

稲わらを粗原料とした実規模での
バイオエタノール生産に関する研究

2014年7月

千葉大学大学院 園芸学研究科
環境園芸学専攻 生物資源科学コース

関 根 基

(千葉大学審査学位論文)

稲わらを粗原料とした実規模での
バイオエタノール生産に関する研究

2014年7月

千葉大学大学院 園芸学研究科
環境園芸学専攻 生物資源科学コース

関 根 基

Studies on actual scale bioethanol production from rice straw

Summary

In recent decades, reduction of greenhouse gases has been needed to maintain the global environment. Eighty percent of the greenhouse effect is from methane gas and carbon dioxide. Methane gas is produced from rotting organic matter under the anaerobic conditions. To reduce methane gas production, it must be effective to collect rice straw from paddy field. Carbon dioxide gas is produced from human activities such as industrial manufacturing which usually needs to burn fossil energy. For carbon dioxide reduction, bioethanol production from rice straw must be one of the best approach. Thus, the combination of these two technologies is effective for reduction of greenhouse gases. However, there are few reports for such combination to rice straw in actual scale. The aim of this study is examination of actual scale bioethanol production from rice straw, which contain two major problems of cost reduction for bioethanol production system and practical examination for greenhouse gas reduction.

The rice straw is produced approximately 8 million tons in a year in Japan, however, 80% of them has not been usage. Rice straw mainly contains cellulose, hemicellulose, lignin, ash. Cellulose, which is a kind of polysaccharide, can be divided into monosaccharide using adequate enzymes and it can be fermented to obtain ethanol using yeast. Rice straw has high moisture when it is harvested. Therefore, it needs drying to handle and store with long term period. The dried rice straw usually formed a bale which is convenient to transport and store it. To produce bioethanol from rice straw after storage, the bale was crushed and prewashed. The prewashed straw was, then, cooked with alkaline chemicals for decomposing of lignocellulose. The cooked pulp was subsequently washed to change slurry state as a pretreatment. The slurry state washed pulp was treated to enzymatic saccharification, which was subsequently treated to an alcoholic fermentation. And then, the fermented liquid was distilled and dehydrated to obtain a 95% ethanol solution.

In order to examine cost reduction approaches for rice straw usage, long term storage of rice straw bale in the open air was carried out. The result showed that the bales were collapsed at 30 days and 20% of bales cannot use for bioethanol production after four months. The cost of rice straw bale storage was approximately 12 JPYen per 1kg dried rice straw. As a result, the rice straw storage as bale form was not effective method to

reduce material collection cost. On the contrary, the tedding-less operation during sun drying for 151 days, which could reduce extra working time, was carried out after harvest at experimental site in Kashiwa, Chiba, Japan, then it was realized to maintain 20% of moisture in rice straw for five months or more on the paddy field. Rice straw collection cost became 7 JPYen/kg or less by that operation. However, long term sun drying and tedding-less operation needed to fulfill under appropriate climate, like Eastern Japan, Central highlands, Nankai area and a part of area near by Pacific Ocean, where could be estimated using grass moisture drying model. To investigate bioethanol production cost, a pilot scale plant in 1/40 of commercial scale, which allowed to treat fifty six hundred bone dry kg of rice straw, was constructed and examined. This plant can measure the yield of each device. Baled off rice straw was pretreated for the saccharification and fermentation operations. The saccharification efficiency of our pilot plant can be achieved as same as laboratory scale. The ethanol yield for our pilot scale experiment was approximately 0.1L/kg of dried rice straw. This result was, however, comparatively lower bioethanol production efficiency than the laboratory scale bioethanol processing.

To evaluate greenhouse gas production from bioethanol processing from rice straw, typical system boundary for inventory analysis was set and estimated business model was reviewed in this study. For the calculation, a commercial scale pulp production is estimated to 4800 BDt /y and the amount of bioethanol production is 1350 kL/y. Bioethanol production plant operates for 300 days in a year. This plant is located at the center of rice straw collection area. As a result, suppression of CH₄ emission by the removal of rice straw was 117~567 Mg-CH₄. CO₂ fixation of rice straw was 17919 Mg-CO₂ in a year. CO₂ emission of bioethanol production system was estimated as 16833 kg-CO₂/kL. In our model, 76% of CO₂ emission was accounted in bioethanol production including of energy consumption, alkaline pulping, and concentration of glucose solution, because our system boundary was too wide. Thus, the new model in which steam utility was omitted and on-site enzyme culturing device was employed was recalculated. Using this scenario's run, CO₂ emission was drastically reduced and bioethanol production cost was estimated to approximately 380 JPYen/L of 95% ethanol. When the system scale becomes 100 times of estimated plant, bioethanol production cost would be smaller than current gasoline price, if the enzyme price was reduced and device efficiency was improved.

目 次

Summary

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産の既往研究	6
1.2.1 稲わらの収集・運搬	6
1.2.2 稲わらのパルプ化	8
1.2.3 エタノール発酵および蒸留	9
1.3 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産の現状と課題	10
1.4 本論文の目的および構成等	14
1.4.1 目的	14
1.4.2 本論文の構成および各章の概要	14
1.5 引用文献	17

第2章 バイオエタノール粗原料用稲わらの貯蔵性およびパルプ化適性の検討

2.1 緒言	23
2.2 材料および方法	26
2.2.1 供試材料	26
2.2.2 稲わらの屋外貯蔵試験	27
2.2.3 稲わらのパルプ化試験	31
2.2.4 パルプ収率の算出	33
2.2.5 カッパー価の算出	33
2.2.6 pH測定	34

2.2.7	全糖分析および発熱量試験	34
2.3	結果および考察	37
2.3.1	屋外貯蔵によるペールの変化	37
2.3.2	稲わらのパルプ化試験の結果	44
2.4	摘要	51
2.5	引用文献	53

第3章 稲わら収集作業工程の低コスト化に関する検討

3.1	緒言	57
3.2	材料および方法	60
3.2.1	供試材料	60
3.2.2	わら試料の分析	60
3.2.3	わら試料の圃場収集試験	63
3.3	結果および考察	69
3.3.1	わら試料の水分変化	69
3.3.2	わら試料の成分変化	76
3.3.3	収量および作業時間	81
3.3.4	ロール重量および収集率に対する反転処理の影響	83
3.3.5	収量・収集作業時間・収集コストの関係	86
3.4	摘要	91
3.5	引用文献	92

第4章 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産の前処理工程に関する検討

4.1	緒言	97
-----	----------	----

4.2	材料および方法	100
4.2.1	原料稲わら	100
4.2.2	バイオエタノール製造プロセス	100
4.3	結果および考察	108
4.3.1	粗粉碎・洗浄	108
4.3.2	ソーダ蒸解	112
4.3.3	パルプ洗浄	112
4.3.4	糖化・濃縮	117
4.3.5	発酵および蒸留	120
4.3.6	プロセス全体について	122
4.4	摘要	123
4.5	引用文献	125

第5章 バイオエタノール生産システムの持続性および経済性に関する検討

5.1	緒言	129
5.2	方法	132
5.2.1	システム境界	132
5.2.2	評価項目および活動量データ	136
5.2.3	算定事業モデル	139
5.2.4	インベントリ・コスト原単位	141
5.3	結果および考察	147
5.3.1	稲わらの利活用による温室効果ガス削減効果	147
5.3.2	稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産の CO ₂ 排出量	149
5.3.3	バイオエタノール製造コスト	153
5.3.4	システム改善に向けたシナリオ	155

5.3.5 システムの採算性確保に関する検討	160
5.4 摘要	163
5.5 引用文献	166
第6章 総括	171
6.1 研究成果の概要	171
6.2 バイオエタノール製造コストの縮減に関する追加検討	174
6.3 今後の課題および展望	177
謝辞	179

第 1 章 序 論

1.1 研究の背景

人類は石炭，石油，天然ガスなどの利便性の高いエネルギーの普及と利活用を通じて多方面にわたる発展を成し遂げ，生活スタイルの多様化を図ってきた。現時点では，少なくとも2030年頃までは世界的なエネルギーの用途拡大と需要・消費の増大は確実に続くものと推計されている（資源エネルギー庁 2013）。一方1990年代以降，地球温暖化による生態系や人類の活動全般への悪影響が懸念されており，その主因は温室効果ガスであるとされている（環境省 2013）。温室効果ガスは，二酸化炭素（ CO_2 ），メタン（ CH_4 ），一酸化二窒素（ N_2O ），ハイドロフルオロカーボン類（ HFCs ），パーフルオロカーボン類（ PFCs ），六ふっ化硫黄（ SF_6 ）の6種類があり，温室効果の約8割は CO_2 と試算されている。 CO_2 排出の起源は人為的な化石燃料の消費と考えられている。そのため CO_2 排出量を削減する方策として，化石エネルギーの使用削減，再生可能エネルギーへの転換などを並行して進めることが有効とされている（環境省 2013）。

再生可能エネルギーは地球上で自然に起こる現象を利用して繰り返し使えるエネルギーであり，

社会経済，環境や健康への悪影響の減少などの広範な便益を供給し得るエネルギーと考えられている（環境省 2011）。図 1.1 はエネルギーの種類と利用形態を示す。再生可能エネルギーの資源は水力，風力，太陽光や地熱等であるが，近年では環境負荷の低いエネルギー源としてバイオマスが有望視されている（新エネルギー・産業技術総合開発機構 2014）。人類は，50 年以上にわたってバイオマスの液体燃料化に取り組んできたが，近年では環境負荷の低いエネルギー源として注目されている。バイオマスはカーボンニュートラルであり，燃焼してエネルギーとして利用しても，排出された CO_2 が光合成により吸収されれば，正味で大気中の CO_2 濃度に影響を及ぼさない資源と認知されている（Hall et al. 1991）。

図 1.2 にバイオマス資源の分類を示す。バイオマス資源は生産系と未利用資源に大別される（日本エネルギー学会 2002）。エネルギー作物のような生産系バイオマスについては，利活用を検討する前に，生産によって発生する温室効果ガスやプランテーション開発等の土地利用の問題を解決する必要があるとされている（横山ら 2009）。

エタノールは比較的熱量が高く，ガソリン代替

第1章 序 論

燃料として利用可能であるため，バイオマスから作られた燃料用の発酵エタノール（バイオエタノール）が世界各国で普及している（農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．商業規模のバイオエタノール生産には，サトウキビ等の甘味資源作物あるいはトウモロコシ等のでんぷん質作物が利用されている．しかし，2007年頃から，トウモロコシ等のバイオエタノール需要の拡大に伴う穀物や飼料価格の高騰が顕在化し始めたため，バイオエタノール生産においては，食料と競合しないシステム構築が喫緊の課題とされている（五十嵐ら 2008）．

こうしたことから，糖質，でんぷん質作物に代えてリグノセルロース系バイオマスからの製造技術開発が活発化している（鮫島 2011）．バイオマス資源利用においては，未利用のリグノセルロース系バイオマスが有望と考えられており（横山ら 2009，新エネルギー・産業技術総合開発機構 2015），我が国のリグノセルロース系バイオマスのなかでは，稲わらのバイオエタノールの生産ポテンシャルが高く評価されている（萩野ら 2009，上田 2011）．

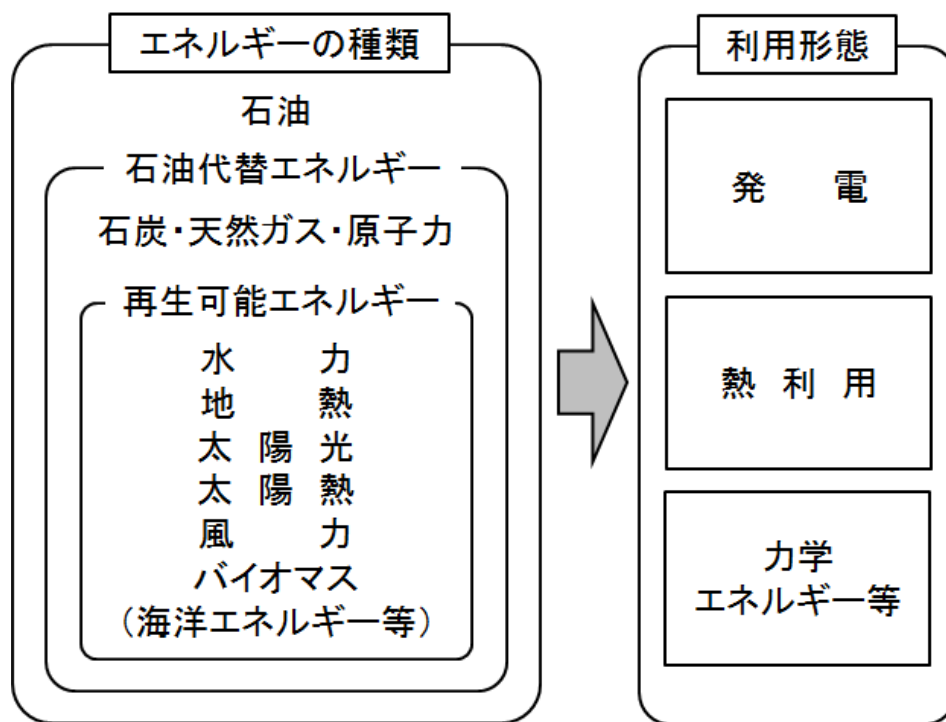


図 1.1 エネルギーの種類と利用形態

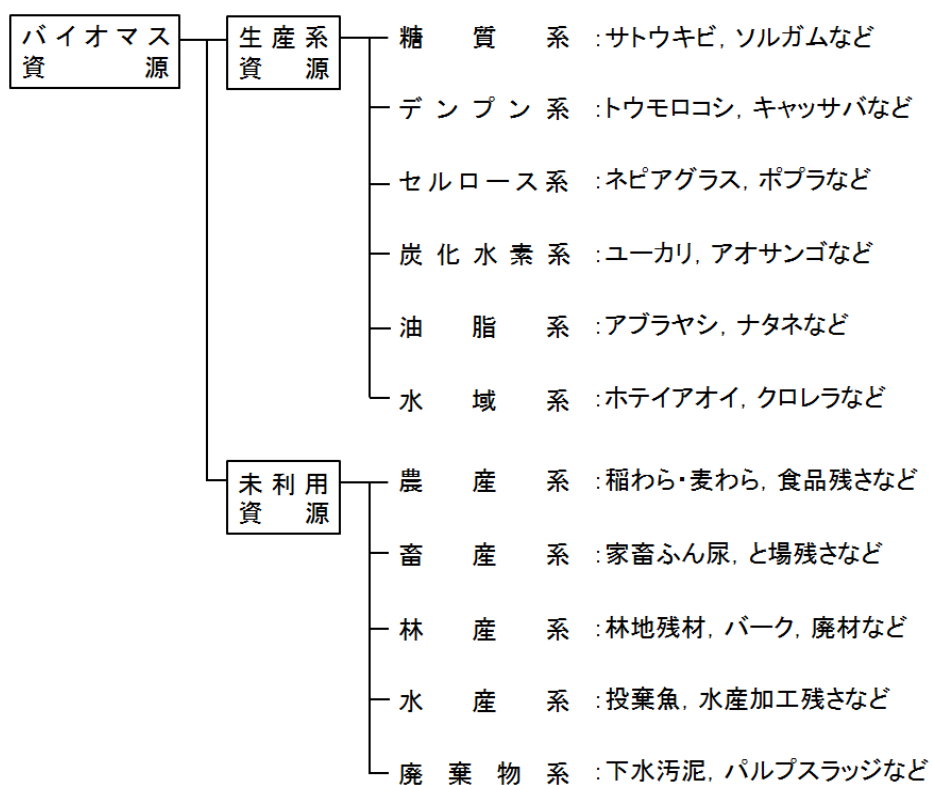


図 1.2 バイオマス資源の分類

1.2 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産の既往研究

1.2.1 稲わらの収集・運搬

北米の水稲産地では、水稲生産の副産物として排出される稲わらが安価で魅力的なエタノール原料とみられている(Leonardo, et al. 2008)。北米の事例では、約30 km圏内の稲わらを520～570 kgの大型ベールに梱包ののち専用トレーラーで輸送した場合のコストはおよそ28 US\$ /BDt(BD: Bone dry), 1 kg当たり3円以下と試算されている(Kiran, et al. 2000)。我が国でも稲わらの飼料、敷料としての価値が再認識されてきており、近年では飼料用わらの実勢価格は20～30円/kg以上となっている(五十嵐および斉木 2008)。稲わらの収穫作業においては中型・小型のベアラが使用されており、諸外国とは交通インフラや道路関係の法制度も異なる。従って我が国において稲わらを産業的に利活用するためには、目的に応じた原料品質の管理および評価が必要と考えられる(Haider 2013)。即ち、粗飼料等とは一線を画した考え方により集荷および貯蔵システムを検討することが必要である。

稲わらの集荷・貯蔵コストの低減に関しては、

稲わらのハンドリングを容易にすることが不可欠であるとされている(Lim 2012). コーンストーバにおける既往研究によれば, 原料コストはバイオエタノール生産施設の規模に影響を受けるとされている. そのため, 原料収集範囲を小さくして, 運搬距離を短くする方が経済的であり, 原料を高密度化することによりハンドリング性が高まり, コスト低減につながると分析されている(Perlack, et al. 2003). 原料の圧縮・かさ密度の向上について, ペレット化に関する研究がみられるが, ハンドリング性は原料の部位により差異があり(板倉ら 2010), 機械的エネルギーの投入量が増加するため原料コストが20%以上増大すると試算されている(瀬戸ら 2012). そのため, 現状の収集運搬, 貯蔵作業工程の省略などを検討することが必要であり, 原料の不均一さなどに影響を受けにくい調製方法を見出す必要がある.

