

ガソリン予混合圧縮着火燃焼エンジンの  
燃焼状態検出フィードバック制御  
に関する研究

An investigation of combustion detection feedback control  
for homogeneous charge compression ignition engine  
fueled with gasoline

2017年 1月

千葉大学大学院工学研究科  
人工システム科学専攻機械系コース  
緒方 健一郎

(千葉大学学位申請論文)

ガソリン予混合圧縮着火燃焼エンジンの  
燃焼状態検出フィードバック制御  
に関する研究

An investigation of combustion detection feedback control  
for homogeneous charge compression ignition engine  
fueled with gasoline

2017年 1月

千葉大学大学院工学研究科  
人工システム科学専攻機械系コース  
緒方 健一郎

## 目 次

Abstract	4
第1章 序論	5
1.1 本研究の背景	5
1.1.1 規制動向	5
1.1.2 技術動向	14
1.2 従来研究	36
1.3 本研究の目的	52
1.4 本論文の構成	53
第2章 回転変動を用いた燃焼変動検出手法の開発	54
2.1 はじめに	54
2.2 燃焼変動検出コンセプト	56
2.3 回転変動検出手法の検討	58
2.4 実験装置および実験条件	63
2.5 回転変動検出手法の選定	64
2.6 検出精度改善	66
2.7 本章の結論	73
第3章 エンジン振動強度を用いた燃焼騒音検出手法の開発	74
3.1 はじめに	74
3.2 燃焼騒音検出コンセプト	75
3.3 実験装置および実験条件	80
3.4 実験結果	82
3.4.1 燃焼騒音検出コンセプトの精度検証	82
3.4.2 検出手法の高精度化	83
3.5 他機種 HCCI エンジンへの適用	92
3.6 本章の結論	96
第4章 イオン電流信号を用いた NO <sub>x</sub> 推定手法の開発	97
4.1 はじめに	97
4.2 イオン電流センシングコンセプト	98
4.3 実験装置および実験条件	100
4.4 実験結果および考察	102
4.5 本章の結論	109

第 5 章	ガソリン HCCI 耐環境ロバスト制御の構築	110
5.1	はじめに	110
5.2	ガソリン HCCI 耐環境ロバスト制御の体系化	111
5.3	リアルタイムロジックの実装	113
5.4	実験装置および実験条件	118
5.5	燃焼安定化性能検証	120
5.6	本章の結論	123
第 6 章	結論	
6.1	本論文の結論	124
6.2	今後の課題	126
	参考文献	127
	研究業績	155
	謝辞	157

## Abstract

CO<sub>2</sub> regulation (fuel consumption regulation) for automobile will begin for purpose of keeping global environment and utilizing energy effectively.

It is necessary to improve an efficiency of a powertrain of the automobile for achieving CO<sub>2</sub> regulation. Methods of improving the efficiency of the powertrain are to improve a thermal efficiency of internal combustion engine (ICE) and to motorize the powertrain system. Especially, the thermal efficiency of ICE is approximately 30%. Approximately 70% are caused by several losses (pumping loss, cooling loss, exhaust loss, mechanical loss, and unburned loss). A combustion of ICE has to be improved for reducing these losses.

Lean combustion and exhaust gas recirculation combustion (EGR) have been put to practical use as the combustion improvement technologies.

Practical use of homogeneous charge compression ignition (HCCI) is expected as further improvement technology. Because burning velocity of HCCI is very early, HCCI is able to overcome an issue of lean combustion and EGR combustion mentioned above.

However, in-cylinder temperature and pressure have to be controlled, because of occurring abnormal combustion phenomena. Abnormal combustion phenomena are combustion fluctuation, combustion noise, nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) emission.

Therefore, a purpose of this research is to develop feedback control with detecting combustion conditions. Function of detecting combustion conditions and function of controlling combustion conditions based on detecting results are needed to build this feedback control.

In this research, author developed the functions of detection and built feedback control algorithm. A crank angle sensor was used as detection sensor of combustion fluctuation. A knock sensor was used as detection sensor of combustion noise. And an ion current sensor was used as detection sensor of NO<sub>x</sub> emission. Finally, a real time feedback control which applied these detection methods has improved stability of HCCI combustion.

## 第 1 章 序論

### 1.1 本研究の背景

内燃機関(以下、エンジン)が量産化されてから 100 年以上が経過し、エンジンは人類の生活を豊かにする手段として、無くてはならない工業製品となっている。エンジンは、世界各国固有のエネルギー源(例えばガソリン、軽油、アルコール、天然ガス等)に対応しつつ普及、および発展し続けており、高いロバスト性を有する動力源であると言える。この高いロバスト性を有するエンジンは、動力源として自動車に搭載されており、世界の年間新車販売台数 1 億台に迫る自動車産業の有力な動力源である<sup>(1)</sup>。

燃料と空気を用いるエンジンは、動力を取り出す際に混合気を燃焼させるため、動力と同時に環境、および人体に悪影響を及ぼす排気物質(未燃焼炭化水素 HC: Hydro Carbon, 窒素酸化物 NO<sub>x</sub>: Nitrogen Oxides, 一酸化炭素 CO: Carbon Monoxide, 粒子状物質 PM: Particulate Matter)と温室効果ガスである二酸化炭素 CO<sub>2</sub>: Carbon Dioxides, メタン CH<sub>4</sub>, 亜酸化窒素 N<sub>2</sub>O 等を排出する<sup>(2)</sup>。これらの排気物質は環境汚染源となる<sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup>ことから世界各国で排出規制を施行されており、エンジンの技術開発は排気浄化を進めてきた。また、温室効果ガスは地球環境変化に影響すると解釈されており<sup>(6)</sup>、CO<sub>2</sub>規制として自動車からの排出規制が施行される<sup>(7)</sup>。さらには燃料となる化石燃料は有限であることを勘案し、エンジンの高熱効率化も望まれている<sup>(8)</sup>。

以上の自動車用エンジンを取り巻く環境において、排気浄化と温室効果ガス排出量の低減、すなわち高熱効率化が必達の性能であり、今後も継続して進められる規制に対応するエンジンの技術開発が必要である。

#### 1.1.1 規制動向

排気規制の歴史は古く、米国における 1943 年カリフォルニア州ロサンゼルスにおけるスモッグの発生に対応し 1962 年制定されたクランクケース・エミッション規制が始まりである<sup>(9)</sup>。全米では 1963 年に大気浄化法が制定され、その後 1970 年にはマスキー法が制定された。マスキー法は 1975 年型車から HC, CO を 1970 年規制の 10 分の 1 以下とし、かつ 1976 年型車から NO<sub>x</sub> を 1971 年型車平均排出量の 10 分の 1 以下にするものであった<sup>(10)</sup>。欧州では、1970 年に排気規制が開始され、現在の欧州委員会 EC: European Commission が施行する Euro 規制に発展してきた<sup>(11)</sup>。日本では 1967 年に公害対策基本法、1968 年に大気汚染防止法が施行され、自動車の排気中の CO を 3%以下とすることが義務づけられた。その後、1972 年昭和 48 年度排出ガス規制基準、1973 年に昭和 48 年度使用過程車に対する排出ガス規制が施行されている<sup>(12)</sup>。日米欧では上記規制を皮切りに、規制物質の拡大、および規制値を厳格化することで現在至っている。

## (1) 排気規制動向

図 1.1 に 2016 年 5 月現在における各国の排気規制動向を示す。欧州は 1995 年の Euro 1, 1998 年 1 月に Euro 2, 2001 年 1 月に Euro 3, 2005 年 1 月に Euro 4 へと移行し, NEDC: New European Driving Cycle へと評価モードを更新した。2009 年 9 月に Euro 5a, 2011 年 9 月に Euro 5b へと規制を移行し, 2014 年 9 月に現行規制である Euro 6b を施行している。今後 2017 年 9 月に Euro 6d-TEMP (Euro6c 規制値と RDE の組み合わせ規制), 2021 年 1 月に Euro 6d が施行される見通しである。その際の車両性能評価用走行モードは従来の NEDC から WLTC: World harmonized Light duty vehicle Test Cycle, および RDE: Real Drive Emission による評価に移行する<sup>(13)</sup>。北米では EPA, CARB が 1987 年の Tier0, 1994 年 Tier1 規制を施行し, 2000 年に CARB が LEV I を施行した。2004 年には Tier2, LEV II, 続いて 2015 年に CARB が LEV III へと移行した。2017 年には EPA, CARB は規制を調和し, 2025 年までの期間において Tier3, LEV III を施行する<sup>(14)</sup>。日本では 1995 年に大気汚染防止法が改定され 10-15+11 モード走行による規制が開始され, 2000 年に新規制が施行され, 続く 2005 年に強化がなされた。2009 年にはポスト新長期規制が施行され, 10-15+11 モード走行から JC08 モード走行へ更新され現在に至っている<sup>(15)</sup>。今後, 欧州委員会 EC が提案する WLTC モードへの移行が検討されている<sup>(16)</sup>。以上の先進国の排気規制をベースとして, 世界各国の排気規制は設定されている。例えば中国では, 2008 年 3 月に欧州排気規制をベースとする CN 4 が施行され, 2013 年 2 月には CN 5 へと更新された。今後 2019 年には CN 6a, 2023 年には CN 6b が施行される。中国は地域により排気規制が異なるため一例として北京の排気規制について述べる。北京では北京 VI と呼ばれる北米, および欧州の排気規制を組み合わせた排気規制が 2018 年に施行される見込みである。その他の国家で欧州排気規制を踏襲している国は, アルゼンチン, オーストラリア, アイスランド, インド, インドネシア, フィリピン, ロシア, サウジアラビア, 南アフリカ, スイス, タイ, トルコ, ウクライナなどが挙げられる。また北米排気規制を踏襲している国は, 韓国, カナダなどが挙げられる。欧州, および北米の排気規制のどちらかを満足することを規制として設定している国は, ニューージーランド, チリなどが挙げられる。

	1995	2000	2005	2010	2015	2020			
Europe	Euro 1	Euro 2 1998 Jan.	Euro 3 2001 Jan.	Euro 4 2005 Jan. NEDC cycle	Euro 5a 2009 Sep.	Euro 5b 2011 Sep.	Euro 5b 2014 Sep.	Euro 6d-TEMP 2017 Sep.	Euro 6d 2021 Jan.
USA (CARB)	Tier I	LEV I TLEV,LEV,ULEV,ZEV)	LEV II 2004 (LEV,ULEV,SULLEV,PZEV)	LEV III 2015 (2017 EPA Tier3 Harmonized)					
Japan	Standards on 10-13+11 mode cycles	New Short Term Standards 2000	New Short Term Standards 2005	Post New Long Term Standards JC08 mode cycle 2009					
China Beijing				CN4 2008 Mar.	CN5 2013 Feb.	CN6a 2019 WLTP/RDE Beijing VI 2018(Expected)	CN6b 2023		
South Korea		Standards on 2002 Jul. NLEV		KULEV, K-LEVII (LEV,ULEV,SULLEV,ZEV)		Standards on 2016 K-LEVIII			
Brazil				PROCONVE 2012 L5	PROCONVE 2014 L6	PROCONVE 2014 L6	PROCONVE 2014 L7 (Expected)		
Argentina				Euro 4 2009	Euro 5a 2015	Euro 5a 2015			
Australia					Euro 5a 2013 Nov.	Euro 6 2017 Jul.	Tier3 (USA EPA based ) 2017		
Canada									
Iceland	Euro 1	Euro 2 1998 Jan.	Euro 3 2001 Jan.	Euro 4 2005 Jan. NEDC cycle	Euro 5a 2009 Sep.	Euro 5b 2011 Sep.	Euro 5b 2014 Sep.	Euro 6d-TEMP 2017 Sep.	Euro 6d 2021 Jan.
India									
Indonesia				Euro 2 2005 Jan. 2007 Jan. Existing models					
New Zealand							Tier II (Euro 4 option) 2016		
Philippines							Euro 5 2015		
Russia					Euro 3 2008 Jan.	Euro 4 2014 Jan.	Euro 5 2016 Jan.		
Saudi Arabia					Euro 2 2004	Euro 3 TBD			
South Africa					Euro 1 2005 Feb.	Euro 2 2006 Jan.			
Switzerland	Euro 1	Euro 2 1998 Jan.	Euro 3 2001 Jan.	Euro 4 2005 Jan. NEDC cycle	Euro 5a 2009 Sep.	Euro 5b 2011 Sep.	Euro 5b 2014 Sep.	Euro 6d-TEMP 2017 Sep.	Euro 6d 2021 Jan.
Thailand									
Turkey					Euro 3 2001	Euro 4 2008	Euro 5 2011		
Ukraine								Euro 6 2018 (proposal)	
Chile							USA EPA based standards or Euro based standards	Tier 3 (USA EPA based) or Euro 5 2013	

Fig. 1.1 Emission standards for gasoline vehicle (17) (18)

表 1.1 に上記日米欧, その他国別の最新排気規制値をまとめる<sup>(17)(18)</sup>. 日本における 2009 年ポスト新長期規制のガソリン, あるいは LPG: Liquefied Petroleum Gas を燃料とする乗用車に対する規制は, CO=1.150g/km, NMHC: Non Methane Hydro Carbon=0.050g/km, NOx=0.050g/km, PM=0.005g/km である. PM については NOx 吸蔵デバイスを備えた直噴ガソリンエンジンにのみ適用される. 欧州における Euro 6c, Euro6d-TEMP の火花点火エンジン乗用車に対する規制は, THC: Total Hydro Carbon=0.100g/km, NMHC=0.068g/km, NOx=0.060g/km, CO=1.000g/km, PM=0.0045g/km, 粒子状物質個数 PN: Particulate Number = $6.0 \times 10^{11}$  Number/km である. なお, PM, および PN の規制はガソリン直噴エンジンにのみ対象となる. 米国における 2017 年 LEV III の乗用車に対する規制は最も厳しい規制値である SULEV20 で NMOG+NOx=0.020g/mile (0.0125g/km), CO=1.0g/mile(0.625g/km), ホルムアルデヒド=0.004g/mile (0.0025g/km), PM=0.010g/mile(0.00625g/km)となる. また, PM 規制は 3mg/mile の段階的導入に加え, 1mg/mile も段階的に導入される. とりわけ欧州では, 2015 年に発生したデフィートデバイスによる NOx 排出量の実使用環境化での増加問題が発生し<sup>(19)</sup>, RDE の適用が前倒しされることとなった<sup>(20)</sup>. RDE は実使用環境を想定し, 従来のシャシダイナモによる整備された環境下での試験ではなく, 気温, 気圧, 湿度, 高度, 車速, 使用燃料, 走行路のカーブ, および勾配についても含めた走行試験である<sup>(21)</sup>. その詳細内容については未決定な点はあるが, CF: Conformity Factor 値を用い, 同年度排気規制 Euro 6c の規制値に CF を乗じた値を規制値として RDE による測定を行う. 2017 年 Euro 6d-TEMP では CF<sub>NOx</sub>=2.1, 2020 年 Euro 6d では CF<sub>NOx</sub>=1.5 として実使用環境下での性能を満足する必要がある. なお, CF の対象となる排気成分は, 2016 年現在 NOx のみ決定されている<sup>(22)(23)</sup>. しかしながら, 対象成分は HC, CO, CO<sub>2</sub>, PM, PN, CH<sub>4</sub> などへと今後拡大するものと考えられる. とりわけ CF の PN への規制導入に向けた動きがある<sup>(24)</sup>.

Table 1.1 Emission requirements for gasoline engine

**European union Passenger cars**

Standards		Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c/6d
Test cycle		Urban +EUDC	Urban +EUDC	Rev.Urban +EUDC	WLTC +RDE				
HC	g/km			0.20	0.20				
NOx	g/km			0.15	0.08	0.060	0.060	0.060	0.060
HC+NOx	g/km	0.97	0.50	0.70					
CO	g/km	2.72	2.20	2.30	1.00	1.000	1.000	1.000	1.000
THC	g/km					0.100	0.100	0.100	0.100
NMHC	g/km					0.068	0.068	0.068	0.068
PM	mg/km					5.0	4.5	4.5	4.5
PN	N/km							6.0e11	6.0e11
Durability	km	80000	80000	80000	100000	100000	100000	100000	100000

**California Passenger cars**

Standards		LEV II			LEV III					
Category		LEV	ULEV	SULEV	LEV 160	ULEV 125	ULEV 70	ULEV 50	SULEV 30	SULEV 20
Test cycle		LA-4	LA-4	LA-4	LA-4	LA-4	LA-4	LA-4	LA-4	LA-4
NMOG	g/mile	0.090	0.055	0.010						
NOx	g/mile	0.070	0.070	0.020						
CO	g/mile	4.200	2.100	1.000	4.200	2.100	1.700	1.700	1.000	1.000
HCHO	g/mile	0.018	0.011	0.004	0.004					
PM	g/mile		0.010	0.010	0.010 (Alternative standards 0.003 to 0.001)					
NMOG +NOx	g/mile				0.160	0.125	0.070	0.050	0.030	0.020
Durability	mile	15000								

**Japan Passenger cars**

Standards		New short term	New long term	Post new long term
Test cycle		10-15 (11)	Combined mode	JC08
NMHC	g/km	0.080	0.050	0.050
	g/test	(2.2)		
NOx	g/km	0.080	1.150	1.150
	g/test	1.4		
CO	g/km	0.670	0.050	0.050
	g/test	19.0		
PM	g/km			0.005

図 1.2 はガソリンエンジン車に対する PN 規制(欧州 Euro 6d 規制より規制対象物質として開始される)と、同ガソリンエンジン車に対する NMOG: Non Methane Organic Gas と NOx 規制(米国 LEV III 規制値)をまとめたグラフである。PN 規制値は Euro 6b の  $6 \times 10^{12}$  Number/km から Euro 6c, Euro 6d-TEMP で  $6 \times 10^{11}$  Number/km となり 10 分の 1 となる。LEV III は自動車の排気規制をレベリングし, ULEV160, ULEV125, ULEV70, ULEV50, SULEV30, SULEV20 とクラス分類する<sup>(25)</sup>。自動車販売する仕向地の排気規制に個別対応することによる車両開発規模の増大を抑制するため、いずれの規制にも軽微な変更で対応できる様、エンジン開発を進める必要がある。

以上の排気規制動向を鑑みると、エンジンの清浄化は必須であり、今後も継続的な燃焼開発が必要である。

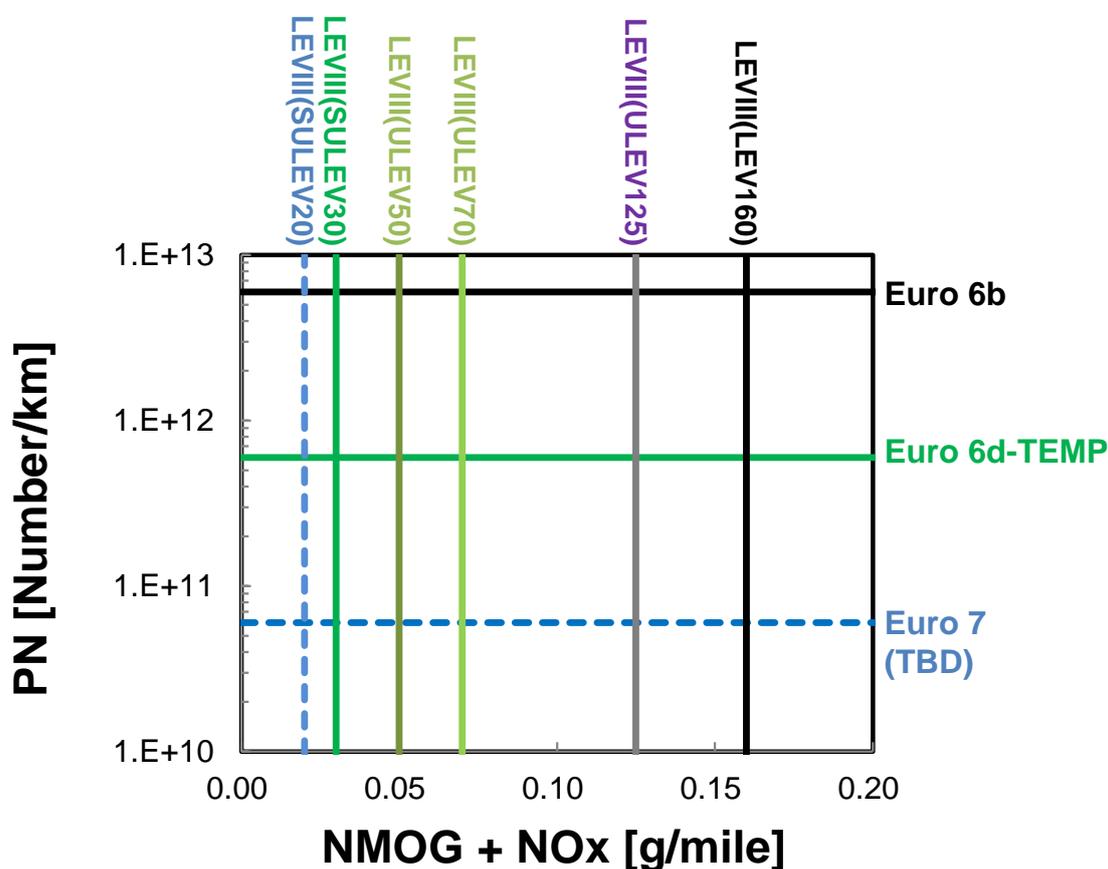


Fig.1.2 Euro 6c, Euro 6d-TEMP PN standard and LEV VIII NMOG+NOx standard <sup>(25)</sup>

## (2) CO<sub>2</sub> 規制動向

CO<sub>2</sub> 規制, および燃費規制は, 達成目標値として各国で設定されている<sup>(26)</sup>. 欧州がグローバルで見ても最も早い年代に, 最も厳しい規制値を設定している. 具体的には 2021 年における 95gCO<sub>2</sub>/km であり, 続く 2025 年に 65~75gCO<sub>2</sub>/km を規制値とする見通しである<sup>(27)</sup>. 米国では 2017 年より段階的に規制値を厳格化する方策を示しており, 2020 年に 182gCO<sub>2</sub>/mile, 2025 年に 143gCO<sub>2</sub>/mile (103gCO<sub>2</sub>/km) を規制値として採用する見通しである<sup>(28)</sup>. 日本では 2020 年に乗用車平均で 20.3 km/liter(105gCO<sub>2</sub>/km) を達成することを目標としている<sup>(29)</sup>. 中国では 2020 年に 117gCO<sub>2</sub>/km とする目標を掲げている<sup>(30)</sup>. インドは 2021 年に 113gCO<sub>2</sub>/km<sup>(31)</sup>, 韓国は 2015 年 153gCO<sub>2</sub>/km<sup>(32)</sup>, メキシコは 2016 年に 153gCO<sub>2</sub>/km<sup>(33)</sup>, ブラジルは 2017 年に 146gCO<sub>2</sub>/km<sup>(34)</sup>, カナダは 2025 年に米国の目標値と合わせた 103gCO<sub>2</sub>/km<sup>(35)</sup> を掲げている. 以上を CO<sub>2</sub> 規制の動向を図 1.3 にまとめる.

以上の様に, グローバルな CO<sub>2</sub> 低減に向けた取り組みは, 自動車に求められる環境性能をさらに高めていくものと考えられる.

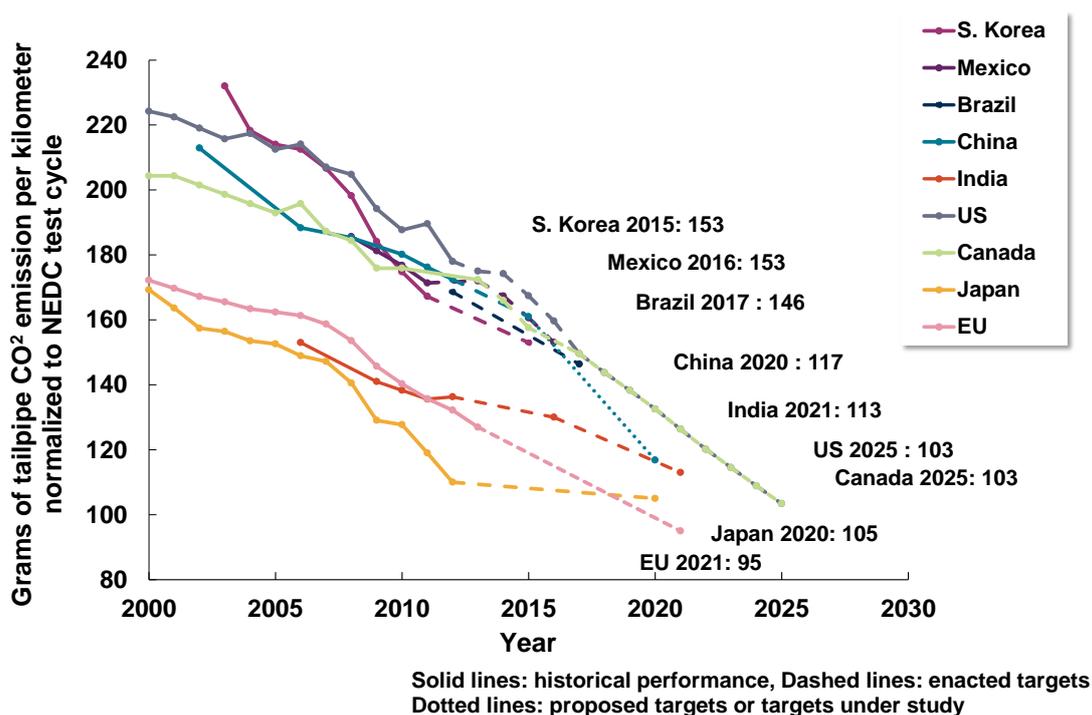


Fig.1.3 CO<sub>2</sub> regulation trend <sup>(36)</sup>

### (3) OBD 規制動向

OBD: On-Board Diagnostics は、米国において 1990 年に施行が開始された車両の自己診断機能である。OBD 普及はグローバルで見て米国での導入が最も進んでいる。1996 年には、より高度化した OBD II へと移行した<sup>(37)</sup>。2017 年に EPA, CARB が排気規制 Tier III, LEV VIII を調和させることに合わせ、OBD についても規制を調和することが発表されている<sup>(38)</sup>。2019 年には新 OBD が施行される予定である<sup>(39)</sup>。欧州も 2001 年に E-OBD を施行し、2005 年 Euro 4, 2008 年 Euro 5, 2014 年 Euro 6 準拠の OBD へと更新している。2017 年には Euro 6-2OBD が施行される予定である。中国では 2013 年に中国全土を対象とした OBD CN4, 同年北京を対象として OBD 5 施行する。インドでは 2013 年に OBD Bhart IV を施行する。ブラジルでは 2012 年に EOBD Euro 4 と同様の OBD PROCONVE P7 を施行することが ICCT: The International Council on Clean Transportation により公表されている<sup>(40)</sup>。日本では 2000 年に OBD が施行され、2010 年に米国、欧州と同様に刷新された OBD を義務付けている<sup>(41)</sup>。

OBD は前記排気規制を基準として性能が悪化した場合、あるいは各種エンジンデバイスが故障した場合などに、車両所有車に異常を知らせる機能を有することが必要であり、今後グローバルに規制の展開が広がるものと考えられる。

	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Europe		2001 EOBD	2005 Euro 4	2008 Euro 5	2014 Euro 6	2017 Euro 6-2
USA (CARB)						2017 OBD II EPA Tier3 Harmonized
USA (EPA)	OBD I	1996 OBDII				2019 OBD II LEV VIII
China					2013 OBD CN4 2013 OBD CN5 (Beijing)	
India					2013 OBD Bhart IV	
Brazil					2012 OBD PROCONVE P7 (Euro 4 similar)	
Japan		2000 JOBD		2010 JOBD revise		

Fig.1.4 OBD standard

#### (4) 将来規制の見通し

前節までに述べた様に、2025年を見越した排気規制、およびCO<sub>2</sub>規制については決定しつつある。しかしながら、今後地球上の人口は2050年に100億に迫る勢いで増加を続けることが国連 United Nations により発表されている（図 1.5）。人口増加が見込まれるアジア諸国、アフリカといった地域が、将来の自動車市場として活性化することが予測されることから、全世界における自動車販売台数は増加し続けると予測される。したがって、地球環境保全の観点で、自動車に対するさらなる規制が適用されることが想定される。具体的にはHC、CO、NO<sub>x</sub>などの環境汚染物質と人体に有害と考えられているPM、PN、アルデヒド、そして温室効果を有するCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、亜酸化窒素N<sub>2</sub>Oなどの規制値厳格化と、規制対象物質の拡大が見込まれる。これらの自動車からの排気物質は、エンジン内部の燃焼によって生成されており、将来規制対応に向けてエンジンの燃焼技術の改善、車両全体で見た効率の向上が必要不可欠と考えられる。

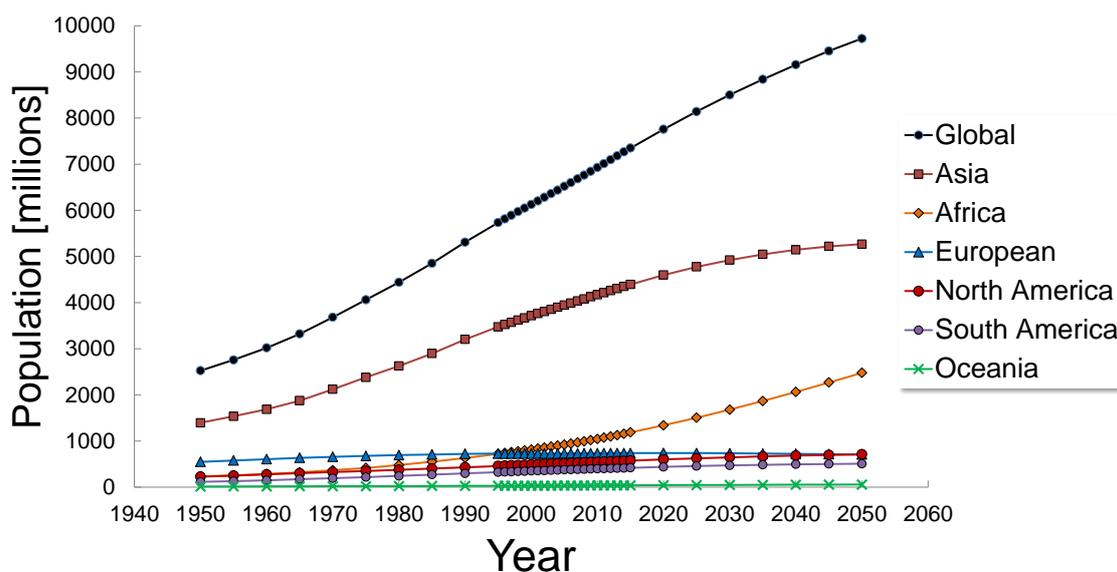


Fig.1.5 Global population trend <sup>(42)</sup>

### 1.1.2 技術動向

厳格化する排気規制，CO<sub>2</sub>規制に対応するために，エンジンから排出される排気の清浄化と車両の燃費低減が解決すべき課題である．この課題に対し，前者排気浄化技術としては，エンジン燃焼の改善によるアプローチと排気後処理によるアプローチがある．後者CO<sub>2</sub>低減技術としては，車両面からのアプローチ，使用燃料の多様化によるアプローチ，ドライブトレイン面からのアプローチ，電動化によるアプローチ，パワートレイン面からのアプローチなど，車両効率を向上させるため多くの技術が開発されている．

以下節にて技術動向の詳細を述べる．

#### (1) 排気浄化技術

排気成分においてHC，CO，NO<sub>x</sub>などは，現在のガソリンエンジンにおいては排気後処理である三元触媒とエンジン燃焼の空燃費 A/F: Air by fuel ratio の量論比化(以下，ストイキ)により浄化されている<sup>(43)</sup>．三元触媒はライトオフ温度と呼ばれる温度域に加熱されることで，浄化率を約99.9%まで高められることが知られている<sup>(44)</sup>．また，車両減速時にエンジンではCO<sub>2</sub>低減のため燃料カット制御を実施しているため，酸素過剰な排気が三元触媒に流れ込み，触媒では酸素過剰な状態となる．そのため燃料再噴射，つまり燃料カトリカバ制御の直後にストイキ燃焼の排気が流れ込ませた場合，NO<sub>x</sub>スリップによるNO<sub>x</sub>排出量増加が発生する．そこで燃料カトリカバ時は酸化剤を多く共有するリッチ燃焼を行う方法が行われている<sup>(45)</sup>．さらに，触媒がライトオフするまでは浄化率が低いことから，低温状態でのエンジン始動において，そのほとんどを排出する<sup>(46)</sup>．したがって，触媒暖機制御と呼ばれる排気温度上昇を行う．具体的には，直噴エンジンでは圧縮行程において燃料噴射を行い，点火プラグ周りにリッチな混合気を形成する．形成手段としてウォールガイド，エアガイド，スプレーガイドといったコンセプトが提案されている．例えばウォールガイドは，図6に示す様にピストン冠面形状に窪み(キャビティ)を持たせ，キャビティ内部に燃料噴霧を噴射することで，リッチな混合気を保持する．これにより圧縮上死点以降に点火時期を設定しても燃焼安定性が担保でき，燃焼位相をリタードすることで排気温度を高めることができる<sup>(47)</sup>．図1.6はマツダが提案するコンセプトであり，極端に冠面中央に窪みを持たせるバスタブ型冠面形状を用いている．

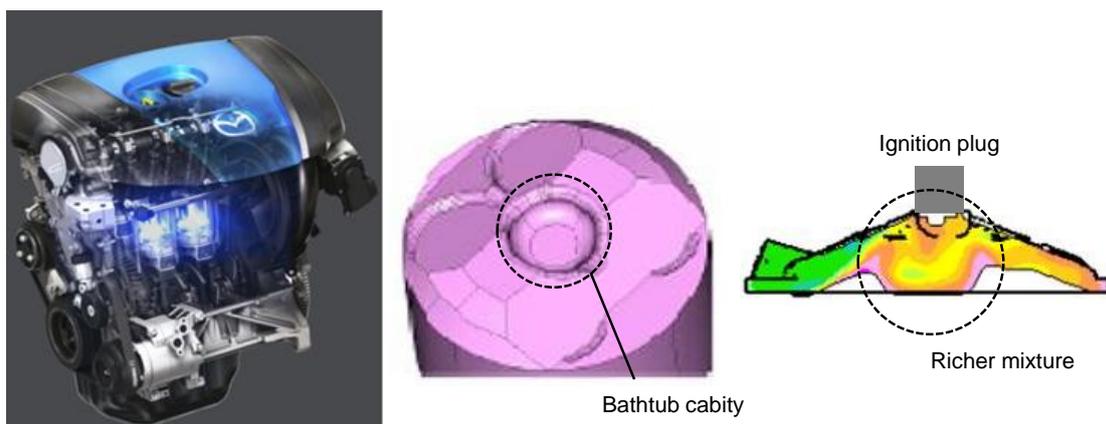


Fig.1.6 Stratified mixture formation control using wall guide <sup>(47)</sup> (Mazda)

図 1.7 は日産自動車のウォールガイドコンセプトの一例である。前述のマツダと同様にインジェクタはサイドマウント方式であり、ピストン冠面形状は浅皿キャビティを有している。圧縮行程中の燃料噴射時は、浅皿キャビティ内部に燃料噴霧を噴き入れる。キャビティ内部の燃料噴霧はキャビティの形状に沿って撒き上がり、点火プラグへと流されることでプラグ周りリッチ混合気の形成を行っている<sup>(48)</sup>。

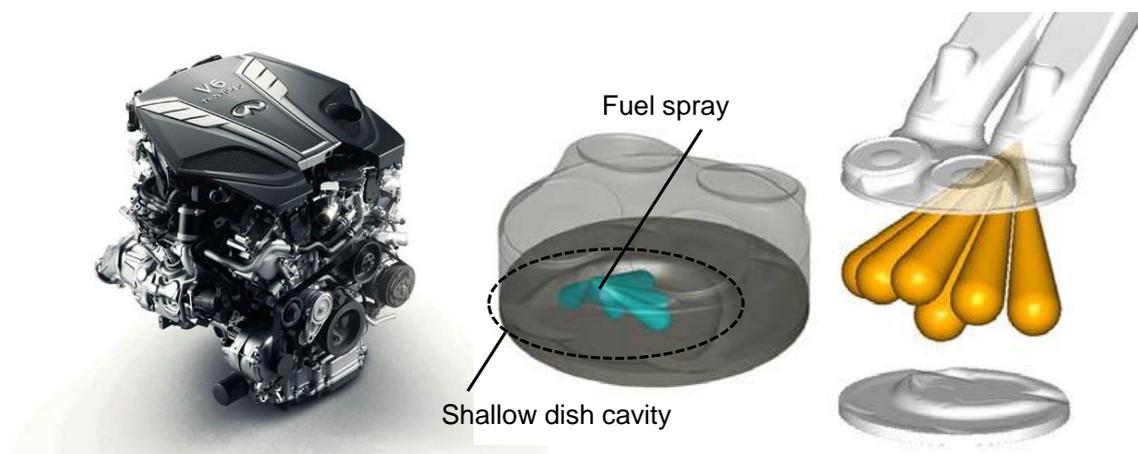


Fig.1.7 Stratified mixture formation control using wall guide <sup>(48)</sup> (Nissan)

図 1.8 は本田自動車のウォールガイドコンセプトの一例である。インジェクタはサイドマウント方式であり、ピストン冠面形状は前述の日産自動車に対して浅皿部を拡大したキャビティを有している。圧縮行程中の燃料噴射時は浅皿キャビティ内部に燃料噴霧を噴き入れ、キャビティ内部の燃料噴霧はキャビティの形状に沿って撒き上がり、点火プラグへと流されることでプラグ周りリッチ混合気の形成を行っている<sup>(49)</sup>。



Fig.1.8 Stratified mixture formation control using wall guide <sup>(49)</sup> (Honda)

図 1.9 はルノーのウォールガイドコンセプトの例である。同じくサイドマウントインジェクタ方式であり、ピストン冠面形状は前述の日産自動車に近い浅皿キャビティを有している。圧縮行程中の燃料噴射時は浅皿キャビティ内部に燃料噴霧を噴き入れ、キャビティ内部の燃料噴霧はキャビティの形状に沿って撒き上がることを狙っている<sup>(50)</sup>。



Fig.1.9 Stratified mixture formation control using wall guide <sup>(50)</sup> (Renault)

次にエアガイドの一例として、フォルクスワーゲンのコンセプトを図 1.10 に示す。エアガイドコンセプトはピストン冠面形状がほぼフラットであり、燃料噴霧を冠面に沿ってガイドするウォールガイドコンセプトとは異なる。このコンセプトは強い空気流動を実現可能なエンジンで適用されており、圧縮行程中の燃料噴霧はこの強い空気流動により点火プラグ方向へと流されていると考えられる。さらに燃料噴霧自体の貫徹力が弱く、かつ燃料気化も充分に行われる必要があるため、当該エンジンでは燃料噴射圧力 35MPa を採用している<sup>(51)</sup>。

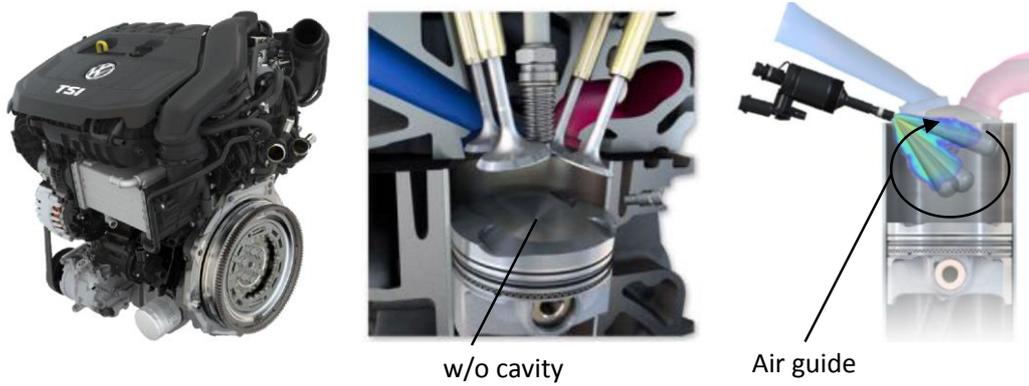


Fig.1.10 Stratified mixture formation control using air guide <sup>(51)</sup>  
(Volkswagen)

次にスプレイガイドの一例として、ダイムラ、アウディ、ポルシェのコンセプトを図 1.11, 1.12, 1.13, 1.14 に示す。スプレイガイドコンセプトはピストン冠面形状によらずセンタマウントインジェクタと点火プラグのレイアウトで実現される。点火プラグ周りのリッチ混合気配置はこのセンタマウントインジェクタの圧縮行程中の燃料噴射によって行われる。図 1.11 に示すダイムラのスプレイガイドコンセプトはピエゾインジェクタを用いており、ソレノイドインジェクタに対して微少な噴射量制御が可能である。これにより触媒暖機運転時の制御を行っている。



Fig.1.11 Stratified mixture formation control using spray guide <sup>(52)</sup> (Daimler)

図 1.12, 1.13, 1.14 に示すアウディとポルシェのスプレイガイドコンセプトは何れもセンタマウントインジェクタレイアウトにおいてソレノイドインジェクタを用いている。前述のダイムラに対して微少量噴射制御が課題となるが、ソレノイドインジェクタのインジェクタ内部可動弁制御を行うことで微少噴射量を実現していると述べている。また、プラグ周りリッチ混合気形成にピストン冠面形状が依存しないため、触媒暖機運転以外のエンジン動作を考慮しキャビティ無しのフラット形状を採用していると考えられる。

以上の例の様な燃焼制御を行うことで三元触媒マネジメントを実現し排気浄化性能を得ている。



Fig.1.12 Stratified mixture formation control using spray guide <sup>(53)</sup> (Audi)

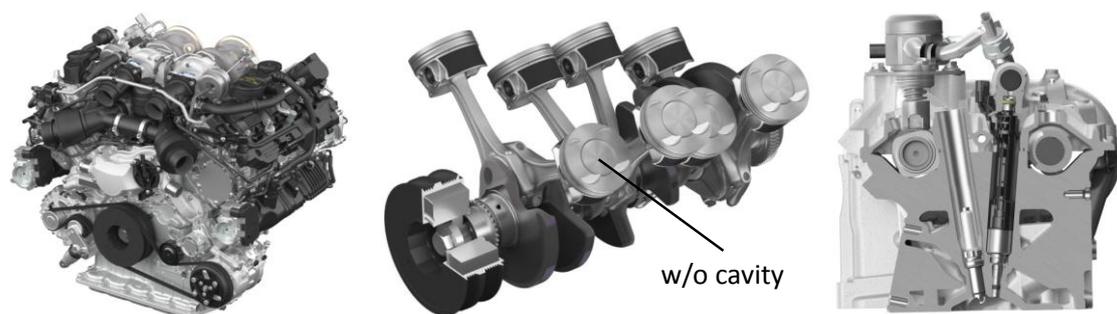


Fig.1.13 Stratified mixture formation control using spray guide <sup>(54)</sup> (Porsche)



Fig.1.14 Stratified mixture formation control using spray guide <sup>(55)</sup> (Porsche)

一方で、前述の様にガソリンエンジンへの PM/PN 規制が開始され、上記触媒暖機制御時において PM/PN が多く排出されることが課題となっている<sup>(56)(57)</sup>。したがって、エンジン燃焼の改善によるアプローチと排気後処理によるアプローチの必要性が高まってきている。PM/PN は神本らの研究により、当量比と温度により生成量が増加する領域があることが明らかとなっている<sup>(58)</sup> (図 1.15)。

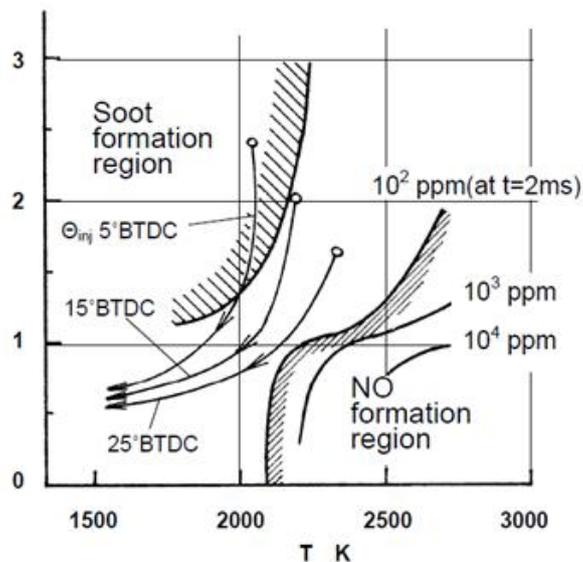


Fig.1.15 Equivalent ratio and temperature map (Kamimoto-map) <sup>(58)</sup>

とりわけリッチ当量比、かつ低温燃焼となると PM/PN 生成量は増加する。これは、エンジンの燃焼室内においては壁面(燃焼室、ピストン冠面、シリンダ、吸排バルブなど)への燃料付着と、気化燃料と空気の混合不均一による過濃リッチ混合気の2つの因子によって引き起こされている(図 1.16) <sup>(59)(60)</sup>。

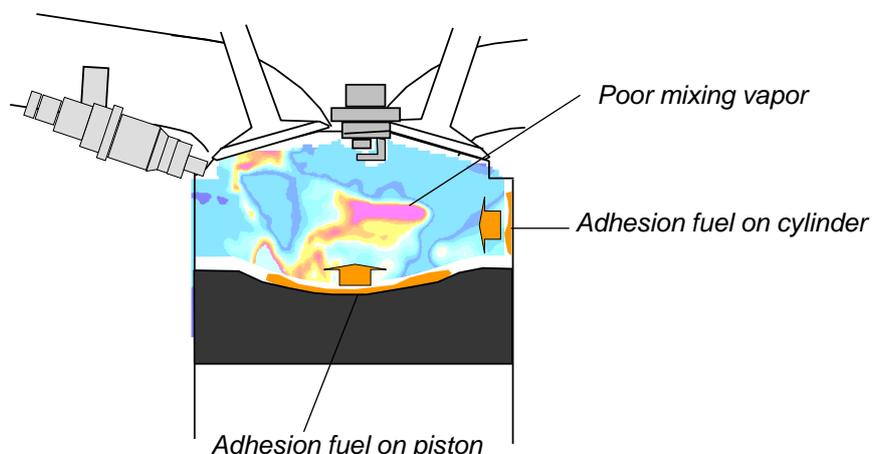


Fig.1.16 PM/PN formation mechanism <sup>(59)</sup>

このメカニズムに基づき、上記触媒暖機制御時の圧縮行程噴射はピストン冠面へ燃料が付着し易く PM/PN が増加すると解釈されている。そこで燃焼の改善によるアプローチとして、燃料噴射圧力の高圧化<sup>(61)(62)(63)</sup>、圧縮行程噴射の少量化<sup>(52)(53)(54)</sup>とこれに伴う点火ロバスト性悪化を担保する点火エネルギーの増加<sup>(64)</sup>といった燃焼の改善技術が開発されている。一方で PM/PN に対する後処理技術としては GPF: Gasoline Particulate Filter が挙げられる。従来ディーゼルエンジン車で広く普及してきた Particulate Filter であったが、ガソリンエンジンへの適用拡大の可能性が高まりつつある。GPF 開発メーカーとしては NGK<sup>(65)</sup>、DOW<sup>(66)(67)</sup>が一例であるが、GPF の課題として、トラップ PM を酸化させる浄化制御と排圧上昇によるエンジン燃焼への悪影響が挙げられるが、この課題に対する開発が推進されてきた結果、ガソリンエンジンの高い排気温度によって自己浄化が可能であることと、内部構造最適化によって排圧上昇も最低限に抑えることが可能となってきた。また、欧州委員会 EC においても GPF 適用による環境への影響とコストベネフィットを詳細に分析した結果を公開しており(2011 年公開)、GPF 適用によりガソリン DI エンジン搭載車から排出される 2030 年までの PM/PN 排出量を 79%削減できるとしている。また GPF 量産適用による車両価格上昇分は、小型乗用車で 62~85€, 中型乗用車で 75~108€, 普通乗用車で 87~131€であること、車両重量増加代とそれによる燃費悪化に伴う燃料費増加などを定量化し、GPF が環境負荷低減と自動車所有者の費用面で量産化価値があることが提唱されている<sup>(68)</sup>。2016 年時点ではメルセデス社 S600<sup>(69)</sup>のみが量産化している(図 1.17)が、RDE 規制において CF<sub>PN</sub> が策定される可能性があるため、実使用環境での PM/PN 排出量抑制のため GPF の普及が進むと予測される。

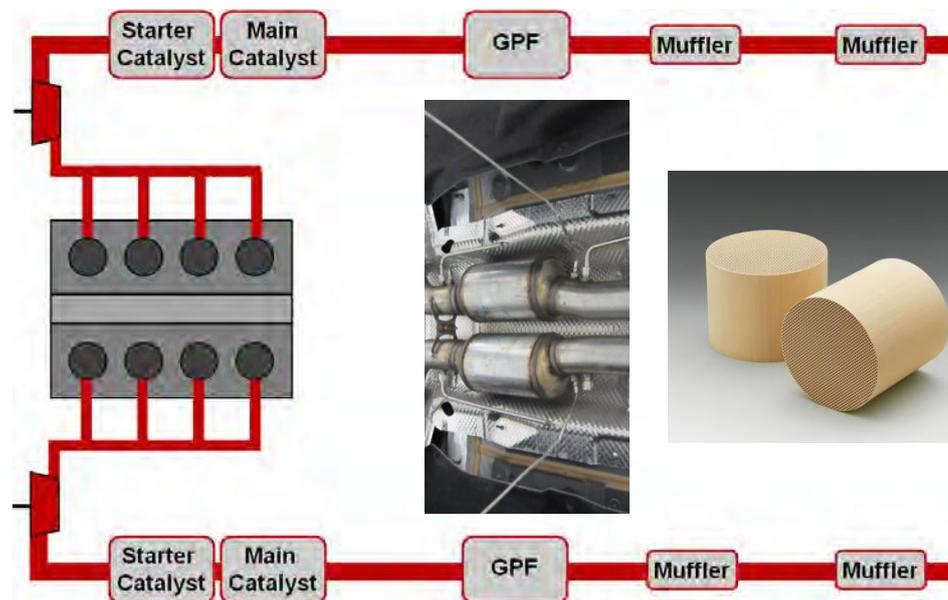


Fig.1.17 GPF equipment <sup>(69)</sup>

以上の排気浄化技術をまとめると、排気浄化技術として、三元触媒とストイキ燃焼制御、触媒暖機制御、および高均質な混合気形成と壁面への燃料付着抑制を両立する燃焼制御が現在の排気規制を達成するコア技術と言える。また後処理装置についても GPF などの新規システムの検討が進められている。

## (2) CO<sub>2</sub>低減技術

車両面からのアプローチとしては、車両の軽量化、空力特性の改善、ドライバーへの省エネルギー運転補助といった技術が開発、および量産化されている。車両の軽量化技術としてはアルミボディの採用<sup>(70)</sup>、カーボンファイバプラットフォーム<sup>(71)</sup>、そして各種ハードウェアの軽量化<sup>(72)(73)</sup>を積み上げることで実現している。

空力特性改善技術としては、トヨタ社のプリウスに代表される様に整流機能を有する車両外装設計がなされている<sup>(74)</sup>。ドライバーへの省エネルギー運転補助としては運転席メータにエコディスプレイを表示する<sup>(75)(76)</sup>、あるいは色調変化などによってドライバーに省エネルギー運転状態を視覚的に伝達し<sup>(77)</sup>、各ドライバーの力量のばらつきによる燃費のばらつきを抑制することを促している。

使用燃料の多様化は、先進国で多く使用されるガソリンへのバイオエタノールの混合、圧縮天然ガス CNG: Compressed Natural Gas<sup>(78)(79)</sup>、LPG: Liquefied Petroleum Gas<sup>(80)(81)</sup>、ブラジルで主に用いられるエタノール E100<sup>(82)</sup>、または高オクタン化燃料である水素<sup>(83)(84)(85)(86)</sup>、ジメチルフラン<sup>(87)</sup>などが挙げられる。また軽油の代替燃料としてバイオディーゼル燃料 BDF: Bio Diesel Fuel<sup>(88)</sup>や DME: Dimethyl Ether<sup>(89)(90)</sup>といった燃料を使用することもある。上記燃料は従来のガソリン、軽油に対し Well to Wheel CO<sub>2</sub>排出量を削減できる可能性があるため、世界各国の燃料事情に適応する様に採用されている。近年では CNG 普及に向けた開発動向が活発に行われており、とりわけ欧州カーメカによる提案が多数ある<sup>(91)(92)</sup>。

ドライブトレイン面からのアプローチとしては、オートマニュアルトランスミッション AT: Automatic Transmission の変速段多段化<sup>(93)</sup>、CVT: Continuously Variable Transmission の変速比幅のワイド化<sup>(94)</sup>、乾式クラッチを用いたマニュアルトランスミッション MT: Manual Transmission の発展系である自動 MT<sup>(95)</sup>、デュアル乾式クラッチによる DCT: Dual Clutch Transmission<sup>(96)</sup>などが開発されている。将来技術としては IVT: Infinity Variable Transmission が開発されている<sup>(97)</sup>。さらに近年においてはフライホイールの慣性モーメントを可変とする可変フライホイールが量産化されている<sup>(98)</sup>。またタイヤについても低転がり抵抗化が継続的に行われている<sup>(99)</sup>。動力伝達を担うドライブトレインは、従来パワートレインの高効率運転を補助する位置付けであったが、現在ドライブトレインは後述する電動化と複合し、車両効率向上に向けて非常に重要なアプローチとなっている<sup>(100)</sup>。

電動化によるアプローチとしてはコンベンショナルエンジン車にモータ、インバータ、バッテリーを組み合わせたハイブリッドシステムがある。シリーズハイブリッド、パラレルハイブリッドといった方式が採用されているが<sup>(101)</sup>、近年は搭載するエンジン出力を上回る出力を有するモータを搭載するシステムに代表される様なストロングハイブリッドシステムも量産化されつつある<sup>(102)</sup>。ハイブリッドシステムが車両効率を改善することは周知となっているもののコスト対効果の面で全車適用に至ってはいない。世界で広く普及している鉛蓄電池を搭載する車両は 12V、あるいは 6V である。この低電圧電力系統においては、電

動化していくことが可能な機能として、エンジンの冷却水ポンプ、ドライブトレインの油圧ポンプ、ブレーキの負圧、空調用エアコンプレッサなどが挙げられる。従来、これらの動力はエンジン出力から取り出されていたため、エンジンの機械損失の一部として取り扱われてきた側面がある。しかしながら電動化が進むにつれ、電力系統から出力を賄うことができる様になり、車両効率向上に対して最適な制御が可能となりつつある。現在電動冷却水ポンプ<sup>(103)</sup>、ドライブトレインの電動油圧ポンプ<sup>(104)</sup>、電動ブレーキブースタ<sup>(105)</sup>、電動ブレーキ<sup>(106)</sup>、空調用電動コンプレッサ<sup>(107)</sup>などが量産化されている。一方で、欧州では2016年に48Vハイブリッドシステムの量産を開始する<sup>(108)</sup>。日本カーメーカは200V~400V程度の高電圧電力系統を用いていることに対して、比較的低電圧なハイブリッドシステムである。48Vハイブリッドシステムの電力使用ハードウェアは各カーメーカで異なるものの、主に高い電力消費を要求するハードウェアを追加することに使用されている。図1.18, 1.19に示すようにアウディはディーゼルエンジン車へ適用し、電動スーパーチャージャ<sup>(109)</sup>による過給によりエンジンの燃焼を改善する。さらに車両の操縦安定性に寄与するスタビライザのアクチュエーションを行う<sup>(110)</sup>。



Fig.1.18 Electric supercharger <sup>(109)</sup> (Valeo)

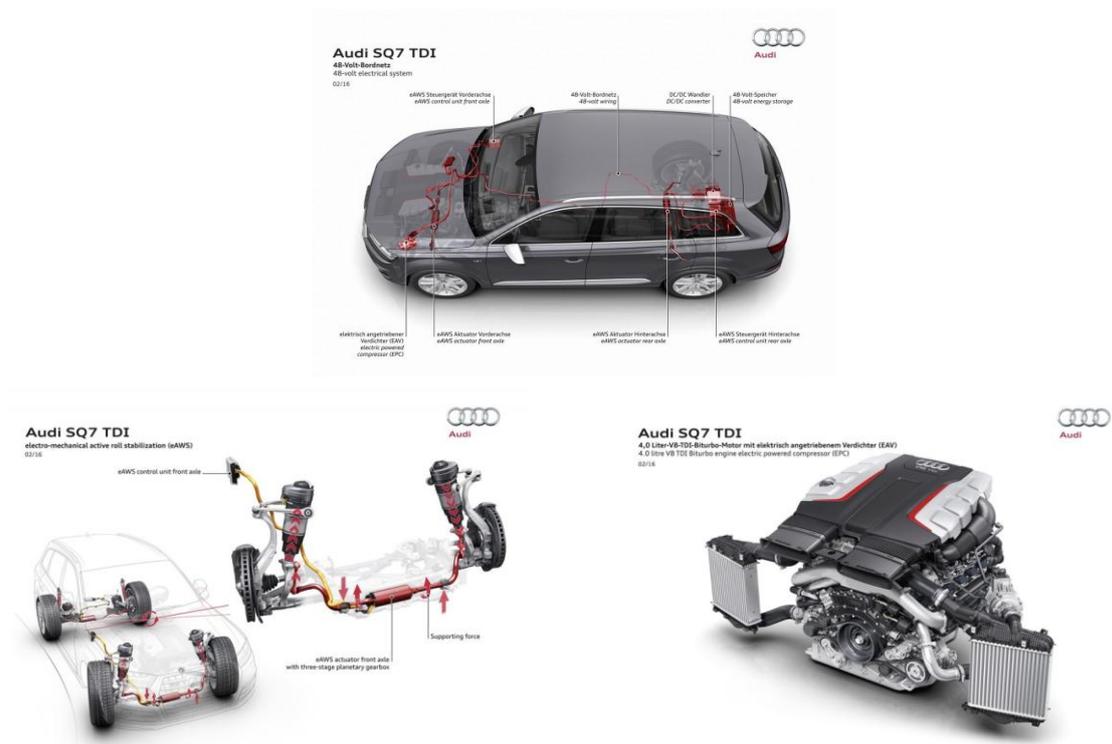


Fig.1.19 48V hybrid system <sup>(110)</sup> (Audi)

またガソリン車への適用時には三元触媒の早期活性化のため触媒ヒータを搭載する情報もある<sup>(111)</sup>.



