

マルチライン記録技術のための
音響光学デバイスの研究

2018年1月

品田 英俊

(千葉大学審査学位論文)

マルチライン記録技術のための
音響光学デバイスの研究

2018年1月

品田 英俊

目次

第 1 章 序論.....	1
1-1 研究背景.....	1
1-2 研究目的.....	8
1-3 本論文の構成.....	10
第 2 章 音響光学デバイスの研究.....	11
2-1 緒言.....	11
2-2 音響光学デバイスの理論.....	12
2-3 マルチ周波数 AOM の研究.....	24
2-3-1 マルチ周波数 AOM の基本理論.....	24
2-3-2 マルチ周波数 AOM の設計.....	27
2-3-3 マルチ周波数 AOM の評価.....	35
2-4 On-axis AOD の研究.....	39
2-4-1 On-axis AOD の異方 Bragg 回折の解析.....	39
2-4-2 On-axis AOD の評価.....	49
2-4-3 On-axis AOD による 2 次元光偏向器への応用と評価.....	57
2-5 考察.....	61
2-6 結論.....	63
第 3 章 マルチ周波数 AOM を用いた平面走査型レーザー記録システムでのマルチライン化技術の検証研究.....	64
3-1 緒言.....	64
3-2 マルチライン化システムの研究.....	66
3-2-1 記録系の主要なシステム構成.....	66
3-2-2 マルチ周波数 AOM に関する光学系の研究.....	69
3-2-3 平面走査型マルチビーム記録光学系の研究.....	71
3-3 マルチビーム化による高速画像形成の研究.....	74
3-4 高画質化のための課題解決.....	85
3-5 考察.....	93
3-6 結論.....	94
第 4 章 On-axis タイプ AOD の 2 次元光偏光器を用いた円筒内面走査型レーザー記録システムでのマルチライン化技術の検証研究.....	95

4-1 緒言	95
4-2 マルチビーム化の研究と基本設計	97
4-2-1 マルチビーム化の原理と方式の研究	97
4-2-2 採用するマルチビーム方式の研究	101
4-3 システム構成	104
4-3-1 システム設計	104
4-3-2 マルチビーム光学系設計	106
4-3-3 ビーム位置ずれ検出・補正系の設計	109
4-4 システム評価	111
4-4-1 光学系の評価	111
4-4-2 ビーム位置ずれ検出補正の評価	113
4-4-3 画像品質の評価	113
4-4-4 記録速度の評価	114
4-5 考察	116
4-6 結論	118
第5章 総括的結論	119
謝辞	120
参考文献	121
業績リスト	124

图表目次

Fig. 1 Trends of digitalization along with basic processes of industrial printing.	2
Fig. 2 Objectives of research in acousto-optic devices.	9
Fig. 3 Objectives of research in laser scanning recording systems.	9
Fig. 4 Schematic of acousto-optic modulator.	12
Fig. 5 Index surface of positive uniaxial crystal ($n_e > n_o$).	16
Fig. 6 Index surface of optically active crystals.	17
Fig. 7 Explanation of birefringence using index surface.	18
Fig. 8 Geometry of Bragg diffraction.	19
Fig. 9 Momentum triangle of optic and acoustic wave vectors.	19
Fig. 10 Wave vector diagram of acousto-optic interaction, isotropic diffraction.	20
Fig. 11 Diagram representing the wave vectors of anisotropic Bragg diffraction.	21
Fig. 12 Wave vector diagram to show midband degeneracy by re-diffraction of a diffracted light.	22
Fig. 13 Wave vector diagram of off-axis type of anisotropic Bragg diffraction.	22
Fig. 14 Relation between fundamental signal and 3 rd intermodulation distortion (IMD) in log-scale.	26
Fig. 15 Schematic of multi-frequency acousto-optic modulator.	26
Fig. 16 Schematic of diffracted lights by three frequencies at fixed input light angle.	28
Fig. 17 Wave vector diagram of acousto-optic interaction, multi-wavevectors-1.	28
Fig. 18 Schematic of diffracted lights by three frequencies at adjusted input light angles.	29
Fig. 19 Wave vector diagram of acousto-optic interaction, multi-wavevectors-2.	29
Fig. 20 Wave vector diagram of acousto-optic interaction, multi-wavevectors-3.	30
Fig. 21 Principle of multi-frequency AOM.	30
Fig. 22 Schematic on distance of transducers and angle of wavefront.	32
Fig. 23 Layout of phased array transducers.	34
Fig. 24 Two wavefronts symmetrically traveling from phased array transducers.	35
Fig. 25 Measurement data of diffraction efficiency and flatness within the bandwidth, each flatness Sample-1(#1): 0.64 dB, Sample-2(#2): 0.58 dB and Sample-3(#3): 0.57 dB.	36
Fig. 26 Calculated and measured diffraction efficiency of the multi-frequency AOM at $f=350\text{MHz}$	36
Fig. 27 Measurement of rise time at $150\ \mu\text{m}$ beam diameter in AOM.	37

Fig. 28 Measurement and calculated results of 1 st order diffraction and measurement result of 3 rd order intermodulation at 350 and 400 MHz RF input signals.	38
Fig. 29 Schematic of three dimensional wave surfaces.....	40
Fig. 30 Schematic of adjustments of angles θ_A , θ_B and θ_C for on-axis AOD.	41
Fig.31 Definition of coordinates for n_A , n_B , θ_A , θ_B and ϕ	42
Fig. 32 Ellipticity of the light propagating in TeO ₂ at 635 nm wavelength along a direction with an angle θ_B , tilted from the [001] axis to the [110] axis, and an angle θ_A , tilted from the [001] axis to the 110 axis.....	43
Fig. 33 Decomposition of incident light according to the two eigenmodes of ellipticity χ	44
Fig. 34 Relations of ψ , θ_A , θ_B , θ_C	45
Fig. 35 Intensities of elliptically polarized wave I_r at light wavelength 635nm in TeO ₂ for Ellipticity χ	46
Fig. 36 State of two polarization eigenmodes of TeO ₂ near the optic axis [001].....	47
Fig. 37 State of polarization of the two eigenmodes of TeO ₂ near the optic axis [001] and relations of polarization directions between incident light and diffracted one.....	48
Fig. 38 Incident and diffracted angles in the condition of anisotropic Bragg diffraction.....	50
Fig. 39 State of two polarization eigenmodes of TeO ₂ near the optic axis [001] and relations of polarization directions between incident lights and diffracted ones.	51
Fig. 40 Angular change θ_{diff} of polarization from the major axis of diffracted light to the one of incident light.....	52
Fig. 41 Measurement and calculated results of diffraction efficiency AOD: Model 4080-13, Gooch & Housego Inc. on the condition of $\theta_A = 9.5^\circ$, $\theta_B = 3.5^\circ$ and $\theta_C = 70^\circ$	53
Fig. 42 The measurement and calculated results of diffraction efficiency at $\theta_C = 70$ deg.	54
Fig. 43 The measurement result of diffraction efficiency between 74~86 MHz, RF signal frequencies at 0.25W, each at $\theta_C = 70^\circ$, $\theta_A = 9.5^\circ$ and $\theta_B = 3.5^\circ$ and the fitted curve.	55
Fig. 44 Processes of adjustment on the 2-dimensional deflector with regards to a polarization angle of incident light for the 1 st AOD, and an angle of the 2 nd AOD for diffracted light from the 1 st AOD.....	57
Fig. 45 The measurement result of diffraction efficiency of 2-dimensional deflector at $\theta_A = 9.5^\circ$, $\theta_B = 3.5^\circ$ and $\theta_C = 70^\circ$ for each AODs and the fitted curve.....	58
Fig. 46 Picture of 2-dimensional AOD unit with two on-axis AOD, two lenses, a prism and an aperture.....	60

Fig. 47 Recording speed of major imagesetters in 1990s.	65
Fig. 48 Schematic of Laser Scanning Optical System.....	66
Fig. 49 Definitions of parameters regarding focusing a coherent light.....	70
Fig. 50 Schematic of the optics around AOM and the definition of d_{AOM} , f_{AOM} , and D_{lex} (beam distance) and d_{ex} (beam diameter) at the recording position.	71
Fig. 51 Major components of the optics system and the three multi-spot positions.	72
Fig. 52 Definition of $2w_0$ and r regarding two Gaussian beams.	74
Fig. 53 Calculated results of beat effect by two Doppler - shifted beams and the status of laser power at the $r/w_0= 0.4$	75
Fig. 54 Calculated results of beat effect by two Doppler - shifted beams and the status of laser power at the $r/w_0= 0.8$	76
Fig. 55 Interlace scanning by three beams.	76
Fig. 56 States on (a) beam profiles by non-interlace and (b) beam profiles by interlace.	77
Fig. 57 Definition of a beam diameter $2w_0$ and a distance r from a peak to a intersection point of an adjacent beam.....	77
Fig. 58 (a) calculated beat effect by two Doppler-shifted lights, and (b) the measured result.	79
Fig. 59 Tone Curve of photosensitive material: FUJIFILM INTEGRA LL.	79
Fig. 60 Definition of “edge sharpness.”	81
Fig. 61 Edge sharpness of the films with different ΔL	82
Fig. 62 Change of diffraction efficiency by number of diffracted beams.	85
Fig. 63 Block diagram of correction system for diffractive light power deviation.	86
Fig. 64 Screening and Iimage position (density) shifts by the relative position between the image signal and the phase of beat wave.	87
Fig. 65 Superposition by white noise approximately ± 3 MHz on RF signal of 350 MHz.	87
Fig. 66 Schematic of (a) bow loci by $f \cdot \theta$ Lens and (b) S shaped deformation by resonant scanner.	88
Fig. 67 Measured and calculated bow after the correction.	89
Fig. 68 Diagram of Position Correction on Main Scanning.	90
Fig. 69 Measured data of cumulative error along the main scan direction.	90
Fig. 70 Schematic of Systems by Main Components.....	91
Fig. 71 Schematic of three fixed beams tilting by a spinner rotation.	96
Fig. 72 Loci of three fixed beams on an internal drum.	96

Fig. 73 Patented ideas using different wavelengths or different polarizations to separate two beams inputted on a rotation axis of a spindle mirror.	97
Fig. 74 Patented ideas that directions of plural beams are fixed inputted on a major axis of spindle mirror.	98
Fig. 75 Schematic of generating parallel beams by changing incident angles.	99
Fig. 76 Loci of controlled beams to be parallel on an internal drum.....	99
Fig. 77 Patented ideas that beams except for one inputted on a rotation axis are given angles two dimensionally synchronized with a spindle mirror rotation.	100
Fig. 78 Schematic of moving a beam to a proper position by changing incident angles.	101
Fig. 79 Schematic to explain beam rotation.	101
Fig. 80 Principle of generating parallel beams by changing incident angles.	102
Fig. 81 Multi-beam optics system for internal drum architecture.	106
Fig. 82 Generation of astigmatic distance Δa for compensating the one of optics including laser diodes and AOD.	107
Fig. 83 Compensation of wavelength deviation $\Delta\lambda$ using a prism by canceling the angle and make the same angle as one of λ	108
Fig. 84 Beam position detection mechanism to adjust the proper positions.	109
Fig. 85 Block diagram for AOD control to adjust diffracted beam positions and powers.	110
Fig. 86 Process of beam position coincidence for multi-beam optics	110
Fig. 87 Picture of multi-beam optics for internal drum architecture.	115
Fig. 88 Recording speed of major imagesetters & platesetters in 2000s.	117

Table 目次

Table. 1 Outline of “Capstan drum system”	5
Table. 2 Outline of “Internal drum system”	6
Table. 3 Outline of “External drum system”	7
Table. 4 Specification of multi-frequency AOM.....	32
Table. 5 Specification of AOD: Model 4080-13, Gooch & Housego Inc.....	49
Table. 6 Comparisons of the specifications shown by the manufacturer and the results obtained by the new adjustment of input polarization.....	56
Table. 7 Measured result of focusing properties of diffracted light.....	59
Table. 8 Specification of 2 Dimensional light deflection unit	59
Table. 9 Specification of Resonant Scanner.....	67
Table. 10 Specification of system parameters	69
Table. 11 Specification of an internal drum system	104
Table. 12 Measurement data of beam waist diameters on the drum for each resolution.....	111
Table. 13 Measured astigmatic distance generated by tilted the lens of beam converter at 2.2 deg	111
Table. 14 Measured beam waist diameters of the compensated direction with/without a compensation prism using a single mode laser diode with/without RF superimposition. Brackets mean relative ratios.....	112
Table. 15 Results of compensations for temperature and chromatic aberration in conditions of ambient temperature, $T=10-35^{\circ}\text{C}$ and wavelength, $\lambda=634-639\text{ nm}$	112
Table. 16 Standard deviations of measurement results on the beam position detector, $SD(x)$ as x-direction and $SD(y)$ as y-direction in case of adjustment into the center	113
Table. 17 Items of image defects caused by multi-beam and the criteria to eliminate visibility of the defects	114

第1章 序論

1-1 研究背景

レーザーの発明により、オプトエレクトロニクスの分野の研究開発が急速に発展し、光通信、光メモリー、光記録、計測、加工・表面処理等、応用される領域も広がってきた。また、レーザー光を制御する素子も多岐に渡って研究されてきた。そのひとつである音響光学デバイス(Acousto-Optic Device)も、1970年頃に、性能指数の大きい結晶 TeO_2 (二酸化テルル)、 PbMoO_4 (モリブデン酸鉛)などが現れ、当時主流であった電気光学デバイスから徐々に音響光学デバイスへと研究の対象が移っていった。

音響光学デバイスは、光学媒質中に伝播する超音波によって発生した周期的な屈折率分布を位相回折格子として、レーザー光を回折させる素子である。この弾性波による光回折現象は1930年代に確認され、光変調、光偏向、波長可変フィルターなどの機能素子としての基礎研究や応用研究が行われてきた。音響光学デバイスは、構造が簡単で消光比が高く、動作が安定し、数10 - 数100 MHzの光変調が可能である。

このような状況の中で、様々なアプリケーションに合わせて、音響光学デバイスの機能をさらに拡張する研究が行われてきた。変調、偏向、周波数シフター、波長可変フィルターなどの機能のみならず、Qスイッチ、モードロッカーなどの用途も開発され、また上記応用分野以外にも、医療、業務用プリンターなどの産業機器用途、航空宇宙・防衛、科学研究用途など多岐に渡り、それぞれに対して最適化されたデバイス設計がなされている。特に、本研究の対象となる印刷分野における業務用プリンター(出力機器)への応用では、音響光学デバイスによる光変調の高速化、広帯域化、高効率化などの実現により、新たな性能向上・付加価値の増大が望まれてきた。

次に、印刷分野の出力機器の研究開発の流れについて見ていく。

1970年代以降のデジタル化の流れは、印刷情報の入力、編集、出力の各分野に対し、作業効率の向上および印刷品質の向上をもたらし、現在も進化し続けている。

印刷分野のデジタル化は、半導体技術による電子デバイス、例えばマイクロコンピュータやイメージセンサー等の技術革新により、画像をdigitalizeし、大量の文字や画像データをコンピュータ上で編集するDTP(Desk Top Publishing)を生み出した。さらにレーザーの出力と波長に適應した感光材料である製版フィルムやダイレクト刷版(CTP: Computer to Plate)の研究開発が進み、レーザーによるダイレクトレコーディングが可能

な出力機器が誕生してきた。

これら出力機器に対する主な要求は、高生産性と高画質化である。1980～1990年代は、レーザーの高出力化・長寿命化，光学デバイスやその制御技術の進歩とともに，革新的なレーザー走査光学技術が開発され，出力機器の性能も飛躍的な進化を遂げていった [1]～[6]。

さらに，中間消耗材(製版，刷版)をなくす方式として，印刷用紙に直接記録する電子写真方式やインクジェット方式によるデジタル印刷機の研究開発が進んでいる。しかしながら，これらのデジタル印刷機においては，印刷物のコストや対応可能な紙種の制約の課題などがあるため，多くの場合，製版フィルムもしくはダイレクト刷版を使用して，従来のオフセット印刷機で印刷するのが，現在でも一般的な印刷工程になっている。従って，今尚，製版フィルム出力機器およびダイレクト刷版出力機器の高性能化が望まれている。

Fig.1 に，1970年代頃までの印刷工程を縦軸に，デジタル化の流れによる工程の統合化の様子を横軸に，簡潔に模式化した図を示す。

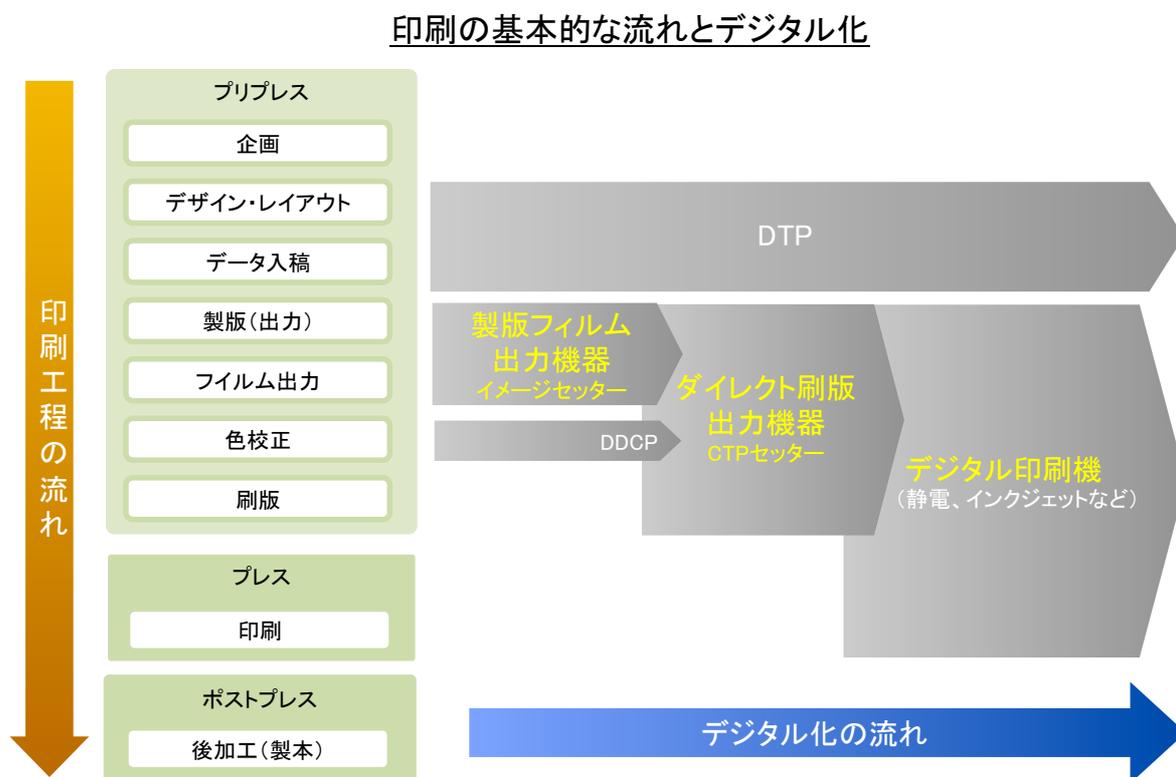


Fig. 1 Trends of digitalization along with basic processes of industrial printing.

次に、製版フィルム出力機器およびダイレクト刷版出力機器について概説する。

製版フィルム出力機器およびダイレクト刷版出力機器は、多様な記録方式が存在していたが、現在では以下の3種類の記録方式が主流である。

- 1. 平面走査型レーザー記録方式 (キャプスタンドラム方式)
- 2. 円筒内面走査型レーザー記録方式 (インナードラム方式)
- 3. 円筒外面走査型レーザー記録方式 (アウトドラム方式)

それぞれの記録方式には利点および欠点がある。各方式の説明および長所・短所を Table.1～3 に簡潔に示す。

刷版(CTP)には、その感光原理からフotonモードの銀塩系とフォトポリマー系、およびヒートモードのサーマル系の3種類が存在する。銀塩系やフォトポリマー系材料は経時安定性等から可視光の波長領域に感度を持たせており、一般的に赤色波長の He-Ne レーザー(632.8 nm)や半導体レーザー(635～650 nm)が使用される。一方、サーマルタイプの感光材料は近赤外(NIR)の波長域で設計されており、光を吸収する色素の発熱による樹脂等の高次構造転位を利用しているため、感度が極めて低い。従って高出力半導体レーザーを数 10 ～ 数 100 個並べる方式か、超高出力半導体レーザーと複数画素形成用 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイス等を用いて、記録速度を上げる方法等が採用されている。これらのマルチ横モード高出力半導体レーザーの採用により、サーマル系の感材に対しては光源と感光材料の距離を極力短くできる円筒外面走査型レーザー記録方式が適しており、また銀塩系、フォトポリマー系の感材に対しては平面走査型レーザー記録方式および円筒内面走査型レーザー記録方式が使用されるという棲み分けが形成されている。

さらに、円筒内面走査方式と平面走査方式の棲み分けについて説明する。円筒内面走査方式は、B1 サイズ記録用には直径 600mm 超のドラム内面を精度よく加工しなければいけないため、装置自体が大型化しかつ高価になる課題がある。一方、感光材料への集光特性は焦点距離が比較的短くて済むため、赤色波長レーザーで 10 μ m 台のビームスポット径を得ることが可能であることから高画質化が容易で、高精細印刷などの高画質対応機という位置付けを確立した。他方、平面走査方式は長焦点になるためビームスポット径が 20 ～ 30 μ m 台となり高精細印刷が困難であること、また記録サイズ(走査幅)の制限等の欠点があるが、装置自体は小型化が可能で安価であるため、エントリー機としての位置付けが定着し普及した。

また、平面走査型レーザー記録方式および円筒内面走査型レーザー記録方式には、生産性(高速記録)の観点において、いくつかの根元的な課題があった。平面走査型レーザー記録方式においては、主走査を担うポリゴンミラーモーター等の高速回転と光変調の高速化等

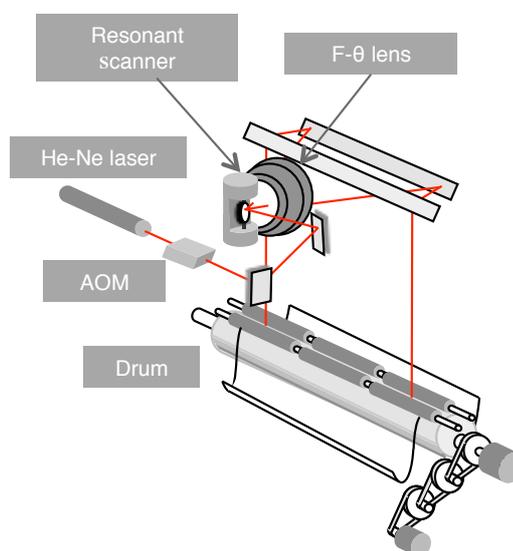
が主なボトルネックになる。ポリゴンミラーはミラー面数の増加に伴い、ミラー自体が大型化し、回転数を上げることが困難になる。レゾナントスキャナーの場合は、共振周波数の増加に伴いミラーの動歪が増し、ビームスポットのプロファイルが崩れ、画質の劣化をもたらす。また、円筒内面走査型レーザー記録方式においては、主走査を担う1面鏡のスピンドルミラーは、50,000rpm以上の回転数になると、ミラーサイズを小型化してもミラー一面の動歪によるビームスポット形状の歪み、風損とそれに伴う騒音が無視できなくなる。このように、両記録方式において、高速化の手段が主走査用デバイスの性能向上のみに依存しており、高速化とともに高画質化の面においても、技術的限界が明らかになってきていた。

上記技術課題を解決する手段として、1本のレーザー光での記録(シングルライン記録)ではなく、複数のレーザー光での記録(マルチライン記録)方式の研究開発が注目され、その実現・実用化のための機能デバイスや新たな制御方式の研究が強く望まれてきた。

Table. 1 Outline of “Capstan drum system”

平面走査型レーザー記録方式(キャプスタンドラム方式)

方式説明



キャプスタンドラムに感光材料を載せる
 レーザー光は円筒ドラム上を走査する
 f-θレンズを用い、ガルバノスキャナー、ポリゴンモーター、レゾナント
 スキャナー等でレーザー光を走査する（メインスキャン）
 キャプスタンドラムを定速回転させる（サブスキャン）

長所

装置の小型化，軽量化が可能
 他方式と比較して，安価
 銀塩感材，フォトポリマー感材に適している

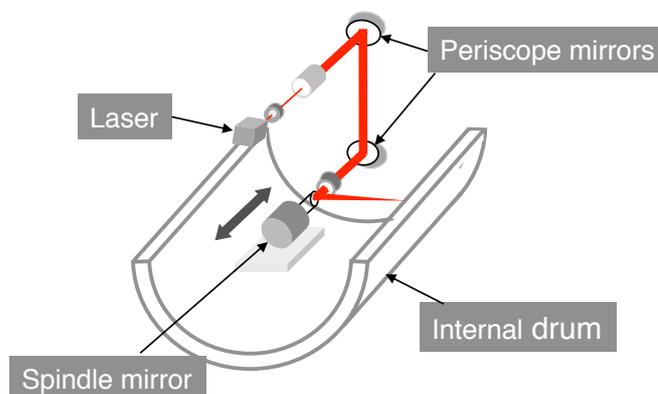
短所

光学系の歪曲収差等により，走査幅(記録幅)に限界がある
 記録ビームスポット径が比較的大きくなるため，記録ドットのエッジシャ
 ープネス(画像のキレ)がよくない．従って，画質が他方式と比較して劣る
 ドラムは高い加工精度が必要
 f-θレンズの製造が難しい
 見当精度(レジストレーション)が他方式と比較して劣る
 フィルムのハンドリングに適し，CTPには不向き

Table. 2 Outline of “Internal drum system”

円筒内面走査型レーザー記録方式(インナードラム方式)

方式説明



ドラム内面に感光材料を装填する
 ドラム内面をスピンドルモーターミラー(1面鏡)でレーザー光を走査する
 (メインスキャン)
 スピンドルモーターを定速移動させる (サブスキャン)

長所

見当精度(レジストレーション)がよい
 記録ビームスポット径を比較的小さくでき、画質がよい
 記録サイズ(感光材料サイズ)を容易に大きくできる
 システム構成が比較的シンプルである
 フィルムおよび CTP のハンドリングが容易
 銀塩感材、フォトポリマー感材に適している

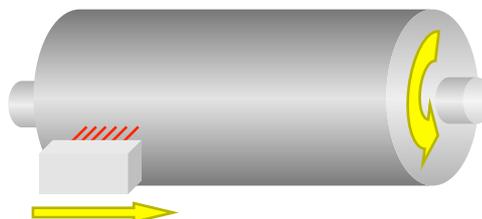
短所

走査効率が悪い(通常、50%以下)
 スピンドルモーターの高速回転によるモーター寿命とミラー歪み量増大による画像劣化がある
 レーザー光の変調速度が高い
 ドラムは高い加工精度が必要
 システム価格は高め(ドラムの高精度加工が必要)

Table. 3 Outline of “External drum system”

円筒外面走査型レーザー記録方式(アウトードラム方式)

方式説明



ドラムに感光材料を巻き付ける
 ドラム上を複数のレーザー光で同時走査する (メインスキャン)
 レーザー光学系を定速で移動させる (サブスキャン)
 レーザースポットを複数並べ、縮小光学系で結像する

長所

見当精度(レジストレーション)がよい
 記録ビームスポット径が小さくでき、画質がよい
 記録サイズ(感光材料サイズ)が比較的大きくできる
 フィルムおよび CTP のハンドリングも容易
 サーマル感材に適している

短所

ドラムは高い加工精度が必要
 感光材料をドラムに密着保持させながら、ドラムを高速回転させるのが困難
 高速回転時の感光材料のドラム上保持に工夫が必要
 複数の半導体レーザーの高い位置合わせ精度が必要、もしくはマルチスポット形成の機能デバイスと高出力半導体レーザーが必要
 他方式と比較して高価

1-2 研究目的

前節で解説した背景より，本研究ではまず音響光学デバイスの新たな性能改善・機能拡張のために，二つの研究を行う。

第一に，高速変調が可能である等方 Bragg 回折を利用し，高周波(RF)信号の同時入力を可能とする広帯域特性を持つ音響光学デバイスを研究する。従来は，広帯域化の主な目的は，レーザー光の偏向量拡大であった。しかし，本研究では“複数の信号を同時に入力する”目的で広帯域を必要とするマルチ周波数 AOM(Multi-frequency acousto-optic modulator)を研究対象とし，その原理解析と技術課題の検討を行う。これは，高速変調を必要とするプリンターの分野などで，マルチライン化して記録する用途に適している。広帯域化の方法として，複数のトランスデューサ(transducer)で構成する phased array 方式を採用して，実システムを想定した設計・検証を行う。

第二に，異方 Bragg 回折における on-axis タイプの音響光学デバイスの基礎的な解析を行い，高回折効率を得るために従来必要とされてきた楕円偏光入射ではなく，直線偏光入射を可能とする理論解析とその調整方法を示す。さらに，そのデバイスを2個使用し，2次元光偏向器(2-dementional light deflector)を構成し検証する。これはレーザー光を旋回偏向させるのに適している。

次に，以上の音響光学デバイスを用いて，製版フィルム出力機器およびダイレクト刷版出力機器の記録速度の向上と画像品質の向上のために，マルチライン記録を研究する。

平面走査型レーザー記録方式 (キャプスタンドラム方式)に対して，上記マルチ周波数 AOM を採用し，マルチライン記録システムの実証研究を行う。

円筒内面走査型レーザー記録方式 (インナードラム方式)に対しては，on-axis タイプの異方 Bragg 回折を利用した2次元光偏向器を用い，マルチライン記録システムの実証研究を行う。

本論文では，音響光学デバイスに関わる諸課題の研究のみならず，後学のためにも，代表的な2つの記録方式におけるシステム研究・設計の要点も概説することとする。

本研究対象が音響光学デバイスおよび印刷分野の出力方式の各々の技術体系の中での位置付けがわかるように，音響光学デバイスについては Fig.2 に示し，記録方式については Fig.3 に示した。

a). 音響光学デバイスの研究

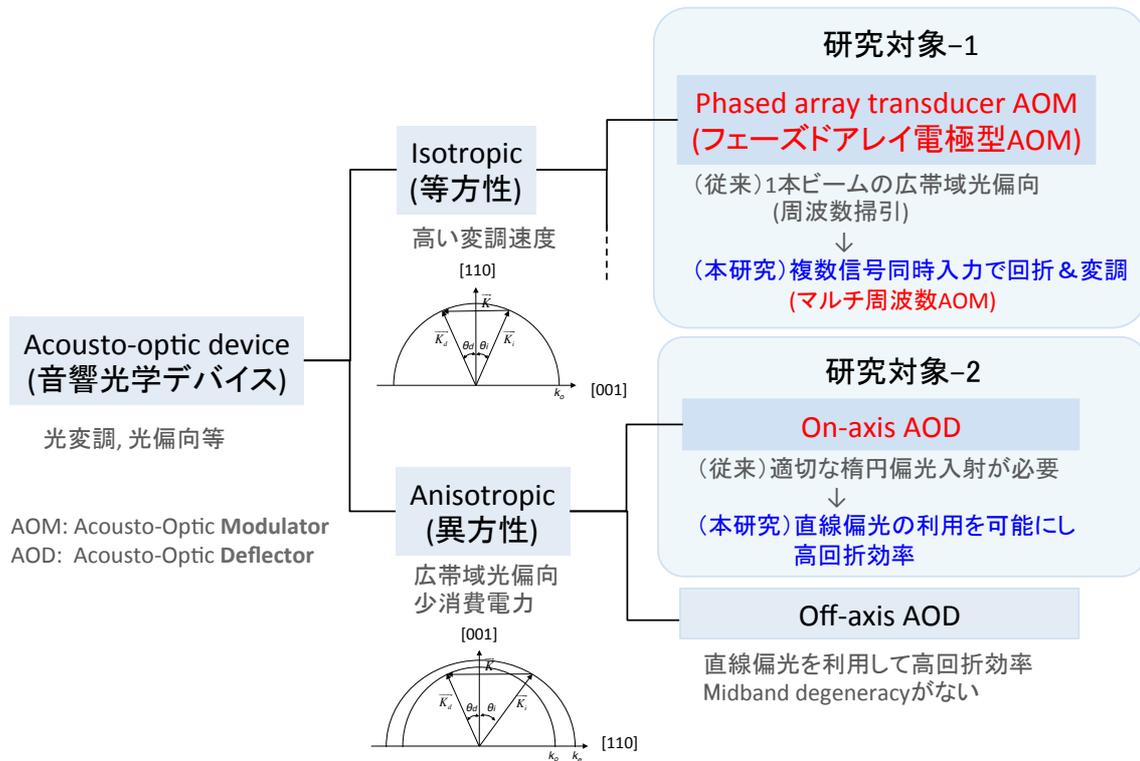


Fig. 2 Objectives of research in acousto-optic devices.

b). レーザー記録装置のマルチライン化研究

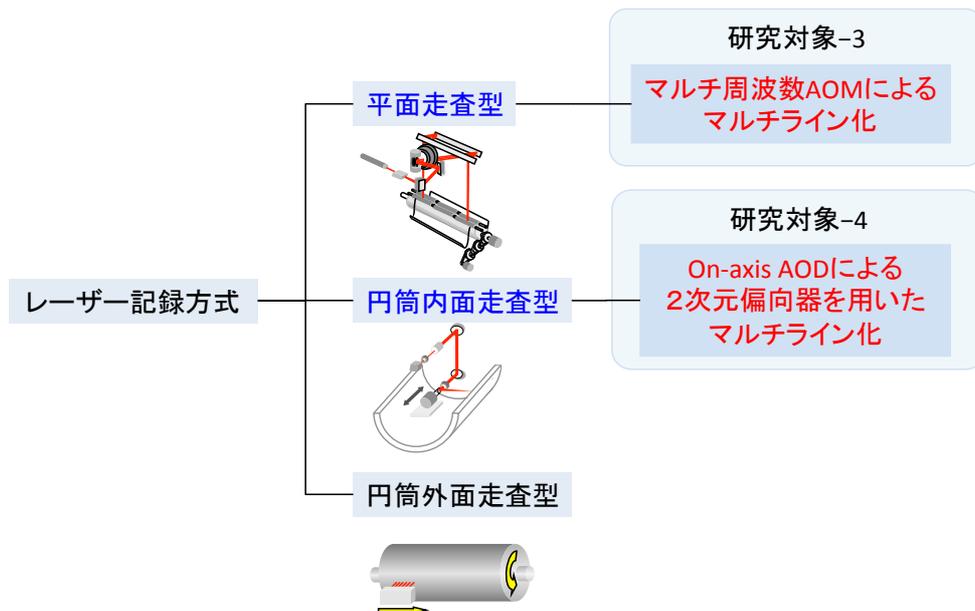


Fig. 3 Objectives of research in laser scanning recording systems.

1-3 本論文の構成

本章では、本研究の背景と研究目的について示し、音響光学デバイス分野の中での位置付け、および印刷分野の出力機におけるマルチライン化の背景と位置付けがわかるように説明した。

第2章では、音響光学デバイスの研究を報告する。まず、音響光学デバイスの理論を示し、マルチ周波数 AOM の原理解析、設計、検証結果(Fig.2 中、研究対象-1)を述べ、次に on-axis AOD の原理解析、検証結果と、これを用いた2次元光偏向器の設計、検証結果(Fig.2 中、研究対象-2)を解説する。

第3章では、マルチ周波数 AOM を用いた平面走査型レーザー記録方式でのマルチライン化技術の研究と設計・検証(Fig.3 中、研究対象-3)について報告する。マルチ周波数 AOM を採用した時の光学系設計の概要を示し、特にヘテロダイン干渉による影響についての検討を示す。

第4章では、on-axis タイプ異方 Bragg 回折を利用した2次元光偏向器を搭載した円筒内面走査型レーザー記録方式でのマルチライン化技術の設計と検証(Fig.3 中、研究対象-4)について述べる。2次元光偏向器でのマルチライン化の技術、ビーム位置補正などの必要技術について説明する。

第5章では、本研究の成果を総括し、結論を述べる。

第2章 音響光学デバイスの研究

2-1 緒言

音響光学デバイスは、光学材料中を伝搬する超音波によって形成された周期的な屈折率分布を回折格子として、入射された光を回折する素子である。1922年に Brillouin が超音波による光の回折効果を予言し[7]、1932年に Debye と Sears が光回折を確認[8]、同年に Lucas と Biquard も独自に回折現象を確認し解析した[9]。1935-36年に Raman と Nath は理論も含め高次の回折条件を示し [10]、1965年には Klein と Cook がより詳細な高次の回折現象の解析を行った[11]。1960年代はレーザーの研究開発の進展とともに多くの基礎研究と応用研究が進められた。さらに、音響光学材料として優れた特性を持つ二酸化テルル(TeO_2)が Arlt によって生成され[12]、超音波の小さい減衰特性、高い光透過性、優れた光弾性および性能指数などから、飛躍的に応用範囲が広がった[13], [14], [15]。これまでは等方性結晶に対する研究であったが、1967年に Dixon は異方性結晶における回折理論の研究を発表した[16]。この研究により、異方性結晶における音響光学効果の解析および研究が活発になり、回折効率の高さから on-axis タイプである異方 Bragg 回折の研究・応用が主流となってきた。しかし、最適な楕円偏光入射が必要であることと、低周波数域に現れる回折効率の落ち込み (midband degeneracy)現象のため[17]、これらを回避できる off-axis タイプでの異方 Bragg 回折に研究がシフトしていき、広帯域化などの優れた特性を実現した。また、on-axis タイプの異方 Bragg 回折において必要な楕円偏光入射は、実用化に際しては致命的な課題となるため、on-axis タイプは研究や製品化の対象にならなくなった。

以上の研究をもとに、以下の二つの音響光学デバイスの研究を行った。

はじめに、プリンターなどの応用で要求される高い変調速度を確保するため、超音波速度が速い縦波モードの等方 Bragg 回折を用い、さらに広帯域化を実現するため、phased array 電極によるマルチ周波数 AOM の研究を行った。

次に、on-axis タイプの音響光学偏向器の研究を行った。Off-axis タイプでは、電極を形成する面に、結晶軸に対して数°の角度を与える(off-axis)。これにより、横波モードである超音波は電極面に対し数 10°の角度を持って進行する。この walk-off と呼ばれる現象により、大きな結晶が必要になる。これは、経済性および実用設計における自由度の観点からは欠点となる。そこで、off-axis タイプに対して結晶サイズが数分の 1 でよい on-axis タイプを用い、課題であった楕円偏光入射の条件をなくし、直線偏光入射を可能にするための研究を行った。

2-2 音響光学デバイスの理論

等方 Bragg 回折を利用する音響光学変調デバイス AOM の基本原理を説明する。AOM の基本構造を Fig.4 に示す。二酸化テルル(TeO_2)のような弾性媒体に piezotransducer (transducer) を貼り付け、高周波(RF)信号を印加すると、媒体内に粗密波が生じ、これが回折格子と同様な効果を発揮し、入射光は回折する。その際、入射角をブラッグ角(Bragg angle) θ_B に調整すると、直進する 0 次光(0th order light)に対し、 $2\theta_B$ の角度で 1 次回折光(1st order light)、さらに高次の回折光が現れる。

Bragg 角 θ_B は、以下のように表される。

$$\sin\theta_B = \frac{\lambda \cdot f_{RF}}{2v} = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (2.1)$$

ここで、 λ はレーザー光の発振波長、 f_{RF} は超音波の RF 周波数、 v は結晶内における超音波の進行速度を表す。また、超音波の波長は $\Lambda = v / f_{RF}$ と表される。式(2.1)の導出については後述する。

Bragg 角 θ_B は光の波長に比例するため、波長の不安定性が回折角度の変動要因になる。半導体レーザーのように、モードホッピング、発振波長の温度ドリフトが比較的大きなレーザーを使用する場合は、発振波長の安定化が必要になる。

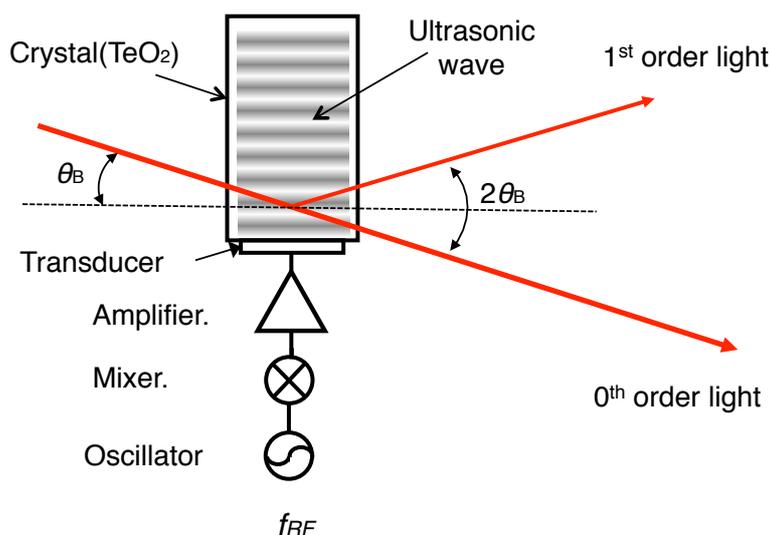


Fig. 4 Schematic of acousto-optic modulator.