一般的にバイオマス資源の多くは広く薄く分布するため, 未利用資源系バイオマスの利活用に当たっては, 収集・運搬・前処理のコスト効率を上げることが重要と考えられている(鮫島 2011, Kozumi 2013).

1.2.2 稲わらのパルプ化

稲わらのエネルギー利用については未知の要素が多いが，かつて稲わらは紙パルプ産業の主原料であった．紙は元来非木材繊維から作られてきたが，約200年前から木材繊維を用いるようになった(山内2006)．クラフトパルプの製法はセルロース系原料からのバイオエタノール製造において前処理法として利用できる技術のひとつとされる(斉木2009)．その特徴は，酸を利用した方法よりも，反応条件がマイルドで，環境負荷が少ないとされている(横山および芋生2009)．北米では製紙工場を活用したバイオエタノール生産が検討されており，古紙パルプなどを原料とするプロセス設計により，相当量のエタノールが生産可能と試算されている(野中2008，長谷川ら2009)．針葉樹クラフトパルプを用いて糖化・発酵実験を行った結果，未晒パルプは糖化率・発酵収率が高く，エタノール製造法として有力とされている．ただし，ラボスケールで確認されたパルプ収率等はスケールアップしたときと異なることが多いため，パイロットスケールでの確認が必要不可欠とされている(長谷川ら2010)．

1.2.3 エタノール発酵および蒸留

稲わらからバイオエタノールを生産する場合、稲わらパルプを市販のセルラーゼを用いてグルコースおよびキシロースなどに単糖化するが、その後の発酵、蒸留等（もろみの濃縮、脱水、精製）の工程は糖質原料等と同様である。エタノール発酵微生物（酵母）の代表格は *Saccharomyces cerevisiae* であり、酒、ビール、ワイン、パンの製造に広く用いられている。発酵もろみの濃縮技術では蒸留法が主流である。蒸留は、もろみに含まれている各成分の蒸気圧差を利用して、エタノール成分を分離・濃縮する技術であり、工業的には液を加熱蒸発させる缶、気液を接触させる精留塔、蒸気を冷却する凝縮器からなる蒸留塔が普及している（通商産業省基礎産業局アルコール課監修 1997）。

エタノール発酵及び蒸留は、酒造で培われてきた技術であるため、コスト効率向上に向けて発酵もろみの濃縮・脱水における蒸気透過膜、ゼオライト複合膜の導入による省エネルギー化などの技術開発が進められている。しかし、基本的な技術はほぼ確立されており（新エネルギー・産業技術総合開発機構 2006）、技術的な課題は少ない。

1.3 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産の現状と課題

稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産システムは，水田が集積した地帯の周辺における展開を想定しており，稲わらは水田でベール梱包されて，貯蔵サイトに仮置きされた後に，近接するパイロットプラントに運搬される流れを想定している（五十嵐ら 2008）．バイオマスの運搬費は，運搬距離の平均値（ $2/3 \times$ 収集範囲の半径）に比例するとされており，多くの仮定の上に成立するものであり，様々な要因に影響を受けると考えられている（横山ら 2008）．そのため，本研究ではベール貯蔵サイトとパイロットプラントは近接しているものと仮定した．なお，後述する調査研究における稲わらの運搬距離は片道 1.5 km であった．

一方，稲わらをパルプ化して糖化・エタノール発酵する工程は，製紙パルプ産業の既往技術，セルラーゼによる糖化技術，産業的なエタノール発酵技術の3つの工程を組み合わせたものとなる（長谷川ら 2009，齊木 2009）．稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産のプロセスは，個別にはほぼ確立されており，課題の少ない既往技術の連なりと考えられる（五十嵐，2008，長谷川ら 2009）．

図 1.3 に、稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産におけるエタノール収率の試算の一例を示す。稲わらのホロセルロース組成を 46 %とした場合、1.00 t の稲わらからパルプが 0.46 t 製造できる。パルプ中のセルロースが 65 %、ヘミセルロースが 25 %と仮定し、糖化率を 90 %とすればグルコースが 0.30 t、キシロースが 0.12 t 生産できる。酵母の発酵効率を 90 %、C5 糖を資化する微生物の発酵効率を 85 %とすると、グルコースおよびキシロースからエタノールが 0.19 t (0.24 kL) 生産できるとパルプ製造の有識者等が試算している(那須野ヶ原土地改良区連合 2011)。しかし、元来稲わらのホロセルロースは木質チップなどよりも少なく、実際にエタノール収率を 0.24 kL/原料 t とするには、プロセスの調整・管理、C5 糖発酵技術の確立などをはじめ、さまざまな課題があるとされている(五十嵐ら 2008)。

2008 年から、稲わら、麦わらを原料とした実規模・パイロットスケールでのエタノール製造実証試験が行われている。しかしながら、依然として技術開発の途上にあり、生産コストの削減が高いハードルとなっている(バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議, 2007; バイオ燃料技術革新協議会,

2008). また, バイオエタノールの生産においては投入エネルギーの削減を含め, 環境負荷の低減に配慮が必要と考えられている (Iswantio, et al. 2012). さらに, リグノセルロース系原料からのバイオエタノール製造プロセスに関しては, システム全体の持続性を評価することが重要とされている (Scott et al., 2013).

以上より, 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産に関する課題は大きくは以下の3つであると考えられた.

(低コスト化を前提とした)

課題 1 : 稲わら集荷方法の構築

(高効率化を前提とした)

課題 2 : 稲わらの前処理技術の確立

(課題 1 および課題 2 の検討結果を踏まえた)

課題 3 : 稲わらバイオエタノール生産システムの環境負荷低減

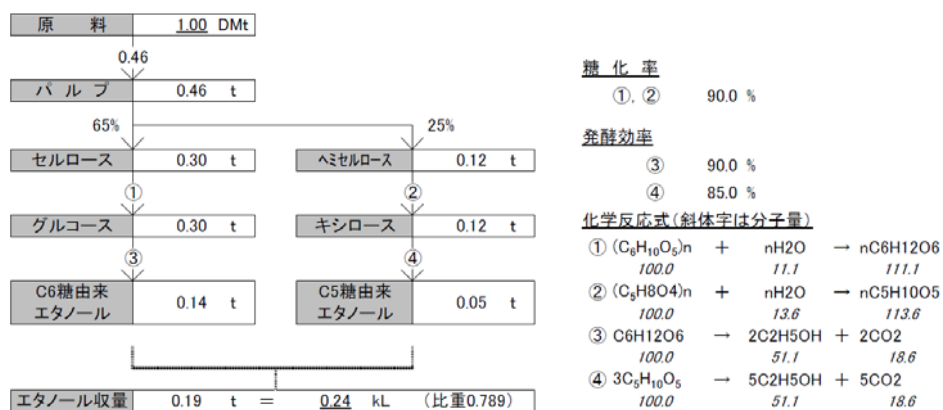


図 1.3 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産におけるエタノール収率試算の一例

1.4 本論文の目的および構成等

1.4.1 目的

本研究は，再生可能エネルギーの重要性を踏まえて，農産系バイオマス資源（廃棄物）の利活用に着目し，実規模における総合的な調査検討により，稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産に係る稲わらの収集，前処理技術，環境負荷低減等の課題解決に資することを目的とした．

1.4.2 本論文の構成および各章の概要

図 1.4 は本論文の構成を示す．

第 1 章は，序論として本研究の背景および課題を整理し，論文の目的および構成について略述した．

第 2 章では，前節に挙げた課題 1（既往技術の有効性と限界の確認）を明確化するために，実規模で稲わらの貯蔵性とパルプ化適性に係る調査を行い，稲わらの収集工程とエタノール変換工程を繋ぐ工程に係る問題点を整理した．

第 3 章では，第 2 章の結果を踏まえて，課題 2（単位工程の低コスト化および高効率化）の解決を図るために，稲わらの圃場における長期保管および反転工程の省略の有効性あるいは影響について調

査検討した。

第4章では、第2章の結果を踏まえて、課題2（単位工程の低コスト化および高効率化）の解決を図るために、パルプ化処理についてパイロットスケールによる検討を行った。

第5章では、課題3（生産システムの持続性に関する評価）の解決を図るために、稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産システムについて実規模のデータを用いたインベントリ分析を行い、CO₂収支の改善およびコスト削減の可能性について検討した。

第6章では、本論文を総括するとともに、今後の展望を記した。

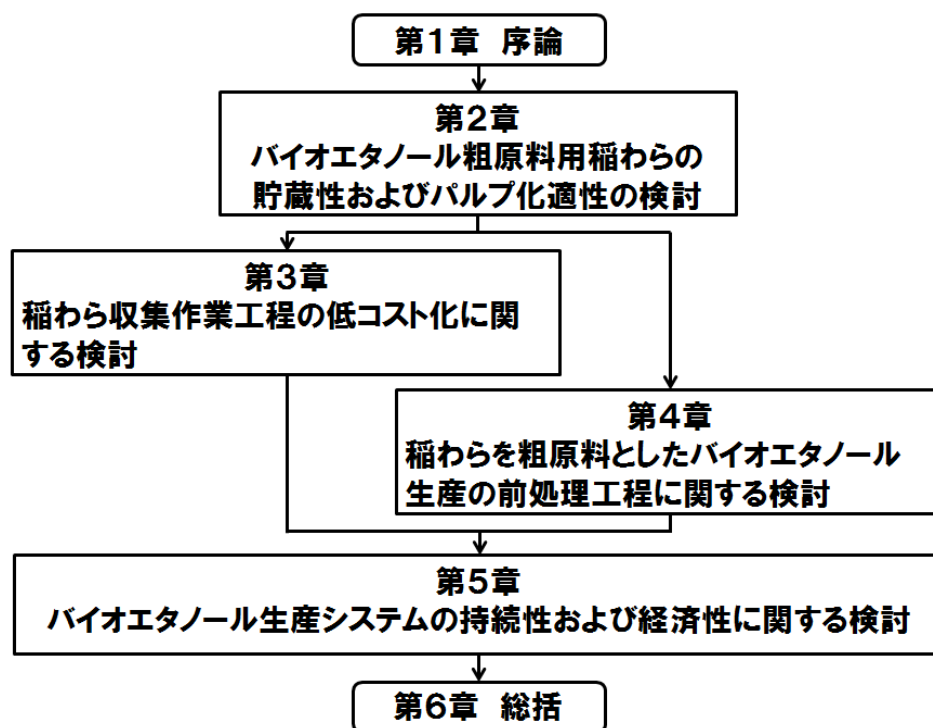


図 1.4 本論文の構成フロー

1.5 引用文献（アルファベット順）

バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議（2007）:

国産バイオ燃料の大幅な生産拡大；1-11.

バイオ燃料技術革新協議会（2008）:バイオ燃料技

術革新計画概要；2-29.

Edi Iswanto Wiloso, Reinout Heijungs, Geert R.

de Snoo(2012):LCA of second generation

bioethanol : A review and some issues t

o be resolved for good LCA practice. Ren

ewable and Sustainable Energy Reviews 1

6 ; 5295 - 5308.

Felipe Scott, Julián Quintero, Marjorie Morale

s 1, Raúl Conejeros, Carlos Cardona, Germán

Aroca(2013):Process design and sustain

ability in the production of bioethanol f

rom lignocellulosic materials. Electronic

Journal of Biotechnology, 16(3).

Hall, D.O., Mynick, H.E & Williams, R.H.(199

1):Cooling the greenhouse with bioenergy.

Nature 353;11-12.

長谷川文生・横山伸也・芋生憲司・矢野伸一・天

野寿二（2009）:パルプ製造技術を利用したバ

イオエタノール生産の可能性,日本エネルギー

一 学会大会講演要旨集(18);184-185.

長谷川文生・横山伸也・芋生憲司・矢野伸一・天野寿二(2010):パルプ製造技術を利用したバイオエタノール生産,日本エネルギー学会大会講演要旨集(19);130-131.

五十嵐泰夫・斉木隆(2008):稲わら等バイオマスからのエタノール生産,社団法人地域資源循環技術センター,東京,pp.12-53.

Jeng Shiun Lim, Zainuddin Abdul Manan*, Sharifah Rafidah Wan Alwi, Haslenda Hashim(2012):A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16;3084-3094.

環境省(2011):IPCC第3作業部会再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書(SREEN)概要.

環境省(2014):平成25年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書;33-138.

Kiran L. Kadama, Loyd H. Forrest, W. Alan Jacobson(2000):Rice straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects.

Biomass and Bioenergy, 18; 369-389.

Koizumi, T (2013): The Japanese biofuel programme developments and perspective. Journal of Cleaner Production, 40; 57-61.

Leonardo D. Gomez, Clare G. Steele-King and Simon J. McQueen-Mason (2008): Tansley review, Sustainable liquid biofuels from biomass: the writing's on the walls. New Phytologist, Wiley Online Library; 473-485.

Mohammed Ziaul Haider (2013): Determinants of rice residue burning in the field. Journal of Environmental Management, 128; 15-21.

中川 仁 (2009): バイオマス燃料用原料としての熱帯牧草を中心とした草本系バイオマスの特性と品種改良, 日本草地学会誌, 55(3); 274-283.

那須野ヶ原土地改良区連合 (2011): 平成 22 年度地域新エネルギー・省エネルギービジョン策定等事業, 那須野ヶ原地域新エネルギービジョン事業化フェーズビリティスタディ調査; 77-81.

日本エネルギー学会編 (2002): バイオマスハンド

ブック,オーム社,東京,pp.2-6.

野中寛(2008):製紙工場を活用するバイオエタノール生産～ノースカロライナ州立大学におけるプロジェクト紹介および日本における可能性,バイオマス科学会議発表論文集(3);110-111.

農業・食品産業技術総合研究機構(2009):地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発,中間成果発表会講演要旨;14-15.

萩野千秋・近藤昭彦(2009):ソフトセルローズ資源からのエタノール発酵技術の開発,日本草地球学会誌,55(3);270-273.

Perlack, R.D., Turhollow, A.F. (2003): Feedstock cost analysis of corn stover residues for further processing. *Energy*, 28; 1395-1403.

斉木隆(2009):バイオマス(11),エタノール変換,日本エネルギー学会誌(88);437-444.

板倉優・西村浩・桑原隆・森井善隆・末武悟・松田茂弘(2010):木質ペレットの物性とハンドリング性評価方法,石油科学学会誌発表論文集(47);20-21.

鮫島正浩(2011):リグノセルローズ系バイオマスからの燃料用エタノール生産に向けて取り組

- むべき課題,日本エネルギー学会誌 90;10-16.
- 資源エネルギー庁(2013):平成24年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書);8-12.
- 新エネルギー・産業技術総合開発(2006):バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/セルロース系バイオマスを原料とする新規なエタノール発酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発;649-718.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2014):再生可能エネルギー白書;1-51.
- 瀬戸利嗣・長谷川文生・山崎裕介・佐賀清崇・海津裕・芋生憲司(2012):エタノール生産のための稲わらのペレット化,バイオマス科学会議発表論文集(8);72-73.
- 通商産業省基礎産業局アルコール課監修(1997):アルコール協会・バイオインダストリー協会編,アルコールハンドブック(第9版),技報堂出版,東京,pp.19-21.
- 上田達己(2011):国産農業バイオマスを用いたバイオ燃料生産の可能性,農村工学研究所技法,211;131-151.
- 山内龍男(2006):紙とパルプの科学,京都大学学術出版会,京都,pp.26-27.

第1章 序 論

横山伸也・芋生憲司(2009). バイオマスエネルギー, 森北出版, 東京, pp.7-19.