Fig. 1.20 Electrically heated catalyst <sup>(111)</sup> (Continental: The EMITEC®)

48V ハイブリッドシステムは、電力系統の電流を 12V 電力系統より低減できるため、配線径を小径化でき配線重量の低減と配線抵抗の低減を得られるメリットがある。また車両減速時の回生に関しても、ストロングハイブリッドには及ばないものの回生量を増加できることも報告されている<sup>(112)(113)</sup>。今後欧州カーメーカの提案する 48V ハイブリッドシステム

と、日米カーメーカーが提案するストロングハイブリッドの2極化が進むと共に、図 1.21 の様に市場によってハイブリッドシステムが異なる中<sup>(114)</sup>で車両の電動化が加速するものと推測される。

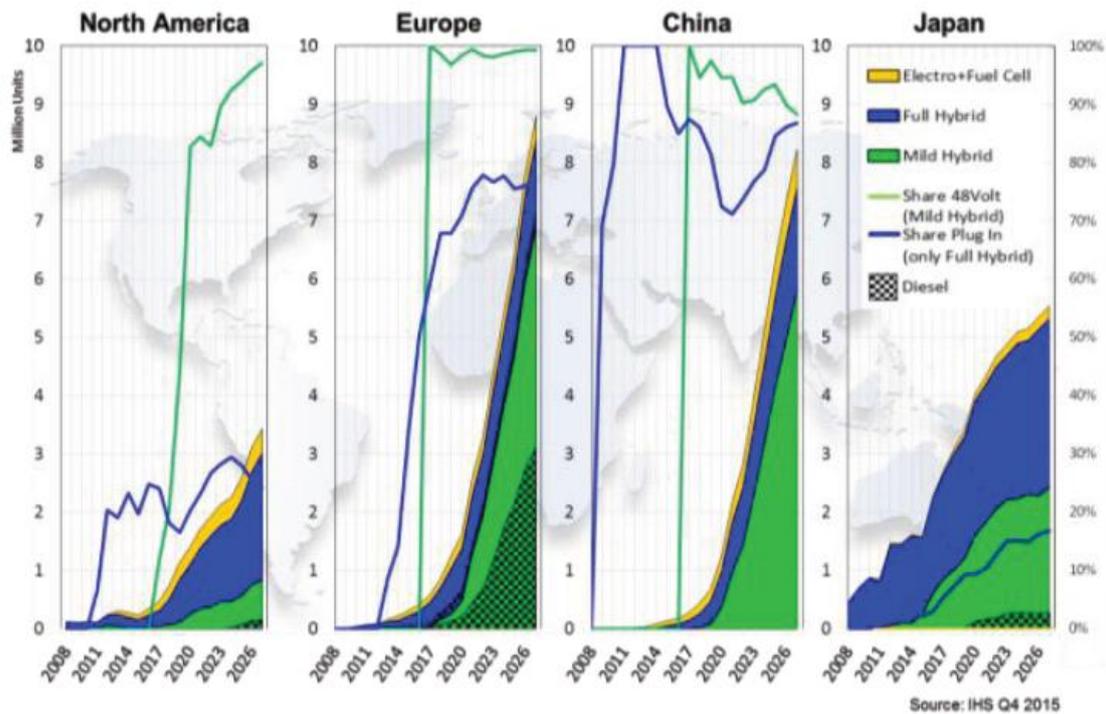


Fig.1.21 Local production volumes of hybrid systems <sup>(114)</sup>

以上の車両効率向上に向けた技術開発が進められる中において、パワートレインに求められる性能は、エンジンの正味熱効率向上である。図 1.22 に示す様に、正味仕事は供給熱量から機械損失分の仕事、冷却損失分の仕事、排気損失分の仕事、ポンピング損失分の仕事、未燃焼損失分の仕事を差し引いた値であり、当該正味仕事を供給熱量で除した値が正味熱効率となる。これら各種損失を低減することがエンジンの正味熱効率向上には必須である。

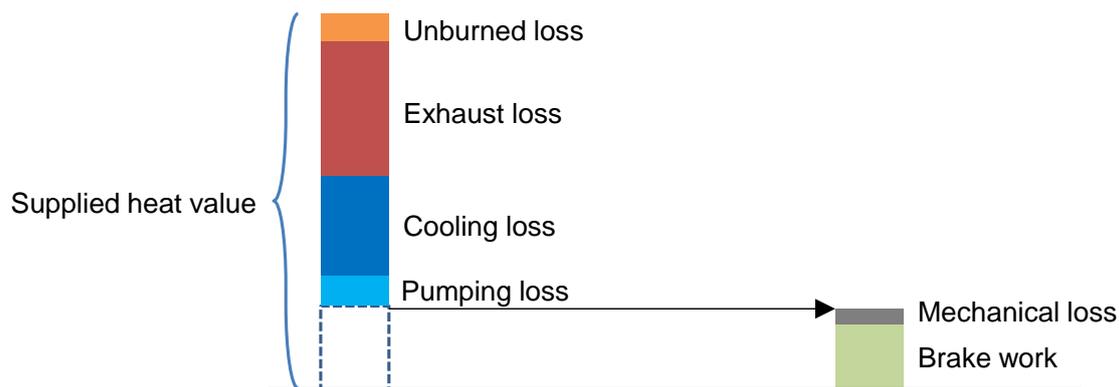


Fig.1.22 Schematic of heat balance of internal combustion engine

これらの損失を低減する手段は、図 1.23 の様にまとめられる。

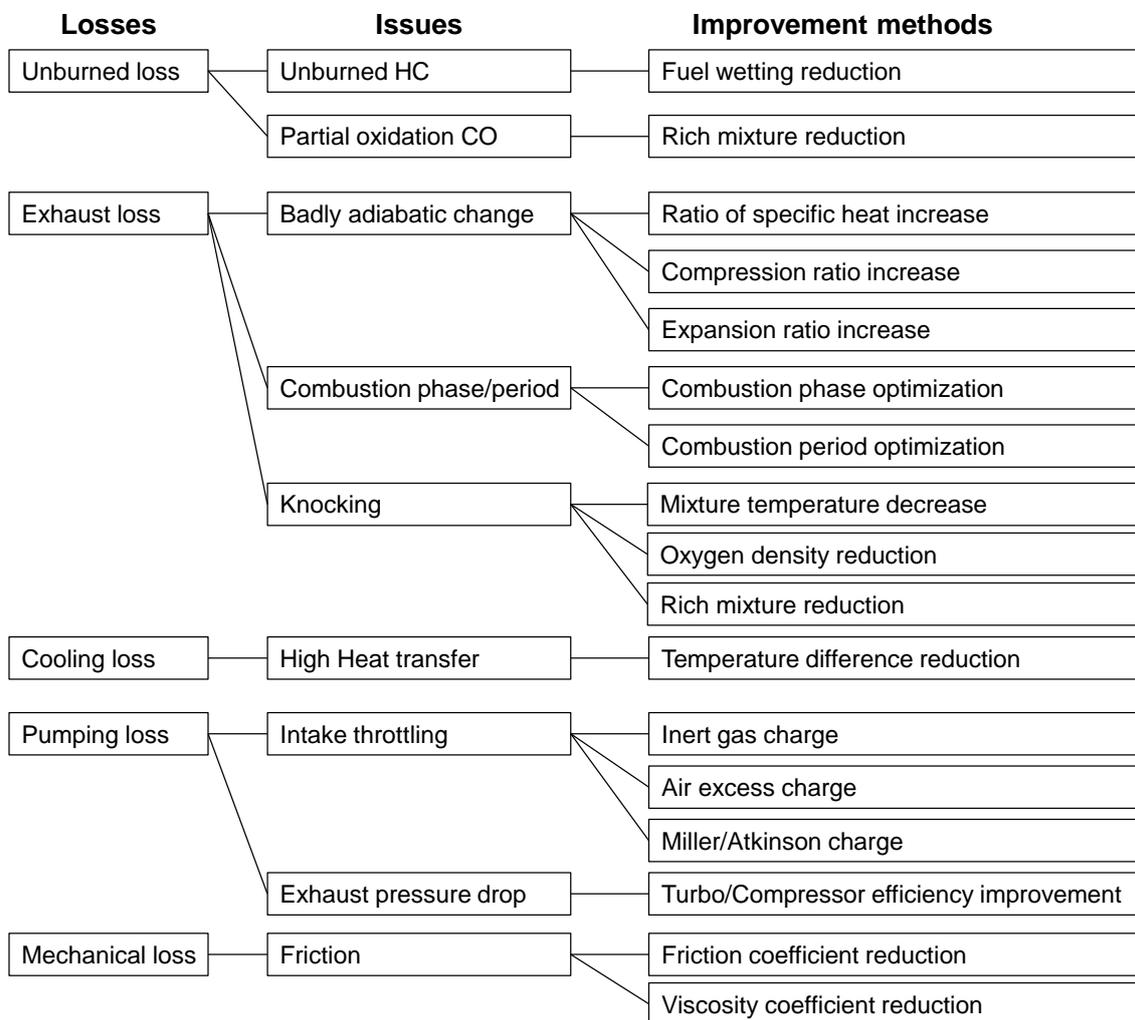


Fig.1.23 Strategy for reduction of losses

未燃焼損失は未燃焼 HC と部分酸化した CO の熱量であり，未燃焼 HC の低減には壁面に付着する燃料を低減する方策があり，CO は酸素不足のリッチ混合気において発生することからより空気と燃料を混合する，すなわち均質度を向上することが方策となる．助川らは冷機時の燃料が壁面に付着することにより発生する HC 低減を課題に置き，非対称噴霧パターンとステップ付きピストンを適用し HC を低減できることを報告している<sup>(115)</sup>．

排気損失はオットーサイクルの理論熱効率<sup>(116)</sup>から示される様に，断熱変化時の温度変化減少によって増加する．したがって，比熱比の増加と圧縮比，膨張比の増加によって改善する方策がある．秋久らは圧縮比と膨張比の最適化を検討した<sup>(117)</sup>．また，直江らは天然ガスを燃料とするコージェネレーション定置式エンジンの開発において圧縮比と膨張比の最適化によって圧縮比 12.2 と膨張比 17.6 の組合せを提唱し量産化(図 1.24)を果たしている<sup>(118)(119)(120)(121)</sup>．

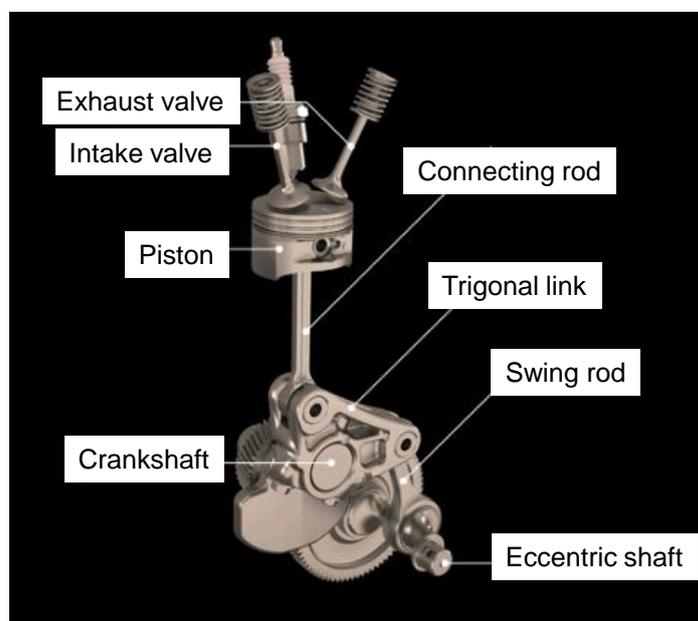


Fig.1.24 EXlink engine <sup>(122)</sup> (Honda)

燃焼位相，燃焼期間が不適切であっても排気損失は増加するため，燃焼位相，燃焼期間を最適化する方策がある．さらにノッキングの発生によるエンジン破損を回避するために燃焼位相をリタードする場合がある．これは上述の燃焼位相を最適設定できない主要因である．ノッキングの発生時期は Livengood-Wu 積分値により現象を支配する因子が着火遅れ時間であると理解されている<sup>(123)</sup>．着火遅れ時間はアレニウスの式により得る燃料物性依存の値であり，温度，圧力，当量比，酸素濃度に依存して変化する<sup>(124)</sup>．とりわけ高温，高圧，過濃混合気，高酸素濃度場において着火遅れ時間は短縮するため，その逆数を積分する Livengood-Wu 積分値は短時間で増加する．この結果，ノッキングし易くなることを示している．ノッキングの抑制には着火遅れ時間を延長する必要があると考えられ，混合気温

度を低減する，酸素濃度を低減する混合気下において，過濃混合気を存在させない方策が有効と考えられる．混合気温度を低減手段としては，水冷インタークーラ，クールド EGR，水噴射などが近年報告されている．水冷インタークーラは近年量産化が推進されている<sup>(125)(126)</sup>．Wagner らは水冷インタークーラをインテークマニホールドにインテグレートすることで吸気温度制御を実現している<sup>(127)</sup>．クールド EGR がノッキングの抑制効果を有することは多くの研究報告により明らかとなっている<sup>(128)(129)</sup>．しかしながら，さらなる燃焼安定性の確立とエンジン運転の過渡状態における EGR ガス制御確立にはさらなる開発が必要である．水噴射は 2016 現在，クローズドコース走行車への適用された(図 1.25)<sup>(130)</sup>．図 1.26 に示す様に，ボッシュより燃焼面からは水インジェクタのレイアウトの最適化，および水と燃料の比率最適化が報告されており<sup>(131)</sup>，車載システム構築が完了し社会インフラの受け入れがなされた段階で，広く普及するポテンシャルがあると考えられる．



Fig.1.25 Water injection safety car <sup>(130)</sup> (BMW)

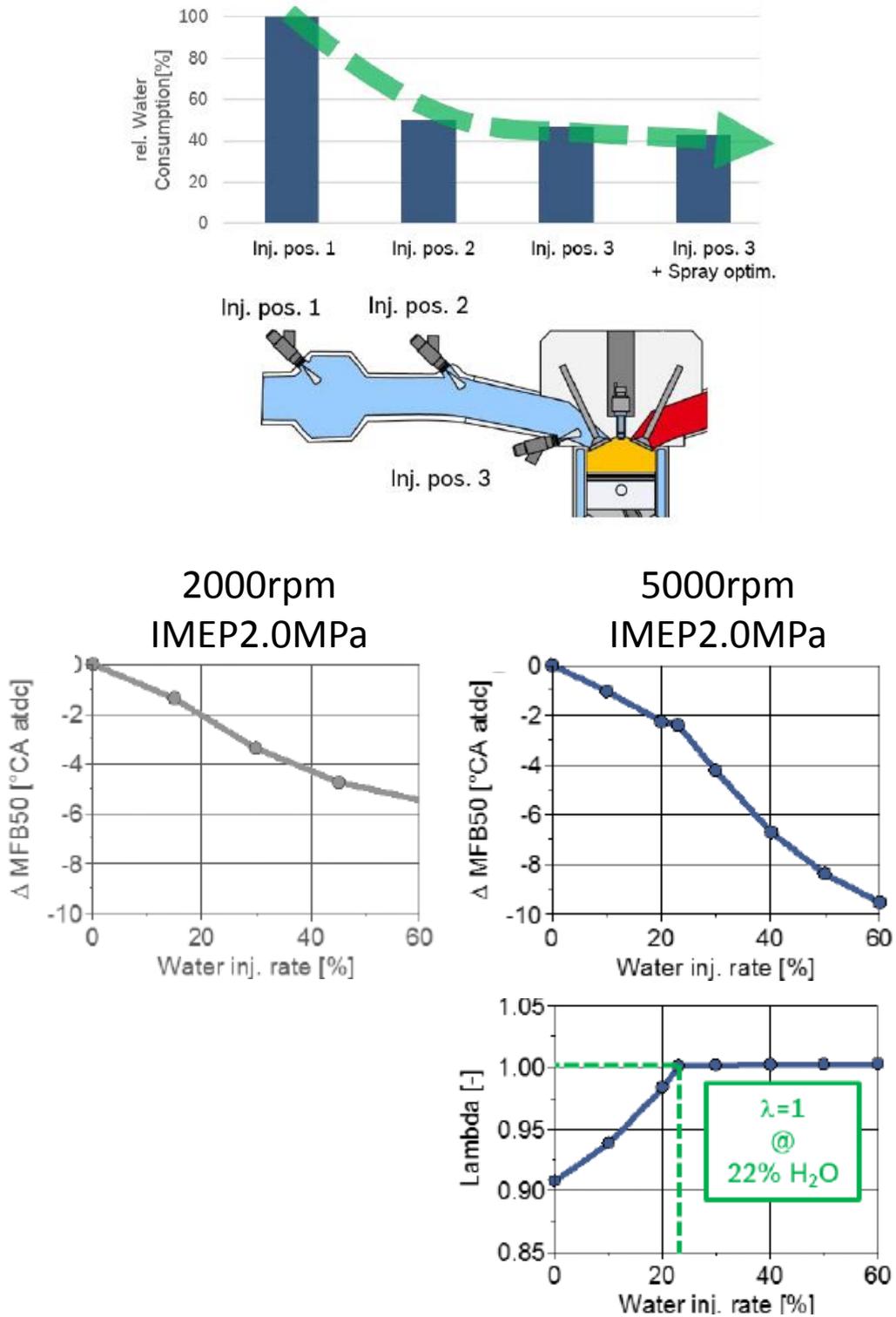


Fig.1.26 Water injection strategy <sup>(131)</sup> (Bosch)

冷却損失は混合気から燃焼室壁面に向かって逃げる熱量と解釈され、吸気、圧縮、膨張、排気工程において膨張行程中の混合気温度が高いことから、主に膨張行程において壁面に熱が逃げる<sup>(132)</sup>。これは混合気温度と壁面温度の差が大きくなることで熱流速が増加するために発生する。したがって、混合気と壁面温度の差異を低減していく方策が考えられる。温度差を低減するためには混合気温度を低下させるか壁面温度を上昇させるかの二つの手段があるが、混合気温度の低減策としては空気過剰率、EGR 率を増加させ混合気の熱容量を増加させることで膨張行程中の混合気温度を低減することができる。近年ではピストン冠面に膜処理を施し、膜温度を混合気に追従させることで熱流速を低減する研究開発が行われている。従来の鉄、アルミニウム冠面では、大きな定容比熱、かつ高熱伝導率材料であるため冠面温度はサイクル中に大きく変動することは無いが、低定容比熱、低熱伝導率材料膜を冠面に施すことで熱流速を低減し、冷却損失を低減できる<sup>(133)(134)(135)(136)</sup>とする報告もある(図 1.27)。



Fig.1.27 TSWIN<sup>(137)</sup> (Toyota)

次に、ポンピング損失は  $p-v$  線図で描かれる膨張下死点から排気工程、吸気工程を経て吸気下死点までのガス交換に要する仕事を示している<sup>(138)</sup>。ガソリンエンジンでは前述の排気浄化で示したストイキ制御を行うため、エンジンへのトルク要求が小さい時はスロットルを絞り充填効率を制御する。これにより吸気ポートでは負圧が発生し、吸気工程中の筒内圧力が排気工程中の筒内圧力より低くなり、これがポンピング仕事として損失となる。吸気絞りの低減手段としては不活性ガスの充填、空気過剰での充填、ミラーサイクル/アトキンソンサイクルがある。不活性ガスの充填手段としては EGR がある<sup>(139)</sup>。空気過剰での充填手段としてリーン燃焼がある<sup>(140)</sup>。その両方用いて実施される燃焼方式として、予混合圧縮着火燃焼 HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition が挙げられる<sup>(141)</sup>。これら

の燃焼方式をエンジン動作条件毎に使い分けることでエンジンの熱効率を向上することができる。近年はミラーサイクルを可変動弁機構で実施するトレンドがあり、図 1.28 に示す各社可変動弁機構を量産、または公開している。また排気工程中の筒内圧力は排気経路の圧力損失に依存するため、ターボエンジンであればターボコンプレッサの効率向上<sup>(142)</sup>、必要に応じて排気のターボバイパスが圧力損失低減に有効な方策である<sup>(143)</sup>。

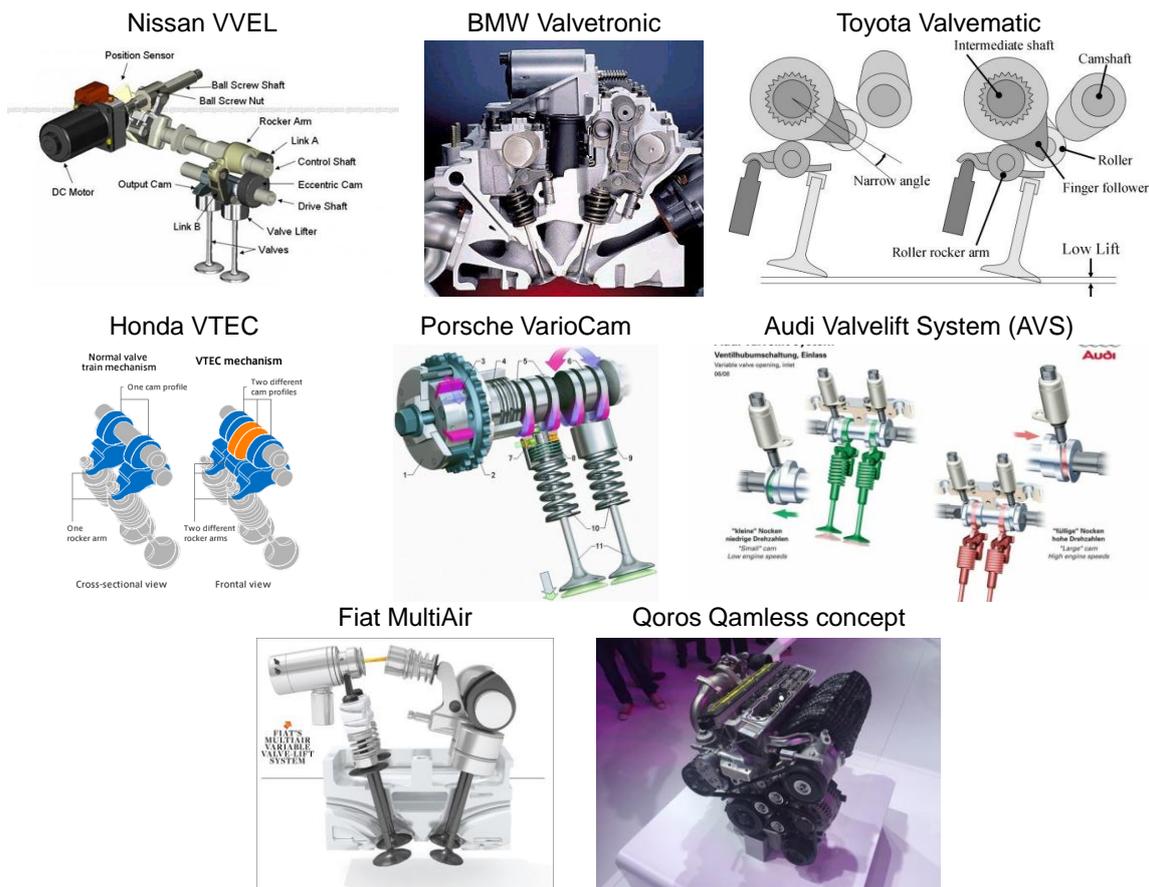


Fig.1.28 Valve train system <sup>(144)(145)(146)(147)(148)(149)(150)(151)(152)</sup>

機械損失は、エンジン内部の摺動面摩擦や、潤滑油の粘性によって発生する。摩擦低減と粘性抵抗低減が方策として挙げられる。摩擦低減としてはローラーロッカーアームの採用<sup>(153)</sup>、ピストンスカート部構造最適化<sup>(154)</sup>、ピストンスカートコーティング<sup>(155)</sup>、シリンダライナコーティング<sup>(156)(157)</sup>、カムリフタの DLC: Diamond Like Carbon コーティング<sup>(158)</sup>などが開発されている。粘性抵抗低減としては、潤滑油温度制御の最適化に関する開発が報告されており、ヘッド側カムシャフトとリフタ間摩擦に対しては低温、クランクシャフト摩擦に関しては高温とすることでエンジン保護のための潤滑と低粘性抵抗を両立可能であることが示されている<sup>(159)</sup>。量産エンジンでは潤滑油流路可変デバイスを搭載することで

熱マネジメント制御が行われている<sup>(160)</sup>。

以上、CO<sub>2</sub>低減技術における車両面からのアプローチ、使用燃料の多様化によるアプローチ、ドライブトレイン面からのアプローチ、電動化によるアプローチ、パワートレイン面からのアプローチなど、車両効率を向上させるための技術を示してきたが、パワートレインにおけるエンジンの熱効率向上は今後も必須の技術課題である。

### (3) OBD 対応技術

OBD 対応技術は OBD 規制に準拠して開発されているが、量産車診断であるためその多くは公開されていない。以下近年の OBD 対応に関し公開されている内容について述べる。SAE2016 World Congress & Exhibition において最新公開情報では松本らが、尿素 SCR: Urea Selective Catalytic Reduction システムを対象として、ディーゼルエンジンにおける触媒異常診断技術を開発した報告をしている。従来手法として触媒下流の NO<sub>x</sub> 濃度を検出する手段を用いていたが、SCR 下流の NH<sub>3</sub> スリップも触媒診断として追加検出し、OBD 診断精度を向上する手法である。SCR 内の NH<sub>3</sub> と NO<sub>x</sub> の反応をモデル化、および ECU: Engine Control Unit に実装することでモデルベース OBD を構築することに成功している<sup>(161)</sup>。SAE2015 World Congress & Exhibition においては、Harsha らが LEV<sub>III</sub> 規制の様な排気への厳しい制限が開始されることに対応することを目的として、複雑化している後処理システムのごく一部が機能不全に陥った場合を想定し、既存センサである NO<sub>x</sub>、PM センサを用いて高いロバスト性を有する OBD を実現するコンセプトについて述べている<sup>(162)</sup>。2015 21th Small Engine Technology Conference では Yong らがナローバンド O<sub>2</sub> センサを用いた三元触媒 TWC: Three Way Catalyst の診断手法を報告した。とりわけ O<sub>2</sub> センサの信号処理技術に特徴を有しており、検出周期、検出期間、増幅率といったパラメータを駆使し TWC の排気浄化性能異常を検出している<sup>(163)</sup>。SAE2014 World Congress & Exhibition においては、Robert が PM OBD 手法として温度センシングを提案している。このコンセプトは PM フィルタの下流に検出用フィルタを増設するものであり、当該フィルタが排気流れを阻害する流量を検出する。PM フィルタにリーク部が発生した場合、検出用フィルタが PM を集塵し、当該集塵地点において透過性が低下する。この影響は検出用フィルタの下流における排気の質量流量を低下させるため、当該フィルタ下流に備えられた温度センサによって検出される。この特性を活用した OBD ロジックを開発することで Euro 6 OBD 2017 PM=12mg/km 閾値を検出することに成功している<sup>(164)</sup>。SAE2013 World Congress & Exhibition においては、Dibyendu が OBD の誤検知防止と OBD ソフトウェアの軽量化を目的として、車両ネットワークアーキテクチャ内にゲートウェイモジュールを作成する手法を提案した<sup>(165)</sup>。いずれの研究開発も厳格化する OBD 規制に対応し、かつ車両所有車の安全を意識した故障モードへの円滑な移行を可能とするものである。今後も前述の排気規制、CO<sub>2</sub> 規制の施行に伴い新たな OBD が検討されると見込まれる。これに対応する技術開発は継続的に実施されていく必要がある。

#### (4) 将来規制対応技術

前節まで排気低減技術と CO<sub>2</sub> 低減技術などを述べてきた。排気低減技術は後処理、および燃焼制御で従来の規制を満足しつつあるが、さらなる規制厳格化の中ではエンジンアウトエミッションをさらに低減する必要がある。また CO<sub>2</sub> 低減技術パートレインにおけるエンジンの熱効率向上技術として、各種損失のさらなる低減が必要である。

図 1.29 に各種損失を低減するための燃焼方式、支援技術についてまとめる。燃焼方式としてはリーン燃焼、EGR 燃焼、HCCI 燃焼が挙げられる。また支援技術としては、燃料噴射装置の最適化、動弁機構の最適化、可変ジオメトリターボ、ターボコンパウンドなどが挙げられる。リーン燃焼は成層混合気を用いた強成層リーン方式と部分成層リーン方式、均質リーン方式がある。EGR は内部 EGR と外部 EGR がある。HCCI 燃焼には自然吸気システムで行うものと過給システムを用いるものがある。またこれら燃焼方式を支えるエンジン骨格機構としては、ライトサイジングを用いた最適排気量の設定、ロングストロークによる筒内混合気の流動強化や、可変圧縮比によるエンジン動作条件毎の圧縮比、膨張比の最適化がある。

本研究では上記燃焼の中で将来排気規制と CO<sub>2</sub> 規制に対応することを想定し、低 NO<sub>x</sub> と高熱効率を実現可能な HCCI 燃焼に着目した。

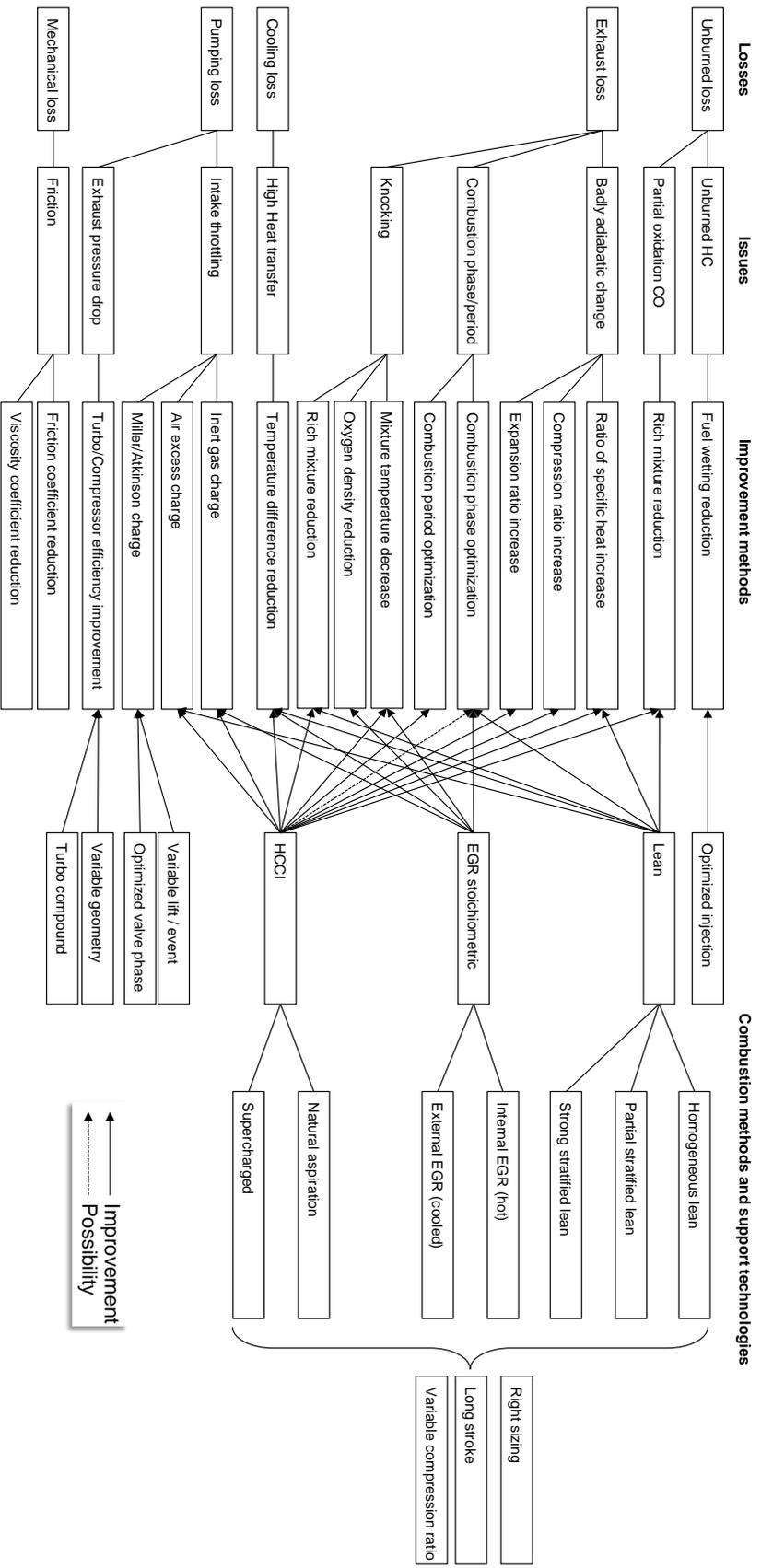


Fig 1.29 Combustion improvement methods and support technologies

## 1.2 従来研究

ガソリンの HCCI 燃焼は、古くから研究が行われてきた燃焼方式であり、主に 4 ストロークへの適用を視野に研究されてきた。また、2 ストロークエンジンへの適用を視野に研究されてきた ATAC: Active Thermo-Atmosphere Combustion (AR: Activated Radical Combustion と同義と解釈されている)もある。以下 HCCI 燃焼についての従来研究についてまとめる。

最初に ATAC についての従来研究を説明する。ATAC は 1979 年に新リーン燃焼プロセスとして Onishi らによって発表された。以下 ATAC について発表された研究開発状況について以下時系列に示す。を示す。Onishi らは、ATAC を 2 ストロークガソリンエンジンに適用し、リーン混合気とパーシャルスロットリングによって安定的に燃焼させ、燃料消費率と排気を改善できる技術として提案した<sup>(166)</sup>。

1994 年には飯田らが ATAC の燃焼メカニズムを解明するため、燃焼室内のラジカル発光観察を試みた。短時間で発光するラジカル種は単一バンドパスフィルタを用いたイメージインテンシファイヤにより捕らえられ、ATAC 運転において OH ラジカルの発生が熱発生開始前に観察されること、その後 CH ラジカル発光が観察されることを明らかとした。この現象はバルクまたは火炎伝播ではない燃焼室全体で着火が開始されたことに起因して ATAC が成立していることを示したと述べている<sup>(167)</sup>。

また 1996 年には飯田らはガソリンとメタノールを用いたストイキ ATAC の運転領域を検討し、メタノールがガソリン ATAC 運転領域よりも広い領域で運転可能であること、CO を低減可能であることを明らかとした。さらにシリコンナイトライドを用いた高温燃焼室壁面を適用し、燃焼室壁面温度の上昇によってホルムアルデヒドの低減効果が得られることを明らかとした。また同じく壁面温度上昇によって ATAC の自着火時期が進角し正味燃料消費率 BSFC: Brake Specific Fuel Consumption が増加することを示した<sup>(168)</sup>。

1997 年には多くの研究報告がなされている。Gentili らは ATAC の低負荷条件における燃焼性能解明を目的として、A/F、エンジン回転数、圧縮比、スカベンジングポート形状を変更による燃焼安定性への影響を実験的に検証した<sup>(169)</sup>。飯田氏は ATAC が燃焼安定性と低 NOx を両立可能な条件が存在するかを光学的手法によって得られた情報から検討した<sup>(170)</sup>。Esterlingot らは ATAC の自着火現象解明を目的として、1230cc の 3 気筒可視化エンジンを用いて、着火位置が安定的となる場合とランダムに変化する場合との 2 つの燃焼モードがあることを確認した<sup>(171)</sup>。小熊らは ATAC に適応可能な燃料を検討することを目的としてメタノール、エタノール、DME、メタン、プロパンを用いた自着火時期、燃焼期間、自着火温度の実測を行った。その結果、含酸素燃料を用いることで ATAC 運転領域がリーン側へシフトすること、自着火温度は当量比やエンジン回転数によらず燃料種のみで決定されることを明らかとした<sup>(172)</sup>。

1999 年には飯田氏は予混合圧縮着火での自着火、燃焼特性を制御するための基礎的検討

を行い、ATAC が残留ガスと可燃混合気の質量平均温度が燃料の自着火温度に達することにより ATAC が発生すると述べている<sup>(173)</sup>。Gentili らがガソリン DI を ATAC に適用する研究を報告している<sup>(174)</sup>。同年山岡らは ATAC エンジンにおける燃料分子構造と自着火特性、および燃焼特性の相関性を明らかとすることを目的として、ガソリン、メタン、プロパン、n-ブタン、iso-ブタン、メタノール、エタノール、DME、DEE: Di Ethyl Ether, MTBE: Ethyl Tert-Butyl eEther の合計 10 種類の燃料を用いた試験を行い、ATAC の自己着火時期が同エンジン回転数条件において圧縮開始の筒内質量の平均ガス温度に依存すること、燃焼期間は燃料種によって決まることを明らかとした<sup>(175)</sup>。

2000 年、2001 年には Gentili らは 2 ストロークエンジンの排気ポートからの燃料スリップ抑制を狙いとしたガソリン DI と ATAC を組み合わせたコンセプトを提案し、噴射時期、燃料噴射圧、排気時期が低エンジン回転数、低負荷側に拡大することを示した<sup>(176)(177)(178)</sup>。

2004 年以降は ATAC と HCCI 燃焼の比較に関する研究が行われている。2004 年、後藤らは同一テストエンジンを用いて ATAC と HCCI 燃焼特性の比較を行い、ATAC と HCCI 燃焼の差異が低温酸化反応であることを示した<sup>(179)</sup>。2005 年、飯島らは ATAC の安定燃焼が得られる領域と HCCI の安定燃焼が得られる領域との相違があることに着眼し、オクタン価の異なる燃料を用いて比較を行った。その結果、オクタン価の変更による自着火時期の変化は HCCI 燃焼より ATAC の方が顕著であることを明らかとした<sup>(180)</sup>。これ以降、ATAC に関する研究発表は見られなくなったが、2010 年、Turner らが 2 ストロークエンジンに可変圧縮比機構を組合せた ATAC に関する研究を報告した。Turner らは可変圧縮比機構として吸排気弁可変機構を採用したことで圧縮比を 10 から 40 まで変更できるエンジンコンセプトを提案している<sup>(181)</sup>。

以上の様に ATAC は 2 ストロークガソリンエンジンへの適用を視野に活発に研究がなされてきた。2016 年現在は 4 ストロークの HCCI 燃焼との棲み分けは無くなりつつある。この要因は、前章にて述べた排気規制の厳格化によって 4 ストロークエンジンへの移行が進んだためと推測される。

次に HCCI 燃焼について発表された研究開発状況について以下時系列に示す。HCCI 燃焼は、1983 年 Wisconsin 大学の Najt と Foster によって提案された 4 ストロークエンジンにおける圧縮着火燃焼コンセプトである。Najt らは CFR エンジンを用いた燃料、空気、排気によって形成した均質混合気を圧縮着火させる燃焼試験を行い、CIHC: Compression-Ignited Homogeneous Charge (CIHC) combustion として発表した<sup>(182)</sup>。

Najt らが提案した均質混合気の圧縮着火燃焼は、SWRI: Southwest Research Institute の Thring 氏によって進展され、1989 年に HCCI エンジンとして発表された。Thring 氏は、4 ストロークガソリンエンジンへの適用を想定し、スロットリング無しで低負荷を運転することでディーゼルエンジン同等の燃費性能と、同一エンジンで高負荷はストイキ燃焼を行うことで出力密度も損なわないコンセプトであるとして提案されている。また HCCI 燃焼が成立する要求 EGR 率が 13~33% であること、吸入空気温度が 370deg.C 以上であること

を示し、適切に HCCI 燃焼を成立させることでディーゼルエンジン並みの ISFC: Indicated Specific Fuel Consumption (180~200g/kW)を達成可能であることを示し、乗用車のエンジンは HCCI でのアイドリング、低負荷運転を行うことを提案した。この際火花点火燃焼と HCCI 燃焼を切り替えて運転するコンセプトも提案された<sup>(183)</sup>。

1996年には Ryan らによってディーゼルエンジンへの HCCI 燃焼適用の可能性が示され、高圧縮比、高 EGR 率、空気過剰が既に主流となっているディーゼルエンジンにおいては、スモーク排出量がほぼ零となることが示された<sup>(184)</sup>。同年、Pucher らによって HCCI 燃焼をメタノール、ガソリン、軽油といった燃料によって実施した際の課題についてまとめられている。高 EGR 率を要求するため充填効率が低下し単位排気量あたりの出力が低下する点、広いエンジン運転範囲に渡る燃焼安定化が困難である点である。メタノールはガソリン、軽油に比べ燃焼が安定化し、かつ熱発生率が高かったことから HCCI 燃焼に適しているとの結論を述べている<sup>(185)</sup>。

1997年には Gray らが軽油を用いた HCCI 燃焼を評価し、HCCI 燃焼が火炎温度の低減を要因とする NO<sub>x</sub> 低減効果を得ることを示した。筒内のリッチ混合気低減も両立できれば Soot についても低減できる見通しを得ている。HCCI 燃焼成立範囲として EGR0~50%を実証した。さらに DI ディーゼル燃焼に比べ NO<sub>x</sub> を 98%低減、PM を 27%低減する性能が得られることが報告されている<sup>(186)</sup>。同年 Christensen らによってイソオクタン、エタノール、天然ガスを用いた HCCI 燃焼の研究報告がなされた。評価に使用したエンジンは 1.6L, 単気筒、圧縮比 HCCI 時 21, SI 時 12 として設定し、ガソリン火花点火燃焼との比較で燃費の低減、低 NO<sub>x</sub> が得られることが確認された。またガソリン、またはエタノールを燃料とする HCCI 燃焼の燃焼安定化範囲が、 $\lambda$ 3~8 であることも確認された。天然ガスは高いオクタン価特性に起因してより濃い当量比での運転が要求されることが述べられている。その一方で HCCI 燃焼は、火花点火燃焼よりも HC, CO が増加する課題も示された<sup>(187)</sup>。

1998年に発表された HCCI 燃焼に関するキーワードは、過給、HCCI 燃焼制御因子探索、水噴射である。HCCI 燃焼は単位排気量あたりの出力が低いため、これを課題に据え Christensen らは過給 HCCI 燃焼を提案した。Christensen らは自然吸気 HCCI での IMEP: Indicated Mean Effective Pressure の発生リミットは 0.5MPa であるとし、これを過給により解決することを実験的に検討した。燃料にはイソオクタン、エタノール、天然ガスを用い、圧縮比を 17, 19 に設定した。吸気圧は大気圧、0.1MPa 過給、0.2MPa 過給に設定し、天然ガスを燃料とし圧縮比を 17 とした際の最大 IMEP は 1.4MPa に到達したと述べた。より高い IMEP の達成にとって制限となるのは高い最大筒内圧力と高い熱発生率であることを示した<sup>(188)</sup>。同年、HCCI 燃焼に対する当量比、EGR 率、吸気温度が及ぼす影響も明らかとし、EGR 率の増加によって熱発生率が低減できることが示された<sup>(189)</sup>。

翌年 1999 年には Christensen がポート噴射インジェクタによる水噴射を HCCI 燃焼に適用し、着火時期制御が可能であること、NO<sub>x</sub> をさらに低減できることを示した。一方で水噴射によって未燃 HC, CO がさらに増加してしまう結果も報告した<sup>(190)</sup>。さらに、圧縮

比が HCCI 燃焼に及ぼす影響についても実験的に検証し、圧縮比の増加に伴い未燃 HC が増加すること、圧縮比増加によって図示熱効率の改善が見られない傾向を示した<sup>(191)</sup>。同年 Anders, Richter らによって HCCI 燃焼を対象とした、混合気の可視化技術が報告され、ラマン分光法による当量比のサイクル変動測定、LIF: Laser Induced Fluorescence による混合気の均質性評価、Chemiluminescence Imaging による OH ラジカル、CH ラジカルの測定などが報告された。圧縮上死点前(BTDC) 20deg.CA において冷炎の存在が確認された<sup>(192)(193)</sup>。Stanglmaier らは HCCI 燃焼の将来エンジンとしての展望について述べた。低 NO<sub>x</sub> と低燃費を得る HCCI 燃焼は、火花点火燃焼、あるいはディーゼル燃焼と組み合わせられ 2 つの燃焼モードを有するエンジンに適用され、望ましくは低 NO<sub>x</sub> 性能を活かすため高負荷において適用されるべきと提唱した<sup>(194)</sup>。

2000 年には、HCCI 燃焼のモデル化に関する発表が見られる。Fiveland と Assanis が HCCI 燃焼の性能向上を目的として 0 次元シミュレーションの開発を発表し、CHEMKIN を用い水素には 11 の化学種、23 の素反応式、天然ガスには 53 の化学種、325 の素反応式を適用し、解析した例を示し、HCCI 燃焼過程を解析した<sup>(195)</sup>。同年東野らは燃焼室壁面から逃げる熱を遮熱する遮熱副室エンジンをベースに、CNG: Compressed Natural Gas を燃料として使用し、HCCI 燃焼性能を検証した<sup>(196)</sup>。Flowers らは HCCI の燃焼開始時期、効率、IMEP、排気性能を 1 次元シミュレータで予測する手法を提案した<sup>(197)</sup>。また Salvador らは KIVA と詳細化学反応コード(HCT: Hydrodynamics, Chemistry and Transport)を複合する手法を提案した<sup>(198)</sup>。またこの 2000 年代初頭から HCCI 燃焼に関する発表が増加し、カーメーカからの発表も見られる様になった。

2001 年には Daimler Chrysler, Ford, PSA Peugeot Citroen はガソリンエンジンの HCCI 燃焼によって NO<sub>x</sub> 触媒無しで Euro 4 規制を満足するエンジンシステムの構築を共同開発で狙った<sup>(199)</sup>。Christensen らは 1998 年に報告した内容から進展し、天然ガスとイソオクタンのデュアル燃料システムを想定した燃焼開発を報告した。過給 HCCI では高い熱発生率が課題となっていたが、EGR50%を導入することで燃焼を緩慢化することを狙った。その際に課題となる着火性を向上するため、イソオクタンをパイロット噴射し、当該パイロット噴射の発熱を用いて天然ガスを自着火させるコンセプトとした。その結果、エンジン回転数 1000rpm において、最大 IMEP は 1.6MPa を達成した<sup>(200)</sup>。Erlandsson らは HCCI 燃焼による高い未燃 HC と CO を解決すべく後処理装置の検討を行った。Fe-Cr 合金メッシュ触媒を適用し HCCI の低い排気温度条件においても浄化が可能であることを示した<sup>(201)</sup>。Hultqvist らも HC, CO 低減のためのセラミックコーティング、触媒コーティングに関し報告している。燃焼室壁面、シリンダライナ上部、ピストン冠面、バルブに Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を施行しコーティングし、後処理触媒には Pt 担持 ZrO<sub>2</sub> を用いた。その結果 HC と CO を低減した条件は薄膜の燃焼室コーティングであることを示した<sup>(202)</sup>。Richter らは混合気の不均質性が HCCI 燃焼に及ぼす影響を実験的に解析し、不均質混合気での HCCI 燃焼では非常に多くの化学種と中間生成物が観察されることを示した。この結果、HCCI 燃焼過程に対し混合

気の不均質性が大きな影響を及ぼすことを示唆した<sup>(203)</sup>. Frias らは EGR 率や冷却水温度などによるサーマルマネジメントを行うことで運転領域を拡大できることを示した<sup>(204)</sup>.

Kontarakis と Collings, Ma(Ford)らは、単気筒火花点火エンジンをベースとしてバルブタイミングが HCCI 燃焼に及ぼす影響を実機検証した. 燃料噴射システムには PFI: Port Fuel Injection, 圧縮比は 10.3, 燃料にはガソリンを用いた. バルブタイミングを適合することで内部 EGR 率約 60%とし, 当量比 0.95~1.1 での点火無し HCCI 燃焼が実施可能であることを示し, NO<sub>x</sub> 排出量を 0.25g/kWh に抑えた<sup>(205)</sup>.

2001 年には燃焼制御からエンジン制御へと開発をシフトした研究開発も報告され出し, Olsson らは筒内圧センサを用いた 50%熱発生時期(MBF50: Mass Burned Fraction 50%)検出に基づくフィードバック制御を提案した. 制御パラメータはオソオクタンと n-ヘプタンのデュアルポートインジェクタによる噴射割合変更である<sup>(206)</sup>. 同年天野らは, A/F と混合気温度が HCCI 燃焼に及ぼす影響を実機とシミュレーションを用いて確認し, 主熱発生の開始時期が最高混合気温度に依存し, 初期熱発生遅れが混合気温度と当量比の不均質性に依存することを示した<sup>(207)</sup>. Kong らは KIVA と CHEMKIN を実装した 3次元流体解析(CFD: Computed Fluid Dynamics)シミュレーションを開発した<sup>(208)</sup>. Law らは連続可変動弁機構 AVT: Active Valve Train を活用することで吸気温度上昇デバイス無しに HCCI を成立させる手段を提案した. Law らは当該燃焼方式を CAI: Controlled Auto Ignition と呼び, 排気弁早期閉じ(EEVC: Early Exhaust Valve Close)による排気閉じ込めによって混合気温度を上昇させ安定的な自着火を成立させた<sup>(209)</sup>. 同年 Kaahaaina らも連続可変電磁油圧動弁システムを用いて排気閉じ込めによる HCCI 燃焼安定化を報告した<sup>(210)</sup>. ディーゼル向けには HCCI から発展させた MK: (Modulated Kinetics)燃焼が木村らにより提案され, その後 PCCI: Premixed Charge Compression Ignition と共に開発が進められた<sup>(211)</sup>. Flowers らと Michael らは 1.9L VolksWagen 社製過給 DI4 気筒ディーゼルエンジンを用いて, 吸気マニフォールドと燃料配管にヒータを備えるモディファイを行い, 自然吸気 HCCI 燃焼のエンジン性能を検証した<sup>(212)(213)</sup>. 同エンジンを用いて Aceves らは HCCI 燃焼時の最大トルクを低減させてしまう課題として気筒間 IMEP 変動を提唱した<sup>(214)</sup>. Christensen らはピストン冠面形状が HCCI 燃焼性能に及ぼす影響実験的に検証し報告している. ピストンクレビスサイズ, 冠面形状などを変更し, イソオクタンを燃料とする単気筒エンジンにて未燃 HC のほとんどがクレビスサイズに由来すること, 冠面トップランド幅の増加に伴って HC が増加することを検証した<sup>(215)</sup>. Ogink らはガソリンを燃料とする HCCI 燃焼の化学反応(化学種 101, 素反応式 479), ガス交換過程をモデル化し 3D CFD に適用した<sup>(216)</sup>. Zhao らは Ford 1.7L Zetec-SE エンジンに対し内部 EGR を活用した HCCI 燃焼を適用し, 高温の内部 EGR が自着火時期を進角すること, その結果燃焼期間が短縮されることを明らかとした. 一方で希釈効果, 比熱増加効果は自着火時期には影響せず, 燃焼期間の延長に影響することを明らかとした. 内部 EGR の成層化が自着火時期の制御を可能とすると述べている<sup>(217)(218)</sup>. Koopmans らは単気筒自然吸気エンジンを対象として市販ガソリンを用いた HCCI

燃焼を行った。内部 EGR 方式での HCCI 燃焼の運転可能範囲を明確化し、最大 BMEP: Brake Mean Effective Pressure=0.35MPa, 最小 BMEP=0.10MPa, 最高回転数 3000rpm, 最低回転数 1200rpm であることを報告した。この時、高負荷側はノッキングにより制約され低負荷側は燃焼変動によって制約され、EVC が自着火時期に大きな影響を及ぼすこと、IVC: Intake Valve Close 時期が僅かに影響すると述べた<sup>(219)</sup>。

2002 年には、Iwashiro らが高負荷側の運転領域拡大を解決することを目的として筒内直噴水噴射を適用した。その結果自然吸気 HCCI で最大 IMEP=0.7MPa を達成できることを述べた<sup>(220)</sup>。Zhao らは EEVC コンセプトを適用した HCCI 燃焼が BMEP で 0.05MPa から 0.4MPa, エンジン回転数で 1000rpm から 3500rpm の範囲で運転可能であることを示した<sup>(221)</sup>。Hiraya ら(Nissan)は可変圧縮比と吸気温度, 吸気組成を変更するエンジン試験を行い、ガソリン HCCI 燃焼での運転可能領域を検証した<sup>(222)</sup>。Christensen は燃焼室形状の変更が HCCI 燃焼に与える影響を検証し、最大熱発生率はスクエアボール燃焼室適用により最も低減することを示し、この要因が熱損失の増加と燃焼効率の低下によるものと推測した<sup>(223)</sup>。Craig ら(GM)はガソリン DI システムを用いて成層混合気化による HCCI 燃焼への影響を検証した<sup>(224)</sup>。Koopmans ら(Volvo)は HCCI 燃焼のサイクル変動に着目し、緩慢燃焼サイクル時に未燃 HC が増加し、緩慢燃焼サイクル直後に高温残留ガスが増加することで次サイクルにおいて自着火時期が進角することを示した。この進角されたサイクルでは未燃 HC が減少する。この自着火時期が早いサイクルと遅いサイクルが発生しサイクル変動に至ることを示した<sup>(225)</sup>。Sjoberg らはガソリン DI を備えた 6 気筒改造 1 燃焼単気筒エンジンにおいて HCCI 燃焼を行い、スワールによる HC, CO 低減効果を示した<sup>(226)</sup>。山本ら(Mitsubishi Motors)は、火花点火と HCCI 燃焼の 2 つを実施可能な 6 ストロークガソリン DI エンジンを検討し、成層リーン火花点火燃焼ガスから高温既燃ガスを生成し、これを用いて HCCI 燃焼を行うコンセプトである<sup>(227)</sup>。Kong らは KIVA と CHEMKIN を実装した 3 次元流体解析(CFD: Computed Fluid Dynamics)シミュレーションの開発を推進し、HC, CO の予測を可能とした<sup>(228)</sup>。Arronsrisopon と森川ら(Yamaha Motor)は、CFR エンジンを用いた HCCI 運転において同一オクタン価の異なる組成の燃料を用い、HCCI 燃焼の運転領域が燃料の化学組成に依存することを示した<sup>(229)</sup>。Haraldsson と Hyvonen ら(SAAB)は、VCR によって混合気温度を制御することで 5000rpm までの高エンジン回転数を RON: Research Octane Number=60 の燃料で運転可能であることを示した<sup>(230)</sup>。Yang ら(Ford)は、PFI を用いた HCCI 燃焼を行い、自然吸気 HCCI で NMEP: Net Mean Effective Pressure=0.7MPa, 過給 HCCI で NMEP=1.17MPa を運転可能であることを示した<sup>(231)</sup>。Christensen らはスワール数の変化が HCCI 燃焼の図示熱効率に与える影響を検証し、スワール比が低い条件において最も高い図示熱効率を得ることを確認した<sup>(232)</sup>。

2003 年に発表された HCCI 燃焼に関するキーワードは、エンジン制御として必要となる制御適合、燃焼切替制御、イオン電流センサによる HCCI 燃焼制御である。Leithgoeb ら(AVL)はリアルタイム HCCI 燃焼制御を想定し、各種パラメータ(可変バルブタイミング、

噴射制御)の自動適合を行った<sup>(233)</sup>。同年 Osborne ら(Ricardo)は、ガソリン直噴 HCCI 燃焼の将来パワートレインにおける位置付けについて報告し、エンジン実験結果に適合した CFD に HCCI 燃焼モデルを組み込み、燃焼性能の予測を行った<sup>(234)</sup>。John らはガソリン直噴 HCCI 燃焼での各種排気成分のパラメトリックサーベイ試験およびシミュレーションを行い、低負荷条件における CO と HC を低減可能な当量比範囲を検討した。実験には 0.98L の単気筒エンジンを使用した。当量比 0.20 以下では CO が相当増加し、この要因が燃焼効率の低下にあることを示した。また HC は当量比 0.14 以下となると増加が見られた。シミュレーションによる現象予測の結果、バルクの反応が不完全となることが主要因と考察されている<sup>(235)</sup>。Koopmans ら(Volvo)は、HCCI と SI の切替について検討した。HCCI 燃焼には内部 EGR 方式を用い、電磁吸排気弁機構を有する単気筒エンジンによる燃焼モード切替を開発している。内部 EGR 量と吸気弁閉じ時期の制御が有効であることが示された一方で、 nonslotted ring SI 燃焼(EIVC)とネガティブバルブオーバーラップ NVO: Negative Valve Overlap での HCCI 燃焼(NVO-HCCI)の間ではバルブタイミングの設定に大きな差異が存在するため、今後の課題として提起されている<sup>(236)</sup>。漆原ら(日産自動車)は NVO-HCCI の運転可能領域拡大を検討し、NVO 中の燃料噴射量を低減し、さらに残る燃料を吸気行程から圧縮行程において噴射することで混合気の不均一性を持たせた。これにより HCCI 燃焼の高負荷側拡大が可能となることを示した<sup>(237)</sup>。大山氏はシミュレーションを用いた HCCI 燃焼時の筒内ガス交換予測を行い、4 気筒、2000cm<sup>3</sup> のエンジンでのサイクル毎、気筒毎の過渡ガス挙動をモデリングした<sup>(238)</sup>。Hongming ら(Jaguar)は、NVO-HCCI と SI 燃焼のバルブスイッチングについてシミュレーションを用いて検討した<sup>(239)</sup>。Jeuland ら(IFP)は、NVO-HCCI 燃焼が燃料の気化特性、組成が自着火特性に強く影響をすることを述べ、HCCI 燃焼の実用化には燃料性状変化に対応する必要があることを述べた<sup>(240)</sup>。同様に Ryan ら(SWRI)も HCCI 燃焼の自着火制御には燃料性能への要求が発生することを述べている<sup>(241)</sup>。Wagner ら(University Karlsruhe)は、ポートインジェクタ(PFI: Port Fuel Injector)および直噴のインジェクタを備えた VCR エンジンを用いた HCCI の実験的研究を行い、各種排気性能と筒内可視化による可視化を関連付けて現象解明を行った<sup>(242)</sup>。Hyvonen ら(Fiat-GM)は、5 気筒 1.6L VCR エンジンを用いた HCCI 運転領域の拡大を目的とした過給適用を検討し、自然吸気 SI 燃焼時の最大負荷と過給 HCCI 燃焼時の最大負荷が同レベルに到達できることを実証した<sup>(243)</sup>。Strandh ら(Volvo)はイオン電流センサを用いた HCCI 燃焼制御コンセプトを発表した。イオン電流センサを HCCI 燃焼に適用し、各種運転状態において出力される信号を実験的に検証している。イオン電流センサに用いた印加電圧は 85V であり、HCCI 燃焼時の A/F 変化に対しイオン電流信号が敏感に反応することを明らかとした<sup>(244)</sup>。