結晶中を伝搬する光について解析する.

空間の電磁場は二つの電場ベクトル \mathbf{E} と磁場ベクトル \mathbf{H} で表現することができる. これらは以下の式で与えられる \mathbf{D} と \mathbf{B} はそれぞれ電束密度および磁束密度である.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.2a)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (2.2b)$$

ここで, ε と μ はそれぞれ 2 階の誘電率および透磁率テンソルで, ε_0 と μ_0 は真空中の誘電率および透磁率である. \mathbf{P} と \mathbf{M} は電気分極および磁気分極を表し, 材料が等方性のときは, スカラー量になる.

マックスウェル方程式は, 電場と地場の時間的および空間的な変化を表す方程式で,

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.3a)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (2.3b)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3c)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2.3d)$$

である. 式(2.3b)はクーロンの法則, 式(2.3c)はファラデーの電磁誘導の法則, 式(2.3d)はアンペールの法則を表す. 透明な媒体が強磁場ではなく, また自由電荷や電流を持たない($J=0$, $\rho=0$)とき, マックスウェル方程式は, 以下のようなになる.

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.4a)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0 \quad (2.4b)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.4c)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4d)$$

ここで, 平面波の角周波数を ω , 波動ベクトルを \mathbf{k} とすると, 電場および磁場は以下のように書ける.

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{D}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (2.5a)$$

$$\mathbf{E}(r, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (2.5b)$$

$$\mathbf{B}(r, t) = \mathbf{B}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (2.5c)$$

$$\mathbf{H}(r, t) = \mathbf{H}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (2.5d)$$

ここで、 $\mathbf{D}_0, \mathbf{E}_0, \mathbf{B}_0$ および \mathbf{H}_0 は定数ベクトルである。このとき、 $\partial \mathbf{D} / \partial t = i\omega \mathbf{D}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} = i\omega \mathbf{D}$ 、 $\text{div} \mathbf{D} = i\mathbf{k} \cdot \mathbf{D}$ となり、 $\mathbf{E}, \mathbf{B}, \mathbf{H}$ も同様に表せることから、マックスウェル方程式は以下のように書き換えられる。

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.6a)$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.6b)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad (2.6c)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.6d)$$

ここで、 ε_0 は真空の誘電率、 μ_0 は真空の透磁率、 ε は比誘電率、 μ は比透磁率である。

次に、異方性媒質中の光の伝搬を考える。

波動ベクトル \mathbf{k} は、屈折率ベクトル \mathbf{n} で表すと、

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \mathbf{n} = k_0 \mathbf{n} = k_0 \mathbf{n} \mathbf{e} \quad (2.7)$$

c は真空中の光速、 \mathbf{e} は波動ベクトル方向の単位ベクトルで、 $\mathbf{n} = \mathbf{n} \mathbf{e}$ である。

異方性のある 1 軸性結晶の主誘電率 ε_j は方向依存性のある 2 階の実対称テンソルであり、主屈折率 n_j とは $\varepsilon_j = n_j^2$ の関係にある。また、2つの主屈折率が一致するので、以下のようになる。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \equiv n_o^2, \quad \varepsilon_3 \equiv n_e^2 \quad (2.8)$$

式(2.7)より、式(2.6c)および(2.6d) は以下のように書き換えられる。

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} - c \mu_0 \mu \mathbf{H} = 0 \quad (2.9a)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} + c \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (2.9b)$$

ここで、 $c^2 = 1/\epsilon_0\mu_0$ であり、多くの光学材料の場合 $\mu \approx 1$ であるので、式(2.9a)と(2.9b)から磁場 \mathbf{H} を消去すると、

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) + \epsilon \mathbf{E} = 0 \quad (2.10)$$

ベクトル公式 $\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C}$ を用いて、以下の式が導かれる。

$$\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) - n^2 \mathbf{E} + \epsilon \mathbf{E} = 0 \quad (2.11)$$

この方程式は斉次方程式であるので、解を持つために係数行列式は0になる。

$$\begin{vmatrix} \epsilon_1 - n_2^2 - n_3^2 & n_1 n_2 & n_1 n_3 \\ n_1 n_2 & \epsilon_2 - n_1^2 - n_3^2 & n_2 n_3 \\ n_1 n_3 & n_2 n_3 & \epsilon_3 - n_1^2 - n_2^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.12)$$

行列を展開して整理し、 $n^2 = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2$ の関係を利用して、以下に示すフレネルの方程式を得ることができる。

$$\begin{aligned} n^2(\epsilon_1 n_1^2 + \epsilon_2 n_2^2 + \epsilon_3 n_3^2) - \epsilon_1(\epsilon_2 + \epsilon_3)n_1^2 - \epsilon_2(\epsilon_3 + \epsilon_1)n_2^2 - \epsilon_3(\epsilon_1 + \epsilon_2)n_3^2 \\ + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

フレネルの方程式は \mathbf{k} ベクトルまたは屈折率の3次元の楕円体表面を表している。

1軸の異方性結晶の場合、式(2.13)に式(2.8)を代入して、フレネルの方程式は以下のように表すことができる[18].

$$(n^2 - n_o^2)[n_o^2(n_1^2 + n_2^2) + n_e^2 n_3^2 - n_o^2 n_e^2] = 0 \quad (2.14)$$

従って、この最初の項は、

$$n^2 = n_o^2 \quad (2.15)$$

となり、球体を表し、光の伝搬の方向に依存しない常光(ordinary light)である。また、2番目の項は、

$$\frac{n_1^2 + n_2^2}{n_e^2} + \frac{n_3^2}{n_o^2} = 1 \quad (2.16)$$

となり、楕円体を表し、異常光(extraordinary light)を表している。 $n_e > n_o$ の時、正(positive)の1軸性結晶と呼び、 $n_e < n_o$ のときは負(negative)の1軸性結晶と呼ぶ。

Fig.5 に正の1軸性結晶の屈折率楕円体を示す。これより、以下の関係式が得られる。

$$\begin{cases} n_1^2 + n_2^2 = n_e^2 \cdot \sin^2 \theta \\ n_3^2 = n_e^2 \cdot \cos^2 \theta \end{cases} \quad (2.17)$$

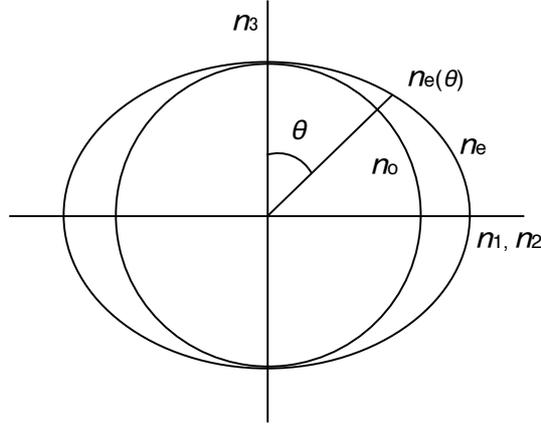


Fig. 5 Index surface of positive uniaxial crystal ($n_e > n_o$).

光学活性(optical activity), 特に旋光性(optical rotary power)について検討する。
直線偏光を結晶内に入射すると、複屈折により、結晶の中で二つの円偏光、つまり右円偏光と左円偏光に分かれ、それぞれは異なる屈折率を持つため、この二つの左右円偏光波の間に位相速度差が生じる。その結果、二つの円偏光の合成である直線偏光の振動面は回転する。これは旋光能(rotary power) ρ として、以下のように定義される[19].

$$\rho = \frac{\pi}{\lambda} (n_r - n_l) \quad (2.18)$$

n_r は右旋回の偏光成分に対する屈折率、 n_l は左旋回の偏光成分に対する屈折率を表す。ここで、 δ の値を次のように定義する。

$$\delta = \frac{n_r - n_l}{2n_o} \quad (2.19)$$

$n_r = n_1(0^\circ) = n_o(1 + \delta)$, $n_l = n_2(0^\circ) = n_o(1 - \delta)$ であることから、式(2.16)は以下のようになる。

$$\frac{n_1^2(\theta) \cdot \cos^2 \theta}{n_o^2 \cdot (1 + \delta)^2} + \frac{n_1^2(\theta) \cdot \sin^2 \theta}{n_e^2} = 1 \quad (2.20)$$

$$\frac{n_2^2(\theta) \cdot \cos^2 \theta}{n_o^2 \cdot (1 - \delta)^2} + \frac{n_2^2(\theta) \cdot \sin^2 \theta}{n_e^2} = 1 \quad (2.21)$$

これにより, Fig.6 が得られる.

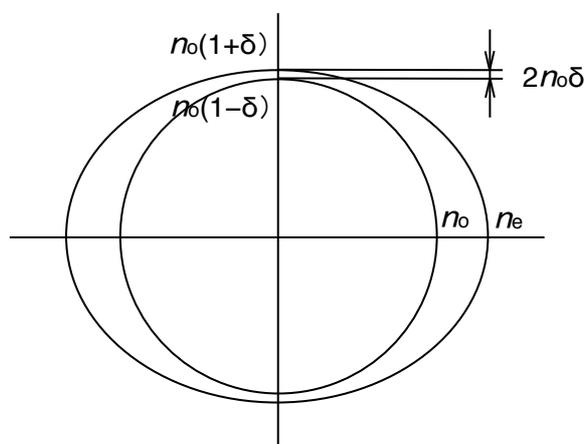


Fig. 6 Index surface of optically active crystals.

式(2.20)および(2.21)から $n_1^2(\theta)$ と $n_2^2(\theta)$ を求めると, 以下のようなになる.

$$n_1^2(\theta) = n_o^2 \left(1 + 2\delta + \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2} \cdot \sin^2\theta \right) \quad (2.22)$$

$$n_2^2(\theta) = n_o^2(1 - 2\delta \cdot \cos^2\theta) \quad (2.23)$$

ここで, 異方性媒質である 1 軸性結晶の複屈折(birefringence)について説明する.

3 次元結晶の場合は, ある 2 次元面内では等方性であるような異方性媒質が 1 軸性結晶である. 光学活性になりうる点群のうち, 二酸化テルル(TeO_2)結晶は正方晶系 D4-422 に属する 1 軸性結晶である. これら異方性媒質に光が入射されると, 結晶は電場の中に置かれるので, 結晶内の電子やイオンは分極し, 分極によって生じた電場は再び光に作用する. 異方性媒質中では, 方向によって原子の配列が異なるから, 偏光によって屈折率が異なる. 従って, 分極の方向性によって光は二つの偏光成分に分かれ, それぞれ異なる屈折率で伝搬し, 位相差を生じることから, 楕円偏光になる.

屈折率面を用いて, 複屈折を説明する. Fig.7 に示すように, 入射側および屈折側の屈折率面の断面を描く. C 点を中心に, それぞれ空気, 常光および異常光の屈折率の屈折率面を置く. 図中左上からの入射光線を, C 点を通り屈折側に延長し, 入射側である(結晶の)屈折率面との交点を I とする. 波動関数の位相の連続条件から波動ベクトルの境界面に平行な成分は連続になる. これから導かれるスネル(Snell)の法則に従い, 図中境界面の x 成分の量は入射側と屈折側で等しくなり, 保存されることになる. 正しくは xy 成分で考える必要があるが, こ

ここで、回折光の波数ベクトルは $K_d = 2\pi n_d/\lambda_0$ ，入射光の波数ベクトルは $K_i = 2\pi n_i/\lambda_0$ ，超音波の波数ベクトルは $K = 2\pi f/v$ ， λ_0 は真空中の光波長であるが，ベクトル K_d の λ は厳密にみるとドップラー偏移が発生しているが，極めて微小なのでここでは無視する． f は超音波のRF周波数， v は結晶内における超音波の進行度速度を表す．

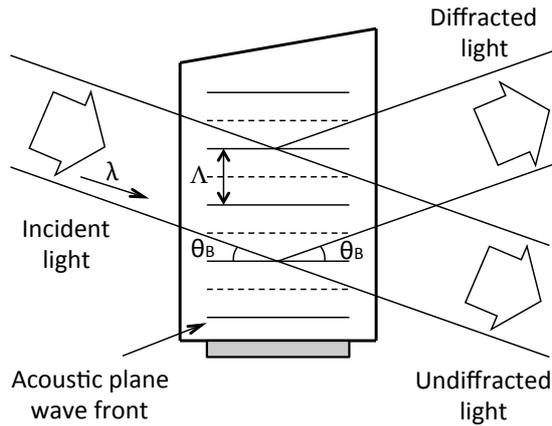


Fig. 8 Geometry of Bragg diffraction.

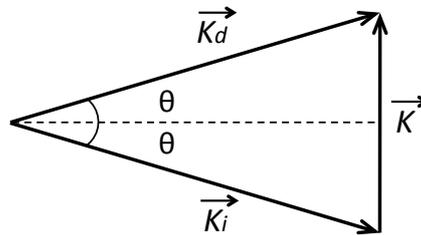


Fig. 9 Momentum triangle of optic and acoustic wave vectors.

等方性の相互作用を利用する縦モードでは，入射時と回折時の屈折率 n_i と n_d は同じになり， $n_d = n_i (= n)$ となる．入射光，回折光，超音波の運動量の保存則が満たされる条件，即ちそれらの波数ベクトルが構成する三角形が閉じる状態が理想的な回折条件であり，phase matching の条件である． $|\vec{K}_i| = |\vec{K}_d| = k$ ，および $|\vec{K}| = K$ とおくと，以下の関係式が導かれる．

$$2k \cdot \sin\theta = K \tag{2.25}$$

$\lambda = \lambda_0/n$ であるから，前述の Bragg 角 θ_B の式(2.1)が得られる．

$$\sin\theta_B = \frac{\lambda \cdot f}{2v} = \frac{\lambda}{2\Lambda}$$

また、Bragg 角 θ_B は数°程度の小さな値であるので、

$$\theta_B = \frac{\lambda \cdot f}{2v}$$

としても、実用上問題ない。

次に、結晶軸を座標にとった屈折率面を Fig.10 に示す。前述の通り、光が等方性材料の中の超音波によって回折されるとき、Bragg 回折条件では入射角と回折角は等しい。さらに、常光入射光は常光回折光になり、異常光入射光は異常光回折光になり、偏光面は変わらない。これはすべての方向に対して屈折率 n が等方的(isotropic)だからである。

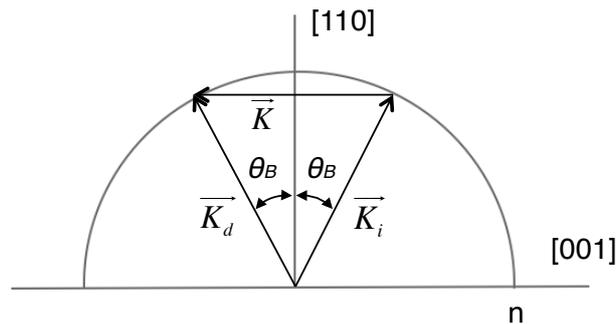


Fig. 10 Wave vector diagram of acousto-optic interaction, isotropic diffraction.

しかし異方 Bragg 回折を利用する場合、Fig.11 に示すように、相互作用により異常光入射光は常光回折光に、また常光入射光は異常光回折光になる条件でベクトル和が成立し、偏光面は 90° 変化する[17]。(厳密には、Fig.11 に示しているように、 $[001] - [110]$ 平面内に光を入射した時の説明になる。) 異方 Bragg 回折の時も同様に、式(2.24)が示す運動量保存の法則は成立する。

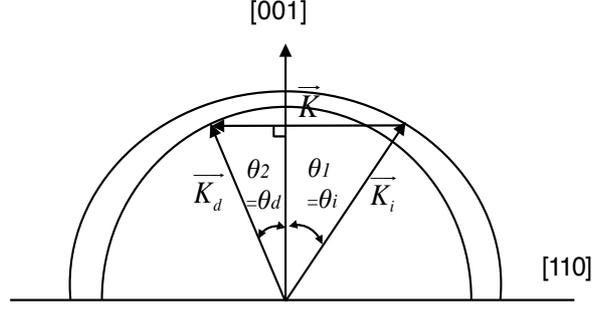


Fig. 11 Diagram representing the wave vectors of anisotropic Bragg diffraction.

Fig.11 内に示される三角形より,

$$K_d^2 = K^2 + K_i^2 - 2KK_i \sin \theta_i \quad (2.26a)$$

$$K_i^2 = K^2 + K_d^2 - 2KK_d \sin \theta_d \quad (2.26b)$$

の関係が導かれる。Dixon は、式(2.26)を式(2.1)に代入することにより、異方 Bragg 回折における入射角と出射角(回折角)の関係を以下の方程式で示した[16].

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{2n_1\Lambda} \left[1 + \frac{\Lambda^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2) \right] \quad (2.27a)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{\lambda}{2n_2\Lambda} \left[1 - \frac{\Lambda^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2) \right] \quad (2.27b)$$

さらに、Warner らは、この複屈折率と光学活性の影響を考慮した関係式(2.22)および(2.23)を式(2.27a)および(2.27b)に代入することで、以下の近似式を導いた[17]. このとき、 θ が小さく、 δ も 10^{-3} のオーダーで小さな値であることから、 $\delta \sin^2 \theta$, $\delta \sin^4 \theta$, δ^2 は無視できる.

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{2n_o\Lambda} \left[1 + \frac{4n_o^2\Lambda^2}{\lambda^2} \delta + \frac{\sin^2 \theta_1 \Lambda^2 n_o^2}{\lambda^2} \left(\frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2} \right) \right] \quad (2.28a)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{\lambda}{2n_o\Lambda} \left[1 - \frac{4n_o^2\Lambda^2}{\lambda^2} \delta - \frac{\sin^2 \theta_1 \Lambda^2 n_o^2}{\lambda^2} \left(\frac{n_e^2 - n_o^2}{n_o^2} \right) \right] \quad (2.28b)$$

左辺第1項は通常の Bragg 回折を表しており、第2項は光学活性による影響を示す値であり、第3項は光軸に対して角度を持って入射された光の複屈折の補正項である.

異方 Bragg 回折のときに生じる midband degeneracy について説明する. 式(2.28b)から

得られる θ_2 が 0° のとき, Fig.12 の右の三角形を構成するベクトルで phase matching の条件 $(\vec{K}_i + \vec{K} = \vec{K}_{d1})$ が成立するが, もうひとつ左の三角形を構成するベクトル $(\vec{K}_{d1} + \vec{K} = \vec{K}_{d2})$ も成立する. これにより, 一度回折した光が再回折する (\vec{K}_{d1} の光が \vec{K}_{d2} の光になる) ため, この周波数 $f(=v/\lambda)$ では回折効率が大きく落ち込む. これが midband degeneracy と呼ばれる現象である.

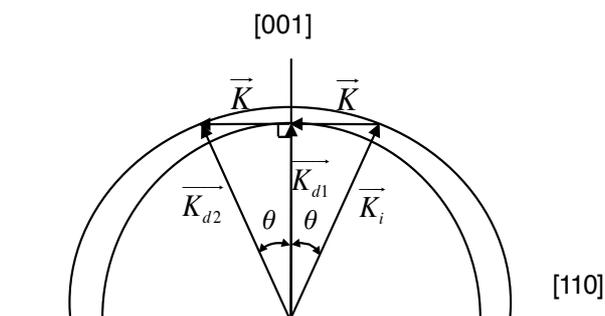


Fig. 12 Wave vector diagram to show midband degeneracy by re-diffraction of a diffracted light.

これを解決する方法として, 超音波の進行方向が, Fig.11 に示すような結晶の [110] 軸である on-axis ではなく, [110] 軸から傾けて進行させる off-axis タイプがある [22]. このベクトル図を Fig.13 に示す. Off-axis タイプは midband degeneracy が発生せず, 広い周波数帯域を活用できるため, 1970 年以降はこの研究が盛んに行われた. [110] 軸から傾けて超音波が伝搬するとき, 超音波はさらに大きく傾いて進行していく. この現象は walk-off として知られている. Off-axis タイプは本研究の対象とはしない.

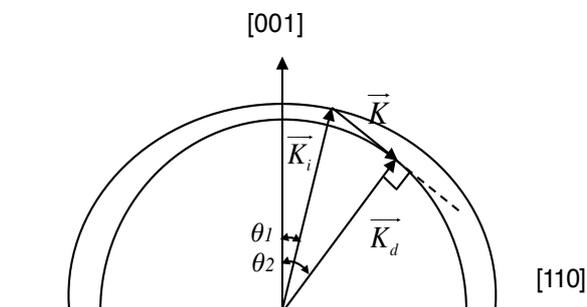


Fig. 13 Wave vector diagram of off-axis type of anisotropic Bragg diffraction.

次の重要な検討課題は偏光の解析であるが, これは 3-3-1 節で検討することとする.

最後に、変調速度について考察する。

1次回折光の方向に注目すると、高周波を入力し回折光が到達したときが ON 状態、高周波の入力がなく回折光がない状態が OFF 状態とみることができる。つまり、高周波入力 ON/OFF が 1 次回折光の有/無と一致する。回折は高周波で生成した粗密波(超音波)がレーザー光を横切り通過し終わった時に完了する。つまり、レーザー光の集光スポット径の大きさと疎密波の速度で、回折完了までの時間が決まる。そこで高速変調を行いたい場合、粗密波の通過時間を短縮させるため、集光スポット径が小さくなるように集光したレーザー光を AOM へ入射する。その時のレーザー光に対するパルス応答時間(立上り時間) t_r は、光量変化の 10 % から 90 % までの時間で定義する。レーザー光が TEM00 横モードである時、パルス応答時間(立上り時間) t_r は、以下の式で表される。

$$t_r = 0.65 \frac{d_0}{v} \quad (2.29)$$

ここで、 d_0 は AOM での集光スポット径、 v は音響光学結晶内における超音波の進行速度である。

2-3 マルチ周波数 AOM の研究

2-3-1 マルチ周波数 AOM の基本理論

マルチ周波数 AOM の原理を説明する前に、信号の合波について考察する。
AOM に 2 つの RF 信号を入力するケースについて、具体的に検討する[23]。非線形要素を含む高調波の基本式は以下のテイラーの級数で表される。

$$P(s) = a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3 + \dots \quad (2.30)$$

ここで、 $P(s)$ は伝達関数、 s は入力信号、 a_n は係数。二乗項が基本周波数の 2 次高調波生成を意味し、三乗項が 3 次高調波を表す。

入力信号が CW(連続波)の場合、信号 s は時間 t の関数として次のようになる。

$$s(t) = B \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (2.31)$$

ここで B は振幅、 f は基本周波数、 φ は初期位相を示す。2 信号の合波 s_m は、以下のように表すことができる。

$$s_m(t) = B_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t + \varphi_1) + B_2 \cdot \cos(2\pi \cdot f_2 \cdot t + \varphi_2) \quad (2.32)$$

式(2.30)の 2 乗項に当たる 2 次高調波(2nd harmonics)と 2 次相互変調成分(2nd order intermodulation, SOI)を求める。

$$\begin{aligned} s_m^2(t) &= \frac{B_1^2}{2} \cdot \cos(2\pi \cdot (2f_1) \cdot t + 2\varphi_1) + \frac{B_2^2}{2} \cdot \cos(2\pi \cdot (2f_2) \cdot t + 2\varphi_2) \\ &+ B_1 \cdot B_2 \cdot \cos(2\pi \cdot (f_1 - f_2) \cdot t + \varphi_1 - \varphi_2) \\ &+ B_1 \cdot B_2 \cdot \cos(2\pi \cdot (f_1 + f_2) \cdot t + \varphi_1 + \varphi_2) \\ &+ \frac{B_1^2}{2} + \frac{B_2^2}{2} \end{aligned} \quad (2.33)$$

この 1 項目 $2f_1$ 成分と 2 項目 $2f_2$ 成分は 2 次高調波を表し、2 次光(2nd order light)として現れる。また、2 次相互変調成分である 3 項目 $(f_1 - f_2)$ の周波数成分の光は 0 次光近傍に現れ、同じく 4 項目の $(f_1 + f_2)$ の周波数成分の光は 2 次回折光の位置に現れる。

次に、式(2.30)の 3 乗項に当たる 3 次高調波(3rd harmonics)と 3 次相互変調成分(3rd order intermodulation, TOI)を求める。

$$\begin{aligned}
s_m^3(t) = & \frac{3B_1}{4} \cdot (B_1^2 + 2B_2^2) \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t + \varphi_1) \\
& + \frac{3B_2}{4} \cdot (B_2^2 + 2B_1^2) \cos(2\pi \cdot f_2 \cdot t + \varphi_2) \\
& + \frac{3B_1^2 \cdot B_2}{4} \cdot \{ \cos(2\pi \cdot (2f_1 - f_2) \cdot t + 2\varphi_1 - \varphi_2) \\
& \quad + \cos(2\pi \cdot (2f_1 + f_2) \cdot t + 2\varphi_1 + \varphi_2) \} \\
& + \frac{3B_1 \cdot B_2^2}{4} \cdot \{ \cos(2\pi \cdot (2f_2 - f_1) \cdot t + 2\varphi_2 - \varphi_1) \\
& \quad + \cos(2\pi \cdot (2f_2 + f_1) \cdot t + 2\varphi_2 + \varphi_1) \} \\
& + \frac{B_1^3}{4} \cdot \cos(2\pi \cdot (3f_1) \cdot t + 3\varphi_1) \\
& + \frac{B_2^3}{4} \cdot \cos(2\pi \cdot (3f_2) \cdot t + 3\varphi_2)
\end{aligned} \tag{2.34}$$

上式において、最初の2項は1次回折光であり、基本周波数 f_1 および f_2 の振幅のオフセットを表し、3項目と4項目は3次相互変調成分を表し、 $(2f_1 - f_2)$ と $(2f_2 - f_1)$ の周波数成分の光は1次回折光近傍に現れ、 $(2f_1 + f_2)$ 、 $(2f_2 + f_1)$ 周波数成分の光は3次回折光近傍に現れる。また、5項目、6項目は3次回折光である。この3次相互変調成分の振幅(強度)に着目する。簡単にするため、2入力信号の振幅を $B_1 = B_2 = B$ とする。3次相互変調成分の強度は式(2.34)より、 $3B^3/4$ である。これをデシベル表示で見ると、 $3B$ となる。従って、1次回折光の振幅 B と比較すると、傾き3で3次相互変調成分が増加することになる。これは大きな回折効率を得るために、入力信号を増加させると、3次相互変調成分が3乗で増加することを意味する。その様子を Fig.14 に示す。これら高次の信号成分によっても回折光は発生する。3次相互変調成分の強度は AOM および駆動高周波電気回路の高調波歪の総合的な量によるため、解析的に見積もることは難しい。一般的には、任意の1次回折光 P_1 と3次相互変調成分 P_3 を測定し、Fig.14 を利用して、基本波と3次相互変調成分のラインが交差する強度である3次インターセプトポイント(IP_3)を求め、 $IP_3 = P_1 + \Delta P/2$ の関係式から所望の P_{in} での強度差 ΔP を得ることが可能である。

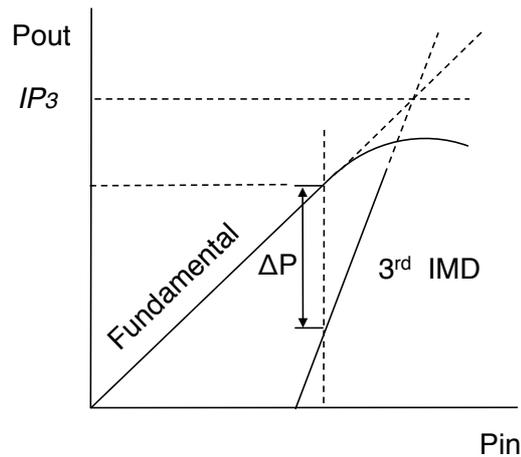


Fig. 14 Relation between fundamental signal and 3rd intermodulation distortion (IMD) in log-scale.

以上は、入力信号が2つの場合について見てきたが、入力信号が3つの場合も同様に高調波と相互変調成分について考察する。

3入力信号 f_1, f_2, f_3 の場合で、特に1次回折光付近を模式的に示すと、Fig.15のようになる。(注：正しくは、信号の周波数ごとに、 θ_B は異なるため、後述の Fig.18 のように入射光も角度を変えるべきであるが、Fig.15 は 2-3-2 節で説明するマルチ周波数 AOM での回折光の状態として表している。)

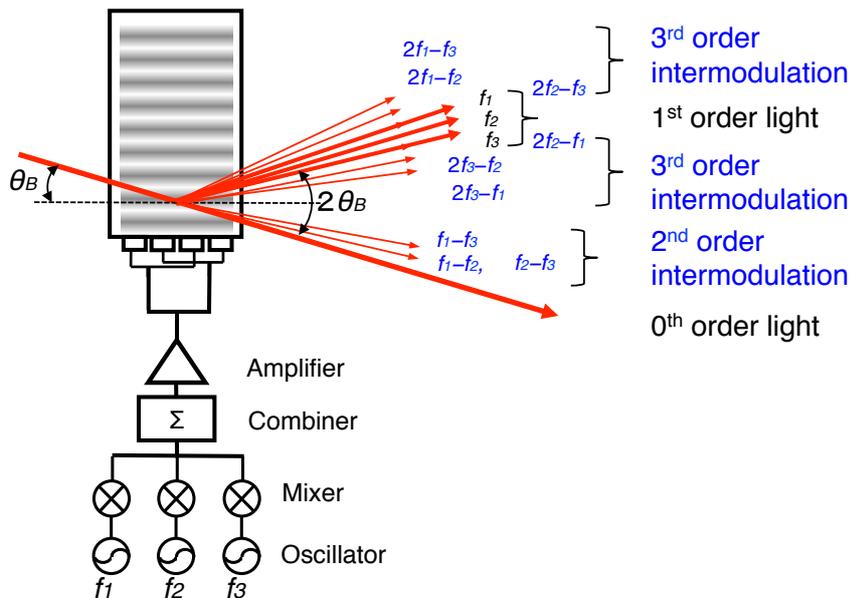


Fig. 15 Schematic of multi-frequency acousto-optic modulator.

Fig.15 より明らかなように、1次回折光を利用する際、前述の通り $(2f_1 - f_2)$ 、 $(2f_2 - f_1)$ 等の3次相互変調成分は1次回折光のごく近傍に発生し、アパーチャーなどで物理的に遮断することが困難になる。さらに、3入力信号 f_1 、 f_2 、 f_3 を等間隔に選択すると、 $(2f_2 - f_3)$ 、 $(2f_2 - f_1)$ はそれぞれ f_1 と f_3 の1次回折光と同じ光路上に現れる。従って、1次回折光と3次相互変調成分による回折光の強度差が十分確保できないと、バイアス光(不要光)として感光材料上に記録される。実際に発生し得る強度差(S/N比)は、電気回路や光学材料から生じる非線形性のみならず、レーザー光から生じる迷光など、複合的に検討する必要がある。これは、光学的には記録面(感光材料上)での消光比として扱うことができる。

また、3次相互変調成分の強度は前述の通り入力信号強度の3乗に比例するので、できる限り低い入力信号強度の領域で使用することが望ましい。第3章で示すシステムは、感光材料として高感度である銀塩フィルムを使用するので、低い入力信号強度での使用が可能となっている。

2-3-2 マルチ周波数 AOM の設計

入力信号数を増やすためには、全ての信号に対し、十分な回折効率を得られる変調帯域幅を確保する必要がある。ここでは、広帯域化を実現するためのマルチ周波数 AOM の設計を考察する。音響光学デバイスメーカーである Crystal Technology 社(以下 CT 社、現在 Gooch & Housego Inc.) と共同で、詳細設計・試作・評価を行った。これにより決定されたマルチ周波数 AOM の仕様をもとに、光学系およびシステムの基本仕様を決めることになる。

Fig.10 に示す[001]の結晶軸方向に超音波を伝搬させて等方性を利用する AOM において、異なる周波数の高周波信号を入力する場合を考察する。最適な回折条件は、式(2.1)が示すような Bragg 角を満たす物理的位置関係、つまり超音波の波面に対し Bragg 角 θ_B の角度でレーザー光を入射することである。しかしながら、複数の高周波信号の周波数を変えると、Bragg 角 θ_B は周波数に比例することから、Fig.16 のように入射光の入射角を固定した状態で、初めに周波数 f_1 に合わせて Bragg 角を調整すると、周波数 f_2 および f_3 の回折光は回折条件からはずれ、高い回折効率を得ることができない。Fig.17 に、Bragg 角 θ_B から外れて波数ベクトルが入射される様子を図示する。図中 \vec{K}_{d2} 、 \vec{K}_{d3} は、式(2.24)が示す運動量保存の法則を満たさない。

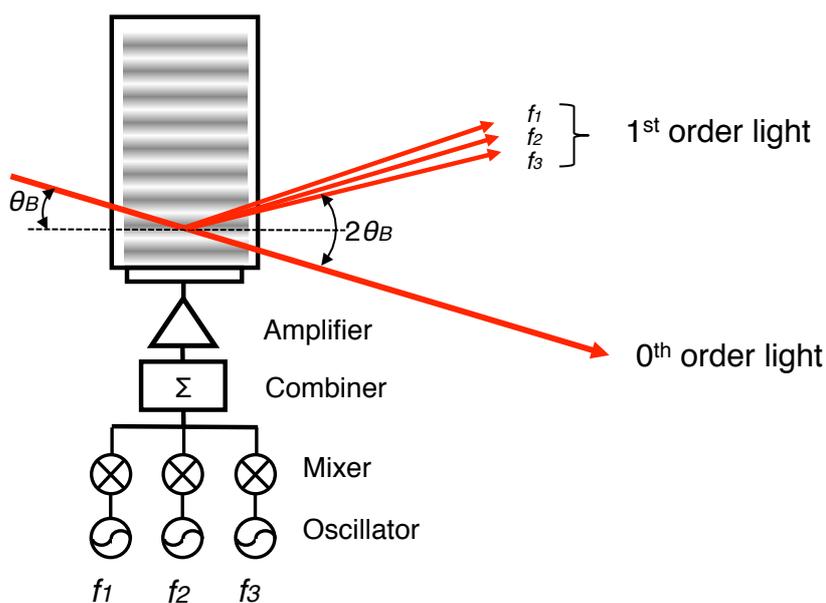


Fig. 16 Schematic of diffracted lights by three frequencies at fixed input light angle.

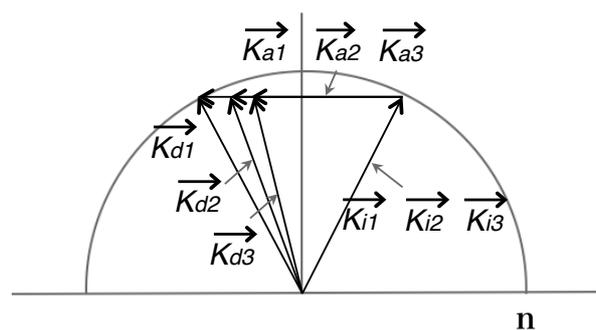


Fig. 17 Wave vector diagram of acousto-optic interaction, multi-wavevectors-1.

この課題を解決するには、Fig.18 のように周波数に応じて入射角を Bragg 角に合わせるように変化させる必要がある。このときの波数ベクトルの様子を示した図を Fig.19 に示す。これは式(2.24)に示す運動量保存の法則を満たしている。しかしながら、システムを構築していく上で、光の角度を変えて入射する光学システムを構築するのは、実際のシステム設計上複雑であり、実質的に困難である。角度を持たせて入射させる複数の光源を用意する方法も考えられるが、やはりマルチライン化を検討する上で構成が複雑であり、新規性および経済性などの価値も持たない。

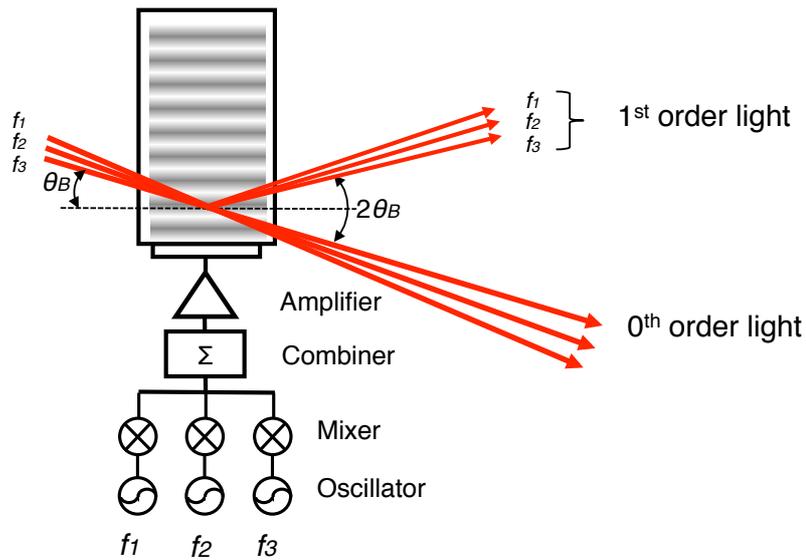


Fig. 18 Schematic of diffracted lights by three frequencies at adjusted input light angles.

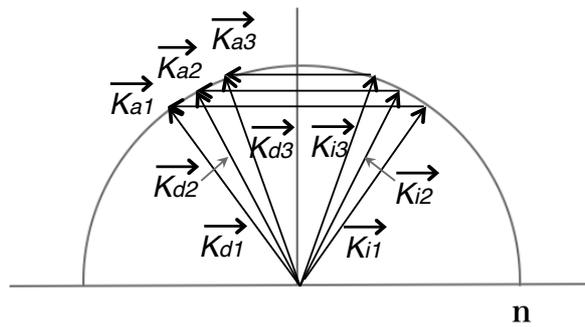


Fig. 19 Wave vector diagram of acousto-optic interaction, multi-wavevectors-2.

上記課題を解決するもうひとつのアイデアは、レーザー光の入射角度を変える代わりに超音波の進行方向を変え、レーザー光に対して常に Bragg 角 θ_{B1} , θ_{B2} , θ_{B3} を保証し、式 (2.24) に示す運動量保存の法則を満たす方法である。この波数ベクトルの様子を Fig.20 に模式的に示す。波数ベクトル \vec{K}_1 , \vec{K}_2 , \vec{K}_3 の進行方向が周波数に従って変化し、常に入射光のベクトルと回折光のベクトルとで三角形を構成する関係を成立させることが原理的に可能である。

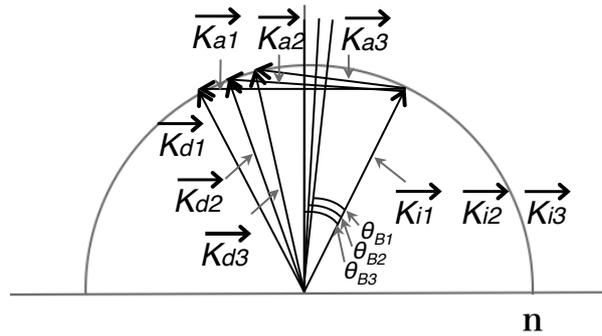


Fig. 20 Wave vector diagram of acousto-optic interaction, multi-wavevectors-3.