第 2 章 バイオエタノール粗原料用稲わらの貯蔵性およびパルプ化適性の検討

2.1 緒言

わが国では 7 月下旬から 10 月下旬頃までのおよそ 3 ヶ月間に集中して稲が収穫される（吉岡 2002, 農林水産省公表資料）。このため多量の稲わらを効率的に収集しつつ、作業工程を最適化する必要がある（新エネルギー・産業技術開発機構 2010）。稲わらの収集や貯蔵に関する技術は、国産粗飼料としての利用拡大の流れの中で確立されてきた（佐賀ら 2008）。稲わらの収集作業はコンバインの定着と牧草用ベーラの導入により飛躍的に向上したとされている。即ち、ドロツパの排わら機構とベーラの作業能率の向上により、高い収集率が確保されるようになった。一方、貯蔵に際しては、発酵熱による自然発火や腐敗が問題となることから、収集後の水分を約 20～22%以下に保つことが推奨されている（今井ら 1989）。しかしながら、産業的な稲わらの収集や貯蔵に関する研究は少なく、1970 年代の紙パルプ産業における事例報告（森本 1999）を除くと非常に少ない。また貯蔵時における稲わらの腐敗防止についてはアンモニア処理や化学防腐剤の効果に関する研究がいくつか見られ

る (Don et al., 1986, 村井ら 1996) ものの, 現状では基礎研究の段階にあり導入の可否を含めて慎重な判断が求められる. そのため多量の稲わらを取り扱う際の貯蔵性についての検討はきわめて重要である.

稲わらからエタノールを生産するためには, その前提としてセルロースなどの多糖類を単糖化(糖化)し, 発酵させる必要がある. それら糖化, 発酵のための前処理法の一つに, 基質である稲わらの比表面積を増やしてリグニンを変性, 除去するパルプ化法がある. パルプ化法は主に製紙業で用いられており, かつては稲わらもその主要な原料の一つとされていた (Sugiyama 1999). 稲わらのパルプ化には, 通常, 原料の稲わらを細断, 除塵した後, 圧力加熱するための釜(蒸解用容器)で蒸解処理する操作が適用される. 蒸解処理法にはソーダ法, 亜硫酸ナトリウム法, 塩素アルカリ法, クラフト法, メカノケミカル法などいくつかの手法があるが, 稲わらをパルプ化するにはソーダ法が適すると考えられている (大蔵省印刷研究所 1976). ただし, ソーダ法はパルプ収率が他の手法よりも若干低くなることが指摘されており, 蒸解に使用する苛性ソーダも高価である. そのため, 蒸

解 糜 液 の 固 形 分 は 焼 成 リ サ イ ク ル し ， 液 分 (黒 液) は バ イ オ エ タ ノ ー ル 生 産 エ ネ ル ギ ー と し て 再 利 用 す る こ と が 望 ま し い と さ れ て い る (五 十 嵐 ら 2 0 0 8) . 以 上 の よ う な 背 景 か ら ， 稲 わ ら を ソ ー ダ 法 に よ っ て 蒸 解 処 理 す る 場 合 ， パ ル プ 収 率 の 低 下 要 因 お よ び 蒸 解 糜 液 の 性 状 を 把 握 す る こ と が 重 要 で あ る .

そ こ で ， 本 章 で は ， 産 業 的 な 稲 わ ら 利 活 用 に お け る 貯 蔵 性 お よ び 蒸 解 性 の 問 題 点 を 明 ら か と す る た め に ， 実 規 模 ス ケ ー ル に 近 い 大 量 の 稲 わ ら の 長 期 貯 蔵 性 を 調 査 検 討 す る と と も に ， 稲 わ ら の 蒸 解 性 に つ い て 実 規 模 の 装 置 を 用 い て 粗 粉 砕 ・ 洗 浄 ， 蒸 解 及 び パ ル プ 洗 浄 の 処 理 工 程 上 の 課 題 を 検 討 し た .

2.2 材料および方法

2.2.1 供試材料

2010年に千葉県柏市上利根地区において慣行栽培された水稲(品種:コシヒカリ)の稲わらを用いた。水稲は同年9月上旬に自脱コンバインで刈り取るとともに0.4~0.6 m程度の比較的長い稲わらとして圃場に放出, 放置し, 約90日間天日乾燥した。乾燥後にテッダレーキを用いて集草列を形成し, カッティングロールベアラ(Mchale F550, エム・エス・ケー農業機械)で専用ネットを巻き付けてφ1.2 m×1.2 mの稲わらベール(以下, ベール)に成形, 貯蔵した。成形時におけるベールの平均水分は 21.8 ± 5.2 %, 1ベールあたりの平均絶乾質量は 207.5 ± 32.6 kgであった($n=98$)。なお, 稲わら貯蔵中の経年変化を調査するため, 2008年から2010年にかけて上述と同様の方法で乾燥後, 小型ロールベアラ(RB510, タカキタ)を用いてφ0.5 m×0.73 mのベールに成形, 軽量鉄骨造倉庫で貯蔵した稲わらも供試した。

2.2.2 稲わらの屋外貯蔵試験

図 2.1 に ベール貯蔵サイトの模式図，図 2.2 に同貯蔵サイトの全景写真を示す。千葉県柏市船戸の市街化調整区域に鉄筋コンクリート造土間の貯蔵サイトを設け，ベール成形した稲わらの屋外貯蔵試験を実施した。図に示されるように土間周縁に樹脂製パレットを敷いて縦置きしたベールを設置し，コンクリート土間に横置きしたベールを3段に積上げた。なおベールの間隔を適切に設け，自然通気可能となるようにした。積上げたベールは全体をブルーシートで覆い，シート上部に土嚢袋を設置するとともにブルーシートのハトメに結束材を結び付けて下方に張力がかかるよう樹脂製パレットに固定した。貯蔵期間はサイトにベールを設置してから140日間とした。貯蔵サイトに使用した資材を表 2.1 に示す。ベールの貯蔵性は，既報（富山製紙指導所 1970）にならってベール高さの経日変化から考察した。ベール高さの測点は，貯蔵サイトの西，中央，東の3ヶ所に設定した（図 2.1）。同時にベールの腐敗状況も目視により評価した。なお稲わらの貯蔵コストは，総計98個のベール貯蔵に要した資材（表 2.1）の使用量に調達価格（実勢価格）を乗じて試算した。

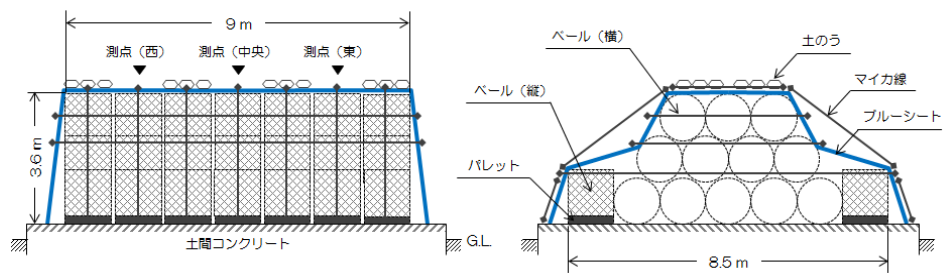


図 2.1 稲わらベール貯蔵サイト模式図



図 2.2 稲わらべール貯蔵サイト全景（2011年1月28日
撮影）

表 2.1 稲わらベール貯蔵サイト使用資材

名称	材質・寸法	耐用年数
パレット	PE製, 120×120cm	5年
ブルーシート	PE製, #3000, 10m×10m	5年
結束材	PE製, 2芯, φ10mm	—
土のう袋	PP製, 60×80cm	—

注) パレットおよびブルーシートの耐用年数は国税庁の耐用年数表「器具備品, 前掲のもの以外のもの及び前掲の区分によらないもの」を参考とした。

2.2.3 稲わらのパルプ化試験

図 2.3 は稲わらのパルプ化試験フローを示す。稲わらのパルプ化処理は、蒸解薬品（苛性ソーダ、炭酸ソーダ）および水を投入してセルロースなどの繊維分を段階的に分離する。本試験では、粗粉碎・洗浄、稲わら 200 kg 処理のバッチ蒸解、蒸解したパルプの洗浄、の 3 工程とし、投入する水量も検討項目の一つとした。以下、各工程の概要を記す。

1) 粗粉碎・洗浄

原料稲わらを回転式ブレード刃の付いたマッシャー（イーギミック，大善，静岡）を使用して粗粉碎・洗浄した。本実験で供試したマッシャーは、処理能力 500 BDkg h^{-1} である。マッシャー処理は、約 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の温水を注水しながら行われた。投入された稲わらは、装置の内部で粗粉碎および洗浄されて、排出される際にケーシング内で圧搾される。粗粉碎・洗浄された稲わらは自重による脱水を行った後、 1 m^3 のフレコンバックに受け取り（図 2.4 (A)）、フックスケール（CASTONI 0.5TH A，エム・エス・ケー農業機械，千葉）で湿潤重量を秤量した。また、蒸解釜に投入する直前の稲わらの絶乾重量を把握するために水分測定を行った。

2) バッチ蒸解

粗粉碎・洗浄わらを球形の蒸解釜（内容量 1.8 m³）に 1 バッチ当たり 200 BDkg 以内の範囲で投入し，蒸解釜のマンホールから蒸解薬品および水を投入した．蒸解釜のマンホールを閉鎖した後，地球釜に蒸気を導入して 1.0 rpm で回転させながら 165 °C で 1 時間加熱した．加熱完了後は，釜を回転させたまま 1 時間自然放熱した．この操作により，稲わらパルプ（以下，蒸解パルプ）と蒸解廃液（以下，黒液）を得た．蒸解パルプと黒液の分離には 400 メッシュのスクリーンを取り付けた水切器（ステンレス製ドレーナー，特注品 2×4.5×0.8 m，高杉製作所，東京）を供試し，自重により圧搾，黒液と分離した（図 2.4 (B))．

なお，蒸解薬品の種類・配合については既往の論文を参考とし，炭酸ソーダ濃度 3.45%，苛性ソーダ濃度 0.07% とした（矢口ら 1986，朴ら 1999，田中ら 2009）．

3) パルプ洗浄

脱液した蒸解パルプは 5 m³ の希釈タンクに移送し，洗浄水を添加して所定濃度まで希釈した（パルプスラリー）．パルプスラリーは回転容積式一軸偏心ねじポンプ（NYS 型モノポンプ，兵神装備，

兵庫)を用いてドラム型洗浄機(PW-20, 大善, 静岡)に投入した(図 2.4 (C)). 投入したパルプスラリーは高圧シャワーで加水しながらドラム型洗浄機内部の回転ドラムによって洗浄パルプと低濃度の黒液に分離した. 洗浄機の処理速度は 460 BDkg/h であった. 洗浄パルプは, ドレーナーに回収して, 自重による圧搾により脱水した(図 2.4 (D)).

2.2.4 パルプ収率の算出

バッチ蒸解試験終了後, ドレーナーのメッシュ上に残った蒸解パルプの質量をデジタル台秤で測定し, 約 50 g ずつ 3 試料を秤量した後, 105 °C の恒温乾燥器で 24 h 乾燥してパルプの固形分及び水分を測定し, パルプと原料稲わらの絶乾重量比に相当するパルプ収率を算出した.

2.2.5 カッパー価の算出

TAPPI Standard T236om-60 (JIS P 8211, ISO 302:2004 に同じ)に準拠して蒸解度・脱リグニンの指標であるカッパー価を算出した.

カッパー価は, 絶乾パルプ 1 g が消費した 1/10 規定の過マンガン酸カリウム溶液の mL 数で示され, カッパー価が小さいほど有機不純物(リグニ

ン等)が少なく、セルロース分が多い。

2.2.6 pH測定

パルプ洗浄終了後、希黒液を500mlガラス製ビーカーに採取してデジタルpHメータ(アタゴ, DP H-2)を用いてpHを測定した。

2.2.7 全糖分析および発熱量試験

バッチ蒸解試験によって得られた稲わらおよびパルプはフェノール-硫酸法に準拠して全糖分析(Dubois, M. et al.1956, Whistler, R. L. et al.1962)を行った。また、洗浄排水、黒液、希黒液は5検体を採取し、5A濾紙を用いて静置ろ過により固形分を分離し、湿潤重量を測定した後に廃棄物固形化燃料の発熱量試験JIS Z 7302-2に準拠して高位発熱量を測定した。なお、発熱量試験実施後、試料をデシケータに移して重量を測定することにより、固形分の可燃物と不燃物の質量比%を算出した。

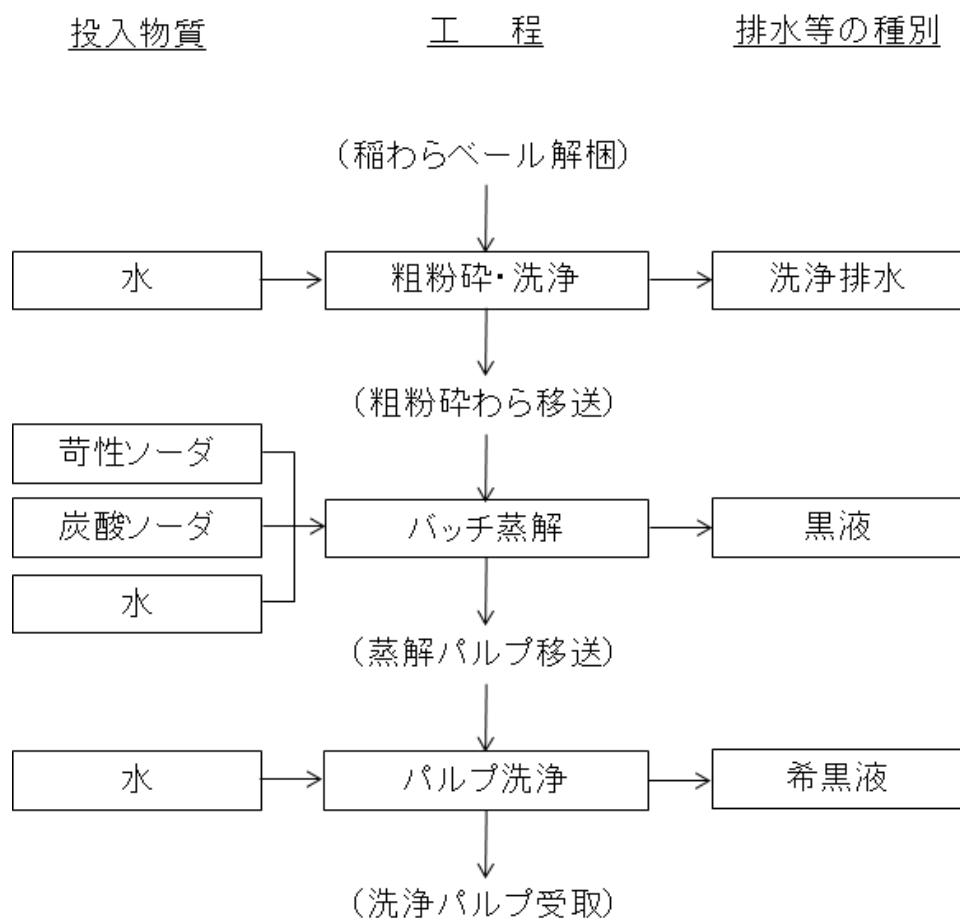


図 2.3 稲わらのパルプ化試験フロー



(A)



(B)



(C)



(D)

図 2.4 稲わらのパルプ化試験・装置写真

(A) マッシャーによる粗粉碎・洗浄わらの受取

(B) 蒸解パルプの排出およびドレーナーによる蒸解パルプの受取

(C) ドラム型洗浄機

(D) 洗浄パルプのドレーナーによる受取

2.3 結果および考察

2.3.1 屋外貯蔵によるべールの変化

図 2.5 はべール設置後 140 日間 (2011 年 1 月 28 日 ~ 6 月 17 日) の、貯蔵サイト高さの変化を示す。図に示されるように、貯蔵サイトの高さは 30 日目を過ぎた頃から低下し始め、特に測点「中央」では 60 日目に約 0.65 m、120 日目に約 0.95 m の低下が観察された。また測点「中央」および測点「西」では 120 日目まで高さが低下し続けた。図 2.6 に測点「西」の 1 段目の横置きべールの 140 日目での変形状態を示す。本べールでは 65 日目以降から腐敗が確認された。同様なべールの腐敗は測点「中央」において多く確認されたことから、貯蔵サイト高さが低下した主な要因であったと考えられる。なお目視した限りでは縦置きしたべールおよび横置きしたべールの 2 段目、3 段目での腐敗は確認されなかった。べールの腐敗程度についての明確な基準はないものの、腐敗、変形によってべールの集積、積込、運搬等が困難となり、そのための作業にも大きな労力およびエネルギー投入が必要となる。本実験では 20 個 (5 個 × 4 列) のべールで腐敗が確認された。こうした腐敗べールは、ロール形状の維持が困難であり、べール