2004 年に Fuerhapter ら(AVL)が、HCCI 燃焼の実用化におけるシステム設計と制御ストラテジ確立を目的として、市販 4 気筒ガソリンエンジンをモディファイした CSI: Compression and Spark Ignition エンジンを提案した。内部 EGR の導入のため、吸気弁

開き期間において排気弁を再開弁するリブレッシング機構を備えている<sup>(245)</sup>。Decら(Sandia National Labs.)は、成層化が HCCI 燃焼に及ぼす影響について検討し、エンジン回転数 1200rpm の条件において燃料成層化が HCCI 燃焼を急速化にシフトすることを示した<sup>(246)</sup>。Vressnerら(Lund Institute of Technology)は、マルチポイントイオン電流センサによって HCCI 燃焼の燃焼状態を診断する手法を検討した<sup>(247)</sup>。Kopecekら(Vienna University)はレーザ着火による HCCI 燃焼成立を検討し、吸気加熱無しで  $\lambda 2.7$  での HCCI 燃焼を確認した<sup>(248)</sup>。山岡ら(日立製作所)はガソリン HCCI 燃焼の燃焼安定化に貢献する燃料噴射制御を立案し、単気筒による A/F、燃料噴射制御の影響を検証に始まり、4 気筒エンジンにおいて燃焼性能を検証した<sup>(249)</sup>。Haraldssonら(Lund Institute of Technology)は、FTM: Fast Thermal Management と呼ばれる温調装置を備えた VCR エンジンを用いて HCCI 燃焼切替時間を短縮できることを示した<sup>(250)</sup>。Aroonsrisoponら(University of Wisconsin)は PFI とデュエアル DI を用いた混合気成層化を行い、HCCI 燃焼のリーン限界とリッチ限界について検討した<sup>(251)</sup>。島崎ら(本田技術研究所)は、点火プラグ一体型の筒内圧センサを用いた HCCI 燃焼診断手法について検討した。筒内圧センサによる失火、異常燃焼をリアルタイムに気筒別で検出する。当該コンセプトは、ノッキング制御、失火検知、トルクデマンド制御、MBT: Maximum Brake Torque 制御、リーン/EGR 制御、NO<sub>x</sub> 抑制、NVH 抑制、バルブタイミング検知、気筒判別/燃焼開始時期判定、RVP: Reid vapor pressure 検出によるキャリブレーションを行う<sup>(252)</sup>。Hyvonenら(Fiat-GM)は、HCCI 燃焼の気筒間燃焼変動を抑制するため、最も失火し易い気筒を保証する吸気加熱と VCR 制御を行う手法を提案した<sup>(253)</sup>。

2005 年には Hunagら(SWRI)が、グロープラグ一体型のイオン電流センサを用いた HCCI 燃焼制御ストラテジを検討し、ECU: Engine control と連携した燃焼制御システムを構築した。イオン電流信号から燃焼開始時期を検出する手法であり、HCCI 燃焼ではイオン電流信号が弱く燃焼状態の検出が困難であることが示されている<sup>(254)</sup>。漆原ら(日産自動車)は、点火アシスト圧縮着火 SI-CI 燃焼を提案し、HCCI 燃焼の高負荷側拡大効果を示した。一方で NO<sub>x</sub> の増加が発生し、EGR 適用の必要性が述べられている<sup>(255)</sup>。Milovanovicら(Lotus)らは SI 燃焼と HCCI 燃焼の切替制御を構築し、連続可変バルブ機構を用いた内部 EGR 制御による実現可能性について検討した。その結果、エンジン回転数とエンジン負荷の変化が発生する過渡条件において燃焼切替を行う際に、条件によって異なる制御パラメータを適合する必要性が示されている<sup>(256)</sup>。また HCCI 燃焼の高負荷側拡大を狙った冷却水温マネジメントについても検討し、低水温化による高負荷への拡大効果を検証している<sup>(257)</sup>。Santosoら(Massachusetts Institute of Technology)は、SI 燃焼と HCCI 燃焼を行うエンジンを想定し、エンジン動作に応じて燃焼を切替える際に詳細なオープンループ制御マップが必要であることを述べている<sup>(258)</sup>。また同年、Amneusら(Lund Institute of Technology)、Ciattiら(Argonne National Labs.)は HCCI 燃焼に対する新たな課題を提起している。Amneusら HCCI 燃焼において N<sub>2</sub>O の排出が見られ、これは混合気の不均一部の燃焼による筒内

の局所高温化により発生するものと推測した<sup>(259)</sup>。Ciatti らは HCCI 燃焼においてもナノサイズの PM が排出され得ることをシミュレーションにより予測し、とりわけ過濃混合気部において低温酸化反応が発生する時に多く排出されることが提起した<sup>(260)</sup>。Wang ら (Tsinghua university) は HCCI 燃焼の運転領域拡大を目的として成層混合気形成に着目した。DI を用いた分割噴射制御を行い、2 回目の噴射を圧縮行程中に行うことで、混合気が冷却され着火時期を制御できる可能性が示されている。筒内可視化による検証では、吸気行程中の噴霧が均質混合気を形成し、圧縮行程中の噴霧が点火プラグ近傍に到達し成層混合気を形成していることが確認された。さらにリッチ混合気が自着火開始点となりリーン混合気へ伝播していることが確認された<sup>(261)</sup>。山岡ら(日立製作所)は、多気筒 HCCI エンジンを用いた A/F フィードバック制御を構築し、気筒別に空燃比センサを配し当該センサ信号に応じて気筒別に燃料噴射量を制御することで気筒別 IMEP を制御する手法を提案した<sup>(262)</sup>。Sjoberg ら(Sandia National Labs.) は、HCCI 燃焼の燃焼騒音低減に向けた検討として、筒内温度成層化による燃焼位相遅角を狙った。温度成層化による効果はシミュレーションにより予測され、IMEP は自然吸気 HCCI 燃焼で 0.524MPa から 0.695MPa へと拡大すると見積もられている<sup>(263)</sup>。温度成層化の適用範囲把握についても検討されており、エンジン回転数とエンジン負荷に応じて適切に温度成層範囲を制御する必要性が述べられている<sup>(264)</sup>。

2006 年には Hyvonen ら(GM)が異なる排気量の多気筒 HCCI エンジンについて性能評価し、いずれのエンジンにおいても同等の図示熱効率 ITE: Indicated Thermal Efficiency を達成できるが、正味熱効率 BTE: Brake Thermal Efficiency については異なる結果が得られたことを発表している<sup>(265)</sup>。Wagner ら(Oak Ridge National Lab.) は、点火アシスト HCCI 燃焼によりサイクル変動が抑制できることを示した<sup>(266)</sup>。Panousakis ら(Loughborough university) はイオン電流センサを用いたフィードバック制御の構築を目的として最高筒内圧力時期がイオン電流センサにより検出できることを述べた<sup>(267)</sup>。また Joyce ら (Loughborough university) はイオン電流と筒内圧情報の関連性について検証し、最大筒内圧力と最大イオン電流信号値に相関があることを検証した<sup>(268)</sup>。Guralp ら(University of Michigan) は、実使用環境を想定し燃焼室内部に堆積したデポジットが HCCI 燃焼に与える影響について検討した。デポジット堆積が進むにつれて HCCI 燃焼の燃焼速度は速まる傾向が示された。またデポジット厚さと熱拡散には関連性が見られたことから、デポジット堆積により燃焼室の保温性が高まることが示唆された<sup>(269)</sup>。HCCI の高負荷領域拡大に向けては温度成層について多く検討がなされている。Lim ら(慶応大学) は急速圧縮機を用いた温度成層の自着火への影響を測定した。温度成層が存在する場合、低温酸化反応と高温酸化反応の開始時期は均質に比べ早まる傾向が示された。また化学発光強度観察の結果、温度成層が存在する場合の最大発光強度発生時期は均質に比べて早まることが示された<sup>(270)</sup>。Yu ら(Lund Institute of Technology) は温度成層度合いの増加に伴って着火が早まることを示した<sup>(271)</sup>。

2007年から2008年にかけて、カーメーカーによる HCCI 燃焼エンジンのコンセプトカーが公開された。Mercedes-Benz は DiesOtto エンジンと称すエンジンを搭載する車両を公開している(図 1.30)<sup>(272)</sup>。



Fig.1.30 Mercedes-Benz F700 equipped DiesOtto engine <sup>(272)</sup>

GM は HCCI エンジンを搭載する車両を公開している。HCCI 運転可能範囲についても公開されている。筒内圧センサを用いたクローズドループ制御、センタ噴射システム、2 ステップ切替動弁と電動可変バルブタイミング機構を用いたシステムを採用した(図 1.31)<sup>(273)</sup>。



Fig.1.31 GM Saturn Aura equipped HCCI engine <sup>(273)</sup>

Volkswagen は CSS と称するガソリンエンジンとディーゼルエンジンのコモディティ化を目指した燃焼コンセプトを提案した。HCCI エンジンを搭載する車両を公開している(図 1.32)<sup>(274)(275)</sup>。ガソリン圧縮着火エンジンについては GCI: Gasoline Compression Ignition と称し、コンセプトカーを公開している。従来研究で多く見られた EEVC による排気閉じ込めコンセプトとは異なり、吸気行程中に排気弁を再開弁するリブレスニング方式を採用している(図 1.33) <sup>(276)(277)</sup>。



Fig.1.32 Volkswagen CSS concept vehicle <sup>(274)(275)</sup>

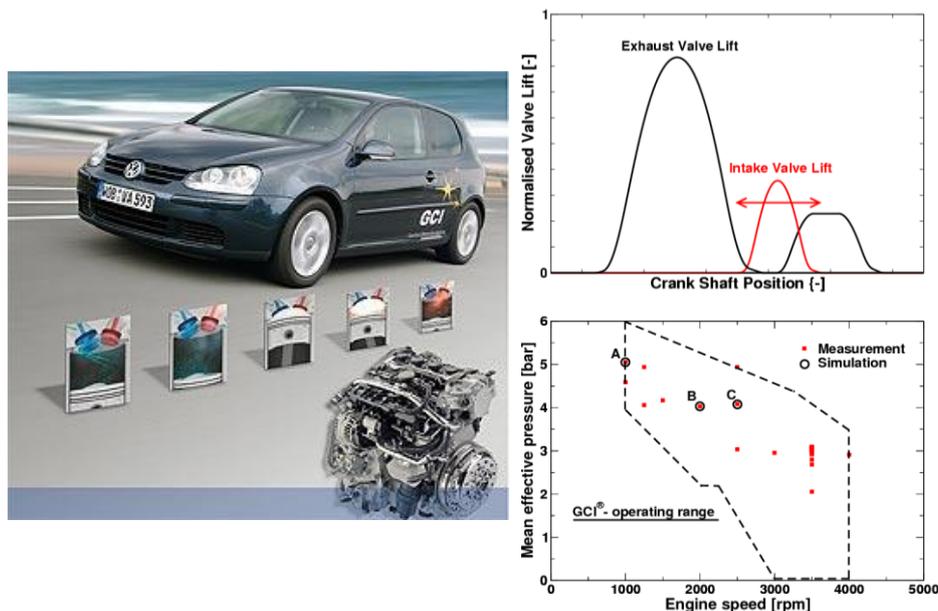


Fig.1.33 Volkswagen GCI concept vehicle <sup>(276)(277)</sup>

2007年の研究発表としては、以下が挙げられる。Tianら(Tsinghua university)はSI-HCCI燃焼切替に関し検討し、2段切替動弁機構とスロットルの非同期制御によって10サイクルで切替が可能であることを示した<sup>(278)</sup>。Caoら(Brunel university)は、DIを用いた分割噴射時期と噴射割合を変更し、NVO中の噴射が着火材として作用すること、2回目の噴射時期を吸気行程中で遅角させていくことで燃焼速度が緩慢となること、圧縮行程中で遅角させていくことで成層度合いが増加し燃焼が急速となることを示した。NVO中の噴射と吸気行程中の噴射を等比率とする分割噴射制御が最も燃焼安定性に優れる一方で、NO<sub>x</sub>とSootが低減可能な分割噴射割合は10:90と吸気行程中の噴射割合を増加することで得られることが示された<sup>(279)</sup>。畑村氏(畑村エンジン研究所)は排気ブローダウンによる過給HCCI燃焼コンセプトを提案した。本コンセプトは日本におけるモード走行10-15mode全域をHCCI燃焼で運転可能なHCCI運転領域が得られることを提唱した<sup>(280)</sup>。中野ら(慶応大学)は、温度成層による高温領域と低温領域が高温酸化反応に至る時間差について検討し、温度成層が大きい時を約42K差、小さい時を約28K差として、急速圧縮機を用いて評価した。その結果、温度成層大の時、燃焼期間は短くなり、圧力上昇率は小さくなることが示された。化学発光観察の結果では高温領域と低温領域の発光が観察される時間差は1.5ms程度であることが確認された<sup>(281)</sup>。吉山ら(岡山大学)は点火プラグを用いたイオン電流センサに着目し、イオン電流信号のピーク2次電流時期が最大熱発生率時期と強い相関があることを示した<sup>(282)</sup>。同様にAulinら(Lund Institute of Technology)は、点火プラグを用いたイオン電流センサに着目し、印加電圧を450V設定とし、イオン電流信号とMBF50に相関性があることを示した<sup>(283)</sup>。

2008年にはBrewsterら(Orbital)がスプレーガイドセンタインジェクタを用いたHCCI燃焼性能の向上について検討した。最大圧力上昇率の制限値を0.45MPa/deg.CAとし、成層混合気形成に着目した実験を通じてエンジン回転数2000rpmにおいてIMEP0.1MPaから0.7MPaの範囲でHCCI燃焼が可能であることを示した<sup>(284)</sup>。Cortiらは筒内圧センサを用いたリアルタイムIMEP、熱発生率ROHR: Rate of Heat Release検知における測定誤差について検討した。量産型のエンジンではクランクシャフトエンコーダは無く、フライホイールの切りかきに応じてクランク角度を検出するため、筒内圧センサ信号取得の時間分解能が不足し精度が低下する。したがってクランク角度ベースと時間ベースでの信号取得を同時計測するアルゴリズムを構築した<sup>(285)</sup>。角谷ら(日立製作所)は、4気筒HCCIエンジンを対象としてSI-HCCI燃焼切替制御を立案した。主たる制御パラメータはスロットルと連続可変動弁機構であり、筒内の内部EGR率とA/Fを制御するコンセプトである<sup>(286)</sup>。Xuら(Ford)は、HCCI燃焼向けの後処理触媒のフィジビリティスタディを行った。年々厳格化する排気規制に対しHCCIにおいてもNO<sub>x</sub>排出を抑制する必要性が出てきたことをモチベーションとして、アルミナベースのリーンNO<sub>x</sub>トラップ(LNT: Lean NO<sub>x</sub> Trap)触媒の開発が実施された。HCCI燃焼の排気温度はSI燃焼に比べ低いことから、低温域(150deg.C)から高温域(550deg.C)でも浄化率を確保可能なアルミナベースLNTが報告された<sup>(287)</sup>。松田

ら(日産自動車)は、様々な可変動弁機構を用いて SI-HCCI 燃焼切替制御を行い、吸気圧の応答が燃焼切替時間に影響することを明らかとした<sup>(288)</sup>. Guillemin ら(Institut Francais du Petrole)は、筒内圧センサ無しでの HCCI 燃焼制御構築を狙い、ノックセンサを用いた燃焼センシングを提案し、HCCI 燃焼時のノックセンサ信号の特徴について述べた<sup>(289)</sup>. Punater ら(Delphi)は、筒内圧センサを用いた HCCI 燃焼クローズドループ制御を構築し、高速 ECU を用いた開発実施例について報告した<sup>(290)</sup>.

2009 年には Dec ら(Sandia National Laboratories)が温度成層混合気形成の検証のため平面画像温度測定手法を発表した<sup>(291)</sup>. Dongbo ら(Tsinghua university)は、燃料成層による HCCI の高負荷運転領域拡大について検討し、リッチ領域をストイキ以上とすることで最大圧力上昇率と NO<sub>x</sub> を両方低減できる見込みを得た. 一方で燃料成層は CO 排出量を大きく増加させたことから、燃料成層コンセプトには最大圧力上昇率、NO<sub>x</sub>、CO の制約があると述べた<sup>(292)</sup>. Wermuth ら(GM)は燃料改質による HCCI 燃焼の低負荷側拡大について検討し、NVO 中の噴射時期、噴射量が改質燃料量を制御する重要なパラメータであることを述べた<sup>(293)</sup>. Kang ら(GM)は UEGO: Universal Exhaust Gas Oxygen センサを用いて改質燃料量を推定し、エンジン制御におけるオブザーバとして活用する手法を提案した<sup>(294)</sup>. また HCCI 燃焼の高ロバスト化に向けた技術開発として、2.2L 4 気筒センタインジェクションエンジンを構築し、全気筒筒内圧センシング、吸排気電動可変バルブタイミング機構により燃焼を安定化した. さらに前述の HCCI コンセプトカーについて紹介した<sup>(295)</sup>. また Yun ら(GM)は、分割噴射、多段点火を用いた HCCI 燃焼のアイドリング運転の燃焼安定化について検討し、低負荷の着火性を担保可能な燃焼制御手法を提案した. 本手法によりアイドリング条件(エンジン回転数 800rpm, NMEP: Net Mean Effective Pressure 0.085MPa)において、IMEP の標準偏差  $\sigma$ IMEP は 0.01MPa 以下を達成し、かつ NO<sub>x</sub><1.0g/kg-fuel と非常に低い性能を達成した<sup>(296)</sup>. Johansson ら(GM)は過給 HCCI 燃焼時の高負荷側拡大を狙い、外部 EGR と噴射制御ストラテジを複合した検討を実施した<sup>(297)</sup>. 北村ら(本田技術研究所)は、SI-HCCI 燃焼切替制御について検討し、SI 燃焼と HCCI 燃焼の排気温度の差異に着目し、点火時期を適切に制御することでトルクショック無しで切替が可能であることを示した<sup>(298)</sup>.

2010 年には Chadwell ら(SWRI)が吸気バイパスバルブを用いて吸気温度制御, HP-EGR: High Pressure EGR システムと過給システムを組み合わせ、エンジン回転数 2000rpm, BMEP 1.1MPa での燃焼制御を可能とした<sup>(299)</sup>. Wu ら(University of Cambridge)は、多気筒エンジンでの SI-HCCI-SI 燃焼切替制御を検討し、可変バルブタイミング機構の動作に対し吸気管圧力の応答が遅れることが課題であると述べ、空気系の応答に準じて燃料系デバイスが動作する必要性を示した<sup>(300)</sup>. Zhang ら(Tianjin university)は、ノックセンサの信号が 10%熱発生時期 MBF10, 最高筒内圧力, 最大圧力上昇率に相関が得られることに着目し、低コストで HCCI 燃焼検知が可能であることを示した<sup>(301)</sup>. Lee ら(University of Michigan)は、ストロークボア比 S/B を変更したエンジンにおいて HCCI 燃焼を行いロングストロー

ク程排気性能に優れることを示した<sup>(302)</sup>。Yun ら(GM)は、HCCI 燃焼の気筒間変動を解決するため気筒バランス制御ストラテジを提案した。この手法は気筒別に A/F と改質燃料量を制御する燃料噴射制御を主軸としたものであり、低負荷では MBF50 を、高負荷では A/F をバランスさせることで燃焼騒音と燃焼変動を抑制可能であることを示した<sup>(303)</sup>。

2011 年には電動化による技術開発が進み HCCI 燃焼のハイブリッドシステムにおける活用についても発表された。Lawler ら(University of Michigan)は HEV: Hybrid Electric Vehicle への HCCI エンジン活用を検討し、モータアシストによる SI-HCCI 燃焼切替を行う手法を提案した<sup>(304)</sup>。Saxena ら(University of California)はイオン電流センサを用いた燃焼騒音条件における燃焼状態検知を行い最大圧力上昇率と最大イオン信号上昇率に高い相関があることを示した<sup>(305)</sup>。また Palma ら(FPT)は Fiat が量産車に搭載したマルチエアシステムを活用し、HCCI 燃焼の実現性を示した<sup>(306)</sup>。また HCCI 燃焼は異なる燃料を筒内で混合させ圧縮着火する方式でも検討され、主に RCCI: Reactivity Controlled Compression Ignition としても研究が開始されている。Kokjohn ら(University of Wisconsin)はガソリンと軽油を用いた RCCI コンセプトを提唱している<sup>(307)</sup>。

2012 年には Yang ら(Tsinghua university)が MPCFI: Multiple Premixed Compression Ignition を提案し、DI による多段噴射により多点着火を制御する手法について述べた<sup>(308)</sup>。窪山ら(千葉大学)はブローダウン過給 HCCI エンジンシステムにおける燃焼切替制御手法を検討し、吸気スロットルと排気スロットル、そして EGR 制御弁を統合した制御手法をシミュレーションにより構築した。一方で各種ガス挙動の遅れに依存することから、さらなる高速燃焼切替には追加デバイスが必要となることが示唆された<sup>(309)</sup>。また Nier ら(Bosch)は燃焼切替制御に着目し、4 気筒 2.0LDI ガソリンエンジンを対象として燃焼騒音と燃焼安定性の両面から燃焼切替する手法をキャリブレーションによって得た<sup>(310)</sup>。Weall と Moore ら(Delphi)は、2 ステップ可変カムプロフィール機構を用いた HCCI エンジンを構築し、燃料噴射制御の適合手法について検討した<sup>(311)</sup>。

2013 年には Wheeler と Wiemers ら(AVL, Bosch)は ACCESS: Advanced Combustion Controls Enabling Systems and Solutions プロジェクトとして SULEV 規制対応とガソリンエンジン車の 25%燃費低減を目標とする開発について発表した。対象車種は GM Cadillac CTS であり、自然吸気 3.6L V 型 6 気筒エンジンである。エンジンのダウンサイジング化と過給機の装着、部分負荷での HCCI 燃焼を組み合わせ目標値に到達した<sup>(312)</sup>。同年 Polovina と Wiemers ら(AVL, Bosch)は上記 ACCESS プロジェクトにおいてエンジン動作点毎に SI, HCCI, SACI: Spark Assist Compression Ignition のいずれを用いることが燃費と排気性能に優れるのかを明らかにするために実験を行い、低負荷における HCCI、中負荷における SACI、高負荷におけるストイキ SACI と EGR を組み合わせることが最適化の結果であることを述べた<sup>(313)</sup>。Hoyer らはガソリン DI 圧縮着火エンジン GDCI: Gasoline Direct injection Compression Ignition と称する新たなコンセプトを提案した。エンジン開発のトレンドを踏襲しダウンサイジング過給直噴 1.8L 4 気筒エンジンをベースとして GDCI を可

能とするエンジン仕様をシミュレーションにより明らかとした<sup>(314)</sup>。Szybist と Moore ら (Oak Ridge National Laboratory, Delphi)は油圧動弁機構を用いた単気筒 HCCI エンジンを構築し、燃料噴射制御の影響を検証し運転領域の見極めを実施した<sup>(315)</sup>。

2014年にはカーメーカである Hyundai とサプライヤである Delphi が GDCI コンセプト実現に向けて共同開発を行っているとの発表があった(図 1.34)<sup>(316)</sup>。

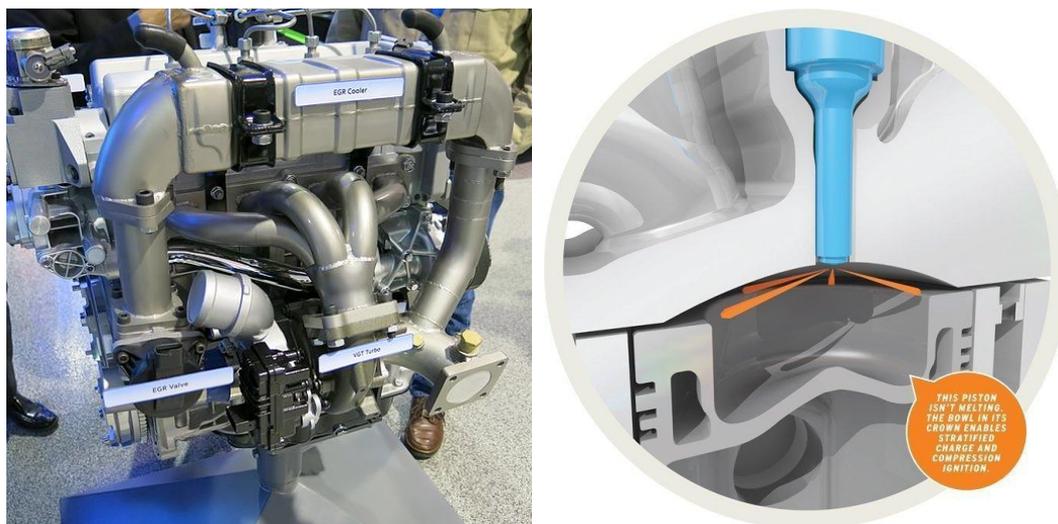


Fig.1.34 Hyundai GDCI concept engine <sup>(316)</sup><sup>(317)</sup>

2014年に発表された研究報告としては、Sternak ら(Bosch)が SACI コンセプトを進展させ燃焼性能適合を行う際の指標として、サイクル平均筒内圧情報と毎サイクル情報といったパラメータを選定することを提案し、より良いアプローチとして燃焼状態の特定には毎サイクル情報を高速に処理する必要性の述べた<sup>(318)</sup>。Cao ら(Tongji university)はイオン電流センサを用いた燃焼切替制御を提案し、燃焼切替時のイオン電流信号を監視することで円滑な切替が可能であることを提唱した<sup>(319)</sup>。

2015年には Mendrea ら(Bosch)が SACI での MFB50 制御手法を提案し、IMEP, RI: Ringing Intensity などのエンジン性能と MFB50 には強い相関があることを理由として高速計算処理無しで燃焼制御が可能であると述べた。また湿度変化や外気温変化に対しても MFB50 を制御することで運転領域を確保できることを実証した<sup>(320)</sup>。また高沢ら(本田技術研究所)は同じく SACI に着目し、エンジン回転数とエンジン負荷変化時に SACI での点火時期制御方法について述べている<sup>(321)</sup>。溝上ら(慶応大学)は、HCCI 燃焼時の燃料成層による最大圧力上昇率低減効果に着目し、この要因が燃料の空間拡散と燃焼開始時期の拡散が同期していることに依存していることを LIF: Laser Induced Fluorescence を用いて確認した<sup>(322)</sup>。竹折ら(本田技術研究所)は、SACI エンジンの後処理システムについて検討した。HCCI の排気成分はパラフィン系が多く含まれ、かつ排気温度が低いことから、これに対応する触媒の開発に着手している。新開発の触媒は TWC: Three Way Catalyst にリーク NOx

触媒をカップリングしたものであり, SACI時の HC と NO<sub>x</sub> を両低減できることを示した。また車載を想定したサイズも実現している<sup>(323)</sup>。山崎らと引田ら(東京大学, マツダ)は排気リブレスリングシステムを用いた HCCI エンジンに適用可能なエンジン制御モデル開発について発表している。着火時期は着火遅れ時間の関数である Livengood-Wu 積分と, 供給燃料量から推定された燃焼期間を用いて燃焼を予測するモデルである。実験結果との比較では最大圧力と最大圧力発生時期が高い精度で予測されていることが示された<sup>(324)</sup>。

2016 年には Johnson ら(Delphi)が GDCI コンセプトを進展させ, 複数の ECU によるエンジン制御を集約可能なコモンアーキテクチャ構築を目指した。GDCI の開発で膨大化するエンジン適合要素と車両制御開発を, 一貫して実施可能な ECU 開発の必要性が示された<sup>(325)</sup>。また Kolodziej ら(Delphi)は, GDCI エンジン generation2 を構築し, 圧縮比 15 の単気筒エンジンに対しナフサと E10 ガソリンを用いてエンジン性能を検証した<sup>(326)</sup>。Easter ら(University of Michigan)は, HCCI エンジンの後処理として TWC と尿素 SCR: urea injection Selective Catalytic Reduction をカップリングしたシステムを提案している。尿素 SCR では NH<sub>3</sub> スリップが課題となることから, SI 燃焼と SACI 燃焼後の NH<sub>3</sub> スリップ量を検証している<sup>(327)</sup>。以上の様にガソリン HCCI エンジンは 2016 年現在, 量産適用は開始されていない。一部, レース分野では SemiHCCI と称するシステムが適用されているとの情報もあるが(図 1.35)<sup>(328)</sup>, マツダの 2015 年 3 月期決算説明会においては, 2018 年の SKYACTIVgeneration2 への究極燃焼適用が明記されている<sup>(329)</sup>ことから, HCCI エンジンの量産化に向けた開発が推進されていると考えられるが, その実用化に向けては未だ解決されていない技術的課題がある。

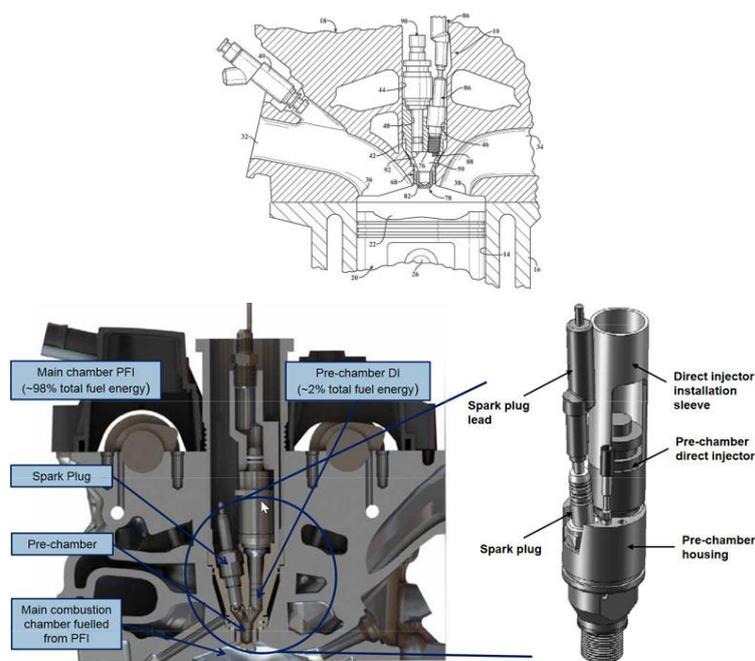


Fig.1.35 Mahle jet ignition system <sup>(328)</sup>

### 1.3 本研究の目的

以上の従来技術をまとめると、図 1.36 に示される技術が過去に研究されている。HCCI 燃焼の運転領域拡大に対応する各種制御(空気系, 燃料系, サーマルマネジメント系, 後処理システム, 使用燃料)について、多くの研究開発が実施されている。これらの制御を複合することにより HCCI の運転領域は拡大されてきており、とりわけ過給システムと組み合わせることで高負荷側への拡大効果が見込まれている。さらに SI-HCCI-SI 燃焼切替の実現性についても、EGR と A/F の協調制御、あるいはステップ的な切替制御と点火時期最適化を協調させることで目処が立ちつつあり、とりわけ空気系制御デバイスを用いることで実証されている。したがって、HCCI 燃焼の運転領域、SI-HCCI 燃焼切替については使用するエンジンシステムに応じて概ね見極められていると言える。

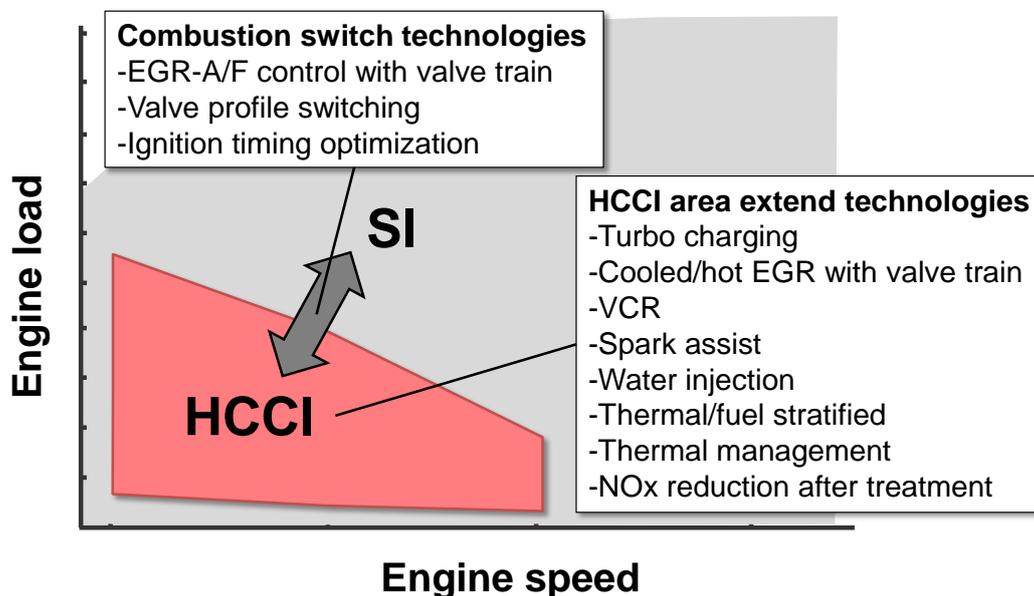


Fig.1.36 HCCI engine control technologies

一方で、HCCI 燃焼は使用環境に影響され易く、例えば燃料組成や大気環境(湿度, 大気圧, 吸気温度など)、各種デバイスの経時変化によって燃焼が変化することからロバスト性が低い燃焼方式と言える。HCCI 燃焼のロバスト性を確保するためのエンジン制御開発としては、筒内圧センサ, イオン電流, ノックセンサについて個別センサで検討がなされているものの、HCCI 燃焼を制約するパラメータは燃焼変動, 燃焼騒音, 排気成分であり、これら全てに対して検知を実現した例は無く、HCCI 燃焼エンジンシステムを制御するために必要な、燃焼状態の検知と制御を統合した例も無い。

上記を鑑み、本研究の目的を、ガソリン HCCI 燃焼エンジンのロバスト性を向上する燃焼状態検出フィードバック制御構築とした。具体的には、燃焼状態検出技術の研究、およびフィードバック制御アルゴリズムを構築することを目的としている。

## 1.4 本論文の構成

以下 2 章, 3 章, 4 章, 5 章に本研究をまとめる。以下各章の概要である。

第 2 章では HCCI 燃焼の燃焼安定性の検出技術開発について述べる。具体的には, HCCI 燃焼の低負荷域における燃焼安定性が燃料性状, エンジン冷却水温度の変化によって悪化する現象を課題とし, エンジンシステムに既に装着されているクランク角センサに着目し, 当該センサを用いた回転変動検出を行うことで, HCCI 燃焼変動を検出する手法を構築した。

第 3 章では HCCI 燃焼の燃焼騒音の検出技術開発について述べる。具体的には, HCCI 燃焼の高負荷域における燃焼騒音がエンジン冷却水温度の変化によって増大される現象を課題とし, エンジンシステムに既に装着されているノックセンサ(加速度センサ)に着目し, 当該センサを用いたエンジン振動強度検出を行うことで, HCCI 燃焼騒音を検出する手法を構築した。

第 4 章では HCCI 燃焼の NO<sub>x</sub> 排出量の検出技術開発について述べる。具体的には, HCCI 燃焼の高負荷域では自然吸気エンジンであれば吸気管絞り無し状態, 過給エンジンであれば最大過給圧状態におけるエンジン吸入空気量によって A/F のリーン化は制約を受ける。これにより高負荷側ではエンジン負荷増加に伴い A/F がリッチ側へとシフトするため NO<sub>x</sub> 排出量が増加する。これに加え, 燃料性状によって同エンジン負荷においても NO<sub>x</sub> 排出量が増加する現象を課題とし, エンジンシステムに既に装着されている点火プラグを用いたイオン電流センシングに着目し, 当該センサを用いたサーマルイオン検出を行うことで, HCCI 時の NO<sub>x</sub> 排出量を推定する手法を構築した。加えて HCCI 燃焼の燃焼位相の検出の可能性について検討した結果についても述べる。

第 5 章では第 2 章から第 4 章までの HCCI 燃焼状態検出手法を組み込んだガソリン HCCI 耐環境ロバスト制御を構築し, 燃焼状態のリアルタイム検出, リアルタイムフィードバック制御の成立性について検討した結果を述べる。

## 第2章 回転変動を用いた燃焼変動検出手法の開発

### 2.1 はじめに

HCCI 燃焼は混合気温度を制御することで自着火を発生させ、当該自着火時期を制御することで実現される。混合気温度は圧縮比、内部 EGR 率、圧縮開始時期における混合気温度、そして燃焼室内壁面温度などに影響される。圧縮比は幾何学的構造により定まり、内部 EGR 率は排気弁閉じ時期により制御することが可能であり、圧縮開始時期における混合気温度は吸気温度や吸気弁閉じ時期により制御することが可能である。一方で燃焼室内壁面温度は冷却水温度や冷却水流量によって変化するためリアルタイムでの制御は困難と言える。また自着火の発生は燃料の性状により異なることから、これも考慮して制御する必要がある。

HCCI 燃焼の燃焼安定性に対する冷却水温度と燃料性状の影響は、図 36, 37 に示す様に存在する。図 2.1 は日本国内市販のレギュラガソリンとハイオクガソリンを用いた際の HCCI 燃焼の  $COV_{imep}$  の挙動を示している。エンジンは圧縮比 12、直噴燃料噴射システムを備え吸排気に連続可変動弁システムを備える直列 4 気筒エンジンである。燃料噴射、動弁制御を同一としていても、油種が異なるだけで燃焼安定性は悪化方向へシフトしていることが分かる。

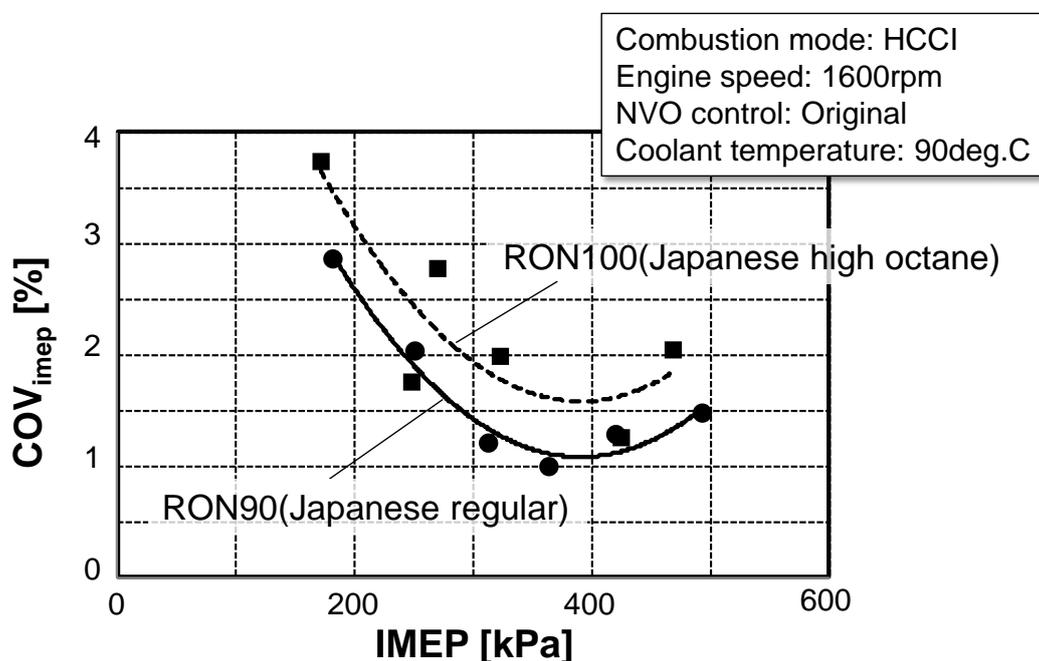


Fig.2.1 Influence of fuel property on combustion fluctuation

また図 2.2 は冷却水温度変更の際の HCCI 燃焼の  $COV_{imep}$  の挙動を示している。油種変化と同様に燃料噴射、動弁制御を同一としていても、冷却水温度が低下するのみで燃焼安定性は悪化方向へシフトしていることが分かる。燃料性状の変化や冷却水温度の低下に対する燃焼不安定化は、混合気温度の調整により安定化する手法は確立しており、図 2.3 に示す様に、負のオーバーラップ期間 NVO: Negative Valve Overlap を増大させることで自着火の安定化を図り、燃焼安定性を確保することは可能である。したがって、燃焼安定性を検出する手法を確立することが必須となる。

これらの結果は HCCI 燃焼が使用環境による影響を受け易いことを示しており、本章では燃焼変動の検出手法の検討結果について述べる。

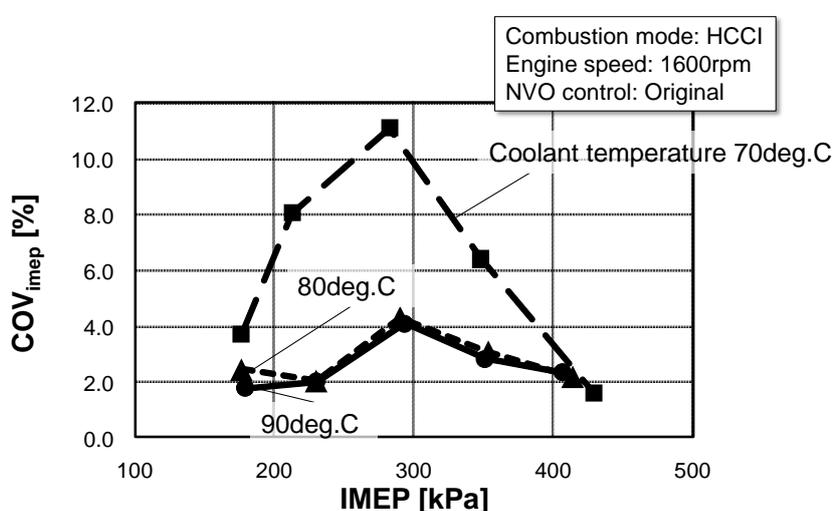


Fig.2.2 Influence of coolant temperature on combustion fluctuation

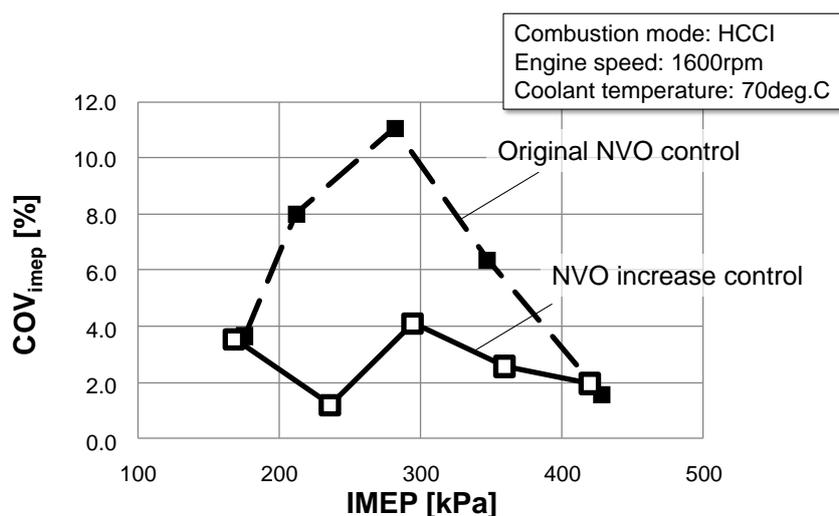


Fig.2.3 Improvement of combustion fluctuation using with increasing NVO

## 2.2 燃焼変動検出コンセプト

燃焼変動の検出手法の検討として、燃焼状態をセンシング可能なセンサは様々なセンサが想定された。表 2.1 にその代表例を示す。

Table 2.1 Combustion detection sensors

Method of combustion detection	Direct		Indirect		
Sensor	Pressure	Ion current	A/F	<b>Crank angle</b>	Knock
Potential of detection for each cylinder	○	○	△	○	○
Issues	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Durability</li> <li>•Temperature drift</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Noise</li> <li>•Sensitivity setting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Response</li> <li>•Configuration for each cylinder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•<b>Calculation load</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Calculation load</li> <li>•Sensitivity setting</li> </ul>

燃焼状態をセンシング可能なセンサは直接型と間接型に分類される。直接型センサとしては筒内圧センサとイオン電流センサが挙げられる。筒内圧センサは燃焼解析に用いられることと従来研究においても検討されていることから気筒別での高精度な燃焼状態検出が可能と考えられる。一方でガソリンエンジンにおいては 2016 年時点で装着されている例は少ない。量産採用が進まない主要因は、コスト増加と実使用環境を想定した際の熱ドリフトの影響があるものと推測される。イオン電流センサは既にエンジンシステムに装着されている例があり、主に SI 燃焼の燃焼安定性検出に用いられている。一方で後述の章で述べるが、イオン電流センサは燃焼によって発生するイオンによって流れる電流を計測する技術であり、HCCI 燃焼の様な低温燃焼では発生するイオン量が少ないため、信号が微弱となり燃焼変動検出には適さないと考えられる。間接型センサとしては A/F センサ、クランク角センサ、ノックセンサが挙げられる。いずれもエンジンシステムに搭載されている既存センサであり、これを活用することで安価な検出が可能となる。A/F センサについては主に排気管集合部に単一で備えられ、排気中 O<sub>2</sub> 濃度に応じて信号を発生するものの、装着レイアウトによっては検出に遅れが生ずる。また集合部では全ての気筒の排気成分が流入するため、気筒別での燃焼状態を推定するのは困難と言える。したがって気筒別に A/F センサを備える必要性があるため、追加デバイスとなり安価とは言えない。クランク角センサはクランク角周期での燃料噴射制御、点火時期制御、動弁制御の機軸となる信号を出力するためエンジン制御においては必要不可欠なセンサと言える。またノックセンサは SI 燃

焼時のノッキング検出に用いられることから、クランク角センサ同様に必要不可欠なセンサと言える。この中で、クランク角センサとノックセンサは燃焼中、あるいは燃焼直後に応答するクランクシャフトの回転変化、エンジン筐体の振動変化を検出することから、気筒別の燃焼状態検出が可能である。したがって、本研究は燃焼変動の検出手法におけるセンサとしてクランク角センサに着目し、真値は筒内圧センサ信号から得られた燃焼変動値とすることを想定した。

図2.4に回転変動検出手法のコンセプトについて示す。図の横軸はクランク角度を示し、縦軸は上から筒内圧力、燃焼圧トルク、クランクシャフトの回転速度(以下、クランク角速度 $\omega$ )を示している。図を用いて筒内圧力と燃焼圧トルク、およびクランク角速度 $\omega$ の関係を説明する。燃焼によって筒内で発生した圧力変化は、クランクシャフトに対して仕事をす。つまり燃焼圧トルクを発生する。その結果、クランクシャフトは回転し、クランク角速度 $\omega$ が発生する。したがって、以上の力の伝達に基けば燃焼圧力の変動はクランク角速度 $\omega$ から検出することが理論的に可能である。燃焼変動検出コンセプトは上記のクランク角速度情報から燃焼圧力の変動を予測する手法である。

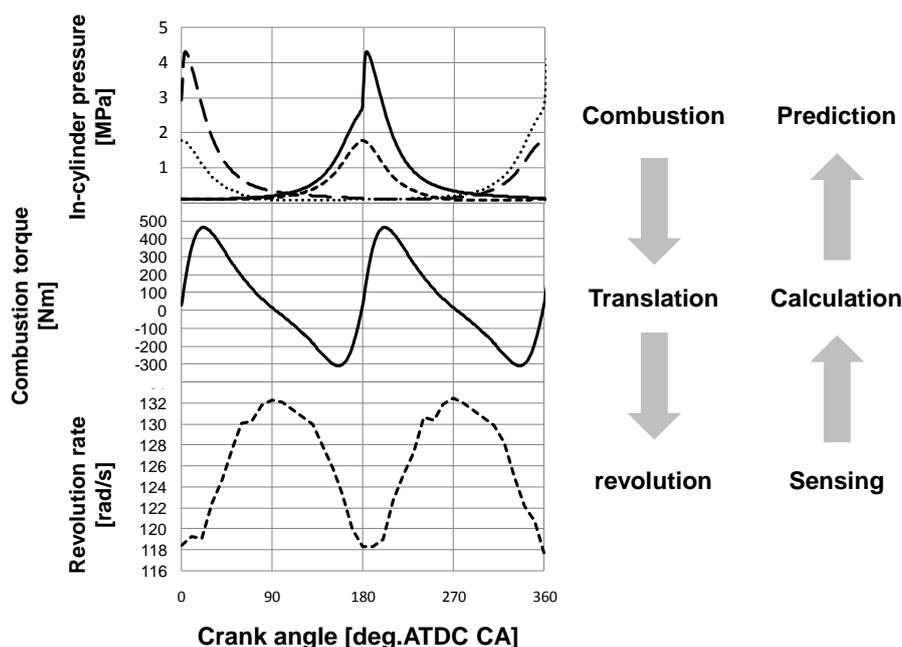


Fig.2.4 Relationship between in-cylinder pressure and revolution rate of crank shaft

### 2.3 回転変動検出手法の検討

クランク角速度に基く燃焼変動推定手法として、3種類の演算式について比較検討した。表2.2にクランク角センサ信号を用いた燃焼変動検出手法の演算式3つについて、その特徴を示す。各演算式共にクランク角センサ信号に基づきクランク角速度 $\omega$ を演算する。以下、3つの演算式はそれぞれ $\Delta\omega$ 検出法、角加速度検出法、燃焼圧トルク推定法と呼ぶ。 $\Delta\omega$ 検出法と燃焼圧トルク推定法は、IMEPを推定し、この推定値の標準偏差を演算することで燃焼変動指標である $COV_{imep}$ を出力する。角加速度検出法は、1回の燃焼につき2点の時間計測結果に基づき当該燃焼サイクルにおけるクランク角速度 $\omega$ を演算し、このクランク角速度 $\omega$ を用いて $COV_{imep}$ を推定する。クランク角センサに要求される分解能は角加速度検出法が最も大きくなる。また計算負荷は燃焼圧トルク推定法が最も大きく、 $\Delta\omega$ 検出法、角加速度検出法は比較的負荷は小さい傾向となる。

Table 2.2 Calculation methods of combustion fluctuation detection using revolution rate of crank shaft

Method	$\Delta\omega$ method	Angular acceleration method	Combustion torque estimation method
Sensor	Crank angle sensor		
Resolution capability for sensor	1deg.CA	Over 10deg.CA	1deg.CA
Estimation parameter	IMEP, $\sigma$ IMEP	$\sigma$ IMEP	IMEP, $\sigma$ IMEP
Detection capability for each cylinder	Possible	Possible	Possible
Data sampling requirement	Over 4points	Over 2points	Over 720points

各演算式の詳細を説明する。 $\Delta\omega$ 検出法の演算について図2.5を用いて説明する。図2.5に $\Delta\omega$ 検出法のクランク角速度 $\omega$ 検出時期を示す。エンジンが運転されている間、クランク角速度 $\omega$ は逐次変動している。 $\Delta\omega$ 検出法は、1回の燃焼に対し2点のクランク角速度 $\omega$ 検出ウィンドウを設定する。この時、検出ウィンドウではクランク角度 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ における時間 $T$ を検出する。この検出時間 $T_1$ と $T_2$ の差分を用いて式(2.1)を用いてクランク角速度 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ を演算する。この $\omega_1$ と $\omega_2$ との差分を取ることで $\Delta\omega$ を演算する。この $\Delta\omega$ はIMEPと等価であるため、検出対象気筒の $\Delta\omega$ と筒内圧力から得られるIMEPの相関式を予め取得しておくことで $\Delta\omega$ からIMEPを推定することが可能である。本研究では、燃焼変動検出に主眼を置き $\Delta\omega$ の変動係数(以下、 $COV_{\Delta\omega}$ )と筒内圧力から演算された $COV_{imep}$ との相関を検証することとした。

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \frac{\theta_2 - \theta_1}{T_1} \\ \omega_2 &= \frac{\theta_4 - \theta_3}{T_2} \\ \Delta\omega &= \omega_2 - \omega_1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \text{式2.1}$$

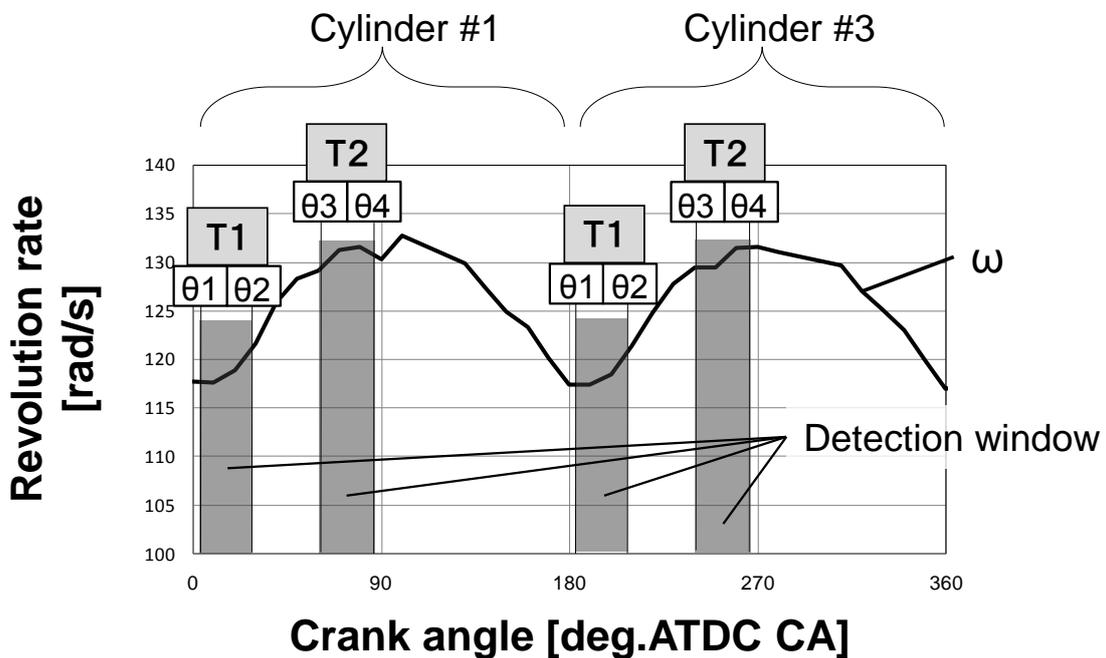


Fig.2.5 Detection method of  $\Delta\omega$  method

次に角加速度検出法の演算について、図2.6を用いて説明する。図2.6に角加速度検出法でのクランク角速度 $\omega$ 検出時期について示す。角加速度検出法は1燃焼に対して1つの検出ウィンドウを設定し、検出ウィンドウの開始と完了における時間 $T_i$ を検出する。検出した時間 $T_i$ から式(2.2)を用い検出ウィンドウにおけるクランク角速度 $\omega_i$ を演算する。ここで添え字の $i$ は気筒番号である。得られたクランク角速度 $\omega_i$ と隣接する気筒のクランク角速度 $\omega_{i+1}$ との差分を演算し、 $d\omega_{i,i+1}$ を演算する。添字の $i$ は気筒番号であり $i+1$ は差分演算をした気筒番号である。 $d\omega_{i,i+1}$ の標準偏差(以下、 $\sigma d\omega$ )と筒内圧力から演算される $COV_{imep}$ との相関を検証する。

$$\left. \begin{aligned} \omega_i &= \frac{\theta_2 - \theta_1}{T_i} \\ \omega_{i+1} &= \frac{\theta_2 - \theta_1}{T_{i+1}} \\ d\omega &= \omega_{i+1} - \omega_i \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \text{式2.2}$$

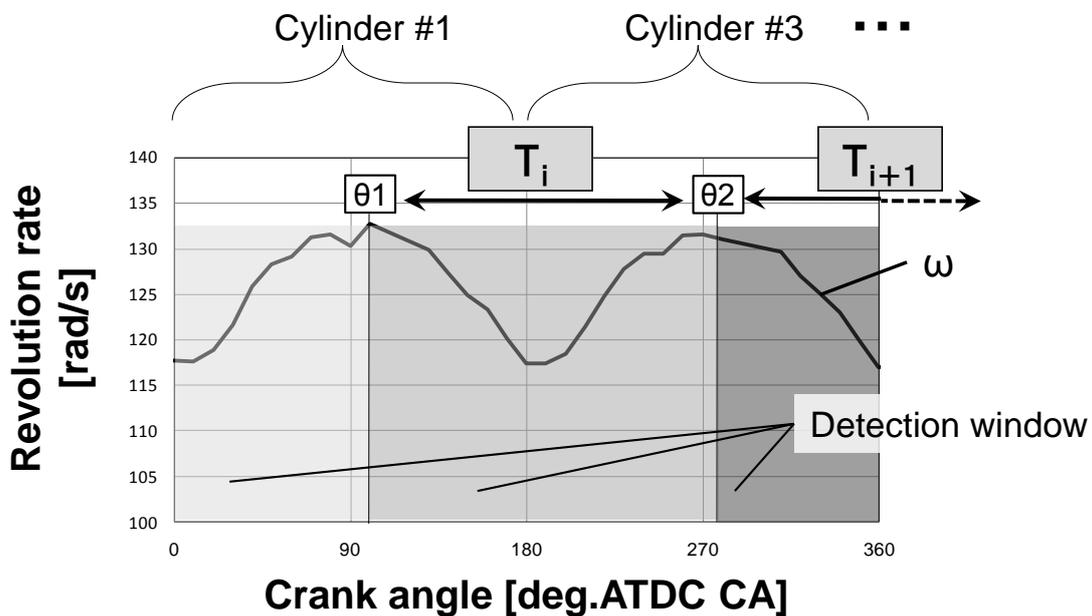


Fig.2.6 Detection method of angular acceleration

次に燃焼圧トルク推定法の演算について図2.7を用いて説明する．図2.7に燃焼圧トルク推定法のクランク角速度 $\omega$ 検出時期を示す．燃焼圧トルク推定法は1サイクル(吸気行程，圧縮行程，膨張行程，排気行程)に対し，720個の検出ウィンドウを設定する．それぞれの検出ウィンドウにおいて経過時間 $T_i$ を検出し，式(2.3)を用いてクランク角速度 $\omega_i$ を演算する．ここで添え字の $i$ はクランク角度である．本手法はクランク角速度 $\omega_i$ からクランクシャフトトルクを算出し，慣性トルクと負荷トルクを差し引くことで燃焼圧トルクを演算する．つまり，燃焼圧トルクと慣性トルク，および負荷トルクの合成トルクがクランクシャフトトルクであると仮定したモデルである．具体的にはクランク角速度 $\omega$ を用いて式(2.4)により燃焼圧トルク $T_{comb}$ を演算する．式(2.4)の $T$ はクランクシャフトの合成トルク， $J$ は慣性モーメント， $C$ は摩擦係数， $T_{inert}$ は慣性トルク， $T_{load}$ は負荷トルク(トランスミッションを駆動するトルク)である． $T_{inert}$ は式(2.5)を用いて算出する．式(2.5)の $M_{rec}$ はピストン質量とコネクティングロッドの往復運動部相当質量， $r$ はクランク半径， $l$ はコンロッド長さである． $T_{load}$ は式(2.6)