超音波の進行方向の角度を周波数によって変える方法として、Couquin, Pinnow らは multi-element planer transducer array および stepped transducer array 方式を提案し[24], [25], その基礎研究を行った。Multi-element planer transducer array はアンテナや超音波プローブなどに使われる技術として知られる phased array 制御技術と同等であり、結晶の微細加工が必要な stepped transducer array より優れている。そこで、本研究では、phased array 制御技術の一つである「 π -shift 法」を応用することとした。「 π -shift 法」は、等間隔に並べた複数のトランスデューサに隣同士の位相が π (180°)シフトした信号を入力する方法である。位相のシフト量は設計上自由に選択可能であるが、 π (180°)シフトはトランスデューサおよびトランスデューサ駆動回路の設計が簡便になる。これに異なる周波数の高周波信号を入力することにより、超音波の波長が変化し、超音波の等位波面の進行方向の角度が変化する。従って、入力信号の周波数で波面の進行方向を制御することが可能となる。この原理を模式的に Fig.21 に示す。

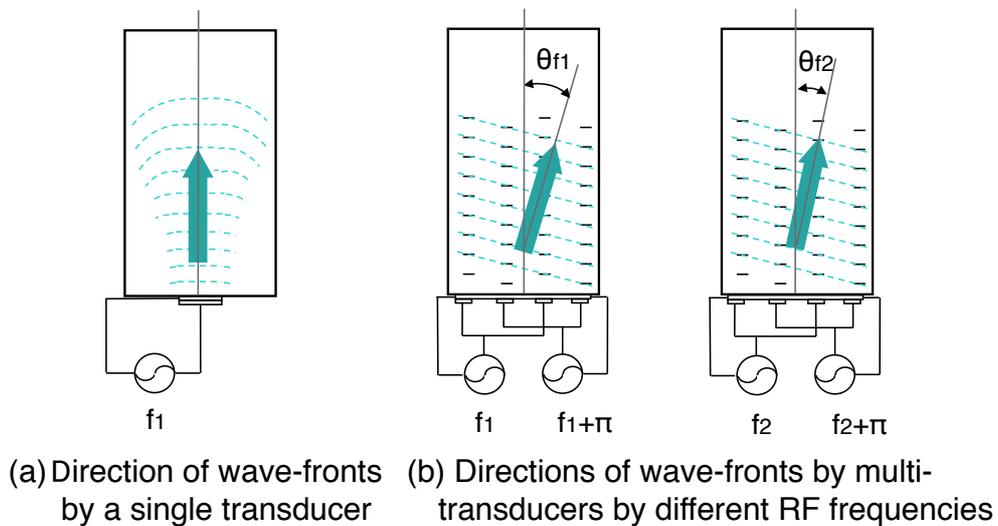


Fig. 21 Principle of multi-frequency AOM.

1 個のトランスデューサで構成される一般的な AOM の超音波の等位波面は、Fig.21 (a) のようにトランスデューサと並行に形成され、直進して、次第に減衰とともに拡散し、周辺部から波面の平面度が崩れ、変形していく。従って、超音波の減衰が少なく、波面の平面性が保持されているトランスデューサに近い位置で回折するように、入射レーザー光の位置調整を行う。π-shift 型 AOM の場合は、Fig.21 (b) に示すように、複数のトランスデューサに交互に 180°位相をずらした信号 f_1 または f_2 を入力すると、等位波面の進行方向がそれぞれ角度 θ_{R1} または θ_{R2} を持って現れる。この等位波面の傾きは、高周波信号の周波数によって変化させることが可能である。つまり、Fig.20 に示すようなベクトル図の関係を実現することができ、入射光が固定された状態での複数の信号が入力された時の回折光の状態は、Fig.15 に示すようになる。入射レーザー光の位置は波面の状態および超音波の減衰を考慮すると、トランスデューサに近い位置で調整するのは、phased array タイプでも同様である。

Phased array(π-shift 型)トランスデューサの設計

π-shift 型マルチ周波数 AOM 設計の主なパラメータは、トランスデューサの間隔、サイズ(高さ H , 長さ L)、およびトランスデューサの個数である。トランスデューサの間隔は Bragg 角を保証するための等位波面の角度を決める。また、トランスデューサのサイズは入力電力量と回折効率に影響を与える。トランスデューサは array 化のために分割されるので、トランスデューサの実効サイズは array の合計サイズになる。

Fig.22 に、π-shift 型 AOM 設計のための主なパラメータを示す。結晶内超音波の波長を Λ 、傾いた実質的波面を形成する波長を Λ_e 、同位相であるトランスデューサの間隔を L_p とし、最小偏向角を θ_{R1} 、最大偏向角を θ_{R2} とする。分割されたトランスデューサのうち 1 つ置きに 180°の位相をずらすので、 L_p はトランスデューサ 2 個分の間隔になる。Fig.22(a)はその基本的な概略図を示し、Fig.22(b)は変調駆動周波数が異なる状態を模式的に示している。

本 π-shift 型マルチ周波数 AOM の仕様を Table.4 に示す。本仕様は設計-試作評価の trial and error を繰り返して、最終的に決定された。採用する音響光学材料は、音響光学効果が大きく、可視光の波長領域(光学透過範囲)を持ち、最も一般的な二酸化テルル(TeO_2)を採用した。この材料の結晶内の波長 Λ は以下のように表される。

$$\Lambda = \frac{v}{f_{RF}} \quad (2.35)$$

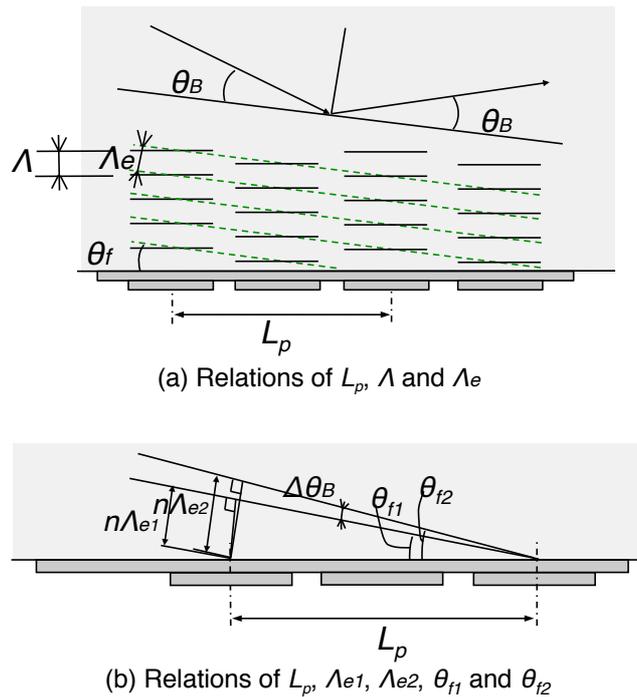


Fig. 22 Schematic on distance of transducers and angle of wavefront.

ここで、 v は音響縦モードの音速で 4260 m/s、Table.4 の仕様を示す中心周波数 350 MHz に対し、変調帯域幅は 175 MHz とすることで、最大偏向角を生成する変調周波数 f_{RF1} は 437.5 MHz、最小偏向角を生成する変調周波数 f_{RF2} は 262.5 MHz となる。これより、式(2.35)から最大偏向時の波長 λ_1 は 9.73 μm 、最小偏向角時の波長 λ_2 は 16.23 μm となる。

Table. 4 Specification of multi-frequency AOM

Items	Specifications
1. Material	TeO ₂ (Tellurium dioxide)
2. Acoustic mode	Longitudinal
3. Light wavelength	632.8 nm
4. Acoustic velocity	4260 m/s
5. Center frequency	350 MHz
6. Modulation bandwidth	175 MHz
7. Diffraction efficiency	> 3.0 % at 50 mW RF input
8. Flatness of diffraction efficiency	< 1.5 dB within bandwidth
9. Pulse response time	20 ns at 125 μm beam diameter

Fig.22(b)より，幾何学的に以下の式が成立する．

$$\sin\theta = \frac{n \cdot \Lambda_e}{L_p} \quad (2.36)$$

ここで， n は整数である．また， $\Delta\theta_B = \theta_2 - \theta_1$ とすると， $\Delta\theta_B$ は以下のように書き換えることができる．

$$\Delta\theta_B = \frac{n\lambda}{2v}(f_{RF1} - f_{RF2}) \quad (2.37)$$

ここで，使用するレーザー光の波長 λ は 632.8 nm であるので， $\Delta\theta_B$ は 13.0 mrad という値を得る．

また， θ_1 と θ_2 が十分小さい場合 (>0.1 radian)，上記関係から以下の式が導かれる．

$$L_p = \frac{nv}{\Delta\theta_B} \left(\frac{1}{f_{RF2}} - \frac{1}{f_{RF1}} \right) \quad (2.38)$$

これより， $n=1$ のとき，トランスデューサの間隔 $L_p = 0.499$ mm が得られる．

実際には，1 個のトランスデューサのサイズから，製造適性を考慮して， $n=2$ の $L_p = 0.998$ mm を採用した．

トランスデューサのサイズ(高さ H ，長さ L)は，回折効率の設計にも関係する(後述の式(2.39))．十分な回折効率を得るためには，音響パワーを決めるトランスデューサの面積($H \times L$)と，回折効率を決める L/H 比も含めて設計する必要がある．トランスデューサの間隔は隣同士が 180° の位相差のため，超音波の波面の乱れができる限り少なくなるようにトランスデューサの間隔を考慮しながら，1 個のサイズを決定する．まず，式(2.29)で表される変調の立ち上り時間(Table.4 の Pulse response time 参照)から実際の光学系での AOM 内ビーム径を約 150 μm と想定して，高さを $H=0.2$ mm とした．また，array 個数をなるべく減らす観点から，トランスデューサ数を 2，4，6 個とそれぞれ検討したが，1 個のトランスデューサのサイズが正方形に近くなる長さ $L=0.2$ mm を選択し，最終的にトランスデューサ数を 6 個，トランスデューサの全長を約 2.7 mm とした． L/H 比は 0.17 程度であり，標準的な等方性 Bragg 回折の AOM の値となっている．なお，トランスデューサ形状は波面が結晶内の超音波の直進性を保つのに有効な変形ダイヤモンド形を採用した[32]．最終のトランスデューサの設計結果を Fig.23 に示す．図中の形状は概略である．(詳細なトランスデューサ形状設計は CT 社で行われた．)

また， Λ_e と Λ の関係は $\Lambda = \Lambda_e / \cos(\theta_f)$ であるので， Λ_e と Λ はほぼ同等とした．これにより，偏向角の最大と最小の差になる($\Delta\theta_B =$) 13.0 mrad の角度差での光学設計を行うことと

する。

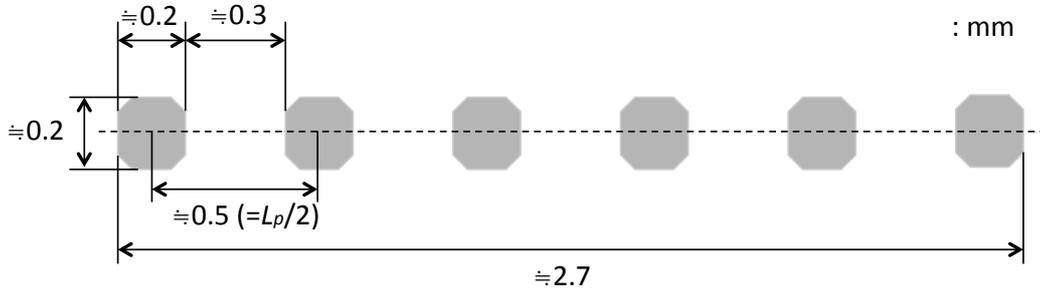


Fig. 23 Layout of phased array transducers.

回折効率と必要光量に関する設計

音響光学デバイスの回折効率は媒質中の波動方程式から、多数の平面波の重ね合わせとしてフーリエ展開を利用し、結合モード理論から結合方程式を解くことで求めることができる。回折効率 I_{1st} は入射光強度 I_{in} に対する1次回折光強度 I_{dif} の比であり、式(2.39)で定義される。ここで、 M_e は結晶の音響光学の性能係数(figure of merit)であり、 L と H は前述の通りそれぞれ超音波の長さ(幅)と高さ(幅)を示し、 P は入力音響電力、 $\cos\theta_i$ は超音波に対する入射角で、等方性 Bragg 回折の場合は Bragg 角 θ_B となる。

$$I_{1st} = \frac{I_{dif}}{I_{in}} = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0 \cos\theta_i} \cdot \left(\frac{M_e P L}{2H} \right)^{1/2} \right] \quad (2.39)$$

$$M_e = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3} \quad (2.40)$$

TeO₂ 結晶の[001]軸(縦モード)の音響光学性能係数 M_e は 34.5×10^{-15} (m²/W)、 L と H は電極形状が分断型なので実効的な長さおよび高さとなり、前述の通り実効的な H/L は $0.2/(0.2 \times 6) \approx 0.17$ となる。

また、Fig.24 に示すように phased array 構造の超音波は θ と $-\theta$ の2方向の波面として現れ、半分の電力が Bragg 角の条件を満たさない方向に進行する。従って、通常の AOM と比較して、入力電力に対する回折効率は半分になる。この電力の損失は phased array タイプである AOM の欠点である。

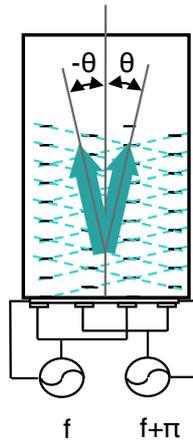


Fig. 24 Two wavefronts symmetrically traveling from phased array transducers.

2-3-3 マルチ周波数 AOM の評価

変調帯域幅とフラットネス

試作した 3 つのマルチ周波数 AOM の変調帯域内でのフラットネスと回折効率の測定値を Fig.25 に示す. 270 MHz から 430 MHz まで(160 MHz 帯域幅)を 20 MHz 間隔で 9 つの入力信号(各 50 mW 入力)を AOM に順次印加し, 光パワーメータで AOM 前後の光出力を測定した. その比率($I_{\text{dif}}/I_{\text{in}}$)が回折効率となる. 3 つのサンプル(#1, #2, #3)とも各周波数での回折効率はほぼ 5 %以上を確保し, フラットネスは 0.57~0.64 dB となり, 高周波側の回折効率の低下も少なく, 良好な結果を得た. 単一のトランスデューサでは数 10 MHz しかなかった帯域幅が, phased array トランスデューサを最適設計することにより, 160 MHz 以上に拡大したことになる. これは駆動周波数の変化に応じて超音波の波面角度が Bragg 角を保証するように変化し, phased array による波面角度の制御が機能していることを示している. 一般的に, 中心周波数を高くすると帯域は広く取れるが, 製造上トランスデューサ電極の膜厚をより薄くしなくてはならず, 製造難易度が急激に上がり, 歩留まりに影響する. 今回はそのトレードオフを考慮し, 中心周波数および周波数帯域を決定した. なお, Table.4 に示した仕様での帯域幅(175 MHz)は, 回折効率が 3 %以上の範囲と規定しており, 別途測定した結果では 200 MHz 以上の帯域幅を確保している.

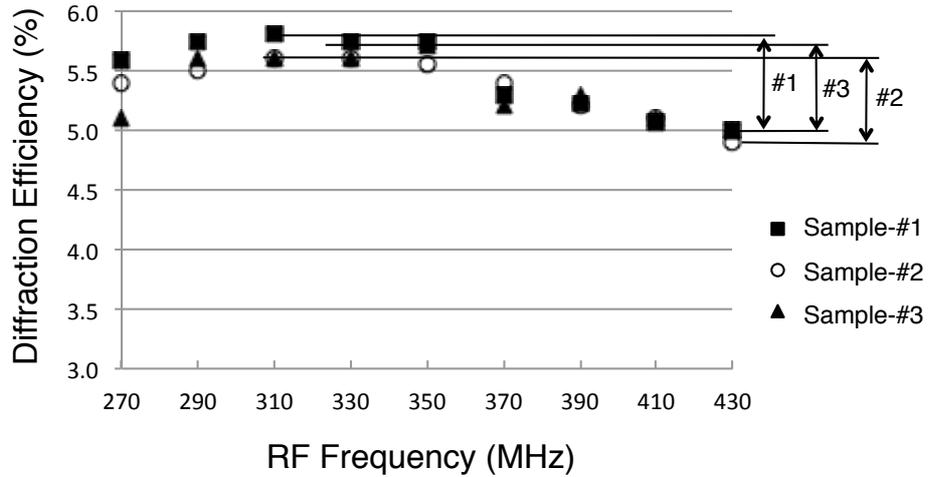


Fig. 25 Measurement data of diffraction efficiency and flatness within the bandwidth, each flatness Sample-#1: 0.64 dB, Sample-#2: 0.58 dB and Sample-#3: 0.57 dB.

次に、RF 入力電力対回折効率の関係を Fig.26 に示す。周波数 350MHz の RF 入力で、回折効率を求めた。式(2.39)および(2.40)による計算結果の半分の値は実測値とよく合致していることがわかる。

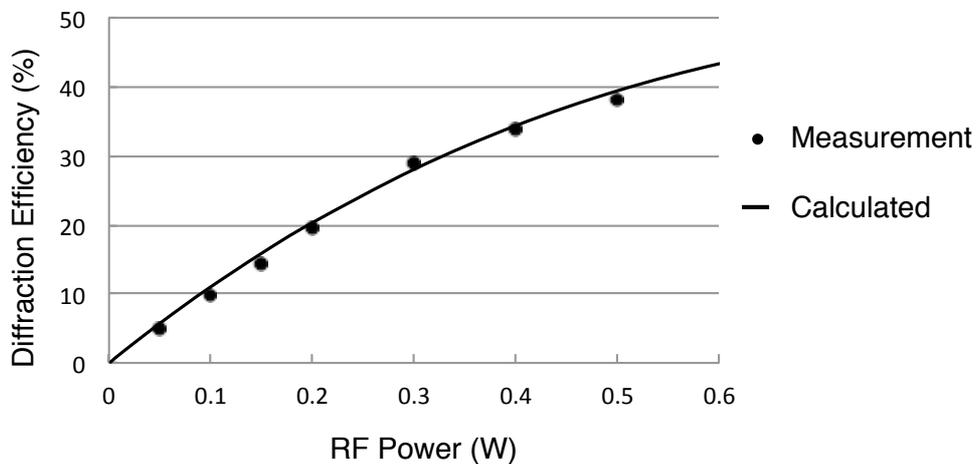


Fig. 26 Calculated and measured diffraction efficiency of the multi-frequency AOM at $f=350\text{MHz}$.

パルス応答時間 (立ち上り時間)

1 次回折光を利用する場合、高周波印加の ON/OFF が 1 次回折光の有/無と一致する。レーザー光のパルス応答時間(立ち上り時間) t_r はレーザー光が TEM00 横モードのとき、式(2.29)

で表される。パルス応答時間の測定結果は、AOM 内ビーム径 d_{AOM} を Table.4 で定義した 150 μm とし、AOM 直後に置いた高速フォトディテクターで1次回折光を測定した結果が 23.1 ns で、計算値 23.2 ns とよく一致した。

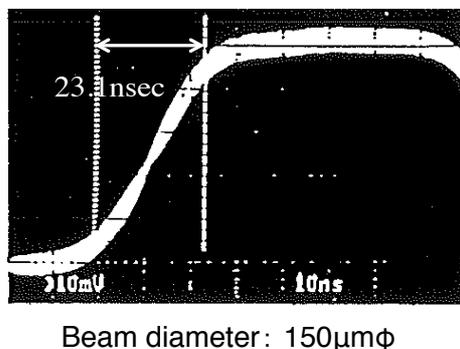


Fig. 27 Measurement of rise time at 150 μm beam diameter in AOM.

実際の光学系では、 d_{AOM} は後述の式(3.6)より 125 μm となり、このときの t_r の計算値は 19.4 ns, 実測値は 19.1 ns であった。

3次相互変調成分

1 次回折光および 3 次相互変調成分の測定結果と、式(2.39)および(2.40)から求めた 1 次回折効率の計算結果を合わせて Fig.28 に示す。回折効率の%を対数($10\log(\%)$)で、また RF 入力電力を dBm で表示した(例：1% \rightarrow 0, 10% \rightarrow 10)。Fig.26 と同様に、1 次の回折効率は理論値とよく一致する。Fig.28 に示している RF 電力が小さい領域(0.2 W, 23 dBm 以下)では、RF 入力電力と回折効率はほぼ線形な特性を示す。

本実験では駆動回路系の高周波増幅回路で生じる高周波歪みをできる限り排除するために、低歪み高出力増幅器を使用した。本設計は、RF 入力信号が 50 mW(およそ 17 dBm)で、 ΔP (3rd IMD Harmonic Suppression)は 30 dB を確保できている。これは 1000:1 の光量差である。通常の硬調な銀塩感光材料の場合は、数 10:1 の光量差で良好なエッジシャープネスを確保できるので、十分なマージンがあると言える。このマージンはシステム内で生じる迷光などに割り当てられる。また、3 次インターセプトポイント(IP₃)はおよそ 50 dBm となった(Fig.14 参照)。

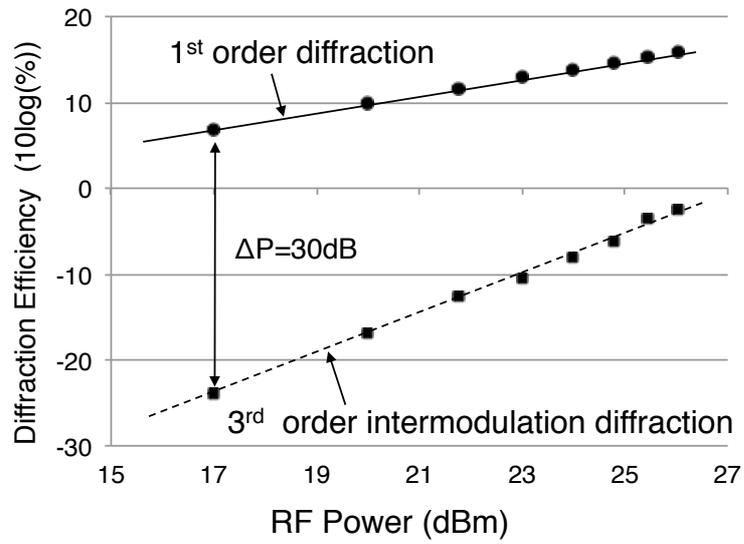


Fig. 28 Measurement and calculated results of 1st order diffraction and measurement result of 3rd order intermodulation at 350 and 400 MHz RF input signals.

2-4 On-axis AOD の研究

音響光学デバイスは、1次元偏向のみならず2次元偏向器としても、レーザー機器への応用が期待されている。1軸性結晶である二酸化テルル(TeO_2)を用いて、異方 Bragg 回折を利用する方法がいくつか提案されている[17], [22], [26], [27]。その中で、前述の通り off-axis 方式は広帯域であり、かつ直線偏光入射が可能なことから、現在偏向器として一般的に使用されており[28]、様々なアプリケーションへの応用が進んでいる。一方、on-axis 方式を用いる応用では、高い回折効率を得るためには適切な楕円偏光入射が必要なこと、入射角が最小になる回折条件では回折効率の落ち込み(midband degeneracy)があり、偏向の帯域幅が広くとれないことなどの欠点があり、実用化が困難であった[17], [29]。しかし、off-axis 方式では walk-off と呼ばれる音響波の進行方向が数 10° 傾く現象により、結晶サイズを大きくする必要があるが、on-axis 方式では超音波はトランスデューサ面に垂直に進行するため、結晶のサイズは off-axis 方式と比較すると数分の1と小さくて済むこと、また製造工程の容易さの点においては on-axis 方式のほうが圧倒的に優位であることから、on-axis 方式の解析および実用化の可能性を研究することとした。

On-axis AOD の研究では、結晶を光軸[001]から $[1\bar{1}0]$ 軸方向に傾けて([110]軸中心に回転させて)光を入射させる(optical rotation と呼ばれている)ことで、回折効率や入射および出射光の偏光が変化することが示唆されていた[29]。また、1軸性結晶における固有モードの解析については、S. Kim, K. Wagner らが優れた解析を行っている[30], [31], [32]が、結晶の偏光固有モードと光の偏光面の角度の関係に対する解析が十分になされていなかった。そこで、これらの関係をさらに解析し、高回折効率を得るための条件を導き、実験にて証明する。本節では、まず on-axis AOD の原理と解析、それを元に高回折効率を得る調整方法を解説する。それから、2次元偏向器への応用を研究する。

2-4-1 On-axis AOD の異方 Bragg 回折の解析

一軸性結晶である二酸化テルル(TeO_2)は大きい自然複屈折と光学活性(旋光能)を持つ。入射光が[001]軸上にあるとき、複屈折により、結晶の中で二つの円偏光、右円偏光と左円偏光に分かれる。入射光が[001]軸に対し角度を持つと、左右の円偏光は楕円偏光になる。超音波による Bragg 回折が発生する時、先の phase-matching 条件(式(2.24))に従い、回折に寄与するのは主に片方の楕円偏光で、回折光はその逆回転の楕円光になる。結晶軸に対し、光の進行方向によって決まるこれらの偏光状態が偏光固有モードである。

ここで, Fig.29 に示す結晶軸を基準にした角度の定義とともに, 理解を容易にするために, 実際の偏向器での角度の取り方の定義も Fig.30 に示しておく. Bragg 回折のための角度が θ_B , 結晶内に伝搬する超音波の方向を軸に回転させる角度 θ_A が optical rotation の角度である. 加えて, 入射光の偏光の[110]軸からの角度が θ_C となる.

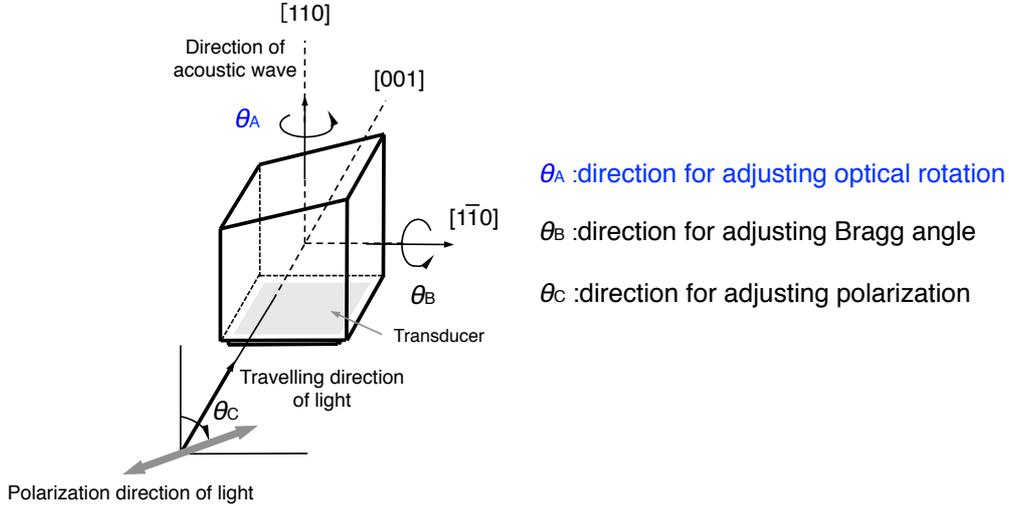


Fig. 30 Schematic of adjustments of angles θ_A , θ_B and θ_C for on-axis AOD.

次に, TeO_2 結晶の固有モードを解析するために, 結晶内における楕円偏光の楕円率を考察する. 楕円率 χ は楕円偏光の長軸 a と短軸 b の比 ($\chi = b/a$) と定義する. 文献[33], [35]に示される楕円率の式は, 角度 θ_A を加えて拡張することで, 以下のように書き換えられる.

$$\chi = \frac{\Delta n_a(\theta_A, \theta_B)}{\Delta n_b(\theta_A, \theta_B) + \{ \Delta n_a^2(\theta_A, \theta_B) + \Delta n_b^2(\theta_A, \theta_B) \}^{1/2}} \quad (2.41)$$

$$\Delta n_a(\theta_A, \theta_B) \approx (n_r - n_l) \cdot \frac{\cos^2 \theta_A \cdot \cos^2 \theta_B}{1 - \sin^2 \theta_A \cdot \sin^2 \theta_B} \approx \frac{\rho \lambda}{\pi} \cdot \frac{\cos^2 \theta_A \cdot \cos^2 \theta_B}{1 - \sin^2 \theta_A \cdot \sin^2 \theta_B} \quad (2.42)$$

$$\Delta n_b(\theta_A, \theta_B) \approx (n_e - n_o) \cdot \frac{\sin^2 \theta_A \cdot \cos^2 \theta_B + \cos^2 \theta_A \cdot \sin^2 \theta_B}{1 - \sin^2 \theta_A \cdot \sin^2 \theta_B} \quad (2.43)$$

ここで, $\Delta n_b(\theta_A, \theta_B)$ と $\Delta n_a(\theta_A, \theta_B)$ は[001]軸方向から角度 θ_A および θ_B 傾いた方向に進む光の自然複屈折と旋光能によって生じる複屈折率差であり, $\Delta n_b(0^\circ, 90^\circ) = n_e - n_o$, $\Delta n_a(0^\circ, 0^\circ) = n_r - n_l$ となる. n_l, n_r は偏光固有モードである左右の円偏光に対する屈折率である. また, ρ は式(2.18)で表される単位長さ当りの回転角で定義される旋光能(optical rotatory power)である.

この導出過程を以下に示しておく。 Fig.31 のように主要なパラメータを定義する。

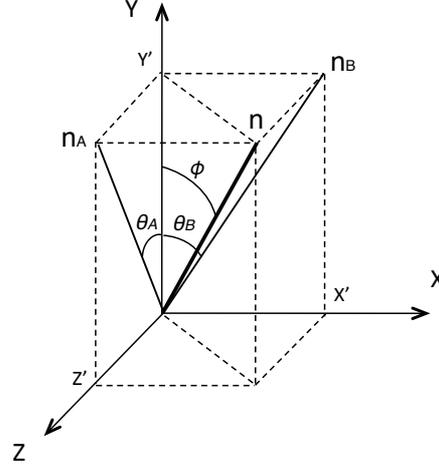


Fig.31 Definition of coordinates for n_A , n_B , θ_A , θ_B and ϕ .

n を x' , y' , z' および n_A , n_B で表すと,

$$\begin{cases} x' = n_B \cdot \sin\theta_B \\ y' = n_A \cdot \cos\theta_A = n_B \cdot \cos\theta_B \\ z' = n_A \cdot \sin\theta_A \end{cases} \quad (2.44)$$

これより,

$$n_B = n \cdot \frac{\cos\theta_A}{\sqrt{1 - \sin^2\theta_A \cdot \sin^2\theta_B}} \quad (2.45)$$

これらより, $\cos\phi$ および $\sin\phi$ を求めると,

$$\cos\phi = \frac{y'}{n} = \frac{\cos\theta_A \cdot \cos\theta_B}{\sqrt{1 - \sin^2\theta_A \cdot \sin^2\theta_B}} \quad (2.46)$$

$$\sin\phi = \frac{\sqrt{x'^2 + z'^2}}{n} = \frac{\sqrt{\sin^2\theta_A \cdot \cos^2\theta_B + \cos^2\theta_A \cdot \sin^2\theta_B}}{\sqrt{1 - \sin^2\theta_A \cdot \sin^2\theta_B}} \quad (2.47)$$

以上より, 式(2.41)~(2.43)が導かれる。

これらの式(2.41)~(2.43)より, TeO₂において光源の波長 635 nm の時に, 角度 θ_A を 0, 2, 4, 10°と与えた時の楕円率 χ は以下のようなになる。

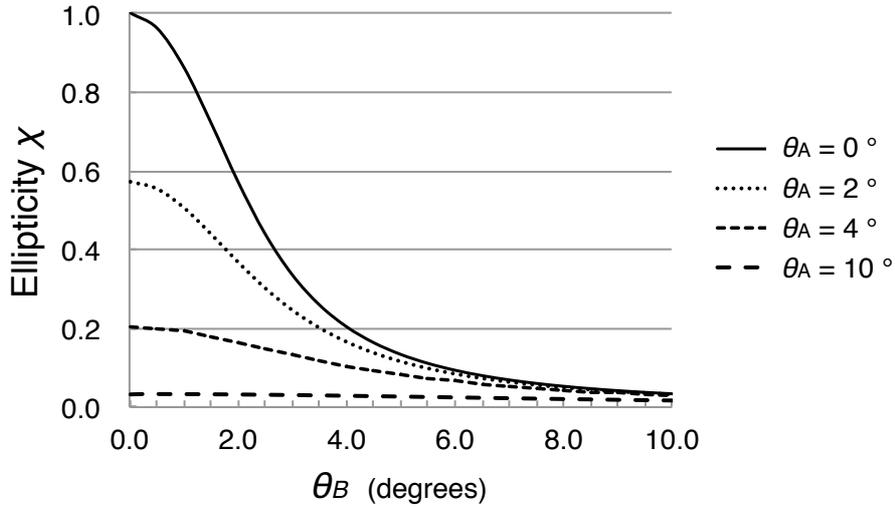


Fig. 32 Ellipticity of the light propagating in TeO₂ at 635 nm wavelength along a direction with an angle θ_B , tilted from the [001] axis to the [110] axis, and an angle θ_A , tilted from the [001] axis to the $[\bar{1}\bar{1}0]$ axis.

Fig.32 は、角度 θ_B および θ_A に対する二つの楕円偏光の楕円率の変化を示している。 θ_A が小さいとき、楕円率は θ_B の数°の角度変化で急激に変化する。通常の optical rotation がない場合($\theta_A = 0^\circ$)、Bragg 回折調整で得られる角度 θ_B はおよそ 3.5° であるため、楕円率は 0.26 程度を示し、固有モードは直線偏光状態にはならない。さらに角度 θ_A を与えることで楕円率が小さくなり、固有モードは直線偏光に近づいていき、 θ_A が 10° 近傍では θ_B の値によらず楕円率は 0.03 近傍となり、ほぼ直線偏光になる。

次に、TeO₂ 結晶内で2つに分かれた楕円偏光の光強度について考察する。楕円率による光強度変化は、T. Yano らによって解析されている[33], [35]。入射光の偏光面が[110]軸方向から角度 θ_c 傾き、入射角度が[001]方向から角度 θ_B 傾け、さらに[110]軸周りに角度 θ_A 回転させた場合について、新たに解析する。まず、偏光を以下のように表す。入射直線偏光(a plane wave incident to a crystal):

$$D_0 = A_0 \cdot \exp i\tau_0 \quad (2.48)$$

入射光の楕円主軸方向を(X, Z)として、
分解された直線偏光の X 成分：

$$D_x = A_0 \cdot \cos\theta_c \cdot \exp i\tau_0 \quad (2.49)$$

分解された直線偏光の Z 成分 :

$$D_z = A_0 \cdot \sin\theta_c \cdot \exp i\tau_0 \quad (2.50)$$

$$D_x = \left\{ a_1 \exp i\tau_0 + b_1 \exp i\left(\tau_0 + \frac{\pi}{2}\right) \right\} + \left\{ b_1 \exp i\left(\tau_0 - \frac{\pi}{2}\right) + c_1 \exp i\tau_0 \right\} \quad (2.51)$$

$$D_z = \left\{ a_2 \exp i\tau_0 + b_2 \exp i\left(\tau_0 + \frac{\pi}{2}\right) \right\} + \left\{ b_2 \exp i\left(\tau_0 - \frac{\pi}{2}\right) + c_2 \exp i\tau_0 \right\} \quad (2.52)$$

上記 2 式は, $D_{x,z} = \{ \text{左偏光成分} \} + \{ \text{右偏光成分} \}$ である.

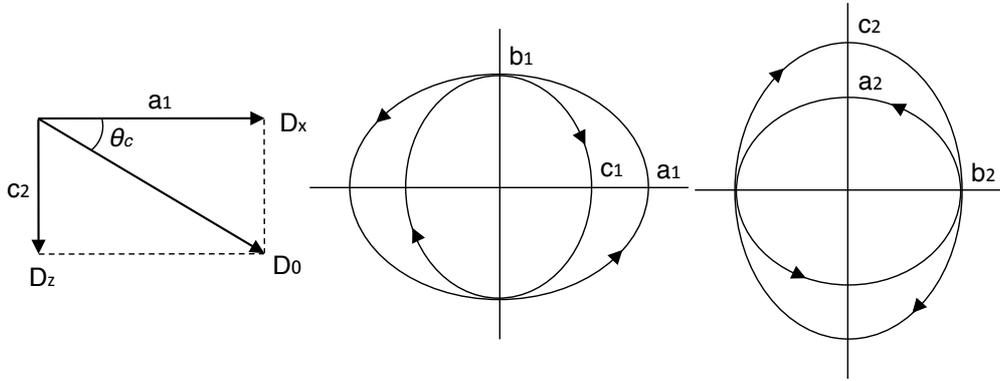


Fig. 33 Decomposition of incident light according to the two eigenmodes of ellipticity χ .

直線偏光波の楕円率を χ とすると, 以下の関係が成立する.

$$c_1 = \chi b_1 = \chi^2 a_1, \quad a_2 = \chi b_2 = \chi^2 c_2, \quad c_2 = \tan\theta_c \cdot a_1 \quad (2.53)$$

結晶内の 2 種の光の強度差は(楕円長軸方向が $[\bar{1}10]$ 軸方向に沿う成分を I_l , $[110]$ 軸方向に沿う成分を I_r とすると), 左偏光成分 I_l と右偏光成分 I_r の光強度を求めると, 以下のようになる.

$$\begin{aligned} I_l &= \frac{1}{2} \left\{ (a_1^2 + b_1^2) + (a_2^2 + b_2^2) \right\} = \left\{ \frac{1 + \chi^2 \cdot \tan^2\psi}{(1 + \chi^2) \cdot (1 + \tan^2\psi)} \right\} \cdot I_0 \\ &= \left\{ \frac{\chi^2 + (1 - \chi^2) \cdot \cos^2\psi}{1 + \chi^2} \right\} \cdot I_0 \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$I_r = \frac{1}{2} \{ (b_1^2 + c_1^2) + (b_2^2 + c_2^2) \} = \left\{ \frac{\chi^2 + \tan^2 \psi}{(1 + \chi^2) \cdot (1 + \tan^2 \psi)} \right\} \cdot I_0$$

$$= \left\{ \frac{1 - (1 - \chi^2) \cdot \cos^2 \psi}{1 + \chi^2} \right\} \cdot I_0 \quad (2.55)$$

ここで、 $\psi = \theta_c - \tan^{-1}(\theta_A / \theta_B)$ 、添字の r と l は右および左回転の偏光を示し、 I_0 は入射光の強度であり、 $I_l + I_r = I_0$ である。

Fig.34 に、 $\psi, \theta_A, \theta_B, \theta_C$ の関係を図示しておく。

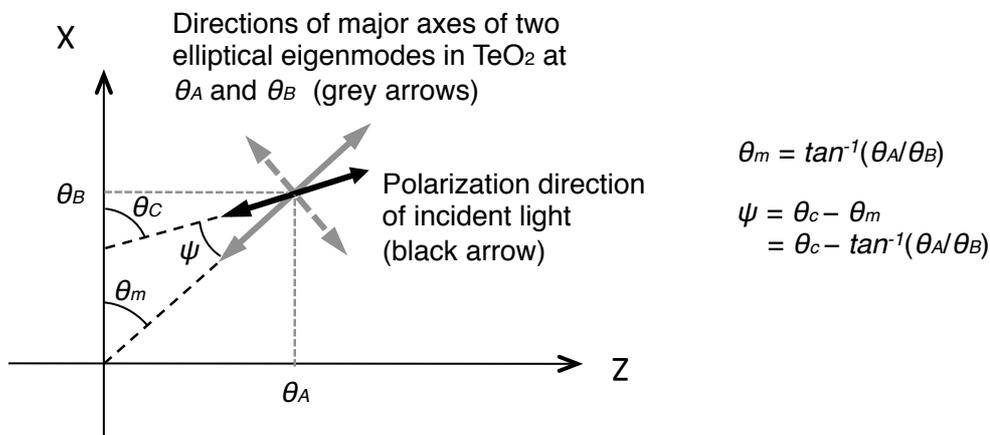


Fig. 34 Relations of $\psi, \theta_A, \theta_B, \theta_C$.

光の進行方向の角度が θ_A, θ_B で定義される θ_m と、光の偏光面の角度が θ_c のときに、この角度差 ψ を変化させたときの光強度 I_r の計算結果を Fig.35 に示す。

式(2.54)および(2.55)から、角度 ψ の時の I_l は、角度 $(\pi/2 - \psi)$ の時の I_r に等しい。Fig.35 の $\psi = 0 \text{ deg}$ の I_r は $\psi = 90 \text{ deg}$ のときの I_l になる。楕円率が1のとき、二つの偏光の強度は50%で等しくなり、楕円率が小さくなっていく(直線偏光に近づいていく)と、片方の偏光の強度が大きくなり、楕円率が0になると片方の偏光のみになる。

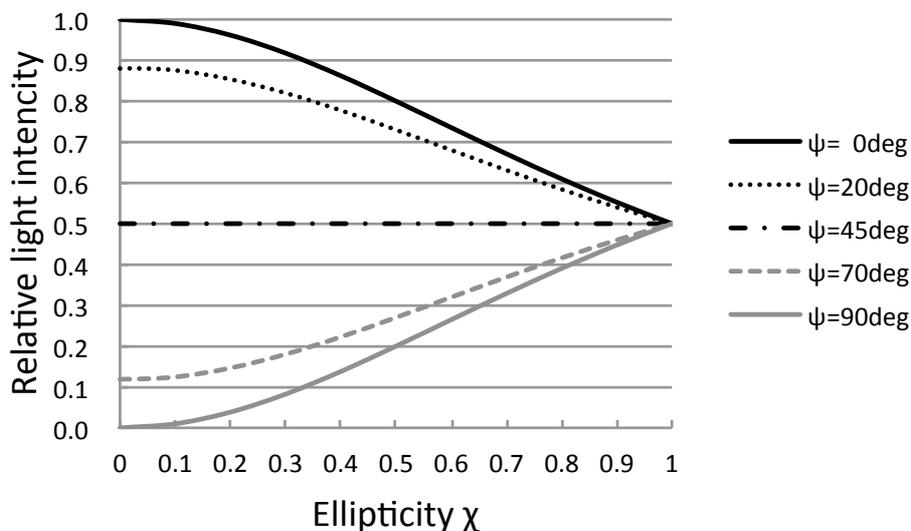


Fig. 35 Intensities of elliptically polarized wave I_r at light wavelength 635nm in TeO_2 for Ellipticity χ .