フォークやベールグラブ等のハンドリング機械を用いた搬出が困難であった。これらのベールをバイオエタノール粗原料として利用不可であるとみなすと、140日間の貯蔵において98個のベールのうち20個が損耗した(約20%相当)。既報(森本 1999)によると、稲わらパルプ製造工場におけるバラ積み稲わらの損耗率は5~8%であることが報告されている。このため、ベールを積み重ねて長期間貯蔵する方法は経済的に不利であると思われた。本研究で貯蔵サイトを設置した地区では、冬期から春期にかけて北西から南西の風が卓越していた(表 2.2)。このためサイトの東側に侵入する雨水は比較的少なく、その結果、測点「東」の高さは測点「西」や「中央」と比べて変化が小さくなっていたと考えられる。なおベールの間隙に低湿の空気を強制送風すれば、約20日間で水分20%以下となることが佐藤らによって報告されている(佐藤ら 1977)。そうした乾燥処理を適用すれば、ベールの腐敗をある程度防ぐことが可能になると思われる。ただし屋外に設置された多量のベールを常時乾燥させるためには大型の除湿・送風装置が必要であり、それらは稲わら貯蔵のコスト増加要因となる。

表 2.3 は ベール貯蔵サイト設置に掛かるコストの試算結果を示す。本実験では 98 個のベールを貯蔵するために要する費用は総額 245,520 円/年となった。供試したベールの平均重量が 207.6 kg であったことから、ベール 1ヶ当りの貯蔵コストは 2,505 円/年、絶乾稲わら 1kg 当たり 12 円/年と試算された。バイオエタノール粗原料としての稲わらの調達コストは絶乾稲わら 1kg 当たり 10 円以下が目安(横山・芋生 2009)とされる。本実験ではコスト増加の要因となるベール貯蔵設備を築造せずに屋外貯蔵したものの、実規模で大量の稲わらベールを貯蔵するには上述のような一定程度の貯蔵コストが必要である。

以上の結果から、バイオエタノール粗原料として稲わらを梱包して利用する方法は貯蔵期間の限界、コスト高などの課題が多いことが明確となった。これら課題の解決のためには、稲わらの収集からパルプ化までの作業工程についてのコスト要因の見直しが必要と考えられた。

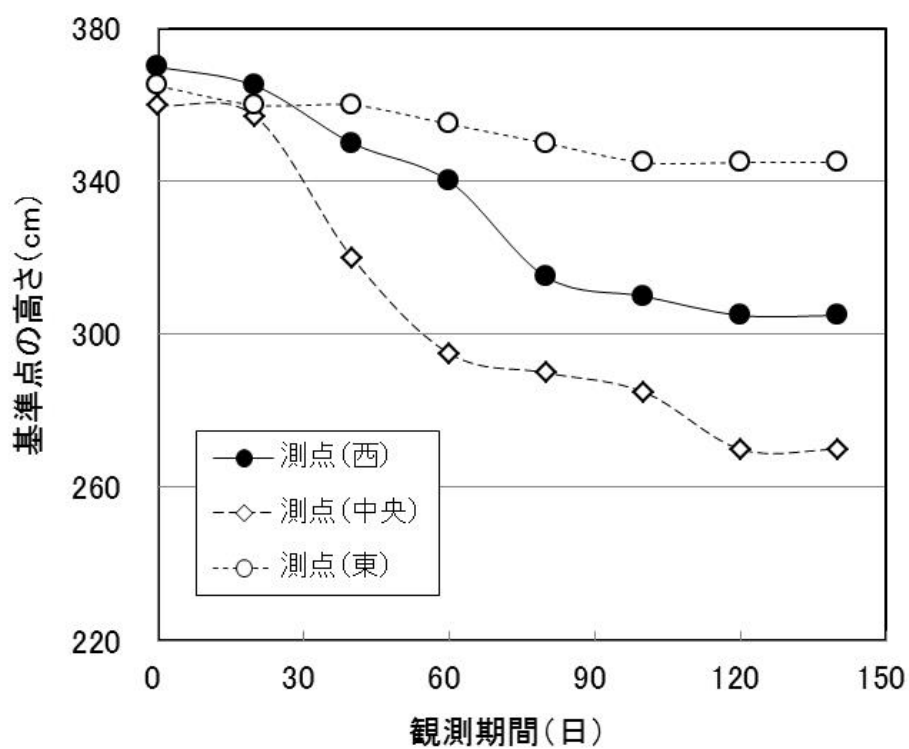


図 2.5 ベール貯蔵サイトの高さ変化



図 2.6 ベール設置後 140 日目の測点「西」下部
におけるベール（2011年6月17日撮影）

第2章 バイオエタノール粗原料用稲わらの貯蔵性およびパルプ化適性の検討

表 2.2 屋外貯蔵試験期間中の気象データ

月	降水量(mm)		気温(°C)			風向・風速(m/s)		
	合計	日最大	平均			最大風速		風向
			日平均	日最高	日最低	風速	風速	
1	2.0	1.5	2.6	8.5	-2.6	1.9	7.0	西北西
2	140.5	63.5	4.9	10.6	-0.1	1.9	8.0	北西
3	81.5	25.5	6.1	11.9	0.9	2.2	8.0	西北西
4	58.0	24.0	12.7	18.7	6.6	2.7	9.5	南南西
5	226.0	61.0	17.0	21.6	13.0	2.3	8.7	南南西
6	137.5	36.5	21.4	25.7	18.1	1.9	7.8	南南西

第2章 バイオエタノール粗原料用稲わらの貯蔵性およびパルプ化適性の検討

表 2.3 貯蔵サイトへのペール設置に掛かるコスト計算結果

名称	貯蔵コスト [円/年]	使用量	単価 [円]	摘要
パレット(償却費)	12,600	14 枚	4,500	耐用年数5年
ブルーシート(償却費)	3,750	5 枚	3,750	〃
結束材	1,530	170 m	9	消耗品
土のう袋	1,152	72 袋	16	〃
人件費(仮設・解体・後片付け)	131,250	15.0 人日	8,750	作業時間7h
基礎コンクリート(償却費)	95,238	6.0 月	2,000,000	耐用年数21年
合計	245,520			稲わらペール88ヶ貯蔵
(稲わらペール1ヶ当り)	2,505			207.6 BDKg/ペール
(稲わら1BDkg当り)	12			

2.3.2 稲わらのパルプ化試験の結果

図 2.7 は、マッシャー投入水分と粗粉碎わらの含水率および全糖の関係を示す。ここでマッシャー投入水分は絶乾稲わら 1 BDkg (BD: Bone Dry) に対する水量 kg の比率とした。マッシャー投入水分を 3.5% から 8.0% まで徐々に増やして粗粉碎・洗浄処理を行ったところ、粗粉碎稲わらの含水率は約 65% から 58% に低下した。この結果から、投入水分を増やすことによってマッシャーの圧搾性能が高まることが推測された。一方、マッシャー投入水分の増加に伴い、全糖は約 44% から 39% に減少した。この結果から、投入水分とともに粗粉碎わらの一部が漏えいしていることが懸念された。

図 2.8 はバッチ蒸解における液比と蒸解パルプ収率およびカップー価の関係を示す。液比とは、パルプ製造における薬品添加量の指標であり、蒸解釜に投入する蒸解薬品と水の比率である。紙パルプ産業では、液比が小さいほど経済的でプロセスの管理が容易と捉えられている(佐野ら 1985)。液比 2.0~5.0 の間では、液比とパルプ収率およびカップー価の相関は見られず、蒸解パルプ収率は 60~65%、カップー価は 30~40 の範囲となった。

バッチ蒸解は安定性のある処理法であり，投入水量の少ない低い液比でも蒸解可能であることが示唆された．図 2.9 はパルプ化試験において排出した洗浄排水，黒液，希黒液の発熱量を示す．本試験の結果では，発熱量は黒液が約 11.9 MJ/kg と最も高く，次いで洗浄排水が 8.8 MJ/kg ，希黒液が 8.4 MJ/kg となった．一般に製紙パルプ工場の黒液の発熱量は 13.2 MJ/kg とされている（経済産業省資源エネルギー庁 2007）．稲わらのバッチ蒸解における黒液はそれより低い発熱量ではあるが，可燃ごみの発熱量 10.1 MJ/kg よりは高いため（東京都環境局 2008），バイオマス燃料としての利用価値はあるものと考えられた．

図 2.10 はパルプ洗浄投入水分と希黒液 pH の関係を示す．パルプ洗浄投入水分は蒸解パルプの固形分量に対する水量の比率とした (kg/B D kg)．パルプ洗浄によりリグニンと炭酸ソーダ等の蒸解薬品が取り除かれる．蒸解パルプは高いアルカリ性を呈しているが，パルプ洗浄投入水分が多いほど希黒液 pH は低下傾向を示した．希黒液も発熱量が低くないため，黒液と同様にバイオマス燃料として活用することが可能と考えられた．

以上の結果，稲わらのパルプ化工程においては，

マッシャーの投入水分と圧搾性能の最適化を図り、液比を特定することが課題として残った。このため、200 B D k g の試験では確認できなかった諸条件について、より多量の稲わらを供試した連続運転での試験を行い、パルプ化工程を評価することが必要と考えられた。

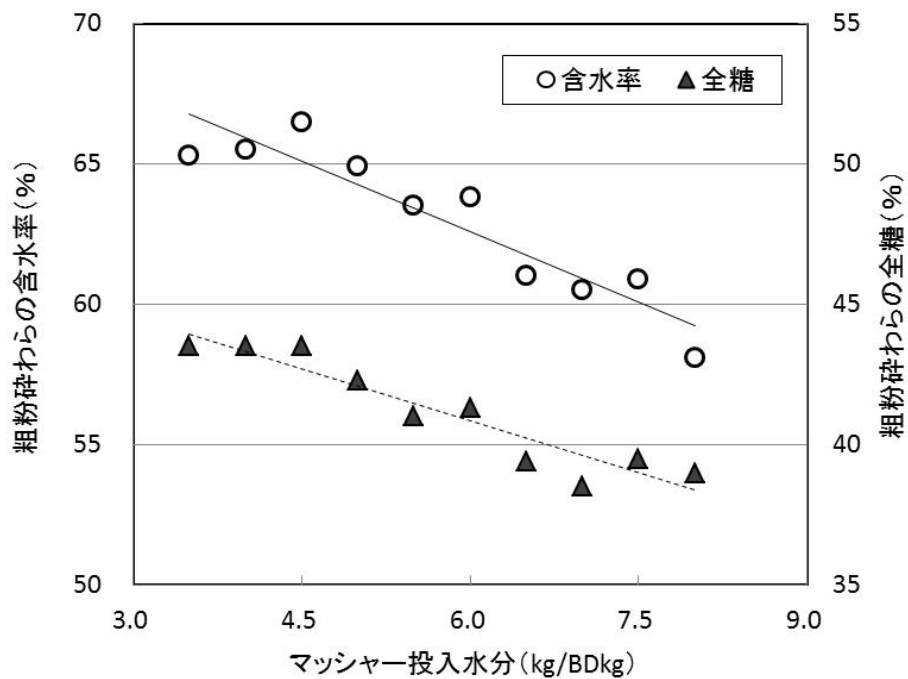


図 2.7 マッシャー投入水分と粗粉砕わらの含水率および全糖の関係

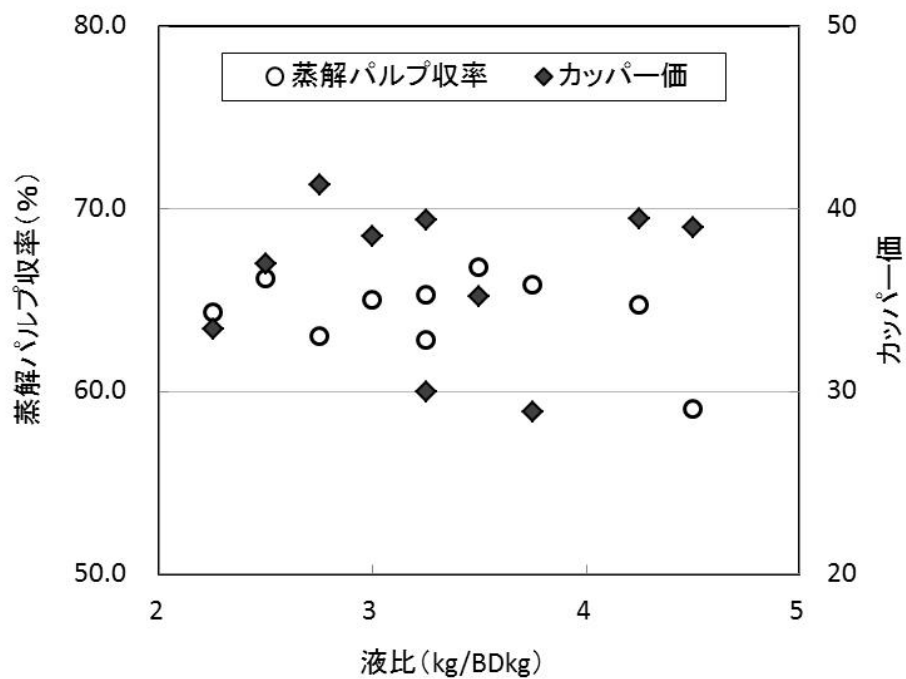


図 2.8 バッチ蒸解における液比と蒸解パルプ収率および銅価の関係

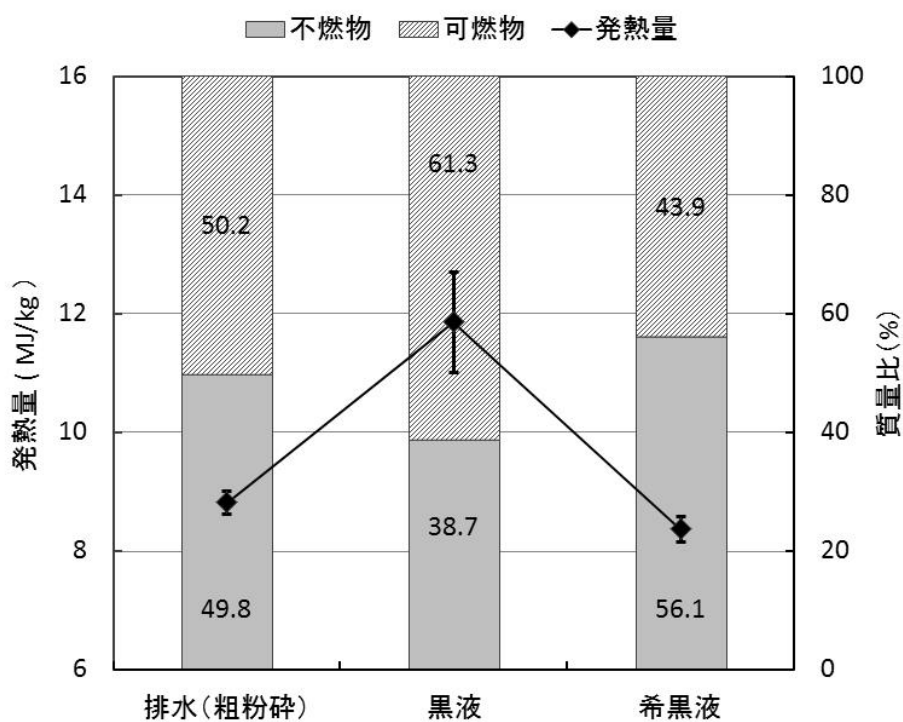


図 2.9 洗浄排水・黒液・希黒液の固形分の発熱量および質量比

z 図中のエラーバーは標準誤差を示す(n=10).