を用いて算出する。TDC, およびBDCにおける $T_{comb}$ ,  $T_{inert}$ が零となる特性を利用し, TDC, BDCにおける $T_{load}$ を得る。TDCとBDC間は $T_{load}$ を線形近似し, 各クランク角度における $T_{load}$ とする。Tは,  $\omega$ の微分値と $\omega$ から算出できる。さらにTを各周波数成分に分離し, 振幅補正, 位相補正を行った後に合成する手法を用いた。式(2.7)に示す様に, 1次から4次までの正弦波成分 $\varphi_{j,i}$ を予めマトリクスとして用意する。次にデータとして取得する1サイクルのクランク角度 $\omega$ と前記 $\varphi_{j,i}$ を乗じ, クランク角度1deg.CAの1次から4次までの周波数成分 $\Omega_j$ を演算する。以上の演算をクランク角度1deg.CA毎に行い1サイクル720点の $\Omega_j$ を演算する。この1次から4次の周波数成分を合成することでTを得る。以上の演算で得られた $T_{inert}$ ,  $T_{load}$ , Tを式(2.4)に代入することで, 燃焼圧トルク $T_{comb}$ を演算する。式(2.8)を用いて燃焼圧トルク $T_{comb}$ を1サイクルに渡って積分し, 行程容積Vで除することでIMEP( $\omega$ )を得る。式(2.8)のVは1気筒あたりの行程容積である。演算されたIMEP( $\omega$ )の変動係数 $COV_{imep(\omega)}$ と筒内圧力から演算される $COV_{imep(p)}$ との相関を検証する。

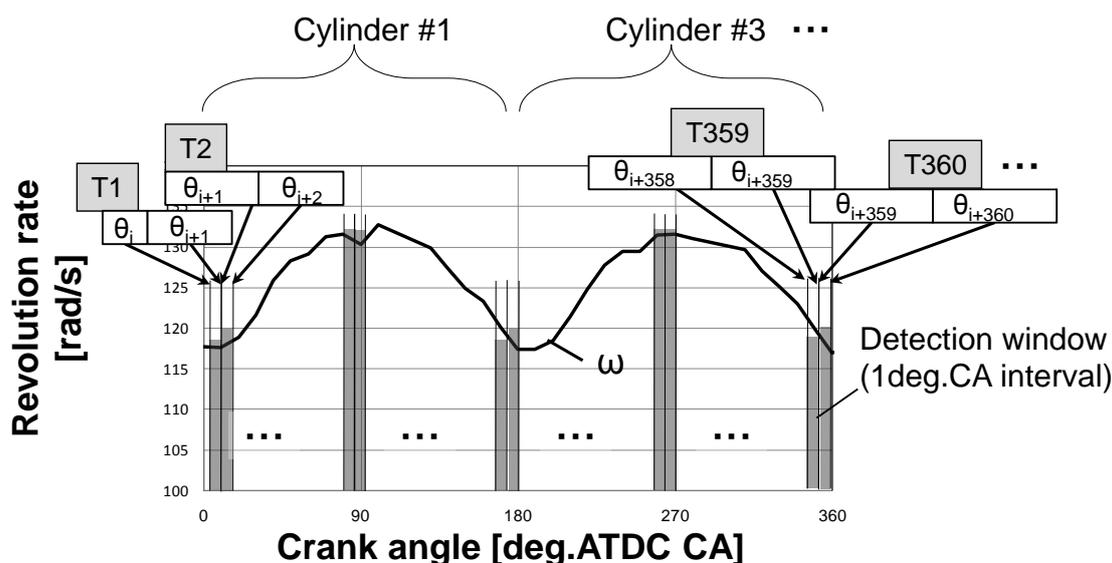


Fig.2.7 Detection method of combustion torque estimation method

$$\left. \begin{aligned} \omega_i &= \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{T_i} \\ i &= 1, 2, \dots, 720 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \text{式2.3}$$

$$\begin{aligned} T_{comb} &= J \frac{d\omega}{d\theta} + C\omega - T_{inert} - T_{load} \\ &= T - T_{inert} - T_{load} \end{aligned} \dots \dots \dots \text{式2.4}$$

$$\begin{aligned} T_{inert} &= f(M_{rec}, \bar{\omega}, r, l) \\ &= -M_{rec} \cdot r \cdot \bar{\omega}^2 \cdot (-\cos \theta - r/l \cdot \cos 2\theta) \dots \dots \dots \text{式2.5} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} T_{load} &= J \frac{d\omega}{d\theta} + C\omega \\ T_{comb} &= T_{inert} = 0 @ TDC, BDC \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \text{式2.6}$$

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d\omega}{d\theta} + C\omega &= \sum_{j=1}^4 \Omega_j \\ [\Omega_1 \quad \Omega_2 \quad \Omega_3 \quad \Omega_4] &= [\omega_1 \quad \dots \quad \omega_{720}] \cdot \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \dots & \phi_{4,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{1,720} & \dots & \phi_{4,720} \end{bmatrix} \\ \phi_{j,i} &= \cos(2i\theta)/90 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \text{式2.7}$$

$$IMEP(\omega) = \frac{1}{V} \int_{\theta_{intakeBDC}}^{\theta_{intakeBDC} + 4\pi} \left( T_{comb} \cdot \frac{d\theta}{d\theta} \right) \dots \dots \dots \text{式2.8}$$

本研究では、上記3つの演算式をHCCI燃焼変動検出に適用し、検出精度の比較検証を行った。

## 2.4 実験装置および実験条件

図2.8に実験エンジンの外観を示す。表2.3にエンジン諸元を示す。実験エンジンの総排気量は1998cm<sup>3</sup>、直列4気筒であり、SI燃焼とHCCI燃焼を燃料噴射、およびバルブタイミング制御により実施できる。圧縮比は12とし、燃料噴射はサイドマウント直噴とした。動弁システムには連続可変バルブタイミングと連続可変バルブリフト機構を備え、これを吸排気に搭載した。エンジン制御にはRPT (Rapid Proto Typing) を使用し、噴射時期、動弁開閉時期、点火時期、スロットル開度を制御した。筒内圧センサは各気筒に装着し、燃焼解析装置により計測した。クランク角センサ信号の計測、およびクランクシャフトの回転変動演算はRPTにより実施した。クランク角センサは実験エンジンの標準装着品(10deg.CA分解能)を使用した。実験条件は、表2.4に示す様にエンジン回転数1200rpmでのIMEP違いとし、NVOを変更することで燃焼変動を作為的に発生させた。



Fig.2.8 Test engine

Table 2.3 Specifications of test engine

4-cylinder 4-stroke engine	
Bore × stroke	89.0 × 80.3 mm
Displacement	1,998cm <sup>3</sup>
Compression ratio	12.0
Valve control	Phase & lift (Intake/exhaust)
Fuel Supply	Direct Injection
Fuel	Regular gasoline

Table 2.4 Experimental condition

Engine speed [rpm]	1200
IMEP [kPa]	200 ~ 400
Negative valve overlap [deg.CA]	160 ~ 140
Coolant temperature [deg.C]	90

## 2.5 回転変動検出手法の選定

図2.9, 2.10, 2.11に各検出手法を用いた際の $COV_{imep}$ と検出パラメータの相関を示す。縦軸は筒内圧センサ信号を処理した $COV_{imep}$ 、横軸は $\Delta\omega$ のCOV,  $d\omega$ のCOV, 燃焼圧トルク推定法から得られた $IMEP(\omega)$ のCOVを示している。COVは実験エンジンの4気筒分全てのサイクルを演算対象とし、全気筒変動(気筒間, 気筒別を含む)の指標値で比較した。

いずれの検出手法でも $COV_{imep}$ の増加に伴い検出パラメータも増加する傾向を示している。これは燃焼変動がクランクシャフトの回転速度に影響することを示している。しかしながら、各検出手法の決定係数 $R^2$ を比較すると、 $\Delta\omega$ 検出法  $R^2=0.1687$ , 角加速度検出法  $R^2=0.8687$ , 燃焼圧トルク推定法  $R^2=0.1713$ と角加速度検出法の相関の高さが示される結果となった。

$\Delta\omega$ 検出法と燃焼圧トルク推定法は、演算時のクランク角度分解能が小さいことを特徴とするが、本開発では既存クランク角センサを用いたため、クランク角度分解能が10deg.CAであることにより検出精度が低下したと推測する。角加速度検出法は $IMEP$ の変動を検出することに主眼を置いておりクランク角度分解能は大きくても良い。各サイクルのサイクル平均回転速度が $IMEP$ を代表する指標値として使用でき、当該サイクル平均回転速度の気筒間差分の変動が $IMEP$ の変動と物理的に同等であることが、高い相関を得た要因と推測される。

以上の結果を鑑み、角加速度検出法に着目し気筒別検出精度のさらなる改善を狙った。

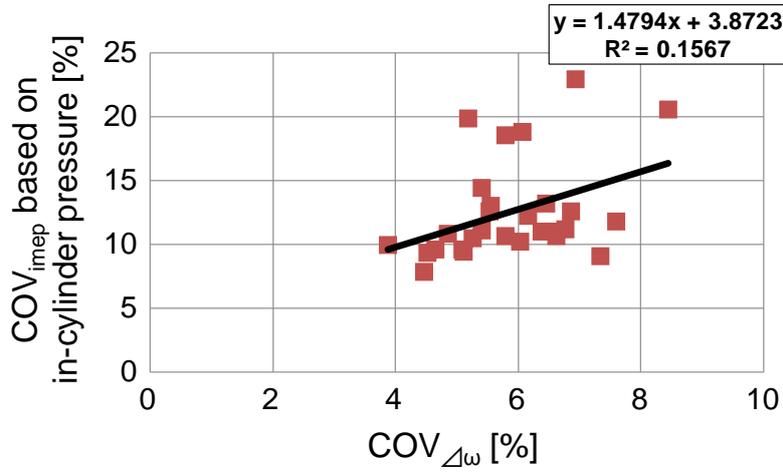


Fig. 2.9 Correlation between  $COV_{imep}$  and  $COV_{\Delta\omega}$

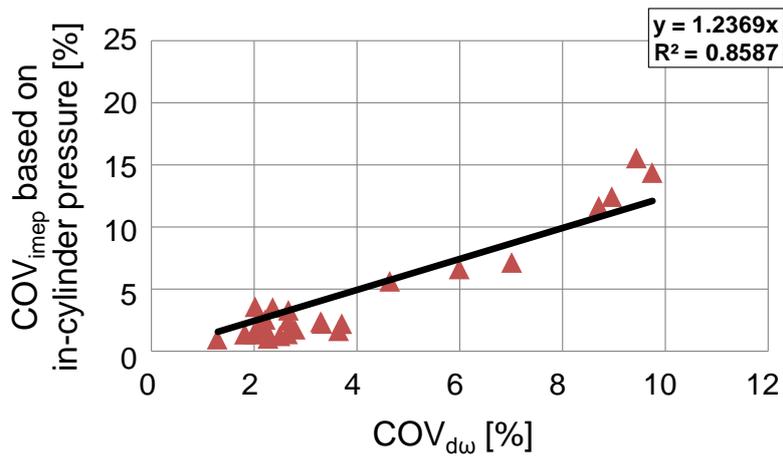


Fig. 2.10 Correlation between  $COV_{imep}$  and  $COV_{d\omega}$

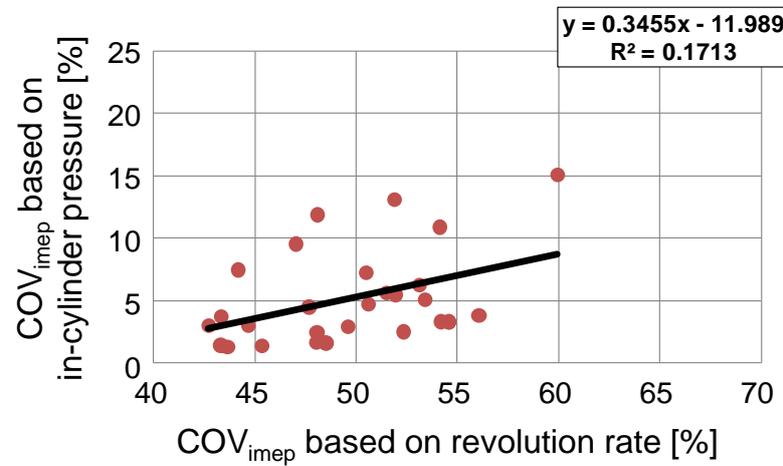


Fig. 2.11 Correlation between  $COV_{imep(p)}$  and  $COV_{imep(\omega)}$

## 2.6 検出精度改善

2.3節にて角加速度検出法の検出原理について示した様に，本手法の検出精度に影響する因子はクランク角速度 $\omega$ の検出時期，および角加速度 $d\omega$ を演算する際の演算対象気筒である．クランク角速度 $\omega$ の検出時期は燃焼による筒内圧力上昇がピストンを押し下げる期間において設定することが望ましい．一方で，HCCI燃焼においては急峻な燃焼であるため，その最適時期を明らかにする必要があった．したがって，クランク角速度 $\omega$ の検出時期をサーベイすることにより検出精度に及ぼす影響を実験的に確認した．

表2.5に実験条件を示す．最初にパターン1として，検出開始時期を20deg.ATDC CAに固定し，検出完了時期を30deg.ATDCから190deg.ATDCまで10deg.CA刻みでサーベイした．次にパターン2として，パターン1で最も高い検出精度が得られた検出完了時期に固定し，検出開始時期を0deg.ATDC CAから170deg.ATDC CAまで10deg.CA刻みでサーベイした．

Table 2.5 Experimental condition for optimizing detection timing

Pattern1		Pattern2	
Detection starting crank angle [deg.ATDC CA]	Detection finishing crank angle [deg.ATDC CA]	Detection starting crank angle [deg.ATDC CA]	Detection finishing crank angle [deg.ATDC CA]
20 (fixed)	30 – 190 (interval 10)	0 – 170 (interval 10)	Optimized timing of pattern1

図2.12に検出完了時期の変更による決定係数に及ぼす影響を示す．縦軸は全気筒を対象とする $COV_{imep}$ と $od\omega$ の決定係数 $R^2$ ，横軸は検出完了時期を示している．検出完了時期の遅角と共に決定係数は改善する傾向を示した．決定係数が最大となる検出完了時期は180deg.ATDC CA(膨張下死点)となり，1サイクル毎にクランク角速度 $\omega$ の検出時期は分離することが検出精度向上に貢献することが示された．

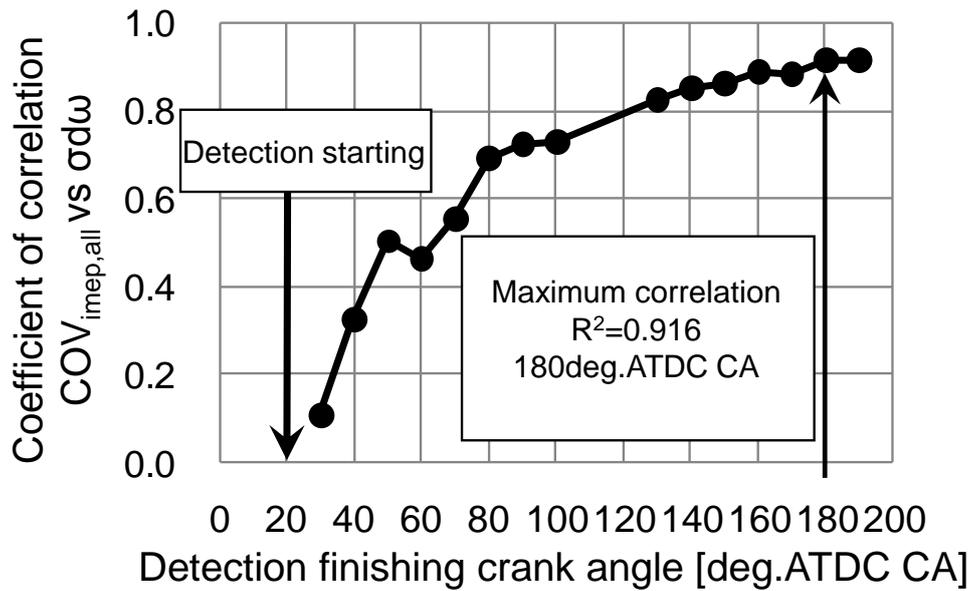


Fig. 2.12 Optimization of detection finishing crank angle (Pattern1)

図2.13に検出開始時期の変更による決定係数に及ぼす影響を示す. 縦軸は全気筒を対象とする $COV_{imep}$ と $\sigma d\omega$ の決定係数 $R^2$ , 横軸は検出開始時期を示している. 検出時期の進角と共に決定係数は改善する傾向を示した. 決定係数が最大となる検出時期は30deg.ATDC CAとなり, 検出開始時期はTDCではなく, 燃焼による筒内圧力上昇後に設定することで検出精度を改善することが示された.

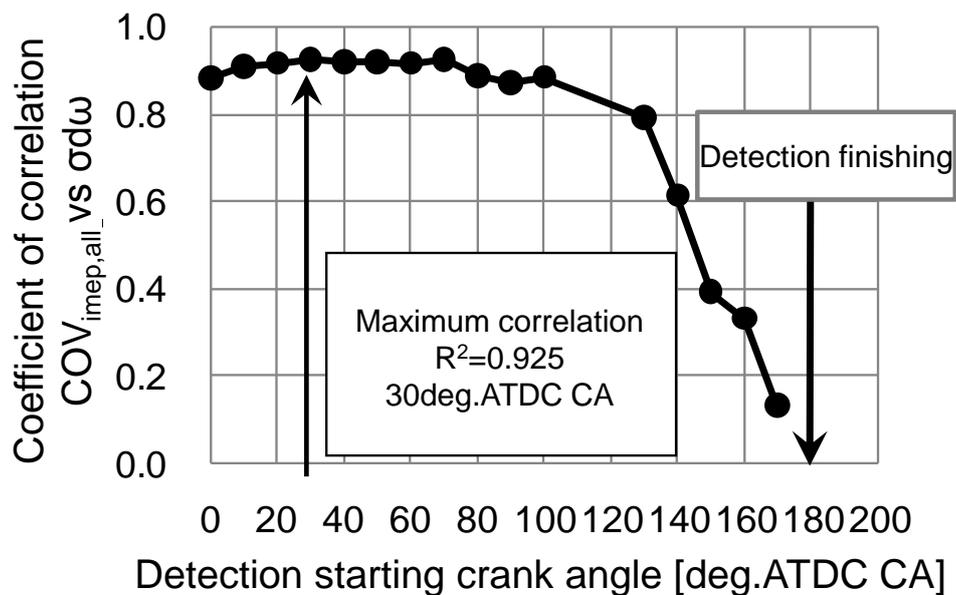


Fig. 2.13 Optimization of detection starting crank angle (Pattern2)

上記検出時期の最適化によって気筒別の検出精度も改善した。図2.14に従来の $\omega$ 検出時期と検出時期最適化による決定係数を気筒別に示す。 $\omega$ 検出時期の最適化は気筒別の燃焼変動の検出精度を改善しており、とりわけ気筒毎に決定係数がばらついていた従来検出時期に対する改善効果が見られた。なお従来の $\omega$ 検出時期は検出開始時期100deg.ATDC、検出完了時期280deg.ATDCであり、SI燃焼時の触媒暖機運転時(燃焼位相が遅角された条件)において検出精度を改善したものであり、この結果からもSI、HCCI燃焼での検出時期切替の必要性が示されている。

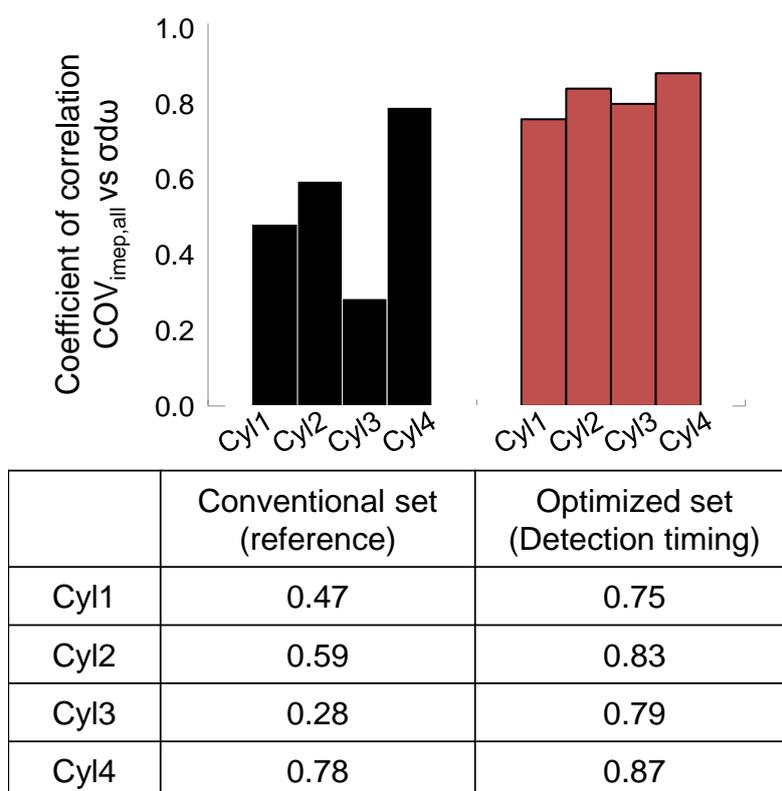


Fig. 2.14 Improvement of detection accuracy by optimized detection timing

$\omega$ 検出時期の変更により検出精度の改善が得られた要因について、以下考察する。燃焼により発生する燃焼圧トルクの変化から考察すると、以下に示す2つの要因が影響したと考えられる。

(1) 4気筒エンジンの場合、合成燃焼圧トルクは180deg.ATDC CAにおいて零となる。図2.15はHCCI燃焼時の4気筒エンジンの合成燃焼圧トルクである。クランク角度180deg.ATDC CAにおいて、合成燃焼圧トルクは零となることから、次燃焼気筒の筒内圧力上昇の影響を受けない時期として最適であったと考えられる。

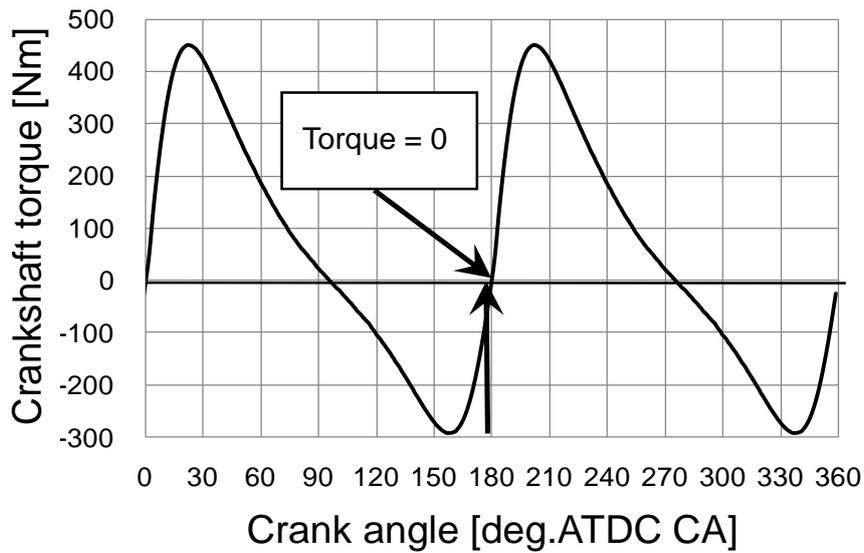


Fig. 2.15 Crankshaft torque by combustion of 4-cylinder engine

(2)HCCI燃焼による筒内圧力上昇が燃焼圧トルクとして伝達され始める時期が30deg.ATDC CAであったと考えられる. 図2.16はHCCI燃焼時の筒内圧力と燃焼圧トルクである. 最高筒内圧力を発生する時期はクランク角度10~20deg. ATDC CAであるのに対し, 最大合成燃焼圧トルクとして伝達される時期はクランク角度20~30deg.ATDC CAであり遅れが存在する. つまり燃焼圧がクランク角速度 $\omega$ に影響する時期は, クランク角30deg.ATDC CA以降であると考えられる. この要因により, 検出開始時期が30deg.ATDC CAにおいて検出精度の改善が得られたと考えられる.

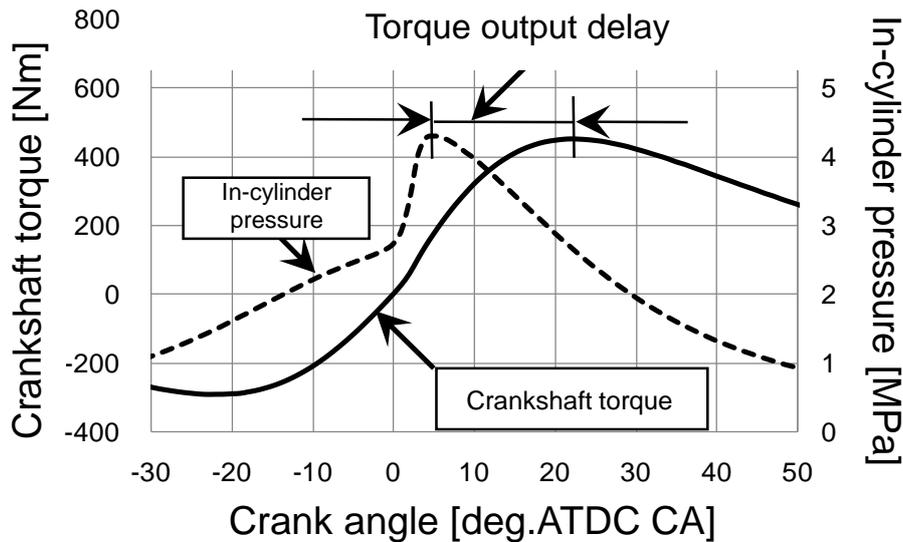


Fig. 2.16 Crankshaft torque and in-cylinder pressure of HCCI combustion

また図2.17に示す様に、HCCI燃焼時と無燃焼時の燃焼圧トルクでは上記考察を裏付ける結果が得られており、30deg.ATDC CA近傍から燃焼有無での燃焼圧トルクの差異が明確になっている。さらに180deg.ATDC CAにおいて燃焼圧トルクは零となる。燃焼と燃焼圧トルクの関係に基づき、 $\omega$ 検出時期の変更により検出精度が変化したと考えられ、上記燃焼圧トルクの変化時期と零となる時期に検出開始、および検出完了時期を設定することにより最大検出精度が得られたと考えられる。

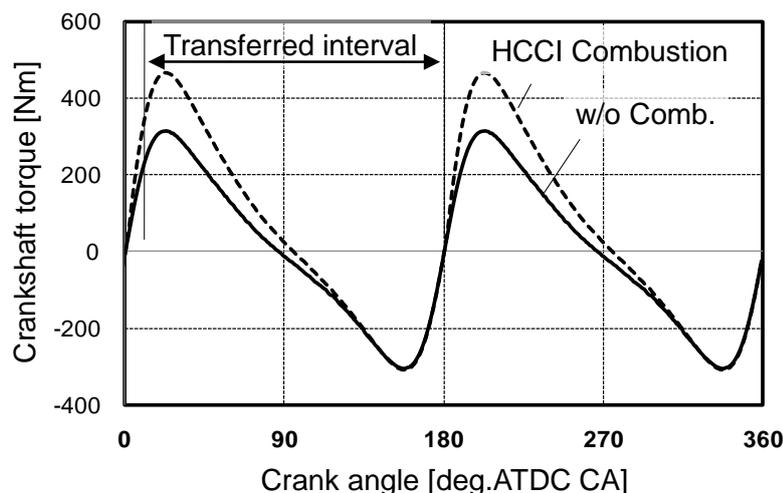
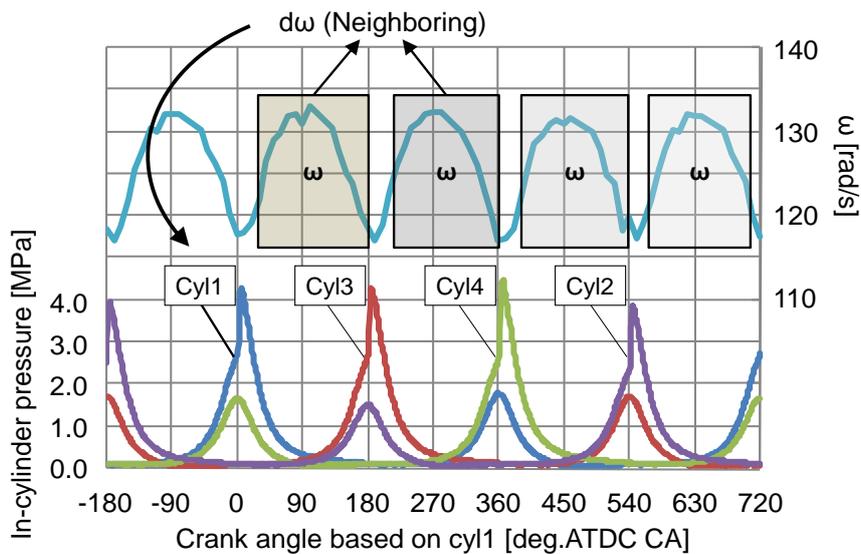


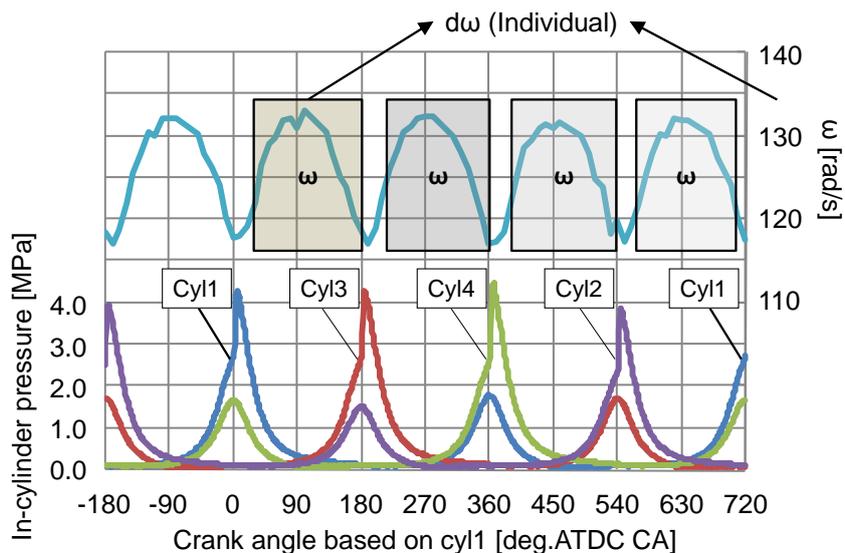
Fig. 2.17 Crankshaft torque of HCCI combustion and w/o combustion

以上検出時期の最適化についてまとめると、角加速度検出法のクランク角速度 $\omega$ 検出時期をHCCI燃焼の特性を考慮し最適化することにより、HCCI燃焼の燃焼変動に対する角加速度 $d\omega$ の変動の決定係数は改善され、この相関関係を用いることによって高い精度で燃焼変動を推定可能と考えられる。

以上の結果を最適検出時期として採用し、続けて $d\omega$ 算出気筒の検討を行った。前記検討までは $d\omega$ 算出対象気筒は隣接気筒間である。したがって気筒別の燃焼変動に着目してはいなかった。そこで $d\omega$ 算出対象気筒を同一気筒間とすることで気筒別燃焼変動の検出精度を改善することを狙った。図2.18に隣接気筒間の $d\omega$ 算出手法と同一気筒間の $d\omega$ 算出手法について概要図を示す。図中左縦軸は筒内圧力、右縦軸はクランク回転速度 $\omega$ 、横軸は1番気筒を基準とするクランク角度である。4気筒エンジンでの筒内圧波形は180deg.CA周期で増減を繰り返す、同時にクランク回転速度 $\omega$ も増減している。角加速度検出法は角気筒の膨張行程に同期するクランク回転速度 $\omega$ を演算している。 $d\omega$ 算出気筒が隣接気筒間である場合は1番、3番、4番、2番気筒の順で燃焼順序に応じて差分演算する。 $d\omega$ 算出気筒が同一気筒間である場合、例えば1番気筒の膨張行程で検出されたクランク回転速度 $\omega$ と、次に1番気筒の膨張行程で検出されたクランク回転速度 $\omega$ の差分を演算する。これにより検出対象気筒を絞り込むことができると共にサイクル変動の検出精度を改善することを狙った。



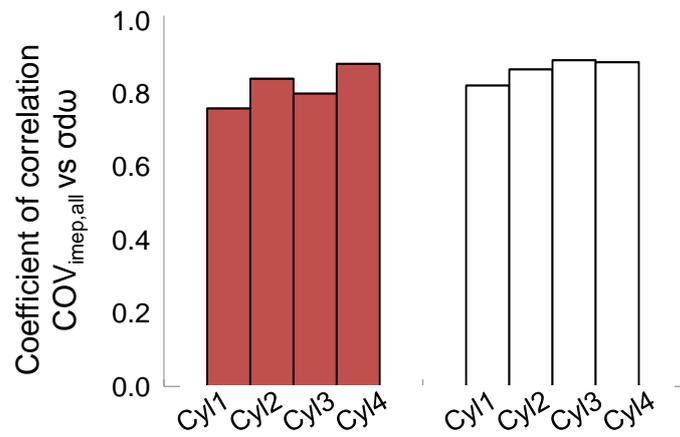
(Neighboring cylinder calculation)



(Individual cylinder calculation)

Fig. 2.18 Calculation method of  $d\omega$

$d\omega$ 算出気筒の同一気筒化による検出精度に及ぼす影響を図2.19に示す。同一気筒間演算を用いたことで気筒別燃焼変動の検出精度はいずれの気筒においても改善する結果が得られた。この要因としては、検出対象気筒におけるサイクル変動に着目したことによると考えられる。なお、同一気筒間演算方式では特定気筒での常時失火を検出することは理論的にできない。なぜなら非燃焼状態においてもサイクル変動が無いと判断できるためである。したがって、気筒別燃焼変動検出には同一気筒間 $d\omega$ を用い、常時失火気筒の検出には隣接気筒間 $d\omega$ を用いることとし、リアルタイム検出ロジックには両方を搭載することとした。



	Optimized set (Detection timing) (Neighboring)	Optimized set (Detection timing) (Individual)
Cyl1	0.75	0.81
Cyl2	0.83	0.86
Cyl3	0.79	0.88
Cyl4	0.87	0.87

Fig. 2.19 Improvement of detection accuracy by optimizing  $d\omega$  calculation

## 2.7 本章の結論

HCCI燃焼の燃焼変動検出手法として既存クランク角度センサを用いた回転変動検出手法を検討し、以下結論を得た。

$\Delta\omega$ 検出法，燃焼圧トルク推定法に比べ，角加速度検出法は既存クランク角度センサの分解能でも高い検出精度を得ることができた。角加速度検出法のHCCI燃焼に対する検出精度改善を狙い，クランク角度 $\omega$ と角加速度 $d\omega$ の演算手法を最適化し，角加速度検出法がHCCI燃焼の燃焼変動検出手法として適用可能であることを示した。表2.6に角加速度検出法の検出精度改善結果を示す。HCCI燃焼への適用には，クランク角速度 $\omega$ の検出開始時期を30deg.ATDC CA，検出完了時期を180deg.ATDC CAとし，角加速度 $d\omega$ の算出対象気筒を同一気筒間とすることで高い気筒別での燃焼変動の検出精度を得ることができる。さらに角加速度 $d\omega$ の算出対象気筒を隣接気筒間と同一気筒間の両方とすることで上記検出精度と常時失火などの連続的に発生する異常燃焼を検出することを可能とした。

Table 2.6 Conclusion of optimizing detection method for HCCI combustion

		Conventional set (reference)		Optimized set (Detection timing)		Optimized set (Detection timing)	
$\omega$ detection timing [deg.ATDC CA]		100	280	30	180	30	180
d $\omega$ calculation cylinder		Neighboring		Neighboring		Individual	
Detection accuracy for cylinder to cylinder		0.858		0.913		0.925	
Detection accuracy (cycle to cycle)	Cyl1	0.473		0.75		0.81	
	Cyl2	0.59		0.83		0.86	
	Cyl3	0.28		0.79		0.88	
	Cyl4	0.78		0.87		0.87	
Detection phenomena		-		Continuously misfire		Combustion fluctuation	

### 第3章 エンジン振動検出を用いた燃焼騒音検出手法の開発

#### 3.1 はじめに

前章で述べた様に、HCCI 燃焼は混合気温度を制御することで自着火を発生させ、当該自着火時期を制御することで実現される。その一方で、燃焼室内壁面温度は冷却水温度や冷却水流量によって変化するためリアルタイムでの制御は困難と言える。また自着火の発生は燃料の性状により異なることから、これも考慮して制御する必要がある。

HCCI 燃焼の燃焼騒音指標である最大圧力上昇率  $dp/d\theta_{max}$  に対する冷却水温度影響は、図 3.1 に示す様に存在する。図 3.1 は冷却水温度を 70deg.C と 90deg.C に変更際の HCCI 燃焼の  $dp/d\theta_{max}$  の挙動を示している。エンジンは圧縮比 12、直噴燃料噴射システムを備え吸排気に連続可変動弁システムを備える直列 4 気筒エンジンである。燃料噴射、動弁制御を同一としていても、冷却水温度が異なるのみで燃焼騒音は悪化方向へシフトしていることが分かる。

図 3.2 に示す様に、HCCI 燃焼によって得られる熱効率改善効果は、HCCI 燃焼での高負荷側ほど大きい傾向にあり、高負荷側の HCCI 燃焼の運転領域を制限する要素が燃焼騒音である。HCCI 燃焼の  $dp/d\theta_{max}$  を検出する手法が無ければ、実使用環境下での安全マージンを取る制御設計となり、HCCI 燃焼の運転範囲を狭めざるを得ない。これにより高熱効率領域が縮小することとなる。

したがって、燃焼騒音指標である  $dp/d\theta_{max}$  を正確に検出する手法が必要不可欠である。本章では  $dp/d\theta_{max}$  の検出手法の検討結果について述べる。

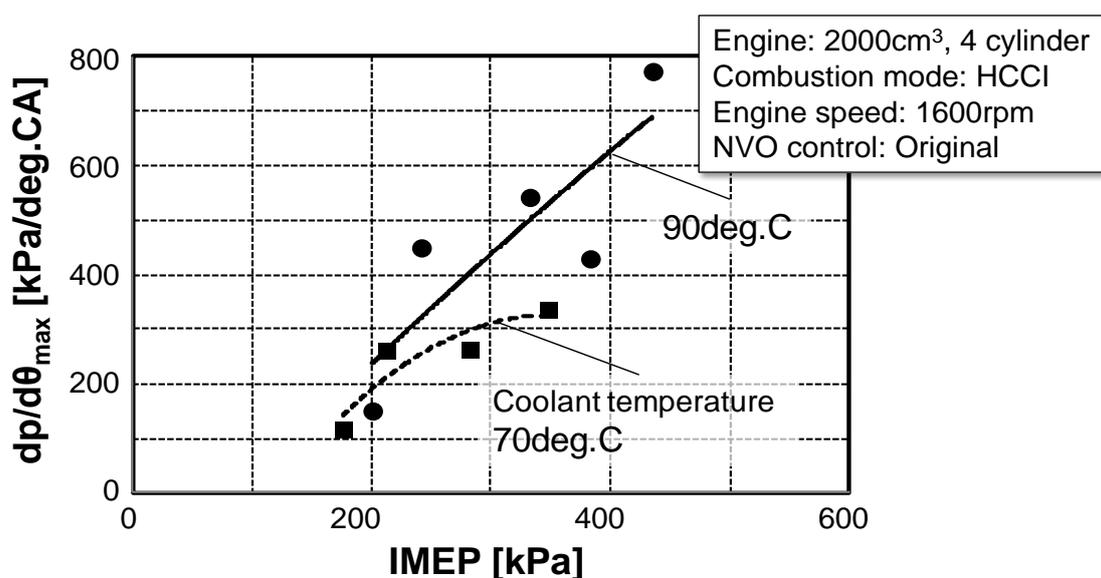


Fig.3.1 Influence of coolant temperature on maximum in-cylinder pressure rise rate  $dp/d\theta_{max}$

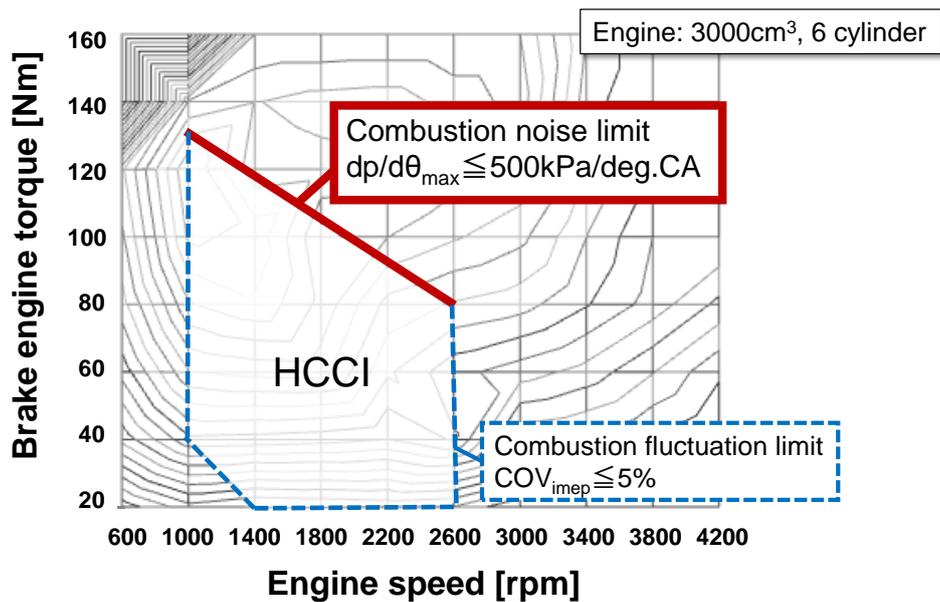


Fig.3.2 Significance to detect combustion noise on HCCI thermal efficiency map

### 3.2 燃焼騒音検出コンセプト

本節では、コンセプト構築に向けて実施した下記検討ステップについて説明する。

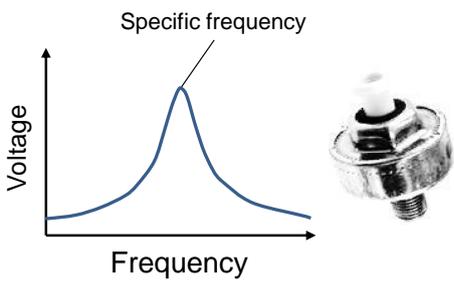
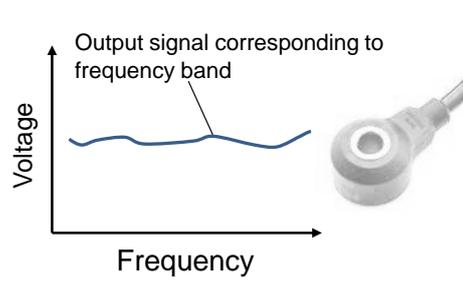
- (1) センサの選定
- (2) 検出可能性のフィジビリティスタディ
- (3) 検出システムコンセプト立案

燃焼騒音の検出手法の検討として、表 3.1 に示すセンサ群の中から適するセンサについて検討した。前章でも述べた様に、燃焼状態をセンシング可能なセンサは直接型と間接型に分類される。直接型センサとしては筒内圧センサとイオン電流センサが挙げられる。筒内圧センサは燃焼解析に用いられることと従来研究においても検討されていることから気筒別での高精度な燃焼状態検出が可能と考えられる。一方でガソリンエンジンにおいては2016年時点で装着されている例は少ない。間接型センサとしてはA/Fセンサ、クランク角センサ、ノックセンサが挙げられる。いずれもエンジンシステムに搭載されている既存センサであり、これを活用することで安価な検出が可能となる。ノックセンサはSI燃焼時のノッキング検出に用いられ、近年では検出精度向上のためノックセンサを複数備えるエンジンがある様に<sup>(330)</sup>、必要不可欠なセンサと言える。ノックセンサはエンジン管体の振動変化を検出するが、燃焼による起振力の発生も検出可能であることから、気筒別の燃焼状態検出が可能である。したがって、本研究は燃焼騒音の検出手法のセンサとしてノックセンサを選定し、真値は筒内圧センサ信号から得られた  $dp/d\theta_{max}$  とすることを想定した。

Table 3.1 Combustion detection sensors

Method of combustion detection	Direct		Indirect		
	Sensor	Pressure	Ion current	A/F	Crank angle
Potential of detection for each cylinder	○	○	△	○	○
Issues	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Durability</li> <li>•Temperature drift</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Noise</li> <li>•Sensitivity setting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Response</li> <li>•Configuration for each cylinder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Calculation load</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Calculation load</li> <li>•Sensitivity setting</li> </ul>

図 3.3 にノックセンサの種類と特性を示す。ノックセンサには共振型と非共振型の二つがある。共振型は特定の共振周波数の振動に対する検出感度が高く、SI 燃焼時のノッキングの振動周波数に対する S/N 比が高いことを特徴とする。その一方でエンジン構造(例えばオープンデッキタイプかクローズドデッキタイプか)、温度変化に影響され易いという課題を有する。非共振型は振動周波数に対する出力電圧の特性がほぼ一定であり、広い振動周波数に対応するという特徴を有する。しかしながら、燃焼による起振力以外の振動も検出するため、ノイズフィルタリング、検出周波数の最適選定、そしてポスト信号処理への高度な演算処理と高速化を必要とする課題を有する。

Type	Resonant	w/o resonant
Feature	High sensitivity for specific frequency	High sensitivity for wide frequency band
Weak point	Sensitivity is affected by engine structure and temperature.	-Noise filtering is required -Detection band setup is required -Post signal processing is required
Output signal		

Source: mlabo.

Fig.3.3 Classification and characteristic of knock sensor <sup>(331)</sup>

次にノックセンサを用いた場合の燃焼騒音の検出可否のフィジビリティスタディとして、燃焼による振動周波数を検討した。ノックセンサでの検出対象は燃焼によって発生するシリンダ内の気柱振動と考える。円筒空間内における燃焼の共振周波数は、Draper の式(3.1)を用いて算出することができる<sup>(332)</sup>。

$$Fr = \rho_{mn} \frac{C}{\pi B} \dots \dots \dots \text{式 3.1}$$

ここで Fr : 共振周波数[Hz],  $\rho_{mn}$  : 振動モード定数, C : 音速[m/s], B : シリンダ直径[m]である。

振動モード定数  $\rho_{mn}$  は、シリンダ内圧力の振動モードによって定義される 5 つの定数である。音速 C は式(3.2)で定義される。シリンダ内混合気の比熱比  $\kappa$ , 気体定数 R, 温度 T の関数である。

$$C = (\kappa RT)^{1/2} \dots \dots \dots \text{式 3.2}$$

ここで  $\kappa$  : 比熱比, R : 気体定数[J/kg K], T : 温度[K]である。

表 3.2 に SI 燃焼と HCCI 燃焼の共振周波数を示す。温度 T には実験値(最高筒内温度)を用い、SI 燃焼で約 2200K, HCCI 燃焼で約 1600K とした。シリンダ内の振動モードは 5 つ(10, 20, 01, 30, 11)であり、それぞれに振動モード定数がある<sup>(332)</sup>。10 モードはシリンダ内を直径方向に二分割した領域間で圧力振動が発生している振動モードである。20 モードはシリンダ内を直径方向に四分割した領域間で圧力振動が発生する。01 モードはシリンダ内を円形に二分割した領域間で圧力振動が発生する。30 モードはシリンダ内を直径方向に六分割した領域間で圧力振動が発生する。11 モードはシリンダ内を直径方向に二分割した領域間で、かつ円形に二分割した領域間で圧力振動が発生する。以上 5 つの振動モードについて共振周波数を算出した結果、SI 燃焼の各振動モードの共振周波数が 7.0, 11.6, 14.6, 16.0, 20.3kHz であり、HCCI 燃焼では 5.3, 8.8, 11.0, 12.0, 15.3kHz であると見積もった。

Table 3.2 Resonant frequency of SI and HCCI

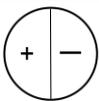
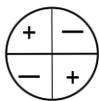
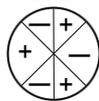
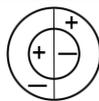
Vibration mode		10	20	01	30	11
						
Mode constant $\rho_{mn}$		0.586	0.972	1.220	1.337	1.697
Frequency [kHz]	HCCI	5.3	8.8	11.0	12.1	15.3
	SI	7.0	11.6	14.6	16.0	20.3

図 3.4 は SI 燃焼と HCCI 燃焼時のノックセンサ信号を FFT: Fast Fourier Transform を実施した一例を示す。縦軸は FFT により得られたパワースペクトル、横軸は周波数である。SI 燃焼は点火時期を過剰に進角させたノッキング状態での信号であり、複数の周波数帯にピークが見られる。10 モード、01 モード、そして 30 モードにピークが見られる。HCCI 燃焼では主に 2 つの周波数帯にピークが見られる。主に 10 モードと 30 モードである。ここで 10 モードに着目すると Draper の式を用いた予測した通り、比較的高温で燃焼する SI 燃焼のピーク周波数よりも比較的低温で燃焼する HCCI 燃焼のピーク周波数の方が低周波数側にピークが現れている。以上の結果より HCCI 燃焼と SI 燃焼で異なる周波数帯を検出することで燃焼振動を検出可能となると判断した。

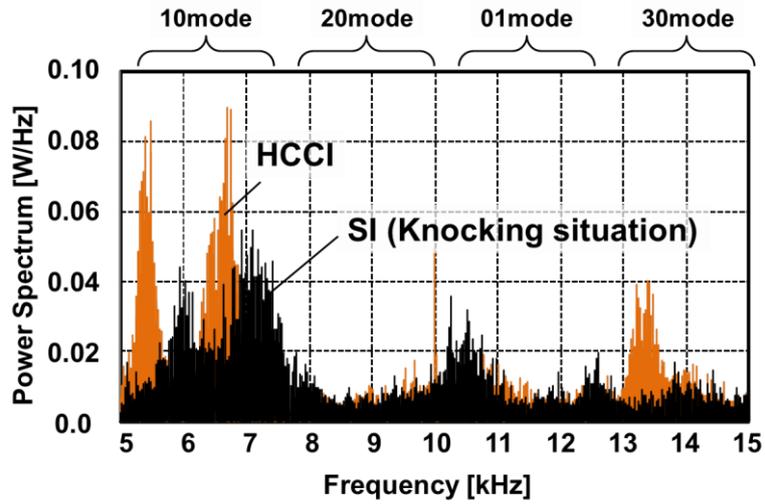


Fig. 3.4 Power spectrum of HCCI and SI knocking situation

ノックセンサを用いたエンジン振動検出を用いたHCCI燃焼の燃焼騒音検出コンセプトを立案した。図3.5に燃焼騒音検出手法のコンセプトを示す。本コンセプトはHCCI燃焼とSI燃焼でノックセンサの検出周波数を変更することで燃焼騒音検出を行う。HCCI燃焼ではノックセンサ信号をA/D取得し、FFT解析により得られた結果を元に閾値判定を行う。この判定に応じて動弁機構と燃料噴射制御へフィードバックする。これにより燃焼騒音 ( $dp/d\theta_{max}$ )の抑制を図る。またSI燃焼時は従来のエンジンに採用されているノッキング検出精度を実施する。この時フィードバック制御の対象は点火時期となる。

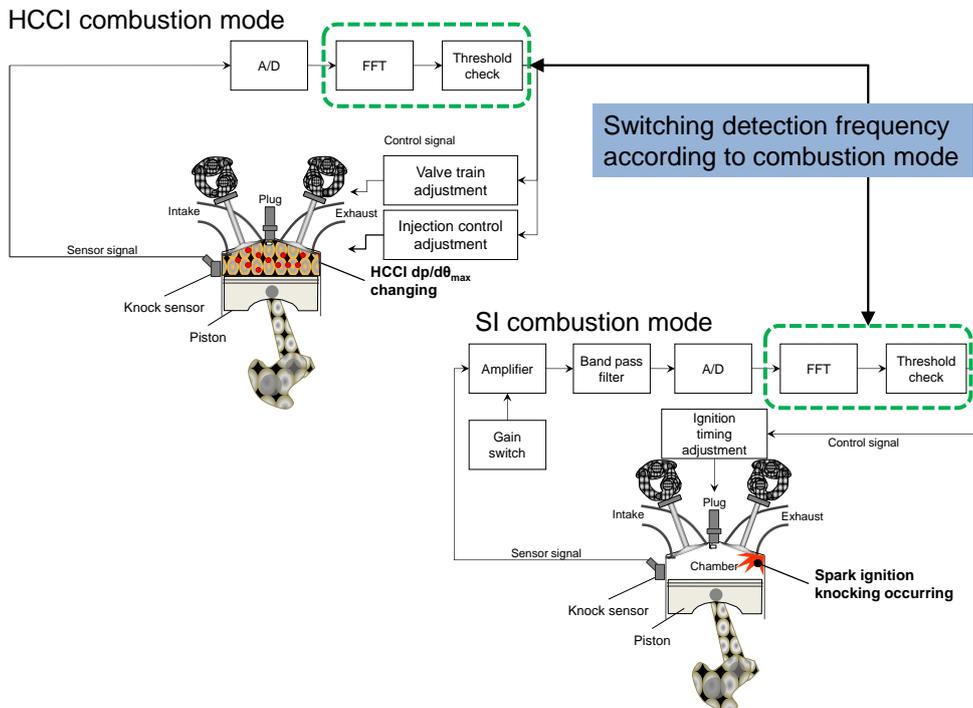


Fig. 3.5 Combustion noise detection concept using knock sensor

### 3.3 実験装置および実験条件

図 3.6 に実験エンジンの外観を示す。表 3.3 にエンジン諸元を示す。実験エンジンの総排気量は  $1998\text{cm}^3$ ，直列 4 気筒である。SI 燃焼と HCCI 燃焼を燃料噴射，およびバルブタイミング制御により実施した。圧縮比は 12 とし，燃料噴射はサイドマウント直噴とした。動弁システムには吸排気に連続可変バルブタイミングと連続可変バルブリフト機構を備える。エンジン制御には RPT (Rapid Proto Typing) を使用し，噴射時期，動弁開閉弁時期，点火時期，スロットル開度を制御した。筒内圧センサは各気筒に装着し，燃焼解析装置により計測した。ノックセンサ信号も同期計測し，ポスト処理によってノックセンサ信号の FFT 処理を行った。ノックセンサは実験エンジンの標準装着品(非共振型)を使用した。実験条件は，表 3.4 に示す様にエンジン回転数 1200rpm での IMEP 違いとし，NVO を変更することで燃焼騒音( $dp/d\theta_{\max}$ )を作為的に発生させた。

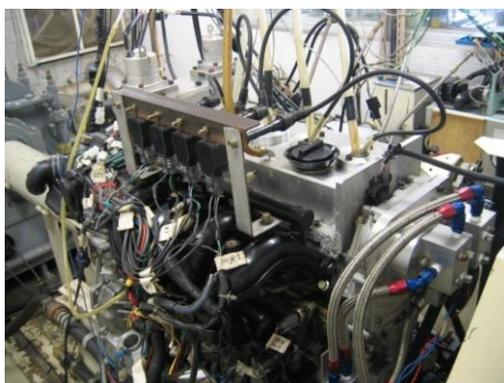


Fig. 3.6 Test engine

Table 3.3 Engine specification

4-cylinder 4-stroke engine	
Bore × stroke	89.0 × 80.3 mm
Displacement	1,998cm <sup>3</sup>
Compression ratio	12.0
Valve control	Phase & lift (Intake/exhaust)
Fuel Supply	Direct Injection
Fuel	Regular gasoline

Table 3.4 test condition

Engine speed [rpm]	1200
IMEP [kPa]	200 ~ 400
Negative valve overlap [deg.CA]	160 ~ 140
Coolant temperature [deg.C]	90
$dp/d\theta_{\max}$ survey area [kPa/deg.CA]	300 ~ 1000

図 3.7 と表 3.5 にノックセンサ装着位置とノックセンサの計測装置仕様を示す。ノックセンサは実験エンジンのヘッド吸気側に装着し、4 気筒の中央(2 番気筒と 3 番気筒の間)に位置する。また、Draper の式により得られた周波数帯より高い振動が発生していないか確認するために、200kHz でのサンプリングを行い、100kHz までの FFT が可能なデータを取得した。