Fig.32 と Fig.35 の結果より, $\theta_c = \tan^{-1}(\theta_A / \theta_B)$ の時 ($\psi = 0$ の時)の結果を直感的に理解しやすくするために, TeO_2 結晶軸に対する偏光の固有モード(polarization eigenmode)を 2 次元的に展開した図を, Fig.36 に示す[31], [32]. 実線は右回りの異常光の偏光状態を示し, 破線は左回りの常光の偏光状態を示している. 光軸上($(\theta_A, \theta_B) = (0^\circ, 0^\circ)$)は常光および異常光とも円偏光で, 光軸からの角度が大きくなるに従って楕円偏光になり, さらに直線偏光に近づく. $[110]$ 軸- $[\bar{1}\bar{1}0]$ 軸平面内では, これら偏光固有モードは点対称であり, また $[001]$ 軸(図中, 中心)のプラスおよびマイナス両方向からの光に対して, 同様の偏光固有モードを示す.

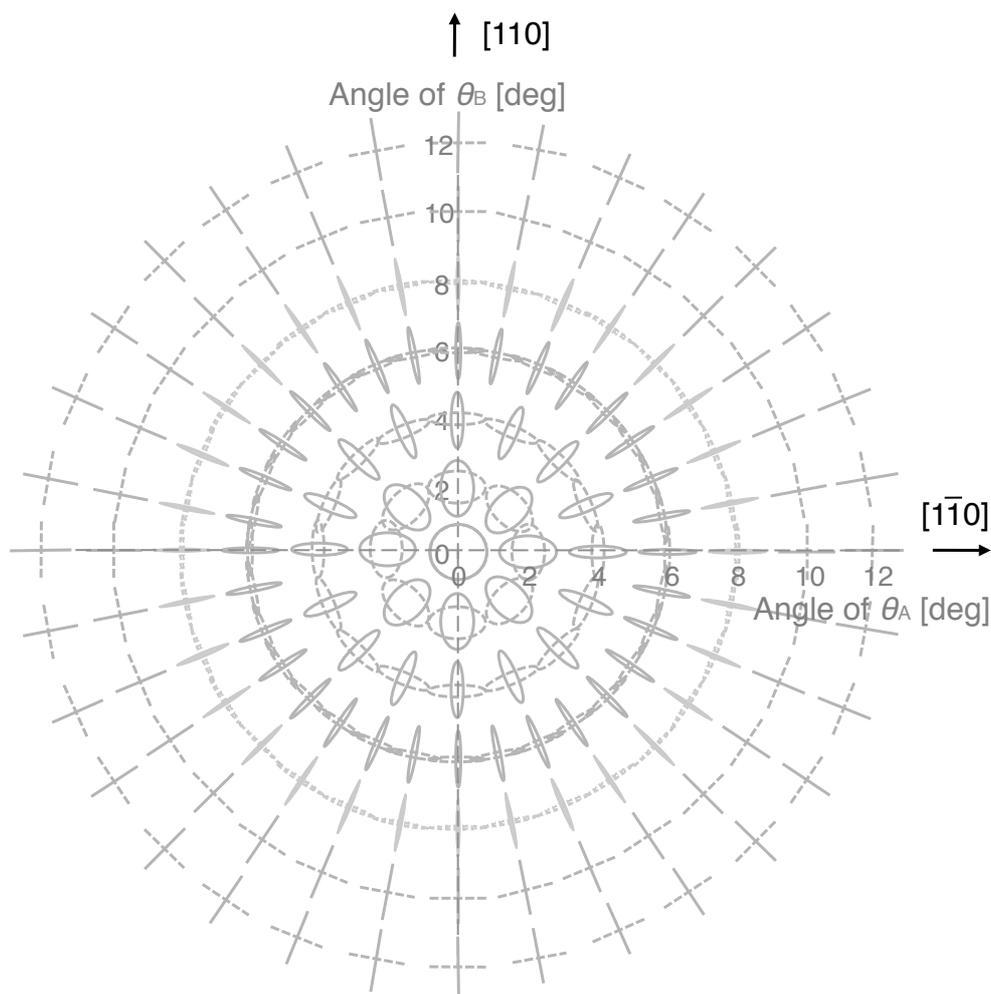


Fig. 36 State of two polarization eigenmodes of TeO₂ near the optic axis [001].

次に、Fig.36 に示した偏光固有モードをもとに、直線偏光を入射したときの偏光状態について、Fig.37 を用いて考える。今、入射光が赤点の位置になる角度 θ_A かつ $\theta_i (= \theta_B)$ に調整されると、超音波の進行方向である[110]軸と平行な方向に回折され、角度 θ_A かつ θ_d である青点の位置から出射される。赤矢印および青矢印の方向は、固有モードの偏光面の方向を示している。固有モードが示す偏光方向(赤矢印)に入射光の偏光面の角度 θ_c を合わせると、光強度の結合効率が最大となり、最大の回折効率を示す。この時、赤矢印の偏光方向を持つ右回りの異常光が回折後、青矢印の偏光方向を持つ左回りの常光になって出射する。これは phase-matching の条件に従っている。つまり、 $\theta_A = 0^\circ$ の時、入射光と出射光の偏光面の角度差は 90° になるが[28]、光学回転(optical rotation) θ_A が与えられた時は、偏光面の角度差は 90° ではなく、固有モードに従った偏光面の角度差で決まる。

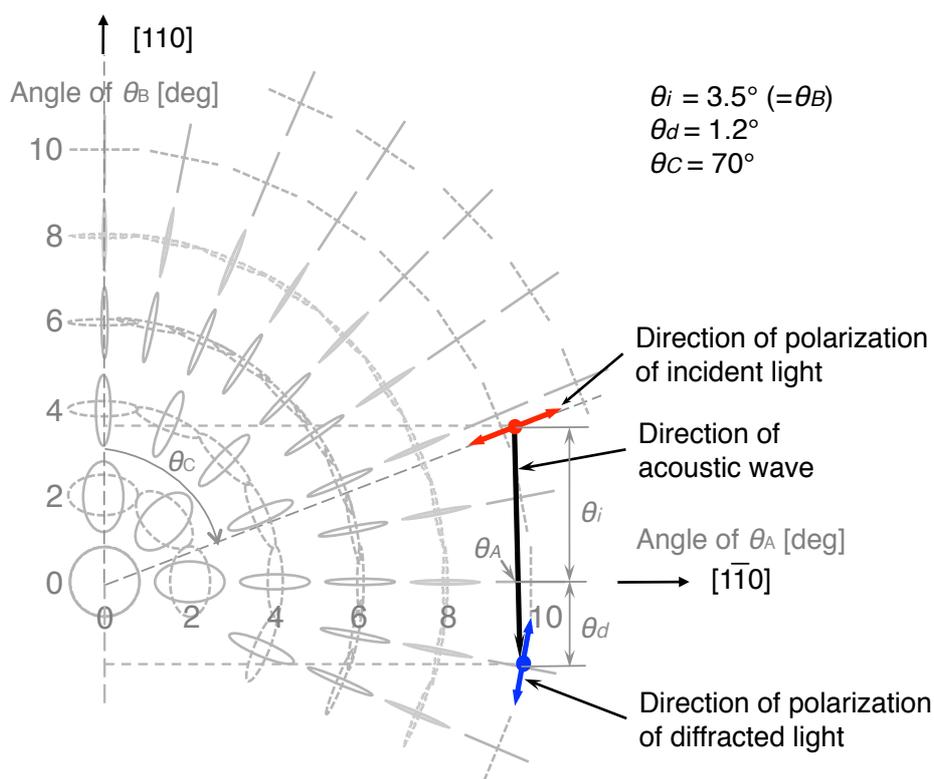


Fig. 37 State of polarization of the two eigenmodes of TeO₂ near the optic axis [001] and relations of polarization directions between incident light and diffracted one.

以上の結果を総合すると、TeO₂結晶の[001]軸に沿って入射した直線偏光は、Bragg角調整となる[110]軸回りの回転角 θ_B を与えると、偏光固有モードに従って二つの楕円偏光に分離する。さらに、超音波の進行方向である[110]軸回りの回転角 θ_A としておよそ 10 deg 与えると、固有モードはほぼ直線偏光になり、かつ片方の固有モードの強度が支配的になる。入射光偏光面の方向をこの固有モードの方向に合わせることで、直線偏光入射でも効率的に回折現象を利用することが可能になる。これは、1/4 波長板などの偏光制御用光学部材が不要となることを意味し、光学システム設計の観点から極めて有用である。

2-4-2 On-axis AOD の評価

今回の評価では，中心周波数を 80 MHz で設計された市販の on-axis AOD(Gooch & Housego Inc.の型番 4080-13)を用い，光源は 635 nm の半導体レーザーを用いた．使用した AOD の製造メーカーGooch & Housego Inc.が提示している基本仕様を Table.5 に示す．評価における RF 駆動入力電力は常に 0.25 W とした．TeO₂ 結晶の異方 Bragg 屈折を利用する場合，midband degeneracy は 50MHz 近傍に現れる[30]．これを避けるために，比較的高い周波数 80MHz を中心周波数としている．

Table. 5 Specification of AOD: Model 4080-13, Gooch & Housego Inc.

Item	Specification
1. Material	TeO ₂ (Paratellurite)
2. Acoustic mode	Slow shear mode, on-axis
3. Wavelength	635 (nm)
4. Acoustic velocity	617 (m/s)
5. Input Polarization	Linear, horizontal
6. Output Polarization	Linear, horizontal
7. Center frequency	80 (MHz)
8. Modulation bandwidth	8 (MHz)
9. Flatness	< 1.5dB
10. Minimum diffraction efficiency	> 50% at 500mW
11. Active aperture	2 x 2 mm

初めに，異方 Bragg 回折による入射角 θ_1 および出射角(回折角) θ_2 について，式(2.28a)および(2.28b)より近似計算した結果と，80MHz における測定結果を Fig.38 に示す．計算においては， $v = 635\text{nm}$ ， $n_o^2 = 2.26$ ， $n_e^2 = 2.41$ ， $\delta = 1.52 \times 10^{-4}$ の値を用いた．入射角と回折角の測定結果は既に Fig.37 中に記したが， $\theta_1 = 3.5^\circ$ ， $\theta_2 = 1.2^\circ$ となり，理論計算結果とよく一致している．今，周波数帯域幅を 80MHz 中心に 10MHz とすると，入射角の変化量は 0.16° と小さな値となるため，Fig.43 で後述するが，入射角調整を行わない場合でも回折効率の変化量はさほど大きくない．出射角(回折角)については，Fig.11 で定義しているが，[001]軸から反時計回りを正としている．周波数が低くなると，回折条件を満たす入射角は小さくなり，

一番低い周波数で midband degeneracy を生じる. それより低い周波数では入射角が増加し, 出射角(回折角)は負の値となるので, [001]軸から時計回りの角度となる.

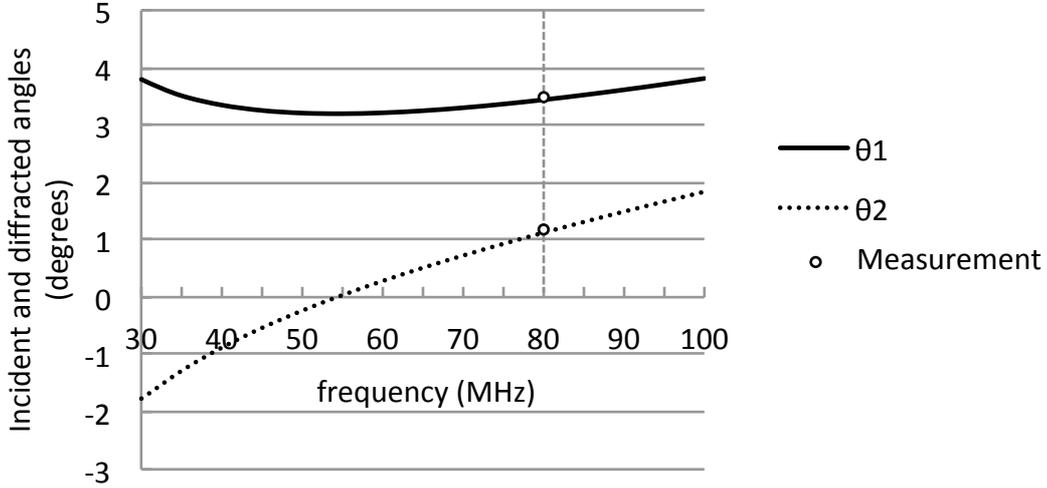


Fig. 38 Incident and diffracted angles in the condition of anisotropic Bragg diffraction.

次に, 偏光に関して評価する.

偏光固有モードに関する上記理論を検証するため, 入射光偏光面と出射光偏光面の角度差 θ_{diff} を考察する.

θ_{diff} は, Fig.37 より, 以下のように求められる.

$$\theta_{diff} = \tan^{-1}\left(\frac{\theta_d}{\theta_A}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\theta_A}{\theta_i}\right) \quad (2.56)$$

また, 入射光の偏光面の角度 θ_C が, 角度 θ_A かつ θ_i における固有モードの偏光面の角度と一致する時の角度 θ_C を θ_{Cmax} とすると, 以下のようなになる.

$$\theta_{Cmax} = \tan^{-1}\left(\frac{\theta_A}{\theta_i}\right) \quad (2.57)$$

Fig.37 で示した考察をより理解し易くするために, 角度 θ_A を変えた時に最大回折効率が得られる状態を Fig.39 に示す. 異方 Bragg 回折が成立した $\theta_i = 3.5^\circ$, $\theta_d = 1.2^\circ$ の条件で θ_A を変化させた時, 入射光の偏光面の角度 θ_C を最大回折効率となるように θ_{Cmax} の値に調整する(偏光固有モードの方向に合わせる)と, θ_C は異常光(赤矢印)の角度であり, 回折光の偏光面は常光(青矢印)の角度になる. $\theta_A = 0^\circ$ のとき異常光の角度は 0° , 常光は 90° となり, θ_{diff} は 90° となる. $\theta_A \cong 2^\circ$ の時, θ_{diff} はほぼ 0° となる.

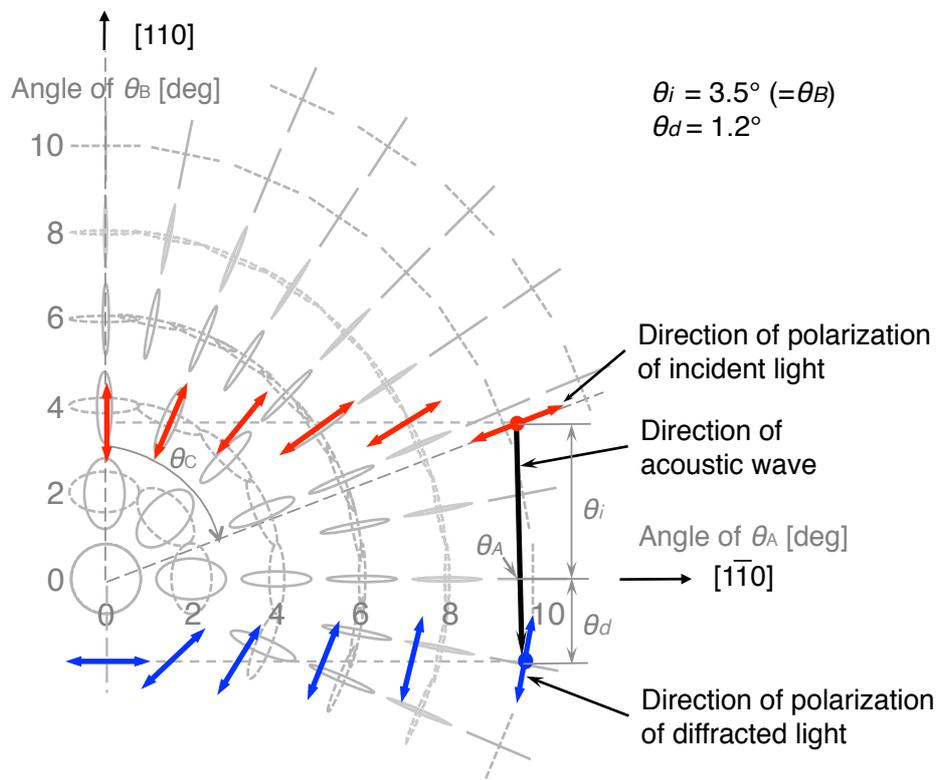


Fig. 39 State of two polarization eigenmodes of TeO₂ near the optic axis [001] and relations of polarization directions between incident lights and diffracted ones.

θ_{diff} と θ_{Cmax} の関係を示す実験結果と計算結果を Fig.40 に示す。

評価の条件は、駆動周波数 80MHz, $\theta_i = 3.5^\circ$, $\theta_d = 1.2^\circ$ である。最大回折効率が得られる時の入射光および出射光(回折光)の偏光面の角度差は、偏光固有モードが示す理論に従って変化していることが実証された。これにより、偏光固有モードによる偏光面の解析が可能となり、異方 Bragg 回折を利用した光学システム的设计において、偏光を含めた正確な设计が可能となった。これをもとに、2-4-3 章では on-axis AOD を 2 個配置した 2 次元偏向器の设计プロセスを詳説し、最適な偏光面角度の设计を実際に行なう。

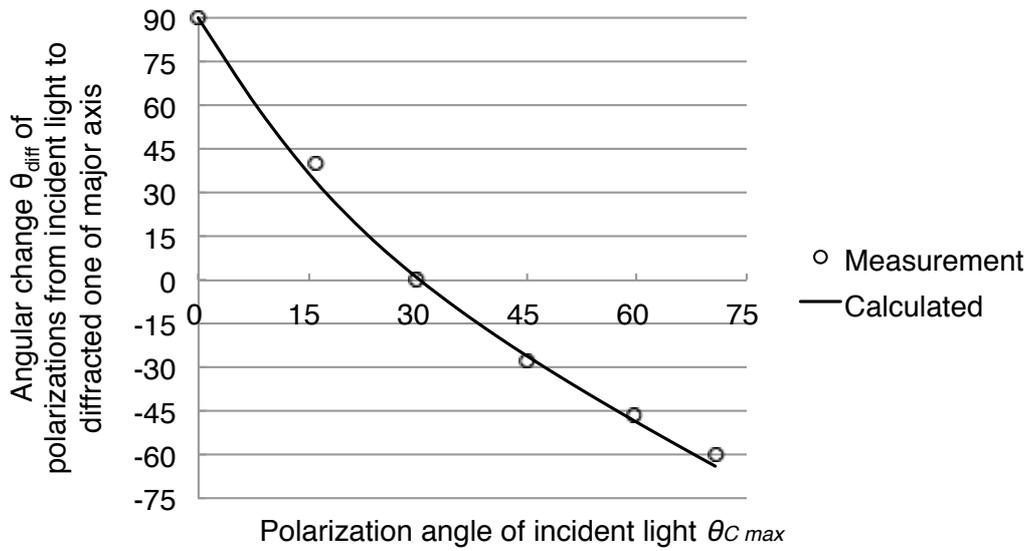


Fig. 40 Angular change θ_{diff} of polarization from the major axis of diffracted light to the one of incident light.

次に、異方 Bragg 回折のときの回折効率について考察する。

異方 Bragg 回折の場合は、式(2.40)で表される性能指数 M_e 中の n^6 の代わりに、入射光および回折光の屈折率 n_1, n_2 を用いて、 $n_1^3 \cdot n_2^3$ を適用する。従って、異方 Bragg 回折の時の性能指数 M_{ea} は、

$$M_{ea} = \frac{n_1^3 n_2^3 p^2}{\rho v^3} \quad (2.58)$$

となる[27].

最大回折効率を得るための理想的な偏光の状態($\theta_A = 9.5^\circ, \theta_B = 3.5^\circ, \theta_C = 70^\circ$)における異方 Bragg 回折の計算結果は、式(2.39)および式(2.58)より Fig.41 のように求められる。また、実測値については 0.25W の超音波パワーのとき 95%であり、計算値とほぼ同等の値を示している。TeO₂ の横波の時の性能指数 M_{ea} は 1200×10^{-15} (g³/kg), 今回使用した AOD(Model 4080-13, Gooch & Housego Inc.)の電極サイズはおよそ $L=2.0$ mm, $H= 3.5$ mm ($H/L = 1.75$)である。

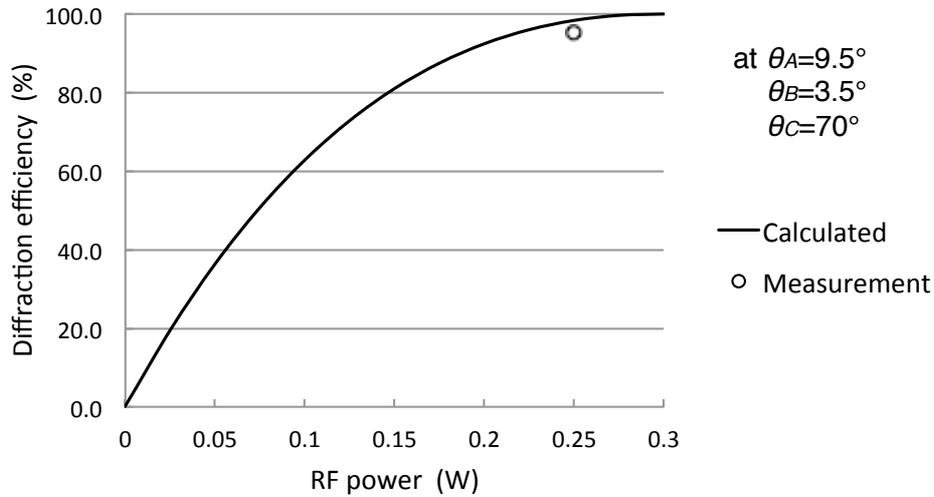


Fig. 41 Measurement and calculated results of diffraction efficiency AOD: Model 4080-13, Gooch & Housego Inc. on the condition of $\theta_A = 9.5^\circ$, $\theta_B = 3.5^\circ$ and $\theta_C = 70^\circ$.

角度 θ_A を加えた時の回折効率 η は、式(2.39)および(2.58)による 1 次回折光の効率を表す I_{1st} (第 1 項)と、(2.54)式で表される回折に寄与する偏光成分の強度比 I_l (第 2 項)との積で概略計算でき、以下のように表せる。

$$\eta = I_{1st} \cdot I_l = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0 \cos \phi} \cdot \left(M_{ea} \cdot \frac{PL}{2H} \right)^{1/2} \right] \cdot \left[\frac{\chi^2 + (1 - \chi^2) \cdot \cos^2 \psi}{1 + \chi^2} \right] \quad (2.59)$$

ここで、 ϕ は式(2.46)および(2.47)で表される θ_A と θ_B で合成される角度、 ψ は Fig.34 で示した通り、 $\psi = \theta_C - \tan^{-1}(\theta_A / \theta_B)$ で表される。また、楕円率 χ は θ_A と θ_B から式(2.41)で得られる。Fig.41 は、角度 $\psi = 0$ がかつ楕円率 $\chi \cong 1$ の条件になる。

θ_A をパラメータとして、 θ_C を 70° に固定して調整した時の最大となる回折効率の計算値と測定値を Fig.42 に示す。この時の駆動周波数は 80 MHz、入力電力は 0.25W である。 $\theta_A=9.5^\circ$ 近辺では、固有モードはほぼ直線偏光で、その偏光固有モードの角度はほぼ 70° であるので、最大回折効率は Fig.41 と同様におよそ 95 %の値が得られた。Fig. 42 では、測定値と計算値に有意な差異が見られるため、さらなる解析が必要と考える。

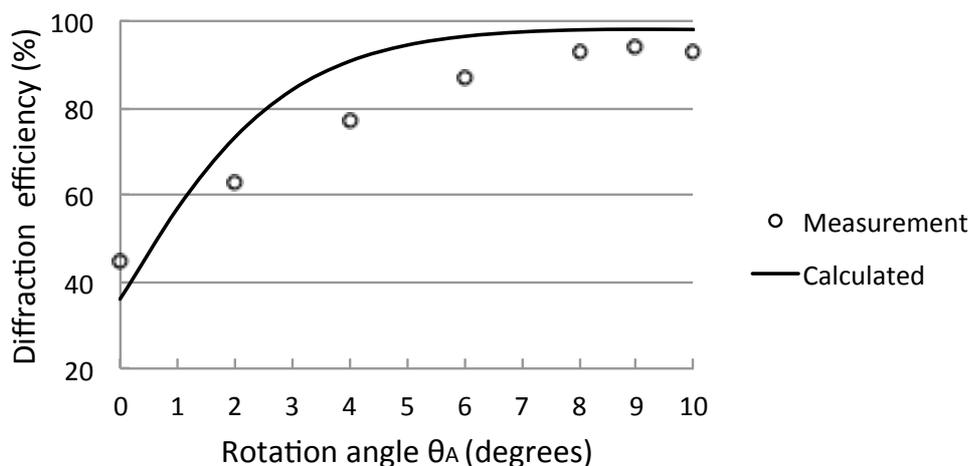


Fig. 42 The measurement and calculated results of diffraction efficiency at $\theta_C = 70^\circ$.

第4章で詳説する記録システムでは、複数の記録解像度を持ち、それぞれに対して光学倍率をもつ。AODの最大偏向量が必要なケースは72 lpmmの解像度の時で、記録面でのライン間距離が $27.8 \mu\text{m}$ 、光学倍率が0.27、偏向器後のレンズの焦点距離が50 mmのときであり、AODの最大偏向量は 0.12° となった。これに相当する帯域幅は、Warnerが示した式(2.28)から見積もると、80 MHzを中心におよそ7.5 MHzとなる。偏向器としては極めて狭帯域である。そこで、システムに必要ないくつかの補正要因やマージンも含めて12 MHzの帯域幅を持つAODを目標に研究することとした。

$\theta_A=9.5^\circ$ 、 $\theta_B=3.5^\circ$ 、 $\theta_C=70^\circ$ の時、74~86 MHzの周波数帯域での回折効率の測定結果をFig.43に示す。この測定は、 $\theta_B=3.5^\circ$ 固定で行われたが、式(2.28)で示したように、Bragg回折条件を満たす入射角と出射角は駆動周波数によって変化するため、回折条件を正確に満たすためには入射角を調整する必要がある。しかし、入射角の式(2.28)よりFig.38に示した80 MHz \pm 6 MHzのときの入射角の変化量は 0.19° となり、これに対する回折効率の変化はFig.43より83~95%になる。実際の系やシステムでは、周波数に応じて入射角を調整するのは困難であることから、 θ_B を固定することとし、回折効率が一定になるように入力電力で調整することになる。

Fig.43は、本帯域内で80%以上の回折効率を達成できる条件があることを示している。また、ピークで380 %/watt、周波数帯域の端ではおよそ330 %/wattの回折効率を示している(Fig.43, 右軸参照)。等方Bragg回折の回折効率は一般的に100 %/watt以下であるので、これと比較すると、対入力電力の回折効率が充分高いことがわかる。これは、式(2.39)および(2.59)

に示したように、回折効率が性能指数 M_e 、 M_{ea} の関数であり、 TeO_2 を縦波である等方性の回折を利用する場合、 M_e は $34.5 \times 10^{-15} (\text{g}^3/\text{kg})$ であるのに対して、異方性の回折の場合の M_{ea} は $1200 \times 10^{-15} (\text{g}^3/\text{kg})$ であるため、入力電力に対する回折効率に有意な差異が生じるためである。

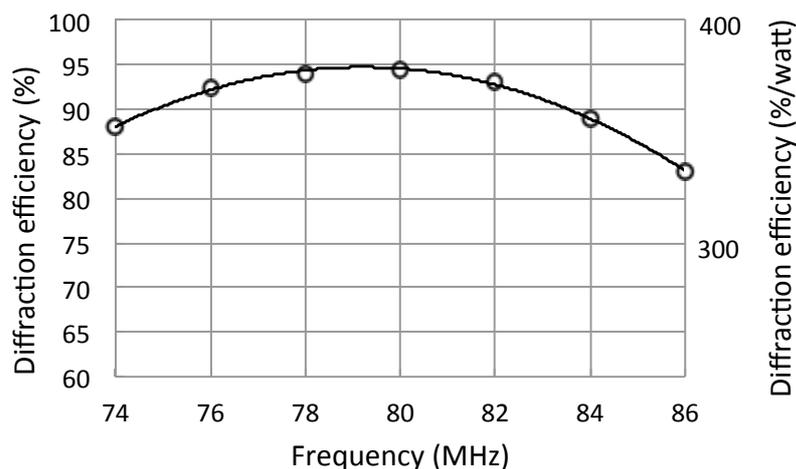


Fig. 43 The measurement result of diffraction efficiency between 74~86 MHz, RF signal frequencies at 0.25W, each at $\theta_c = 70^\circ$, $\theta_A = 9.5^\circ$ and $\theta_B = 3.5^\circ$ and the fitted curve.

以上より、[110] 軸を中心に結晶を回転(optical rotation)させ、さらに入射光の偏光面の方向を TeO_2 結晶の固有モード(eigenmode)の偏光方向に合わせる調整方法を行うことで、帯域幅の拡大と回折効率の改善が得られた。これは Table.5 に示したメーカーが示している仕様に対して、input polarization の条件を変える(horizontal ではなく 70° とする、必然的に output polarization も horizontal ではない)ことで、変調帯域幅(modulation bandwidth)が 8 MHz から 12 MHz 以上に、フラットネス(flatness)が 1.5 dB から 0.7 dB に、また回折効率(diffraction efficiency)が 50 %以上 at 500 mW から 83 %以上 at 250 mW になるという大幅な特性改善がなされたことになる。(正しくは、フラットネス 1.5dB で変調帯域幅を比較すべきで、その場合変調帯域幅は 12 MHz より広くなる。) これらをまとめて、Table.6 に示す。

Table. 6 Comparisons of the specifications shown by the manufacturer and the results obtained by the new adjustment of input polarization.

Items	Specifications	Improved results
1. Input polarization	Linear, Horizontal	Linear, 70° from horizontal
2. Output polarization	Linear, Horizontal*	Linear, -60° from the input one
3. Modulation bandwidth	8 MHz	> 12 MHz
4. Flatness	< 1.5 dB	< 0.7 dB
5. Diffraction efficiency	> 50 % at 500mW	83 - 95 % at 250 mW

* メーカーの仕様では”Horizontal”であるが、実際には”Vertical”である.

2-4-3 On-axis AOD による 2 次元光偏向器への応用と評価

前節で示したように、最大回折効率を得るためには、入射光の偏光面と回折光の偏光面の角度は偏光固有モードに従って決定される。Fig.40 の結果をもとに、上記偏光面の関係から、2次元光偏向器を構成するときの調整プロセスを Fig.44 で説明する。説明を簡略化するために、 θ_c にのみ着目する。

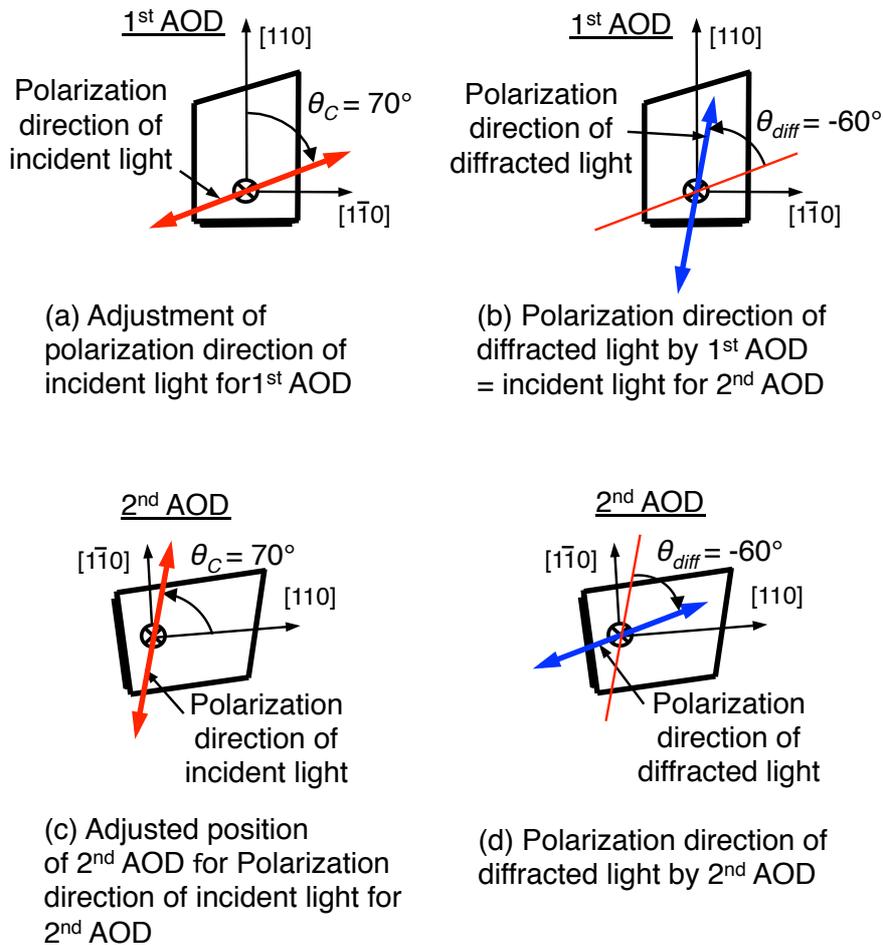


Fig. 44 Processes of adjustment on the 2-dimensional deflector with regards to a polarization angle of incident light for the 1st AOD, and an angle of the 2nd AOD for diffracted light from the 1st AOD.

まず初めに、第1のAODの[110]軸に対し $\theta_c = 70^\circ$ となるように入射光の偏光面の角度を調整する(Fig.44(a)). ここで、第1のAODと第2のAODに対する光の進行方向は、結晶軸に関して逆向きであるが、結晶構造上自然複屈折と光学活性は不変であるので問題ない。その

回折光の偏光面の角度は Fig.40 より $\theta_{diff} = -60^\circ$ として現れる (Fig.44(b)). この回折光は第 2 の AOD の入射光となるが, この偏光面の角度を, 第 2 の AOD の [110] 軸に対し, $\theta_c = 70^\circ$ になるように調整する (Fig.44(c)). 第 1 の AOD と第 2 の AOD は [001] 軸に対し逆向きに配置されているのは, 2 つの AOD の距離をできる限り近づけるためである. 第 2 の AOD の回折光は $\theta_{diff} = -60^\circ$ として現れる (Fig.44(d)). その結果, 第 1 と第 2 の AOD の交差角は 80° となる. この時, 偏向器としての理想的な交差角 90° に対し, 偏向の無効成分は $1 - \cos(90^\circ - 80^\circ)$ よりわずかに 1.5% となるので, システム設計の観点からは, わずかな RF 入力調整で回折光量補正が可能である. また, 2 次元光偏向器を出射後の偏光面の角度は入射光の偏光面の角度と一致する. これは光学系の設計上大変都合のよい特性である.

2 次元光偏向器を実際に試作し, 回折効率の測定を行なった. 結果を Fig.45 に示す. 個々の AOD に対し, $\theta_A = 9.5^\circ$, $\theta_B = 3.5^\circ$ の条件と, Fig.44 で示したプロセスで調整した結果, 12 MHz の帯域幅において, 各 0.25W の入力信号駆動で, 72~79 % の高効率を達成した. この結果は, Fig.43 に示した AOD の回折効率の特性を 2 段にしたときの単純な掛け合わせにはなっていない. これは, 第 2 の AOD については中心周波数 80 MHz で最適に調整するのではなく, 帯域内でより平坦な特性を得るように微調整しているためである.

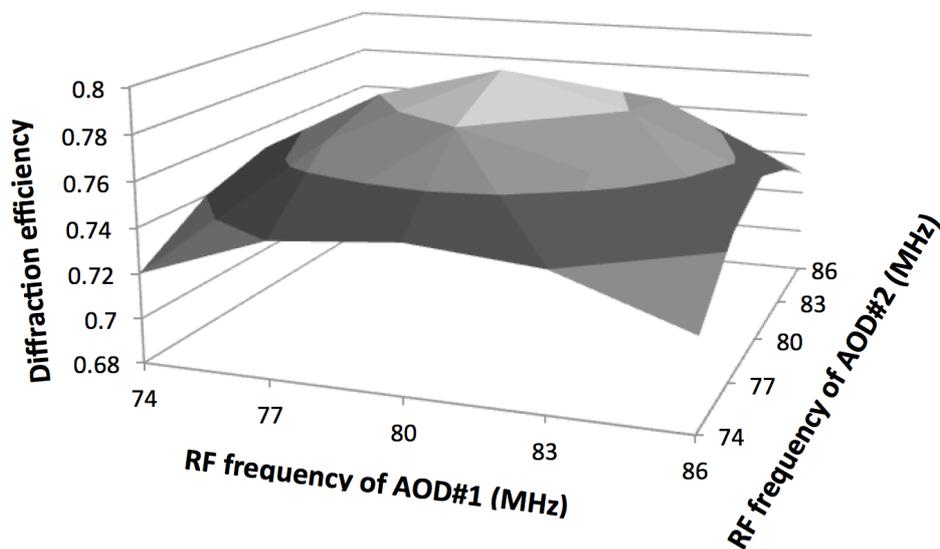


Fig. 45 The measurement result of diffraction efficiency of 2-dimensional deflector at $\theta_A = 9.5^\circ$, $\theta_B = 3.5^\circ$ and $\theta_c = 70^\circ$ for each AODs and the fitted curve.

また, 回折光の波面の品質を評価するため, 回折光の集光特性を評価した. TeO_2 における横モードでは, 音響波面の不均一性 (nonhomogeneity) に留意が必要である.

厳密には、シュリーレン法等による音響波の直接的な評価が求められるが、ここでは実際のアプリケーションにとって直接的な評価になる回折光の集光特性で判断することにした。集光特性での評価は、無収差時の計算値と実測値を二つのケースについて評価した。結果を Table.7 に示す。計算値に対する実測値の比率は、1.05 以下となり、実用上ほぼ無視できる収差であることがわかる。つまり、AOD の超音波の波面の状態がレーザー記録光学系での使用に対して十分良好であることを示している。

Table. 7 Measured result of focusing properties of diffracted light

	Calculated diameters	Measured diameters (Ratio to calculated diameters)
Case #1	17.7 μm	17.7 – 18.5 μm (1.00 – 1.05)
Case #2	26.5 μm	26.2 – 27.6 μm (0.99 – 1.04)

ここまで評価してきた 2次元光偏向器の仕様を Table.8 に示す。第 4 章で、実際のシステムに組み込み、機能を実証する。

Table. 8 Specification of 2 Dimensional light deflection unit

Item	Specification
Wavelength	635 nm
Beam diameter	ϕ 1.0 mm
Ellipticity	< 10 %
Movement of deflection	> 100 μm (Each direction, X, Y)
Resolution of deflection	< 0.1 μm
Efficiency of light utilization	> 60 % (Including diffraction efficiency and transmittance)

“Movement of deflection” and “Resolution of deflection” are the values at exposure position on a drum.

参考までに、偏向器としての重要な性能の一つである解像度(分解能)をみる。分解能はアパーチャ時間 $\Delta T (= D/v)$ と音響帯域幅 ΔF の積に等しい。従って、通常 TBWP (time-bandwidth product) として表される。

$$TBWP = \Delta F \cdot \Delta T \quad (2.60)$$

ビーム直径 D は 1.0 mm, 音響速度 v は 617 m/s であり, 帯域幅は 12 MHz であるから, TBWP は 19.4 となる. これは一般的な偏向器としてはかなり低い分解能である. 後述するシステムでの用途は, 本偏向器を主走査と同期させて正弦波駆動(掃引)することになる. 主走査を担うスピンドルミラーの回転数は 30,000 rpm (500 rps) であるため, 偏向器として基本的には 500 Hz の正弦波で駆動することが目的となる. 従って, 本システムの用途では分解能は重要ではなく, また応答性に関しても問題ない.

実際に製作した 2 次元光偏向器の写真を Fig.46 に示す.

第 1 の AOD から出射された回折光はある偏向角度幅を持つ. AOD 同士の交差角は 80° であるため, この偏向角度幅は, 第 2 の AOD に対して Bragg 回折角方向の入射角変動にはほぼならない. しかしながら, トランスデューサの高さの中央近傍に光を入射させるためには, AOD 間の距離は極力狭めて配置することが望ましい. On-axis AOD は結晶が小さく AOD モジュールを小型化できるため好都合であり, off-axis AOD に対して優位な点である.