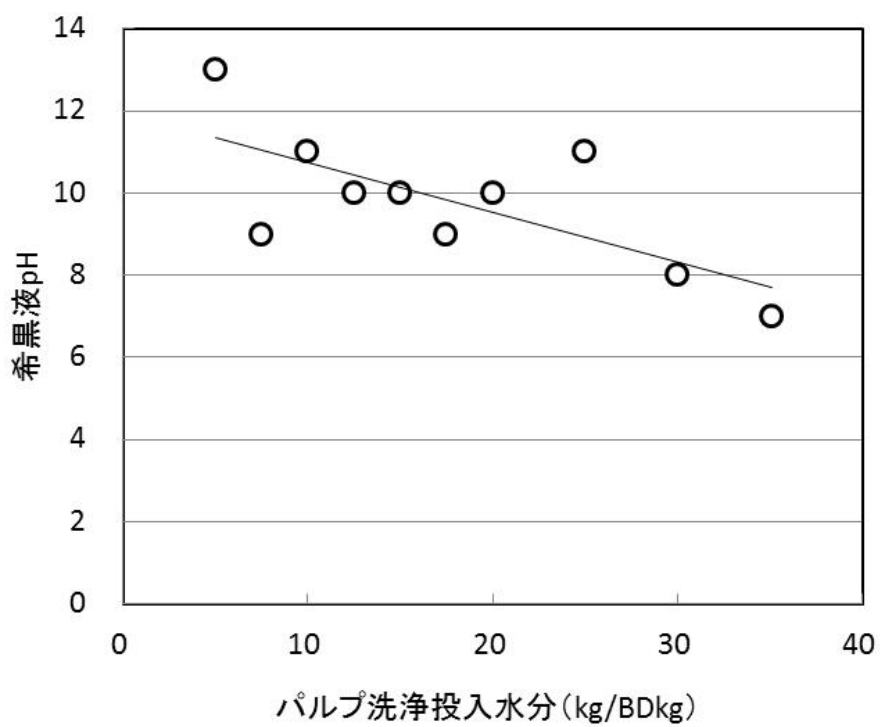


図 2.10 パルプ洗浄投入水分と希黒液の pH の関係

2.4 摘要

本章では、実規模に近い貯蔵試験でバイオエタノール粗原料用稲わらの貯蔵性を調査検討するとともに、稲わらのパルプ化工程における課題を整理した。

2.4.1 バイオエタノール粗原料用稲わらの貯蔵性

(1) ベール貯蔵サイトの高さは30日目を過ぎた頃から低下し始め、特に中央部分で大きく低下した。低下の原因は、土間に直接横置きしたベールの腐敗による変形であることが確認された。

(2) 本実証実験の事例では、98個のベールを貯蔵するために要する費用は絶乾稲わら1kg当たり12円/年と試算された。

(3) 稲わらの収集からパルプ化までの作業工程についてコスト要因の見直しを行う必要がある。

2.4.2 バイオエタノール粗原料用稲わらのパルプ化適性

(1) 稲わらの粗粉碎・洗浄において注水する水量が多くなると、粗粉碎わらの含水率が低下し、全糖が減少する傾向が見られた。これらの結果は使用した機械装置(マッシャー)の圧搾性

能や粉碎された稲わらの漏えいに関係するものと思われた。

(2) バッチ蒸解 ($n=10$) による蒸解パルプ収率は 60～65%、カップー価は 30～40 で安定しており、液比 5.0 以下でも蒸解が可能であることが示唆された。

(3) 洗浄排水、黒液、希黒液はバイオマス燃料として利用可能と思われる。

(4) パルプ化試験において明らかとなった問題点を解決するため、パイロットスケールによる連続運転を行い、200 BDkg よりも多量の稲わらを投入してプロセス全体を評価することが必要と考えられた。

2.5 引用文献（アルファベット順）

朴承榮・松本雄二・飯塚堯介・飯山賢司（1999）：
イネワラのアルカリ系蒸解における脱シリカ
反応に影響する因子，紙パ技協誌 53(2)；214-2
21.

Don A., Toenjes, Monte Bell, Bryan Jenkins (1
986): Baler ammoniation of rice straw, C
arifornia Agriculture, MAY-JUNE; 15-17.

Dubois, M. et al. (1956): Analytical Chemistry,
New York, 28, 350

五十嵐泰夫・斉木隆（2008）：稲わら等バイオマスか
らのエタノール生産，社団法人地域資源循環
技術センター，東京，pp. 56-70.

今井明夫・徳重英明・斉木了（1989）：わら類の効率
収集と飼料価値向上法，新潟県畜産試験場研
究報告，8号；55-60.

経済産業省資源エネルギー庁総合エネルギー統計
検討会事務局（2005）：2005年度以降適用する
標準発熱量の検討結果と改訂値について，1-2
9.

気象庁．我孫子の風向・風速（2009）：[http://www.
data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10dail
y_a1.php?prec_no=45&block_no=0376&year](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10daily_a1.php?prec_no=45&block_no=0376&year)

= 2011 & month = & day . 2011 . (2011 年 7 月 1 日 閲 覧) .

森本正和(1999):環境の21世紀に生きる非木材資源,ユニ出版,東京,pp.156-159.

村井勝・萬田富治・山崎昭夫(1996):アンモニア処理わらの飼料利用性に及ぼす供給エネルギーおよびタンパク質飼料の影響,北海道農業試験場研究報告,162;1-23.

農林水産省:グラフと絵で見る食料・農号.統計ダイジェスト,5米のできるまで. <http://www.toukei.maff.go.jp/digest/kome/kome.html> (2014年6月2日閲覧).

大蔵省印刷研究所(1976):非木材パルプ特集,研究所時報別冊.87-92.

佐賀清崇・芋生憲司・横山伸也・藤本真司・柳田高志・美濃輪智朗(2008).バイオエタノール生産に向けた稲わらの収集運搬作業体系に関する研究.日本エネルギー資源学会,29(6);8-13.

佐野嘉拓・斉藤直人・榊原彰(1985):ソルボリシスパルプ化による木材の脱リグニン(第4報):針葉樹材と広葉樹材の選択的脱リグニン反応.北海道大学農学部演習林研究報告,42(4);11

17-1133.

佐藤純一・中川西弘之・下名迫寛．稲わらの乾燥に関する研究－常温通風による貯蔵乾燥技術の開発．草地試験場研究報告．第11号：172-180．1977．

新エネルギー・産業技術開発機構(2010):平成20年度～平成21年度成果報告書 新エネルギー技術フィールドテスト事業 バイオマスエネルギー導入ガイドブック改訂に係わる調査 バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第3版);53-270.

Sugiya K(1999):Dyeing property of non-wood pulp, Japan Tappi Journal 53;64-69.

田中潤治・大井洋・横山朝哉・松本雄二(2009):キノン添加修正クラフト蒸解におけるキノン化合物の作用動態(第1報)－クラフト蒸解におけるキノン化合物の分布－,紙パ技協誌 63(4);426-436.

東京都環境局都市地球環境部(2008):バイオマス・都市ガス活用による再生可能エネルギー導入促進研究,東京都環境科学研究所年報 2008;75-78.

富山県製紙指導所(1970):県産原料によるパルプ

の製造技術に関する研究(稲わらパルプの製造技術),昭和44年度技術開発研究費補助事業成果普及講習会テキスト;1-10.

Whistler, R. L. et al. (1962): Methods in carbohydrate chemistry I, Academic press, New York, 388.

矢口時也・世佐木真弘・滝敏男・奈倉道博(1986): 酸化鉄法直接苛性化技術に関する研究, 第1部ソーダキノン蒸解について第1報 - N材のソーダキノン蒸解 -, 紙パ技協誌 40(5); 51-58.

横山伸也・芋生憲司(2009): バイオマスエネルギー, 森北出版, 東京, pp. 23-26.

吉岡秀樹(2002): 西南暖地における早期水稻品種の特性解析と出穂および収量の安定化に関する研究. 宮崎県総合農業試験場報告 38; 1-66.

第3章 稲わら収集作業工程の低コスト化に関する検討

3.1 緒言

バイオエタノール粗原料として穀物類を多用することが懸念されるなか、食料と競合しない木本・草本系粗原料を利用した燃料用バイオエタノール製造技術が希求されており（遠藤 2008）、世界各国で木本・草本に含まれているセルロースのエタノール変換に関する研究開発が活発化している（新エネルギー・産業技術総合開発機構 2010）。我が国においては、水稻生産に付随して排出される稲わらが草本系のセルロース原料として有望視されている（五十嵐および斉木 2008）。ただし、稲わらは広く薄く分布するバイオマス資源の特徴を濃く有しているため、その有効活用に当たっては単位面積当たりの収量確保および収集運搬の低コスト化などの課題を解決する必要があると考えられている（バイオマス・ニッポン総合戦略会議 2007）。

稲わらに含まれるセルロース、ヘミセルロースからエタノールを製造する場合、エタノール発酵に至るまでの前処理、糖化工程に一定のコストがかかる（新エネルギー・産業技術総合技術開発機構 2010）。このため必然的にそれ以外のコスト要因

である原料コストの削減が大きな課題となっており、広域、大量の稲わらを収集するシステムおよびその環境負荷などが検討されている（Kadam et al. 2000, 昔農ら 2009）。なお、現在のところ我が国における稲わら収集コストは1 kg当たり10円以下の枠組みで検討することが求められている（横山および芋生 2009）。

稲わらをバイオエタノール原料として収集する作業工程は、家畜用粗飼料の収穫調製のための作業工程に類似している。ただし粗飼料とは異なり、繊維分の保全が最優先であり、腐敗や被雨による泥などの付着を軽減するため、刈り取り、乾燥後速やかに収集することが望ましいと考えられている。刈り取り直後の稲わらは比較的高水分であるため、圃場で乾燥、軽量化の後、専用機械を用いてある程度の大きさのロール形状に梱包し、処理施設へ運搬する作業工程が一般に採用されている（日本エネルギー学会 2008）。稲わらを圃場乾燥する際の目標水分は、梱包後の発熱・発火防止、腐敗防止などの観点から15%程度がひとつの目安とされている（大谷ら 2007）。この乾燥に要する日数の短縮を目的として、圃場乾燥中の稲わらが梱包されるまでの間に2, 3回反転させる作業体系

が普及しているが，それらの作業工程にも機械力が投入されるため，収集運搬コストを引き上げる要因の一つとされている（横山ら 2009）．また，稲わら等からパルプを製造する場合，広大なわら貯蔵用地を持つことは経済的に不利であると考えられている（富山県製紙指導所 1970）．

近年，バイオエタノール生産に向けた稲わらの圃場収集について多くの研究成果が公表されている（佐賀ら 2008，金井ら 2010，日高ら 2012）．しかしながら，実規模の試験データに基づいたコスト縮減のための検討，特に作業工程省略や圃場における長期保管についての知見は少ない．一方で，稲わら収集作業を請け負う側のニーズに合致した収集時期の検討も必要とされている．そこで本研究では，稲わらや麦わらなど（以下，わら試料）のバイオエタノール粗原料の要求品質を踏まえた上で，圃場でのわらの収穫時期の分散・保管時の損耗も考慮して，長期の乾燥処理を行った．その際，収集時期の延長に対するわら試料の組成変化，および圃場乾燥時の反転処理省略による低コスト化の可能性などについて検討した．

3.2 材料および方法

3.2.1 供試材料

試験に供したわら試料の品種，栽培条件，刈取り条件を表3.1に示す．各々の稲（フサコガネ，コシヒカリ，ヒメノモチ，ミツヒカリ），麦（農林61号）は，千葉県柏市上利根地区の農場内で品種ごとに約1haの試験区を2ヶ所ずつ設定して栽培した．

3.2.2 わら試料の分析

設定した各試験区の四隅および対角線上の9点からわら試料を各500g程度採取し，質量既知のポリ袋（10L，450×500mm）に封入し，わら試料の含水率およびセルロース等の化学組成を測定した．

1) 含水率

圃場で採取したわら試料を試験室に持ち帰って105℃，24時間炉乾法によって湿量基準の水分を算出し，各試験区での平均値を求めた．

2) セルロースおよびヘミセルロース

試料に含まれる全糖をフェノール硫酸法の改良法，Hodge and Hofreiter法（Whistler et al.1962）に準拠して分析した．単糖はイオンクロマトグラフィー法（平山ら2012）に準拠して定量し，わら

試料に含まれているセルロース(C6糖)およびヘミセルロース(C5糖)の組成を推計した。

3) 酸不溶性リグニン

米国エネルギー省国立再生可能エネルギー研究所の研究室的分析法，72%硫酸沈殿法(LAP-003)に準拠して分析した(Templeton et al.2001)。

4) 灰分

灰分，酸可溶性灰分，酸不溶性灰分の定量は，575℃焼成法(Eharmann1994)に準拠した。即ち，130℃・24h炉乾燥したわら試料0.5～1.0gを，磁性ルツボを用いて，575±25℃の電気炉で12h加熱し，室温に冷却後0.1mgの精度で質量を測定しながら，繰り返し焼成を行い，測定質量からルツボ質量を差し引いて灰分量とした。酸可溶性灰分は，灰分量から酸不溶性灰分を差し引いた値で示した。なお，灰化する前の試料を炉乾燥することによって，水分測定による補正を省き，小麦原粒灰分の効率的な測定が可能と報告されている(藤田ら2013)。

表 3.1 供試わら試料一覧

品種	作型	収穫
農林61号	秋播き小麦	7月下旬
フサコガネ	早生・移植	8月上旬
コシヒカリ	標準・直播	9月上旬
ヒメノモチ	標準・移植	9月下旬
ミツヒカリ	晩生・移植	11月中旬

注) イネの収穫は自脱コンバインでの高刈り(刈高15~20cm程度)とし、長わらとして放出した。麦は普通コンバインにより収穫した。

3.2.3 わら試料の圃場収集試験

1) 作業工程

図 3.1 は バイオエタノール粗原料となる稲わらの収集・運搬等作業の流れを示す。表 3.2 は、圃場収集作業工程に使用したトラクタおよび作業機械の一覧である。作業工程および供試機械は、関東圏で普及している飼料用稲わらの収穫調製作業体系を参考とした(鈴木ら 2008)。即ち、地上 0.15 m で高刈りして放出された稲わらを圃場で天日乾燥し、回転輪型・作業幅 2.9 m のテッダレーキを用いて集草列を形成した後に、ベアラを用いて $\phi 1.2 \text{ m} \times H 1.2 \text{ m}$ のロールベールに梱包し、ベールグラブで回収した。本研究では圃場乾燥後の反転処理の効果を確認するため、稲刈りが行われてから 20 日目にテッダレーキを使用して反転処理を実施した試験区と省略した試験区を設けた。圃場乾燥は最長 115 日間行い、乾燥後のわら試料を中型ロール梱包した。圃場乾燥を除く作業工程の所要時間は、使用機械が試験区に進入して所定の作業を完了・停止するまでの時間より算出した。分析用のわら試料は、刈り取り後の各工程において適宜採取した。

2) ロール質量の測定

梱包作業では、梱包わら（以下、ロール）の形成数を確認しつつ、ロールの拾上・積込が完了した時点でクレーンスケール（秤量 1000 kg，最小表示目盛 500 g）を用いて湿潤質量を秤量した。その後直ちに牧草水分計（HX-700，ケット科学）をロールの各所に20点程度挿入し、平均水分を測定した。

3) 収量および収集率の推計

わら試料の収量（BD kg/ha）（絶乾）は、各試験区で回収したロールの湿潤質量（kg）にロールの平均水分（%）を乗じて得た値を、各試験区の面積で除して算出した。

わら試料の収集率（%）は、各試験区に放出されたわら試料の総量（BD kg）に対するわら試料の収量（BD kg）の比とした。

なお、わら試料の総量の推定は以下の手順により行った。刈り取り直前に立毛状態の稲または麦の株を試験区の四隅および対角線上の9箇所にて地表から0.15 mの高さで手刈りし、質量既知のポリ袋（10 L，450×500 mm）に封入して試験室に持ち帰った。固形分は全てステンレストレー（550×453 mm）に移し替え、送風低温乾燥機で一定程度乾燥させた。その後土質試験用の鋼製ストレートエ

ッジなどを用いて籾を除去し，105□・24時間炉乾法により，わらのみを乾燥して乾物質量を得た。得られた乾物質量は，別途調査した試験区の稲または麦の株数に乗じて1haあたりの質量に換算し，わら試料の総量として推定した。

4) 収集コストの算定

既存資料(向井ら1984)の収集コスト算定方法を参考として，トラクタを除く供試機械の経費，作業に係る燃料・油脂費，オペレータ労賃，消耗品費を積み上げて，わら試料1BDkg当りの収集コストを(3.1)式により算定した。

$$\text{収集コスト}[\text{円/BDkg}] = \text{固定費}(F) + \text{変動費}(V) + \text{人件費}(L) + \text{資材費}(P) \quad (3.1)$$

ここで固定費(F)は，供試機械の減価償却費，修理費，車庫費，資本利子，租税公課，保険料を足しあげた費用とした。

変動費(V)は，供試機械の燃料消費量に軽油価格(113円/L)を乗じ，わら試料の収量(BDkg/ha)で除して算出した。

人件費(L)は，供試機械のオペレータの労賃(1250円/hr)に1haあたりの作業時間(hr/ha)を乗じ，わら試料の収量(BDkg/ha)で除して算出した。

資材費(P)は、稲わらまたは麦わらの収集に要したロール梱包用ネットの消費量(m/ha)に単価(20円/m)を乗じ、わら試料の収量(BDkg/ha)で除して算出した。