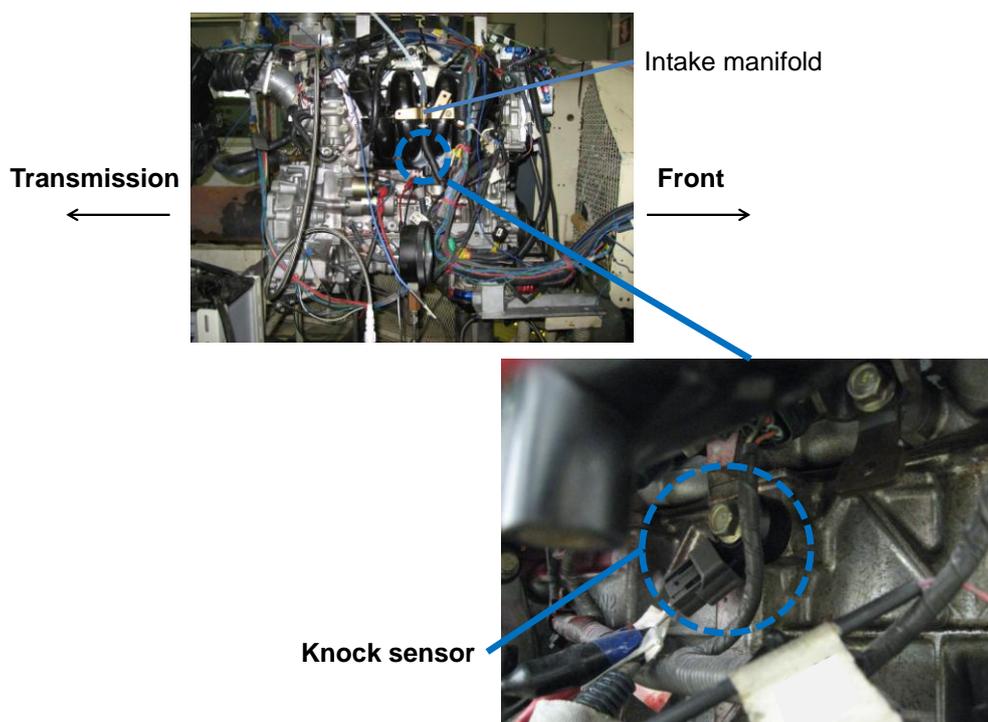


Fig. 3.7 Location of knock sensor

Table 3.5 Data logger

Maker	KEYENCE
Production	NR-HA08
Sampling rate	200kHz

FFT により得られたパワースペクトルは、式(3.3)を用い FFT 後のパワースペクトルの総和を解析し、振動強度 VI として定義した。VI と  $dp/d\theta_{max}$  の相関を確認することで、当該検出手法の検出精度を検証した。

$$VI = \int_{fr1}^{fr2} PSdfr \dots \dots \dots \text{式 3.3}$$

ここで、VI は振動強度[W]、fr1 は積分開始周波数[Hz]、fr2 は積分完了周波数[Hz]、PS はパワースペクトル[W/Hz]である。

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 燃焼騒音検出コンセプトの精度検証

図 3.8 は HCCI 燃焼時の燃焼騒音有無での筒内圧力履歴とノックセンサ信号の計測結果である。燃焼騒音が発生している場合、燃焼騒音と判断しない通常 HCCI 燃焼時に比べ筒内圧力が上昇傾向となっている。これに伴い、ノックセンサ信号も振幅が増加した。

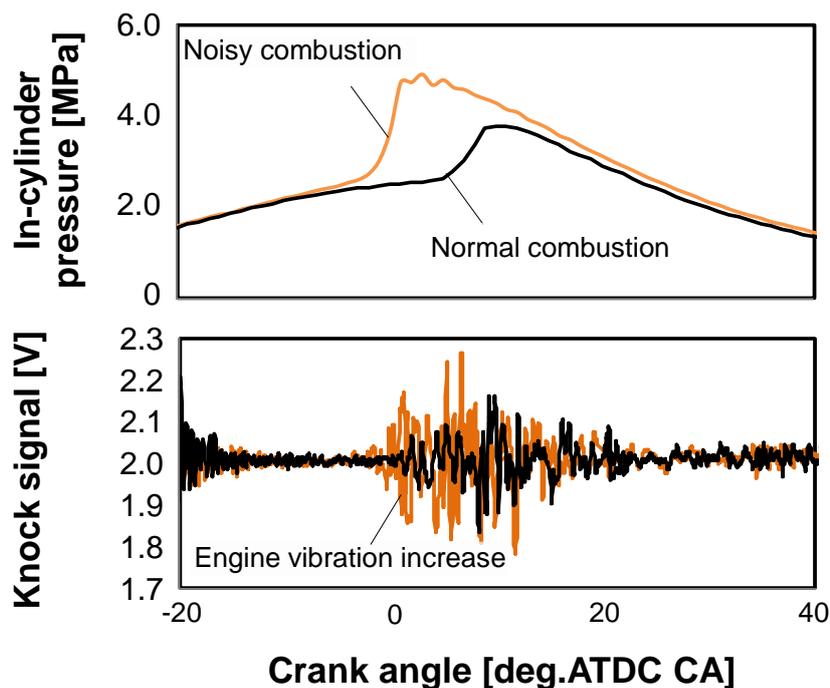


Fig. 3.8 Relationship between in-cylinder pressure and signal of knock sensor

この2つの条件で得られたノックセンサ信号をFFT解析した結果を図3.9に示す。 $dp/d\theta_{max}$ は841kPa/deg.CAと349kPa/deg.CAである。 $dp/d\theta_{max}$ の増加によってパワースペクトルは全体的に増加している。とりわけ周波数5から7kHz, 9.5から11.5kHz, 13から15kHzでピークの増加が見られた。

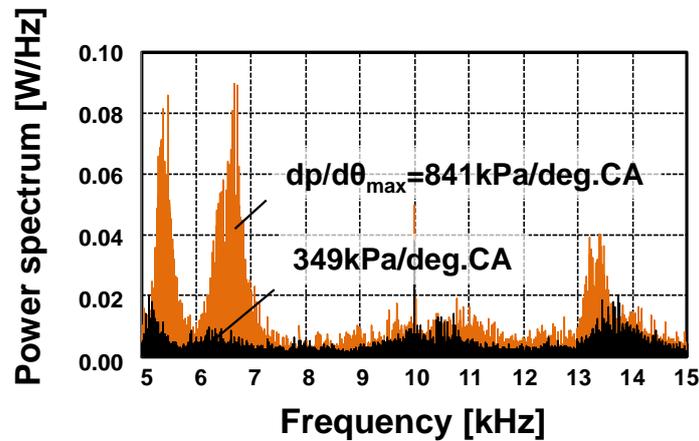


Fig. 3.9 Influence of  $dp/d\theta_{max}$  on power spectrum

振動強度 VI と  $dp/d\theta_{max}$  の相関を図 3.10 に示す。エンジン回転数 1200rpm, IMEP200kPa から 400kPa における積分周波数範囲 1 から 15kHz の結果である。  $dp/d\theta_{max}$  の増加に伴い VI も増加する傾向が得られた。決定係数  $R^2$  は 0.6709 であり、比較的高い相関を得られた。

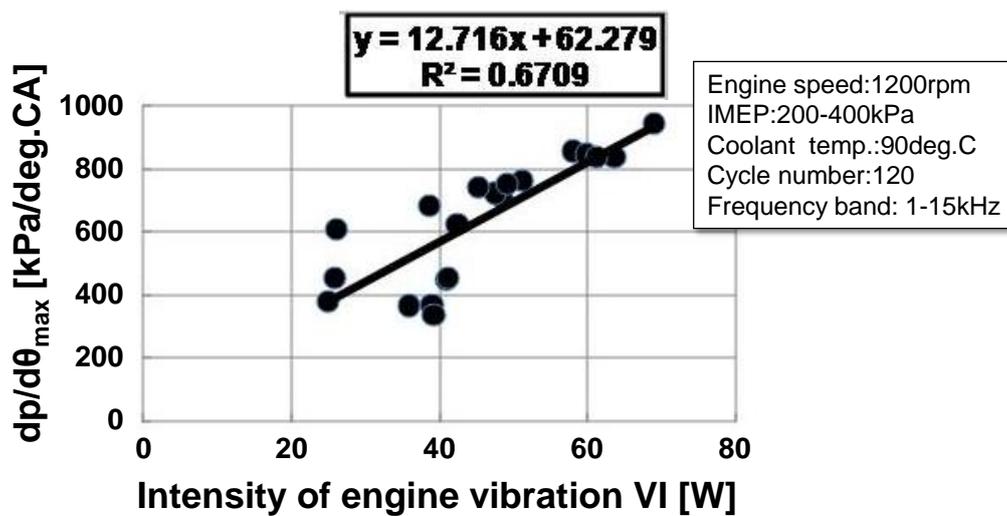


Fig. 3.10 Relationship between  $dp/d\theta_{max}$  and VI (1-15kHz, all cylinder)

### 3.4.2 検出手法の高精度化

さらに、検出精度向上を図るため以下 2 つの手法を検討した。

- (1) 周波数選定による精度向上
- (2) 燃焼以外の振動ノイズ除去による精度向上

周波数選定による精度向上に向けては、本実験で得られたパワースペクトルを分析することにより実施した。  $dp/d\theta_{max}$  が異なる 3 つの条件でのパワースペクトルの結果を図 3.11 に

示す。  $dp/d\theta_{max}$  は 820, 600, 330 kPa/deg.CA である。 3 つのパワースペクトルのピークが存在することが分かる。 その周波数は 5~7kHz, 9.5~11.5kHz, 13~15kHz である。 前章で述べた Draper の式の計算結果から、 5~7kHz は 10 モード、 9.5~11.5kHz は 01 モード、 13~15kHz は 11 モードと考えられる。 30 モード、 20 モードでのパワースペクトルは見られなかった。 したがって、 HCCI 燃焼の  $dp/d\theta_{max}$  変化は 10 モード、 01 モード、 11 モードの振動モードに現れることが分かる。

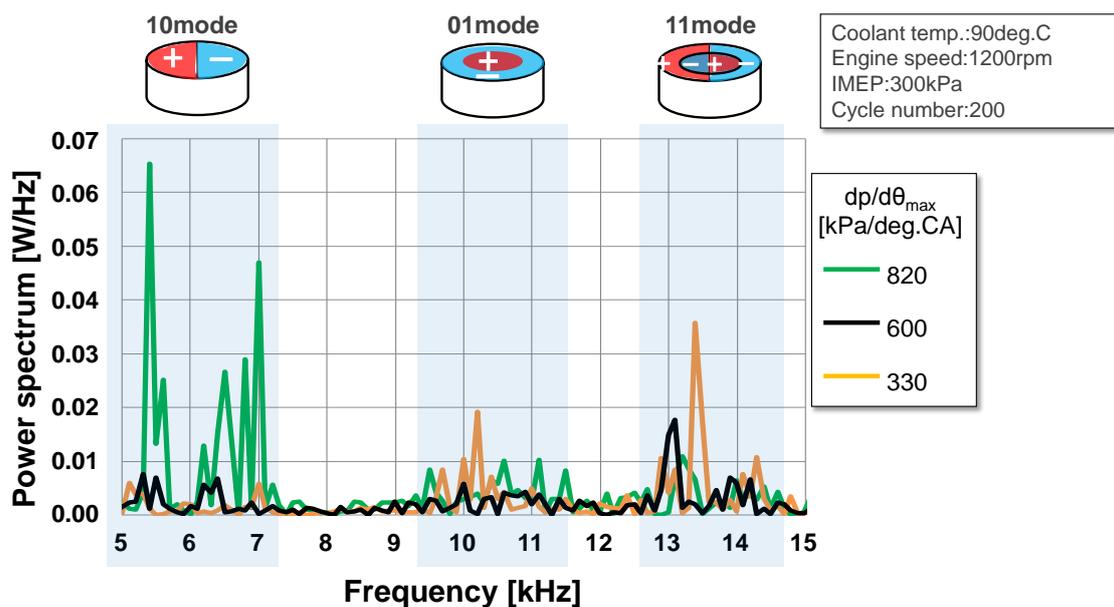


Fig. 3.11 Influence of  $dp/d\theta_{max}$  on power spectrum

各振動モード(10 モード、 01 モード、 11 モード)の VI と  $dp/d\theta_{max}$  の相関を図 3.12, 図 3.13, 図 3.14 に示す。 各振動モードで相関に違いが見られる。

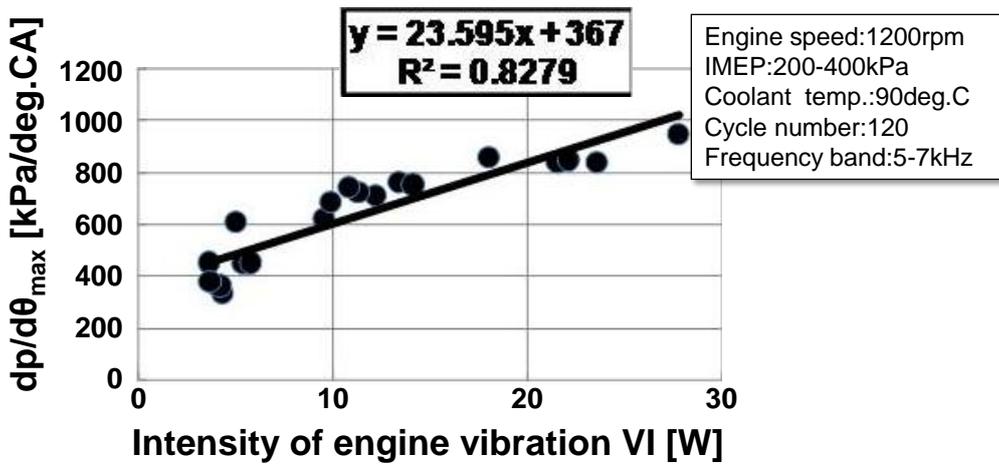


Fig. 3.12 Relationship between  $dp/d\theta_{max}$  and VI (5-7kHz, all cylinder)

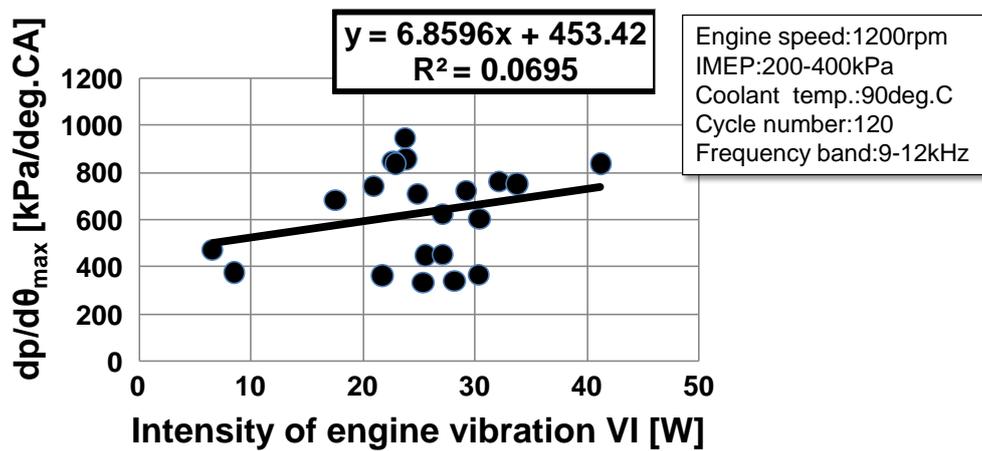


Fig. 3.13 Relationship between  $dp/d\theta_{max}$  and VI (9-12kHz, all cylinder)

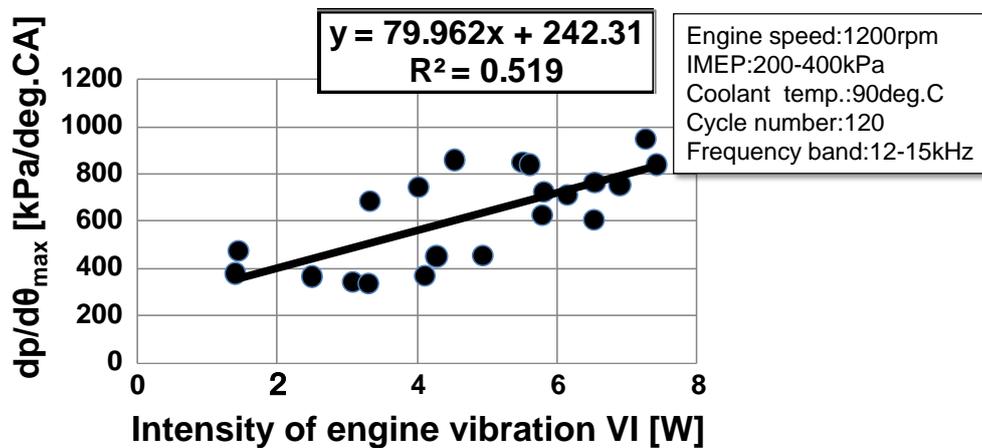
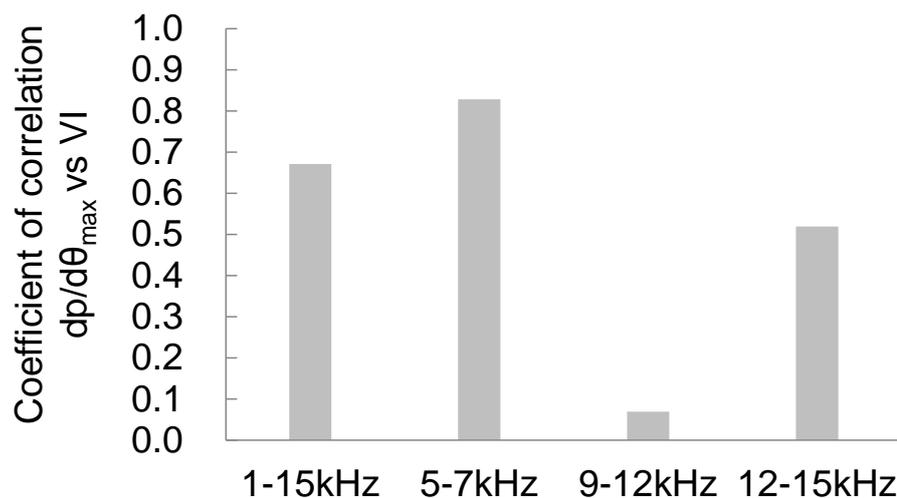


Fig. 3.14 Relationship between  $dp/d\theta_{max}$  and VI (12-15kHz, all cylinder)

各振動モードの VI と  $dp/d\theta_{max}$  の決定係数  $R^2$  を図 3.15 に示す。本検出手法ベース性能 1-15kHz 積分 VI による決定係数は 0.6709 であったのに対し、5-7kHz 積分 VI では 0.8279 まで決定係数が改善した。一方で 9-12kHz, 12-15kHz では決定係数は低下する傾向を示し、 $dp/d\theta_{max}$  の増加に対し正の相関が得られない振動モードであることが分かる。

以上の検討結果に基づき、HCCI 燃焼での検出周波数帯を 5-7kHz(10 モード)に決定した。



Band	1-15kHz	5-7kHz	9-12kHz	12-15kHz
$R^2$	0.6709	0.8279	0.0695	0.5190

Fig. 3.15 Improvement of detection accuracy by optimizing detection band of frequency

次に、燃焼以外の振動ノイズ除去による精度向上を検討した。

図 3.16, 図 3.17 に SI 燃焼と HCCI 燃焼での 4 気筒エンジンにおけるサイクル中デバイス動作について模式図を示す。図 3.16 は SI 燃焼である。1 番気筒の燃焼を検出対象とした時、そのタイミングの近辺に存在するデバイス動作は点火、対向燃焼気筒の IVC、および点火時期、次々燃焼気筒の EVC、吸気行程噴射、さらに次の燃焼気筒の燃焼による筒内圧力上昇である。主にノッキングは膨張行程初期で発生することから、そこで課題となる次燃焼気筒の IVC と対向燃焼気筒の EVC、および吸気行程早期の噴射は検出タイミングに重畳する。したがって、SI 燃焼ではそのいずれも周波数での分離が必要となる。

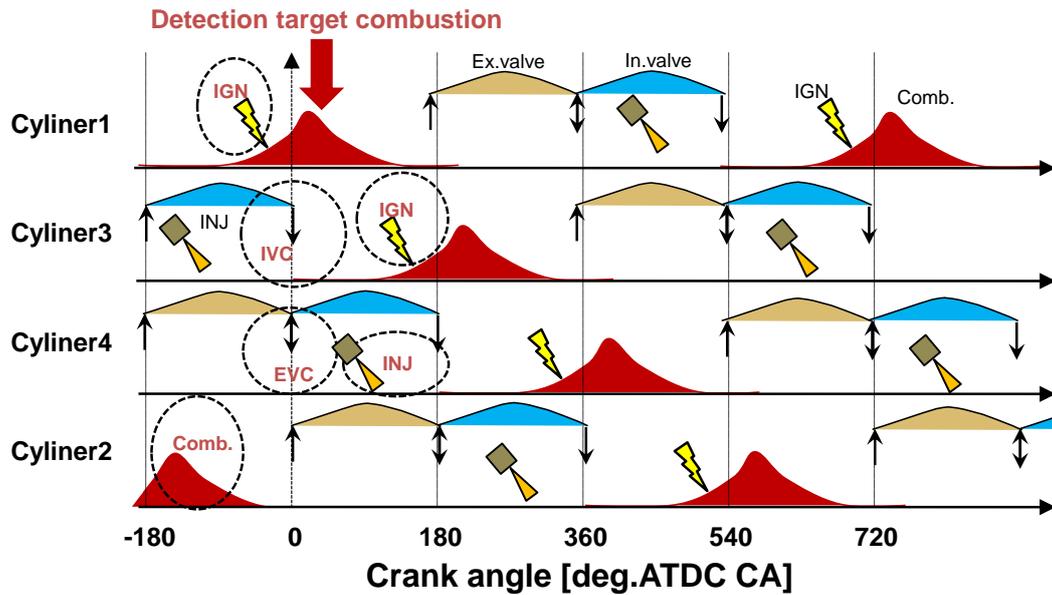


Fig. 3.16 Schematic of cycle schedule of engine devices (SI)

一方で、HCCI 燃焼は 1 番気筒の燃焼を検出するタイミングの周辺に、当該気筒の点火、次燃焼気筒の IVC、対抗燃焼気筒の EVC、NVO 噴射、吸気行程噴射、さらに次の燃焼気筒の燃焼による筒内圧力上昇である。これらの検出タイミングに近接するデバイス動作について、ノックセンサ信号に外乱として入力され得るかどうか、入力される場合には周波数分離が可能かを実験的に解析した。

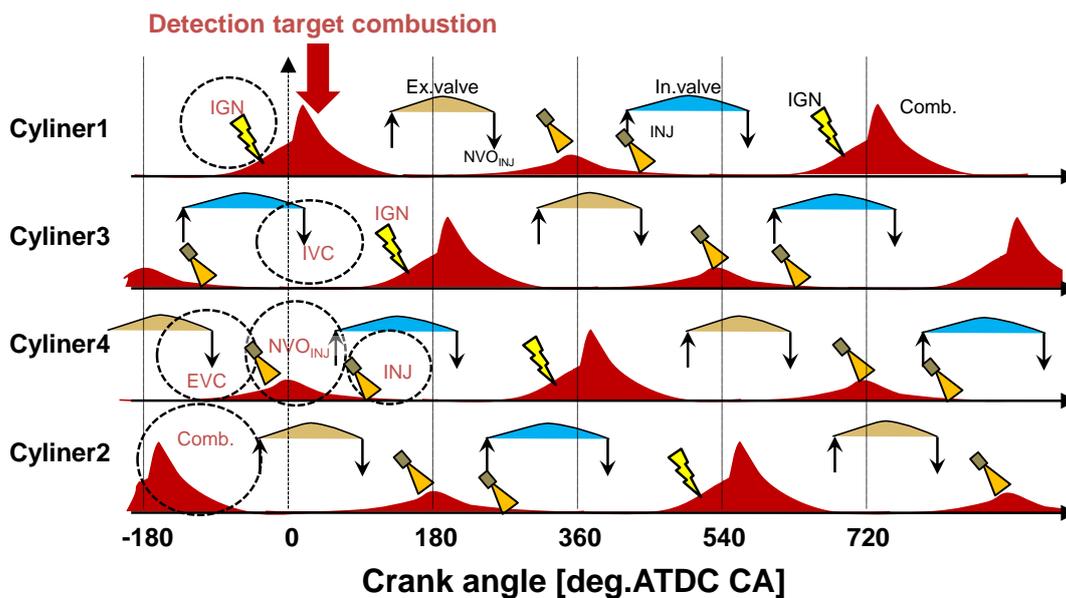


Fig. 3.17 Schematic of cycle schedule of engine devices (HCCI)

図 3.18 は 1 番気筒の圧縮行程後期から膨張行程にかけて対向燃焼気筒の噴射時期を変更した際のノックセンサ信号を示している。本実験条件は SI 燃焼であるが、対向燃焼気筒の噴射は HCCI 燃焼時の NVO 噴射を模擬したものである。SI 燃焼で確認した理由は、種々パラメータを変更しても燃焼状態が HCCI 燃焼に比べ安定しているためである。まず 1 番気筒の点火時期においてノックセンサ信号にスパイクが見られる。これは点火放電によるヘッドへの通電を要因とするノイズである。この点火時期ノイズは検出対象となる膨張行程には重畳しないため検出タイミングの最適化により除去することが可能である。また次燃焼気筒(3 番気筒)の点火ノイズについても除去可能である。次に対向燃焼気筒(4 番気筒)の NVO 模擬噴射はノックセンサ信号に僅かな振幅を発生させており、噴射時期の遅角に伴い振幅波形も遅角することが確認できる。したがって、NVO 噴射によるノイズは、検出タイミングの最適化では除外できないことが分かる。周波数分離での除去可否についての検討が必要である。

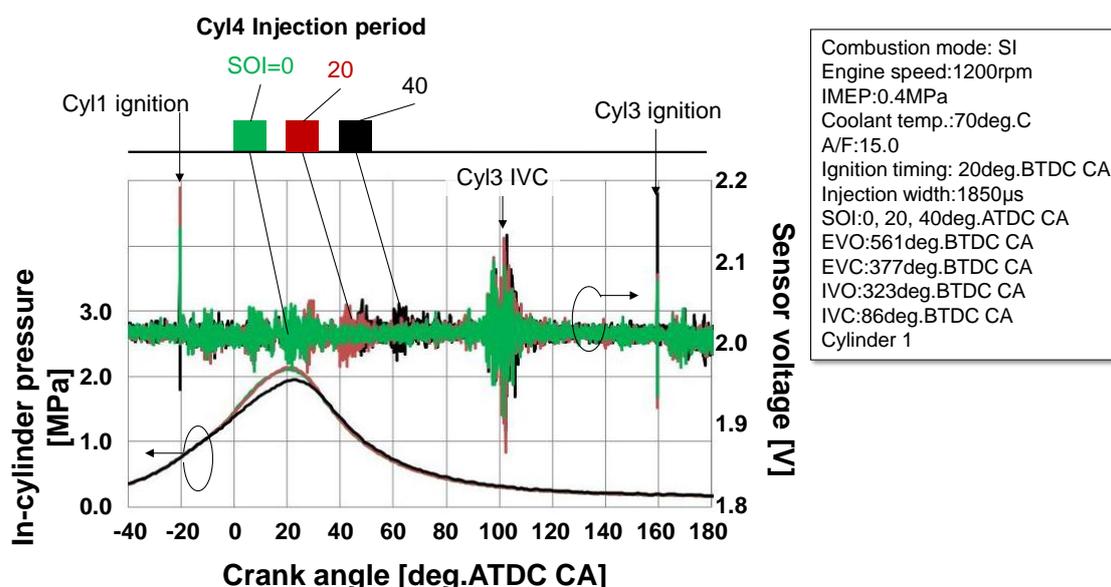


Fig. 3.18 Noise input of engine devices for knock sensor signal (Cylinder 1)

そこで図 3.19 に示す対向燃焼気筒の噴射時期 SOI:Start Of Injection が 0deg.ATDC CA, 40deg.ATDC CA の条件における 40deg.ATDC CA から 60deg.ATDC CA のノックセンサ信号データを抽出し、FFT 解析した。当該 FFT ウィンドウは、SOI=0deg.ATDC CA の振幅がノイズとして入力されていないため NVO 噴射無しを模擬していること、そして SOI=40deg.ATDC CA はインジェクタの開閉弁動作を含んでいることから、インジェクタによる噴射の周波数帯を明確化することが可能と判断し選定した。

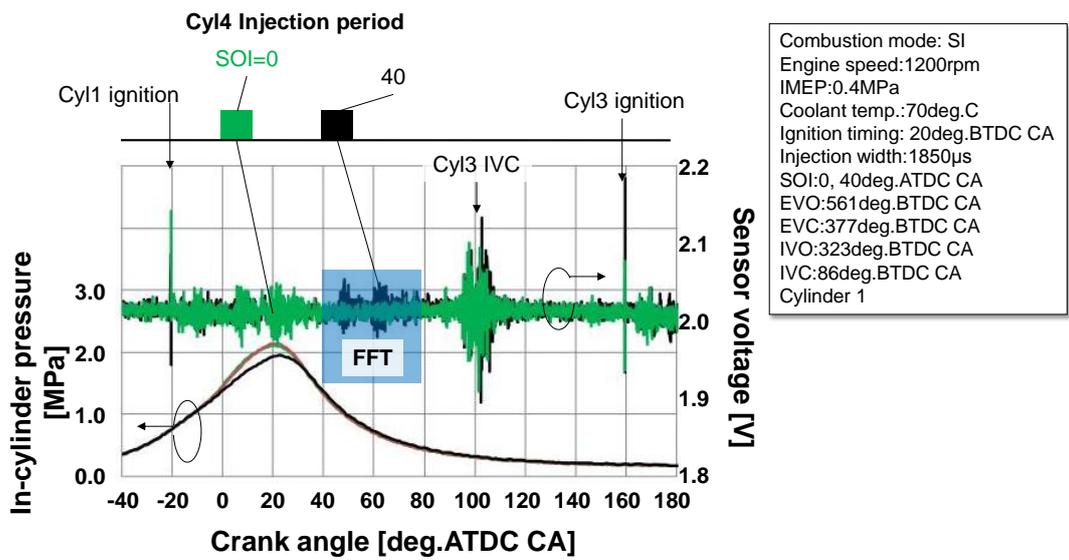


Fig. 3.19 FFT window setup

図 3.20 に FFT 解析結果を示す。縦軸は噴射有無で得られたパワースペクトルの差分値である。5kHz 以下の周波数帯に NVO 模擬噴射の有無による差異が見られることが分かる。したがって、HCCI 燃焼における対向燃焼気筒の NVO 噴射によるノックセンサ信号へのノイズは 5kHz 以下の周波数帯を除去することで検出精度の向上が図れる見通しを得た。

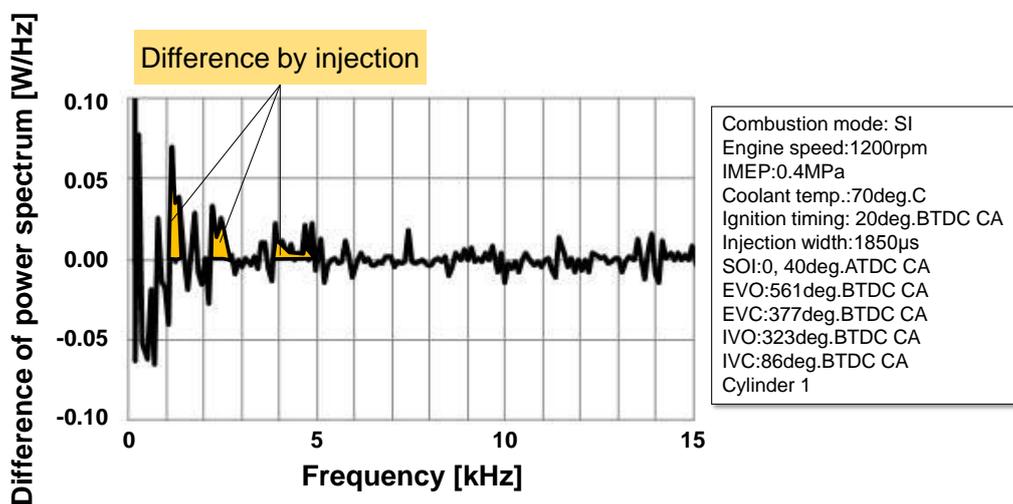


Fig. 3.20 Power spectrum variance by injection noise

次に対向燃焼気筒の EVC によるノックセンサ信号へのノイズ入力について検討した。図 3.21 は EVC を変更した際のノックセンサ信号計測結果である。排気弁のバルブシート着座振動ノイズが、EVC 時期においてノックセンサ信号に入力されている。また EVC 遅角に

応じてノイズも遅角している。しかしながら、NVO 噴射を用いた HCCI 燃焼では EVC は早期に設定されるため、検出タイミングである 1 番気筒の膨張行程には重畳しない。したがって、対向燃焼気筒の EVC は検出タイミングの最適化により除去可能であることが分かった。また次燃焼気筒の IVC によるノックセンサ信号へのノイズ入力について検討した。図 3.22 は IVC を変更した際のノックセンサ信号計測結果である。吸気弁のバルブシート着座振動ノイズが、IVC 時期においてノックセンサ信号に入力されている。また IVC 遅角に応じてノイズも遅角している。しかしながら、IVC は検出対象気筒の膨張行程中期以降に設定されるため、検出タイミングである 1 番気筒の膨張行程には重畳しない。したがって、次燃焼気筒の IVC は検出タイミングの最適化により除去可能であることが分かった。

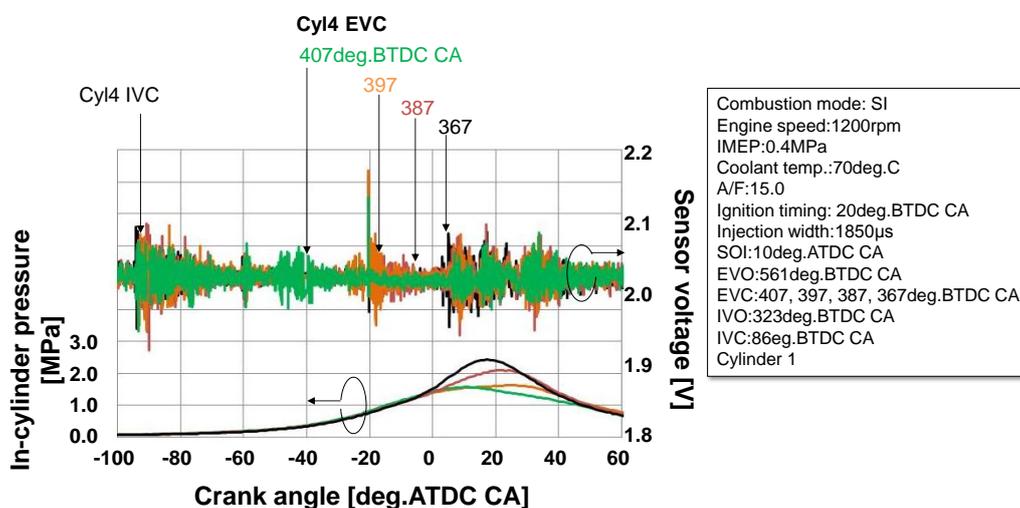


Fig. 3.21 Noise input of EVC for knock sensor signal (Cylinder 1)

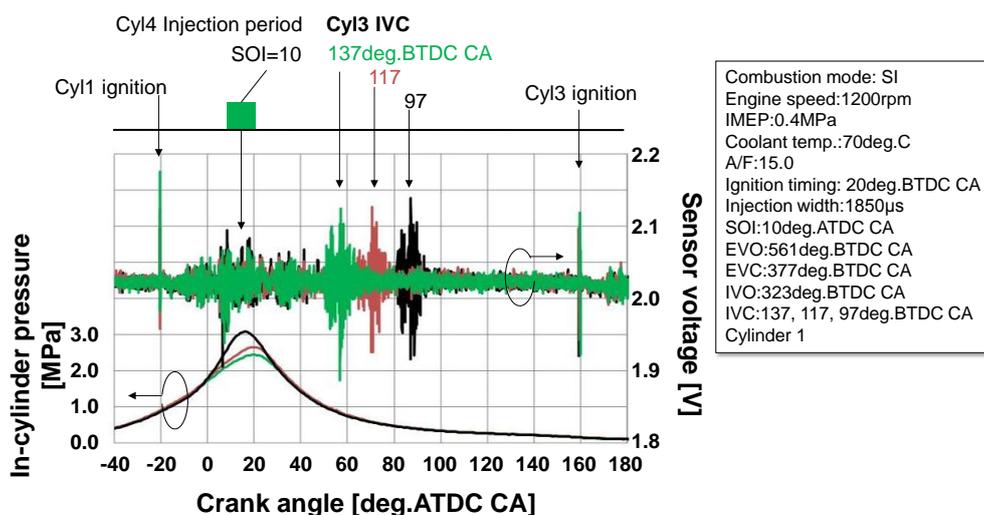


Fig. 3.22 Noise input of IVC for knock sensor signal (Cylinder 1)

以上の実験的検証結果から、HCCI 燃焼時のノックセンサ信号の FFT ウィンドウを決定した(図 3.23). 検出開始を TDC とし検出完了を 40deg.ATDC CA とした. これにより IVC, EVC, 点火によるノックセンサ信号へのノイズ成分を除外する. また, 噴射ノイズは周波数帯が HCCI 燃焼の 10 モードより低いため, 周波数での除去が可能である.

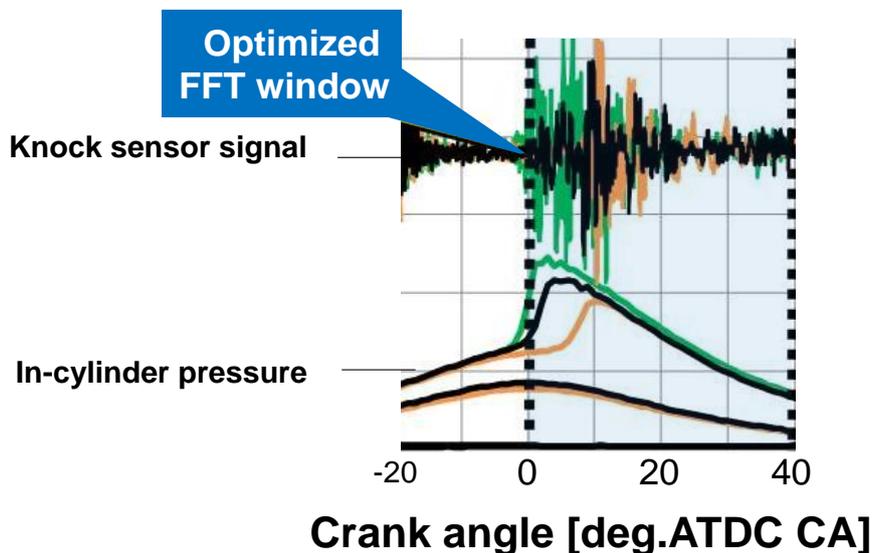


Fig. 3.23 Optimized FFT window

図 3.24 に周波数選定と FFT ウィンドウ最適化を実施際の検出精度を示す.  $dp/d\theta_{max}$  の増と共に VI が増加するリニアな特性が得られた.

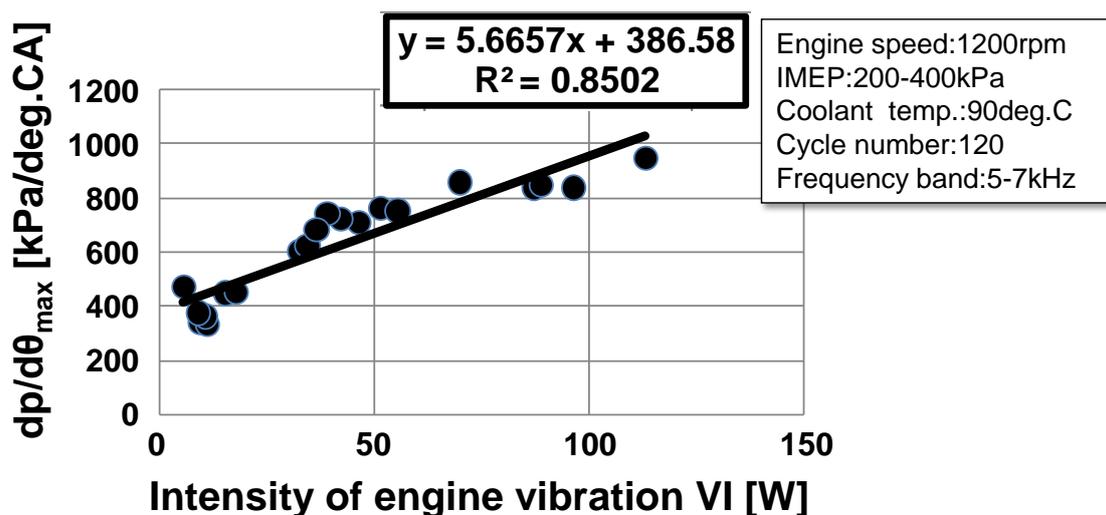


Fig. 3.24 Relationship between  $dp/d\theta_{max}$  and VI (5-7kHz, Optimized FFT window, all cylinder)

各振動モードの VI と  $dp/d\theta_{max}$  の決定係数  $R^2$  を図 3.25 にまとめる. 本検出手法ベース性能 1-15kHz 積分 VI による決定係数 0.6709 に対し, 5-7kHz 積分 VI で 0.8279, FFT ウィンドウ最適化を加え 0.8502 まで改善した.

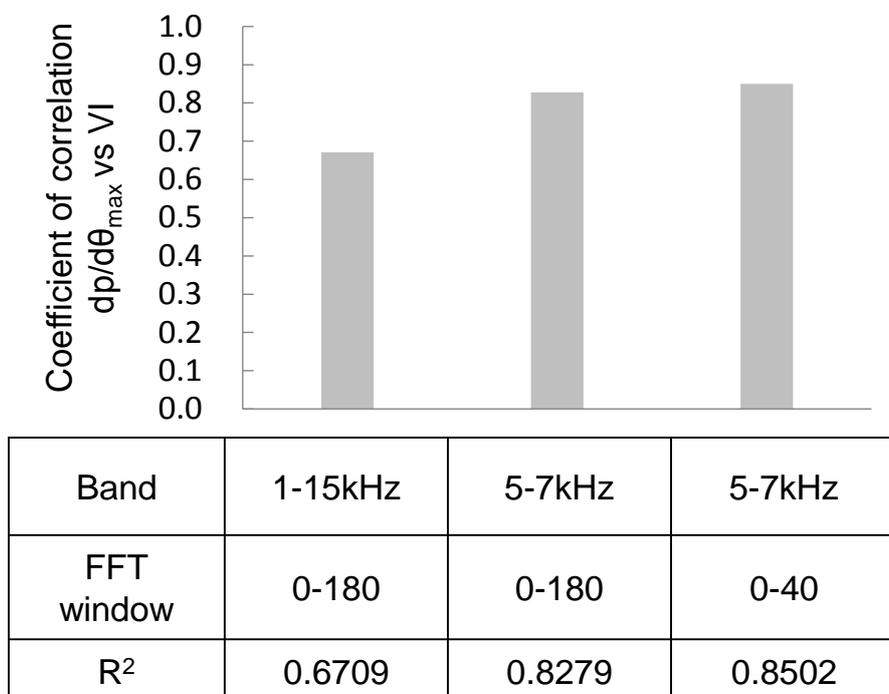


Fig. 3.25 Improvement of detection accuracy by optimizing detection method

### 3.5 他機種 HCCI エンジンへの適用

本燃焼騒音検出コンセプトが他機種エンジンへ適用できるかについて実験的に検証した. 検証エンジンは図 3.26 に示す V 型 6 気筒エンジンである. 表 3.6 にエンジン諸元を示す. 実験エンジンの総排気量は  $2987\text{cm}^3$ , V 型 6 気筒である. 当該エンジンでは HCCI 燃焼を燃料噴射, およびバルブタイミング制御により実施した. 圧縮比は 12 であり, 燃料噴射はサイドマウント直噴である. 動弁システムには吸排気に連続可変バルブタイミングと連続可変バルブリフト機構を備える. エンジン制御には RPT (Rapid Proto Typing) を使用し, 噴射時期, 動弁開閉弁時期, スロットル開度を制御した. 筒内圧センサは各気筒に装着し, 燃焼解析装置により計測した. ノックセンサ信号も同期計測し, ポスト処理によってノックセンサ信号の FFT 処理を行った. ノックセンサは検証エンジンの標準装着品(非共振型)を使用した. 実験条件はエンジン回転数 1400rpm, 1800rpm, 2200rpm での IMEP 違いとし, NVO および燃料噴射量を変更することで燃焼騒音( $dp/d\theta_{max}$ )を作為的に発生させた(表 3.7).



Fig. 3.26 Test engine

Table 3.6 Engine specification

V6-cylinder 4-stroke engine	
Bore × stroke	93.0 × 73.3 mm
Displacement	2,987cm <sup>3</sup>
Compression ratio	12.0
Valve control	Phase & lift (Intake/exhaust)
Fuel Supply	Direct Injection
Fuel	Regular gasoline

Table 3.7 test condition

Engine speed [rpm]	1400, 1800, 2200
IMEP [kPa]	160 ~ 480
Coolant temperature [deg.C]	90
dp/dθmax survey area [kPa/deg.CA]	100 ~ 1200

図 3.27 にノックセンサ装着位置を示す。ノックセンサは両バンク中央ブロック部に装着し、3 番気筒、4 番気筒、5 番気筒、6 番気筒の中央に位置する。また振動強度 VI のリアルタイム演算ロジックを構築し、RPT に実装させることによりリアルタイム検出を実施した。

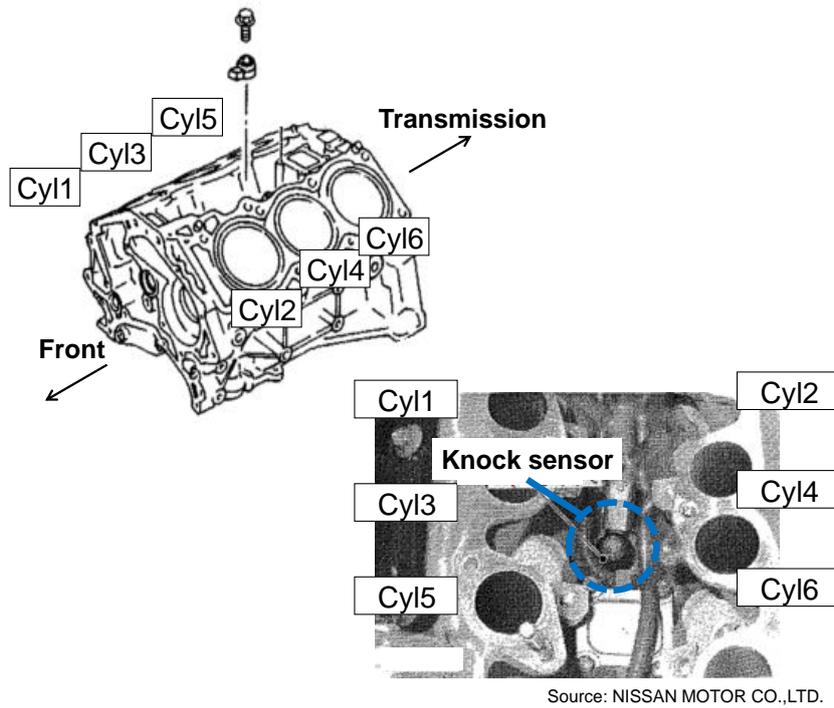


Fig. 3.27 Location of knock sensor (333)

図 3.28, 3.29 に検証結果を示す. 全気筒平均での  $dp/d\theta_{\max}$  と VI の相関は非常に高い結果が得られ, 決定係数  $R^2$  は 0.91 に到達した. 一方で, 低  $dp/d\theta_{\max}$  (400kPa/deg.CA 近傍) では  $dp/d\theta_{\max}$  の変化量に対し VI の変化量が小さいこと, 高  $dp/d\theta_{\max}$  (900kPa/deg.CA 以上) においても  $dp/d\theta_{\max}$  の変化量に対し VI の変化量が小さいことが確認された.

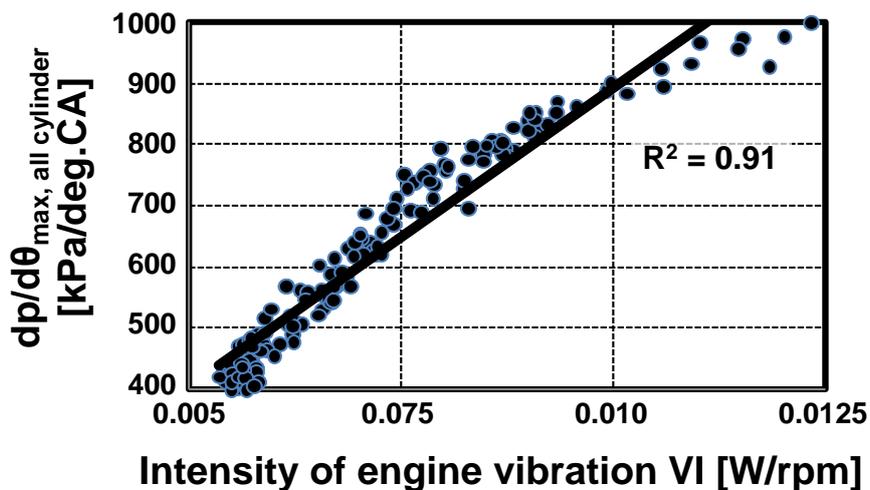


Fig. 3.28 Relationship between  $dp/d\theta_{\max}$  and VI (all cylinder)

各気筒の  $dp/d\theta_{max}$  と VI の相関を図 78 に示す. いずれの気筒においても  $dp/d\theta_{max}$  の増加と VI の増加傾向が確認できた. ノックセンサ装着位置に近い 3 番気筒, 4 番気筒, 5 番気筒での  $dp/d\theta_{max}$  の増加に対する VI の増加量に対し, ノックセンサ装着位置から遠い 1 番気筒, 2 番気筒の VI の増加量は小さい傾向となり, S/N 比が低下していることが示唆された. したがって, 本燃焼騒音検出コンセプトは HCCI エンジンのレイアウトによってはノックセンサを複数備える必要があることが示唆された.