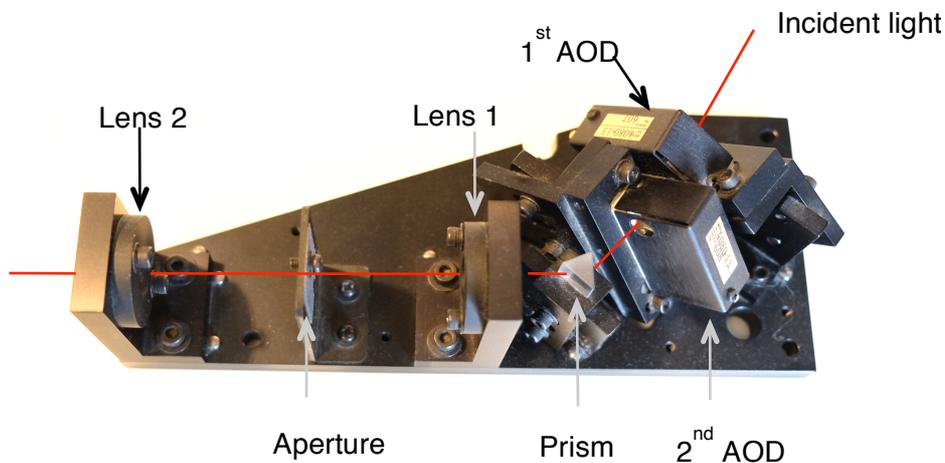


Fig. 46 Picture of 2-dimensional AOD unit with two on-axis AOD, two lenses, a prism and an aperture.

2-5 考察

マルチ周波数 AOM の原理解析および設計試作と検証を行った。

複数の RF 信号を同時に入力するときの原理と課題を解析し、phased array タイプのトランスデューサが設計通りに機能することを検証した。変調帯域幅は、実際にはトランスデューサが持つ周波数特性、特に高周波特性に依存する。変調帯域幅を広げるため、中心周波数を高くして試作を繰り返したが、製造上の安定性に課題があったため、中心周波数は 350 MHz とした。160 MHz の帯域幅で 0.7 dB 以内のフラットネスを達成しており、200 MHz の帯域幅でもおよそ 1.5 - 2.0 dB のフラットネスを確保できていることから、3 次高調波の影響と画像品質目標(エッジシャープネスなど)とのトレードオフになるが、200 MHz の帯域を利用して、ビーム本数を 5 本まで増やすことも可能である(Fig.47 に示すように、5 beams のシステムもその後上市した)。

次に、on-axis AOD について解析した。

異方性結晶の偏光固有モードの解析を従来の 2 次元から 3 次元に拡張したことより、二酸化テルル(TeO_2)結晶を用いた on-axis AOD において、直線偏光入射でも高い回折効率を得ることができることを理論的に示し、実験によって検証した。第 1 に、光軸[001]から $[1\bar{1}0]$ 軸方向に傾ける optical rotation の角度を θ_A 、光軸[001]から超音波の進行方向である[110]軸方向へ傾けた Bragg 回折角調整のための入射光の角度を θ_B 、入射光の偏光面の[110]軸からの角度 θ_C を結晶の偏光の固有モードに合わせるように調整する方法を理論的に示した。第 2 に、0.25 W 入力電力駆動かつ 12 MHz の周波数帯域幅で 80 %以上、最大で 95 %の回折効率を達成した。これは入力電力に対しては 380 %/watt となり、off-axis AOD に匹敵する高効率が得られたことを示している。さらに、2 次元光偏向器を構成するため、2 個の AOD に同様の調整と最適な偏光面の角度調整を行った結果、12MHz の帯域幅において、各 0.25 W の入力電力駆動で、72~79 %の高効率を達成した。On-axis AOD を用いた 2 次元光偏向器では、偏光固有モードを考慮した高回折効率の条件で、交差角が 80°となり、理想的な 90°交差との比較で、無効成分がわずか 1.5 %であるのも大きな利点である。また、入射光の偏光面の角度をパラメータとした回折効率の導出を試みたが、測定値との有意な誤差があり、さらなる研究が必要である。

最後に、off-axis AOD との差異について触れる。Off-axis の場合は、超音波の進行方向である[110]軸に対し、電極面を研磨し、数°の角度をつけて進行させることで、超音波は walk-off という現象により数 10°の角度をもって進行する。そのため、結晶サイズが on-axis AOD と

比較して数倍大きくなる。従って、インピーダンスマッチング回路部を含め、AOD モジュールのサイズが大きくなる。これは経済性にも直結する。また、他の光学部材と近接させる場合も、on-axis AOD のほうが有利であり、光学設計上自由度が増す利点がある。一方、off-axis AOD は aperture サイズが大きいこと、結晶軸に対して光の入射角度が大きいため直線偏光が扱えるなど、大きな利点がある。従って、on-axis AOD と off-axis AOD はアプリケーションによる使い分け、棲み分けが可能である。

2-6 結論

Phased array タイプのトランスデューサを持つ音響光学デバイスは、偏向器の広帯域化を目的として検討されてきた技術であり、通常は周波数の掃引による偏向角の拡大が研究目的であった。そのため、複数の RF 信号を同時に入力することは想定されていなかった。本章は、複数の信号を同時に入力する広帯域マルチ周波数 AOM として、基礎的な解析と実証を行った。複数信号同時入力の原理的な課題は、3次相互変調成分と光ヘテロダイン干渉(ビート)である。本章では3次相互変調成分について詳細に検討し、1次回折光と3次相互変調成分が理論通りに観測された。実際の系では、複数信号の同時入力による3次相互変調成分は入力信号数の階乗で増えるため、入力信号の電力を上げていくと、3次相互変調成分の合計は無視できなくなる。実際のシステムにおける3次相互変調成分の検討と、光ヘテロダイン干渉(ビート)の影響については、次章で行う。広帯域を持つ縦モードの AOM は、高速変調が必要なアプリケーションに有用である。次章で検討するが、redundant な帯域は様々な補正に使用することが可能である。

異方 Bragg 回折については、on-axis タイプを対象にして、固有偏光モードの解析から直線偏光入射で高回折効率が得られることを示した。従来は、入射光が Bragg 回折を満たす入射角に調整されると、適切な楕円偏光入射が必要となり、その楕円率が計算できず、実用化には向かないと考えられていた。しかし、幾つかの論文では optical rotation を与えることで回折効率の改善が示唆されていたが、本論文で初めて直線偏光での扱いが可能であることを理論的に解明し、偏光も設計可能なパラメータになることを示した。二酸化テルル(TeO_2)結晶を用いた異方 Bragg 回折では性能指数が大きいため、入力電力に対する回折効率が高く、かつ偏光面の角度を制御することで、on-axis AOD でも off-axis AOD と同等な高回折効率を得ることができることから、様々なアプリケーションへの応用の可能性が増すことの意義は大きい。特に on-axis AOD の場合は、前節で述べた通り結晶が小型になるため、光学部材を近接させることが可能である。直線偏光での設計が可能になったことにより波長板等が不要になったことも、システムへの応用の面ではメリットが大きい。また、 TeO_2 結晶は高価であるので、小さな結晶サイズは経済性の面でも大きな利点になる。今後、広く普及している off-axis AOD の用途に対し、大きな帯域を必要としない分野等では、on-axis AOD が置き換わることが期待される。

第3章 マルチ周波数 AOM を用いた平面走査型レーザー記録

システムでのマルチライン化技術の検証研究

3-1 緒言

1980年代後半から現れた製版フィルム出力機器(イメージセッター)は、DTPの発展により、それまで返しフィルムを使用して編集していた手集版がパーソナルコンピュータ上での編集になり、製版フィルムは色版ごとに1枚のみの出力となった。これにより、出力機器の性能差が画質や生産性に直結し、また各版の寸法精度およびカラーレジストレーションは出力機器が保証しなければならない機能になった。

1990年初頭のイメージセッター市場を分析する。

1990年代はイメージセッターの開発が盛んで、世界市場では10数社が参入していたが、Agfa, Linotype-Hell, 大日本スクリーン製造(SCREEN), 富士フイルムが、主なメーカーであった。記録解像度が96 lines/mmのときの、主力機種 of 記録速度の推移を上市年順にFig.47に示す。1995年以降に上市された本研究対象であるマルチビーム化機能を搭載した機種LuxSetter5600, LuxSetter5600VおよびLuxel F-9000を強調して図中に加えた。

前述の記録方式の特長と合わせ、以下に技術トレンドを示す。

- 1980年代初頭より、円筒外面走査型出力機が主流であったが、(ドラム回転数とビーム本数による)記録速度の点から、高速機は次第に円筒内面走査型出力機に移行してきた。
- 円筒内面走査型出力機の記録速度は、スピンドルミラーモーターの回転速度に依存し、かつ画質を決めるミラーサイズと回転数のトレードオフがあるため、1本ビーム記録での記録速度の限界が見えてきた。
- 平面走査型出力機は、ビームスポット径の制約から、高精細(高解像度)印刷が困難であること、また記録サイズ(走査幅)の制約のため、エントリー機としての位置付けが定着した。また、主走査を担うポリゴンモーターの回転数の増加、またはレゾナントスキャナーの共振周波数の増加に対する限界より、1本ビーム記録での記録速度の限界が見えてきた。
- 従って、円筒内面走査型および平面走査型では、マルチライン化が記録速度を大幅に向上させる重要な研究課題として注目されてきた。

本章では「平面走査型レーザー記録方式(キャプスタンドラム方式)」のマルチライン化を、次章では「円筒内面走査型レーザー記録方式(インナードラム方式)」のマルチライン化の研究について説明する。

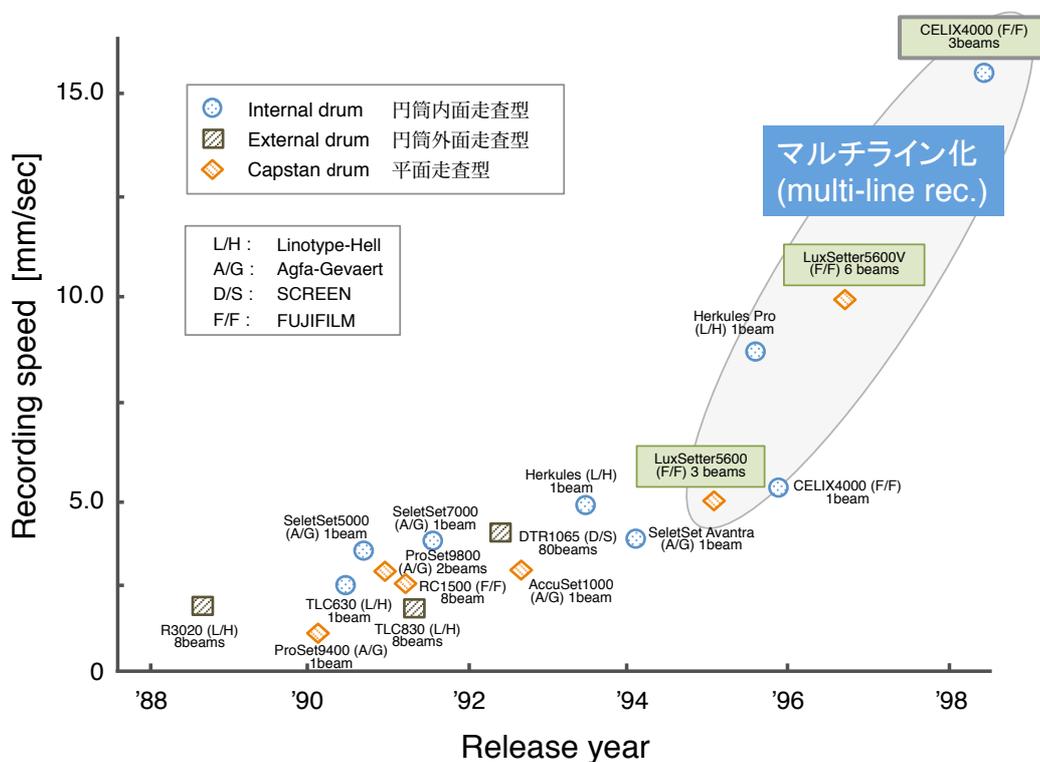


Fig. 47 Recording speed of major imagesetters in 1990s.

3-2 マルチライン化システムの研究

3-2-1 記録系の主要なシステム構成

本システムの記録系の主要な構成部材を Fig.48 に図示する。

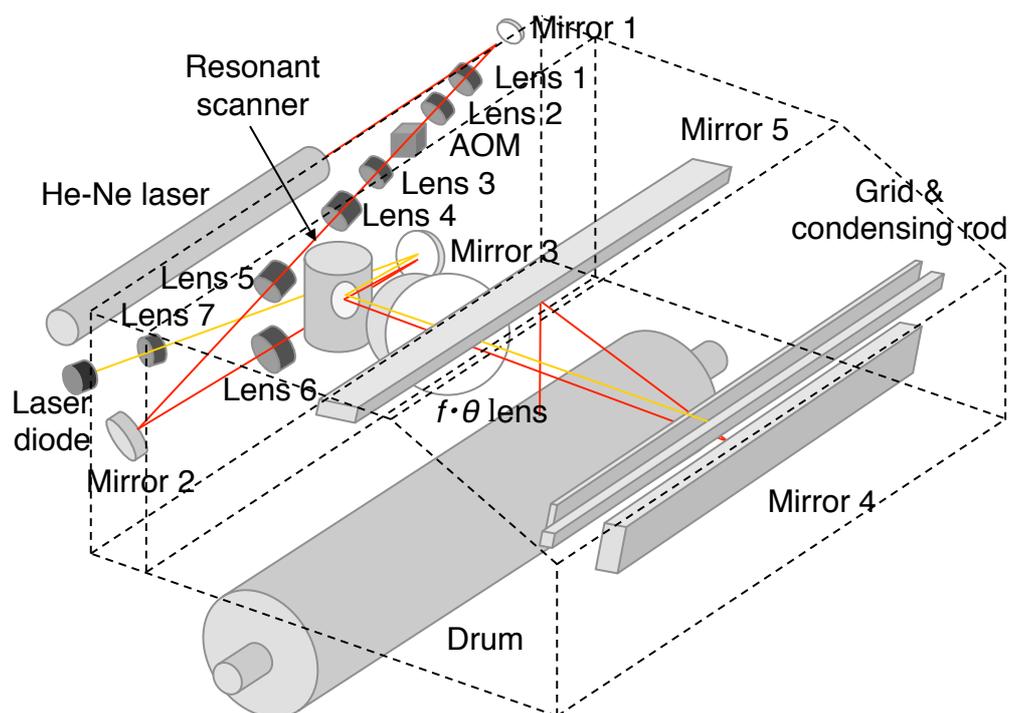


Fig. 48 Schematic of Laser Scanning Optical System.

本記録系は縦型の定盤上に主要な光学部材を配置し、側定盤を介して、長尺ミラーやドラムが固定されている。また、振動源になるレゾナントスキャナーに対しては、十分な制振構造設計を盛り込む。He-Ne レーザー、マルチ周波数 AOM、レゾナントスキャナーは交換可能部材として簡単に交換できるようマウント構造にした。主要な構成要素について、以下に説明する。

He-Ne(ヘリウムネオン)レーザー (光源)

前述の通り、He-Ne レーザーを光源として選択した理由は、光出力および発振波長(632.8 nm)が安定であることである。式(2.1)に示したように、AOM の回折角(Bragg 角)は光源の波長の関数であるが、He-Ne レーザーの温度に対する波長安定性は $1 \times 10^{-3} \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 程度であるの

で、これによる回折角変動は無視できる。

低動歪みミラー付きレゾナントスキャナー（主走査）

レゾナントスキャナーは共振型スキャナーで、回動が可能なように弾性支持された軸上にミラーを固定し、その機械的な共振を利用しているため、省電力でかつ極めて安定した周波数で駆動することが可能であり、ミラーは正弦波走査を行う。これは走査画像域で走査速度が変化することを意味する。従って、その特性に合わせて露光条件を最適化する必要がある。また、よりよい結像性能を得るためには、レーザー光のケラレがないよう、できるだけ大きいサイズのミラーを使用したいが、動歪み等とのトレードオフになる。従って、ミラーの剛性（スティフネス）を上げるための材料、ミラー形状、背面リブ構造を工夫した[36]。レゾナントスキャナーの主な仕様を Table.9 に記す。

Table. 9 Specification of Resonant Scanner

Items	Specifications
1. Resonant frequency	160 Hz
2. Oscillation angle	24 deg. (mech.& full width)
3. Mirror size	35 x 42 mm
4. Mirror reflectivity	> 90 %
5. Mirror flatness	< $\lambda/6$ (static), < $\lambda/8$ (dynamic)
6. Wobble	< 1 μ rad
7. Jitter	< 0.1 %
8. Scan line linearity	< $\pm 15 \mu$ m (f=745 mm)

高真円度ドラム（副走査）と高精度副走査送り機構

走査幅を保証する長さを持つ真円度の高いドラムでフィルムを一定速で送る。高いフィルム送り精度を確保するためには、フィルムを高真円度ドラム接触面で一定の圧力で押さえることが重要で、ニップ圧の差やフィルムとドラムの接触面積の差が送り量の誤差になり、見当精度(レジストレーション)の悪化になる。そのために、分割ニップでかつ自重のみでフィルムを押さえる方法を採用し、ドラム前後のフィルムにも余分なテンションがかからない工夫を施した。また、ドラムの高精度回転を実現するためには、むら低減のために多段減速系を採用した。

マルチ周波数 AOM

前章で基本原理と設計指針を示したが、本システムでは所望の記録速度を達成するために、3本ビームで具体的な設計を行った。マルチビーム化によって、主走査の周波数、ピクセル駆動周波数を低く抑えることが可能になる。ただし、新たに解決すべき課題(光ヘテロダイン干渉の抑制技術、ビートによる網揺れ、1次回折光変動(光の奪い合い))が生じたので、次節で詳説する。

同期制御用光学系

レゾナントスキャナーのように走査速度が一定ではない場合や、記録面(ドラム上のフィルム面)の正確な位置に記録したい場合に、記録光と同じ光路に同期用レーザー光を合波し、スキャナーで同時に走査させ、その同期光でガラス上に印刷されたグリッド(格子)を読み取ることで、主走査位置を正確に計測できる。このグリッド位置信号を利用して、記録ドットタイミングを決める。ドラムとグリッドは常に固定された位置関係にあるので、グリッド位置信号がドラム上の正確な位置を表すことになる。グリッドを通過したレーザー光はロッド中を伝搬し、両端に配置されたフォトダイオードで電気信号に変換される。

超硬調感光材料(フィルム)

ドラムキャプスタン記録方式では、長い走査長と結像レンズ($f \cdot \theta$ レンズ)の焦点距離の関係から、他の記録方式と比較して、記録面でのビームスポット径を小さくするのは困難である。ビームスポット径が走査間隔に対して大きいと解像度が落ち、またフィルム上の記録されたドットの edge sharpness は悪くなる。それを補償するのは、フィルムが持つ硬調度が重要な要素になる。硬調度が高い時、光量差に対する濃度の discrimination が大きくなり、edge sharpness は良化する。

主要なシステム仕様を Table.10 に示す。

目標の記録速度を既存装置のおよそ2倍である 5.0 mm/s (96 lines/mm の線密度時)とおいた。レゾナントスキャナーの共振周波数 f_{RS} を決定する関係式は、以下の通りである。

$$f_{RS} = \frac{v_{rec} \cdot d_l}{N_m} \quad (3.1)$$

ここで、 v_{rec} は記録速度、 d_l は線密度、 N_m はビーム本数である。

これより、ビーム本数を3本、レゾナントスキャナーの共振周波数 f_{RS} を160 Hz と決めた。

Table.10 項目9の edge sharpness for image quality(画像品質を示すキレ値)に関しては次

節で詳説する。

Table. 10 Specification of system parameters

Items	Specifications
1. Recording speed (sub-scan)	5.0 mm/s at 96 lines/mm
2. Number of beams	3 beams
3. Light wavelength for recording	632.8 nm
4. Recording length (main scan)	544 mm
5. Recording beam diameter	25.9 μm at $1/e^2$
6. Scan angle	41.8 deg (opt.& full width)
7. Pulse response time	20 ns
8. Recording light power	21 μW at 96 lines/mm
9. Edge sharpness for image quality	< 9

3-2-2 マルチ周波数 AOM に関する光学系の研究

本研究では、前述の通り、出力や発振波長の安定性の観点から、発振波長 632.8nm のヘリウムネオンレーザー(He-Ne laser)を採用することとした。この波長は感光材料の感度およびマルチ周波数 AOM の材料である TeO_2 の透過波長域に対しても適している。しかし、ヘリウムネオンレーザーのようなガスレーザーは光出力が一定になるようにフィードバック制御されており、所望の周波数やデューティ比での変調機能を有しない。そこで、on/off 変調させる機能は、マルチ周波数 AOM に持たせる。

レーザー光の集光特性について検討するため、必要なパラメータの関係を Fig.49 に図示する。

レーザー光の広がり半角 θ は以下の式で表される。

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi d_0} \quad (3.2)$$

θ は広がり半角、 λ はレーザーの波長、 d_0 はビームウェスト半径を示す。また、入射ビーム半径 D は以下の式で表される。

$$D = F \cdot \theta \quad (3.3)$$

F は集光レンズの焦点距離である。式(3.3)より式(3.2)は以下のように表される。

$$d_0 = \frac{F\lambda}{\pi D} \quad (3.4)$$

これがレーザー集光光学系の理論回折限界であり、集光スポット径(ビームウェスト径)が決まる。

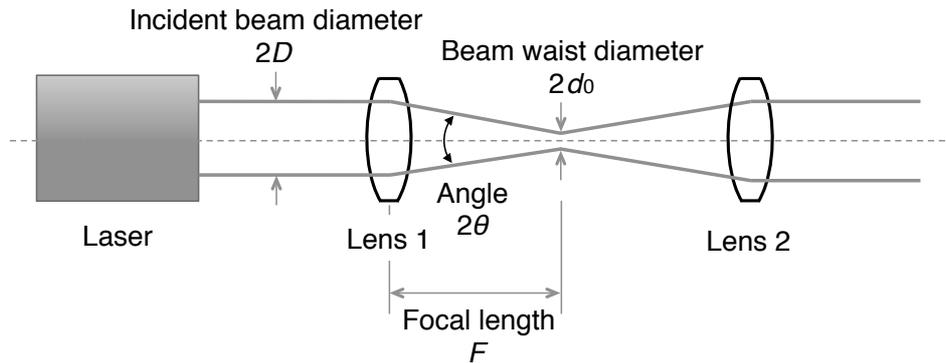


Fig. 49 Definitions of parameters regarding focusing a coherent light.

マルチ周波数 AOM 前後の光学系と感光材料がある記録面での集光されたレーザー光の間隔 Δl_{ex} とスポット径 d_{ex} の関係を Fig.50 に示す。

帯域幅を決めるには、記録面で隣接するレーザー光の間隔 Δl_{ex} から決定する必要がある。 Δl_{ex} は以下のように計算される。

$$\Delta l_{ex} = \Delta\theta \cdot f_{AOM} \cdot M \quad (3.5)$$

ここで、 $\Delta\theta$ は隣接するレーザー光の回折角の差である。 f_{AOM} は AOM の後のレンズ（射出レンズ）の焦点距離、 M は AOM 射出レンズ以降の光学倍率である。走査光学系の場合は幾つものレンズをリレーしていく必要があるため、それらの総合的な光学倍率を指す。また、最終記録面でのビームウェスト径 d_{ex} は以下で計算される。

$$d_{ex} = \alpha \cdot f_{AOM} \cdot \frac{M}{d_{AOM}} \quad (3.6)$$

ここで、 d_{AOM} は AOM 内ビームウェスト径、 α は補正係数である。システム仕様として、記録ビームウェスト径をおよそ $26.0 \mu\text{m}$ 、 f_{AOM} を 15.0 mm 、総合的な光学倍率は縮小系であるのでおよそ 0.2 とする。一般的な印刷機器の解像度である 96 lines/mm を採用すると、 Δl_{ex} は $10.4 \mu\text{m}$ であるので、 $\Delta\theta$ は 3.47 mrad となり、式(2.1)より AOM 駆動周波数差は 23.4 MHz

となる。つまり、2本ビームに分波するには 23.4 MHz、3本ビームでは 46.8 MHz の帯域が必要になる。さらにレーザー光同士の重なり画質面への影響を考慮しインターレース走査(詳細は後述)を行う場合は、その2倍の 93.6 MHz の帯域幅を確保しなければならない。これがシステム設計を成立させる最小帯域幅となる。

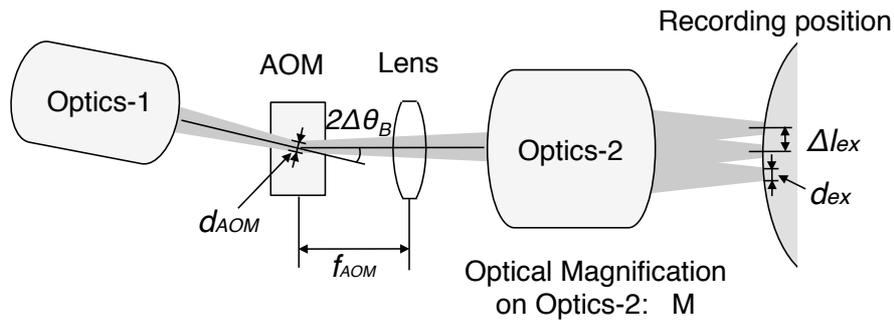


Fig. 50 Schematic of the optics around AOM and the definition of d_{AOM} , f_{AOM} , and D_{lex} (beam distance) and d_{ex} (beam diameter) at the recording position.

3-2-3 平面走査型マルチビーム記録光学系の研究

光学系の基本設計を説明する。Fig.51 は主要な構成部材のみを示し、ミラーやアパーチャーなどの光学部材は省略した。本光学系が持つべき主な機能をまとめると、以下の4点である。

- 1. マルチ周波数 AOM で3つのビーム(スポット)を形成すること
- 2. 生成した3つのビーム(スポット)をドラム面上に投影すること
- 3. 3つのビーム位置とビーム径を所望の値に変換すること
- 4. レゾナントスキャナーによる偏向を行い、その走査空間を持つこと

光学レンズはフーリエ変換作用を持つ。1本のレーザー光をマルチ周波数 AOM で分離形成された複数のレーザー光は角度を持っているため、AOM 出射後のレンズを通過した後に複数のスポットとして現れる(Fig.51 中の Multi-spot position-1)。その後レンズを通過するごとに、スポット数は1個と3個の変換を繰り返すが、最終記録面(ドラム面、Multi-spot position-3)でまた3個のスポット形成状態になっていなければならない。

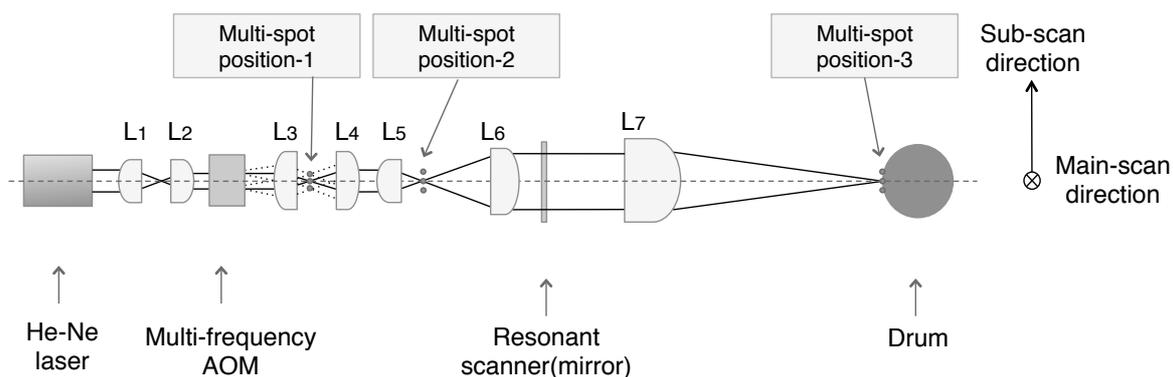


Fig. 51 Major components of the optics system and the three multi-spot positions.

最終記録面でのビーム位置(ビームスポット間隔)とビームスポット径は、式(3.5)、(3.6)で示した通り、独立に設計が可能である。最小のインターレース間隔は、96 lines/mm(10.4 μ m ピッチ)時の2倍である 20.8 μ m となる。これに必要なマルチ周波数 AOM の帯域は、レンズ焦点距離と今回設計した実際の総合的な光学倍率の設計から 50.2 MHz となり、3本マルチビーム化に必要な帯域は 100.4 MHz となった。今回開発したマルチ周波数 AOM の変調帯域幅は、Table.4 より 175 MHz であるので、充分余裕がある。

次に記録ビーム径について検討する。平面走査型光学系では広い走査長を確保するために、大きい振角と長い焦点距離が必要である。ビームウェストの直径 d_0 は、実際の光学系では有効な開口径に設計上の制限があるため、ビームのケラレにより集光性能が変わる。係数を k とし、ビーム直径 d_0 は以下のように表される。

$$d_0 = k \frac{\lambda \cdot f_t}{D} \quad (3.7)$$

λ はレーザーの波長、 D は入射ビーム直径、 f_t は集光レンズ($f \cdot \theta$ レンズ)の焦点距離である。レゾナントスキャナーのミラー径は動歪により充分大きくできないので、ケラレが生じる。この場合の k の値は、計算と実測からの修正値を用いた。最終的に、レンズ焦点距離と総合的な光学倍率、ケラレ率の設計から、できる限りスポット径が小さくなるように設計した結果、記録ビーム直径を 25.9 μ m とした。記録走査線のピッチは 10.4 μ m であるから、オーバーラップの影響は無視できない。その画質への影響については 3-4 節で検討する。

次に、回折光のパルス応答時間(立上り時間) t_r についての検討結果を示す。レゾナントスキャナーの周波数 f_{RS} が 160 Hz、走査幅が 544 mm、 $f \cdot \theta$ レンズの焦点距離 f_t が 745 mm、レゾナントスキャナーの振角 θ_{RS} は 24° (=0.42 rad)より、走査速度は $f_t \cdot \theta_{RS} \cdot 2 \pi \cdot f_{RS}$ から 313.7 m/s となり、画素周期として 33.2 ns が得られる。これが中心を走査しているときの一番速い記録画像周波数になる。パルス応答時間(立上り時間) t_r は、AOM でのビーム径 d 、音響光学

媒体中の音速を v とすると，式(2.29)に示した通り，およそ $0.65 \cdot (d/v)$ で求められるので， 19.0 ns となり，最小画素を解像可能である．また，走査幅 544 mm ，走査角 θ は $\pm (544/2)/745 = \pm 0.37 \text{ rad}$ となるので，周辺部での走査速度は $\cos(\arcsin(\theta/\theta_{RS}))$ として求められ，その結果，中央部の 0.49 倍である 155.1 m/s となる．

3-3 マルチビーム化による高速画像形成の研究

光ヘテロダイン干渉抑制とインターレーススキャン

マルチ周波数 AOM を用いたことに起因する課題を中心にその詳細と解決策を示す。マルチ周波数 AOM により分波されたレーザー光はドップラーシフトを起こしており、これらを合波するとビートが起こる。レーザー光はコヒーレンシーが高いため、入力信号の周波数差に相当する干渉が顕著に発生する。これがヘテロダイン干渉であり、光強度変動であるので、画質劣化の原因となる。

入力信号が連続波(CW)の場合、信号 $s_{1,2}$ は時間 t の関数として、式(2.31)に示したように、

$$s_{1,2}(t) = B_{1,2} \cos(2\pi f_{1,2}t + \varphi_{1,2})$$

と表される。ここで $B_{1,2}$ は振幅、 $f_{1,2}$ は基本周波数、 $\varphi_{1,2}$ は初期位相である。これより合波した2信号の光強度 I を求めると、以下のようなになる。

$$I = \langle |s_1(t) + s_2(t)|^2 \rangle = \frac{B_1^2 + B_2^2}{2} + B_1 B_2 \cos(2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_1 - \varphi_2) \quad (3.8)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は時間平均を表し、 $(f_1 - f_2)$ はビート周波数 Δf である。ビート(うなり)を時間軸で見た場合、画素周波数と比較してビートが十分に高い周波数であれば記録ドット形状に欠陥は視認されないが、画素周波数とビートの周波数が無視できない程度に近くなってくると、ドット欠陥が顕在化してくる。

まず、Fig.52 に示すように2つのガウス分布のビームがピークから強度が交差する地点までの距離を r とし、ビートを発生する成分の寄与率を計算する。

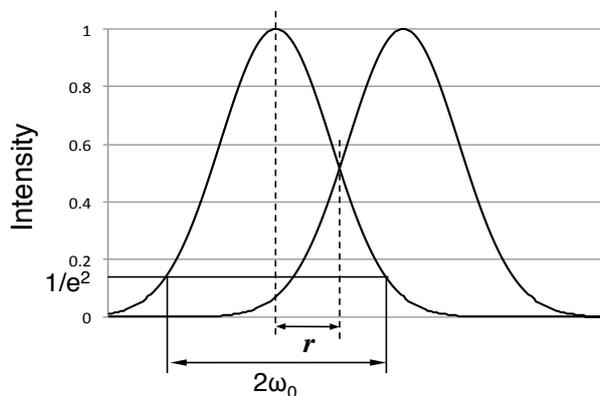


Fig. 52 Definition of $2w_0$ and r regarding two Gaussian beams.

半径 ω_0 のガウス分布を示すレーザー光の強度分布 $I(x)$ は

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-2x^2/\omega_0^2)$$

で示される。2つのレーザー光のオーバーラップされた出力成分は、 $I(x)$ を r から ∞ までを積分した値の2倍として求められる(後述 Fig.57 参照)。そのビート出力になる変動成分(Beat component)とビートの影響を受けない非変動成分(Non-beat component)を計算した結果を Fig.53 に示す。

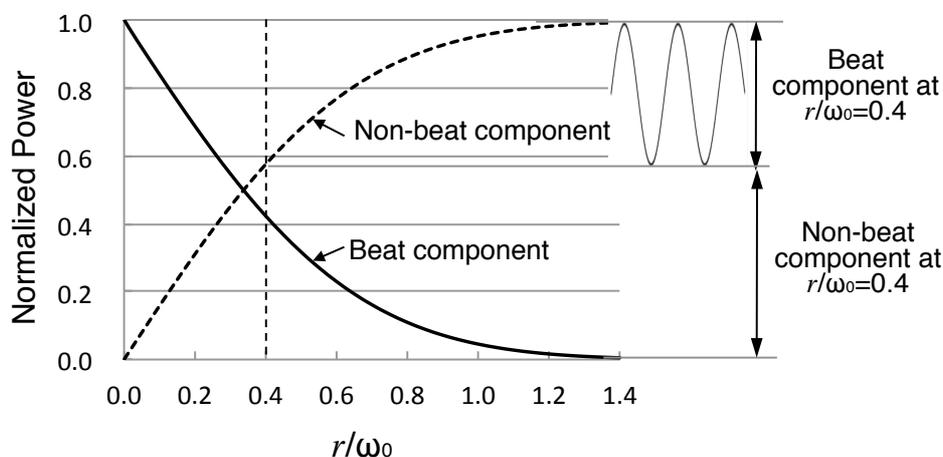


Fig. 53 Calculated results of beat effect by two Doppler - shifted beams and the status of laser power at the $r/\omega_0 = 0.4$.

記録走査面をできる限り均一な濃度で記録するためには、記録面全域で蓄積される光エネルギーが一定であることが望ましい。そのためには、2本のレーザー光は適度な間隔でオーバーラップする必要がある。一方で、最大濃度(べた露光)でビート起因のむらを見えなくするためには、非変動成分を大きく、変動成分を小さくする(Fig.52 中の r/ω_0 が極力大きな値を取る)ことが望ましいため、できる限り r を大きくすべきであり、これらの相反する要求が生じる。ノンインターレース走査では、 r は 96 lines/mm の走査線ピッチの半分の $5.2\mu\text{m}$ 、 ω_0 はビーム半径が $13.0\mu\text{m}$ より r/ω_0 は 0.4 となり、Fig.53 の右側にその時の変動および非変動成分の比率を示す通り、出力の 42 %がビートにより変動する。一方、1本おきに走査するインターレースでは r/ω_0 は 0.8 となり、変動成分は 11 %に低減される。Fig.54 にインターレース時の変動成分と非変動成分の様子を示す。それぞれの Non-beat component の比から、レーザー出力はインターレースにより 54 %有効に活用できることを示している。これがイン

ターレース走査を採用する最大の理由である。実際の光学系では、各光学部材等で発生する散乱光や迷光を含めた総合的な記録光の S/N 比とともに、必要レーザー出力を評価する必要がある。

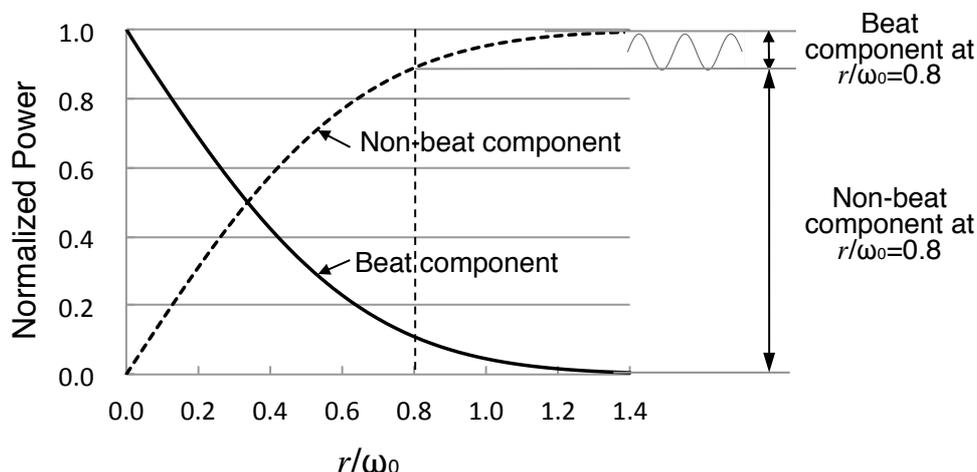


Fig. 54 Calculated results of beat effect by two Doppler - shifted beams and the status of laser power at the $r/\omega_0=0.8$.

Fig.55 にインターレース走査の方法を示す。走査する最小解像度ラインを 1 本おきに配置し、かつ 2 本分のライン飛ばしで走査することで、あるライン以降のすべてのラインを埋めることが可能である。

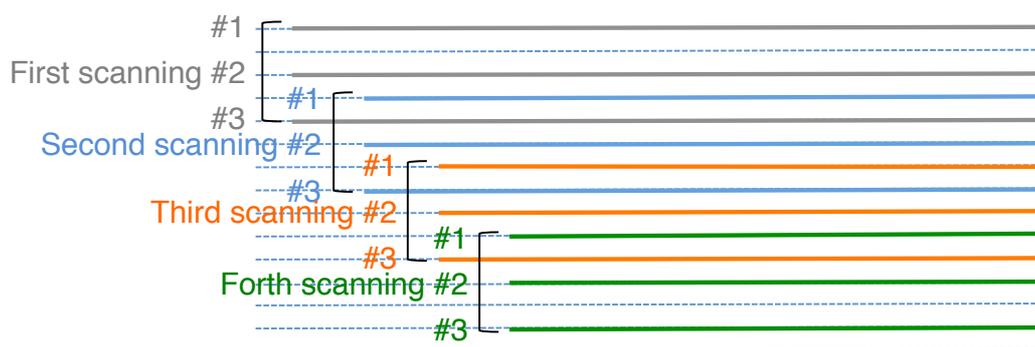


Fig. 55 Interlace scanning by three beams.