なお、収集コスト算定の基礎となった供試機械の購入価格、軽油価格、オペレータの労賃、ロール梱包用ネットの単価は2010年3月現在の当該地における実勢価格を用いた。

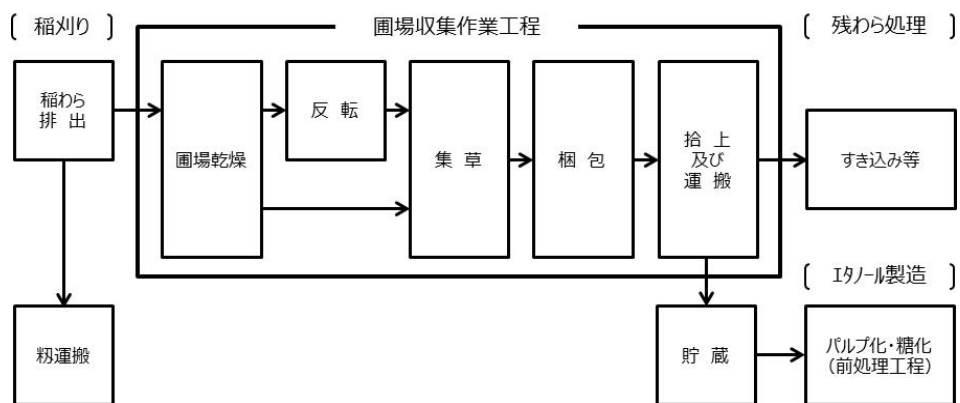


図 3.1 稲わらの収集・運搬等作業の流れ

表 3.2 供試機械一覧

作業工程	牽引トラクタの馬力	作業機の名称
圃場乾燥	-	-
反転	75PS	テッダレーキ
集草	75PS	テッダレーキ
梱包	165PS	ベーラ
拾上・積込	125PS	ベールグラブ

3.3 結果および考察

3.3.1 わら試料の水分変化

圃場乾燥によるわら試料の水分変化を示す例として、こしひかり試験区で採取したわら試料の水分変化および期間中の降水量を図3.2に示す。水分変化は反転処理の実施、省略それぞれの場合を、また図中の棒グラフは圃場に最も近い Am e D A S (我孫子)の降水量データ(気象庁2009)を示す。稲刈り直後(0日後, 2009/09/25)のわら試料水分は56%であったが、12日後には約30%まで低下した。反転処理を省略したわら試料の場合、20日後(2009/10/15)に10%まで低下するものの、50日後(2009/11/14)から83日後(2009/12/17)までは20%以上で推移した。わらの梱包においては発酵熱による自然発火に細心の注意が必要であり、わらパルプ製造産業では水分20~22%以上のわらは乾燥が不完全とされている(森本1999)。本試験では、わら試料水分が反転処理後の20日間および稲刈り後83日後以降(2009/12/17~2010/1/24)で20%未満となっていた。稲刈り後83日目以降のわら試料の水分低下は、降水量50mm以下の比較的少雨が続く気候条件と関係していると考えられる。図3.3aは気候官署「千葉」の月別天気出現率を示す。

「千葉」では，11月以降に「晴」の割合が増加し，晴天率は12月が72%，1月が68%である．本実験の結果は，冬に晴天が多い地域では，わら試料の天日乾燥が可能であるとする報告（佐賀，2008）と合致している．

一方，各種の気象データを用いた牧草等の水分損失モデルにより，稲わらの圃場乾燥の進み方を評価できると考えられている（MATSUOKA 2005）．即ち，Murrayの式により，日平均気温の値から飽和水蒸気圧 e_s を算出し（農業技術協会 1997）， e_s および日平均湿度 H から比湿 Δq を求め，対象地の風速 U ，比湿 Δq ，稲わらの含水比から（3.2）式により Drying constant (a) を算出する．

$$a = 15.5 \cdot U \cdot \Delta q / M + 0.0223 \quad (3.2)$$

ただし， a : Drying constant (h^{-1})， U : 平均風速 (m/s)， Δq : 比湿 $e_s \cdot (100 - H) / 100$ ， M : 稲わらの含水比 (g/g)， $e_s = 6.1078 \exp \{at / (t + b)\}$ (Murrayの式)， H : 相対湿度 (%)， t : 日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)， $a = 17.2693882$ ， $b = 237.3$

図 3.3b は，我が国3地区における a の試算結

果を示す。αの試算に当たっては、図3.2に示した稲わらの水分変化に基づいて算出した含水比(g/g)を用いた。3地区(札幌、つくば(館野)、熊本)のαの平均値を比べると、札幌および熊本では3.0以上であるが、つくば(館野)は約1.0と小さな値となった。また、札幌および熊本における当該期間のαの値は、つくば(館野)に比べてバラつきが多いと思われた。表3.3は我が国各地のα試算値一覧を示す。つくば(館野)は、図3.2の長期圃場乾燥を行った試験区に最も近い気象観測地点であり、我が国ではαが最も小さく、αのバラつきが少ない地点と思われた。つくば(館野)に次いでαの値が小さな地点は、長野、高知、網走であった。一方、つくば(館野)に次いでαのバラつきが少ない地点は、高知、網走、札幌、名古屋、前橋であった。(3.2)式は降水量の影響や土壌水分と稲わら等との水分の関係を考慮していないが、つくば(館野)とのDrying constant(α)の類似性という観点においては、東日本型、南海型、日本海型の気候(関口1959)に属する地域では稲わらの長期圃場乾燥の実施可能と考えられた。

わらパルプ製造産業では、稲わらを堆積する際にわら層内の通風を確保可能な貯蔵方法が導入さ

れている（富山県製紙指導所 1970）。したがってより厳密には，集草列の状態や放出わらの積層程度なども考慮する必要がある。また長期間圃場乾燥する場合は，水分以外の繊維成分の損耗なども含めてわら試料の品質を評価する必要があると思われる。

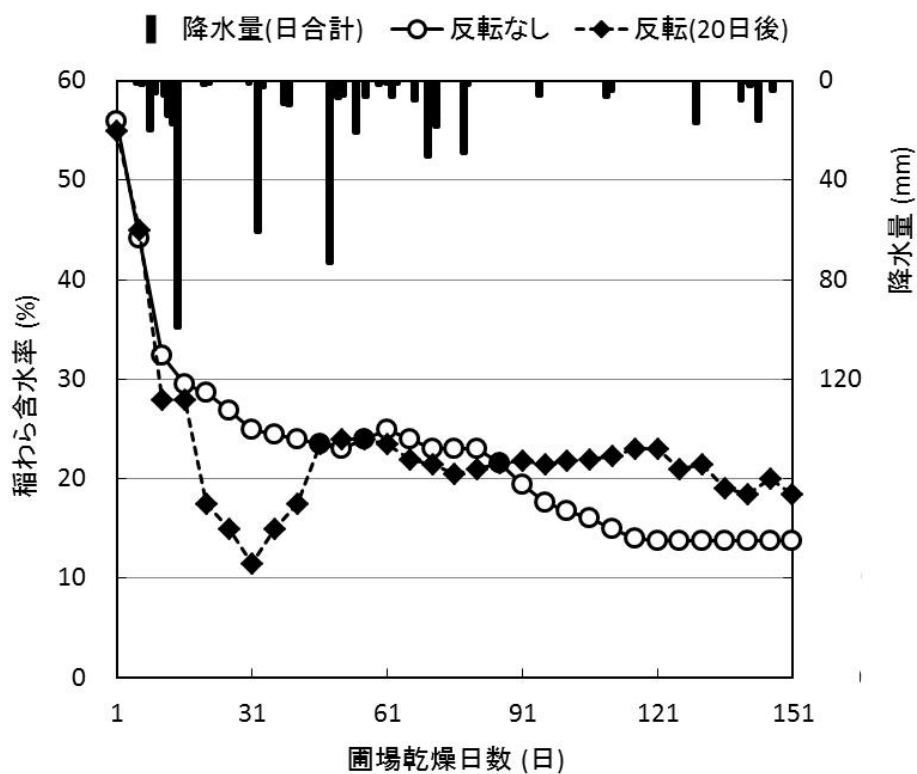


図 3.2 稲わら(コシヒカリ)試料の水分変化および降水量

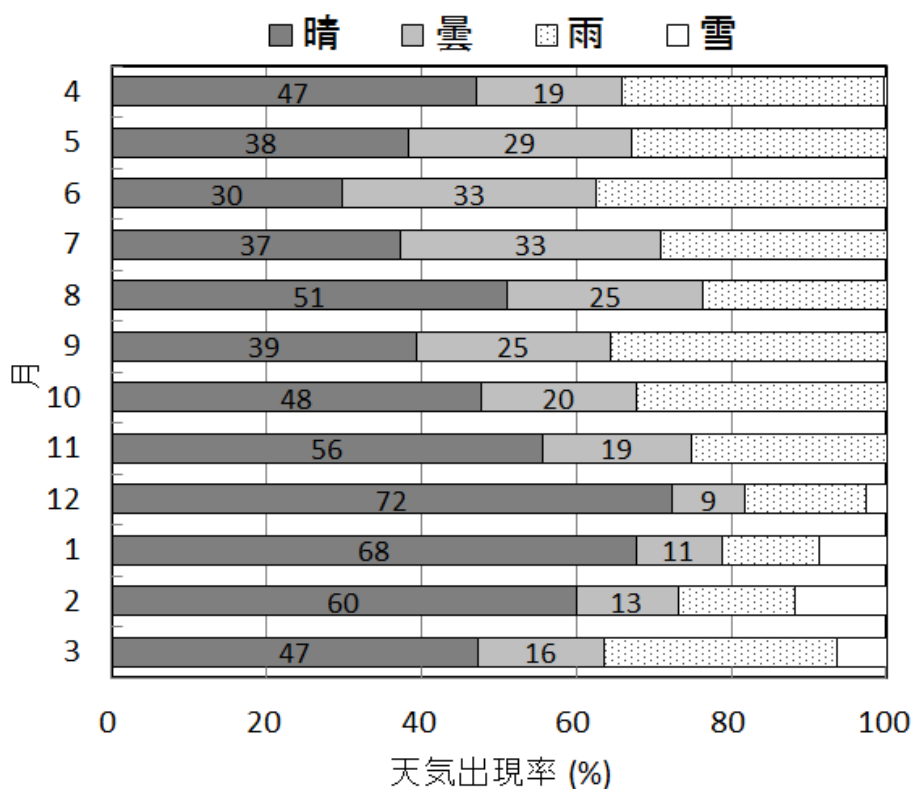


図 3.3 a 千葉の月別天気出現率

出典：東京管区気象台：千葉の日別天気出現率（統計期間 1981年～2010年9月）http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/kansoku_data/tenki/682.html, (2014年6月13日閲覧)。

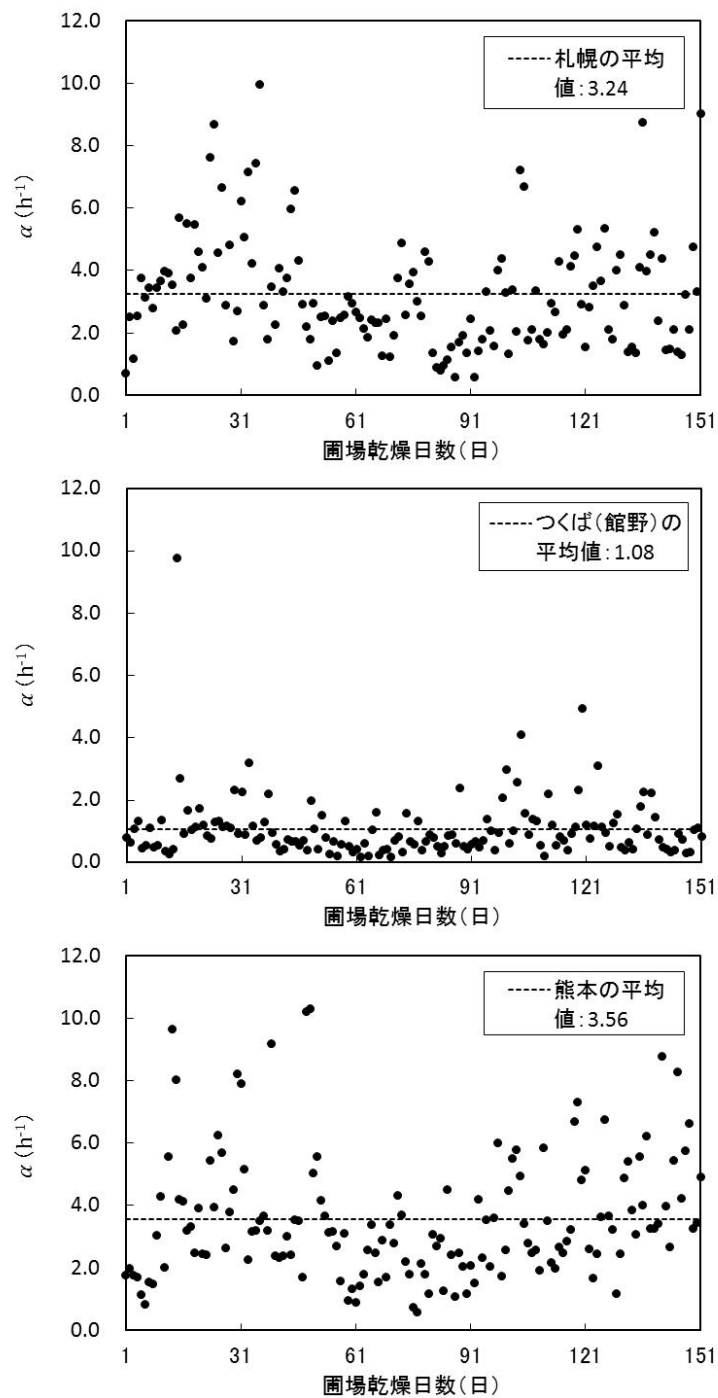


図 3.3 b 我が国 3 地区の 2009/9/25 ~ 2010/2/22 (151 日間)における α の試算結果

注) 図 3.2 に示した稲わらの水分変化に基づいて算出した含水比 (g/g) を用いて試算した。

表 3.3 我が国各地の α 試算値一覧

地点	α (h^{-1})		気候区分(関口1959)	
	平均値	標準偏差	大区分	細区分
網走	2.90	1.51	日本海型	オホーツク型
札幌	3.24	1.81	日本海型	北海道型
秋田	4.77	2.75	日本海型	東北型
新潟	4.68	2.92	日本海型	北陸型
松江	4.68	3.62	日本海型	山陰型
熊本	3.56	1.99	九州型	
高知	2.80	1.06	南海型	
岡山	4.79	2.79	瀬戸内型	
釧路	4.47	2.78	東日本型	東部北海道型
仙台	4.18	2.51	東日本型	三陸・常磐型
前橋	4.37	1.93	東日本型	東海・関東型
名古屋	3.51	1.91	東日本型	東海・関東型
長野	2.09	1.56	東日本型	中央高原型
那覇	15.03	6.26	南日本型	
つくば(館野)	1.08	1.03	本研究の試験区近傍	

3.3.2 わら試料の成分変化

圃場乾燥開始 21 日後および 151 日後にこしひかり試験区で採取したわら試料の成分組成を図 3.4 に示す。バイオエタノールの原料となるセルロースは約 27～29%，ヘミセルロースは約 16%～21%であった。稲わらの成分組成はセルロース 30～40%，ヘミセルロース 20～30%であるが、栽培時の栄養状態や収穫時期によって異なるとされている（五十嵐および斉木 2008）。長期間圃場乾燥することによりそれら成分に変化が生じる可能性がある。このため各成分の 21 日後と 151 日後で一元配置の分散分析（5%水準）による検定を行ったが有意差は認められなかった。したがって本研究の条件では、151 日間の圃場乾燥であってもセルロースやヘミセルロースの損失はそれほど大きくないことが明らかとなった。図 3.5 は、反転処理の有無とわら試料の酸不溶性灰分との関係を示す。灰分などの非炭素系成分は、バイオエタノール製造の際に可能な限り除去する必要のある成分でもある。わら試料の酸不溶性灰分は 21 日後に約 18%であったが、それ以降乾燥日数の経過に伴って増加する傾向を示した。この傾向は反転処理を省略したわら試料でも同様に見られたが、反転処理を

実施したわら試料は，省略した場合に比べて平均値でおよそ5%程度大きな値を示した．これはわらに元来含まれているシリカに加えて，反転処理によって土壌由来の無機物がわら試料に付着したことが主な原因と推察される．