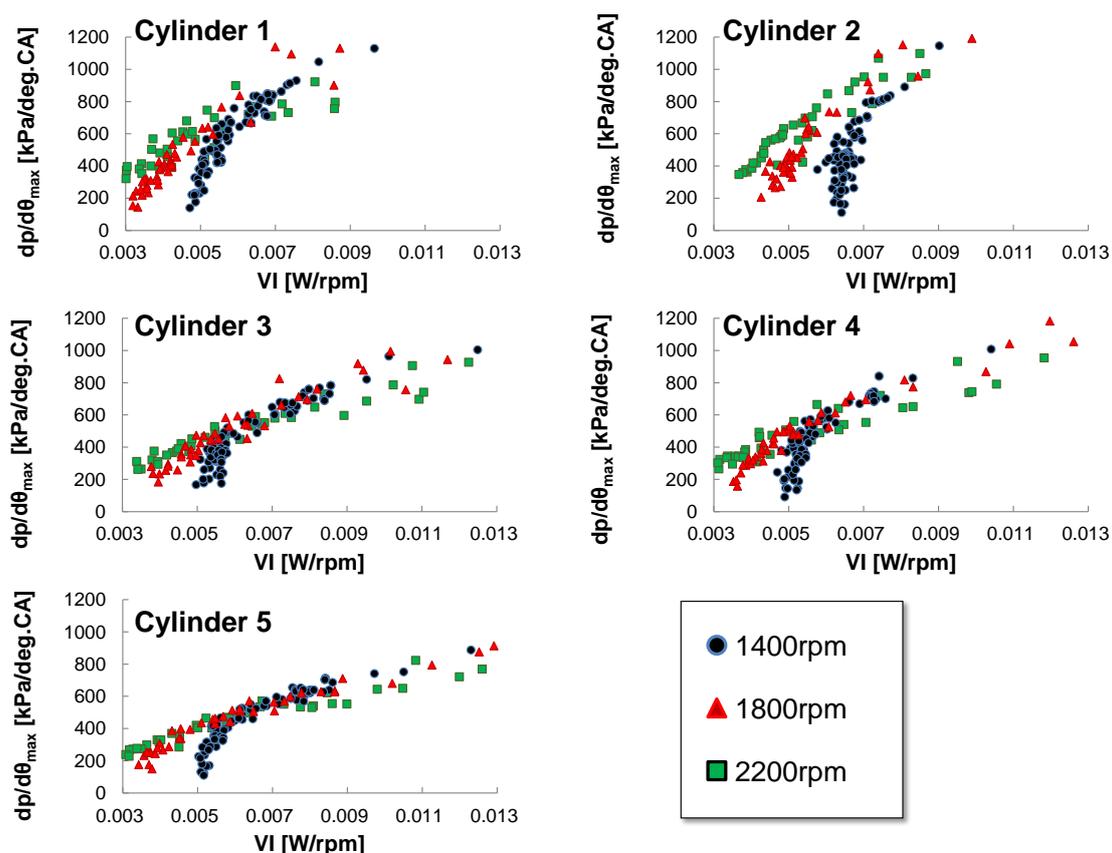


Fig. 3.29 Relationship between  $dp/d\theta_{max}$  and  $VI$  (individual cylinder)

### 3.6 本章の結論

HCCI燃焼の燃焼騒音検出手法として既存ノックセンサを用いたエンジン振動検出手法を検討し、以下結論を得た。

低温燃焼であるHCCI燃焼では、燃焼騒音指標( $dp/d\theta_{max}$ )の増減に依存して変化する周波数帯が5~7kHzであることを実験的に明らかとした。さらにノックセンサ信号にノイズとして入力されるエンジンデバイス(インジェクタ, 動弁機構, 点火)をFFTウィンドウと周波数分離により除外する手法を考案した。これらを組み合わせたエンジン振動強度演算を行い、高い検出精度を得ることができた。表3.8にエンジン振動検出手法の改善結果についてまとめる。HCCI燃焼騒音検出には、検出する周波数を5~7kHzとし、FFTウィンドウTDCから40deg.ATDC CAとし、高い気筒別での燃焼騒音( $dp/d\theta_{max}$ )の検出精度を得る見込みを得た。

Table 3.8 Conclusion of optimizing detection method for HCCI combustion

		Detection method (Trial)		1 <sup>st</sup> improved detection method		2 <sup>nd</sup> improved detection method	
Detection frequency [kHz]		1~15		5~7		5~7	
FFT window [deg.ATDC CA]		0	180	0	180	0	40
Detection accuracy for cylinder to cylinder		0.670		0.827		0.850	
Detection accuracy (cycle to cycle)	#1	0.404		0.703		0.694	
	#2	0.592		0.631		0.611	
	#3	0.543		0.583		0.605	
	#4	0.531		0.822		0.843	
Detection phenomena		Combustion noise $dp/d\theta_{max}$					

## 第4章 イオン電流信号を用いた NO<sub>x</sub> 推定手法の開発

### 4.1 はじめに

HCCI 燃焼は混合気温度を制御することで自着火を発生させ、当該自着火時期を制御することで実現される。その一方で、従来研究で述べた様に燃料組成は HCCI 燃焼に影響する。例えば RON が異なる場合、図 4.1 に示す様に同一制御を用いても NO<sub>x</sub> が増減する。燃料組成は車両ユーザが任意に選択できることから、いずれの燃料が入っても排気を悪化させない様制御する必要がある。

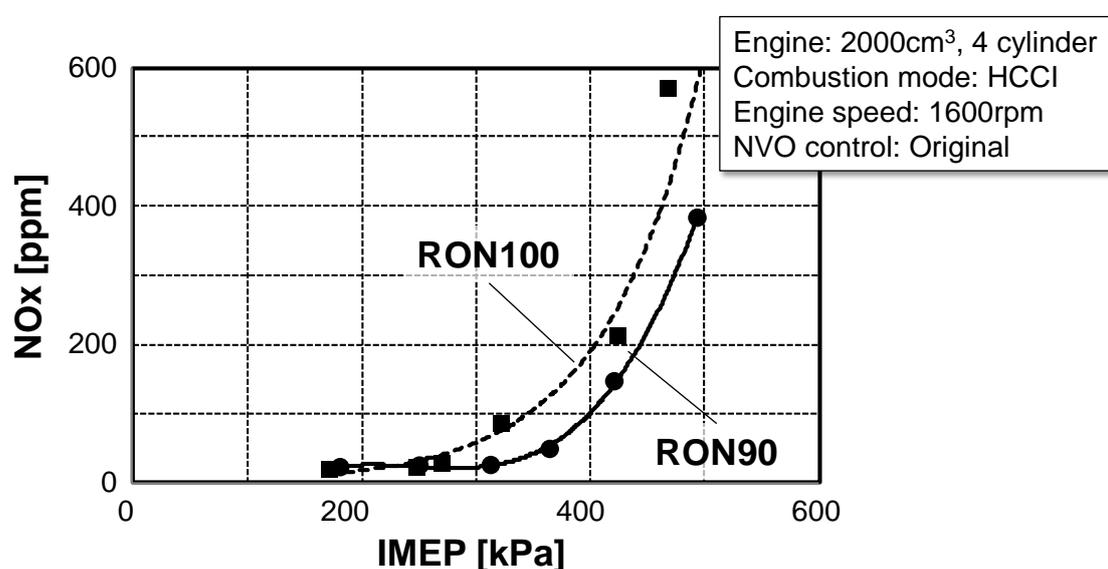


Fig. 4.1 Influence of RON on NO<sub>x</sub> emission

しかしながら、燃料組成をセンシングすることは困難である。したがって、NO<sub>x</sub> 排出量を正確に検出する手法が必要不可欠である。本章では NO<sub>x</sub> の推定手法の検討結果について述べる。

## 4.2 イオン電流センシングコンセプト

NOx 排出量のセンサとして NOx センサが量産化されている<sup>(334)</sup>。これを活用することでディーゼルエンジン同様にシステム構築が可能であるものの、高価な追加デバイスとなる。したがって、本研究は推定手法の検討として、燃焼状態をセンシング可能なセンサの中から、ガソリンエンジンへの量産実績のあるイオン電流センサを選定した。(表 4.1)

Table 4.1 Combustion detection sensors

Method of combustion detection	Direct		Indirect		
Sensor	Pressure	<b>Ion current</b>	A/F	Crank angle	Knock
Potential of detection for each cylinder	○	○	△	○	○
Issues	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Durability</li> <li>•Temperature drift</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Noise</li> <li>•Sensitivity setting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Response</li> <li>•Configuration for each cylinder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Calculation load</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Calculation load</li> <li>•Sensitivity setting</li> </ul>

イオン電流センサを用いた HCCI 燃焼状態の検出に関する従来研究は多く報告されている。Saxena らは HCCI 燃焼の騒音状態(Ringing Index)を検出することを目的とし、イオン騒音指標(Ion Ringing Index)を適用する手法を報告した<sup>(335)</sup>。Attard らはイオン電流信号と熱発生率の類似性を利用した MFB50(質量燃焼割合 50%)の高い相関性を報告した<sup>(336)</sup>。Mehresh らは HCCI 燃焼において当量比と EGR 率を変更することがイオン信号に大きく影響することを実験的に示すと共に、シミュレーションによって高 EGR、および高当量比において炭化水素の熱分解反応が活性化することを示した<sup>(337)</sup>。Hans らは EGR 率と燃料種を変更した条件において CA50(質量燃焼割合 50%時期)と最高イオン信号検出時期に高い相関性があることを示し、この手法を用いて HCCI 燃焼フィードバック制御を構築した。また負のオーバーラップを用いた内部 EGR 方式 HCCI 燃焼への適用を次の課題としている<sup>(338)</sup>。Yiqun らはグローブラグ内蔵式のイオン電流センサを用いて HCCI 燃焼の燃焼開始を検知する手法を報告すると共に、センシング部の自己浄化機能の必要性を報告した<sup>(339)</sup>。田中らは内部 EGR 方式 HCCI 燃焼に対して実機検証を実施し、イオン電流生成割合と質量燃焼割合が 10%~70%時期において高い相関があることを見出し、イオン電流生成割合を用いて質量燃焼割合を推定できることを明らかとした。さらにサイクル毎の最大イオン電流発生時期と最高筒内圧力時期の高い相関を検証し、イオン電流センサにより燃焼時期のサイ

クル変動を検出する手法を報告した<sup>(340)</sup>。以上の従来研究は燃焼状態を検出することを主眼としてイオン電流センサの適用可否について検討されている。

ここでイオン電流センシングコンセプトを用いたNO<sub>x</sub>排出量推定のメカニズムについて、図 4.2 を用いて説明する。イオン電流センサは、電流波形として 2 つのピークを検出することが知られている<sup>(341)</sup>。一つ目のピーク A は熱分解ケミカルイオンと呼ばれ、燃焼初期の熱分解反応によって発生するイオン(H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, CHO<sup>+</sup>, C<sub>3</sub>H<sub>3</sub><sup>+</sup>) である。ケミカルイオンは火炎面がプラグの電極部を通過した際に検出される。2 つ目のピーク B はサーマルイオンと呼ばれ、燃焼による高温化により窒素が熱解離し発生するイオン(NO<sub>2</sub><sup>+</sup>)である。サーマルイオンは燃焼期間の近傍に検出されるが、燃焼室内の局所ではなく燃焼室バルクのイオンとして検出されていると考えられている<sup>(340)(341)</sup>。サーマルイオンは熱解離によって発生するNO<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンを検出していると考えられることから、NO<sub>x</sub> センサとしてイオン電流センシングコンセプトを立案した。

一方で HCCI 燃焼への適用に向けた課題は、低温燃焼である HCCI 燃焼においてサーマルイオン信号が弱まることと考えられる。したがって本研究は、イオン検出感度に影響を及ぼす点火プラグの印加電圧変更による検出感度向上効果を検証するため、一般的な点火コイル一体型のイオン電流センサを用いて、印加電圧(ダイオードの降伏電圧)を変更することでイオン検出感度を変更した。エンジンアウト NO<sub>x</sub> とイオン電流信号の相関を検証し、NO<sub>x</sub> センサとしての活用を検討した。また、HCCI 燃焼の IMEP, dp/dθ<sub>max</sub> との相関も検証することでイオン電流センサの信号と燃焼状態との関連性を明らかにすることとした。

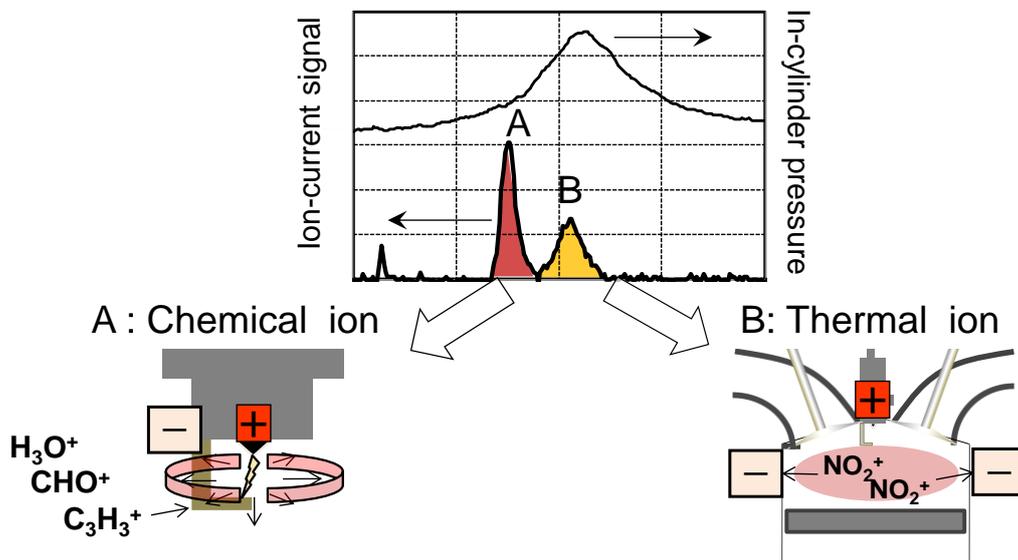


Fig.4.2 Ion current signal of spark ignition combustion

### 4.3 実験装置および実験条件

図 4.3 に本研究で使用したイオン電流センサを示す。本回路は印加電圧を調整するダイオードと、増幅アンプ、ノイズ除去回路、イオン信号検出部によって構成されている。印加電圧は 225V から 840V まで変更した。アンプ部の増幅率は 1.0 とした。ノイズ除去回路の遮断周波数は 1.5kHz とした。図 4.4 に試験エンジンの外観を、表 4.2 にエンジン諸元を示す。総排気量は 1987cm<sup>3</sup>、V 型 6 気筒であり、圧縮比は 12 である。燃料噴射はサイドマウント DI であり、バルブシステムは可変位相および可変リフトにより構成される連続可変バルブシステムを吸排気に搭載した。イオン電流センサおよび筒内圧センサを各気筒に装着し、イオン電流履歴と筒内圧履歴を同時計測した。

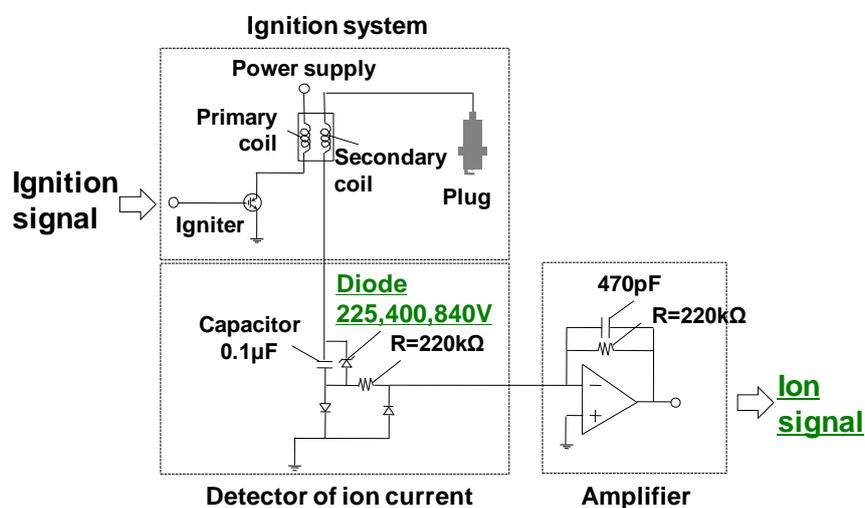


Fig.4.3 Circuit of ion current sensor



Fig.4.4 Test engine

Table 4.2 Specifications of test engine

V6-cylinder 4-stroke engine	
Bore × Stroke [mm]	93.0 × 73.3
Displacement [cm <sup>3</sup> ]	2,987
Compression ratio	12.0
Valve control system (Intake & exhaust)	Valve timing & lift control
Fuel supply system	Direct injection

エンジン制御は Rapid Proto Typing (RPT) を用い、燃料噴射量、点火時期、スロットル開度、吸排気バルブの開閉時期を制御した。イオン電流センサの信号は回路内で電圧に変換し測定した。なおイオン電流センサの信号処理は式(4.1)を用い、イオン電流(抵抗部にて電圧に変換)を時間積分し、イオン強度 II と定義し算出した。

$$II = \int_{\theta_1}^{\theta_2} V_{ion} dt \dots \dots \dots \text{式 4.1}$$

ここで、II はイオン強度[V・sec]、θ<sub>1</sub> は積分開始クランク角度[deg.ATDC CA]、θ<sub>2</sub> は積分完了クランク角度[deg.ATDC CA]、V<sub>ion</sub> はイオン信号[V]、dt はサンプリング時間[sec]である。式(12)で得られるイオン強度 II は、上記積分開始クランク角度と積分完了クランク角度に応じてケミカルイオンとサーマルイオンを積分する。積分期間として θ<sub>1</sub>、θ<sub>2</sub> を設定する必要があるが、これは実験結果に基づき設定することとした。

表 4.3 に試験条件を示す。燃焼方式は HCCI 燃焼と SI 燃焼を比較のため実施した。HCCI 燃焼時の IMEP は 0.21~0.48MPa、イオン電流検知のため点火は実施し点火時期を 30deg.BTDC CA とした。SI 燃焼時の IMEP は 0.18~0.46MPa、点火時期は MBT とした。エンジン回転数は 1400rpm とした。

Table 4.3 Experimental conditions

Combustion mode	HCCI	SI
Engine speed [rpm]	1400	←
IMEP [MPa]	0.21 ~ 0.48	0.18 ~ 0.46
Ignition timing [deg.BTDC CA]	30	MBT
Applied voltage [V]	225,400,840	225
Fuel	Regular gasoline (90 RON)	

#### 4.4 実験結果および考察

図 4.5 に HCCI 燃焼, 1400rpm 時の熱発生率とイオン信号を示す. データは 10 サイクルの平均を示している. 熱発生率の増加に伴い燃焼期間中のイオン信号が増加していることが分かる. これは前述のサーマルイオン生成の増加によるものと推測される. サーマルイオンの信号のピーク電圧は最大 0.45V 程度であり, 低負荷(IMEP=0.26MPa)時は 0.1V 未満と非常に低いことが分かった.

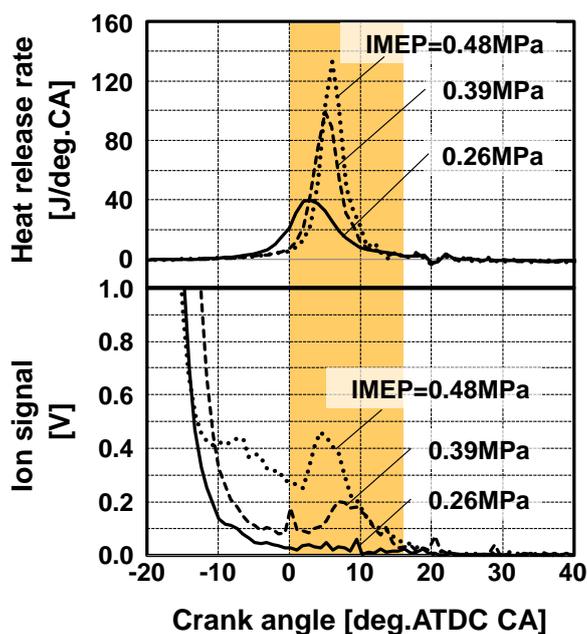


Fig.4.5 Heat release rate and ion current signal of HCCI condition

図 4.6 に SI 燃焼, 1400rpm 時の熱発生率とイオン信号を示す. HCCI 燃焼同様に熱発生率の増加に伴い熱発生率が最大となる時期の近傍に現れるイオン信号が増加している. また HCCI 燃焼に比べ熱発生率が最大となる時期の近傍に現れるイオン信号が高い値を示しており, ピーク電圧は 1.5V~5V 程度となることが分かった. 以上の傾向を見ると燃焼方式によらず IMEP の増加に伴いイオン信号は増加傾向にあることから, 式(12)に示したイオン強度 II を用いることで相関が得られると考えられる.

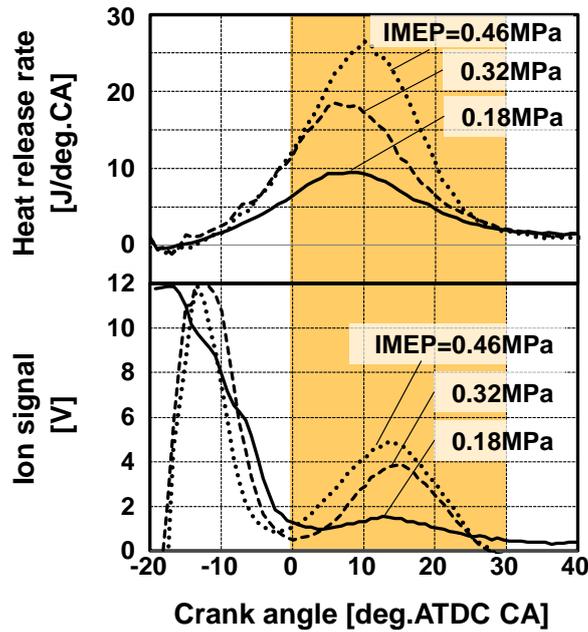


Fig.4.6 Heat release rate and ion current signal of SI condition

上記イオン強度  $I$  を検出するにあたり、積分開始クランク角度  $\theta_1$  と積分完了クランク角度  $\theta_2$  を選定するため、燃焼によって生成されるイオンを実験的に検証した。HCCI 燃焼および SI 燃焼で運転している条件において、特定の 1 気筒のみ燃料カットすることで燃焼有無の条件を作り出し、この際に得られたイオン信号の差異を確認した。

図 4.7 は HCCI 燃焼と燃料カットの比較である。上図は筒内圧であり、燃料カットによって筒内圧上昇が無い状態(モータリング)であることが分かる。この時のイオン信号(下図)は上死点前 80deg.BTDC CA 近傍において点火時期までに増加し、上死点前 30deg.BTDC CA において急速に 0V に降下し保持されている。この点火時期までの増加は点火コイルへの充電のための電流が現れており燃焼有無によらず変化しない。また降下のタイミングにおいて点火プラグで絶縁破壊が発生していると考えられる。0V 近傍に保持されている期間は放電期間である。放電が完了した後、イオン信号は増加し前述のケミカルイオンと類似する波形を示した。一方でケミカルイオンも燃焼有無に関わらず同一のイオン信号となっていることから HCCI 燃焼ではケミカルイオンの発生が無いと推測される。したがって放電完了後のイオン信号には放電に関連するノイズが検出されていることが分かった。このノイズを検出した以後、筒内圧が最大値となる時期とほぼ同時期にイオン信号の増加が検出されている。これはサーマルイオンが検出されていると推測される。

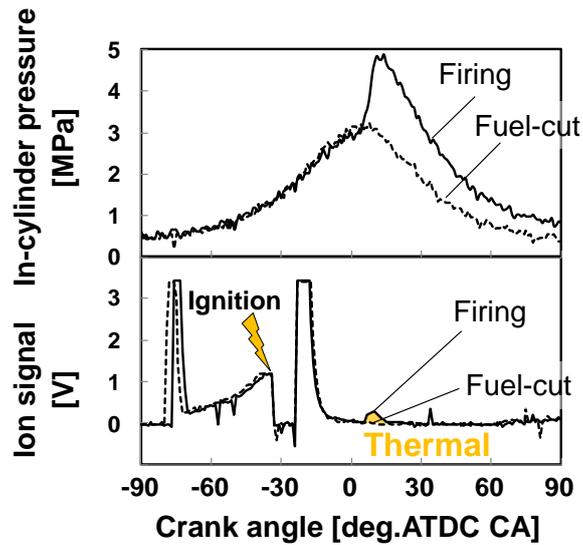


Fig.4.7 Comparison of HCCI and fuel cut situation

図 4.8 は SI 燃焼と燃料カットの比較である。上図の筒内圧に示す通り、燃料カットによって筒内圧上昇が無い状態(モータリング)であることが分かる。この時のイオン信号(下図)は上死点前約 30deg.BTDC CA(MBT)において急速に 0V に降下し保持されており、前述の HCCI 燃焼と同様の挙動を示した。しかしながら、放電が完了した後イオン信号は燃焼有無で異なっており、SI 燃焼をしている時の信号が大きい値を示した。したがって SI 燃焼時は放電完了後にノイズとケミカルイオンを合成したイオン信号波形が検出されていることが分かった。また HCCI 同様に筒内圧の最大値となる時期とほぼ同時期にイオン信号の増加が検出された(サーマルイオン)。

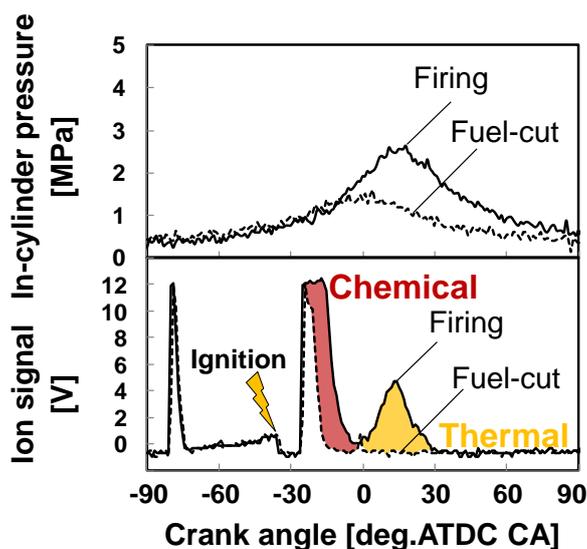


Fig.4.8 Comparison of SI and fuel cut situation

さらに本研究で用いたイオン電流センサの回路は点火コイル一体型で構成されているため、イオン信号が点火時期の影響を受ける可能性がある。そこで実験的に点火時期がイオン信号に与える影響を確認した。図 4.9 は HCCI 燃焼において点火時期を変更した際のイオン信号を示している。点火時期を 10deg.BTDC CA から 70deg.BTDC CA まで進角した際、HCCI 燃焼の筒内圧には影響は現れていない。しかしながら 10deg.BTDC CA では前述のサーマルイオンが検出される時期にノイズが検出されてしまうことからイオン検出が不可能となる。また 35deg.BTDC CA と 70deg.BTDC CA ではサーマルイオンの検出が可能である。

以上をまとめると SI 燃焼時はケミカルイオンとサーマルイオンが検出され、HCCI 燃焼ではサーマルイオンが主に検出されることが分かった。また本研究で用いたコイル一体型イオン電流センサの構成では放電やノイズなどの信号がイオン信号に混入するため、点火時期をサーマルイオン検出時期より進角側へ設定する必要があることが分かった。

上記実験結果に基づき、式(4.1)イオン強度 II は、サーマルイオンを積分することを主眼に置き、HCCI 燃焼と SI 燃焼で同様の設定値( $\theta_1=0\text{deg.ATDC CA}$ ,  $\theta_2=60\text{deg.ATDC CA}$ )として検討を進めた。また HCCI 燃焼時の点火時期は 30deg.BTDC CA に固定した。

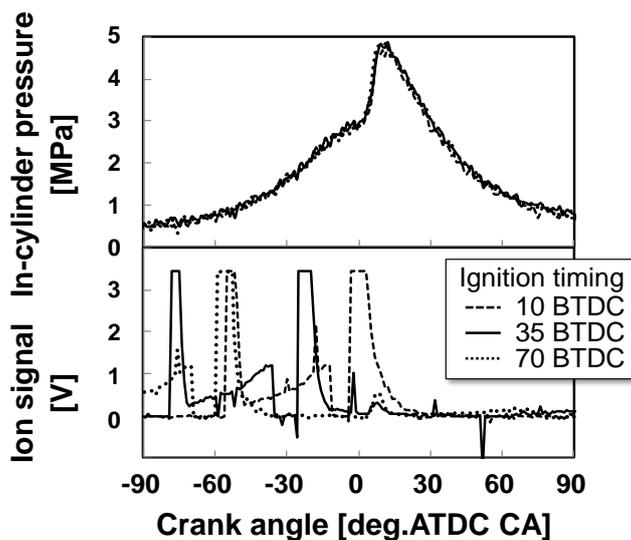


Fig.4.9 Influence of ignition timing for ion signal of HCCI condition

図 4.10 にイオン強度 II と IMEP の関係を示す。実線はダイオード電圧 225V、破線は 400V、点線は 840V の結果である。IMEP の増加と共にイオン強度 II も増加することが分かる。またダイオード電圧を昇圧することによりイオン強度 II は増加し、決定係数も向上傾向が見られた。一方で 400V 程度の高電圧が必要であると共に、840V まで昇圧しても決定係数に改善は見られない結果となった。

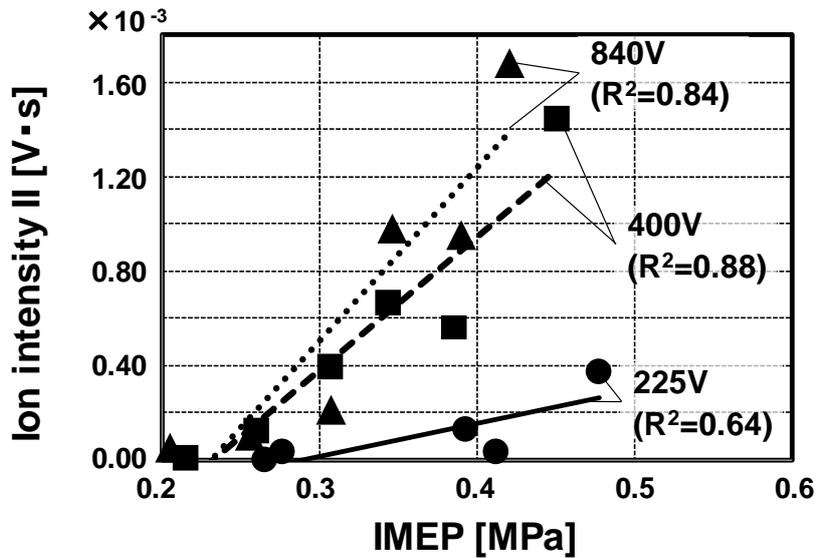


Fig.4.10 Relationship between ion intensity II and IMEP of HCCI condition

図 4.11 にイオン強度 II と最大圧力上昇率  $dp/d\theta_{max}$  の関係を示す. IMEP 同様に  $dp/d\theta_{max}$  の上昇に伴いイオン強度 II も増加する傾向が見られる. しかしながら印加電圧によらず  $dp/d\theta_{max}$  に対するイオン強度 II は二次曲線的な増加傾向を示しており, HCCI 燃焼の燃焼騒音許容値が  $dp/d\theta_{max} \leq 500 \text{ kPa/deg.CA}$  程度であることを考慮すると, 実際に使用する領域でのイオン強度 II が非常に小さいことが分かった. またこの領域内では 840V まで昇圧してもイオン強度 II の増加は見られなかった. これは印加電圧を昇圧してもイオンの検出感度が飽和していることを意味しているためと考えられる.

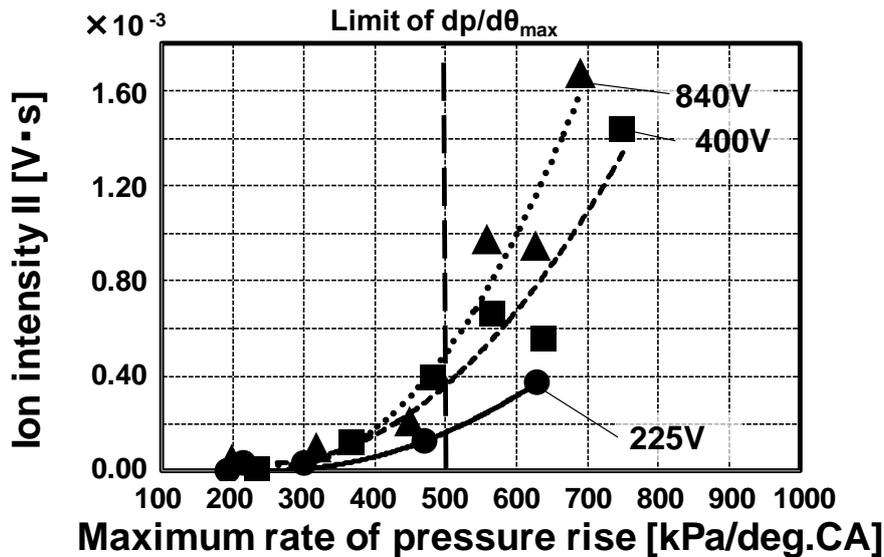


Fig.4.11 Relationship between ion intensity II and  $dp/d\theta_{max}$  of HCCI condition

図 4.12 にイオン強度 II と NO<sub>x</sub> 排出量の関係を示す。NO<sub>x</sub> の測定値は排ガス分析計により測定した値を使用した。NO<sub>x</sub> 排出量の増加によりイオン強度は増加しており、本研究のイオン強度 II が NO<sub>x</sub> 生成過程におけるサーマルイオンを検出していることを示していると考えられる。また低温燃焼である HCCI 燃焼ではサーマルイオンの発生が非常に少なく、かつ低負荷条件においては NO<sub>x</sub> 排出量がほぼ零である点を鑑みてもサーマルイオンの生成が無いことが推測される。したがって印加電圧を昇圧しイオン検出感度を向上してもイオン強度 II が増加しなかったと考えられる。以上の結果より、イオン電流センサの信号における熱発生率が最大となる時期の近傍に現れるイオン(サーマルイオン)は NO<sub>x</sub> 生成量、つまり G/F や筒内温度に強い相関を持つと推測される。

この推測を裏付けるため HCCI 燃焼での様々な運転条件(エンジン回転数, IMEP, G/F を変更)でのイオン強度 II と G/F の関連を検証した。図 4.13 にイオン強度 II と G/F の関係を示す。G/F の増加と共にイオン強度 II は減少していく傾向となり、NO<sub>x</sub> 排出量増加の一つの指標である G/F が 35 以下となることでイオン強度 II が増加傾向となった。

以上のことから、HCCI 燃焼における NO<sub>x</sub> 排出量の推定手法としてイオン電流センシングが適用可能と判断すると共に、NO<sub>x</sub> 排出量低減のためのフィードバック制御手段は G/F であることが分かった。

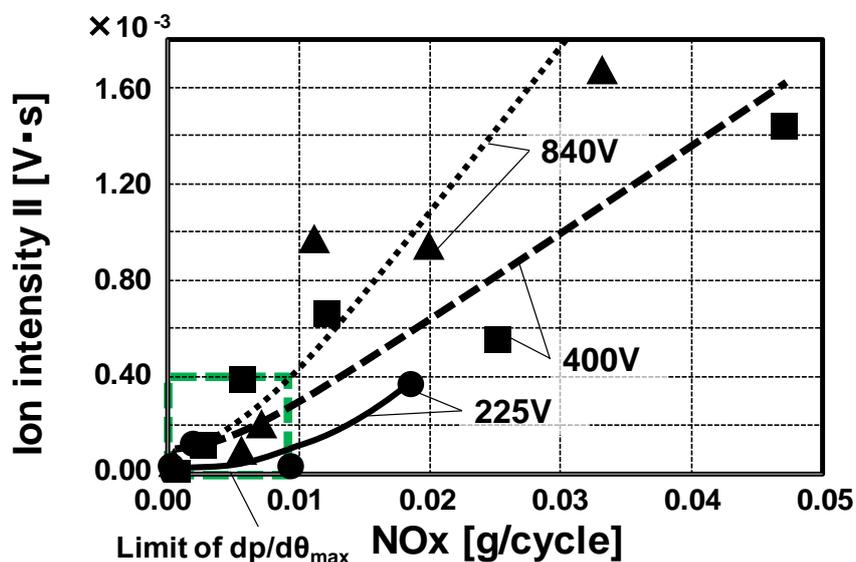


Fig.4.12 Relationship between ion intensity II and NO<sub>x</sub> of HCCI condition

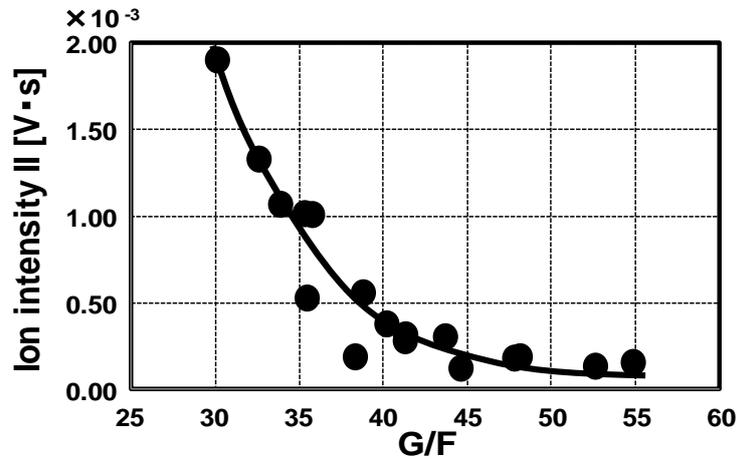


Fig.4.13 Relationship between ion intensity II and G/F of HCCI condition (Applied voltage 225V)

さらに図 4.14 に HCCI 燃焼, SI 燃焼 (ストイキ, 内部 EGR, リーン) を実施した際のイオン強度 II と最高筒内平均温度の関係を示す. 最高筒内平均温度は状態方程式を用いて算出した. 最高筒内平均温度とイオン強度 II には二次曲線的な相関が見られ, 燃焼方式に依存しないことが分かった. したがって比較的高温燃焼となるストイキの SI 燃焼時においてイオン検出が良好に実施できる. また低温燃焼(EGR, リーン)においてはイオン検出感度の向上が必須となると考えられる. そして HCCI 燃焼では前記低温燃焼よりもさらに低い最高筒内平均温度となることから, イオン検出感度向上のためさらなる高感度化が必要となると推測された.

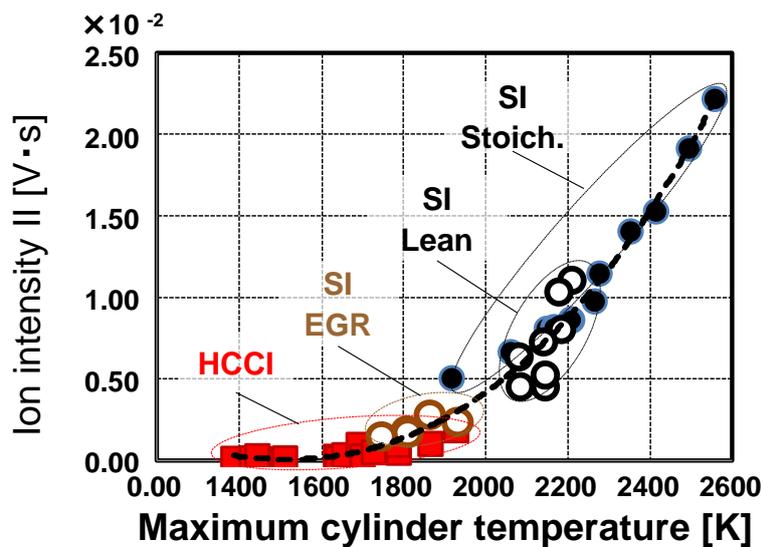


Fig.4.14 Relationship between ion intensity II and maximum cylinder temperature of several combustion conditions (Applied voltage 225V)

#### 4.5 本章の結論

HCCI燃焼のNO<sub>x</sub>排出量推定手法としてイオン電流センサを用いたイオン強度II検出手法を検討し、以下結論を得た。

燃焼時と燃料カット制御時(燃料噴射停止時)のイオン信号を比較した結果、SI燃焼ではケミカルイオンとサーマルイオンが検出されたが、HCCI燃焼ではサーマルイオンのみが検出された。印加電圧(ダイオードの降伏電圧)を上昇させることでHCCI燃焼時の主熱発生期間に出現するサーマルイオンは増加することが可能である。HCCI燃焼のG/Fを増加させることでイオン強度IIは低下する傾向にある。またNO<sub>x</sub>排出量も低下する傾向がある。したがって、HCCI燃焼におけるNO<sub>x</sub>排出量の推定手法としてイオン電流センシングが適用可能と判断すると共に、NO<sub>x</sub>排出量低減のためのフィードバック制御手段はG/Fであることが分かった。イオン強度IIと最高筒内平均温度は燃焼方式によらず高い相関性を有することから、低温燃焼においては燃焼状態を示すパラメータであるサーマルイオンの発生量が低下することがメカニズムである。

また、IMEPとイオン強度IIの決定係数は印加電圧を400Vとすることで0.8以上となるが、840Vまで昇圧しても改善は見られない。最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$ に対しては二次曲線的な相関となる。印加電圧を840Vまで昇圧しても $dp/d\theta_{max} \leq 500kPa/deg.CA$ 程度のHCCI実用範囲では検出感度の改善効果は小さい。

## 第5章 ガソリン HCCI 耐環境ロバスト制御の構築

### 5.1 はじめに

次世代のエンジン燃焼技術として位置付けられる HCCI 燃焼は，排気清浄化と熱効率向上を両立する手段として注目されている．HCCI 燃焼は，高温高压の雰囲気下において混合気の圧縮によって進行する低温酸化反応を経て，自己着火に至る燃焼方式である．HCCI エンジンシステムにおいては，以下解決すべき課題がある．

- (1) HCCI 燃焼の運転領域拡大
- (2) HCCI 燃焼と SI 燃焼との切替
- (3) ロバスト性の向上

(1)運転領域の拡大と(2)燃焼切替については従来研究において多くの報告がなされている．しかしながら，(3)ロバスト性の向上についての研究報告は少なく，対応が必要である．図 5.1はHCCI燃焼を行うエンジンシステムにおける課題を示している．エンジン冷却水温度，燃料のオクタン価の変化によって HCCI 燃焼は燃焼安定性，燃焼騒音，NO<sub>x</sub> 排出量の性能が変化する．また，エンジン部品の経時変化などによっても燃焼状態が変化し易く，これを検出，抑制する必要がある．

本章では，HCCI 燃焼のロバスト性向上を可能とする燃焼状態検出フィードバック制御 (ガソリン HCCI 耐環境ロバスト制御)の構築について述べる．

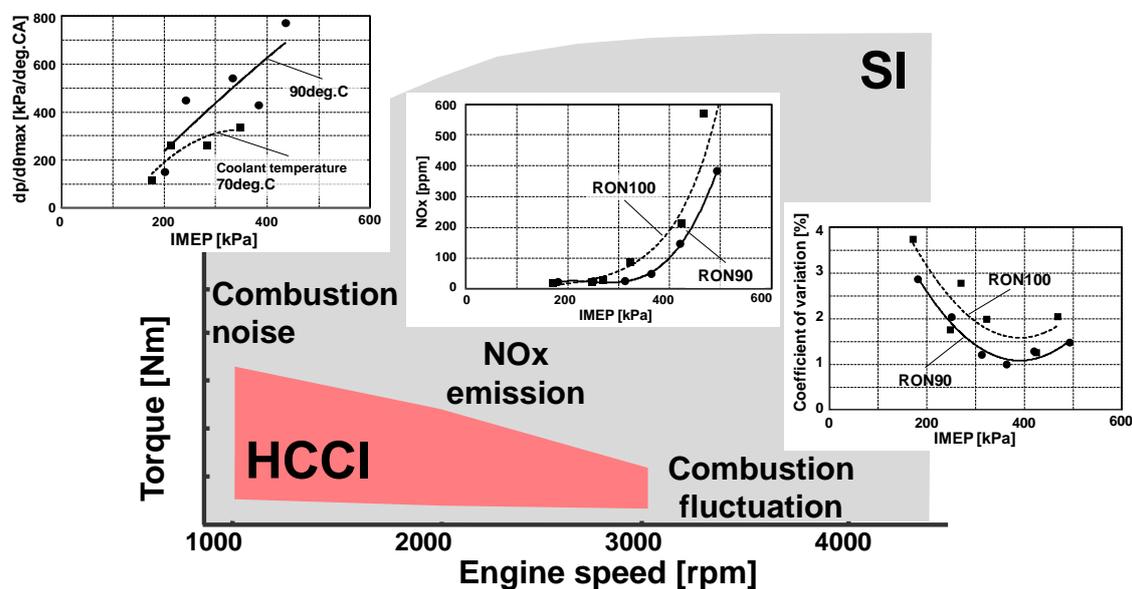


Fig.5.1 Challenges of HCCI engine system

## 5.2 ガソリン HCCI 耐環境ロバスト制御の体系化

図 5.2 にガソリン HCCI エンジンの燃焼状態検出およびフィードバック制御システムを示す。以下、本制御システムの詳細について述べる。本制御はトルクベース規範で構築する。アクセルペダル信号と外部からのトルク要求(エアコンやステアリング操舵による要求負荷増加),そしてエンジン回転数を含めた入力为目标トルク演算部に入力される。目標トルク演算部では,エンジンに対する目標図示トルクを出力する。この要求はトルク変換部に入力される。トルク変換部においては,要求に適合する様に各種エンジンデバイスの制御目標値を演算する。目標図示トルクとエンジン回転数は SI 制御部と HCCI 制御部に入力し,逐次 SI 用デバイス制御目標値と HCCI 用デバイス制御目標値を演算する。ここで HCCI 燃焼と SI 燃焼ではエンジン動作領域が異なるため,燃焼モード判定部を備えることとした。燃焼モード判定部では予め HCCI 燃焼を実施可能な目標図示トルクとエンジン回転数領域を記憶しておく。燃焼モード判定部は,目標図示トルク,またはエンジン回転数の入力に対し,HCCI 燃焼が実施可能な範囲か否かを判定し,SI 燃焼モード,あるいは HCCI 燃焼モードの判定出力を出力する。燃焼モード判定出力は燃焼切替制御部に入力する。燃焼切替制御部では燃焼モード指令に応じて SI 用デバイス制御目標値と HCCI 用デバイス制御目標値を切り替える動作を行う。燃焼切替制御部では円滑な切替が行える様,各種デバイス目標値の切替を時間差をもって行う。燃焼切替制御部から出力する各種デバイス目標値をエンジンのハードウェアに伝送し,HCCI エンジンを運転する。

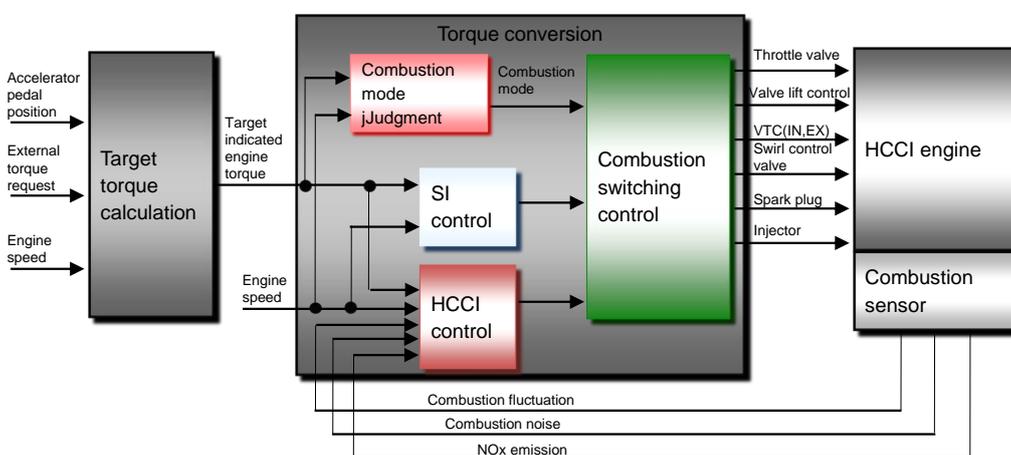


Fig.5.2 Combustion detection and feedback control system for gasoline HCCI engine

ここで HCCI エンジンには前章までに述べた燃焼状態を検出するセンサを搭載する。具体的にはクランク角センサ, ノックセンサ,そしてイオン電流センサである。これらセンサの信号は HCCI 制御部に入力する。図 5.3 に HCCI 制御部の内部構造を示す。HCCI 制御部は HCCI 用デバイス制御目標値演算部と燃焼検出フィードバック部を有する。燃焼検

出フィードバック部にクランク角センサとノックセンサ，そしてイオン電流センサの信号を入力し，燃焼変動，燃焼騒音，NO<sub>x</sub> 排出量の演算部へと伝送する．各燃焼状態演算部で得られた出力はオフセット値演算部へ入力され，フィードバック値として HCCI 制御部の出力値を補正する．

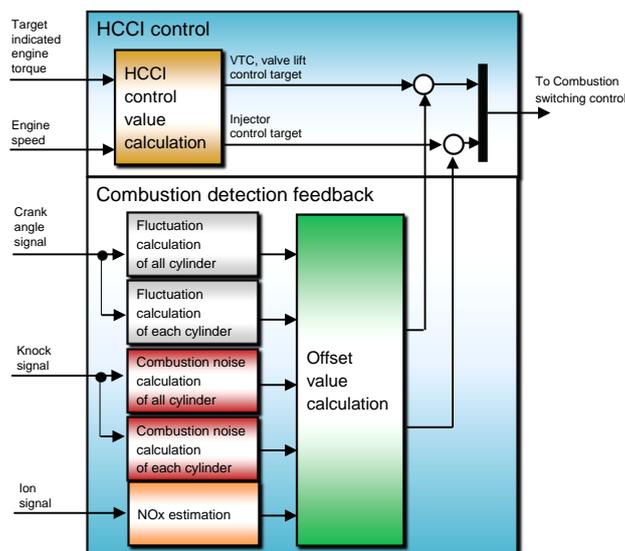


Fig.5.3 Internal structure of HCCI control

表 5.1 に，本フィードバック制御システムを構築する演算手法をまとめる．検出パラメータとしては燃焼変動，燃焼騒音，NO<sub>x</sub> 排出量がある．これらに対しそれぞれクランク角センサ，ノックセンサ，イオン電流センサを適用する．検出手法は回転変動検出手法，エンジン振動検出手法，イオン信号積分手法を用いる．回転変動検出手法の評価パラメータは角加速度の標準偏差  $\sigma d\omega$  とし，エンジン振動検出手法は振動強度 VI，イオン信号積分手法はイオン強度 II である．それぞれの燃焼状態検出結果に応じ，フィードバック対象とするパラメータは内部 EGR，NVO 中の噴射(ラジカル生成量)，A/F，あるいは G/F とした．これらのフィードバック対象とするパラメータを変更可能なデバイスとして，可変バルブ機構，インジェクタ，スロットルを選定した．

Table 5.1 Detection and control strategy of combustion condition

Detection parameter	Combustion fluctuation	Combustion noise	NO <sub>x</sub> emission
Sensor type	Indirect	Indirect	Direct
Sensor	Crank angle	Knock	Ion current
Detection method	Rotational fluctuation	Engine vibration	Ion signal integral
Estimation parameter	$\sigma d\omega$ : Standard deviation	VI: Vibration intensity	II: Ion intensity
Feedback parameter	Interval EGR Radical quantity	Radical quantity	A/F, G/F
Feedback device	Variable valve control Injector	Injector	Throttle

### 5.3 リアルタイムロジックの実装

図 5.4 に回転変動検出のロジックを示す。本ロジックは Matlab/Simulink により記述したリアルタイム用プログラムである。処理フローについて以下説明する。

本プログラムはクランク角度周期で起動，演算，終了を繰り返し行う。クランク角信号が入力されることで，回転速度  $\omega$  検出トリガが各気筒で起動し，タイマーが起動される。各気筒で 2 回のトリガが引かれ， $\omega$  検出開始時期と  $\omega$  検出完了時期の経過時間が計測される。この結果に基づき  $\omega$  演算部で  $\omega$  が逐次演算される。 $\omega$  は  $d\omega$  演算部に入力され隣接気筒，および対向気筒間で演算される。 $d\omega$  は  $\sigma_m d\omega$  演算部に入力され，予め設定されるサンプリング数に応じた統計処理値を出力する。この統計処理値を燃焼変動と相関のある評価パラメータとして取り扱う。

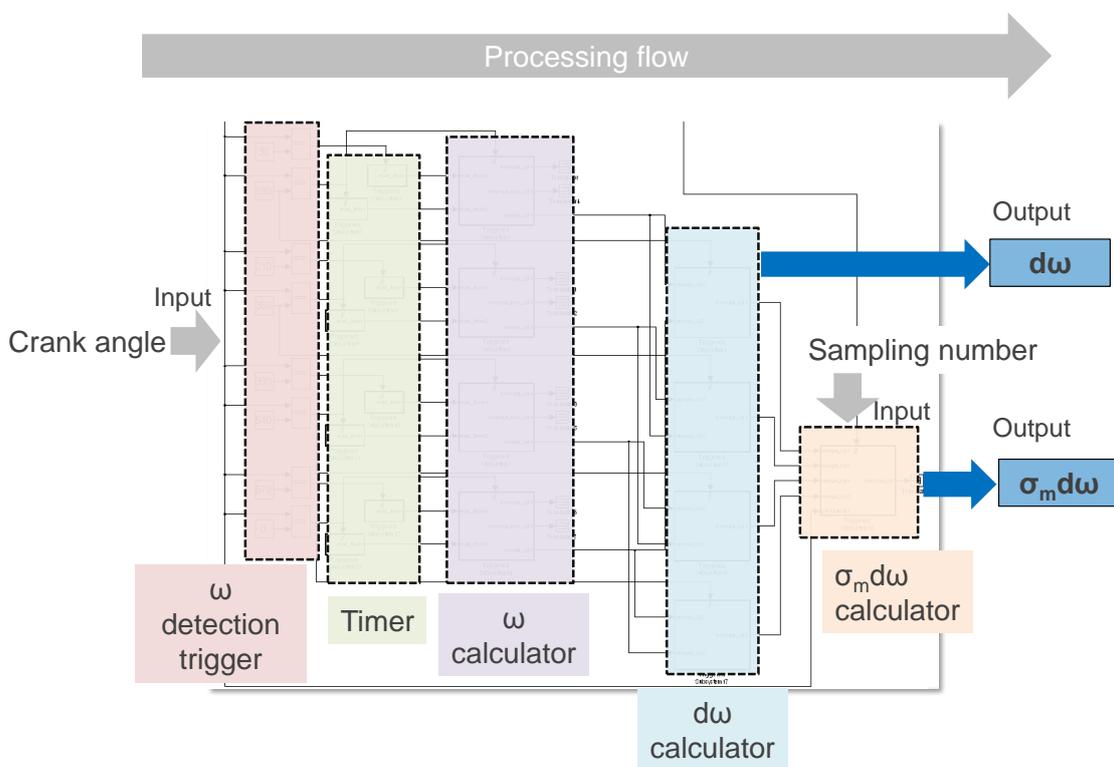


Fig.5.4 Rotational fluctuation detection logic

本ロジックには標準偏差 $\sigma$ は使用せず平均偏差 $\sigma_m$ を用いた。これは計算負荷軽減のため適用したものであり，検出性能の優劣について計算処理時間の確認を行い判断した。

標準偏差と同等な評価指標として式(5.1)に示す平均偏差がある。

$$\sigma_m d\omega = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\omega_i - \bar{\omega}| \dots \dots \dots \text{式 5.1}$$

平均偏差の算出式は標準偏差に比べ簡素であり、計算負荷を低減可能である。同一データ数(100データ×100回演算)に対する標準偏差処理と平均偏差処理の計算時間を検証した結果、15%の計算時間低減効果が得られた。また図5.5、5.6に示す様に、燃焼変動 $\sigma_{IMEP}$ と $\sigma d\omega$ 、および $\sigma_{md\omega}$ の決定係数には優位差は無く、同等の検出精度が確保されている。したがって、回転変動検出リアルタイムロジックには平均偏差 $\sigma_{md\omega}$ を評価パラメータとして使用し実装した。

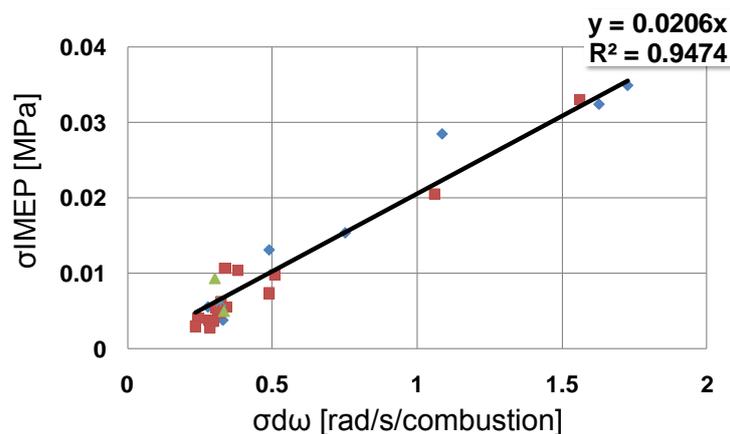


Fig.5.5 Coefficient of correlation using standard deviation (HCCI mode)

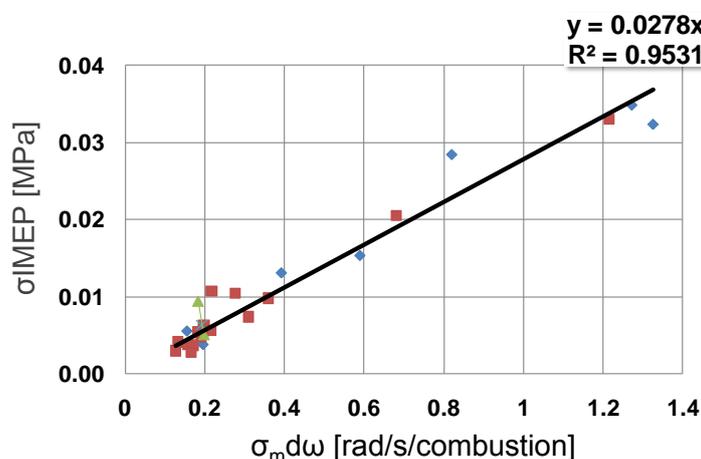


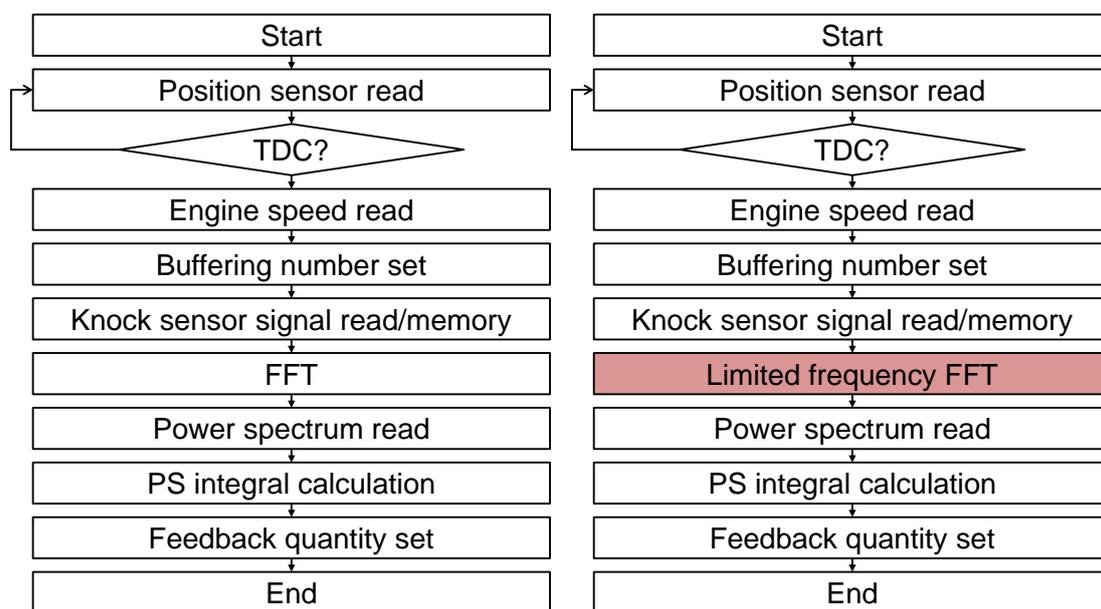
Fig.5.6 Coefficient of correlation using averaging deviation (HCCI mode)

次に、エンジン振動検出のリアルタイムロジックについて述べる。FFTをリアルタイムロジックとして実装することは、計算負荷の増大を招く。そこで、前章で述べた様に、HCCI燃焼の燃焼騒音は10モードに相関が得られたことを鑑み、周波数を限定したFFTを用いて実装を行った。

図5.7にリアルタイムFFTのフローチャートを示す。Aは全周波数帯を対象とし、Bは周波

数を限定するフローチャートである。演算プログラムがスタートされた後、クランク角度を判定する位置情報読み込みプログラムが実行される。TDCを判定した時、エンジン回転数の読み込み、ノック信号のバッファリング数の設定、ノックセンサ信号の読み込み、記憶を行う。次に全周波数を対象とするFFTを行い、パワースペクトル読み込み、PS積分演算、フィードバック制御量設定と続く。ここで全周波数を対象とするFFTではリアルタイムプログラムへの実装は困難であった。そこでBに示す限定周波数FFTに変更し、リアルタイムプログラムとして機能することを目指した。

具体的には、HCCI 燃焼の燃焼騒音に相関が得られた 10 モード(5kHz)のパワースペクトルのみを算出し、逐次演算方式によりリアルタイムプログラムを構築した。なお 10 モードはシリンダ内を直径方向に二分した領域間で、圧力振動が発生している振動モードである。

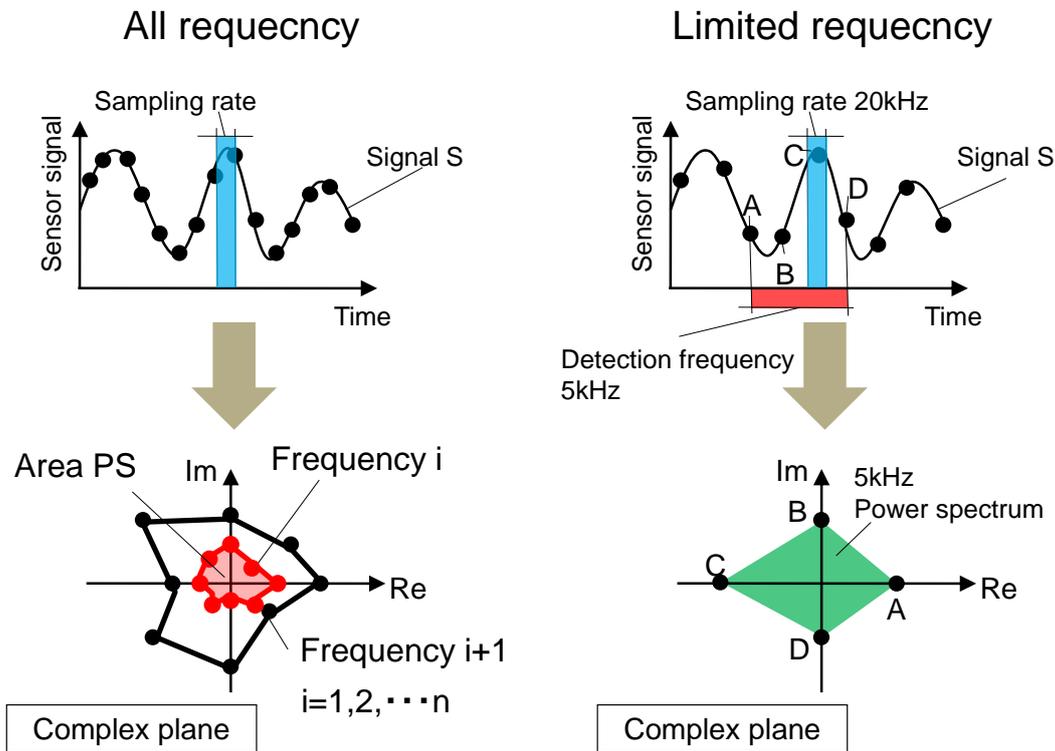


A. All frequency FFT

B. Limited frequency FFT

Fig.5.7 Flowchart of engine vibration detection method

図 5.8 に全周波数対象 FFT と限定周波数 FFT の概念図を示す。縦軸はノックセンサの電圧信号、横軸は時間である。ノックセンサ信号はアナログ値であり、時々刻々と変化する。Analog/digital(A/D)変換を行う際、アナログ値は離散化されサンプリングレートに基づきデータ取得される。非常に高い周波数でのサンプリングを行うことで離散化を低減できることから、全周波数 FFT では複素平面上での詳細なパワースペクトルを解析することができるが、計算負荷が非常に高まる。そこで限定周波数 FFT では、Shannon Hartley theorem<sup>(342)</sup>に従い、検出周波数 5 kHz に対しサンプリングレートを 20 kHz とする。これにより検出周波数に対するデータは  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$ ,  $S_D$  の 4 点が取得できる。全周波数対象に比べ周波数は限定でき、5kHz のパワースペクトルについては同値が得られる。