インターレース及びノンインターレース時の 2 つのレーザー光のオーバーラップしたプロファイルを示す。Fig.56 に示す。(a)はノンインターレース($r/\omega_0=0.4$)の状態であり、(b)はインターレースにより隣接のビームプロファイル(点線)を一つ飛ばしで配置された状態を示す。イン

ターレースでは、極端にオーバーラップ部分が減少しているのが、この図からもわかる。

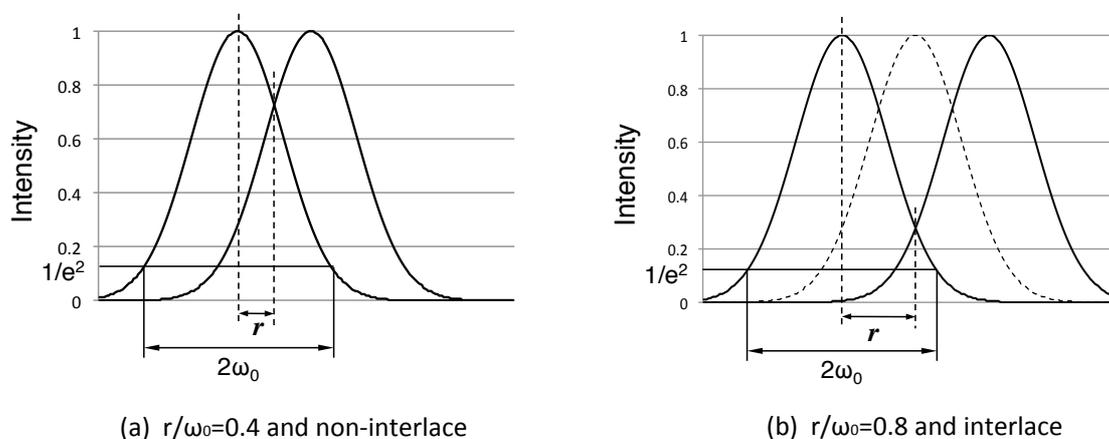


Fig. 56 States on (a) beam profiles by non-interlace and (b) beam profiles by interlace.

ここで、参考までに Fig.53 および 54 で示したビート成分計算の導出過程を以下に記しておく。

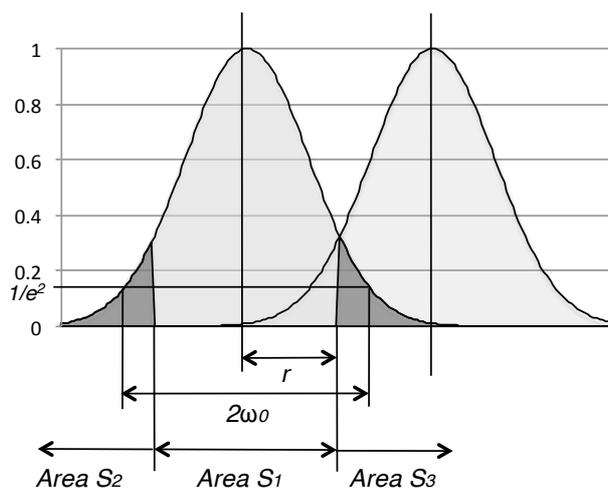


Fig. 57 Definition of a beam diameter $2w_0$ and a distance r from a peak to a intersection point of an adjacent beam.

Fig.57 に示すように、重ならない部分を Non beat component として $-r$ から $+r$ の面積 (Area S1), 重なる部分を Beat component として $-\infty$ から $-r$ (Area S2) および $+r$ から ∞ (Area S3) の範囲の面積になる。

ガウシアンビームの強度分布は、

$$I(x) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2x^2}{\omega_0^2}\right) \quad (3.9)$$

非干渉成分(non-beat component) S_1 は,

$$S_1 = \int_{-r}^r I(x) dx = 2 \int_0^r I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2x^2}{\omega_0^2}\right) dx \quad (3.10)$$

ここで, $2x^2/\omega_0^2 = t^2$ とおくと, $dx = \omega_0/\sqrt{2}dt$ であるので, S_1 は以下のようになる.

$$S_1 = \sqrt{2}\omega_0 \int_0^{\sqrt{2r/\omega_0}} I_0 \cdot \exp(-t^2) dt \quad (3.11)$$

誤差関数 $\text{erf}(x)$ は,

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (3.12)$$

であるので, 以下のように書き換えることができる.

$$S_1 = \omega_0 I_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0}\right) \quad (3.13)$$

また, ビームの全パワー S は, ガウス積分 $\int_{-\infty}^{\infty} I_0 \cdot \exp(-t^2) dt = \sqrt{\pi}$ を利用して,

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{2}\omega_0 \int_0^{\infty} I_0 \cdot \exp(-t^2) dt = \sqrt{2}\omega_0 I_0 \cdot \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \cdot \exp(-t^2) dt \\ &= \sqrt{2}\omega_0 I_0 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\pi} = \omega_0 I_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

非干渉成分(non-beat component) S_1 の全パワー S に対する比は,

$$\frac{S_1}{S} = \omega_0 I_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0}\right) / \omega_0 I_0 \sqrt{\frac{\pi}{2}} = \text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0}\right) \quad (3.15)$$

干渉成分(beat component)の合計 ($S_2 + S_3$)の全パワー S に対する比は,

$$\frac{(S_2 + S_3)}{S} = 1 - \frac{S_1}{S} = 1 - \text{erf}\left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0}\right) \quad (3.16)$$

上記計算を検証するため, ふたつの周波数 $f_1 = 432.9\text{MHz}$, $f_2 = 467.9\text{MHz}$ の RF 信号 0.5W を同時入力し, $r/\omega_0 = 0.25$ の条件のときの測定結果を Fig.58(b)に示す. (a)には, 計算結果を比較しやすいように並べて示す. 周波数差 $\Delta f = f_2 - f_1 = 25\text{MHz}$ より, ビートの周期は $1/\Delta f = 40\text{ ns}$, beat component がおよそ 60 %で, 測定値と理論値がよく一致している.

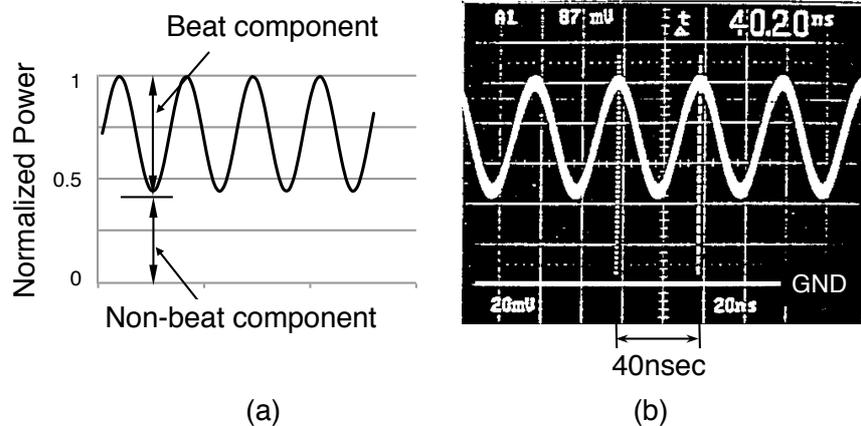


Fig. 58 (a) calculated beat effect by two Doppler-shifted lights, and (b) the measured result.

感光材料量の特性と 3 次相互変調成分の扱いおよび必要光量,

今回使用した硬調製版用フィルム（富士フィルム(株)の INTEGRA LL）の特性曲線(トーンカーブ)を Fig.59 に示す[37]. 横軸は相対的なエネルギーの対数表示である. Δdis はフィルムが十分な濃度を発現し得る最小エネルギーであり, 濃度 0.2 から 2.0 の $\log E$ の距離を ΔL と定義する.

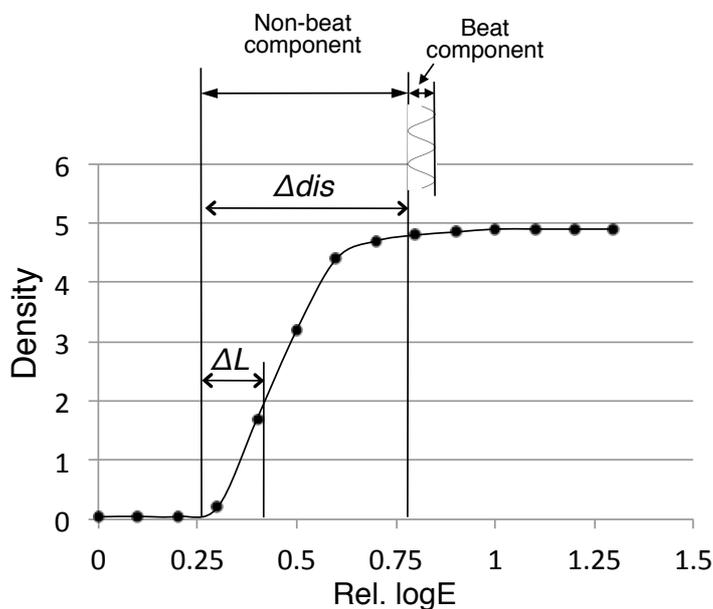


Fig. 59 Tone Curve of photosensitive material: FUJIFILM INTEGRA LL.

INTEGRA LL の感度は, およそ $5 \sim 6 \times 10^{-3}$ (J/m^2)である. 生産性目標を 5.0 mm/s の記

録速度、解像度 96 lines/mm, 3 本ビームで走査周波数 160 Hz, 走査幅 544 mm とおくと, 10 mW の He-Ne レーザーを採用することで, 0.3 % の光利用効率でよいことになる。光効率のうち, 種々の光学部材での損失をおよそ 50 % と割り当て, その他光強度補正のためのマージン 50 % とし, 総合的に 1.2 % が AOM による回折効率の最小の目標値となる。さらに, インターレース走査でも残存するビート成分(11 %)は, Dmax と呼ばれる最大濃度(Fig.59 では density がおよそ 5)が飽和している領域まで光出力を増加させることで, ビートの影響が濃度差として現れないようにする設計が必要である。

必要光量について検討する。光学系のレンズやミラー等各部材での総合的な光量ロスと, 後述する各種出力強度補正のためのマージンをそれぞれ 50 % と割付けた。Fig.59 に示した感光材料では, 感度 $5\sim 6 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ に対する露光量を確保する必要がある。このためには, Table.4, 8, 9 に示した記録に必要な露光条件と 10 mW 出力のレーザーおよび 1.2 % 以上の回折効率が必要である。この時に必要な RF 入力 は 12 mW(11 dBm)であり, 3 次相互変調成分との光量差は Fig.28 より 30 dB 以上確保できている。

以上より, 3 本ビームでインターレース走査に必要な変調帯域幅, パルス応答時間, 最終記録面での集光スポット径のすべてが成立する設計が可能である。

画像品質の評価

感光材料に対する画像品質の評価は主に,

- ① エッジシャープネス (edge sharpness)
- ② むら
- ③ 階調再現性 (トーンジャンプ, ハイライト部のとび, シャドー部のつぶれ)
- ④ 単版モアレ

の項目について行った。

エッジシャープネスは, 感光材料と記録光学系のハードウェア特性で決まる評価指標であり, ②~④の 3 評価項目は出力された評価画像をもとにした画像品質評価項目になる。出力機器設計において最も重視したのが, 高濃度領域の平網でのむらの評価で, これも主にハードウェアの特性で決まる。単版モアレは網(スクリーン)設計の重要な評価項目で, 主に画像形成アルゴリズムの課題となるが, エッジシャープネスの影響も強く受ける。②~④の 3 つの評価項目は, 製版, 刷版, 印刷のそれぞれの工程で個別に確認し, 保証する方法が一般的である。また, より主観を排除した評価にするために, 限度見本を作成し, 対象サンプルとの比較評価を基本とした。網設計に関しては本論文の研究内容に含まれないので, 参考文献[38]

を挙げておく。

① エッジシャープネス

感光材料とその画像品質の評価指標として、記録ドットのエッジ部分における濃度の傾きを edge sharpness(エッジシャープネス)とした独自の指標を用い評価した。エッジ部分の濃度の傾きにより、ドット形状の鮮明さが決まり、それがドットゲイン(ドットの太り・広がり具合)、ざらつき、外乱(熱による乱流など)に対するトレランスに影響する。その定義を Fig.60 に示す。

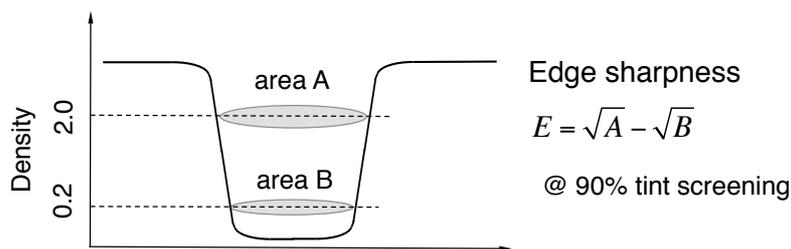


Fig. 60 Definition of “edge sharpness.”

網の線数が 175 線, 90 %の平網につきマイクロデンシトメーター(濃度計)でマイクロな濃度分布を計測し, 10 %の白地部分の濃度 2.0 の断面積 A, および濃度 0.2 の断面積 B を求め, エッジシャープネス E を

$$E = \sqrt{A} - \sqrt{B}$$

と定義した。従って, 値が小さいほど, 濃度変化が急峻でキレのいい画像であることを示す。

記録ビーム径の違いによるエッジシャープネスについて, 4 種類の感光材料を ΔL (Fig.59 参照)で表して評価した結果を Fig.61 に示す。ビームスポット径は 15 μm , 25.9 μm (今回の設計値), 30 μm の 3 種類で記録後測定した結果, ビームスポット径のエッジシャープネスに対する影響は大きく, ビーム径が小さいほどエッジシャープネスが小さな値を示し, 良好な画質が得られる。今回の画質目標はエッジシャープネス 9 以下(Table.10)としたので, 記録ビームスポット径が 25.9 μm かつ $\Delta L=0.30$ 以下の感光材料で達成できることがわかる。

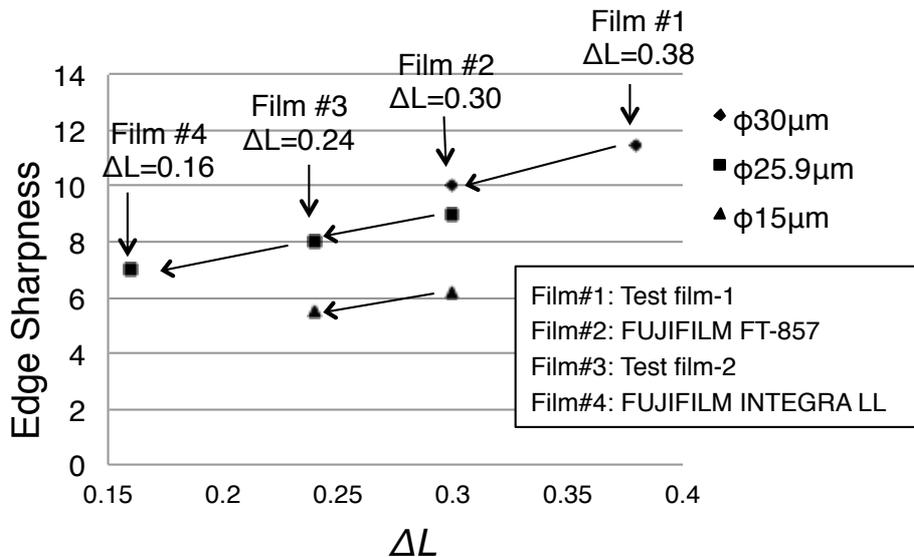


Fig. 61 Edge sharpness of the films with different ΔL .

② むら

高濃度領域の平網 (93 - 95 %の領域を使用)でのむらは微小な濃度差により発生する。その原因は、走査しているレーザー光をよぎる風・陽炎による屈折現象や、副走査送りむらなどである。この高濃度域での微小な濃度差を一般の濃度計で計測するのは困難であり、また人間の目による視認感度のほうが高いため、目視検査を行った。製版である銀塩フィルムの場合はライトテーブルを使用し透過光で目視し、刷版(CTP)の場合はカラービューワー(色見台)等を使用し反射光で目視検査を行う。

③ 階調再現性

十分な解像度(網点を構成する画素数)がある場合はリニアな階調再現が可能であるが、解像度が十分ではない場合は、トーンジャンプ、ハイライト部 (0~5 %)のとび、シャドー部(95~100 %)のつぶれが発生する。

網(スクリーン)による階調再現は、出力機の露光特性や感材の特性曲線を考慮し、0%から100%までの入力画像データに対してリニアな階調特性を持つように設計する。しかし、システムの解像度の制限から、リニアな濃度変化が再現できず、例えば網点同士が繋がる時に階調が不連続になる。これがトーンジャンプである。さらに、印刷時のインキによるドット太りを逆補正するドットゲイン補正を行うが、やはりトーンジャンプは存在する。トーンジャンプの評価はグラデーションで行う。シミュレーションでも確度良く推定できるが、機差の確認も含め、視認評価も併用した。

ハイライト部 (0~5%)のとびは、ビームスポット径が大きくかつビームプロファイルなどに乱れがある時など、1ドット記録が十分に解像できない時に起こる。また、シャドー部(95~100%)のつぶれは、1ドット抜きの解像が不十分であるときに起こり、とびとつぶれの両方ともハードウェアの特性を直接的に反映する。これらもグラデーションで視認評価する。

④ 単版モアレ

単版モアレは単色版上の網点位置および形状の量子化誤差により生じるモアレ縞であり、解像度による周期成分と網点の周期成分との干渉で計算できる。これも感光材料と記録光学系のハードウェア特性に大きく依存する。この評価も限度見本を作成し、視認評価を行った。

画像品質と記録速度

本システムで採用したレゾナントスキャナーを例に、記録速度と画像品質の関係について検討する。

レゾナントスキャナーはミラー振動型偏向器であり、偏向ミラーの質量に基づく慣性力により、ミラー側縁部には動歪が生じる。この動歪量を δ 、偏向ミラーの厚さを h 、振動中心軸からの側縁部までの距離を r 、ヤング率を E 、ミラーの密度を ρ とすると、 $\delta \propto r^5 \cdot \rho / (E \cdot h^2)$ の関係にある。つまり、ミラーサイズを大きくすると、側縁部での動歪は距離 r の5乗で増加するため、それを抑制するために厚み h を増さなければならない。しかし、これは重量の増加を招き、共振のための板バネへの負荷が増大し、疲労破壊の原因になる。従って、 ρ/E が小さな材料を選択し、厚み h を減らすための背面のリブ構造の最適設計が必要になる。今回のミラーサイズは35 x 42 mmと比較的大きく、共振周波数は160 Hzで設計している。He-Neレーザー波長(632.8 nm)の時、背面に4本の平行なりぶを持たせたときのミラーの動歪量が $\lambda/2$ に対し、試行錯誤しながら得られた最適な角度を持たせた3本の背面りぶを持つミラーの動歪量は $\lambda/8$ に抑えられた[36]。これにより、ビームの歪曲を減らし、集光特性への影響を低減することが可能になる。

次に、記録速度を3倍にするため、同じミラーサイズで共振速度を3倍に上げるケースを考察する。ミラー側縁部の慣性力は、速度の2乗に比例するので、9倍になる。同じ動歪量 $\lambda/8$ を確保するためには、上記 $\delta \propto r^5$ の関係からミラーサイズを0.64倍にする必要がある。これは同じ光学系で集光すると集光スポット径が1.55倍太ることになり、エッジシャープネスなどの画像品質項目に大きな影響を与える。また、オーバーラップ率が変わるため、マルチ周波数AOMを用いる場合は光ヘテロダイン干渉に対する設計も見直さなければならない。

マルチビーム化による記録速度向上は、主走査デバイスの速度を上げない代わりにミラーサイズを大きくすることが可能であることから、記録速度と画像品質の両立が可能となる。本検討は、主走査デバイスがガルバノミラーやスピンドルミラーであっても同様であり、また記録方式が平面走査および円筒内面走査であっても共通して言える。

3-4 高画質化のための課題解決

ここまでは、開発したマルチ周波数 AOM と光ヘテロダイン干渉への対応について説明した。さらに機能および性能を高めるための制御技術について説明する。

1 次回折光変動(光の奪い合い)の補正技術

高次の高調波成分および相互変調成分は、バイアスやサイドローブのように画質の劣化をもたらすだけでなく、1 次回折光量の減少という弊害をもたらす。特に回折光の本数を増やしていくと、高次の高調波成分および相互変調成分の数がその階乗で増大し、それらに奪われる光量が増大し、1 次回折光量が減少する。これを「光の奪い合い」現象と呼ぶこととする。「光の奪い合い」によって 1 次回折光の光量が減少すると、AOM への入力電力を増大させて、減少分の光量補正が必要になる。それにより、さらに 3 次相互変調成分が増大し、画質に影響する。回折光を増やした時の回折効率の変化を Fig.62 に示す。1 つの RF 入力時の 1 次回折光強度で正規化し、ビーム本数を増やしたときの 1 次回折光強度をプロットした。本システム設計では、RF 入力信号は 12 mW で十分であるため、3 本ビームの場合は 2-3 %程度の回折光出力補正を行えばよいことになる。

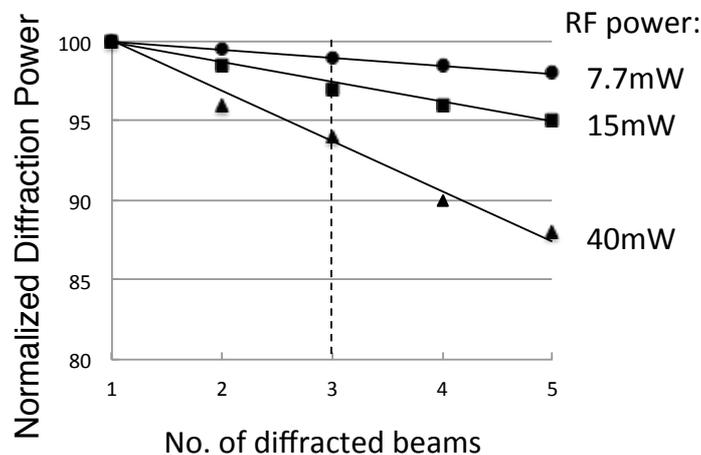


Fig. 62 Change of diffraction efficiency by number of diffracted beams.

Fig.63 に、開発した 1 次回折光変動補正系のブロック図を示す。信号数と入力電力をパラメータとして補正テーブル(Compensation Table-1)を持ち、ON になる信号の数に応じて常に一定の記録光量を保証することと、外乱による変動要因を考慮し、Photo diode により回折光を計測しフィードバックをかけることが可能なシステム構成とした。これにより、回折光

の本数による 1 次回折光量変動「光の奪い合い」の補正も含めた光量補正系はおよそ 0.4 % の分解能を有し、調整誤差を考慮して、フィルム面での光量変動を 3 % 以内に抑えた。

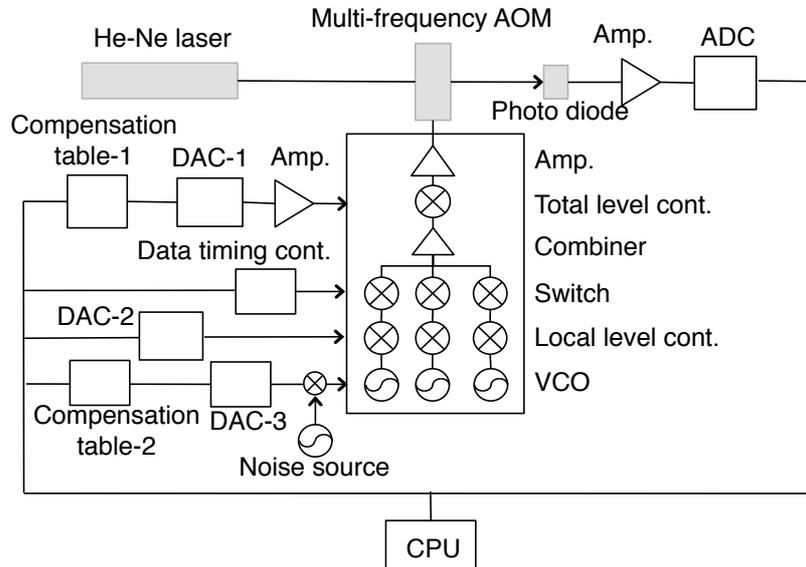


Fig. 63 Block diagram of correction system for diffractive light power deviation.

ビートによる網(スクリーン)揺れ

良好な階調や色再現を得るために、2 値化された画像データで網点パターン(AM スクリーン)を構成するのが一般的な印刷手法である(Fig.64 左図参照)。AM スクリーンにおける網点の線数は、商業印刷分野では 175 線、200 線などが一般的であり、175 線の場合は 1 網点のサイズはおよそ $150 \mu\text{m}$ となる。

3-2 節で示したように、ビートは 2 信号の周波数差 $\Delta f = 50.2 \text{ MHz}$ で発生し、走査速度 v_s は 155.1 m/s から 313.7 m/s まで変化しながら走査している。ビートの波長 λ_b は $\lambda_b = v_s / \Delta f$ であるから、 $3.1 \mu\text{m}$ から $6.2 \mu\text{m}$ まで変化する。Fig.64 右図に、画像タイミングの基準信号(Pixel clock)、これを元に生成する画像信号(Image signal)、位相を表しているビート波(Beat wave-1 および-2)、その影響を受けて感光材料上に発現する濃度(Density-1 および-2)を示す。Fig.63(の中央下部)に示すように、3 つの独立した発振源 VCO (Voltage-Controlled Oscillator)の位相はランダムであり、2 信号で生成されるビートも位相もランダムである。このビートによる光強度のわずかな変動がフィルム上で網点のエッジの揺れとなり、不規則なむらとして視認される。この対策として、常に AOM に入力する RF 信号に微弱なホワイトノイズ(Fig.63 中の Noise source)を重畳することにより、ビートの周期より極めて短い周期での光強度変動を発生させ、むらとして視認できない高い周波数に変更する対策を施した。中心周波数 350 MHz に対し、およそ 3 MHz 幅の変動が発生するホワイトノイズを重畳した RF

信号をスペクトルアナライザーで測定した結果を Fig.65 に示す。これは 2 信号の周波数差 $\Delta f = 50.2\text{MHz}$ に対し、およそ $\pm 6\%$ の変動、つまり $20.8\ \mu\text{m}$ の画素ピッチに対し、 $1.25\ \mu\text{m}$ の変動をランダムに与えることになる。

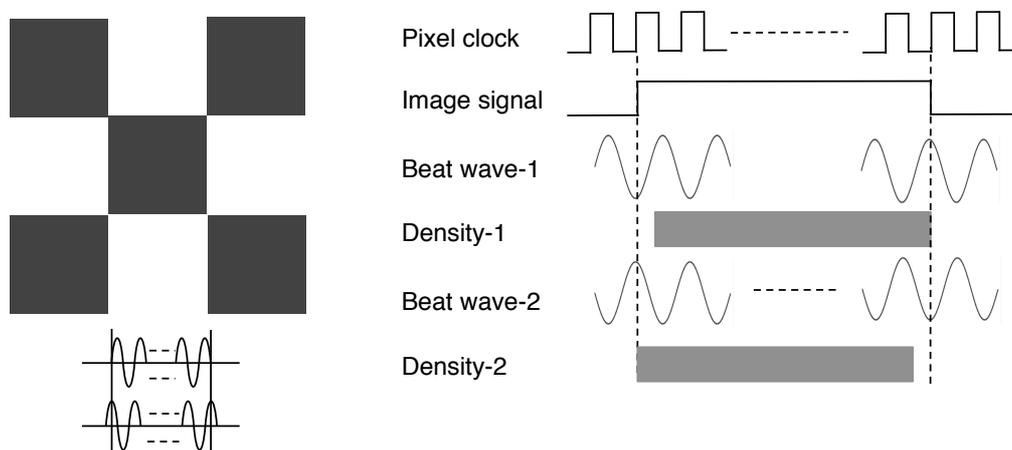


Fig. 64 Screening and image position (density) shifts by the relative position between the image signal and the phase of beat wave.

ホワイトノイズを重畳するということは、画像全般にノイズが乗り、この強度が強いと画像としてはざらつきとして視認される。従って、重畳するホワイトノイズの量は、ビートによるむらとざらつきおよびエッジシャープネスのバランスを見て決定した。インターレース走査はビートによる光強度変動を減らすことから、網揺れ削減にも大きく貢献している。

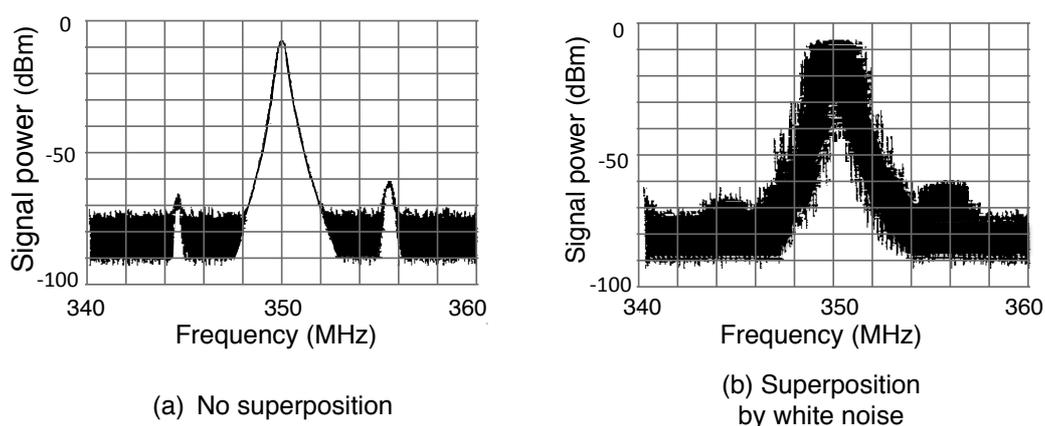


Fig. 65 Superposition by white noise approximately $\pm 3\text{ MHz}$ on RF signal of 350 MHz .

主走査曲がり補正(副走査位置補正)制御

マルチ周波数 AOM による偏向方向は、主走査方向に対し直交しているため、副走査方向

の位置補正機能を持つことが可能である。今回のシステムでは、主走査線曲がり(副走査方向へのずれ)を発生させる二つの要因がある。

1つ目は、 $f \cdot \theta$ レンズ(走査レンズ)による曲がりである。 $f \cdot \theta$ レンズに関して、ビームスポットがフィルム面上で結像し最小スポットを保证するためには、できるだけ歪曲収差を減らす設計を試みるが、微小な収差が残る。特に3本の記録ビームを同時に記録する場合、中心の走査線に対して中心をはずれた隣の走査線のズレ量はおよそ $0.6 \mu\text{m}$ となった。これが副走査むらとなる。この様子を Fig.66(a)に示す。

2つ目は、レゾナントスキャナーによる走査軌道の直線性である。Table.9 より、レンズの焦点距離 f が 745 mm のときに、仕様は $< \pm 15 \mu\text{m}$ としているが、実測では $< \pm 10 \mu\text{m}$ 程度の S 字カーブを描く。これは図形精度およびカラーレジストレーションの悪化となる。この様子を Fig.66(b)に示す。これらふたつの走査線歪みを直線になるように補正する。

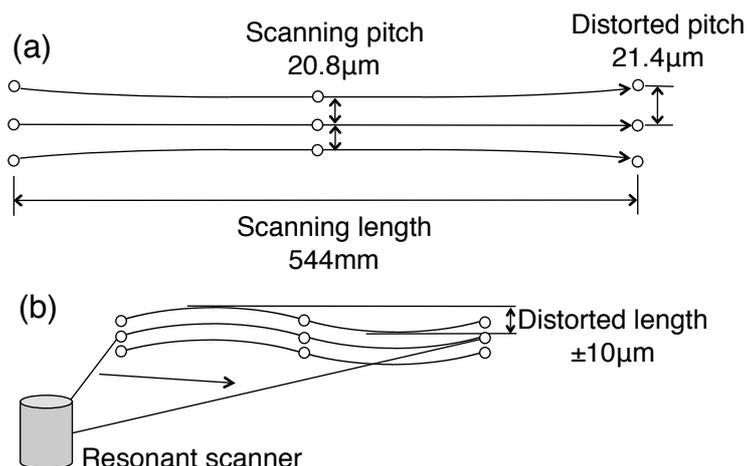


Fig. 66 Schematic of (a) bow loci by $f \cdot \theta$ Lens and (b) S shaped deformation by resonant scanner.

これらの総合的な補正量はおよそ $\pm 11 \mu\text{m}$ であるので、マルチ周波数 AOM の感度 $2.4 \text{ MHz}/\mu\text{m}$ より、 $\pm 26.4 \text{ MHz}$ の変調帯域幅の拡大が必要であり、インターレース走査に必要な帯域幅 100.4 MHz と合わせても、仕様 175 MHz 内に収まる。本補正は、Fig.63 中の Compensation Table-2 と DAC-3(Digital-Analog Converter-3)で主走査タイミングに合わせて行われ、補正帯域幅及び AOM の感度から、12 ビット制御(DAC-3)により記録面上で $0.04 \mu\text{m}$ の分解能で高精度位置補正機能を構成した。評価例を Fig.67 に示す。設計値を S 字カーブ形に設定し、図中破線で示す。実線の測定結果を見ると、主走査開始 $0 - 100 \text{ mm}$ では誤差が $10 \mu\text{m}$ ほど生じているが、これはフィルム先端部に生じる送り量のエラーの影響

が現れているが、それ以降は誤差を数 μm 以内に制御できていることがわかる。

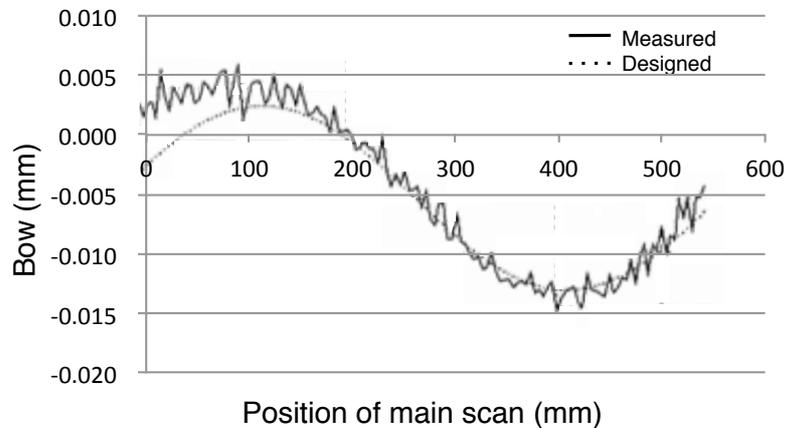


Fig. 67 Measured and calculated bow after the correction.

主走査位置補正制御

レゾナントスキャナーの走査速度変動(中心と周辺で2倍の速度差)に対する PLL(Phased Locked Loop)の遅れ誤差や追従精度により、実際の画像位置精度は数 $10 \mu\text{m}$ のずれを生じる。これを補正するため、Fig.68 に示すように、半導体レーザー(Laser diode)を同期光とし、記録光(He-Ne レーザー)とともにレゾナントスキャナーで走査し、ドラム位置と等価な位置関係になるように置いたグリッド(格子)板を透過した信号を記録用画像信号(Pixel clock)とする。そこで、画像の絶対位置を保持するように記録用画像信号にプログラマブルディレイラインを用いてタイミング調整を行う。記録用画像信号に対し 4 ns の分解能で設計し、フィルム上での描画位置に換算すると $0.5 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 相当になる。これにより、見当精度(レジストレーション精度)および絶対位置精度に関して、フィルム上の画像位置で $10 \mu\text{m}$ 以下の誤差に追い込むことが可能となった。主走査累積誤差のサンプル測定結果を Fig.69 に示す。

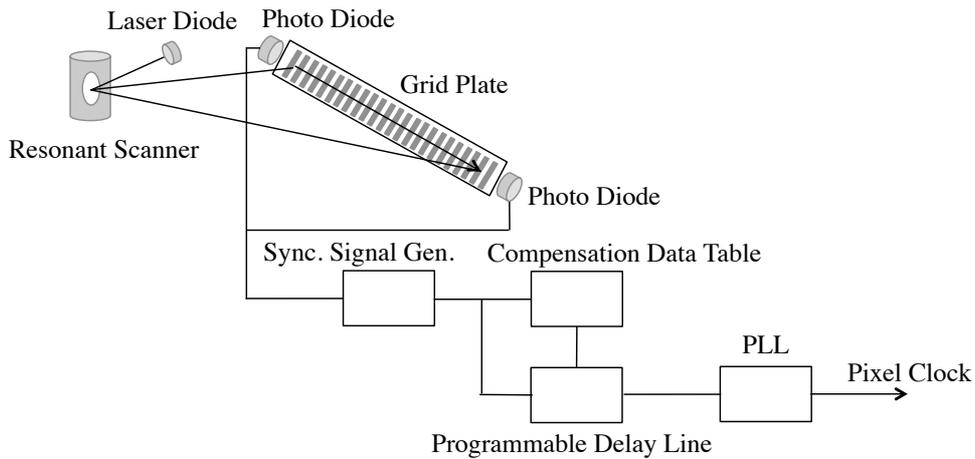


Fig. 68 Diagram of Position Correction on Main Scanning.

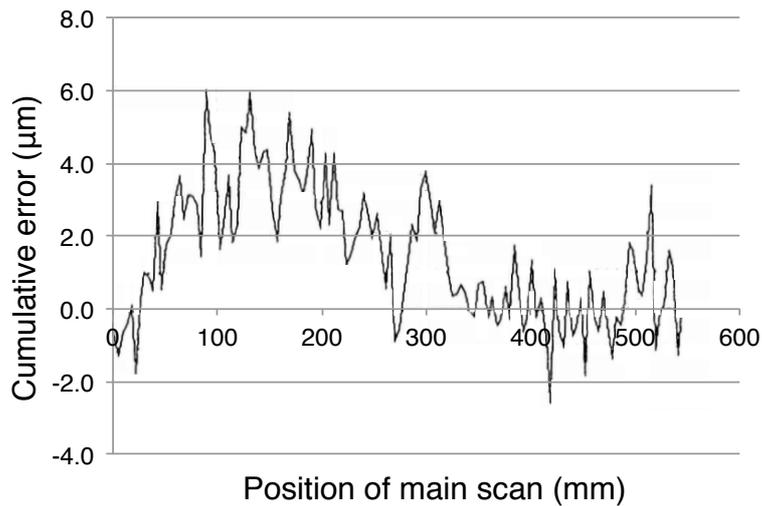


Fig. 69 Measured data of cumulative error along the main scan direction.

ドラムダイレクトフィードバック制御と副走査送りのピッチ誤差制御

フィルムを定速で搬送するためにドラムを使用するが、副走査方向の見当精度を向上させるためには極めて定速な回転制御が必要である。そのために2段減速系とダイレクトフィードバック制御によりロータリーエンコーダを含めたPLL制御を行うが、角度誤差が小さい高価なエンコーダではなく、エンコーダ信号のピッチ誤差を補正することで、安価なエンコーダの使用を実現した。まず、この回転速度制御で安定した回転を保证する。

また、レゾナントスキャナーには上から見てNSに着磁した円筒磁石があり、左右にコイルを配置している。片側のコイルでドライブ、逆側のコイルで電磁誘導による磁石の移動角度をセンシングし、出力が一定になるようにフィードバック制御している。本レゾナントスキ

ャナーは160 Hzのメカニカルな共振を利用して設計されているが、板バネの加工精度上個体差があり、わずかながら共振周波数が異なる。従って、本システムはレゾナントスキャナー基準で印字動作が決まるように設計している。これがフィードバック制御の大きなループが必要な理由である。

以上、種々の補正系について説明したが、この他に、フィルムを定速で搬送するためのドラムダイレクトフィードバック制御と副走査送りのピッチ誤差制御、高精度ドラム回転を実現するためのエンコーダによる減速系のフィードバック制御を盛り込み、またフィルムへのストレスを軽減するため自重型分割ニップローラーを採用した。これらを搭載することにより、副走査方向の位置精度も保証し、高画質化、高いレジストレーションの達成に寄与していることも記しておく。

これらをまとめた制御系の構成を Fig.70 に図示する。

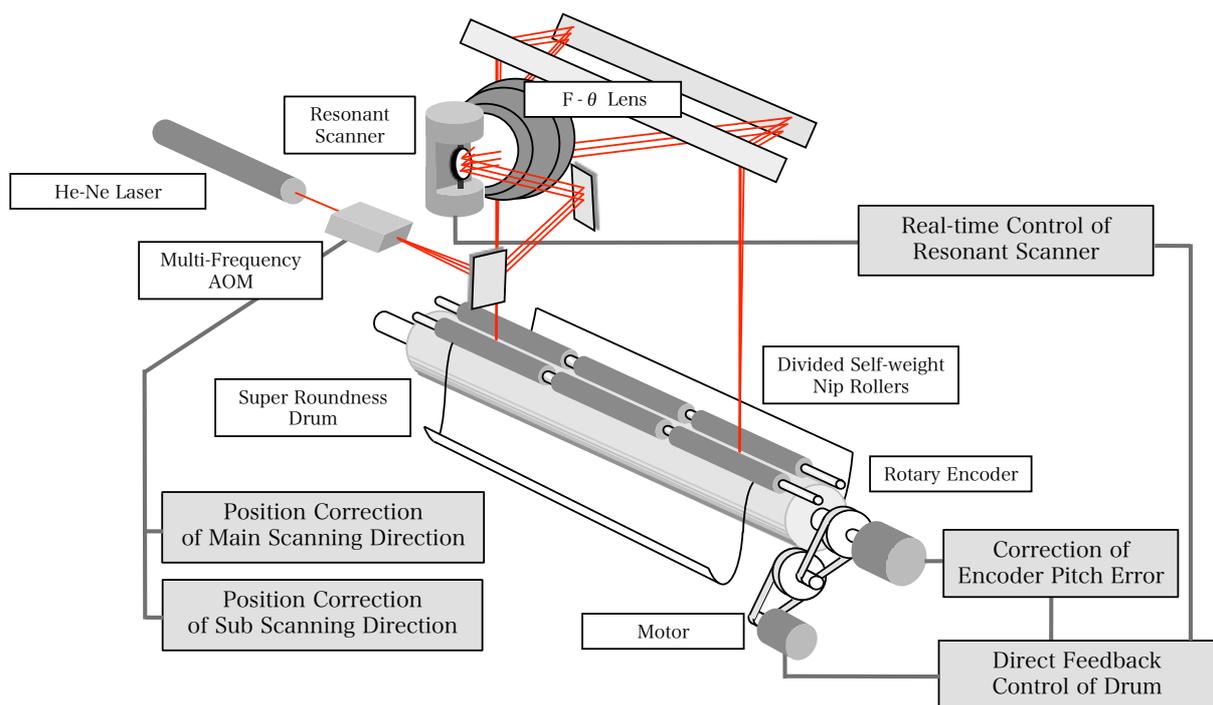


Fig. 70 Schematic of Systems by Main Components.