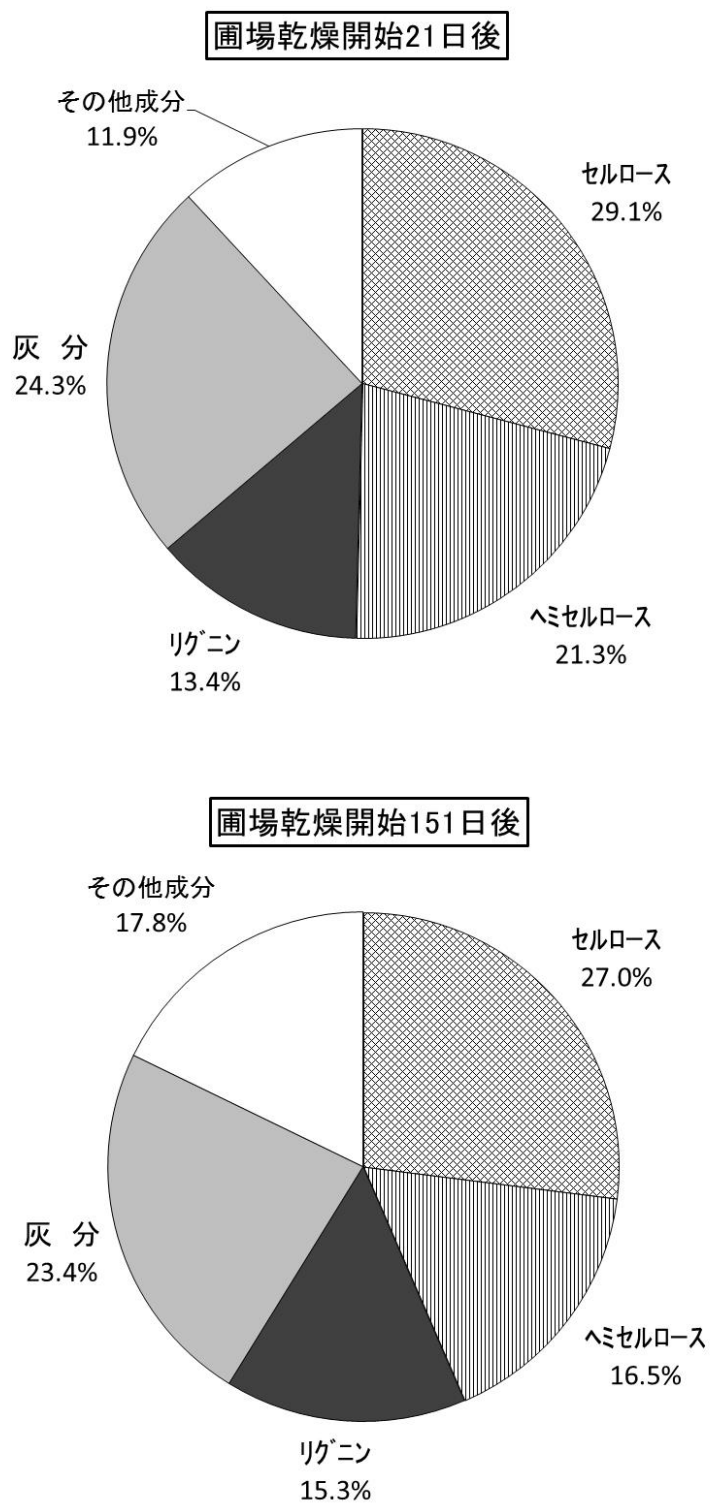


図 3.4 稲わら(コシヒカリ)試料の成分組成

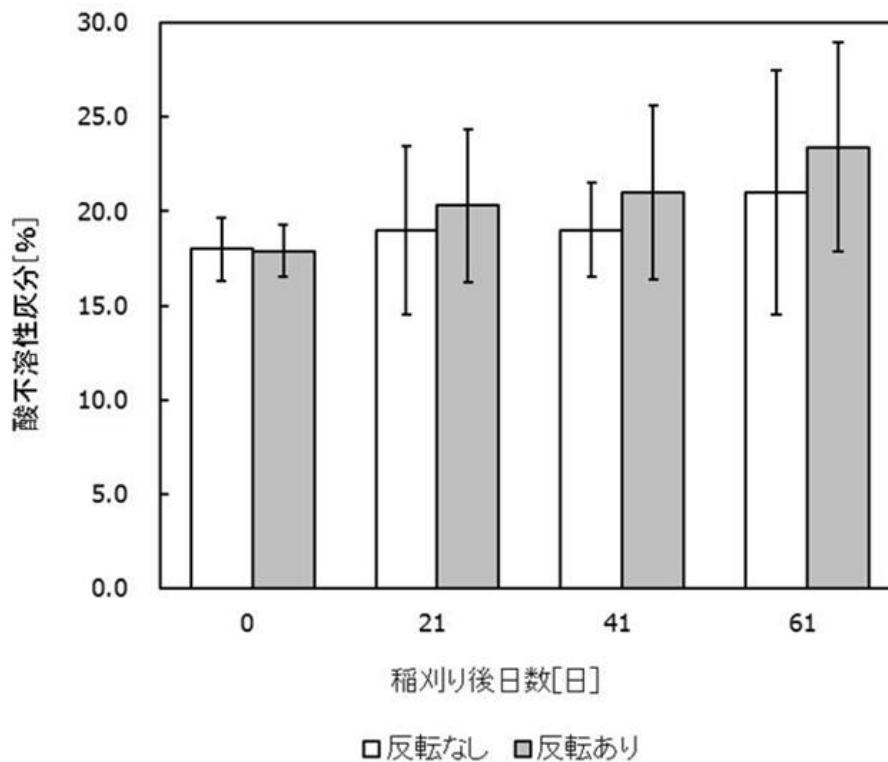


図 3.5 反転処理の有無と稲わら（コシヒカリ）試料の酸不溶性灰分の関係
 エラーバーは標準偏差を示す。稲刈り後日数ごとにデータ（反転なし，反転あり）について，分散分析により5%水準で検定したところ有意差は認められなかった。

3.3.3 収量および作業時間

圃場収集試験におけるわら試料の収量，各工程の構成割合(%)の内訳，および反転処理を実施した場合の実作業時間を表3.3に示す．秋播き小麦は稲に比べて反収が少なく，わらの収量は 1.27×10^3 BDkg/haであった．一方，早生種，こしひかり，もち米のわら収量は $5.5 \sim 6.0 \times 10^3$ BDkg/ha，多収穫米は 12.3×10^3 BDkg/haであった．稲わらの場合，反転処理に要する作業時間は $0.96 \sim 1.19$ h/haで，同様の機械体系で行う集草列形成の作業時間とほぼ等しかった．梱包，拾上・積込，ロール運搬の各作業時間は，わら試料の収量に応じて長くなった．全体作業における反転処理の作業時間割合は $12 \sim 27\%$ であった．

第3章 稲わら収集作業工程の低コスト化に関する検討

表 3.4 圃場収集試験におけるわら試料の収量および作業時間（内訳）

項目及び単位	農林61号	フサコガネ	コシヒカリ	ヒメノモチ	ミツヒカリ
収 量 [BDt/ha]	1.27	5.83	6.01	5.50	12.36
反 転 [h/ha] [%]	0.08 (3.4)	1.19 (22.1)	1.19 (23.8)	1.19 (27.1)	0.96 (12.0)
集草列形成 [h/ha] [%]	0.08 (3.5)	1.19 (22.1)	1.19 (23.8)	1.19 (27.1)	0.96 (12.0)
梱 包 [h/ha] [%]	1.00 (42.0)	1.78 (33.0)	1.47 (29.4)	1.04 (23.7)	1.95 (24.3)
拾上・積込 [h/ha] [%]	0.97 (40.8)	0.97 (18.0)	0.93 (18.5)	0.85 (19.4)	1.65 (20.6)
ロール運搬 [h/ha] [%]	0.12 (10.5)	0.26 (4.8)	0.23 (4.5)	0.25 (2.7)	2.49 (31.1)
作業時間計 [h/ha]	2.25	5.39	5.01	4.52	8.01

3.3.4 ロール重量および収集率に対する反転処理の影響

わら試料の種類別，反転処理の実施，省略別で分類した圃場収集後のロール質量を図3.6に示す。得られたロール全体での平均質量は207.5 kg/ロールであった。反転処理を省略した場合のロール質量は多収穫米，もち米，秋播き小麦の順に大きかった。一方，反転処理を実施した場合のロール質量は省略した場合よりも減少する傾向のあることが全種類で示された。図3.7は，わら試料の種類別・反転処理の実施，省略別で分類した収集率を示す。反転処理を省略した場合のわら試料の収集率はおよそ85%以上であった。なお目視した限りでは，反転処理後に相当量のわら試料が畝間，株間に落下していた。このことから，反転処理は梱包時のわら試料取り込み量に関係するとともに取り込み不能となるわら試料量を増大させる可能性があると考えられる。

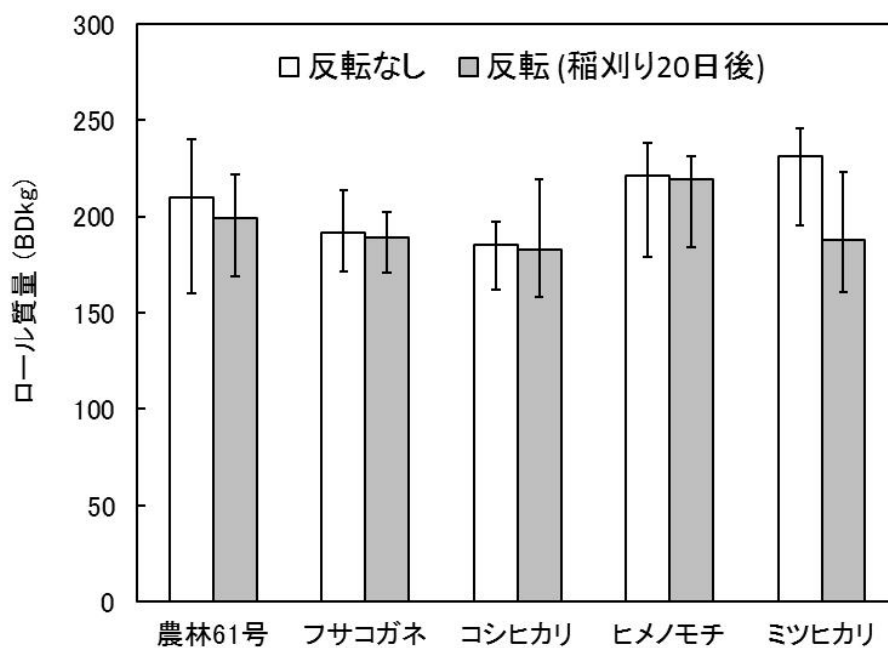


図 3.6 反転処理の有無とわら種類ごとのロール質量

エラーバーは標準偏差を示す。わら試料の種類、反転処理の有無に関して、分散分析により5%水準で検定したところ有意差は認められなかった。

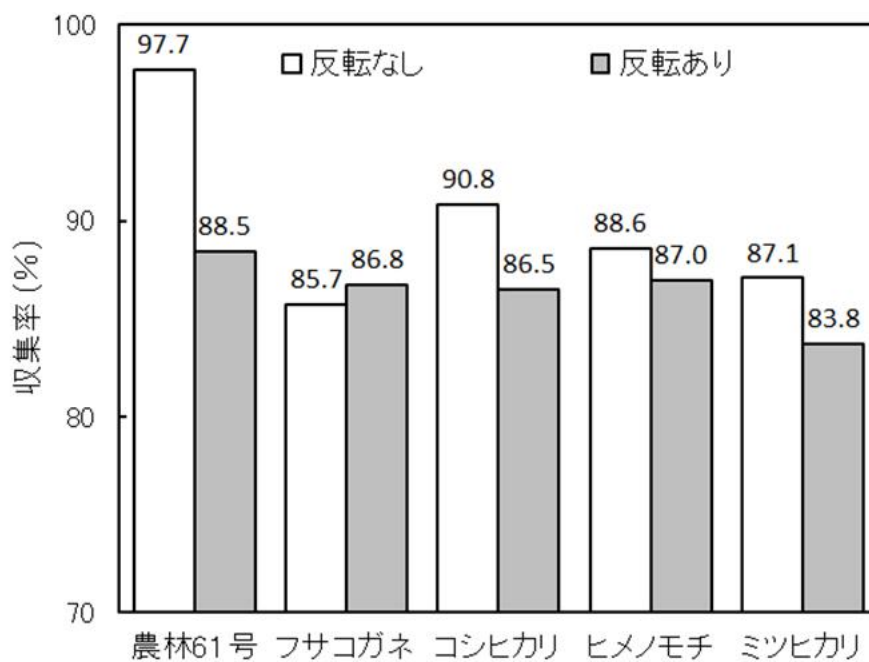


図 3.7 反転処理の有無とわら種類ごとの収集率

3.3.5 収量・収集作業時間・収集コストの関係

わら試料の圃場収集コストを図3.8に示す。秋播き小麦の収集コストが最も大きく35円/BDkg程度、次いでこしひかりが18~20円/BDkgであった。いずれの品種も、反転処理を省略した場合に収集コストが低下した。特に早生種およびもち米では約17%低下し、中でも、多収穫米では7円/BDkgであった。

図3.9は、反転処理を省略した場合の圃場収集作業の収集コストと作業時間の関係を示す。図の横軸は各わら試料の収量である。なお、図3.9に示した収集コストはロールの運搬コストを除外しているため作業時間にロール運搬の所要時間を含んでいない。わら試料の品種別収集作業時間は、麦わらが1.8h/ha、こしひかり等の稲わらが3.6h/haであった一方で、多収穫米は4h/haを超えていた。この結果は、わら試料の収集作業時間が収量の増加に伴って増大することを示している。同時に、わら試料の収量と収集作業時間の関係が線形性を示すことも確認された。金井らは収量の増加に伴って作業時間も増加することを報告しており(金井ら2010)、本研究においてもその関係が示された。一方、収集コストについては、わら試

料の収量増加に伴って低下することが示された。また、収量と収集コストの関係を線形とみなした場合、 R^2 は0.7程度であることが確認された。

以上の結果より、わらを刈り取り後長期間圃場に放置しても、バイオエタノール粗原料として利用不能となるような損耗や劣化は生じないことが示された。また、関東圏では冬期に長期間圃場乾燥することが可能であり、反転処理の省略で収集コスト低減も可能であることが明らかとなった。とりわけ、多収穫米のようなわらの収量が多い品種であれば、バイオエタノール粗原料として収益の目安となる10円/BDkgを下回る低コスト化が可能であることも示された。わらパルプ工場では、わらの集荷予定区域内の農家と契約を結び、集荷センター単位で独自の集荷組織を設けることが望ましいとされている(森本1999)。多収穫米は、こしひかりなどに比べて晩生であり、関東圏では稲刈りの時期が11月～12月となる。このため稲わらの収集時期を農閑期に設定することが可能であり、収集作業請負側のニーズに合致しやすい品種として期待できる。なお将来的には、稲刈りが始まる8月から翌年の施肥・耕うん作業までの期間は稲わらを圃場に放置し、農家が適時参画しやす

い わ ら 収 集 ・ 貯 蔵 シ ス テ ム を 検 討 す る こ と も 必 要
と 考 え ら れ た .

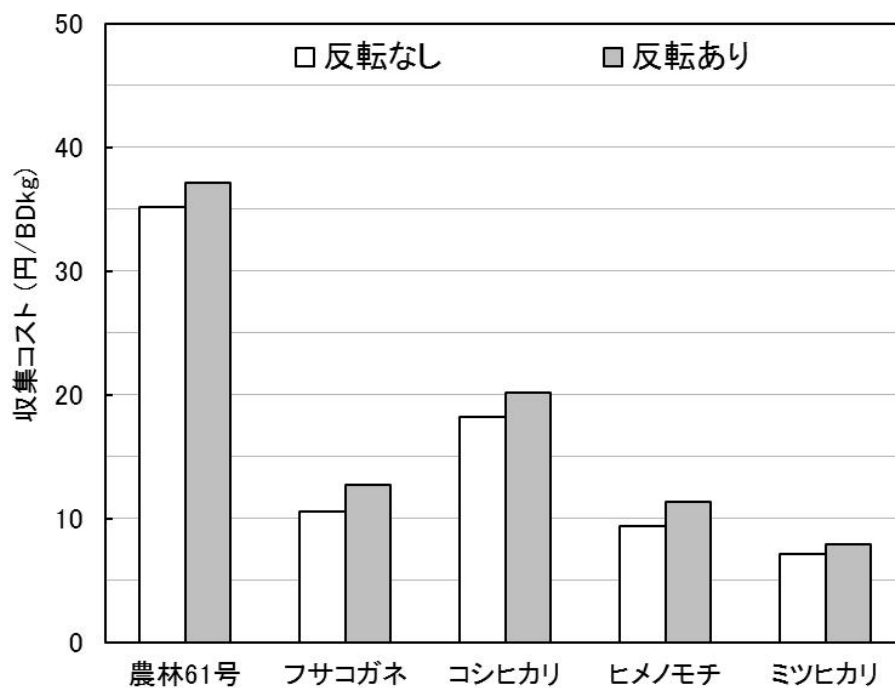


図 3.8 反転処理の有無とわら種類ごとの収集コスト

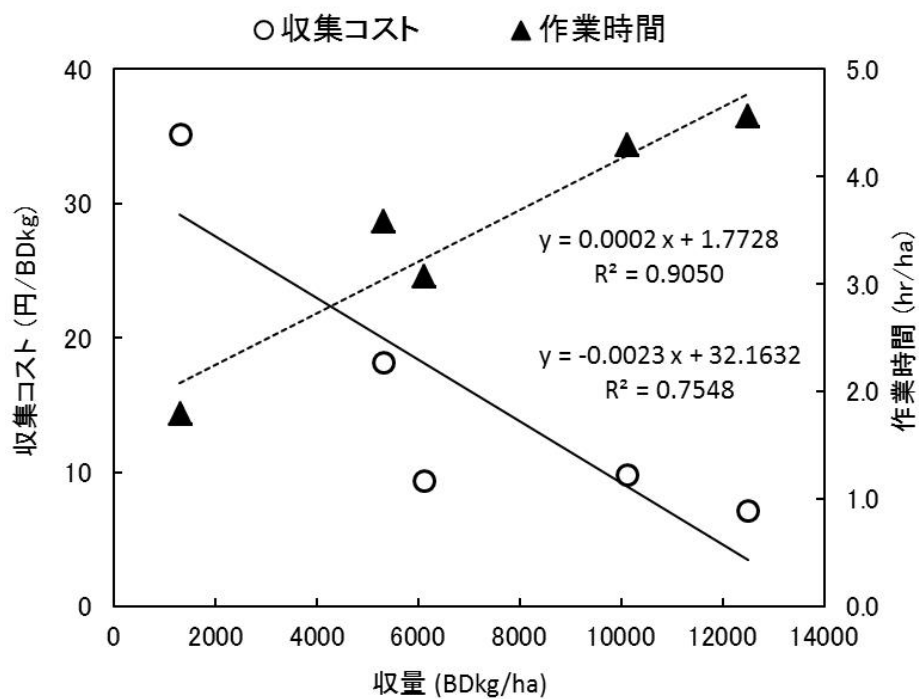


図 3.9 反転処理を省略した場合の収集コストと作業時間

3.4 摘要

5種類の稲わら・麦わらを長期間圃場に放置した際の水分，組成変化，および収集コストに対する反転処理省略の効果を検討した．圃場乾燥中のわら試料を反転処理することによって乾燥促進の効果は確認された．また稲刈り後90日以上経過すれば，反転処理を省略しても乾燥は進むことが確認された．圃場収集の全作業時間に占めるわら試料の反転処理作業時間の割合は12～27%であった．反転処理したわら試料で形成された中型ロールは，反転処理省略のロールよりも質量および収集率が小さかった．反転処理を省略した収集作業体系では，収量の増加に伴って作業時間は線形に増加し，収集コストは減少することが示された．

3.5 引用文献（アルファベット順）

バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議（2007）:

国産バイオ燃料の大幅な生産拡大；1-11.