A. All frequency FFT

B. Limited frequency FFT

Fig.5.8 Schematic of FFT

具体的には、式(5.2)を用いて実部  $Re$  と虚部  $Im$  を算出する。実部  $Re$  は  $Re(1)$  と  $Re(2)$ 、虚部  $Im$  は  $Im(3)$  と  $Im(4)$  が残る。これらの実部と虚部の値を用い式(5.3)により検出周波数  $5kHz$  のパワースペクトルを算出することが可能である。

$$\begin{aligned}
 Re(1) &= S_A \cdot \cos(0\pi) \\
 Re(2) &= S_B \cdot \cos(\pi/2) = 0 \\
 Re(3) &= S_C \cdot \cos(\pi) \\
 Re(4) &= S_D \cdot \cos(3\pi/2) = 0 \\
 Im(1) &= S_A \cdot \sin(0\pi) = 0 \quad \dots \dots \dots \text{式 5.2} \\
 Im(2) &= S_B \cdot \sin(\pi/2) \\
 Im(3) &= S_C \cdot \sin(\pi) = 0 \\
 Im(4) &= S_D \cdot \sin(3\pi/2)
 \end{aligned}$$

$$PS = \sqrt{\{Re(1) + Re(3)\}^2 + \{Im(2) + Im(4)\}^2} \quad \dots \text{式 5.3}$$

次に、逐次演算方式の概要を図 5.9 に示す。まず式(5.3)に示した実部  $Re$  と虚部  $Im$  の演算部を用意する。信号データのサンプリングステップが 1 の時、各演算部には  $S_A \sim S_D$  が入力され、式(5.3)を用いてパワースペクトルが算出される。サンプリングステップが 2 に進むと、 $S_A \sim S_D$  は一つスライドし、新たに取得したデータ  $S_E$  が  $Im(4)$  演算部に入る。これにより各演算部には  $S_B \sim S_E$  が入力され式(5.3)を用いてパワースペクトルが算出される。このようにサンプリングステップ毎に演算部に入力されるデータをスライドすることで、逐次パワースペクトルが演算可能となる。この逐次演算パワースペクトルを 1 燃焼に渡って積分することで振動エネルギー  $VI$  がリアルタイムに算出できる。

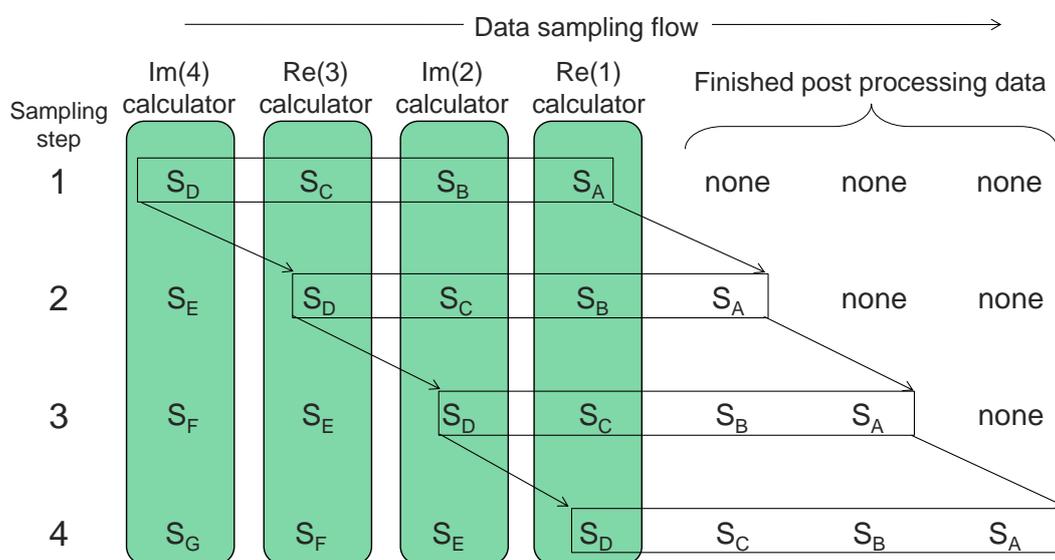


Fig.5.9 Schematic of sequential calculation

図5.10に振動強度検出のロジックを示す。本ロジックはMatlab/Simulinkにより記述したリアルタイム用プログラムである。処理フローについて以下説明する。

本プログラムは20kHz周期で起動、演算、終了を繰り返し行う。PS演算部はクランク角信号に基く振動強度演算トリガが入力されることで起動する。PS演算部はPS積分値である  $VI$  を出力する。PS演算部の内部は、信号ドリフト補正部と複素変換部、PS積分演算部で構成した。信号ドリフト補正部はノックセンサの特性に合わせた補正值を予め設定する。複素変換部は式(5.2)を繰り返し実行する。PS積分演算部はPSを積分し1燃焼毎に  $VI$  を出力する。

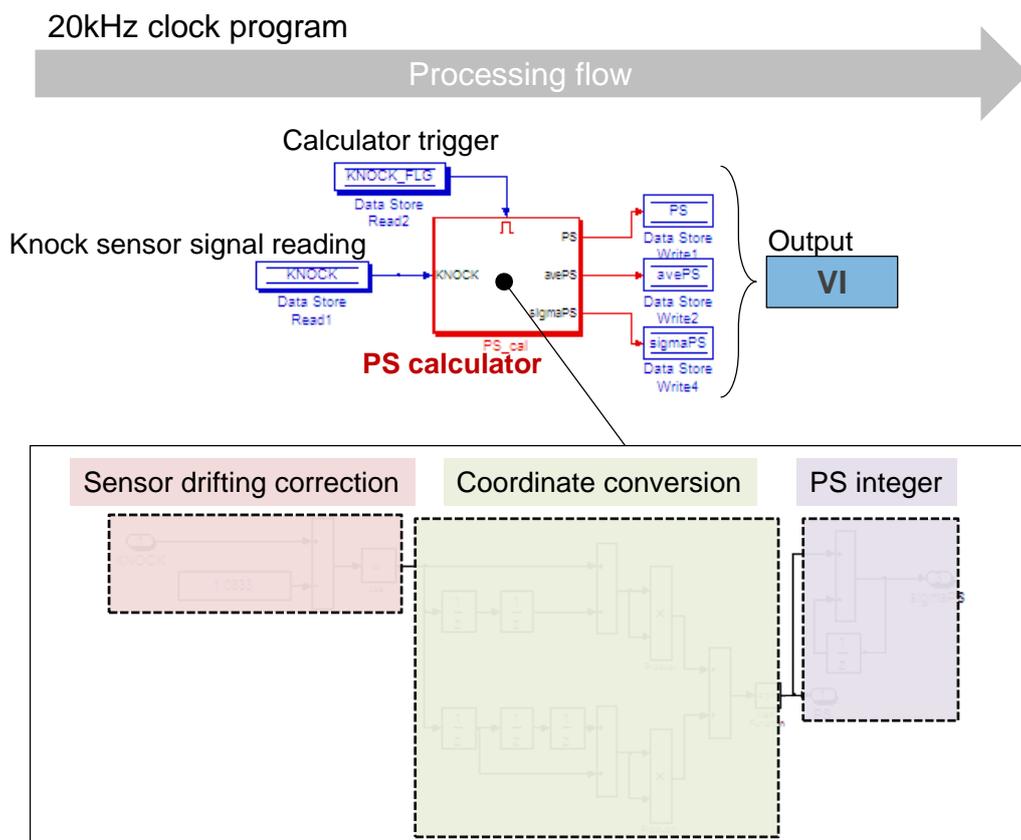


Fig.5.10 Vibration intensity detection logic

#### 5.4 実験装置および実験条件

図5.11に実験装置の外観を，表5.2に評価エンジンの諸元を示す．評価エンジンはDIシステムと連続可変動弁システムを吸排気に搭載しており，HCCI燃焼が可能である．



Engine A



Engine B

Fig.5.11 Test engine

Table 5.2 Specifications of test engine

Test engine	A	B
Number of cylinder	4	6
Bore × Stroke [mm]	89.0 × 80.3	93.0 × 73.3
Displacement [cm <sup>3</sup> ]	1,998	2,987
Compression ratio	12.0	←
Valve control (Intake Exhaust)	VTC & lift control	←
Fuel supply	Direct injection	←

表5.3にリアルタイム回転変動検出ロジックの検出性能検証のための実験条件を示す。試験はHCCI燃焼を安定運転条件で保持した後、データ取得を開始後1.3秒時点でステップ的に不安定化条件へ移行する流れで実施した。具体的にはNVOの短縮により内部EGRを減じ、燃焼が不安定化する条件を模擬した。

Table 5.3 Experimental condition for combustion fluctuation detection performance

Combustion mode	HCCI
NVO [deg.CA]	160 to 150
Sampling number	30

表5.4にリアルタイム振動強度検出ロジックの検出性能検証のための実験条件を示す。試験はHCCI燃焼を安定運転条件で保持した後、データ取得を開始後2.6秒時点でステップ的に燃焼騒音条件へ移行する流れで実施した。具体的にはNVO噴射の噴射パルス幅を増加することにより、燃焼騒音が増加する条件を模擬した。

Table 5.4 Experimental condition for combustion noise detection performance

Combustion mode	HCCI
NVO injection pulse width [μs]	920 to 1000
NVO [deg.CA]	133 to 152

## 5.5 燃焼安定化性能検証

図 5.12 に NVO ステップ変更時の IMEP と  $\sigma_{m d\omega}$  の推移を示す. NVO がステップ変更された後, IMEP の変動が増加している. クランク角センサ信号を用いた回転変動  $\sigma_{m d\omega}$  もまた増加している. したがって燃焼変動の発生を回転変動によりリアルタイムで検出可能であることが確認された.

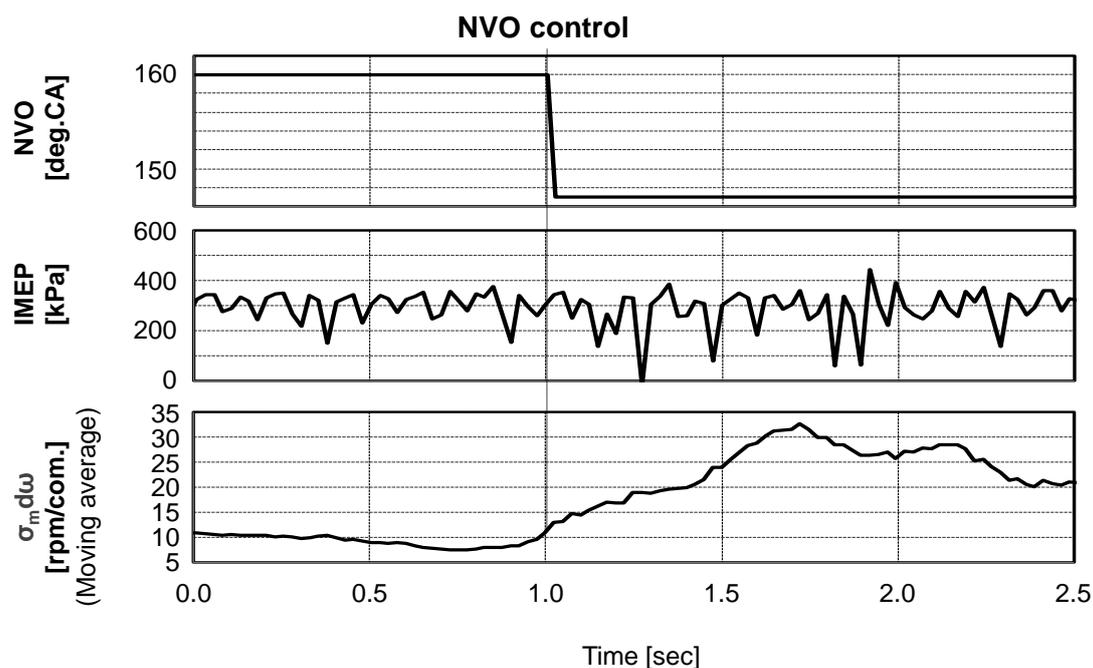


Fig.5.12 Detection result of HCCI combustion fluctuation

図 5.13 に NVO, および NVO 噴射ステップ変更時の  $dp/d\theta_{max}$  と VI の推移を示す. NVO, および NVO 噴射がステップ変更された後,  $dp/d\theta_{max}$  は増加し燃焼騒音が発生した. ノックセンサ信号を用いた振動強度 VI もまた増加している. したがって燃焼騒音の発生を振動強度によりリアルタイムで検出可能であることが確認された.

以上のことから, 本開発ロジックはリアルタイムでの HCCI 燃焼状態検出を実施可能であることを検証したと考える.

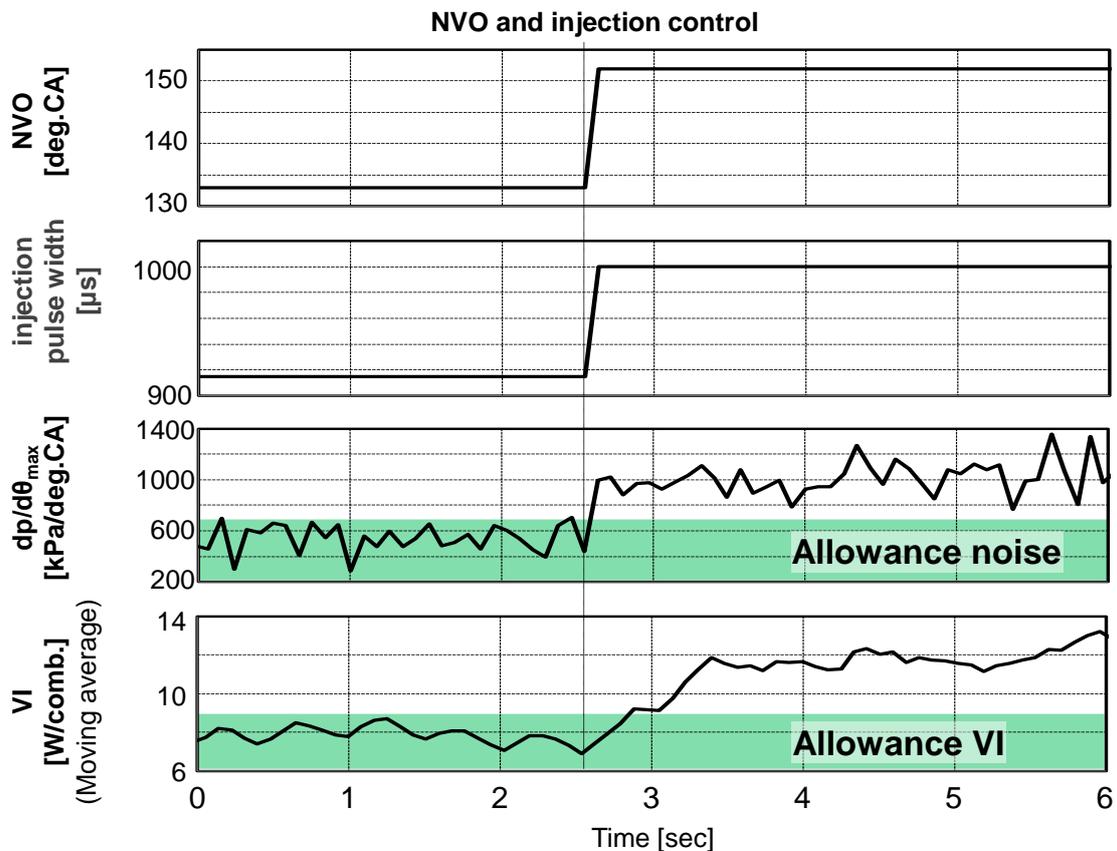


Fig.5.13 Detection result of HCCI combustion noise

さらに本リアルタイムロジックを適用した NVO と NVO 噴射へのフィードバック制御を実行した結果を図 5.14 と図 5.15 に示す。図 5.14 では、作為的に燃焼変動を発生させた状態から安定化フィードバック制御を開始し、 $\sigma_{md\omega}$  が減少する方向へ NVO を減少し、IMEP が安定化することを検証した。また図 5.15 では、作為的に燃焼騒音を発生させた状態から安定化フィードバック制御を開始し、NVO を短縮しつつ、NVO 噴射期間を減少する制御によって振動強度 VI を許容 VI 範囲内へ収束できることを検証した。

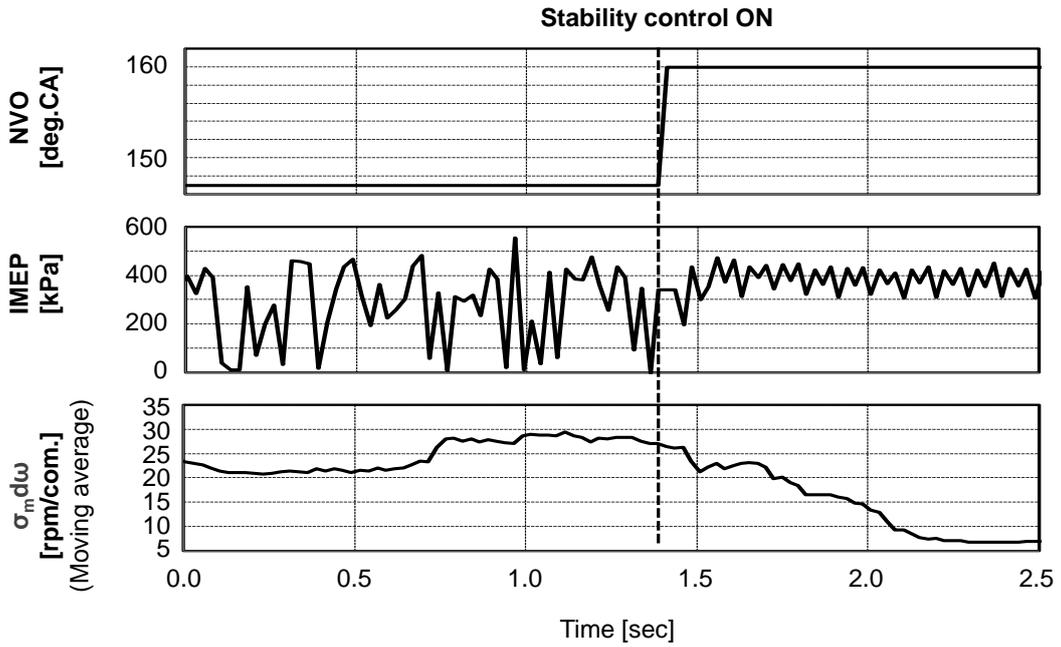


Fig.5.14 Combustion stabilizing effect of feedback control using rotational fluctuation detection

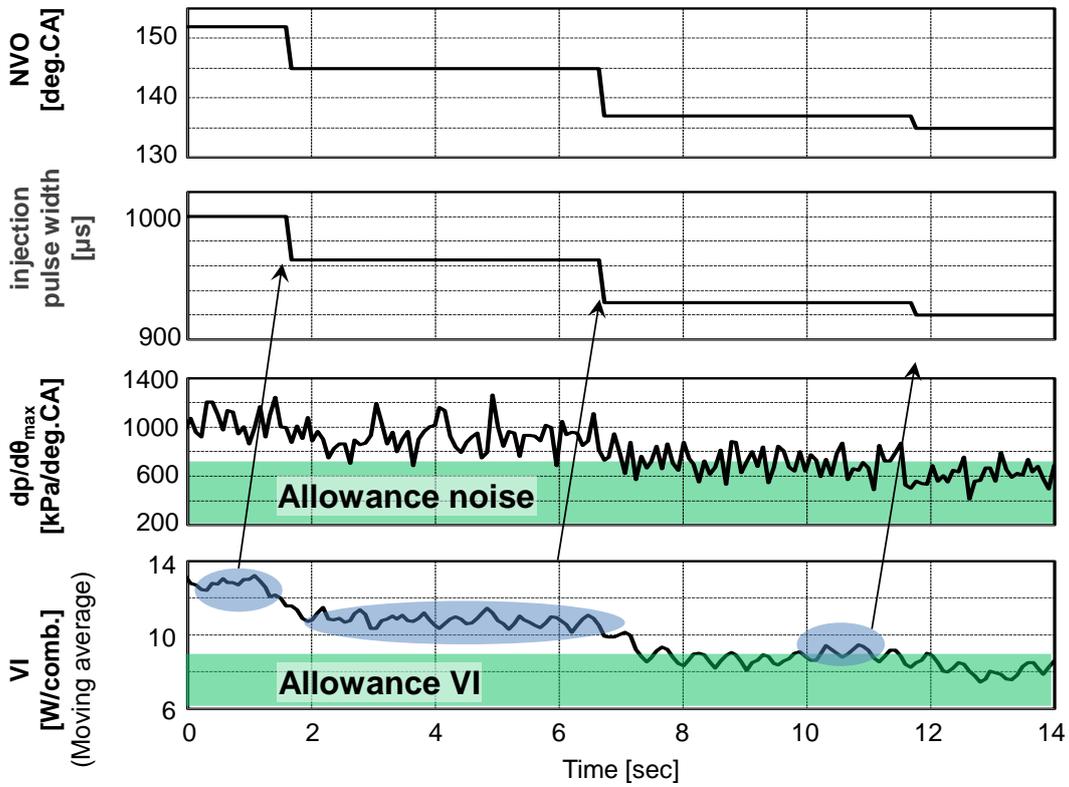


Fig.5.15 Combustion stabilizing effect of feedback control using vibration intensity detection

#### 5.4 本章の結論

HCCI燃焼安定化を目的として、燃焼検知フィードバック制御を構築し、以下結論を得た。

トルク規範のSI、HCCIエンジン制御システムに燃焼検知によるフィードバック制御を組み合わせたガソリンHCCI耐環境ロバスト制御を構築した。本制御は燃焼変動の検出手段としてクランク角センサを用いた回転変動検出手法、燃焼騒音の検出手法としてノックセンサを用いた振動強度検出手法、そしてNO<sub>x</sub>排出量の検出手法としてイオン電流センサを用いたイオン信号積分手法を統合した燃焼フィードバック制御として構築されている。

リアルタイム制御実装時に課題となる計算負荷を軽減するロジックとして、回転変動検出手法には平均偏差演算を適用し、振動強度検出手法には限定周波数FFTおよび逐次演算手法を適用した。その結果、多気筒エンジンでのリアルタイム検出が可能となるプログラムとして実装することができた。

本リアルタイム検出をベースとしたフィードバック制御を行い、HCCI燃焼の燃焼変動の抑制と燃焼騒音の収束が可能であることを検証した。

## 第6章 結論

### 6.1 本論文の結論

ガソリンHCCI燃焼エンジンのロバスト性を向上する燃焼状態検出フィードバック制御構築のため、燃焼状態検出技術の研究、およびフィードバック制御アルゴリズムを構築することを目的として研究を行ってきた。

第2章では、HCCI燃焼の燃焼変動検出手法として既存クランク角度センサを用いた回転変動検出手法を検討し、以下結論を得た。△ $\omega$ 検出法、燃焼圧トルク推定法に比べ、角加速度検出法は既存クランク角度センサの分解能でも高い検出精度を得ることができた。角加速度検出法のHCCI燃焼に対する検出精度改善を狙い、クランク角度 $\omega$ と角加速度 $d\omega$ の演算手法を最適化し、角加速度検出法がHCCI燃焼の燃焼変動検出手法として適用可能であることを示した。HCCI燃焼への適用には、クランク角速度 $\omega$ の検出開始時期を30deg.ATDC CA、検出完了時期を180deg.ATDC CAとし、角加速度 $d\omega$ の算出対象気筒を同一気筒間とすることで高い気筒別での燃焼変動の検出精度を得ることができる。さらに角加速度 $d\omega$ の算出対象気筒を隣接気筒間と同一気筒間の両方とすることで上記検出精度と常時失火などの連続的に発生する異常燃焼を検出することを可能とした。

第3章では、HCCI燃焼の燃焼騒音検出手法として既存ノックセンサを用いたエンジン振動検出手法を検討し、以下結論を得た。低温燃焼であるHCCI燃焼では、燃焼騒音指標( $dp/d\theta_{max}$ )の増減に依存して変化する周波数帯が5~7kHzであることを実験的に明らかとした。さらにノックセンサ信号にノイズとして入力されるエンジンデバイス(インジェクタ、動弁機構、点火)をFFTウィンドウと周波数分離により除外する手法を考案した。これらを組み合わせたエンジン振動強度演算を行い、高い検出精度を得ることができた。HCCI燃焼騒音検出には、検出する周波数を5~7kHzとし、FFTウィンドウTDCから40deg.ATDC CAとし、高い気筒別での燃焼騒音( $dp/d\theta_{max}$ )の検出精度を得る見込みを得た。

第4章では、HCCI燃焼のNO<sub>x</sub>排出量推定手法としてイオン電流センサを用いたイオン強度II検出手法を検討し、以下結論を得た。燃焼時と燃料カット制御時(燃料噴射停止時)のイオン信号を比較した結果、SI燃焼ではケミカルイオンとサーマルイオンが検出されたが、HCCI燃焼ではサーマルイオンのみが検出された。印加電圧(ダイオードの降伏電圧)を上昇させることでHCCI燃焼時の主熱発生期間に出現するサーマルイオンは増加することが可能である。HCCI燃焼のG/Fを増加させることでイオン強度IIは低下する傾向にある。またNO<sub>x</sub>排出量も低下する傾向がある。したがって、HCCI燃焼におけるNO<sub>x</sub>排出量の推定手法としてイオン電流センシングが適用可能と判断すると共に、NO<sub>x</sub>排出量低減のためのフィードバック制御手段はG/Fであることが分かった。イオン強度IIと最高筒内平均温度は燃焼

方式によらず高い相関性を有することから、低温燃焼においては燃焼状態を示すパラメータであるサーマルイオンの発生量が低下することがメカニズムである。また、IMEPとイオン強度IIの決定係数は印加電圧を400Vとすることで0.8以上となるが、840Vまで昇圧しても改善は見られない。最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$ に対しては二次曲線的な相関となる。印加電圧を840Vまで昇圧しても $dp/d\theta_{max} \leq 500 \text{ kPa/deg.CA}$ 程度のHCCI実用範囲では検出感度の改善効果は小さいことを明らかとした。

第5章では、第2章、第3章、第4章で検討した燃焼状態検出技術を適用するHCCI燃焼検知フィードバック制御を構築し、以下結論を得た。トルク規範のSI、HCCIエンジン制御システムに燃焼検知によるフィードバック制御を組み合わせたガソリンHCCI耐環境ロバスト制御を構築した。本制御は燃焼変動の検出手段としてクランク角センサを用いた回転変動検出手法、燃焼騒音の検出手法としてノックセンサを用いた振動強度検出手法、そしてNO<sub>x</sub>排出量の検出手法としてイオン電流センサを用いたイオン信号積分手法を統合した燃焼フィードバック制御として構築した。リアルタイム制御実装時に課題となる計算負荷を軽減するロジックとして、回転変動検出手法には平均偏差演算を適用し、振動強度検出手法には限定周波数FFTおよび逐次演算手法を適用した。その結果、多気筒エンジンでのリアルタイム検出が可能となるプログラムとして実装することができた。本リアルタイム検出をベースとしたフィードバック制御を行い、HCCI燃焼の燃焼変動の抑制と燃焼騒音の収束が可能であることを検証した。

## 6.2 今後の課題

本研究では、将来排気規制と CO<sub>2</sub> 規制に対応する燃焼方式として HCCI 燃焼に着目し、その課題であるロバスト性を向上することに注力してきた。本研究により HCCI 燃焼を実施するエンジン運転範囲について排気と CO<sub>2</sub> 低減効果が得られる見込みである。

その一方で、1.1.2 で述べた様に、規制の厳格化が継続的に進められる中、エンジンアウトエミッションのさらなる低減と、CO<sub>2</sub> 低減技術パワートレインにおけるエンジンの熱効率向上技術として、各種損失のさらなる低減が今後必要である。

前章(図 1.29)に示す様に、HCCI 燃焼は未燃損失、排気損失、冷却損失、ポンプ損失に対し低減効果を有するが、エンジンが動作する全領域での HCCI 燃焼は困難と言える。例えば燃焼騒音が発生する HCCI 高負荷条件以上にトルクを発生させる領域においては SI 燃焼せざるを得ず、SI 燃焼のノッキング対策として大量 EGR を用いたストイキ SI 燃焼の実現が必要と考えられる。さらに運転条件によってはリーン SI 燃焼が燃費性能面で優れる可能性もある。またポンプ損失についてはミラーサイクル、過給機効率の改善などの燃焼技術以外の支援技術が適用可能となるため、燃焼方式との最適化の余地がある。図示仕事としては上記技術の積み上げが必要であるが、エンジンとして有効仕事は正味仕事であり機械損失も無視できない。機械損失の低減には、エンジンシステムに対し電動部品を適用する電動化技術や、地道な性能向上としての低フリクション化といった緻密な改善技術などを適用していく必要がある。

以上の損失低減技術をエンジンシステムから見て選択、熟成していくことが今後のエンジン開発における課題である。

## 参考文献

- (1) 日経 Automotive Technology: "IHS Automotive の自動車市場予測", p.27-29, (2014/1)
- (2) 改訂・自動車用ガソリンエンジン, 山海堂, ISBN4-381-10133-2, p.83-85, (2005/4)
- (3) 独立行政法人環境再生保全機構: "大気環境の情報館",  
<http://www.erca.go.jp/yobou/taiki/kangaeru/kankyuu/03.html>
- (4) 環境省: "平成 28 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書", p.104-107, (2016)
- (5) 小峯美奈子, 早福正孝, 古明地哲人, 岩崎好陽: "東京都における大気中の亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)の長期モニタリング結果について", p.159-164, (2001)
- (6) Mike Hulme: "On the origin of 'the greenhouse effect: John Tyndall's 1859 interrogation of nature", Weather Royal Meteorological Society, Vol.64, No.5, p.121-123, (2009/5)
- (7) European Union: "REGULATION (EU) No 333/2014 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 March 2014 amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO<sub>2</sub> emissions from new passenger cars", Official Journal of the European Union, (2014.3)
- (8) 国土交通省, 自動車燃費目標基準について,  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_fr10\\_000005.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000005.html)
- (9) トヨタ自動車会社: "第 1 項 排出ガス問題の発生",  
[https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/text/entering\\_the\\_automotive\\_business/chapter2/section3/item1.html](https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/text/entering_the_automotive_business/chapter2/section3/item1.html)
- (10) 環境省: "窒素酸化物排出削減対策技術の導入に係るガイドライン", (2015/3)
- (11) Transport Policy. net: "EU: Light-duty: Emissions",  
[http://www.transportpolicy.net/index.php?title=EU:\\_Light-duty:\\_Emissions#History](http://www.transportpolicy.net/index.php?title=EU:_Light-duty:_Emissions#History)
- (12) 環境省: "昭和 48 年度版 環境白書", (1973)
- (13) Delphi Automotive LLP: "Worldwide Emissions Standards Passenger Cars and Light Duty 2016/2017", p.3, (2016/3)
- (14) Delphi Automotive LLP: "Worldwide Emissions Standards Passenger Cars and Light Duty 2016/2017", p.16-24, (2016/3)
- (15) Delphi Automotive LLP: "Worldwide Emissions Standards Passenger Cars and Light Duty 2016/2017", p.26-30, (2016/3)
- (16) 国土交通省: "乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法(WLTP)について", (2014/5)
- (17) Delphi Automotive LLP: "Worldwide Emissions Standards Passenger Cars and Light Duty 2016/2017", (2016/3)
- (18) AVL List GmbH: "EMISSION LEGISLATION TIMELINE –Overview about

- emission regulation with focus on RDE”, AVL-Italy RDE Roadshow, (2015/7)
- (19) ICCT: “Defeat devices under the U.S. and EU passenger vehicle emissions testing regulations”, p.1-12, (2016/3)
- (20) 朝日新聞: “車の不正ソフト、日本も規制へ VW排ガス問題で前倒し”, (2015/9/29)
- (21) AVL List GmbH: “AVL Emission Report -EU Real Driving Emissions NEWS & UPDATES-”, p.2-9, (2015/5)
- (22) EUROPEAN COMMISSION: “Commission Regulation amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6), p.1-6, (2015)
- (23) EUROPEAN COMMISSION: “ANNEXES to the Commission Regulation amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6), p.1-23, (2015)
- (24) Association for Emissions Control by Catalyst: “Real Driving Emissions”, UnICEG meeting, (2015/4)
- (25) State of California: “PROPOSED AMENDMENTS TO THE LEV III CRITERIA POLLUTANT REQUIREMENTS FOR LIGHT- AND MEDIUM-DUTY VEHICLES, THE HYBRID ELECTRIC VEHICLE TEST PROCEDURES, AND THE HEAVY-DUTY OTTO-CYCLE AND HEAVY-DUTY DIESEL TEST PROCEDURES”, p.1-45, (2014/9)
- (26) ICCT: “Global Comparison of Passenger Car and Light-commercial Vehicle Fuel EconomyGHG Emissions Standards”, (2014/5)
- (27) EUROPEAN PARLIAMENT: “on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO<sub>2</sub> emissions from new passenger cars (COM(2012)0393 – C7-0184/2012 – 2012/0190(COD))“, p.1-70, (2013/4)
- (28) U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION NHTSA: “SUMMARY OF FUEL ECONOMY PERFORMANCE”, p.1-18, (2014/6)
- (29) The Automobile Evaluation Standard Subcommittee, Energy Efficiency Standards Subcommittee of the Advisory Committee for Natural Resources and Energy and The Automobile Fuel Efficiency Standards Subcommittee, Automobile Section, Land Transport Division of the Council for Transport Policy: “Final Report of Joint Meeting between the Automobile Evaluation Standards Subcommittee, Energy Efficiency Standards Subcommittee of the Advisory Committee for Natural Resources and Energy and the Automobile Fuel Efficiency Standards Subcommittee, Automobile Section, Land Transport Division of the Council for

- Transport Policy“, p.1-30, (2011/12)
- (30) STANDARDIZATION ADMINISTRATION OF THE PEOPLE’S REPUBLIC OF CHINA: “中華人民共和國国家标准”, GB 27999-2011,  
[http://www.sac.gov.cn/SACSearch/outlinetemple/gjcxjg\\_qwyd.jsp?bzNum=GB%2027999-2011](http://www.sac.gov.cn/SACSearch/outlinetemple/gjcxjg_qwyd.jsp?bzNum=GB%2027999-2011), (2011/2)
- (31) Government of India Press: “THE GAZETTE OF INDIA : EXTRAORDINARY”, p.1-6, (2014/1)
- (32) UNEP DTIE Economics and Trade Branch: “Overview of the Republic of Korea’s National Strategy 54 for Green Growth”, p.1-54, (2010/4)
- (33) DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION: “Emisiones de bióxido de carbono (CO2) provenientes del escape y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible, aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto vehicular de hasta 3 857 kilogramos”, NORMA Oficial Mexicana NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013, (2013/6/21)
- (34) Planalto: “Decretonº 7.819/2012 — Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores — Inovar-Auto.,  
[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm)
- (35) Her Majesty the Queen in Right of Canada: “Canada Gazette Part II”, Vol. 148, No. 21, (2014/10/8)
- (36) ICCT: <http://www.theicct.org/>
- (37) EPA US Environmental Protection Agency: <https://www3.epa.gov/obd/basic.htm>
- (38) ICCT: “REVIEW OF LDV OBD REQUIREMENTS UNDER THE EUROPEAN, KOREAN AND CALIFORNIAN EMISSION PROGRAMS”, p.1-31, (2016/3)
- (39) 自動車産業ポータル MARKLINES:  
<https://www.marklines.com/ja/regulation/environment/>
- (40) ICCT: “GLOBAL OVERVIEW OF ON-BOARD DIAGNOSTIC (OBD) SYSTEMS FOR HEAVY-DUTY VEHICLES”, p.1-25, (2015/1)
- (41) 国土交通省: “自動車の排出ガス規制(新車)”,  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_tk10\\_000001.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000001.html)
- (42) 総務省統計局: “第 2 章 人口”, <http://www.stat.go.jp/data/sekai/0116.htm>
- (43) John J. Mooney: “The 3-Way Catalytic Converter: a) Invention and Introduction into Commerce - Impacts and Results b) Barriers Negotiated”, California Air Resources Board Chairman Invitational Seminar Series, (2007/10/9)
- (44) Hai-Ying Chen, Hsiao-Lan Chang: “Development of Low Temperature Three-Way Catalysts for Future Fuel Efficient Vehicles”, JOHNSON MATTHEY TECHNOLOGY REVIEW, 59, (1), p.64-67,

- <http://dx.doi.org/10.1595/205651315X686011>, (2015)
- (45) トヨタ自動車株式会社: “内燃機関の制御装置”, WO 2011158353 A1 (2011/12/22 公開)
- (46) 藤川竜也, 内田健児, 中山佳映, 山川正尚: “高圧縮比ガソリンエンジンにおける触媒早期暖機のための燃焼技術開発”, マツダ技報, No.33, p.83-87, (2016)
- (47) 廣瀬一郎, 工藤秀俊, 木原龍博, 山川正尚, 人見光夫: “SKYACTIV-G 2.0L 新型ガソリンエンジンの紹介”, 第 22 回内燃機関シンポジウムテキスト, 20117006, No.7, p.1-7, (2011/11)
- (48) Shosaku Ando, Kazuaki Takashima: “Highly efficient performance - The new Infiniti V6 Petrol Engine with Direct Injection and Turbocharging”, 37th Internationales Wiener Motorensymposium, p.1-21, (2016)
- (49) Tomonori Niizato, Yuji Yasui, Yasuhiro Urata, Yusuke Wada, Mitsutaka Jono, Koji Nakano, Masayuki Taguchi: “Honda’s New Turbo-GDI Engine Series for global application”, 37th Internationales Wiener Motorensymposium, p.1-17, (2016)
- (50) Global Auto News: “[오토저널] 다운사이징 엔진기술 - 1.2 GDI 터보차져 엔진”, [http://global-autonews.com/bbs/board.php?bo\\_table=bd\\_035&wr\\_id=278](http://global-autonews.com/bbs/board.php?bo_table=bd_035&wr_id=278), (2016/05/02)
- (51) F. Eichler, W. Demmelbauer-Ebner, J. Theobald, B. Stiebels, H. Hoffmeyer, M. Krefl: “The New EA211 TSI® evo from Volkswagen”, 37th Internationales Wiener Motorensymposium 2016, p.1-23, (2016)
- (52) Maio Murwald, Roland Kemmler, Anton Waltner, Fritz Kreitmann, “THE NEW FOUR-CYLINDER GASOLINE ENGINES FROM MERCEDES-BENZ”, MTZ 11I2013, Vol.74, p.4-10, (2013)
- (53) Jürgen Königstedt, Gerald Bonn, Christian Brinkmann, Gerhard Fröhlich, Thomas Heiduk, Jürgen Jablonski: “The new 3.0l V6 TFSI engine from Audi - the next milestone in TFSI technology -“, 37th Internationales Wiener Motorensymposium 2016, p.1-25, (2016)
- (54) Jörg Kerner, Thomas Günther, Martin Werner, Alexander Kronich, Matthias Krämer, Andreas Kramer, Christoph Pleuß, Sven König, Wolfgang Liesen, Frank Maier, h.c. F.: “The new V8 turbo engine from Porsche”, 37th Internationales Wiener Motorensymposium 2016, p.1-22, (2016)
- (55) Jörg Kerner, Thomas Wasserbäch, Markus Baumann, Thomas Brandl, Bruno Kistner, Martin Werner, Ralf Schmidt: “The new family of flat engines from Porsche”, 37th Internationales Wiener Motorensymposium 2016, p.1-23, (2016)
- (56) Gerd Rosel, Erwin Achleitner, Friedrich Kapphan, Wendelin Klugl, Bill Imoehl: “Gasoline DI-System to Reach EU6c Legislation”, 2016 JSAE Annual Congress (Spring) proceeding, 20165278, p.1473-1480, (2016/5)

- (57) Rolf Brück, Peter Hirth, Bin Hu, Christian Schorn: “New Catalyst Substrate Innovation for Achieving RDE and SULEV 30 Emission Legislation”, 37th Internationales Wiener Motorensymposium 2016, p.1-16, (2016)
- (58) Kamimoto, T., Bae, M.: “ High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines”, SAE paper 880423, (1988)
- (59) Yoshihiro Sukegawa, Kengo Kumano, Kenichiro Ogata: “Estimation of Particulate Matter in Direct Injection Gasoline Engines by non-combustion CFD”, SAE paper 2014-01-1142, (2014)
- (60) Wolfram Wiese, Andreas Kufferath, Axel Storch, Philipp Rogler: “Requirements for Multi-hole injectors in GDI engines to meet future emission legislation”, 2nd International Engine Congress 2015, Baden-Baden, p.1-14, (2015/02/24)
- (61) 溝渕剛史: “直噴ガソリンエンジンのPN低減に向けた微粒化技術開発”, 「ガソリンエンジンの進化を支える最新技術」自動車技術会シンポジウムテキスト, 20154728, No.10-15, p.6-11, (2015/12)
- (62) 日経オートモティブ: “Delphi社の先進燃料噴射技術ルクセンブルクに専門家を集中ガソリン希薄燃焼など研究”, <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/MAG/20140121/328812/>, (2014/3/26)
- (63) 植木毅, 後藤守康, 松村恵理子, 千田二郎: “ガソリン直噴インジェクタノズルの高噴射圧化による噴霧特性解析”, 自動車技術会 2016年春季大会学術講演会講演予稿集, 20165143, p.761-766, (2016/5)
- (64) Timothy J. Jacobs, Louis Camilli, Matthias Neubauer: “High Power Discharge Effects on Fuel Consumption, Emissions, and Catalyst Heating”, SAE paper 2014-01-2626, p.1-12, (2015)
- (65) Kyohei Kato, D. Thier, E. Ohara and C. D. Vogt: “GPF Concepts for Low PN Emissions, Backpressure and CO<sub>2</sub> Emissions”, 19th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, 29th June – 1st July, (2015/6)
- (66) Ingo Mikulic, Hein Koelman, Steve Majkowski, Paul Vosejka: “A Study about Particle Filter Application on a State-of-the-Art Homogeneous Turbocharged 2L DI Gasoline Engine”, 19th Aachener Kolloquium 2010, (2010)
- (67) Ingo Mikulic, Hein Koelman, Steve Majkowski, Paul Vosejka: “Studie zur Partikelfilterapplikation an einem modernen homogenen turboaufgeladenen 2L DI-Ottomotor”, 19th Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik 2010, p.1-18, (2010)
- (68) European Commission: “JRC SCIENTIFIC AND POLICY REPORTS - Feasibility of Introducing Particulate Filters on Gasoline Direct Injection Vehicles - A Cost Benefit Analysis“, Report EUR 25297 EN, p.2-81, ISBN 978-92-79-24166-6, (2011)

- (69) Association for Emissions Control by Catalyst: “Real Driving Emissions of a GPF-equipped production car”, IQPC 3rd International Conference Real Driving Emissions Berlin, 27-29 October 2015, (2015)
- (70) アーサー・D・リトル(ジャパン)株式会社: “車体軽量化に関わる構造技術、構造材料に関する課題と開発指針の検討”, p.1-47, (2015/06/22)
- (71) 影山裕史: “自動車における CRRP 技術の現状と展望”, 第 2 回次世代自動車公開シンポジウム「超軽量化技術の深化をめざして」, p.1-88, (2012/03/12)
- (72) 三井物産戦略研究所: “自動車構造材の軽量化と多様化”, p.1-11, (2014/07/28)
- (73) 社団法人中部産業連盟: “車両軽量化技術分野における中小部品・加工メーカーの技術開発の取組提案”, p.1-72, (2012/03/12)
- (74) 炭谷圭二, 前田和宏, 一之瀬健一: “自動車と流体力学: 車体周り流れと空力特性”, 日本流体力学会誌 ながれ 23 (6), p.445-454, (2004)
- (75) 本田技研工業株式会社: “FIT PRESS INFORMATION 2013.9.5”, p.1-45, (2013/09)
- (76) 居倉和徳, 細田浩司, 角岡幸治, 宮崎透: “新開発マルチインフォメーションディスプレイの紹介”, マツダ技報 No.27, p.72-77, (2009)
- (77) スズキ自動車株式会社: <http://www.suzuki.co.jp/car/wagonr/interior/>
- (78) 沖山智之: “レガシィ B4 2.0 CNG の開発”, 自動車技術会, p.1-3, (2006/5/24)
- (79) 竹村優一, 和田実, 溝渕剛史, 河野正顕: “CNG 燃料の燃焼効率向上に向けた混合気形成要件の検討”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.116-13, p.1-5, 20135744, (2013)
- (80) 自動車技術会: “将来ビジョン ガス燃料エンジンの技術発展シナリオ”, p.1-7, <http://www.jsae.or.jp/~dat1/vision/>, (2012)
- (81) 水嶋教文: “LPG-SI エンジンの燃焼特性の把握に基づく高効率化に関する研究”, 早稲田大学大学院博士論文, p.1-125, (2010)
- (82) 株式会社アイ・ビー・ティ: “平成 26 年度主要エタノール生産国(ブラジル)における企業動向等に関する調査”, p.1-97, (2015)
- (83) 古浜庄一, 山根公高: “水素エンジンの燃焼特性”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.723, p.509-520, 721063, (1972)
- (84) 森本賢治, 齊藤智明, 西村博文, 水島善夫, 柏木章宏, 後藤昌志: “水素ロータリーエンジン車の開発”, 自動車技術会, p.29-32, (2006/08/24)
- (85) 山根健: “BMW Hydrogen 7 プロジェクト水素社会の実現を目指して”, 水素エネルギーシステム, Vol.33, No.1, p.42-48, (2008)
- (86) 矢吹勉繁, 緒方健一郎, 梶谷修一, 島田敦史: “水素エンジンの基礎的研究”, 日本機械学会茨城講演会講演論文集, p.109-110, 2007-09-28, (2007)
- (87) 佐藤康太, 渡邊潤哉, 田中光太郎, 金野満: “希薄条件におけるフラン類の自着火特性”, 第 26 回内燃機関シンポジウムテキスト, No.103, p.1-6, (2015)
- (88) 金野満, 阿部俊之, 岡本毅, 青柳友三, 石井素, 川野大輔: “菜種油メチルエステルを燃

- 料とする小型汎用ディーゼルエンジンのカーボンデポジット生成特性およびその生成要因に関する研究”, Review of Automotive Engineering, Vol.29, No.3, p.315-319, 20084847, (2008)
- (89) S. Kajitani, Z. L. Chen, M. Konno, K. T. Rhee: “Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct-injection Diesel Engine Operated with DME”, SAE paper 972973, (1997)
- (90) 梶谷修一, 山口瑞穂, 加藤正明, 竹内久晴, 高原雅明: “DME 供給時の噴射ノズル先端の摩耗に関する研究”, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.5, p.39-44, 20084904, (2008)
- (91) VOLKSWAGEN AG: “最小の燃料で, 最大のパワーを- TSI フォルクスワーゲンによる新しい 1.2 リッターエンジン -”,  
[http://web.volkswagen.co.jp/sustainable\\_mobility/news/polo12tsi/pdf/dr\\_h\\_present.pdf#search='%E6%9C%80%E5%B0%8F%E3%81%AE%E7%87%83%E6%96%99%E3%81%A7%EF%BC%8C%E6%9C%80%E5%A4%A7%E3%81%AE%E3%83%91%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%82%92+TSI%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%AB%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%82%B2%E3%83%B3%E3%81%AB%E3%82%88%E3%82%8B%E6%96%B0%E3%81%97%E3%81%841.2%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%BF%E3%83%BC%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%83%B3'](http://web.volkswagen.co.jp/sustainable_mobility/news/polo12tsi/pdf/dr_h_present.pdf#search='%E6%9C%80%E5%B0%8F%E3%81%AE%E7%87%83%E6%96%99%E3%81%A7%EF%BC%8C%E6%9C%80%E5%A4%A7%E3%81%AE%E3%83%91%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%82%92+TSI%E3%83%95%E3%82%A9%E3%83%AB%E3%82%AF%E3%82%B9%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%82%B2%E3%83%B3%E3%81%AB%E3%82%88%E3%82%8B%E6%96%B0%E3%81%97%E3%81%841.2%E3%83%AA%E3%83%83%E3%82%BF%E3%83%BC%E3%82%A8%E3%83%B3%E3%82%B8%E3%83%B3'), (2010/5/28)
- (92) Heinz-Jakob Neußer: “Natural Gas as Part of the Drive and Fuel Strategy”, VIAVISION Sustainable Mobility with Natural Gas The CO<sub>2</sub>-friendly Alternative, p.1-8, (2014/9)
- (93) NIKKEI TECHNOLOGY: “Honda Shows World’s 1st Planetary Gear-based 10-speed AT for FF Vehicles (1)”,  
[http://techon.nikkeibp.co.jp/atclen/news\\_en/15mk/112000186/](http://techon.nikkeibp.co.jp/atclen/news_en/15mk/112000186/), (2015/11/20)
- (94) 中野晴久, 加藤義邦, 奥村直俊, 梅田勇樹: “新世代ワイドレシトカバレッジ小型 CVT の開発”, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No.06-15, p.34-37, 20154665, (2015)
- (95) 小路正実, 釜付裕之: “スズキ AGS の開発”, 自動車シンポジウムテキスト, No.06-15, p.65-69, (2015)
- (96) Young Min Yoon, Baek Seung Sam, Cho Sung Hyun, Song Kyung, Kim Jung Chul: “Development of Control Algorithm for DCT of Dry Clutch”, 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.2-16S, p.37-42, 20165008, (2016)
- (97) 金子直弘, 古賀英隆, 五十川晋一: “小型商用車用 Infinitely Variable Transmission の開発”, 2015 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.59-15A, p.1431-1435, 20156275, (2015)
- (98) Albert Albers: “Advanced Development of Dual Mass Flywheel (DMFW) Design - Noise Control for Today's Automobiles”, Schaeffler homepage, p.5-42, (2006)

- (99) 石垣勉, 白井悠, 尾本志展, 川上篤史, 寺田剛, 久保和幸: “アスファルト舗装における  
タイヤ/路面転がり抵抗低減技術の開発”, 自動車技術会シンポジウムテキスト,  
No.21-15, p.1-8, 20154833, (2015)
- (100) ZF Friedrichshafen AG: “E-Mobility Cars Electric Drive Technology”, 09/2015,  
(EN20150831), p.1-11, (2015)
- (101) トヨタ自動車株式会社: “環境技術 テクノロジーファイル”,  
[http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/environment/technology\\_file/](http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/environment/technology_file/)
- (102) 本田技研工業株式会社: “ODYSSEY 主要諸元”,  
[www.honda.co.jp/factbook/auto/ODYSSEY/201310/p29.pdf](http://www.honda.co.jp/factbook/auto/ODYSSEY/201310/p29.pdf), (2103/10)
- (103) 斎藤篤志, 石黒幹久: “エンジン冷却用電動ウォータポンプの開発”, 自動車技術会学術  
講演会前刷集, No.53-11, p.19-21, 20115289, (2011)
- (104) 井上昌弘: “アイドルストップ用電動オイルポンプの開発”, 日本フルードパワーシステ  
ム学会, 第 43 巻, 第 E1 号, p.E39-45(2012)
- (105) 日経テクノロジー: “【東京モーターショー】アイシン精機, EV/HEV のブレーキ向け  
電動負圧ポンプを参考出展”,  
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20091022/176737/?rt=nocnt>,  
(2009/10/23)
- (106) Robert Bosch GmbH: “Press release - ボッシュの新製品 iBooster インテリジェン  
トな制御で制動力を増強 e モビリティとドライバーアシスタンスのための基本シス  
テム”, PI 8143 RB Ks/SL,  
<https://www.bosch.co.jp/jp/press/pdf/group-1306-13-release.pdf#search='%E3%83%9C%E3%83%83%E3%82%B7%E3%83%A5%E3%81%AE%E6%96%B0%E8%A3%BD%E5%93%81iBooster+%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%86%E3%83%AA%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%83%B3%E3%83%88%E3%81%AA%E5%88%B6%E5%BE%A1%E3%81%A7%E5%88%B6%E5%8B%95%E5%8A%9B%E3%82%92%E5%A2%97%E5%BC%B7+e%E3%83%A2%E3%83%93%E3%83%AA%E3%83%86%E3%82%A3%E3%81%A8%E3%83%89%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%90%E3%83%BC%E3%82%A2%E3%82%B7%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B9%E3%81%AE%E3%81%9F%E3%82%81%E3%81%AE%E5%9F%BA%E6%9C%AC%E3%82%B7%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%A0'>, (2013/6)
- (107) 高橋恒吏, 松永健, 乾究: “ハイブリッド車向け電動コンプレッサ空調システムの製品  
開発”, デンソーテクニカルレビュー, Vol.10, No.1, p.24-27, (2005)
- (108) Audi Japan: “Media Info - Audi SQ7 TDI: ドライビングイノベーション“,  
[http://www.audi-press.info/wp-content/uploads/2016/03/014\\_SQ7\\_verfinal2.pdf#se  
arch='Audi+SQ7+TDI%3A%E3%83%89%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%93%  
E3%83%B3%E3%82%B0%E3%82%A4%E3%83%8E%E3%83%99%E3%83%BC%E](http://www.audi-press.info/wp-content/uploads/2016/03/014_SQ7_verfinal2.pdf#search='Audi+SQ7+TDI%3A%E3%83%89%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%93%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%82%A4%E3%83%8E%E3%83%99%E3%83%BC%E)

- 3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%B3+media+info', (2016/3/4)
- (109) Claude Leichele, Michel Forissier: “POWERTRAIN SYSTEMS” VALEO INVESTOR DAY 2015 London, (2015/3/16)
- (110) LEVOLANT BOOST: “【ジュネーブショー2016】アウディ SQ7 登場! V8 ディーゼルは世界初の電動ターボを搭載”,  
<http://levolant-boost.com/2016/03/06/6707/audi-sq7-tdi/>, (2016/3/6)
- (111) Uwe Wagner, Martin Rauch, Tobias Eckl, Andreas Schamel, Carsten Weber, Moritz Springer, Oliver Maiwald, Thomas Knorr, Stefan Lauer, “48 V P2 Hybrid Vehicle with an Optimized Engine Concept – Optimum Drivability with Excellent Fuel Economy and Cost-Efficiency”, 37th Internationales Wiener Motorensymposium 2016, p.1-30, (2016)
- (112) Jean-Luc MATE: “48V eco-Hybrid Systems”, European Conference on Nanoelectronics and Embedded Systems for Electric Mobility, p.1-17,  
[http://www.artemis-ioe.eu/events/presentations/25.09.2013\\_NESEM\\_2013\\_Toulouse\\_J.L.Mate\\_Continental\\_48V\\_ECO\\_Hybrid\\_Systems\\_Final\\_.pdf#search='48V+ecoHybrid+Systems+continental'](http://www.artemis-ioe.eu/events/presentations/25.09.2013_NESEM_2013_Toulouse_J.L.Mate_Continental_48V_ECO_Hybrid_Systems_Final_.pdf#search='48V+ecoHybrid+Systems+continental'), (2013)
- (113) Helfried Sorger, Wolfgang Schöffmann, Andreas Ennemoser, Gernot Fuckar, Michael Gröger, Petutschnig, Gerald Teuschl, Jonathan Hood: “The Ideal Base Engine for 48 Volts - Chances for Efficiency Improvement and Optimization of the Overall System Complexity”, 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015, p.1091-1112, (2015)
- (114) G.Fraidl, P.Kapus, H.Sorger, G.Teuschl: “The next steps in Fuel Economy – Variable Compression Ratio and / or 48V?”, 2016 JSAE Annual Congress Proceedings (Spring), p.825-829, 20165154, (2016)
- (115) 助川義寛, 木原祐介, 藤井敬市: “ガソリン直噴エンジンの冷機始動時における HC 低減手法の検討”, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.5, p.1037-1042, 20104588, (2010)
- (116) J.B.Heywood: “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, Inc., p.169-173, ISBN 0-07-028637-X, (1998)
- (117) 秋久大輔, 澤田大作, 神山栄一: “超高膨張比サイクルによる熱効率向上効果の研究”, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.4, p.839-844, 20114577, (2011)
- (118) 河野昌平, 渡邊生, 古賀響, 倉田眞秀: “汎用高膨張比エンジンの研究 -複リンク機構の理論と熱効率の向上-“, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.81-87,(2006/3)
- (119) 渡邊生, 古賀響: “汎用高膨張比エンジンの研究第二報 -熱発生と正味性能-“, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.52-58, (2007/3)

- (120) 瀧田義治, 河野昌平, 高田秀昭, 吉津邦弘, 直井専, 津野康一: “複リンク式高膨張比エンジンを搭載した家庭用コージェネレーションユニットの開発“, Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.2, (2011/9)
- (121) 直江学, 徳備広太, 渡邊生: “複リンク式高膨張比エンジンにおける慣性力の特徴とその低減”, Honda R&D Technical Review, Vol.24, No.1, (2012/3)
- (122) Honda Worldwide site: “Performing more work with less fuel – Exlink”, <http://world.honda.com/powerproducts-technology/exlink/>, (2016)
- (123) 三好明: “0次元ノックモデルと Livengood-Wu 積分”, 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.59-16S, p.1437-1442, 20165271, (2016)
- (124) 田中光太郎, 岡田寛也, 小山貴久, 金野満: “急速圧縮装置を用いた日本の実用ガソリンの自着火機構に関する研究”, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.3, p.679-684, 20164330, (2016)
- (125) 寺地翔太, 原田真樹, 齊藤荘史, 神谷定行, 安田位司: ”水冷インタークーラ開発”, 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.48-15S, p.1151-1154, 20155221, (2015)
- (126) Tomohiro Shinagawa, Masahito Kudo, Wataru Matsubara, Takashi Kawai: “The New Toyota 1.2-Liter ESTEC Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine”, SAE paper, 2015-01-1268, (2015)
- (127) Wagner Roberto: “Use of 1D-3D Coupled Simulation to Develop an Intake Manifold System”, SAE paper, 2010-01-1534, (2010)
- (128) Michael Winkler, Jürgen Grimm, Holger Lenga, Ramchandran Hartmann, Byoung Hyouk Min: “Low Pressure EGR for Downsized Gasoline Engines”, 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2014, p.793-806, (2014)
- (129) Terry Alger: “SwRI’s HEDGE® III Program High Efficiency Dilute Gasoline Engines”, SwRI HEDGE program, (2012/2)
- (130) BMW M-power: ” [http://www.m-power.com/\\_open/s/varlink2.jsp?id=3301&lang=en](http://www.m-power.com/_open/s/varlink2.jsp?id=3301&lang=en), (2016)
- (131) Thomas Pauer, Martin Frohnmaier, Jochen Walther, Peter Schenk, Alexander Hettinger, Stefan Kampmann: “Optimierung von Ottomotoren durch Wasser-Einspritzung Optimization of Gasoline Engines by Water Injection”, 37th Internationales Wiener Motorensymposium 2016, p.1-15, (2016)
- (132) 小坂英雅, 脇坂佳史, 野村佳洋, 堀田義博, 小池誠, 中北清己, 川口暁生: “壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 -数値計算による適切な遮熱膜特性の検討-, 自動車技術会論文集, Vol.44, No.1, p.39-44, 20134023, (2013)
- (133) 脇坂佳史, 稲吉三七二, 福井健二, 小坂英雅, 堀田義博, 川口暁生: “壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第 2 報) -単筒エンジンによる遮熱効果の先行検討-, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, p.39-45, 20164027, (2016)