システム設計を行う上で、各キーデバイスに持たせる機能とそれを補正する機能を、その要求精度と経済性(コスト)を考慮しながら設計することは重要である。位置や光量など、セン

シングが可能であれば、ソフトウェアで補正系を構築することは容易であり、設計の自由度も増す。機械加工精度では追い込めないサブミクロンオーダーでのレーザー光の位置精度、設計上誤差をなくすことが困難なレゾナントスキャナーや $f \cdot \theta$ レンズによって生じる走査線曲がり誤差を計測して補正する系を構築することで、システム全体の性能や安定性を増すことが可能になった。

3-5 考察

マルチ周波数 AOM に、複数の光源生成(分波)、変調(on/off)、光量調整(適正露光量調整、シェーディング補正)、副走査方向の位置補正等、図形精度・カラーレジストレーション補正など、多くの機能を持たせ、実証した。これらの機能は、メカニカルな補正部材で構成するのではなく、電気回路およびソフトウェアで実現できるため、シンプルなシステム構成で実現した。マルチ周波数 AOM のように、複数の機能を持たせることが可能なデバイスは、システム設計を行う上で大変有用である。

マルチ周波数 AOM を活用する上で、光ヘテロダイン干渉の扱いが課題となる。光ヘテロダイン干渉は干渉計としての積極的な使用方法もあるが、本使用法では光量変動として画質に悪影響を及ぼす。実際の記録システムでは、濃度変動と網点の揺れになることを示し、感光材料の特性を考慮して設計で回避が可能なことを示し、その具体的な対処法を示した。

システム設計の観点からは、感光材料の特性(感度や特性曲線)が重要なパラメータになる。今回採用した銀塩感光材料は、感度が極めて高くかつ超硬調であったため、光エネルギーや 3 次相互変調成分については余裕をもった設計が可能であった。マルチ周波数 AOM を採用したシステムでは、感度が低い感光材料に対する設計が今後の課題のひとつと言える。今回、感光材料が超硬調な特性であることから、比較的大きなビームスポット径でもエッジシャープネスの高い画像が得られた。このように、感光材料の高い discrimination 特性が、システム設計での各設計値の余裕度を増すことになる。

3-6 結論

平面走査型レーザー記録方式(キャプスタンドラム方式)での高生産性を実現するため、マルチ周波数 AOM を採用したマルチビーム走査光学系およびその制御・補正技術を開発し、マルチビーム化による原理的な課題およびシステム化のための課題の解決方法を示した。Phased array タイプのトランスデューサを持つ広帯域マルチ周波数 AOM に、変調(ON/OFF)、光強度変調(補正)、3本のマルチビーム化(分波)、インターレース走査間隔形成、副走査むら補正、副走査方向の画像歪み補正および図形精度・カラーレジストレーション補正の機能を持たせた。音響光学デバイスは、変調のタイミング制御と入力信号の周波数の制御で、2次元的な制御が可能であることを示している。この多機能化がシステムの簡素化に大きく寄与している。

これらの技術は製版フィルム(イメージセッター)に応用され、平面走査型レーザー記録装置の3本のマルチビーム化を先駆けて実現することができ、96 lines/mm の解像度のとき、従来の出力機器の線速度 2.5 ~3.0 mm/s に対し、5.0 mm/s というドラムキャプスタン方式での最高記録速度のシステムを実現した。

マルチ周波数 AOM は高速化等に対しては有効なソリューションであったが、ドローバックとして光ヘテロダイン干渉(ビート)を起こす。光ヘテロダイン干渉によって生じる画像濃度の変動や網点のエッジの揺れに対する対策、3次相互変調成分による画質への悪影響に対する対策が必要であり、これらには感光材料の特性を踏まえた総合的な検討が必要であった。この全ての課題において技術的解決策を見出すことができ、商業印刷に耐えうる画像品質を実現できることを示した。さらに光学系の設計やマルチ周波数 AOM の性能を改善することで、ビーム本数の増加など性能の向上が見込める。

第4章 On-axis タイプ AOD の2次元光偏光器を用いた円筒内面走査型レーザー記録システムでのマルチライン化技術の検証研究

4-1 緒言

第1章で示したように、円筒内面走査型レーザー記録方式は、平面走査型レーザー記録方式と比較して、結像レンズと焦点面までの距離が短く、ビームスポット径を小さくすることが可能であることから、画像品質の面において優位である。また、フィルムをドラムに貼り付け吸着してから記録するため、見当精度(レジストレーション)がよい。さらに、本記録方式は、フィルムのみでなく、アルミニウム板のCTP(Computer To Plate)のハンドリングも容易な構造であることから、両材料の記録に使用される。

一方、本方式の技術的課題のひとつは記録速度である。記録速度を上げるためには、主走査速度を決めるスピンドルモーター(スピナー)の回転数を上げる必要があり、エアベアリングを採用して50,000rpmを超える回転数のモーターが開発されたが、モーター寿命やミラーの動歪みによる画質劣化の課題が健在化していた。このような状況下で、研究開発はスピナーの回転の高速化からマルチライン化にシフトしてきた。

円筒内面走査型レーザー記録方式のマルチライン化には、以下の本質的な課題がある。Fig.71に示すように、出射方向が固定された複数本のレーザー光をスピナーミラーに入射し、そのミラーを回転させると、3本のレーザー光の軌跡はドラム上ではすべてが直線にはならず、また平行な関係にもならない。ドラムの内面をスピナーによって半周(180°)回転させた3本のレーザー光は、ドラム上ではFig.72(a)に示すような軌跡を描くことになる。つまり、スピナーの回転中心軸上に入射されたレーザー光は直線を描くが、その周りのレーザー光は緩やかな弧を描き、直線にはならない。半周以上回転させると、3本のレーザー光は交差し、1周させると元の位置に戻る。このように湾曲した軌跡を描くため、回転するスピナーを定速移動で副走査搬送させても感光材料の全面を露光することができず、周期的なむらとなって視認される。さらに気がつくことは、3本のレーザー光の走査速度が一定ではない。たとえばFig.72(b)を見ると、半周回転した後、#1のレーザー光の軌跡は両端に位置し、走査距離が#2のレーザー光に対しピッチの2倍分長いことから、わずかながら平均走査速度が大き

いことがわかる。

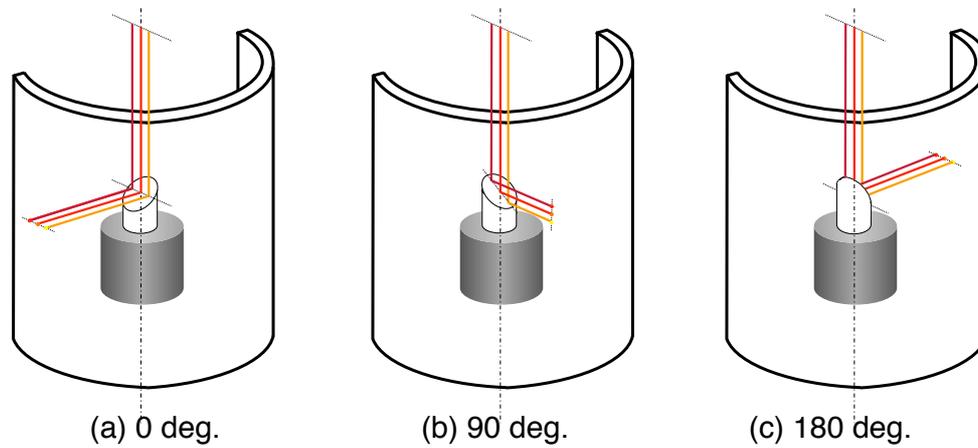


Fig. 71 Schematic of three fixed beams tilting by a spinner rotation.

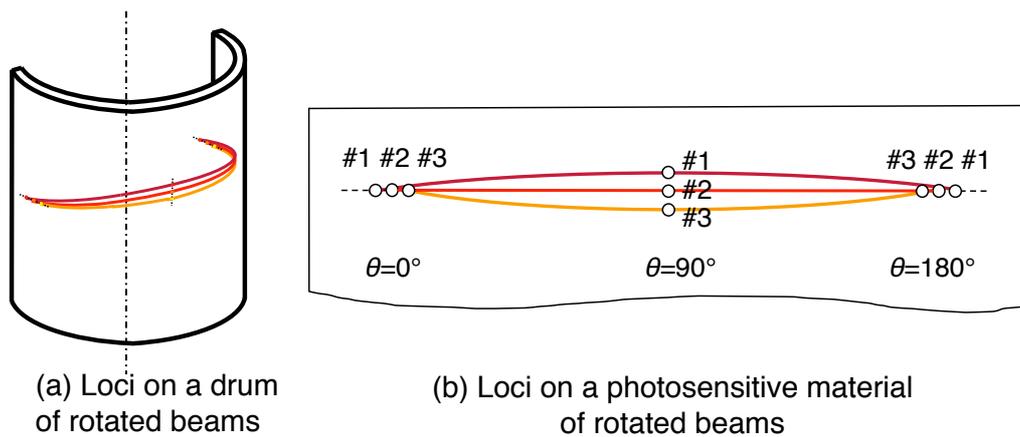


Fig. 72 Loci of three fixed beams on an internal drum.

本章では、円筒内面走査型レーザー露光装置(インナードラム方式)のマルチビーム化のための上記課題解決の研究およびシステムを構築し、検証を行う。

4-2 マルチビーム化の研究と基本設計

4-2-1 マルチビーム化の原理と方式の研究

前項で触れた通り、円筒内面走査型レーザー露光装置(インナードラム方式)のマルチビーム化のアイデアは、特許として多数出願されている。これらの方式を精査し、複数のレーザー光の配置・並べ方をもとに分類し、説明する。

(1) 複数のレーザー光を重ねてスピナー回転軸上に入射させる方式

スピナーの回転軸上に複数ビームを重ねて入射させるが、スピナーミラー付近で分離させる手段を設ける方式である。分離手段は、波長や偏光を利用する方法が提案されている [39], [40] .

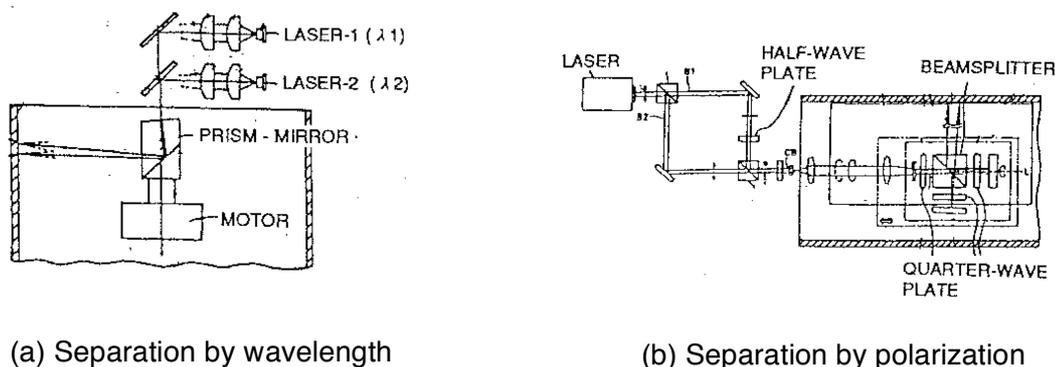


Fig. 73 Patented ideas using different wavelengths or different polarizations to separate two beams inputted on a rotation axis of a spindle mirror.

Fig.73(a)は、レーザーの発振波長の差で生じるプリズムミラーでの反射角度差を利用する。半導体レーザーの場合、単一縦モードである DBR(Distributed Bragg Reflector, 分布反射型)レーザーや DFB(Distributed Feedback, 分布帰還型)レーザーで波長を選択する方法が考えられる。温度を制御することで波長シフトおよび安定化は可能である。一方、プリズムミラーの重量はスピナーの回転への大きな負荷となる。

Fig.73(b)は、ひとつの円偏光のレーザー光源からふたつの偏光(p 偏光と s 偏光)を作り、片方のレーザー光に角度を持たせたミラーで光路を傾ける。このシステムの場合はスピナーに付随する 1/4 波長板、偏光ビームスプリッター、ミラーなどの部材が、軸のぶれなく高速回転させなければいけないため、メカニカルな設計に留意が必要であると同時に、スピナーの

回転部材の重量増加は大きな欠点になる。また、分離したそれぞれのレーザー光の光量調整機能が必要である。

(2) 複数のレーザー光の位置を固定してスピナーのミラー面長軸上に入射させる方式

複数のレーザーの位置関係を変えずにレーザー光を記録面に投影するために、スピナーが回転しても複数のビームの配列が常にミラー面の長軸上に入射させる方法がある。Fig.74 (a) に dove prism の画像の回転機能を応用したものを示す[41]。スピナーの 1/2 の回転数でかつスピナーと同期させながら、dove prism を回転させる。Dove prism とレンズを含むユニットは重心が回転軸からずれてしまうため、重量の回転バランスをとる必要がある。また、高速回転物が 2 個になる。Fig.74(b)は、スピナーミラー面をスピナーの回転軸上に配置し、回転角度とは関係なく、複数のレーザー光を同じ入射角度および同じ位置で反射する方法である[42]。この場合、ミラー重心が回転軸から外れるため、重量のバランスをとる必要があり、スピナーミラーの重量の増大につながる。

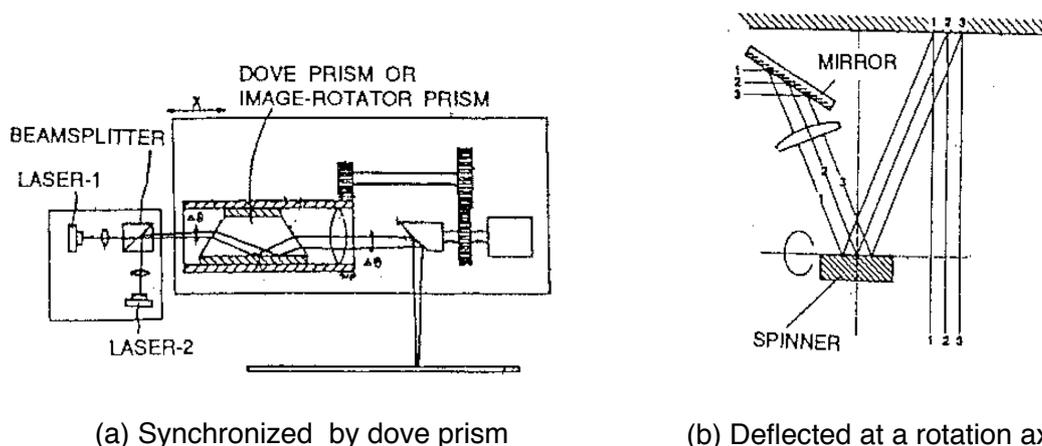


Fig. 74 Patented ideas that directions of plural beams are fixed inputed on a major axis of spindle mirror.

(3) レーザー光の角度を変えてスピナーに入射させる方式

本方式は、レーザー光の角度を変えてスピナーに入射させる方法である。つまり、ドラム上で常にレーザー光が所望の位置になるように、スピナーの回転と同期させて各レーザー光の入射角を変化させる。スピナー回転軸上に入射するように配置したレーザー光は角度を変える必要はなく、その他のレーザー光に対しては、最終的にポジショニングしたい位置を狙ったときの角度を与える。Fig.75 では、3本のレーザー光が、スピナーの角度を 0° から 180° まで、図中のドラム内面上で常に縦並びになるように、入射角度を変化させている。Fig.76

に、その時の3本のレーザー光の軌跡とドラム上においた感光材料上の記録状況を示す。

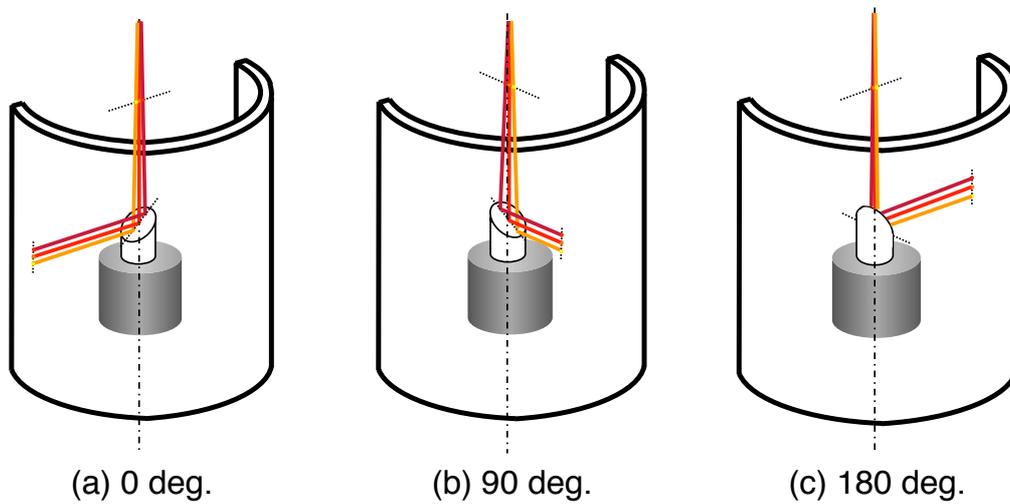


Fig. 75 Schematic of generating parallel beams by changing incident angles.

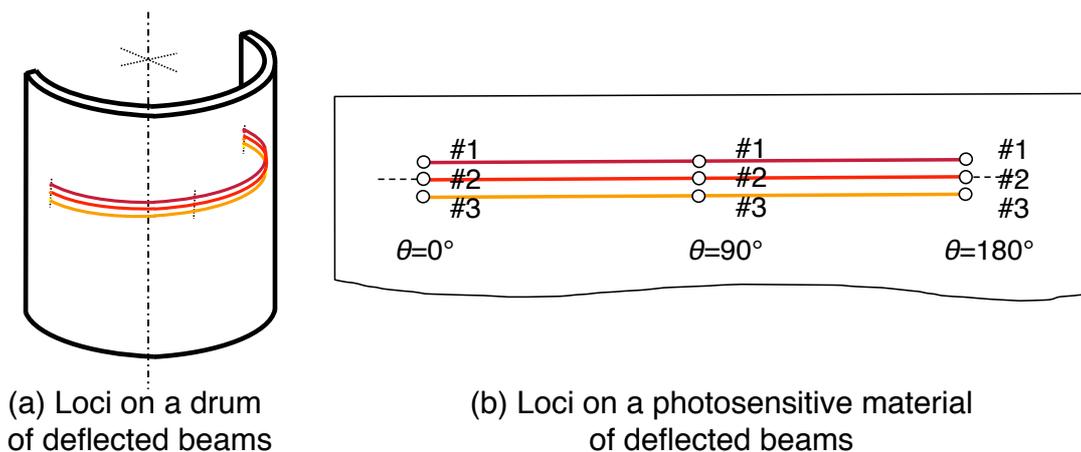


Fig. 76 Loci of controlled beams to be parallel on an internal drum.

この基本原理を実現するための角度付与(2次元光偏向)機能の与え方に幾つかのアイデアがある。それを Fig.77 に示す。

Fig.77(a)は、wedge prism もしくは hologram をスピナーと同期させて回転させることで2次元的に角度を持たせることが可能である[43]。この方式では prism や hologram の回転時の、厳しい傾き誤差精度および同期精度が要求される。

Fig.77(b)は、1本のレーザー光を偏光の違いで分割し、片方のレーザーをピエゾアクチュエータ(piezo actuator)で角度を与える[44]。アクチュエータはヒステリシスなどの補正を行う必要があるが、ふたつのアクチュエータで2次元的に偏向させることが容易である。この

構成では2本のレーザー光の構成に限定される。

Fig.77(c)は、AOD(acousto optic deflector)もしくはEOD(electro optic deflector)でレーザー光に角度を与える方法である[45]. AODおよびEODは通常1次元回折偏向であるので、2次元偏向が可能ないように2個組み合わせる。(b)と(c)の方式は、それぞれのデバイスに与える信号(の強度や周波数)で任意に偏向角度を設定できる利点がある。この機能は回転と同期した様々な偏差、収差、誤差を補正するときに有効である。

本研究開発では、筆者の特許である(c)方式を採用した。採用理由は上記利点の他に、他方式のようにスピナーと同期させる回転ユニットを設ける必要がなく、システムとしての安定性が見込めること、スピナーモータやミラーへの負荷がなく、シングルビームの時とほぼ同等のミラーでよいことが挙げられる。

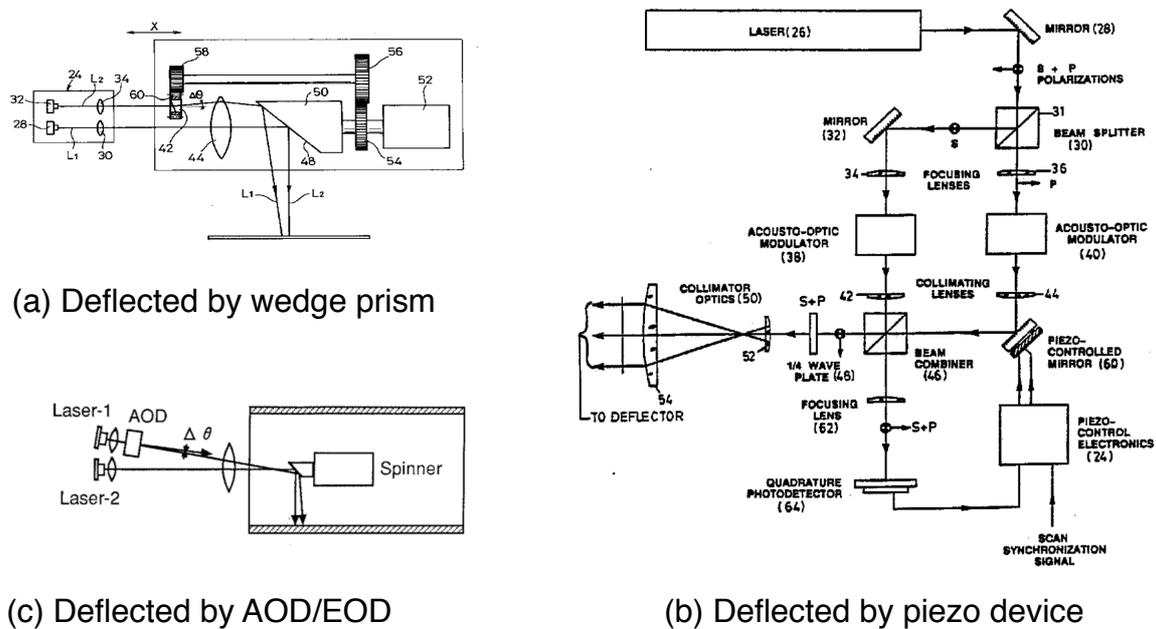


Fig. 77 Patented ideas that beams except for one inputed on a rotation axis are given angles two dimensionally synchronized with a spindle mirror rotation.

4-2-2 採用するマルチビーム方式の研究

スピナーの回転軸に対して、レーザー光に角度を持たせて入射させたときの状態を見る。Fig.78 には、スピナーミラーが 45° の角度で中心が原点に置かれ、法線が X-Z 面にある状態で、レーザー光の反射の状態を示す。(a) は回転軸 (Z 軸) 上に入射したレーザー光であり、反射光は X 軸上を通る。(b) では、X-Z 平面上で Z 軸に対して角度 θ_x を持たせて入射させた場合であるが、反射光は X-Z 平面で X 軸に対し θ_x の角度を持って進む。同様に、(c) は Y-Z 平面上で Z 軸に対して θ_y の角度で入射させた場合であるが、X-Y 平面で X 軸に対し θ_y の角度で反射する。(d) では θ_x と θ_y を加えた角度で入射した場合だが、これは (b) と (c) を合わせた角度の方向に反射光は進む。つまり、 θ_x と θ_y を加えることで、任意の方向にレーザー光を偏向することが可能である。

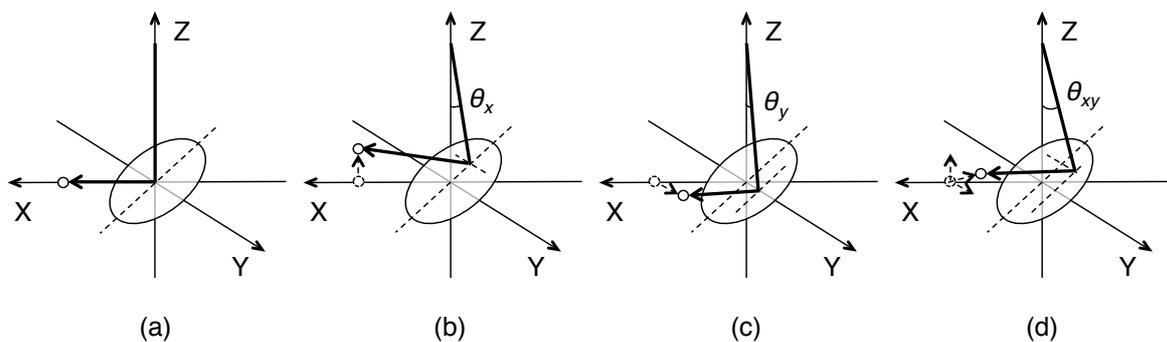


Fig. 78 Schematic of moving a beam to a proper position by changing incident angles.

Fig.72 に示した課題である $\theta = 0^\circ$ の時のレーザー光の横並び状態を縦並びにするためには、任意の角度 θ_{xy} 方向に偏向することで実現できる。

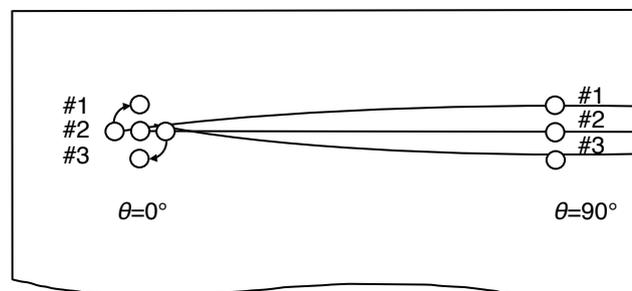


Fig. 79 Schematic to explain beam rotation.

Fig.80 に座標軸を取り直し、詳細に検討する。

3本のレーザー光をZ軸上方からレンズ(Lens)を通して並行に入射する。スピナーの回転軸はZ軸であり、ミラーはX-Y平面をZ軸に対し45°傾け、ミラーの中心は原点とする。このスピナーミラー平面の法線のX-Z平面上にある時を $\theta=0^\circ$ とし、図中上部から見た時にZ軸中心に左回りでミラー面を回転させる。Fig.80(b)は 90° 、(c)は 180° を示している。スピナーミラーで反射されたビームはある距離(ドラム面上)で結像し記録されるので、その距離の位置で常に縦並び状態を保証しなければいけない。そこで、考えやすくするために、スピナーミラーがない状態で投影される面S'を想定する。この投影面S'をFig.80(d)に示す。これより、Fig.76(b)に示したようにドラム面でビームが縦並びであるべき3本のビームの軌跡を見ると、中心のビーム#2はミラー回転軸上で出射方向は固定され、ビーム#1およびビーム#3はビーム#2を中心に回転軌道をとることがわかる。

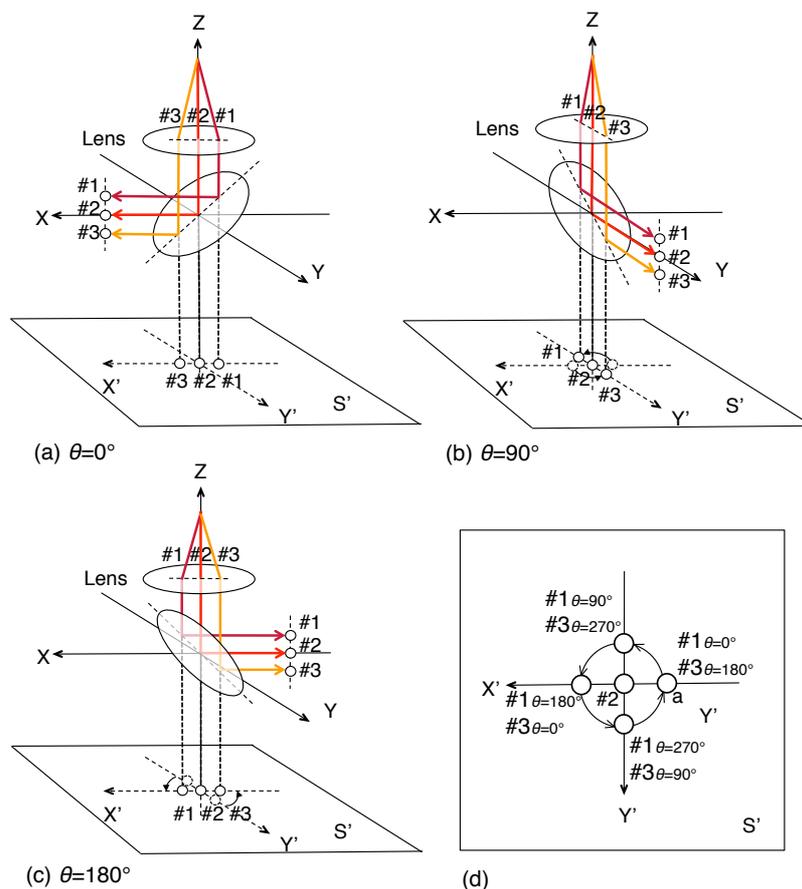


Fig. 80 Principle of generating parallel beams by changing incident angles.

Fig.80(d)に示すビーム#1とビーム#3の軌道は、振幅 a とし、角周波数 ω で回転するスピナーに同期させることにより、それぞれ以下の式で表すことができる。

$$X = -a \cdot \cos(\omega t), \quad Y = -a \cdot \sin(\omega t) \quad : \text{beam \#1} \quad (4.1)$$

$$X = a \cdot \cos(\omega t), \quad Y = a \cdot \sin(\omega t) \quad : \text{beam \#3} \quad (4.2)$$

このように、中心以外のレーザー光は、スピナーの回転と同期させながら円軌道制御することにより、ドラム上では平行な直線を描くことが可能になる。また、今回は3本のマルチビーム化を検討したが、さらに4本目および5本目を増やす場合、円軌道の振幅を $2a$ とすることで可能となる。

Fig.80 を再確認すると、Z 軸上部のレーザー光の出射点から、レーザー光#1 と#3 は2次元の偏向を行っている。しかし、レンズを通した後は3本のレーザー光は平行になり、スピナーミラーに対しては常に長軸上に並んで入射されている。これは、前節 4-2-1 に示した(2)と(3)の混合方式と言える。

4-3 システム構成

4-3-1 システム設計

システムの基本仕様を Table.11 に示す. 記録解像度を 4 種類持ち, それに応じて記録ビーム径を変える. ビーム本数は 1 から 3 本まで選択可能とした. 記録光源は発振波長が 635nm の半導体レーザーを採用し, 直接変調を行う. 主走査偏向器としては, スピナーを採用し, 安定稼働・長寿命化が見込める 30,000 rpm の回転数とした. 本回転数の設計では比較的大きなミラーを採用でき, 寿命の面でも利点がある. 96 lpmm 時において, 3 本ビームで記録することにより, 50,000rpm のスピナーを持つシングルビームの装置の記録速度 8.7 mm/s と比較し, 1.8 倍になる 15.6 mm/s の記録速度を持つことが可能になる.

3 本のビームのうち, 光学中心軸を通る #2 のビームを基準に, その周辺を旋回するように偏向させるビーム #1 および #3 はその位置関係を正確に保つ必要がある. その位置ずれ検出機能とそのずれ量を偏向量に加減算して補正する機能を持たせた.

Table. 11 Specification of an internal drum system

Item	Specification
Recording size	559 / 768 / 1067 / 1130 mm
Diameter of drum	454 mm
Resolutions	48 / 72 / 96 / 144 lpmm
Light source	635 nm Laser diode(LD), 15 mW
Beam diameters	25.0 – 31.2 / 16.7 – 20.8 / < 15.6 / < 15.6 μm for each resolution
Deflectors of main scan	Spindle mirror (a single mirror)
Rotation number of main scan	30,000 rpm
Number of beams	1, 2 or 3, selectable
Correction of beam positions	Angles Correction by 2-dimensional AODs
Modulation	Direct modulation of laser diodes
Beam position detection	PSD (position sensing detector)
Beam power detection	Photo detectors and ND filters
Photosensitive materials	Silverhalide films “LS-H” and “LS-4500” by FUJIFILM

記録サイズは B1 サイズ(728 x 1030 mm)をカバーできるように、ドラム直径とドラム長を決定する。結像レンズの焦点距離が比較的短いため、記録ビーム径を 12.5 μm まで絞り込むことが可能である。その結果、走査線密度を 144 lpmm(3,658 lpi)および 192 lpmm(4,876.8 lpi)まで上げ、高精細記録が達成できる。

光源にはレーザーダイオード(LD)を採用した。3個のレーザーダイオードはそれぞれ発振波長がわずかに異なる。その結果、前章で議論したヘテロダイン干渉やビートなどの現象を起こさないで、その対策は不要である。

前節で説明したマルチビーム化のときのビーム走査線の並行化補正は2次元光偏向器として構成された AOD で行う。選択した on-axis タイプは横モードのため変調速度が遅いため、レーザーダイオードの直接変調で対応する。これにより、nsec オーダーの ON/OFF 変調が可能となる。

マルチビーム化で新たに考慮しなければいけない点は、3本のビームが常に正しい位置にいるかということである。経時や環境(温度など)によって生じるずれは画質に致命的な欠陥をもたらすため、位置の検出と補正手段を持つことが必須となる。同時にレーザー出力の計測と補正も必須機能となる。

マルチビーム本数は、1, 2, 3本をそれぞれ選択できるように設計した。レーザーダイオード(LD)モジュールおよび2次元光偏向器は光学定盤上に位置決めピンによるモジュール突き当て方式で、ミクロンオーダーでの精度を保證する設計とした。

感光材料は超硬調銀塩フィルム(富士フィルム製, LS-H)を使用し、Edge sharpness for image quality(画像品質を示すキレ値)はほぼ5を達成した(Fig.61 参照)。

4-3-2 マルチビーム光学系設計

光学系の基本的な考え方を Fig.81 を用いて説明する。#1 と#3 の半導体レーザーユニット(LD unit)からのレーザー光は2次元光偏向器を通過し、光軸を通るように合波される。合波部はハーフミラーで構成されている。また、光量調整のためのND filterユニットを置く。このfilterのひとつでレーザー光を反射させ、Beam position detectorでビームの位置を測定する。経時的な位置変動も含め、精度よく位置情報を読み取り、変位がある場合はAODのRF駆動信号の周波数を変え偏向角を調整することで補正する。また、ND filterのあとに置いたPower detector #1 で3本のレーザー光量を個別に計測し、また Beam expander & beam diameter converter を置くことで、解像度ごとに光量と記録ビーム径を切り替える。その後 Periscope mirror でレーザー光を円筒型ドラム内面に導き、Spinner mirror でほぼ 90°反射させてドラム内面を走査し、carriage で副走査を行う。Power detector# 2 は Drum の外に配置され、レーザー光が Spinner mirror 通過後の位置、つまりフィルム面上に到達する最終光量を測定することと同じ位置での測定になるため、Periscope mirror の汚れおよび Spinner mirror の汚れ具合を知ることが可能である。Spinner mirror は高速で回転しているため、ほこりの付着などパワーダウンの主要因になる。最終光量の測定は、清掃メンテナンスのタイミングを通知する重要な機能を持つ。

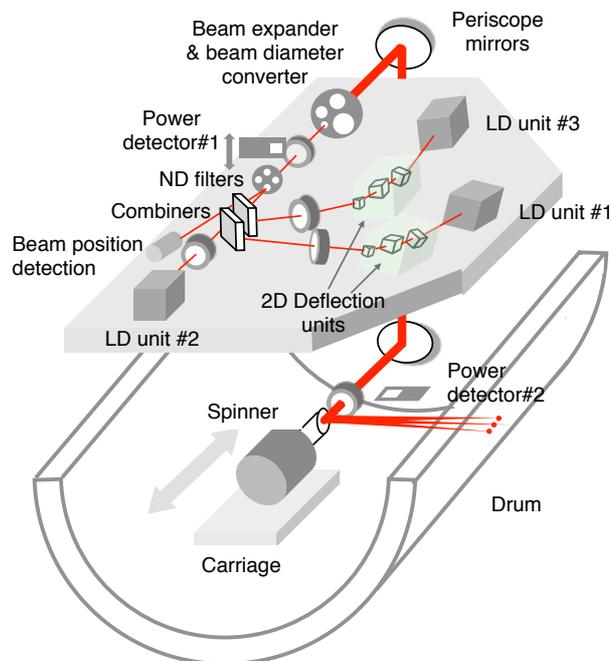


Fig. 81 Multi-beam optics system for internal drum architecture.

今回使用する感光記録材料は、富士フィルムの超硬調フィルム LS-H および RAS 感材である LS4500 を採用した。両感材の波長 635nm に対する感度はおよそ $6 \sim 7 \times 10^{-3} \text{ (J/m}^2\text{)}$ である。2次元光偏向器の最小効率を 60% とし、ハーフミラーの透過率・反射率を適切に選択することで合波後の3つのレーザー光量を等しくすることができ、それらは元の光量の約 20% となる。レンズ7個の透過率(> 97 %), ミラー3枚の反射率(> 95 %), レーザー出力最大 15 mW より、露光面エネルギーが最も小さくなる 48 lines/mm で、 $8 \times 10^{-3} \text{ (J/m}^2\text{)}$ 以上のエネルギーが供給可能であることがわかる。

次に、レンズ系に盛り込んだ機能について、以下に説明する。

a). 非点隔差補正

合波後のレンズおよびミラー等の光学系全般で生じる非点隔差は、記録面でのビームスポットの非点隔差となるため、補正する必要がある。光学定盤のビーム径変換部の後端レンズをチルトさせることで、非点隔差を減らすように調整することが可能である。非点隔差 Δa を発生させる様子を示す。

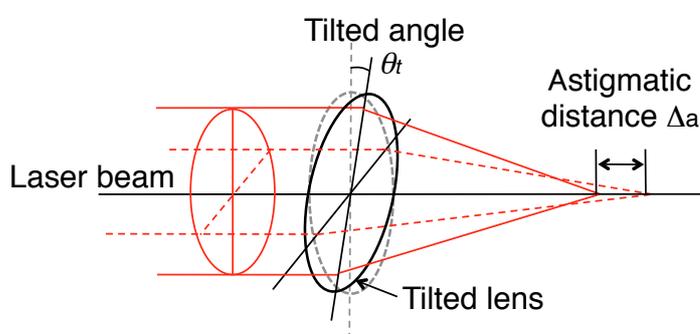


Fig. 82 Generation of astigmatic distance Δa for compensating the one of optics including laser diodes and AOD.

b). 波長変動補正

AOD は、回折角が波長に比例するため(Fig.83(a)), 角分散(回折角変化/波長変化)特性を持つ。光源として選択したマルチ縦モード半導体レーザーは波長拡がりを持つ。また、温度変化に対してモードホップは抑制されるが、波長シフトは発生する。波長拡がりや波長シフトは角分散により記録ビーム径増大の原因になる。また、波長シフトも角分散によりビーム位置変動を発生させる。そこで、最適に選択された硝材でプリズムを設計し(b), 逆角分散を発生させる。

生させ、それぞれの角分散をキャンセルする(c).

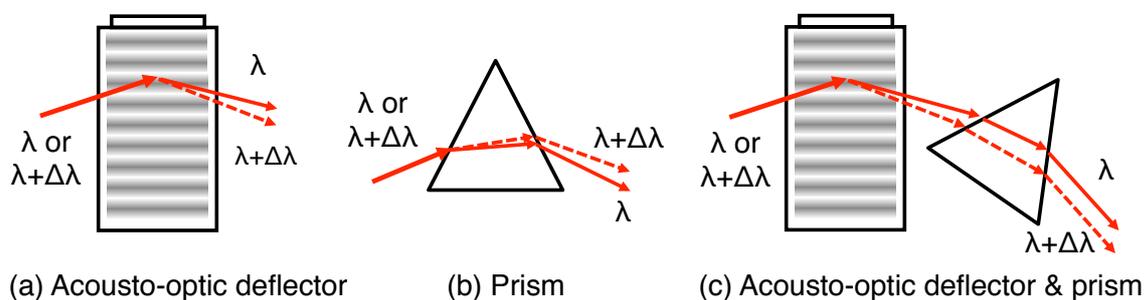


Fig. 83 Compensation of wavelength deviation $\Delta\lambda$ using a prism by canceling the angle and make the same angle as one of λ .

c). 温度補正と色収差補正

温度変化による光学定盤の熱膨張やレンズの焦点距離変化と、個々の半導体レーザーの波長ばらつきによるレンズ系の縦色収差により、記録面上でデフォーカスが発生する。このデフォーカスは記録ビーム径の増大になる。そこで、レンズに温度補償機能と色収差補正機能を合わせ持たせた。具体的には、デフォーカス特性を基に、合波後の2つの2枚貼り合わせレンズに対して、レンズ硝材の屈折率温度係数、線膨張係数、分散、そしてレンズ曲率等の最適化を行った。

4-3-3 ビーム位置ずれ検出・補正系の設計

3本のマルチビーム化では、各レーザー光が所望の位置を走査しない場合、種々の画像むらになる。レーザーモジュールであるLD unitは経時的にも位置ずれが生じるため、各レーザー光の位置ずれを検出し補正する機能を持たせる必要がある。記録ドラム面と共役な位置でかつ拡大系となる面を光学定盤上に作り、その面にPSD(Position Sensing Detector)で構成されたBeam position detectorを光軸の中心に置き、ビームスポットの重心位置を計測・演算する。また、本設計では、検出系は記録面に対し約15倍の拡大系で設計した。その検出系をFig.84に示し、その検出された位置ずれを補正する制御系(Frequency control)をFig.85に示す。レーザー光の旋回および位置ずれ補正はAODを駆動するRF信号の周波数で制御する。記録面での偏向倍率は $13.9\ \mu\text{m}/\text{MHz}$ であるから、サブ μm の位置制御には10 kHzの周波数制御が必要になる。スピナーの回転で得られるドラム面の位置情報(Address generator)に従って、レーザー光の旋回位置を決める。その位置情報に位置ずれ補正の位置情報(LUT-1)を重畳する。Fig.85に示すAOD制御ブロック図におけるもう一つの機能は回折光量の制御(Amplitude control)である。可変減衰器(Variable attenuator)はレーザー光間の出力ばらつき補正(Register)、シェーディング補正(LUT-2)等に利用する。

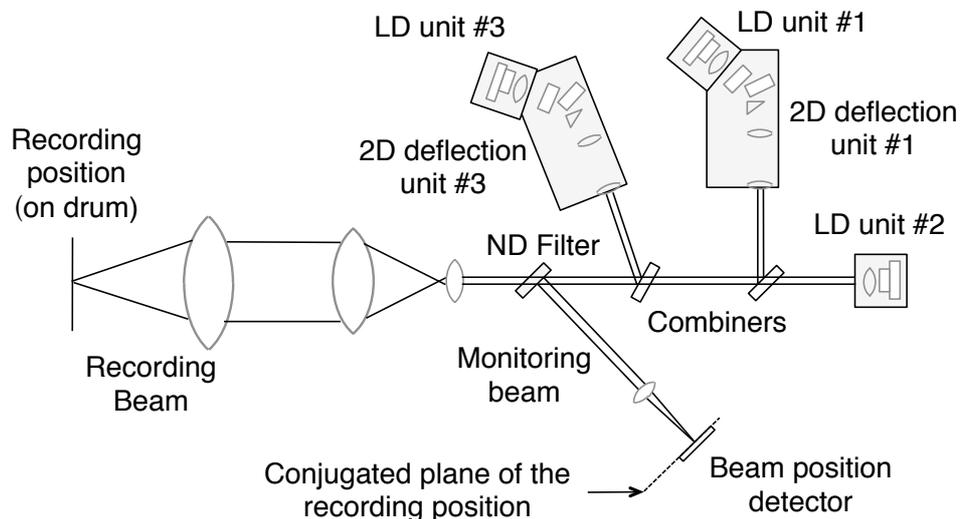


Fig. 84 Beam position detection mechanism to adjust the proper positions.

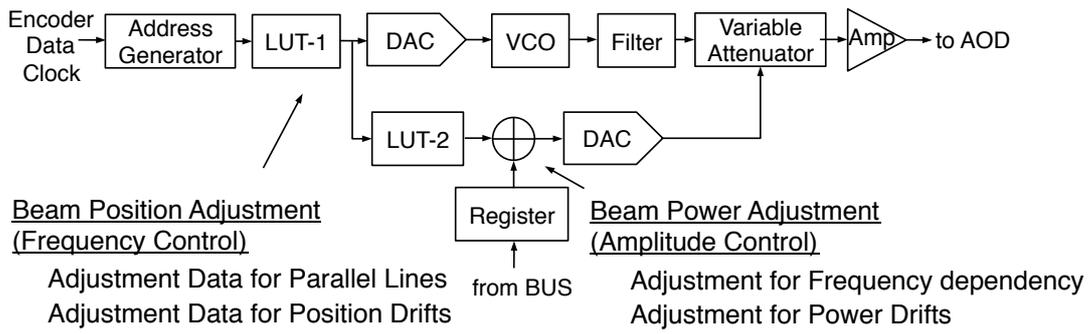


Fig. 85 Block diagram for AOD control to adjust diffracted beam positions and powers.

各レーザー光の位置ずれ検出と補正のアルゴリズムを簡単に Fig.86 に示す. レーザー光の位置を正確に測定するためには, PSD の特性上, 初めに光量のある範囲に抑え込む必要がある. 従って, まず光量を調整し, その後位置ずれ測定というシーケンスになる.

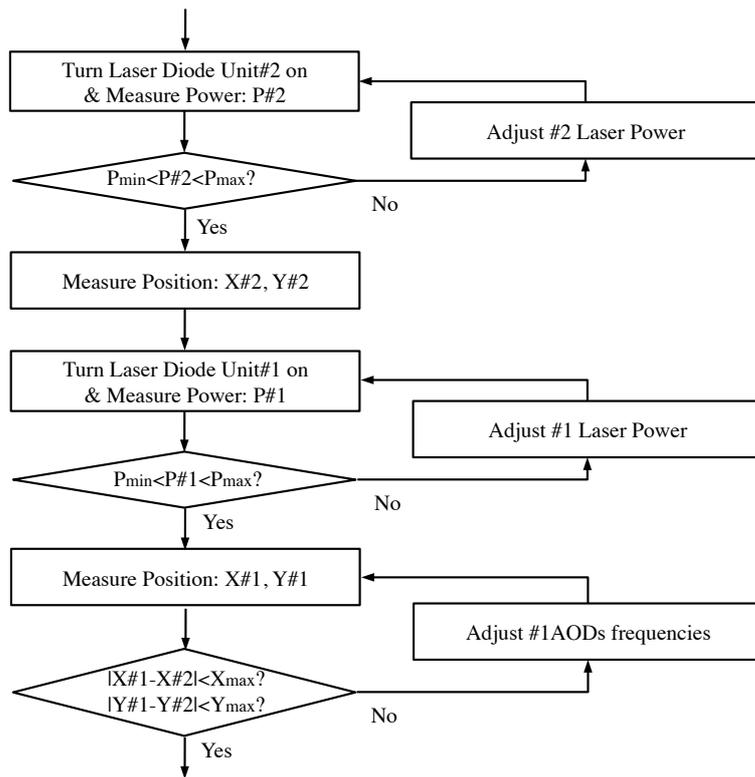


Fig. 86 Process of beam position coincidence for multi-beam optics

4-4 システム評価

4-4-1 光学系の評価

a). ビームスポット径

スピナーミラーは、実際の系では 30,000rpm の回転時に生じる動歪を計算し、回転時にフラットになるように逆補正した形状に加工されている。そこで、ビームスポット径の測定においては、スピナーの代わりに良好な平面度を持つ測定用ミラーを固定して、最終ビームスポット径を測定した。そのデータを Table.12 に示す。記録走査線上でビームは回転するため、測定は走査線に対し、0, 45, 90, 135°の角度で測定した値の最小値と最大値を示した。真円に近い極めて良好なビーム径が得られた。

Table. 12 Measurement data of beam waist diameters on the drum for each resolution

Resolution (Lines/mm)	Specification (μm)	Measurement data (μm)
144	< 15.6	12.4 – 13.7
96		
72	16.7 – 20.8	17.7 – 18.5
48	25.0 – 31.2	26.2 – 27.6

b). 非点隔差補正

Table.13 に示す通り、ビーム径変換部の最終レンズを 2.2°チルトさせることで発生させた非点隔差は記録面に相当する集光位置で 0.46 mm であった。これは補正の目標値 0.3 mm に対して十分マージンのある値である。この時のビーム径の変化は $\pm 2\%$ 以内と良好な結果を得た。

Table. 13 Measured astigmatic distance generated by tilted the lens of beam converter at 2.2 deg

Tilted angle (deg) of the beam converter lens	Astigmatic distance (mm)	
	Target	Measurement
2.2	0.30	0.46

c). 波長変動補正

波長変動補正性能を確認するため、シングルモードレーザーに高周波(700 MHz)を重畳し、採用したマルチモードレーザーと同等の縦モード半値全幅 1.2 nm を生成させて、ビーム径を測定した。この半値全幅から計算されるビーム径太りは 6 % である。その測定結果を Table.14 に示す。括弧内はシングルモードを 1.0 としたときのビーム径の比率を示した。補正プリズム無しで 8% のビーム径太りに対し、プリズム挿入で 1% の太りとほぼ設計通り補正できている。

Table. 14 Measured beam waist diameters of the compensated direction with/without a compensation prism using a single mode laser diode with/without RF superimposition.

Brackets mean relative ratios

Mode	Without a prism		With a prism	
	Single	Multi	Single	Multi
Beam waist diameter	42.2 μm (1.0)	45.6 μm (1.08)	42.8 μm (1.0)	43.2 μm (1.01)

d). 温度補正と色収差補正

温度補償機能と色収差補正機能を盛り込んだレンズを含む光学系を用いて、環境温度 10~35 °C、波長 $\lambda = 634\sim 639$ nm に対する記録面上の集光ビームウェストの位置と径を測定した。96 lines/mm のときの結果を Table.15 に示す。いずれも目標値を満足する結果が得られた。

Table. 15 Results of compensations for temperature and chromatic aberration in conditions of ambient temperature, $T=10\sim 35^{\circ}\text{C}$ and wavelength, $\lambda=634\sim 639$ nm

	Criteria	Measured
Change rate of beam waist position with temperature	$\leq 3.0 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$	3.0 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$
Change rate of beam waist position with wavelength	$\leq 1.2 \mu\text{m}/\text{nm}$	1.2 $\mu\text{m}/\text{nm}$
Beam waist diameter (at 96 lines/mm)	$\leq 15.6 \mu\text{m}$	$\leq 14.0 \mu\text{m}$

4-4-2 ビーム位置ずれ検出補正の評価

PSD の暗電流の影響を減らして S/N を確保し、位置ずれ補正の精度を上げるためには、飽和光電流に近い光量で照射、測定する必要がある。今回は beam position detector 上におよそ 250 μ W の光量を確保し、LD unit #1 と #2 の測定ばらつきを計測した。50 回の測定の標準偏差の結果を Table.16 に示す。Detector 面は記録面の 15 倍の拡大系で設計したので、記録面上では 1/15 である 0.015~0.036 μ m の分解能を持つ。これは下記 3-5-3 節で説明する位置ばらつきに対する分解能を十分確保している。

Table. 16 Standard deviations of measurement results on the beam position detector, SD(x) as x-direction and SD(y) as y-direction in case of adjustment into the center

Standard deviateon SD	Sample -1	Sample -2
SD(x) (μ m)	0.23	0.54
SD(y) (μ m)	0.26	0.49

4-4-3 画像品質の評価

マルチビーム化では、それに起因する新たなむらが発生する。その要因の一覧とむらが視認されないための各仕様を Table.17 に示す。レーザー光の旋回半径、レーザー光同士の回転の位相差、露光出力、ビームスポット径のばらつきはむらの要因になる。むらの評価は視認感度をより上げて評価するために、高濃度領域(95%近傍の平網)での記録サンプルを作成する。むらは感光材料の特性にも大きく影響するため、感光材料ごとに目標基準値は異なる。本システムでは富士フィルムの LSH と LS-4500 フィルムを採用したので、この組み合わせで本目標仕様を置き、ほぼむらが視認されないレベルになることを確認した。但し、これらの項目は個別に目標を決めるのではなく、総合的に影響度合いを判断して決めるべきであるので、ここでは目安として示す。

また、3-3 節で説明した画像品質の評価は同様に実施した。

Table. 17 Items of image defects caused by multi-beam and the criteria to eliminate visibility of the defects

Items	Criteria
1. Dispersion of diffraction amplitude	$< \pm 5\%$ (equivalent to $< 0.5 \mu\text{m}$ at 96 lines/mm)
2. Dispersion of phase difference	$< \pm 10 \text{ deg}$ in #1 or #3 beam $< \pm 4 \text{ deg}$ between #1 or #3 beam
3. Dispersion of exposure power	$< \pm 5 \%$
4. Dispersion of beam waist diameter	$< \pm 10 \%$

4-4-4 記録速度の評価

スピナーの回転数 30,000 rpm, 3本ビーム同時記録により, 解像度 96 lines/mm 時で 15.6 mm/s, 48 lines/mm 時では 31.3 mm/s の記録速度を達成した. AOD の帯域の半分以上を位置補正用に使っているが, 偏向用に割り付けて光学倍率を変えることでビーム本数を増やすことや, スピナーの回転数を上げることにより, さらに記録速度アップの可能性はある.

参考までに, Fig.87 に定盤上の光学部の写真を示す.

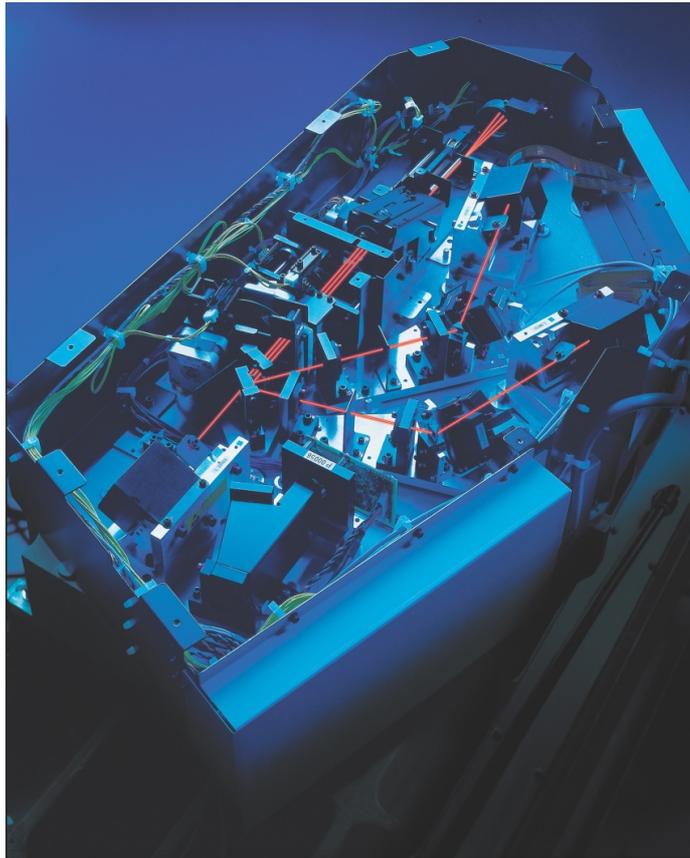


Fig. 87 Picture of multi-beam optics for internal drum architecture.

4-5 考察

円筒内面走査型レーザー露光装置のマルチビーム化実現のための数あるアイデアから、光軸上の固定されたレーザー光の回りを他のレーザー光が旋回する方式、つまり2次元に光偏向させる方式を考案し、実証した。他のアイデアと比較し、回転体(スピナー)に対する重量増加や構造的な複雑さを増すことなくスピナーの回転数を低く抑えることが可能となり、システム全体の安定性を確保した。

円筒内面走査型記録方式において、ライン数を増やす本方式では、中心のビームはミラーの回転中心軸上に入射し、第2、第3のビームは印刷の解像度で決まる走査線間隔を保持しながら、中心のビームの回りを旋回させる。また、第4および第5のビームは走査線間隔の2倍の半径で旋回させることで実現可能である。つまり、偏向角(偏向帯域幅)を2倍にする必要がある。

今回の光学設計では、偏向倍率が $13.9 \mu\text{m}/\text{MHz}$ という設計になっているので、48 lpmmの低解像度では6 MHzの帯域幅が必要であったが、第4および第5ビームまで拡張するには12 MHzの帯域幅となるので、帯域幅の観点からは、本AODは適用可能である。しかしながら、課題として合波部の透過効率が挙げられる。今回の設計ではハーフミラーによる合波方式を採用したため、各ビームは入射光量の約20%の透過率になっている。5本の場合は透過効率を重視した合波方式を採用することで、高い光利用効率を実現する必要がある。

Off-axis AODはwalk-off現象のため、結晶サイズがon-axis AODと比較して数倍大きくなる。On-axis AODはパッケージ化された状態でも小型化が可能であり、近接させた配置が可能になる。今回の2次元偏向器の設計では、2個目のAODに対する1個目の偏向角は電極の幅方向の広がり角になるため、近接により2個とも同じ電極サイズで許容できている。実際の設計において、近接配置は有利であり、自由度を増すことがわかる。

円筒内面走査型レーザー露光装置への応用研究では、複数のレーザー光の種々のぼらつきが画像品質に影響を及ぼす。そのため、今回の評価系では非点隔差補正および波長変動補正を試み、有効であることを確認した。また、光学系では温度補正と色収差補正、マルチビーム化で重要なビーム位置ずれ検出補正も設計通り機能した。

ここで2000年以降の本分野の技術開発動向を見る。印刷工程のデジタル化の流れに伴い、中間媒体の削減がさらに進み、かつ刷版(CTP)機器の記録速度が向上してきたことにより、印

刷用出力機器の研究開発は、製版出力機器から刷版(CTP)出力機器にシフトしてきた。また、CTPは大きくフォトンモードとヒートモードに分類できるが、それらが競合しながら開発が進められてきた。

フォトンモードは光重合や光架橋を利用するフォトポリマー方式および銀塩方式が主流で、その処理の簡便さから広く普及した。出力機器としては、本研究の成果であるマルチビームによる円筒内面走査方式の卓越した記録速度と画質により、その後目ぼしい出力機器が現れておらず、現在も本出力機が新興国中心に使用されている。また、明室での取り扱いのため、感光波長が紫色(405 - 410 nm)にシフトしてきており、本後継機もこれに対応している。

一方、ヒートモードであるサーマル方式は熱を利用して画像形成を行う方式であり、画像・非画像部のディスクリミネーションが顕著で高画質(高精細や FM スクリーン対応)に適しており、かつ明室での取扱いが可能である等の特長がある。シアニン色素(光熱変換剤)などが赤外光を吸収し熱に変換するために、高出力赤外半導体レーザーが使用される。アルカリ現像処理が主流で、現像における溶解性の安定化が長年の重要課題ではあったが、技術的な改良が進み、さらに高出力赤外半導体レーザーの発展とともに超マルチチャンネル化(~1,024チャンネル)技術の進歩により、近年フォトンモード感光材料用の出力機器に匹敵する記録速度を達成してきた。機器としては高価であるが、刷版出力の専門化など業態の変化とともに、先進国ではサーマル CTP が主流になっている。

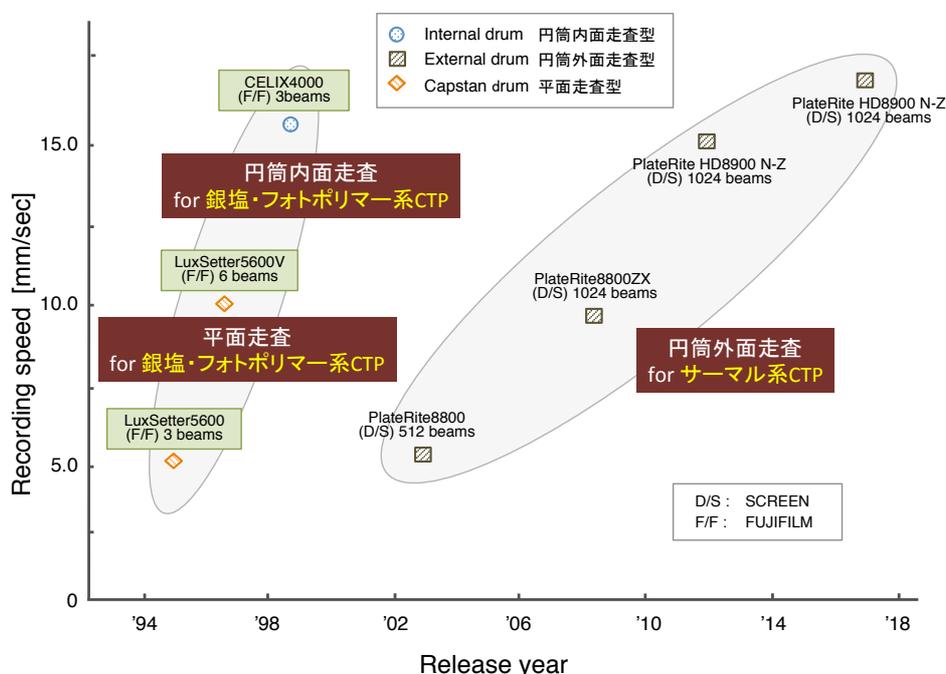


Fig. 88 Recording speed of major imagesetters & platesetters in 2000s.

* 円筒外面走査方式の機器の記録速度は仕様中の生産性から概算した。

4-6 結論

円筒内面走査型レーザー露光装置に対するマルチビーム化の理論と設計を示した。開発した2次元光偏向器は、偏光固有モードを考慮した最適な高回折効率の条件で、交差角が 80° となり、 90° の交差時と比較で無効成分がわずかに1.5%であるのも、システム設計を行う上で大きな利点である。これにより、偏向角と比例する帯域幅を有効に利用できる。また、2次元光偏向器に入射する最適な直線偏光の角度は出射光の偏光角度と一致する。これもシステム設計を行う上で利点となる。

マルチビームのシステムでは、ビーム間の位置ばらつき、ビームウェスト径や楕円率などの影響が画像のむらとなって顕在化しやすい。そこで、ビーム位置ずれ検出・補正、非点隔差補正、波長変動補正など、システムとして機能させるために必要な技術を同時に開発した。

これらの技術は製版フィルムおよびダイレクト刷版の出力機器(イメージセッターおよびCTPセッター)に応用され、円筒内面走査型レーザー露光装置の3本のマルチビーム化を先駆けて実現することができ、96 lines/mmの解像度のとき、従来機が8.7 mm/sに対し、15.6 mm/sの記録速度を達成した。

前章の平面走査型レーザー露光装置に対するマルチビーム化と合わせ、円筒内面走査型レーザー露光装置に対しても、研究開発した音響光学デバイスを採用して、初めてマルチビーム記録の技術開発を実用化レベルまで仕上げた。

第5章 総括的結論

第2章では、等方 Bragg 回折を利用したマルチ周波数 AOM と異方 Bragg 回折を利用した On-axis AOD の解析と実証を行った。

マルチ周波数 AOM においては、phased array 型電極の解析・設計を行うとともに、複数の入力信号を同時に加えて複数の回折光を生成する時の課題である 3 次相互変調成分と光ヘテロダイン干渉(ビート)の解析を行い、また AOM とその前後の光学系における関連パラメータについて明らかにした。これによって、広帯域かつ高速変調が可能なマルチ周波数 AOM の設計と応用が可能になった。

On-axis AOD においては、従来は楕円偏光入射が必要とされていたが、固有偏光モードの解析を従来の 2 次元から 3 次元に拡張し、さらに光軸[001]から[1 $\bar{1}$ 0]軸方向に傾ける optical rotation を与えることで、直線偏光入射でも高回折効率を得られる条件があることを理論的に示し実証した。異方 Bragg 回折に関しては、on-axis AOD はこの直線偏光の適用とともに、結晶サイズが小さいという利点があるため、偏向器前後の光学部材の近接配置に関して、設計の自由度が増す。これにより、on-axis AOD を用いた高回折効率である 2 次元偏向器の実現を可能とし、設計・評価した。小さな結晶サイズは、経済性の面でも優位である。現在、off-axis タイプの AOD が広く利用されているが、今後 on-axis AOD が off-axis AOD に置き換わるアプリケーションが増え、広く応用されることが期待される。

第3章ではマルチ周波数 AOM を利用した平面走査型レーザー記録システムでのマルチライン化技術の検証研究を、第4章では on-axis AOD で構成された 2 次元偏向器を用い、円筒内面走査型レーザー記録システムでのマルチライン化技術の検証研究を行った。音響光学デバイスの新たな可能性の検証にとどまらず、実用化に向け必要な要件や課題を挙げ、解決の方法を示し、それらを実装したシステムでの検証を行った。代表的な二つの記録方式に対し、マルチライン化記録を初めて実現し、飛躍的な記録速度の向上を達成した。新たに研究した音響光学デバイスを印刷機器に応用したが、新規な技術の可能性を検証するにとどまらず、実用化に必要な要件を明確にし、設計手順と勘所を示した。後学に対して有益な情報になると確信している。

謝辞

本研究は富士フイルム株式会社にて行われ、実用化(製品化)まで進められた研究開発である。研究テーマや課題を自由かつ意義ある方向に導いてくださった諸先輩、同僚に心から感謝致します。特に、共に研究開発を行った富士フイルムビジネスエキスパート株式会社の角克人さん、富士フイルム株式会社の高田倫久さん、藤井武さんには、よりよい結果を導くために日々切磋琢磨しながら共に研究開発に励み、また今回研究をまとめるにあたり、有用なご指摘、アドバイスをいただきました。また、長きにわたり音響光学素子研究に携わってこられた屋野勉工学博士から多くの有益なご助言やご指摘をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

また、本博士論文をまとめるにあたり、千葉大学大学院融合科学研究科の星野勝義教授、高原茂教授、堀内隆彦教授、椎名達雄准教授、総合工学科の伊藤智義教授から多大なるご指導、ご助言を賜りました。特に、椎名達雄准教授からは長きにわたり丁寧なご指導、ご助言を賜り、ここまでまとめ上げることができました。ここに深くお礼を申し上げます。

最後に、このような機会や環境を与え、応援してくださった CYBERDYNE 株式会社代表取締役社長で筑波大学大学院の山海嘉之教授、シミックホールディングス株式会社代表取締役副社長で日本化学会の井上伸昭フェロー、関係する皆様や家族に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 梶光雄, 遠藤寿, 森脇一, 新田尚道, 「平面走査型レーザー製版装置の開発」, 日本印刷学会誌, 31[6], 25, (1994).
- [2] 戸倉征雄, 「CTP用出力セッターの構造」, 日本印刷学会誌, 33[4], 8, (1996).
- [3] 前田昌俊, 茜部祐一, 「走査光学系の経済化, 高性能化の動向」, 日本印刷学会誌, 31[6], 12, (1994).
- [4] 廣澤誠, 磯野弘一, 「出力機(プレートセッター)の技術動向」, 日本印刷学会誌, 38[6], 8-12, (2001).
- [5] 吉川武志, 「CTPと印刷機械」, 日本印刷学会誌, 34[1], 19, (1997).
- [6] 笠松敏雄, 「プレートセッターの進歩」, 日本印刷学会誌, 36[2], 11, (1999).
- [7] L. Brillouin, "Diffusion de la lumiere et des rayons X par in corps transparent homogene," Ann Phys. Vol.7, pp.88-122, 1922.
- [8] P. Debye, F. W. Sears, "On the scattering of light by supersonic waves," Proc. Nat. Academy of Science, vol. 18, pp.409-414, June 1932.
- [9] R. Lucas, P. Buquard, "Nouvelles proprietes optiques des liquids soumis a des ondes ultra-sonores," C. R. Acad. Sci., vol.18, pp.2132-2134, June 1932.
- [10] C. V. Raman, N. S. N. Nath, "Diffraction of light by high frequency sound waves," Part I and Part II, Ind. Acad. Sci., vol.2, pp.406-420, Oct. 1935, "Diffraction of light by supersonic waves", Proc. Ind. Acad. Sci., (Part III), vol.3, pp.75-84, (Part IV), vol.3, pp.119-125, 1936.
- [11] W. R. Klein, B. D. Cook, "Light diffraction by ultrasonic grating," Acoustica, vol.15, pp.67-74, 1965.
- [12] G. Arlt, H. Schweppe, "Paratellurite, a new piezoelectric material," Solid State Commun. Vol.6, pp.783-784, Nov. 1968.
- [13] E. I. Gordon, "A Review of Acousto-Optical Deflection and Modulation Devices," Proc. IEEE, vol.54, pp.1391-1401, Oct. 1966.
- [14] I. C. Chang, "Acousto Optic Devices and Applications," IEEE Trans. Sonics and Ultrason. vol. SU-23, pp.2-22, 1976.
- [15] E. H. Young, S. K. Yao, "Design Considerations for Acousto Optic Devices," IEEE Proceedings, vol.69, pp.54-64, Jan 1981.
- [16] R. W. Dixon, "Acoustic diffraction of light in anisotropic media," IEEE J. Quantum Electron., vol.3, pp.85-93, Feb. 1967.
- [17] A. W. Warner, D. L. White and W. A. Bonner, J. Appl. Phys. 43, 11 1972.

- [18] 黒田光男, 物理光学 – 媒質中の光波の伝搬 – 光学ライブラリー3, (朝倉書店, 2011).
- [19] J. F. Nye, Physical Properties of Crystals, (Oxford University Press, 1957).
- [20] N. Uchida, Y. Ohmachi, “Elastic and photoelastic properties of TeO₂ single crystal,” J. Appl. Phys., vol. 40, pp. 4692-4695, Nov. 1969.
- [21] N. Uchida, “Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO₂),” Phys. Rev., vol. B4, pp.3736-3745, Nov. 1971.
- [22] T. Yano, M. Kawaguchi, A. Fukumoto and A. Watanabe, “TeO₂ anisotropic Bragg light deflector without midband degeneracy,” Appl. Phys. Letters, vol. 26, No. 12, pp.689-691, 15 June 1975.
- [23] C. Henn, APPLICATION BULLETIN, “INTERMODULATION DISTORTION (IMD),” 1994, <http://www.ti.com/lit/an/sboa077/sboa077.pdf>.
- [24] G. A. Coquin, J. P. Griffin, L. K. Anderson, “Wide-band Acousto-Optic Deflectors Using Acoustic Beam Steering,” IEEE Trans. Sonics Ultrason. vol. SU-17, pp.34-40, Jan. 1970.
- [25] D. A. Pinnow, “Acousto-Optic Light Deflection: Design Considerations for First Order Beam Steering Transducers,” IEEE Trans. Sonics Ultrason. vol. SU-18, pp.209-214, Oct. 1971.
- [26] Y. Ohmachi, N. Uchida and N. Niizeki, “Acoustic wave propagation in TeO₂ single crystal,” J. Acoust. Soc. Am. 51, pp.164-168, 1972.
- [27] N. Uchida, N. Niizeki, “Acousto-optic Deflection Materials and Techniques,” IEEE Proceedings, vol.61, NO.8, pp.1073-1092, Aug. 1973.
- [28] A. Fukumoto, M. Kawaguchi and H. Hayami, “Polarization Considerations in the Operation of a Two-Dimensional TeO₂ Abnormal Bragg Deflector,” Appl. Opt. 14, 805 1975.
- [29] G. Elston, “Optically and Acoustically Rotated Slow Shear Bragg Cells in TeO₂,” SPIE Vol.936 Advances in Optical Information Processing III, pp.95-101, 1988.
- [30] K. Wagner, Doctorial desertion, California Institute of Technology. 1987.
- [31] S. Kim, Robert R. Mcleod, M. Saffman, and Kelvin H. Wagner, “Doppler-free, multi-wavelength acousto-optic deflector for two-photon addressing arrays of Rb atoms in a quantum information processor,” Applied. Optics. Vol. 47, No. 11, pp. 1816-1831, April 2008.
- [32] Sangteak Kim, “Acousto-Optic Devices for Optical Signal Processing and Quantum Computing,” thesis at University of Colorado, 2008.
- [33] T. Yano and A. Watanabe, “Acousto-optic figure of merit of TeO₂ for circularly polarized light,” J Appl. Phys. Vol. 45, No.3, pp.1243-1245, March 1974.

- [34] J. Xu and R. Stroud, Acousto-Optic Devices (Wiley-Interscience, 1992).
- [35] 屋野勉, 学位論文, 「TeO₂ 結晶の音響光学異方ブラッグ回折の解析とその応用」, 大阪大学, 1981.
- [36] 特許公報 第 2026155 号 「ミラー振動型光偏向器」, 高田, 富士写真フイルム株式会社.
- [37] 山田耕三郎, 江副利秀, 河戸孝二, 「低 pH 超硬調印刷感材“INTEGRA”システムのための新規造核剤の開発」, 富士フイルム研究報告 (No.34-1989).
- [38] 井上義章, 「低解像度高線数網点(Co-Re SCREENING)の開発」, 富士フイルム研究報告 (No.48-2003).
- [39] 特開平 6-95016 「光走査装置」 岩崎, ブラザー工業株式会社.
- [40] 特開平 5-27188 「円筒内面走査型画像記録装置」 岡崎, 大日本スクリーン製造株式会社.
- [41] 特開平 5-289018 「インナードラム走査型記録装置」 角他, 富士写真フイルム株式会社.
- [42] 特開平 5-308488 「走査装置及び走査方法」 アムノン他, サイテックス・コーポレーション・リミテッド.
- [43] 特開平 5-276335 「インナードラム走査型記録装置」 角, 富士写真フイルム株式会社.
- [44] 米国特許 5,097,351 号 Simultaneous Multibeam Scanning System, Kramer, Holotek Ltd.
- [45] 特許公報 第 3667816 号 「円筒内面走査型画像記録装置」 品田, 富士写真フイルム株式会社.

業績リスト

査読付き学術雑誌論文

- [1] H. Shinada, “Multi-frequency AOM for multi-beam laser scanning exposure system,” *Opt. Review*, **Vol. 23**, No. 5, (2016).
- [2] 品田英俊, 「平面走査型マルチビームレーザー露光装置のためのマルチ周波数 AOM の特性評価」, 日本印刷学会誌, **Vol.53**, No.4, (2016).
- [3] 品田英俊, 角克人, 高田倫久, 藤井武, 「平面走査型マルチビームレーザー露光装置の設計・開発」, 日本印刷学会誌, **Vol.53**, No.6, (2016).
- [4] 品田英俊, 角克人, 高田倫久, 藤井武, 「円筒内面走査型マルチビーム露光装置の研究・開発」, 日本印刷学会誌, **Vol.54**, No.2, (2017).
- [5] H. Shinada, K. Sumi, T. Shiina, “2-dimensional acousto-optic deflector using on-axis anisotropic Bragg diffraction for internal drum scanning exposure systems,” *Opt. Eng*, **Vol.56**, No.8, (2017).

国内学会発表論文

- [1] 品田英俊, 近藤雅彦, 高田 倫久, 藤井 武, 「高速・高画質平面走査型フィルムレコーダの開発」, 平成 7 年度日本印刷学会 第 95 回秋季研究発表会, 9-12. 1995.
- [2] 藤井武, 角克人, 品田英俊, 高田倫久, 「インターナルドラム方式レコーダにおけるマルチビーム露光技術の開発」, 平成 13 年度日本印刷学会 第 106 回春季研究発表会, 129-132. 2001.
- [3] 三田剛, 中澤雄祐, 菱沼慶一, 品田英俊, “枚葉インクジェット印刷機(JetPress720)向けヘッドおよびヘッドメンテナンス技術”, Imaging Conference JAPAN 2014 Fall Meeting, 日本画像学会.

その他発表資料

- [1] 藤井武, 角克人, 品田英俊, 高田倫久, 「インターナルドラム方式レコーダにおけるマルチビーム露光技術の開発」, 富士フィルム研究報告 (47), 34-39, 2002

国際学会発表

- [1] H. Shinada, “Single Pass Inkjet Digital Printing Technology for Commercial Printing Market,” Keynotes, 28th International Conference on Digital Printing Technologies (NIP28), 2012.

本研究に関する発明

- [1] 特願 2000-313598 「内面走査型画像記録装置」 品田英俊
[2] 特願 2000-145914 「画像記録装置」 品田英俊
[3] 特願 11-140846 「内面走査型画像記録装置」 品田英俊
[4] 特願 11-140845 「内面走査型画像記録装置」 品田英俊
[5] 特願平 8-191661 「円筒内面走査型画像記録装置」 角克人, 品田英俊
[6] 特願 2005-12639 「円筒内面走査型画像記録装置」 品田英俊
[7] 特願平 7-113328 「円筒内面走査型画像記録装置」 品田英俊
[8] 特願平 4-273204 「発振回路及び光ビーム走査装置」 品田英俊
[9] 特願平 4-266073 「光ビーム走査装置」 品田英俊
[10] 特願平 4-188408 「光ビーム走査装置」 加藤喜一, 品田英俊, 角克人
[11] 特願平 4-188407 「光ビーム記録装置用ディスク及び光ビーム記録装置」 品田英俊
[12] 特願平 3-28813 「光ビーム記録方法及び光ビーム記録装置」 品田英俊
[13] 特願平 3-26262 「レーザビーム走査装置」 品田英俊
[14] 特願平 3-21833 「レーザビーム走査装置」 品田英俊
[15] 特願平 3-21832 「レーザビーム走査装置」 品田英俊
[16] 特願平 3-21831 「複数光ビームのパワー補正方法及び光ビーム走査装置」 品田英俊
[17] 特願平 3-14181 「同時多ビーム光変調装置」 品田英俊
[18] 特願平 3-5627 「光ビーム走査装置及び光ビーム走査方法」 品田英俊

- [19] 特願平 3-5626 「光ビーム走査装置及び光ビーム走査方法」 品田英俊
- [20] 特願平 3-5625 「光ビーム走査装置」 品田英俊
- [21] 特願平 2-274757 「光ビーム走査装置」 品田英俊
- [22] 特願平 2-274755 「複数光ビームのパワー補正方法」 品田英俊
- [23] 特願平 2-274754 「複数光ビームによる走査露光方法」 品田英俊
- [24] 特願平 2-274753 「複数光ビームによる走査露光方法」 品田英俊
- [25] 特願平 2-274752 「複数光ビームによる走査露光方法」 品田英俊
- [26] 特願平 2-103897 「光変調器への信号入力方法」 品田英俊
- [27] 特願平 2-103896 「同時多ビーム光変調装置」 品田英俊
- [28] 特願平 2-103895 「同時多ビーム光変調装置」 品田英俊
- [29] 特願平 1-272333 「同時多ビーム光変調装置」 品田英俊
- [30] 特願平 1-272332 「同時多ビーム光変調装置」 品田英俊
(出願人はすべて富士フイルム株式会社)

本研究に関する受賞歴

- [1] GATF 2000 InterTech Technology Award, ” MULTI-LASER IMAGING TECHNOLOGY.”
- [2] THE PREPRESS AND PUBLISHING AWARDS 2000 GOLD AWARDS WINNER, “Fujifilm Sumo Luxel F9000 B1 with Valiano.”
- [3] 日本印刷学会 平成 13 年度 技術賞 「インターナルドラム方式レコーダにおけるマルチビーム露光技術の開発」(2001).
- [4] QUEEN’S AWARDS FOR ENTERPRISE INNOVATION 2002, “Multibeam laser imaging on Luxel F-9000.”
- [5] 日本印刷学会 2018 年度 論文賞 「円筒内面走査型マルチビーム露光装置の研究・開発」, 品田英俊, 角克人, 高田倫久, 藤井武, 日本印刷学会誌, **Vol.54**, No.2, (2017).