- (134) 川口暁生, 立野学, 山下英男, 猪熊洋希, 山下晃, 高田倫行, 山下親典, 小山石直人, 脇坂佳史: “壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第 3 報) -列型過給直噴ディーゼルエンジンへの適用-”, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, p.47-53, 20164028, (2016)
- (135) 西川直樹, 高岸れおな, 清水富美男, 堀江俊: “壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第 4 報) -スイング遮熱膜の材料-”, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, p.55-60, 20164029, (2016)
- (136) 福井健二, 脇坂佳史, 西川一明, 服部義昭, 小坂英雅, 川口暁生: “レーザ誘起燐光法を用いた高応答温度計測技術 -壁温スイング遮熱膜への応用-”, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.1, p.61-66, 20164030, (2016)
- (137) トヨタ自動車株式会社: “トヨタ自動車, 新型 2.8L 直噴ターボディーゼルエンジンを開発”, <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/8347879>, (2015/1/19)
- (138) J.B.Heywood: “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, Inc., p.46-47, ISBN 0-07-028637-X, (1998)
- (139) 溝上宏, 鄭棟元, 山本英継, 飯田訓正, 横尾望, 中田浩一: “SI エンジンの吸排気タイミングの最適化によるポンピングロス低減効果の調査”, 第 26 回内燃機関シンポジウムテキスト, No.30, p.1-6, (2015)
- (140) 横森剛, 松田昌祥, 飯田訓正, 横尾望, 中田浩一, 浦田泰弘: “高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究”, 20165267, 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.59-16S, p.1413-1418, (2016)
- (141) 東泉智子, 吉澤廣昭, ゴンザレスファン, 荒木幹也, 志賀聖一: “大量 EGR を用いた超過膨張サイクル機関における HCCI 燃焼制御”, 第 26 回内燃機関シンポジウムテキスト, No.17, p.1-5, (2015)
- (142) 大迫雄志, 横山隆雄, 吉田豊隆, 星徹, 恵比寿幹, 白石隆: “非定常数値解析技術を用いた自動車用ターボチャージャの高効率ツインスクロールタービンの開発”, 三菱重工技報, Vol.50, No.1, p.33-40, (2013)
- (143) 株式会社ティオ MOTOWN21: “自動車技術トレンド 第 59 回フォルクスワーゲン・ポロに搭載の新型 1.2LTSI エンジン”, [http://www.motown21.com/Tech/Trend\\_59/](http://www.motown21.com/Tech/Trend_59/), (2010/6/22)
- (144) AUTOZINE: “Continuous Variable Valve Lift”, [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/vvt\\_5.html](http://www.autozine.org/technical_school/engine/vvt_5.html), (2011)
- (145) 日産自動車株式会社: “VVEL(Variable Valve Event & lift)(バルブ作動角・リフト量連続可変システム)”, <http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/vvel.html>, (2016)
- (146) BMW: “Valvetronic.”,

- [http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/technology\\_guide/articles/mm\\_valvetronic.html](http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/technology_guide/articles/mm_valvetronic.html), (2016)
- (147) トヨタ自動車株式会社: “連続可変バルブタイミング機構(VVT-i)”,  
[https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/data/automotive\\_business/products\\_technology/technology\\_development/engines/details\\_window.html](https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/data/automotive_business/products_technology/technology_development/engines/details_window.html), (2016)
- (148) Honda New Zealand: “Variable Valve Timing & Lift Electronic Control “,  
<http://www.honda.co.nz/technology/engine/VTEC/>, (2014)
- (149) Toate Drepturile rezervate: “Sistemul de distribuție variabilă VarioCam Plus de la Porsche”,  
<http://www.e-automobile.ro/categorie-motor/20-general/126-distributie-variabila-variocam-porsche.html>, (2014)
- (150) Audi AG: “Audi Technology Portal”,  
[http://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/fsi-tsi-engines/audi-valvelift-system\\_en](http://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/fsi-tsi-engines/audi-valvelift-system_en), (2014)
- (151) Bauer Consumer Media Ltd.: “Tomorrow’s world: Fiat’s MultiAir engine tech”,  
<http://www.carmagazine.co.uk/car-news/industry-news/flat/tomorrows-world-fiats-multi-air-engine-tech/>, (2009/10/14)
- (152) Internet Brands Automotive Group.: “FreeValve camless engine shown in Qoros concept at 2016 Beijing Auto Show”,  
[http://www.motorauthority.com/news/1103619\\_freevalve-camless-engine-shown-in-qoros-concept-at-2016-beijing-auto-show#image=100553123](http://www.motorauthority.com/news/1103619_freevalve-camless-engine-shown-in-qoros-concept-at-2016-beijing-auto-show#image=100553123), (2016/4/26)
- (153) 所博治, 谷裕文, 大森俊英, 腰水孝英: “ローラロック式動弁系の摩擦損失低減”, 自動車技術会論文集, Vol.36, No.4, p.141-145, 20054565, (2005)
- (154) Totaro P., Westerfield Z., Tian T.: “Introducing a New Piston Skirt Profile to Reduce Engine Friction”, SAE paper, 2016-01-1046, (2016)
- (155) 中村正明, 伊東明美, 菊原浩司, 中鉢裕介: “エンジンのピストンコーティングパターンが摩擦力および燃費に及ぼす影響 -エンジンの燃費とピストン摩擦力の測定-”, 自動車技術会論文集, Vol45, No2., p.171-176, 20144261, (2014)
- (156) 趙鎮佑, 金重洙, 金宇泰, 韓昌培, 韓相得, 崔鍾日: “Development of the Compact Cylinder Block with Al Thermal Spray Coated Counter Spiny Thin-Wall Cast Iron Liner”, 自動車技術会学術講演会前刷, No.3-13, p.1-4, (2013)
- (157) 持田浩明, 浜田孝浩, 中島匡哉, 谷合宏之, 村木一雄: “低フリクション高熱伝達の為のミラーボアコーティング技術開発”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.136-14, p.1-6, 20145765, (2014)
- (158) Doi K., Kurita H.: “Development of Lightweight DLC Coated Valve Lifter Made from Beta Titanium Alloy for Motorcycles”, SAE International Journal of

- Materials and Manufacturing, 6(1), p.105-112, 2012-32-0088, (2013).
- (159) 窪山達也, 戸井田一宣, 森吉泰生, 山田敏生: “ガソリンエンジン冷却系最適化に関する研究”, 第 24 回内燃機関シンポジウムテキスト, p.1-6, 20137094, (2013)
- (160) トヨタ自動車株式会社: “油温制御装置”, 特開 2016-1025, (2016)
- (161) Matsumoto A., Furui K., Ogiso M., Kidokoro T.: “Model-Based OBD Logic Utilizing Adsorption”, SAE paper, 2016-01-0960, (2016)
- (162) Yong Fu Syu, Jia Siou Wu, Jih Si Syu, Bo-Chiuan Chen, Yuh-Yih Wu: “Development of Three-Way Catalytic Converter Diagnostic Strategy”, SAE paper, 2015-32-0783, (2015)
- (163) Harsha K. Nanjundaswamy, Joel Deussen, Roger Van Sickle, Dean Tomazic, Tamas Szailer, Michael Franke, Matthias Kotter, Thomas Koerfer: “OBD Diagnostic Strategies for LEVIII Exhaust Gas Aftertreatment Concepts”, SAE paper, 2015-01-1040, (2015)
- (164) Robert Cloudt: “Diagnostics Development for Cost-Effective Temperature Sensor based Particulate Matter OBD Method”, SAE paper, 2014-01-1550, (2015)
- (165) Dibyendu Palai: “Vehicle Level Approach for Optimization of On-Board Diagnostic Strategies for Fault Management”, SAE paper, 2013-01-0957, (2013)
- (166) Shigeru Onishi, Souk Hong Jo, Katsuji Shoda, Pan Do Jo, Satoshi Kato: “Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engines”, SAEpaper, 790501, (1979)
- (167) Norimasa Iida: ” Combustion Analysis of Methanol-Fueled Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) Engine Using a Spectroscopic Observation”, SAEpaper, 940684, (1994)
- (168) Norimasa Iida, Shinji Hosonuma, Kenichi Yoshimura, Shigehisa Takase: “Combustion and Emissions of Low Heat Rejection Ceramic Methanol ATAC Engines”, The Japan Society of Mechanical Engineer international Journal, Series B, Vol.39, No.1, p.176-184, (1996)
- (169) Roberto Gentili, Stefano Frigo, Leonardo Tognotti, Patrice Habert, Jacques Lavy: “Experimental Study on ATAC (Active Thermo-Atmosphere Combustion) in a Two-Stroke Gasoline Engine”, SAEpaper, 970363, (1997)
- (170) Norimasa Iida: “Alternative fuels and homogeneous charge compression ignition combustion technology”, SAE978449, (1997)
- (171) Eric Esterlingot, Philippe Guibert, Jacques Lavy, Staephane Raux: “Thermodynamical and optical analyses of controlled autoignition combustion in two-stroke engines”, SAEpaper, 978473, (1997)
- (172) Hajime Oguma, Takayoshi Ichikura, Norimasa Iida: “A Study on Adaptability of

- Alternative Fuels for Lean-Burn Two-Stroke Atac Engine”, SAE paper, 978472, (1997)
- (173) Norimasa Iida: “A Study of Autoignition and Combustion in Two-Stroke ATAC Engine - Compression Ignition Characteristics of Low Carbon Alternative Fuels”, SAEpaper, 1999-01-3274, (1999)
- (174) Gentili R., Frigo S.: “ATAC and GDI in a Small Two-Stroke Engine”, SAEpaper, 1999-01-3273, (1999)
- (175) 山岡士朗, 小熊元, 飯田訓正: “2 ストローク ATAC エンジンにおける各種低炭素代替燃料の圧縮自己着火時期に関する考察”, 日本機械学会論文集(B編), 65 巻, 640 号,p.284-291, (1999)
- (176) Gentili R., Frigo S.: “Further Insight on ATAC and GDI Combination in Two-Stroke Engines”, SAEpaper, 2000-01-0897, (2000)
- (177) Gentili R., Frigo S., Zanforlin S., Cozzolino F.: “Two-Stroke GDI: Improvement of Engine Behaviour at Light Loads “, SAEpaper, 2001-24-0056, (2001)
- (178) Song-Charng Kong, Craig D. Marriott, Rolf D. Reitz, Magnus Christensen: “Modeling and Experiments of HCCI Engine Combustion Using Detailed Chemical Kinetics with Multidimensional CFD“, SAEpaper, 2001-01-1858, (2001)
- (179) Jawad B., Zellner K., Riedel C.: “Small Engine Cooling and the Electric Water Pump”, SAEpaper, 2004-32-0097, (2004)
- (180) Iijima A., Yoshida K., Shoji H.: “A Comparative Study of HCCI and ATAC Combustion Characteristics Based on Experimentation and Simulations Influence of the Fuel Octane Number and Internal EGR on Combustion “, SAEpaper, 2005-01-3732, (2005)
- (181) J.W.G. Turner, D.W. Blundell, R. J. Pearson, R. Patel, D. B. Larkman, P. Burke, S. Richardson, N. M. Green, S. Brewster, R.G. Kenny, R.J. Kee: “Project Omnivore: A Variable Compression Ratio ATAC 2-Stroke Engine for Ultra-Wide-Range HCCI Operation on a Variety of Fuels “, SAEpaper, 2010-01-1249, (2010)
- (182) Paul M. Najt, David E. Foster: “Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion “, SAEpaper, 830264, (1983)
- (183) R. H. Thring : “Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines”, SAEpaper, 892068, (1989)
- (184) Thomas W. Ryan, Timothy J. Callahan: “Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel“, SAEpaper, 961160, (1996)
- (185) Greg R Pucher, David P. Gardiner, Michael F. Bardon, Vittoria Battista: “Alternative Combustion Systems for Piston Engines Involving Homogeneous Charge Compression Ignition Concepts - A Review of Studies Using Methanol,

- Gasoline and Diesel Fuel “, SAEpaper, 962063, (1996)
- (186) Allen W. (Bill) Gray, Thomas W. Ryan: “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) of Diesel Fuel“, SAEpaper, 971676, (1997)
- (187) Magnus Christensen, Bengt Johansson, Patrik Einewall: “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Using Isooctane, Ethanol and Natural Gas - A Comparison with Spark Ignition Operation“, SAEpaper, 972874, (1997)
- (188) Magnus Christensen, Bengt Johansson, Per Amnéus, Fabian Mauss: “Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition“, SAEpaper, 980787, (1998)
- (189) Magnus Christensen, Bengt Johansson: “Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition“, SAEpaper, 982454, (1998)
- (190) Magnus Christensen, Bengt Johansson: “Homogeneous Charge Compression Ignition with Water Injection”, SAEpaper, 1999-01-0182, (1999)
- (191) Magnus Christensen, Anders Hultqvist, Bengt Johansson: “Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio”, SAEpaper, 1999-01-3679, (1999)
- (192) M. Richter, A. Franke, M. Aldén, A. Hultqvist, B. Johansson: “Optical Diagnostics Applied to a Naturally Aspirated Homogeneous Charge Compression Ignition Engine”, SAEpaper, 1999-01-3649, (1999)
- (193) Hultqvist Anders, Magnus Christensen, Bengt Johansson, Axel Franke, Mattias Richter, Marcus Aldén: “A Study of the Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion Process by Chemiluminescence Imaging“, SAEpaper, 1999-01-3680, (1999)
- (194) Rudolf H. Stanglmaier, Charles E. Roberts: “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications“, SAEpaper, 1999-01-3682, (1999)
- (195) Scott B. Fiveland, Dennis N. Assanis: “A Four-Stroke Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Simulation for Combustion and Performance Studies “, SAEpaper, 2000-01-0332, (2000)
- (196) Akira Higashino, Hiroshi Sasaki, Keiji Kishishita, Sigeo Sekiyama, Hideo Kawamura, Hiroyuki Iwamoto: “Compression Ignition Combustion in a Prechambered and Heat Insulated Engine Using a Homogeneous Natural Gas Mixture“, SAEpaper, 2000-01-0330, (2000)
- (197) Daniel Flowers, Salvador Aceves, Ray Smith, John Torres, James Girard, Robert Dibble: “HCCI in a CFR Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling”, SAEpaper, 2000-01-0328, (2000)

- (198) Salvador M. Aceves, Daniel L. Flowers, Charles K. Westbrook, J. Ray Smith, William Pitz, Robert Dibble, Magnus Christensen, Bengt Johansson: "A Multi-Zone Model for Prediction of HCCI Combustion and Emissions", SAEpaper, 2000-01-0327, (2000)
- (199) Jacques Lavy, Jean-Charles Dabadie, Christian Angelberger, Pierre Duret, Jürgen Willand, Andreas Juretzka, Jochen Schäflein, Tom Ma, Yvane Lendresse, Arnaud Satre, Christof Schulz, Heinz Krämer, Hua Zhao, Len Damiano: "Innovative Ultra-low NOx Controlled Auto-Ignition Combustion Process for Gasoline Engines: the 4-SPACE Project", SAEpaper, 2000-01-1837, (2000)
- (200) Magnus Christensen, Bengt Johansson: "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) with Exhaust Gas Recirculation and Pilot Fuel", SAEpaper, 2000-01-1835, (2000)
- (201) Olof Erlandsson, Bengt Johansson, Fredrik A. Silversand: "Hydrocarbon (HC) Reduction of Exhaust Gases from a Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine Using Different Catalytic Mesh-Coatings", SAEpaper, 2000-01-1847, (2000)
- (202) Anders Hultqvist, Magnus Christensen, Bengt Johansson: "The Application of Ceramic and Catalytic Coatings to Reduce the Unburned Hydrocarbon Emissions from a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine", SAEpaper, 2000-01-1833, (2000)
- (203) M. Richter, J. Engström, A. Franke, M. Aldén, A. Hultqvist, B. Johansson: "The Influence of Charge Inhomogeneity on the HCCI Combustion Process", SAEpaper, 2000-01-2868, (2000)
- (204) Joel Martinez-Frias, Salvador M. Aceves, Daniel Flowers, J. Ray Smith, Robert Dibble: "HCCI Engine Control by Thermal Management", SAEpaper, 2000-01-2869, (2000)
- (205) George Kontarakis, Nick Collings, Tom Ma: "Demonstration of HCCI Using a Single Cylinder Four-stroke SI Engine with Modified Valve Timing", SAEpaper, 2000-01-2870, (2000)
- (206) Jan-Ola Olsson, Per Tunestål, Bengt Johansson: "Closed-Loop Control of an HCCI Engine", SAEpaper, 2001-01-1031, (2001)
- (207) Toshiji Amano, Satoshi Morimoto, Yasuharu Kawabata: "Modeling of the Effect of Air/Fuel Ratio and Temperature Distribution on HCCI Engines", SAEpaper, 2001-01-1024, (2001)
- (208) Song-Chang Kong, Craig D. Marriott, Rolf D. Reitz, Magnus Christensen: "Modeling and Experiments of HCCI Engine Combustion Using Detailed

- Chemical Kinetics with Multidimensional CFD”: SAEpaper, 2001-01-1026, (2001)
- (209) Don Law, Dan Kemp, Jeff Allen, Gary Kirkpatrick, Ted Copland: “Controlled Combustion in an IC-Engine with a Fully Variable Valve Train“, SAEpaper, 2001-01-0251, (2001)
- (210) N. B. Kaahaaina, A. J. Simon, P. A. Caton, C. F. Edwards: “Use of Dynamic Valving to Achieve Residual-Affected Combustion”, SAEpaper, 2001-01-0549, (2001)
- (211) Shuji Kimura, Osamu Aoki, Yasuhisa Kitahara, Eiji Aiyoshizawa: “Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards”, SAEpaper, 2001-01-0200, (2000)
- (212) Daniel Flowers, Salvador M. Aceves, Joel Martinez-Frias, J. Ray Smith, Michael Au, James Girard, Robert Dibble: “Operation of a Four-Cylinder 1.9L Propane Fueled Homogeneous Charge Compression Ignition Engine: Basic Operating Characteristics and Cylinder-to-Cylinder Effects”, SAEpaper, 2001-01-1895, (2001)
- (213) Michael Y. Au, James W. Girard, Robert Dibble, Daniel Flowers, Salvador M. Aceves, Joel Martinez-Frias, Ray Smith, Christian Seibel, Ulrich Maas: “1.9-Liter Four-Cylinder HCCI Engine Operation with Exhaust Gas Recirculation”, SAEpaper, 2001-01-1894, (2001)
- (214) Salvador M. Aceves, Daniel L. Flowers, Joel Martinez-Frias, J. Ray Smith, Robert Dibble, Michael Au, James Girard: “HCCI Combustion: Analysis and Experiments”, SAEpaper, 2001-01-2077, (2001)
- (215) Magnus Christensen, Bengt Johansson, Anders Hultqvist: “The Effect of Piston Topland Geometry on Emissions of Unburned Hydrocarbons from a Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine”, SAEpaper, 2001-01-1893, (2001)
- (216) Roy Ogink, Valeri Golovitchev: “Gasoline HCCI Modeling: Computer Program Combining Detailed Chemistry and Gas Exchange Processes”, SAEpaper, 2001-01-3614, (2001)
- (217) Hua Zhao, Z. Peng, J. Williams, N. Ladommatos: “Understanding the Effects of Recycled Burnt Gases on the Controlled Autoignition (CAI) Combustion in Four-Stroke Gasoline Engines”, SAEpaper, 2001-01-3607, (2001)
- (218) Jian Li, Hua Zhao, Nicos Ladommatos, Tom Ma: “Research and Development of Controlled Auto-Ignition (CAI) Combustion in a 4-Stroke Multi-Cylinder Gasoline Engine”, SAEpaper, 2001-01-3608, (2001)
- (219) Lucien Koopmans, Ingemar Denbratt: “A Four Stroke Camless Engine, Operated

- in Homogeneous Charge Compression Ignition Mode with Commercial Gasoline”, SAEpaper, 2001-01-3610, (2001)
- (220) Yuki Iwashiro, Tadashi Tsurushima, Yoshiaki Nishijima, Yasuo Asaumi: “Fuel Consumption Improvement and Operation Range Expansion in HCCI by Direct Water Injection“, SAEpaper, 2002-01-0105, (2002)
- (221) Hua Zhao, Jian Li, Tom Ma, Nicos Ladommatos: “Performance and Analysis of a 4-Stroke Multi-Cylinder Gasoline Engine with CAI Combustion”, SAEpaper, 2002-01-0420, (2002)
- (222) Koji Hiraya, Kazuya Hasegawa, Tomonori Urushihara, Akihiro Iiyama: “A Study on Gasoline Fueled Compression Ignition Engine ~ A Trial of Operation Region Expansion ~”, SAEpaper, 2002-01-0416, (2002)
- (223) Magnus Christensen, Bengt Johansson, Anders Hultqvist: “The Effect of Combustion Chamber Geometry on HCCI Operation”, SAEpaper, 2002-01-0425, (2002)
- (224) Craig D. Marriott, Rolf D. Reitz: “Experimental Investigation of Direct Injection-Gasoline for Premixed Compression Ignited Combustion Phasing Control”, SAEpaper, 2002-01-0418, (2002)
- (225) Lucien Koopmans, Ove Backlund, Ingemar Denbratt: “Cycle to Cycle Variations: Their Influence on Cycle Resolved Gas Temperature and Unburned Hydrocarbons from a Camless Gasoline Compression Ignition Engine”, SAEpaper, 2002-01-0110, (2002)
- (226) Magnus Sjöberg, Lars-Olof Edling, Torbjörn Eliassen, Lars Magnusson, Hans-Erik Ångström: “GDI HCCI: Effects of Injection Timing and Air Swirl on Fuel Stratification, Combustion and Emissions Formation”, SAEpaper, 2002-01-0106, (2002)
- (227) Shigeo Yamamoto, Takahiro Satou, Motoki Ikuta: “Feasibility Study of Two-stage Hybrid Combustion in Gasoline Direct Injection Engines”, SAEpaper, 2002-01-0113, (2002)
- (228) Song-Chang Kong, Craig D. Marriott, Christopher J. Rutland, Rolf D. Reitz: “Experiments and CFD Modeling of Direct Injection Gasoline HCCI Engine Combustion”, SAEpaper, 2002-01-1925, (2002)
- (229) Tanet Aroonsrisopon, David E. Foster, Takeshi Morikawa, Minoru Iida: “Comparison of HCCI Operating Ranges for Combinations of Intake Temperature, Engine Speed and Fuel Composition”, SAEpaper, 2002-01-1924, (2002)
- (230) Göran Haraldsson, Per Tunestål, Bengt Johansson, Jari Hyvönen: “HCCI Combustion Phasing in a Multi Cylinder Engine Using Variable Compression

- Ratio”, SAEpaper, 2002-01-2858, (2002)
- (231) Jialin Yang, Todd Culp, Thomas Kenney: “Development of a Gasoline Engine System Using HCCI Technology - The Concept and the Test Results”, SAEpaper, 2002-01-2832, (2002)
- (232) Magnus Christensen, Bengt Johansson: “The Effect of In-Cylinder Flow and Turbulence on HCCI Operation”, SAEpaper, 2002-01-2864, (2002)
- (233) Jan Hronza, David Bell: “A Lubrication and Oil Transport Model for Piston Rings Using a Navier-Stokes Equation with Surface Tension”, SAEpaper, 2003-01-1053, (2003)
- (234) R. J. Osborne, G. Li, S. M. Sapsford, J. Stokes, T. H. Lake, M. R. Heikal: “Evaluation of HCCI for Future Gasoline Powertrains”, SAEpaper, 2003-01-0750, (2003)
- (235) John E. Dec, Magnus Sjöberg: “A Parametric Study of HCCI Combustion - the Sources of Emissions at Low Loads and the Effects of GDI Fuel Injection”, SAEpaper, 2003-01-0752, (2003)
- (236) Lucien Koopmans, Hans Ström, Staffan Lundgren, Ove Backlund, Ingemar Denbratt: “Demonstrating a SI-HCCI-SI Mode Change on a Volvo 5-Cylinder Electronic Valve Control Engine”, SAEpaper, 2003-01-0753, (2003)
- (237) Tomonori Urushihara, Koji Hiraya, Akihiko Kakuhou, Teruyuki Itoh: “Expansion of HCCI Operating Region by the Combination of Direct Fuel Injection, Negative Valve Overlap and Internal Fuel Reformation”, SAEpaper, 2003-01-0749, (2003)
- (238) Yoshishige Ohyama: “Simultaneous Control of Air/fuel Ratio and Intake, Exhaust Valve Timing for HCCI Operation”, SAEpaper, 2003-01-1084, (2003)
- (239) Hongming Xu, Andrew Williams, Huiyu Fu, Stan Wallace, Steve Richardson, Mike Richardson: “Operating Characteristics of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Cam Profile Switching - Simulation Study”, SAEpaper, 2003-01-1859, (2003)
- (240) Nicolas Jeuland, Xavier Montagne, Pierre Duret: “Engine and Fuel Related Issues of Gasoline CAI (Controlled Auto-Ignition) Combustion“, SAEpaper, 2003-01-1856, (2003)
- (241) Thomas W. Ryan, Andrew C. Matheaus: “Fuel Requirements for HCCI Engine Operation”, SAEpaper, 2003-01-1813, (2003)
- (242) Uwe Wagner, Razvan Anca, Amin Velji, Ulrich Spicher: “An Experimental Study of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) with Various Compression Ratios, Intake Air Temperatures and Fuels with Port and Direct Fuel Injection”, SAEpaper, 2003-01-2293, (2003)

- (243) Jari Hyvönen, Göran Haraldsson, Bengt Johansson: "Supercharging HCCI to Extend the Operating Range in a Multi-Cylinder VCR-HCCI Engine", SAEpaper, 2003-01-3214, (2003)
- (244) Petter Strandh, Magnus Christensen, Johan Bengtsson, Rolf Johansson, Andreas Vressner, Per Tunestål, Bengt Johansson: "Ion Current Sensing for HCCI Combustion Feedback", SAEpaper, 2003-01-3216, (2003)
- (245) A. Fuerhapter, E. Unger, W. F. Piock, G.K. Fraidl: "The new AVL CSI Engine - HCCI Operation on a Multi Cylinder Gasoline Engine", SAEpaper, 2004-01-0551, (2004)
- (246) John E. Dec, Magnus Sjöberg: "Isolating the Effects of Fuel Chemistry on Combustion Phasing in an HCCI Engine and the Potential of Fuel Stratification for Ignition Control", SAEpaper, 2004-01-0557, (2004)
- (247) Andreas Vressner, Petter Strandh, Anders Hultqvist, Per Tunestål, Bengt Johansson: "Multiple Point Ion Current Diagnostics in an HCCI Engine", SAEpaper, 2004-01-0934, (2004)
- (248) H. Kopecek, E. Wintner, M. Lackner, F. Winter, A. Hultqvist: "Laser-Stimulated Ignition in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine", SAEpaper, 2004-01-0937, (2004)
- (249) Shiro Yamaoka, Hiromu Kakuya, Shinji Nakagawa, Toshiharu Nogi, Atsushi Shimada, Yusuke Kihara: "A Study of Controlling the Auto-Ignition and Combustion in a Gasoline HCCI Engine", SAEpaper, 2004-01-0942, (2004)
- (250) Göran Haraldsson, Per Tunestål, Bengt Johansson, Jari Hyvönen: "HCCI Closed-Loop Combustion Control Using Fast Thermal Management", SAEpaper, 2004-01-0943, (2004)
- (251) Tanet Aroonsrisopon, Philipp Werner, John O. Waldman, Volker Sohm, David E. Foster, Takeshi Morikawa, Minoru Iida: "Expanding the HCCI Operation With the Charge Stratification", SAEpaper, 2004-01-1756, (2004)
- (252) Yuichi Shimasaki, Makoto Kobayashi, Hideki Sakamoto, Masaki Ueno, Mamoru Hasegawa, Satoshi Yamaguchi, Takahiro Suzuki: "Study on Engine Management System Using In-cylinder Pressure Sensor Integrated with Spark Plug", SAEpaper, 2004-01-0519, (2004)
- (253) Jari Hyvönen, Göran Haraldsson, Bengt Johansson: "Balancing Cylinder-to-Cylinder Variations in a Multi-Cylinder VCR-HCCI Engine", SAEpaper, 2004-01-1897, (2004)
- (254) Yiqun Huang, Darius Mehta: "Investigation of an In-cylinder Ion Sensing Assisted HCCI Control Strategy", SAEpaper, 2005-01-0068, (2005)

- (255) Tomonori Urushihara, Koichi Yamaguchi, Koudai Yoshizawa, Teruyuki Itoh: “A Study of a Gasoline-fueled Compression Ignition Engine ~ Expansion of HCCI Operation Range Using SI Combustion as a Trigger of Compression Ignition ~” , SAEpaper, 2005-01-0180, (2005)
- (256) Nebojsa Milovanovic, Dave Blundell, Stephen Gedge, Jamie Turner: “SI-HCCI-SI Mode Transition at Different Engine Operating Conditions”, SAEpaper, 2005-01-0156, (2005)
- (257) Nebojsa Milovanovic, Dave Blundell, Richard Pearson, Jamie Turner, Rui Chen: “Enlarging the Operational Range of a Gasoline HCCI Engine By Controlling the Coolant Temperature”, SAEpaper, 2005-01-0157, (2005)
- (258) Halim Santoso, Jeff Matthews, Wai K. Cheng: “Managing SI/HCCI Dual-Mode Engine Operation”, SAEpaper, 2005-01-0162, (2005)
- (259) Per Amnéus, Fabian Mauss, Markus Kraft, Andreas Vressner, Bengt Johansson: “NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O formation in HCCI engines”, SAEpaper, 2005-01-0126, (2005)
- (260) Stephen A. Ciatti, Jan P. Hessler, Kyeong O. Lee, Adrian M. Tentner, Jinyu Zhu: “Investigation of Nano-particulate Production From Low Temperature Combustion”, SAEpaper, 2005-01-0128, (2005)
- (261) Zhi Wang, Jian-Xin Wang, Shi-Jin Shuai, Qing-Jun Ma: “Effects of Spark Ignition and Stratified Charge on Gasoline HCCI Combustion With Direct Injection”, SAEpaper, 2005-01-0137, (2005)
- (262) Shiro Yamaoka, Hiromu Kakuya, Shinji Nakagawa, Takashi Okada, Atsushi Shimada, Yusuke Kihara: “HCCI Operation Control in a Multi-Cylinder Gasoline Engine”, SAEpaper, 2005-01-0120, (2005)
- (263) Magnus Sjöberg, John E. Dec, Nicholas P. Cernansky: “Potential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-Rise Rates in HCCI Engines, Based on Multi-Zone Modeling and Experiments”, SAEpaper, 2005-01-0113, (2005)
- (264) Magnus Sjöberg, John E. Dec: “Effects of Engine Speed, Fueling Rate, and Combustion Phasing on the Thermal Stratification Required to Limit HCCI Knocking Intensity”, SAEpaper, 2005-01-2125, (2005)
- (265) Jari Hyvönen, Carl Wilhelmsson, Bengt Johansson: “The Effect of Displacement on Air-Diluted Multi-Cylinder HCCI Engine Performance”, SAEpaper, 2006-01-0205, (2006)
- (266) Robert M. Wagner, K. Dean Edwards, C. Stuart Daw, Johney B. Green, Bruce G. Bunting: “On the Nature of Cyclic Dispersion in Spark Assisted HCCI Combustion”, SAEpaper, 2006-01-0418, (2006)

- (267) Dimosthenis Panousakis, Andreas Gazis, Jill Paterson, Wen-Hua Chen, Rui Chen, Jamie Turner, Nebosja Milovanovic: "Ion Current Signal Interpretation via Artificial Neural Networks for Gasoline HCCI Control", SAEpaper, 2006-01-1088, (2006)
- (268) Gautam T. Kalghatgi, Per Risberg, Hans-Erik Ångström: "Advantages of Fuels with High Resistance to Auto-ignition in Late-injection, Low-temperature, Compression Ignition Combustion", SAEpaper, 2006-01-3278, (2006)
- (269) Orgun Güralp, Mark Hoffman, Dennis N. Assanis, Zoran Filipi, Tang-Wei Kuo, Paul Najt, Rod Rask: "Characterizing the Effect of Combustion Chamber Deposits on a Gasoline HCCI Engine", SAEpaper, 2006-01-3277, (2006)
- (270) Ock Taeck Lim, Hiroaki Nakano, Norimasa Iida: "The Research About the Effects of Thermal Stratification on n-Heptane/iso-Octane-Air Mixture HCCI Combustion Using a Rapid Compression Machine", SAEpaper, 2006-01-3319, (2006)
- (271) R. Yu, X. S. Bai, H. Lehtiniemi, S. S. Ahmed, F. Mauss, M. Richter, M. Aldén, L. Hildingsson, B. Johansson, A. Hultqvist: "Effect of Turbulence and Initial Temperature Inhomogeneity on Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion", SAEpaper, 2006-01-3318, (2006)
- (272) Carview Corporation: "清水和夫, F700 に試乗 究極のガソリンエンジン", <http://carview.yahoo.co.jp/article/testdrive/20090605-20100206-carview/>, (2008/7/25)
- (273) 日経テクノロジー: "GM 社, HCCI エンジンを搭載した走行可能な試作車を発表", <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20070827/138283/>, (2007/8/27)
- (274) 日経テクノロジー: "Volkswagen の次世代燃焼技術 CCS", <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20070331/129921/>, (2007/3/31)
- (275) Wolfgang Steiger: "The Volkswagen Vision - Future Powertrains and Fuels for Sustainable Mobility", Dearborn, 16 January 2008, (2008/1)
- (276) Jürgen Willand, Christian Jelitto, Jan Jakobs: "The GCI Combustion Process from Volkswagen", MTZ worldwide, Vol. 69, Issue 4, p.56-61, DOI: 10.1007/BF03226906 , (2008/4)
- (277) Beck L.M., Mauß F., Montefrancesco E., Winkler A.: "Auto-Ignition and Flame Propagation Modelling Approaches with VECTIS", Ricardo European User Conference, March 27th 2012, Ludwigsburg, (2012)
- (278) Guohong Tian, Zhi Wang, Qiangqing Ge, Jianxin Wang, Shijin Shuai: "Mode Switch of SI-HCCI Combustion on a GDI Engine", SAEpaper, 2007-01-0195, (2007)
- (279) Li Cao, Hua Zhao, Xi Jiang: "Investigation into Controlled Auto-Ignition

- Combustion in a GDI Engine with Single and Split Fuel Injections”, SAEpaper, 2007-01-0211, (2007)
- (280) Koichi Hatamura: “A Study on HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) Gasoline Engine Supercharged by Exhaust Blow Down Pressure”, SAEpaper, 2007-01-1873, (2007)
- (281) Hiroaki Nakano, Ock Taeck LIM, Norimasa Iida: “An Investigation of the Effect of Thermal Stratification on HCCI Combustion by using Rapid Compression Machine”, SAEpaper, 2007-01-1870, (2007)
- (282) Sadami Yoshiyama, Eiji Tomita, Masatoshi Mori, Yuji Sato: “Ion Current in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine”, SAEpaper, 2007-01-4052, (2007)
- (283) Hans Aulin, Pascal Bentioulis, Per Tunestål, Jari Hyvönen, Bengt Johansson: “Improving Ion Current Feedback for HCCI Engine Control”, SAEpaper, 2007-01-4053, (2007)
- (284) Simon Brewster, Geoffrey Cathcart, Christian Zavier: “The Potential of Enhanced HCCI / CAI Control Through the Application of Spray Guided Direct Injection”, SAEpaper, 2008-01-0035, (2008)
- (285) Enrico Corti, Davide Moro, Luca Solieri: “Measurement Errors in Real-Time IMEP and ROHR Evaluation”, SAEpaper, 2008-01-0980, (2008)
- (286) Hiromu Kakuya, Shiro Yamaoka, Kengo Kumano, Shinya Sato: “Investigation of a SI-HCCI Combustion Switching Control Method in a Multi-Cylinder Gasoline Engine”, SAEpaper, 2008-01-0792, (2008)
- (287) Lifeng Xu, George Graham, Robert McCabe, John Hoard, Jialin Yang: “The Feasibility of an Alumina-Based Lean NOx Trap (LNT) for Diesel and HCCI Applications”, SAEpaper, 2008-01-0451, (2008)
- (288) Tsuyoshi Matsuda, Hiroki Wada, Toshiya Kono, Takeshi Nakamura, Tomonori Urushihara: “A Study of a Gasoline-fueled HCCI Engine~Mode Changes from SI Combustion to HCCI Combustion~” , SAEpaper, 2008-01-0050, (2008)
- (289) Fabrice Guillemin, Olivier Grondin, Jonathan Chauvin, Emmanuel Nguyen: “Combustion Parameters Estimation Based on Knock Sensor for Control Purpose Using Dedicated Signal Processing Platform”, SAEpaper, 2008-01-0790, (2008)
- (290) Ash Punater, Gene Ripley, Karl Schten: “Controller for Rapid Development of Advanced Mode Combustion Algorithms using Cylinder Pressure Feedback”, SAEpaper, 2008-21-0015, (2008)
- (291) John E. Dec, Wontae Hwang: “Characterizing the Development of Thermal Stratification in an HCCI Engine Using Planar-Imaging Thermometry”,

- SAEpaper, 2009-01-0650, (2009)
- (292) Yang Dongbo, Xu Fan, Wang Zhi, Wang Jianxin: "Limitation of Charge Stratification for High Load Extension of HCCI Combustion in a GDI Engine with NVO", SAEpaper, 2009-01-1343, (2009)
- (293) Nicole Wermuth, Hanho Yun, Paul Najt: "Enhancing Light Load HCCI Combustion in a Direct Injection Gasoline Engine by Fuel Reforming During Recompression", SAEpaper, 2009-01-0923, (2009)
- (294) Quazi E. Hussain, David R. Brigham, Clay W. Maranville: "Thermoelectric Exhaust Heat Recovery for Hybrid Vehicles", SAEpaper, 2009-01-1132, (2009)
- (295) Jun-Mo Kang, Chen-Fang Chang, Jyh-Shin Chen, Man-Feng Chang: "Concept and Implementation of a Robust HCCI Engine Controller", SAEpaper, 2009-01-1131, (2009)
- (296) Hanho Yun, Nicole Wermuth, Paul Najt: "Development of Robust Gasoline HCCI Idle Operation Using Multiple Injection and Multiple Ignition (MIMI) Strategy", SAEpaper, 2009-01-0499, (2009)
- (297) Thomas Johansson, Bengt Johansson, Per Tunestål, Hans Aulin: "HCCI Operating Range in a Turbo-charged Multi Cylinder Engine with VVT and Spray-Guided DI", SAEpaper, 2009-01-0494, (2009)
- (298) Toru Kitamura, Junichi Takanashi, Yasuhiro Urata, Ken Ogawa: "A Study on Ignition Timing and Combustion Switching Control of Gasoline HCCI Engine", SAEpaper, 2009-01-1128, (2009)
- (299) Christopher James Chadwell, Darius Mehta: "Development of a Transient-Capable Multi-Cylinder HCCI Engine", SAEpaper, 2010-01-1244, (2010)
- (300) Hao Wu, Nick Collings, Simon Regitz, Jonathan Etheridge, Markus Kraft: "Experimental Investigation of a Control Method for SI-HCCI-SI Transition in a Multi-Cylinder Gasoline Engine", SAEpaper, 2010-01-1245, (2010)
- (301) Hongchao Zhang, Hui Xie: "Research on Relativity of Knock Sensor Signal and Gasoline HCCI Combustion Obtained with Trapping Residual Gas", SAEpaper, 2010-01-1242, (2010)
- (302) Chang-Ping Lee, Sourabh Goel, Aristotelis Babajimopoulos: "The Effects of Stroke-to-Bore Ratio on HCCI Combustion", SAEpaper, 2010-01-0842, (2010)
- (303) Hanho Yun, Jun-Mo Kang, Man-Feng Chang, Paul Najt: "Improvement on Cylinder-to-Cylinder Variation Using a Cylinder Balancing Control Strategy in Gasoline HCCI Engines", SAE paper, 2010-01-0848, (2010)
- (304) Benjamin Lawler, Elliott Ortiz-Soto, Rohit Gupta, Huei Peng, Zoran Filipi:

- “Hybrid Electric Vehicle Powertrain and Control Strategy Optimization to Maximize the Synergy with a Gasoline HCCI Engine”, SAEpaper, 2011-01-0888, (2010)
- (305) Samveg Saxena, Jyh-Yuan Chen, Robert W. Dibble: “Characterization of Ion Signals under Ringing Conditions in an HCCI Engine”, SAEpaper, 2011-01-1777, (2011)
- (306) Antonio Palma, Davide Del Core PhD, Carmine Esposito: “The HCCI Concept and Control, Performed with MultiAir Technology on Gasoline Engines”, SAEpaper, 2011-24-0026, (2011)
- (307) Sage Kokjohn, Reed Hanson, Derek Splitter, John Kaddatz, Rolf D. Reitz: “Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Combustion in Light- and Heavy-Duty Engines”, SAEpaper, 2011-01-0357, (2011)
- (308) Hong-Qiang Yang, Shi-Jin Shuai, Zhi Wang, Jian-Xin Wang: “High Efficiency and Low Pollutants Combustion: Gasoline Multiple Premixed Compression Ignition (MPCI)”, SAEpaper, 2012-01-0382, (2012)
- (309) Tatsuya Kuboyama, Yasuo Moriyoshi, Koichi Hatamura, Toshio Yamada, Junichi Takanashi, Yasuhiro Urata: “A Study of Control Strategy for Combustion Mode Switching Between HCCI and SI With the Blowdown Supercharging System”, SAEpaper, 2012-01-1122, (2012)
- (310) Tobias Nier, Andre Kulzer, Roland Karrelmeyer:” Analysis of the Combustion Mode Switch Between SI and Gasoline HCCI”, SAEpaper, 2012-01-1105, (2012)
- (311) Adam Weall, James P. Szybist, K. Dean Edwards, Matthew Foster, Keith Confer, Wayne Moore: “HCCI Load Expansion Opportunities Using a Fully Variable HVA Research Engine to Guide Development of a Production Intent Cam-Based VVA Engine: The Low Load Limit”, SAEpaper, 2012-01-1134, (2012)
- (312) Jennifer Wheeler, Dusan Polovina, Vasile Frasinell, Oliver Miersch-Wiemers, Alan Mond, Jeff Sterniak, Hakan Yilmaz: “Design of a 4-Cylinder GTDI Engine with Part-Load HCCI Capability”, SAEpaper, 2013-01-0287, (2013)
- (313) Dusan Polovina, David McKenna, Jennifer Wheeler, Jeff Sterniak, Oliver Miersch-Wiemers, Alan Mond, Hakan Yilmaz: “Steady-State Combustion Development of a Downsized Multi-Cylinder Engine with Range Extended HCCI/SACI Capability”, SAEpaper, 2013-01-1655, (2013)
- (314) Kevin S. Hoyer, Mark Sellnau, James Sinnamon, Harry Husted: “Boost System Development for Gasoline Direct-Injection Compression-Ignition (GDICI)”, SAEpaper, 2013-01-0928, (2013)
- (315) James P. Szybist, K. Dean Edwards, Matthew Foster, Keith Confer, Wayne Moore:

- “Characterization of Engine Control Authority on HCCI Combustion as the High Load Limit is Approached”, SAEpaper, 2013-01-1665, (2013)
- (316) SAE: “Delphi and Hyundai GDCI program aims to top diesel efficiency”, <http://articles.sae.org/12823/>, (2014/2/17)
- (317) Hearst Communications, Inc.: “We Have Ignition: Hyundai’s Experimental Gas Engine Runs Without Spark Plugs”, <http://www.caranddriver.com/features/hyundais-experimental-gas-engine-runs-without-spark-plugs-feature>, (2014/3)
- (318) Veli Kivanc Temel, Jeff Sterniak: “Characterization of SACI Combustion for Use in Model Based Controls”, SAEpaper, 2014-01-1289, (2014)
- (319) Yinbo Cao, Zhongye Xue, Qiqi Miao, Jun Deng, Liguang Li: ” Closed Loop Control of SI/HCCI Combustion Mode Switch Based on Ion Current Feedback”, SAEpaper, 2014-01-2704, (2014)
- (320) Brandon Mendrea, Yan Chang, Yusuf Zeynel Abidin Akkus, Jeff Sterniak, Stanislav Bohac: “Investigations of the Effect of Ambient Condition on SACI Combustion Range”, SAEpaper, 2015-01-0828, (2015)
- (321) Masanobu Takazawa, Kiminori Komura, Toru Kitamura: “Transient Control Technology of Spark Assisted HCCI”, SAEpaper, 2015-01-0880, (2015)
- (322) Hiroshi Mizokami, Mina Nishi, Norimasa Iida: “An Investigation of the Effects of Fuel Concentration Inhomogeneity on HCCI Combustion -Fuel Concentration of Pre-Mixture Using LIF measurement-“, SAEpaper, 2015-01-1788, (2015)
- (323) Hiroki Takeori, Hiroki Hosoe, Teruyoshi Morita, Tetsuo Endo: “A Study of Aftertreatment System for Spark-Assisted HCCI Engine”, SAEpaper, 2015-01-2013, (2015)
- (324) Yudai Yamasaki, Sota Umahashi, Yasuto Uesugi, Qiong Ma, Shigehiko Kaneko, Takayuki Hikita, Saori Mizuno, Yuichiro Tsumura, Tadasu Hashiguchi: “Development of Dynamic Models for an HCCI Engine with Exhaust Gas Rebreatheing System”, SAEpaper, 2015-01-1803, (2015)
- (325) Donald V. Johnson, Gregory Roth, Andrew Fedewa, Jeremy Kraenzlein, Xiaojian Yang: “Development of Electrical-Electronic Controls for a Gasoline Direct Injection Compression Ignition Engine”, SAEpaper, 2016-01-0614, (2016)
- (326) Christopher P. Kolodziej, Mark Sellnau, Kukwon Cho, David Cleary: “Operation of a Gasoline Direct Injection Compression Ignition Engine on Naphtha and E10 Gasoline Fuels”, SAEpaper, 2016-01-0759, (2016)
- (327) Jordan Elizabeth Easter, Stanislav V. Bohac: “Influence of HCCI and SACI Combustion Modes on NH<sub>3</sub> Generation and Subsequent Storage across a

- TWC-SCR System”, SAEpaper, 2016-01-0951, (2016)
- (328) F1 TECHNICAL: “Turbulent Jet ignition pushes engine combustion efficiency”,  
<http://www.f1technical.net/news/20316>, (2016/4/25)
- (329) マツダ株式会社“2015年3月期決算説明会”,  
[http://www.mazda.com/contentassets/e431347bc35e470aa5d825e96889d30d/files/pre150424\\_j.pdf](http://www.mazda.com/contentassets/e431347bc35e470aa5d825e96889d30d/files/pre150424_j.pdf), (2015/3)
- (330) ハーレーダビッドソン アルファ新潟: “HD ハーレー新エンジン  
「MILWAUKEE-EIGHT」の特長”,  
<http://alphabbm.com/hd-milwaukee-eight-engine/>, (2016/8/2)
- (331) LogicArtz“ノックセンサーの種類”, [http://www.mlabo.com/knock\\_sensor\\_ja.html](http://www.mlabo.com/knock_sensor_ja.html),  
(2016)
- (332) C.S.Draper: “Pressure Waves Accompanying Detonation in the Internal  
Combustion Engine”, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol.5, No.6, p.219-226,  
(1938/4)
- (333) 日産自動車株式会社: “日産スカイライン V35 型 整備解説書”, (2001)
- (334) 日本ガイシ株式会社: “高精度 NOx センサーを世界で初めて商品化”,  
<http://www.ngk.co.jp/news/2008/0611.html>, (2008/6/11)
- (335) Samveg Saxena, Jyh-Yuan Chen, Robert W.Dibble: “Characterization of Ion  
Signals under Ringing Conditions in an HCCI Engine”, Society of Automotive  
Engineers of Japan, 20119085, p.1219-1226, (2011)
- (336) P Attrad, J Micallef: “Ion current combustion technology for controlled  
auto-ignition gasoline engines”, Int. J. Engine Res., Vol.8, p.429-437, (2007)
- (337) P. Mehresh, R.W.Dibble, D.Flowers: “EGR effect on Ion Signal in HCCI Engines”,  
SAEpaper, 2005-01-2126, (2005)
- (338) Hans Aulin, Pascal Bentioulis, Per Tunestal, Jari Hyvonen, Bengt Johansson,  
“Improving Ion Current Feedback for HCCI Engine Control”, SAEpaper,  
2007-01-4053, (2007)
- (339) Yiqun Huang, Darius Mehta: “Investigation of an In-cylinder Ion Sensing Assisted  
HCCI Control Strategy”, SAEpaper, 2005-01-0068, (2005)
- (340) Sadami Yoshiyama, Eiji Tomita, Masatoshi Mori, Yuji Sato: “Ion Current in a  
Homogeneous Charge Compression Ignition Engine”, SAE paper, 2007-01-4052,  
(2007)
- (341) 島崎勇一, 坂口純子, 牧秀隆, 鈴木宏章, 近藤稔明, 山田達範: “フォーミュラ 1 エンジ  
ンの燃焼状態検出システムの研究(第2報)”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.1-05,  
p.5-8, 20055017, (2005)
- (342) Claude E.Shannon: “Communication in the Presence of Noise”, PROCEEDINGS

OF THE IEEE, Vol.86, No.2, p.447-457, (1998/2)

## 研究業績

### 学術論文

- ・ 緒方 健一郎：ガソリン HCCI エンジン実用化に向けた耐環境ロバスト制御の検討 -回転変動検出とエンジン振動検出を用いた燃焼安定性向上-，自動車技術会論文集, Vol.44 No.2, 20134173, p.257-262, 2013/3
- ・ 緒方 健一郎, 片岡 徹夫：ガソリン HCCI エンジン実用化に向けた耐環境ロバスト制御の検討 -イオン電流センサを用いた燃焼状態検出技術の研究-，自動車技術会論文集, Vol.44 No.3, 20134458, p.809-814, 2013/5
- ・ Kenichiro Ogata：Investigation of a Detecting Technology of Combustion Conditions Using the Ion-current Sensor, SAE paper 2015-01-1983, p.1-10, 2015/9
- ・ Kenichiro Ogata：Investigation of Robustness Control for Practical Use of Gasoline HCCI Engine, SAE paper 2013-01-0323, p.1-10, 2013/4
- ・ Kenichiro Ogata：Investigation of Robustness Control for Practical Use of Gasoline HCCI Engine- An Investigation of a Detecting Technology of Conditions of HCCI Using an Ion Current Sensor-, SAE paper 2014-01-1279, p.1-9, 2014/4
- ・ 緒方健一郎, 片岡徹夫：EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討，自動車技術会論文集, Vol.47 No.2, 20164170, p.357-362, 2016/3
- ・ 緒方健一郎, 片岡徹夫, 鈴木俊靖, 窪山達也, 森吉泰生：EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討(第 2 報)，自動車技術会論文集, Vol.47 No.5, p.1073-1078, 20160078, 2016/9

### 学会誌

- ・ 緒方健一郎：回転変動検出を用いたガソリン HCCI 燃焼安定性向上(特集 高機能化を支える制御・状態検知技術)，自動車技術会誌「自動車技術」, Vol.66 No.2, p.15-20, 20124075, 2012/2
- ・ 緒方健一郎：熊野賢吾, 紀村博史, 山岡士朗, エンジン制御システムにおける燃焼状態センシング技術, 計測自動制御学会誌「計測と制御」, vol.53 No.8 p.683-689, 2014/8
- ・ 緒方健一郎：熊野賢吾, 紀村博史, 山岡士朗, エンジン制御システムにおける燃焼状態センシング技術, 尖端社月刊誌「自動化技術」, vol.31 SN.360 p.74-80, 2015/1

### 国際会議発表

- ・ Kenichiro Ogata：Shiro Yamaoka, Hiromu Kakuya, Kengo Kumano, Investigation of robust control for gasoline HCCI engine, FISITA2014, F2014-CET-129, p.1-10, 2014/6
- ・ Kenichiro Ogata：Investigation of a Detecting Technology of Combustion Conditions Using the Ion-current Sensor, PF&L2015 Proceedings, 2015-01-1983, 2015/9

#### 国内会議発表

- ・ 緒方健一郎, 片岡徹夫, 鈴木俊靖, 窪山達也, 森吉泰生 : EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討(第 2 報), 学術講演会前刷集, No.34-16S, p.830-835, 20165155, 2016/5
- ・ 緒方健一郎, 片岡徹夫 : EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討, 学術講演会前刷集, No.43-15A, p.1029-1034, 20156198, 2015/10
- ・ 緒方健一郎, 片岡徹夫 : ガソリン HCCI エンジン実用化に向けた耐環境ロバスト制御の検討 (第 3 報)ーイオン電流センサを用いた燃焼状態検出技術の研究ー, 学術講演会前刷集, No.92-12, 20125505, 2012/10
- ・ 緒方健一郎 : ガソリン HCCI エンジン実用化に向けた耐環境ロバスト制御の検討 (第 2 報)ーエンジン振動検出を用いた燃焼安定性向上ー, 学術講演会前刷集, No.24-12, 20125013, 2012/5
- ・ 緒方健一郎 : ガソリン HCCI エンジン実用化に向けた耐環境ロバスト制御の検討 (第 1 報), 学術講演会前刷集, No.158-11, 20115511, 2011/10
- ・ 緒方健一郎, 梶谷修一, 橋本孝秀 : DME ハイブリッド機関に関する基礎的研究, 学術講演会前刷集, No.81-08, 20085018, 2008/5

#### フォーラム

- ・ 緒方健一郎, 熊野賢吾, 紀村博史, 山岡士朗 : エンジン制御システムにおける燃焼状態センシング技術, SICE 九州フォーラム, 2014/8

## 謝辞

本論文を作成するにあたってご指導，ご助言を頂きました千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻 森吉泰生教授に心より感謝申し上げます。また，主査を務めて頂きました千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻 田中学教授，副主査を務めて頂きました千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻 鷹野敏明教授，千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻 山田敏生特任教授，千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻 窪山達也准教授に深く感謝の意を表します。

本論文は，筆者が株式会社日立製作所日立研究所在籍中に実施した研究成果をまとめたものであり，本論文をまとめる機会を与えて頂きました株式会社日立製作所研究開発グループ長 鈴木教洋氏，テクノロジーイノベーション統括本部長 青木雅博氏，制御イノベーションセンタ長 入江直彦氏，グリーンモビリティ研究部長 山岡士朗氏，グリーンモビリティ研究部ユニットリーダー 鈴木邦彦氏に心より感謝申し上げます。

研究開発を業務とする機会を与えて頂いた元日立研究所の白石拓也氏，野木利治氏，大須賀稔氏，岡田隆氏，そして，HITACHI AUTOMOTIVE SYSTEMS EUROPE GMBH. の町田憲一氏，岡本多加志氏，また，HITACHI (CHINA) RESEARCH & DEVELOPMENT CORPORATION の安部元幸氏に心より感謝致します。

本研究の共同研究者であり，本研究を遂行するにあたっての実験装置の試作にご協力頂いた日立オートモティブシステムズ阪神株式会社設計部長 片岡徹夫氏に心より感謝致します。また，実験装置の設計にご協力頂いた日立オートモティブシステムズ阪神株式会社設計部主任技師 安田祐氏，石井理之氏，技師 内勢義文氏，島田直樹氏に心より感謝致します。

本研究を遂行するにあたり多くの技術的ご助言を頂いた HITACHI EUROPE GMBH.(Germany)の熊野賢吾氏，株式会社日立製作所研究開発グループ電力システム研究部主任研究員 角谷啓氏，株式会社日立製作所研究開発グループグリーンモビリティ研究部主任研究員 助川義寛氏，押領司一浩氏，紀村博史氏，木原裕介氏に心より感謝致します。

本研究を遂行するにあたっての実験装置の設営等にご協力頂いた元自動車機器技術研究組合 星喜美男氏，佐藤洋二氏，高田誠氏，加瀬完二氏に心より感謝致します。

本研究を遂行するにあたっての日々の業務サポートくださった日立オートモティブシステムズ株式会社 技術開発本部主任技師 猿渡匡行氏，技師 大場久浩氏，有原儀信氏，井上雅彦氏，板谷隆樹氏，株式会社日立製作所研究開発グループグリーンモビリティ研究部主任研究員 安川義人氏，草壁亮氏，奥田雄希氏，宮本明靖氏，荒川貴文氏，米谷直樹氏，石浩雲氏，南波昇吾氏に感謝致します。

また，エンジン燃焼の研究開発分野に携わる機会を与えて下さった茨城大学工学部 金野満教授，梶谷修一教授，同大学工学部技術部 小松護氏，山口一成氏に心より感謝致します。

本論文の執筆に関し，応援を持って協力してくれた元茨城大学工学部機械工学科同窓の岡本毅氏，阿部俊之氏，小野泰和氏，高木利憲氏，林光秀氏，幕内孝伸氏，宮下将氏，矢

吹勉繁氏，山口瑞穂氏，相原友二氏，荻田恭之氏，須賀博基氏，田中徳泰氏，飛田直樹氏，橋本孝秀氏，保坂洋氏，横須賀章裕氏，井上良一氏，大作晃一氏，加藤綾太氏，兼為正義氏，佐々川知明氏，篠原秀一氏，萬田哲也氏，森裕秋氏，江幡俊祐氏，小澤大輔氏，川口浩二氏，高山正樹氏，山崎哲央氏に心より感謝致します。

最後に，本論文の執筆に関し，応援と励ましを持ってサポートしてくれた父 緒方義徳，母 緒方保子，妻 緒方節子に心から感謝致します。