Ehrman, T (1994): Standard method for ash in biomass, Laboratory Analytical Procedure #005. (<https://engineering.purdue.edu/LORRE/research/LAP-005.pdf>), (2013年9月1日閲覧).

遠藤真弘（2008）. 食料と競合しないバイオ燃料，調査と情報－Issue Brief 627；1-6.

藤田雅也・松中仁・八田浩一・久保堅司（2013）: 試料粉碎を省いた小麦原粒灰分の簡易省力測定法，九州沖縄農業研究センター報告，第59号；39-44.

日高靖之・野田崇啓・横江未央・橘保宏・川出哲生・梅田直円・栗原英治・嶋津光辰（2012）: 自脱コンバインと汎用型資料収穫機を利用した稲わら収集体系，農業機械学会 74(5)；343-347.

平山修治・山口迪子・泉可也（2012）: セルロースの分解試料における単糖類の迅速 HPLC 分析，Chromatography 33(1)；35-39.

五十嵐泰夫・斉木隆（2008）: 稲わら等バイオマスか

らのエタノール生産,地域資源循環技術センター,東京,pp.8-35.

金井源太・竹蔵憲弘・加藤仁・小林一有(2010):バイオマス収集拠点の立地と収集効率(第1報)ー稲わら収集における輸送エネルギー試算方法ー,農業施設,40(4);249-258.

Kiran L. Kadam, Loyd H. Forrest, W. Alan Jacobson(2000):Rice straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects. Biomass and Bioenergy 18; 369-389.

気象庁:過去の気象データ検索,千葉県我孫子,<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index>(2013年9月1日閲覧).

MATSUOKA Nobuhiro, HOSHIKAWA Satoshi, DEGUCHI Kenzaburo, SHIRAHATA Masaki and KON Hisashi (2005): Estimation of Water Loss from Cut Timothy Swaths in the Field by Meteorological Factors, Proceedings of the International Conference on Research Highlights and Vanguard Technology on Environmental Engineering in Agricultural Systems; 293-297.

向井三雄，池田弘，金津豊彦，米村純一，酒井学（1984）：農林水産省農蚕園芸局肥料機械課担当官，農業機械化研修テキスト，農業機械導入利用と安全管理，I 農業機械の導入利用計画，農業技術研修会；62-78.

森本正和（1999）：環境の21世紀に生きる非木材資源，ユニ出版，東京，pp.156-159.

日本エネルギー学会（2008）：（横山伸也編 アジアバイオマスハンドブック），バイオマスの生化学的変換；117-140.

農業技術協会（1997）：新訂農業気象の測器と測定法，日本農業気象学会編，農業技術協会，東京，大谷隆二・澁谷幸憲・天羽弘一・西脇健太郎・北中敬久・岡嶋弘（2007）：稲わらの圃場乾燥・収集技術の開発，平成19年度農業機械学会東北支部大会研究発表会要旨集，2.

昔農英夫・芋生憲司・横山伸也（2009）：稲わらの収集・輸送・貯蔵プロセスのLCA評価，日本エネルギー学会大会講演要旨集（18）；166-167.

新エネルギー・産業技術総合開発機構（2010）：第二世代バイオ燃料の研究開発動向（欧米），NEDO海外レポート 1059；1-10.

新エネルギー・産業技術総合開発機構（2010）：バイ

オマスイエエネルギーの技術の現状とロードマップ, NEDO 再生可能エネルギー技術白書; 171-252.

佐賀清崇・芋生憲司・横山伸也・藤本真司・柳田高志・美濃輪智朗(2008): バイオエタノール生産に向けた稲わら等の収集運搬作業体系に関する研究, エネルギー・資源 29(6); 8-13.

鈴木一好(2008): 専用収穫機と予乾方式の組合せで作業効率向上, 機械化農業 2008年8月号; 12-16.

関口武(1959): 日本の気候区分, 東京教育大学地理学研究報告(3); 65-78.

Templeton, David and Ehrman, Tina (2001): Determination of Acid-Insoluble Lignin in Biomass, Laboratory Analytical Procedure #003. (<https://engineering.purdue.edu/LORRE/research/LAP-003.pdf>). (2013年9月1日閲覧).

富山県製紙指導所(1970): 県産原料によるパルプの製造技術に関する研究-稲わらパルプの製造技術, 昭和44年度技術開発研究費補助事業成果普及講習会テキスト; 1-10.

Whistler, R.L., Wolfrom, M.L.(1962): Analysis

and preparation of sugars, Methods in Carbohydrate Chemistry, Academic Press, New York, pp. 380-394.

横山伸也・芋生憲司(2009):バイオマスエネルギー, 森北出版, 東京, pp. 23-35.

第4章 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産の前処理工程に関する検討

4.1 緒言

近年，稲わらなどの植物系農業廃棄物がバイオエタノール粗原料として注目されているが，エタノール変換プロセスには大きな化石エネルギーの投入を必要であり（Binod, et al. 2010），より効率的なエタノール変換技術の開発が希求されている（Koizumi 2013）。

植物系のバイオマス原料からエタノールを生産するためには，セルロースやヘミセルロースなどの多糖類をグルコースとキシロースに分解・遊離する糖化処理が必要となる（横山および芋生 2009）。稲わらのセルロースやヘミセルロースはリグニンが結合したリグノセルロースとなっているため，基質である稲わらの比表面積を増やして，リグニンを変性させるパルプ化が適していると考えられている（Zhao, et al. 2012，五十嵐および斉木 2008）。

パルプ化法はリグノセルロースの一部を構成するリグニンを除去し，セルロースとヘミセルロースを回収する製紙技術の一部として確立されている。針葉樹または広葉樹のチップを原料とする

パルプ製造では、苛性ソーダ等のアルカリ系混合液（蒸解薬品）を加えて熱処理するクラフトパルプの製法が主流となっている（Binod, et al. 2010）。稲わらが主要な製紙原料であった1878年から、我が国でも製紙製造法として適用されており（大蔵省印刷局研究所 1976, 杉谷 1999）、今も尚、数か国で特殊紙の原料となるわらパルプが製造されている。クラフトパルプの製造においては、強度や白色度などの紙質を確保するために、苛性ソーダ、亜硫酸ナトリウム、炭酸ナトリウムが蒸解薬品として使用されている。木質チップを主原料とする製紙産業では、アルカリ反応の弱い炭酸ソーダ（炭酸ナトリウム）は蒸解薬品として効率的とはいえないが、紙の品質を求められない場合は有効と考えられている（Yang et al. 2012）。炭酸ソーダ等を用いたパルプ化プロセスでは、アルカリ系薬品を蒸解廃液（黒液）として回収している。製紙工場では回収した黒液の熱利用や発生蒸気による発電が行われており（Andersson 2007）、稲わらからバイオエタノールを製造するプロセスにおいても、省エネ・低排出を図る上で重要な要素技術とされている。（五十嵐および斉木 2008）。

農作物残渣からバイオエタノールを製造する

ための研究開発は，ラボスケールの検討が多く，バイオエタノール製造プロセスのスケールアップに関する報告は少ない．また，プラント全体の建設コストと製造規模の経験則である0.6乗則による報告はいくつがあるものの(Humbird et al. 2011)，単位工程のスケールアップに特化した報告は少ない．

一般に，化学プラントの開発では，ラボスケール，パイロットスケール，商業化スケールの順に段階的なスケールアップが行われる．ラボスケールでは，プロセス設計のための基礎的な検討が行われている．パイロットスケールでは収量・収率，設備装置の再現性を確認し，経済性を考慮した製造方法の詳細検討を行うことが望ましいとされている(竹林ら 2012)．

そこで，本研究では，パルプ化プロセスを前処理法としたバイオエタノール製造プロセスのスケールアップのための検討の一環として，稲わらのパルプ化，酵素糖化およびエタノール発酵等の単位工程に関する基礎データ収集を目的として，想定される商業規模の1/40スケールのパイロットプラントにおける投入物質量および処理効率を調査した．

4.2 材料および方法

4.2.1 原料稲わら

試験には、2009年9月下旬に千葉県柏市上利根地区の圃場内で稲刈り時に放出されたコシヒカリの稲わらを供した。約3ヵ月天日乾燥し、その後小型の角ベールに梱包した(外形寸法:0.3×0.4×0.8m, サイザルトワイン結束)。ベールの平均質量は12.5kg/個, 平均水分は16.2%WBであった。

酵素糖化にはセルラーゼ(アクセルレースデュエット, ナガセケムテックス, 大阪)を使用し, エタノール発酵には市販のパン酵母(オリエンタルイースト, オリエンタル酵母, 東京)を使用した。

4.2.2 バイオエタノール製造プロセス

図4.1は本研究に適用したバイオエタノール製造プロセスを示す。ベールを解梱して、稲わらを糖化、発酵の前処理工程に投入する。稲わらを粗粉碎・洗浄しながら細断した後、アルカリ系薬品等とともに蒸解し、再び洗浄する。これらの前処理を行った後、蒸解薬品などを洗い流したパルプを酵素糖化し、糖化液をエタノール発酵して、蒸留、脱水することで95%エタノールを得る。このバイオエタノール製造プロセスに関する研究はパイロットプラント(千葉県柏市柏の葉地区に築造

設置)で実施した。各工程用に導入した機械装置を表4.1に示す。また、パイロットプラントの主要な装置と操作状況の写真を図4.2に示す。プロセスの物質収支は、蒸解釜(地球釜)の1バッチ当りの稲わら処理量200BDkgを基本として設計した。前処理(パルプ化)プロセスが図4.1と同じ非木材パルプ製造工場では、16t/dのパルプ生産の実績がある(東邦ワラパルプ1985)、本研究のパイロットプラントは、商業的な非木材パルプ製造工場の1/40のスケールに相当する実証試験施設である。

以下、単位工程ごとの処理方法を整理した。

1) 粗粉碎・洗浄

原料稲わらを回転式ブレード刃の付いたマッシャー(イーギミック, 大善, 静岡)を使用して粗粉碎・洗浄した。本実験では、処理能力 500 BDkg h^{-1} 、約80 \square の温水を注水しながら連続的に稲わらの粗粉碎と洗浄を行うことができるマッシャーを用いた。粗粉碎・洗浄された稲わら(図4.2(A))は自重による脱水を行った後、 1 m^3 のフレコンバックに受け取り、フックスケール(CASTONI 0.5THA, エム・エス・ケー農業機械, 千葉)で湿潤質量を秤量した。また、蒸解釜に投入する直前の稲わらを抜き取り、絶乾質量、水分含量測定のため

ために，105℃・24 h 乾燥した。

2) ソーダ蒸解

粗粉碎・洗浄わらを球形蒸解釜（地球釜，内容量1.8 m³）に1バッチ当たり200 BDkg以内の範囲で投入し，蒸解釜のマンホールから蒸解薬品（炭酸ソーダ濃度3.45%，苛性ソーダ濃度0.07%）および水を投入した。その際，粗粉碎・洗浄わらの絶乾質量に対する蒸解薬液比は5:1とした。蒸煮釜のマンホールを閉鎖した後，地球釜に蒸気を導入して，1.0 rpmで蒸煮釜を回転させながら，165℃で1時間加熱した。加熱完了後は，釜を回転させたまま1時間自然放熱した。この操作により，稲わらパルプ（以下，蒸解パルプ）と蒸解廃液（以下，黒液）が得られた。蒸解パルプは水切器（ドレーナー）に受け取り（図4.2（B）），ドレーナーで自重により圧搾，黒液と分離した。分離した蒸解パルプについては，残留リグニンと相関のあるカップー価をTAPPI Standard T236m-60（JIS P 8211，ISO 302:2004）に準拠して測定した（Parker et al. 1970）。カップー価は，絶乾パルプ1gが消費した1/10規定過マンガン酸カリウム溶液のmLで示され，パルプに接触している過マンガン酸カリウム溶液の50%消費量に補正した数値である。原料

の種類および蒸解法により異なるが，残留リグニン% = $0.15 \times$ カッパー価の関係が成り立つとされている。

3) パルプ洗浄

脱液した蒸解パルプは 5 m^3 の希釈タンク (図 4.2 (C)) に移送し，洗浄水を添加して所定濃度まで希釈した (パルプスラリー)。その後，回転容積式一軸偏心ねじポンプ (NYS 型モノポンプ，兵神装備，兵庫) を用いてパルプスラリーをドラム型洗浄機 (PW-20，大善，静岡) に投入した (図 4.2 (D))。パルプスラリーに高圧シャワーで加水しながら，ドラム型洗浄機内部の回転ドラムによって洗浄パルプと低濃度の黒液に分離した。洗浄機の処理量は $460 \text{ B D k g} \cdot \text{h}^{-1}$ であった。洗浄パルプはドレーナーに回収して，自重による圧搾により脱水した。

4) 酵素糖化

洗浄パルプを糖化ジャー (Fig. 4.2 (E)) に投入し，パルプ絶乾質量の 20 倍相当量を加水して約 3000 L (基質濃度 5%) に希釈した後に，希硫酸水溶液で pH 9 に調整した。濃度調整後直ちに，糖化ジャーのジャケットに蒸気を導入して糖化ジャー内部を 50°C まで加温した。その後，セルラーゼを絶乾パルプ 1 kg 当たり 101 g (酵素濃度約 10%)

添加し，24 h 攪拌して糖化反応を促進させた．糖化終了時に市販の Brix 示度計 (PAL-BX/RI, アタゴ, 東京) を用いて可溶性固形物濃度 (糖濃度) を測定した．

5) 発酵・蒸留

糖化ジャー下部から内容物を取り出し，ドレーナーを用いて糖化液と糖化残渣に分離した (図 4.2 (F))．糖化液は，糖液濃縮装置 (CEP-5S, 大川原製作所, 静岡) に導入して，循環濃縮によって 15～20 % の糖液となるようにした．濃縮した糖化液は内容量 1,000 L の保温ジャケット付き発酵ジャーに移し，市販のパン酵母を所定量投入してエタノール発酵を開始した．28 °C で 24 h 発酵後に発酵液をサンプリングし，ガスクロマトグラフ (GC-14A 型, 島津製作所, 京都) でエタノール濃度を測定した．発酵もろみは 2 回蒸留し，エタノール濃度が 90 % 以上となったところで蒸留作業を終了した．得られたエタノール溶液は，エタノールの脱水に適したモレキュラーシーブ 3A を用いて PSA-カラム法 (圧力スウィング吸着法) により 8～10 時間程度静置脱水し，95 % エタノールとなったことを確認した．

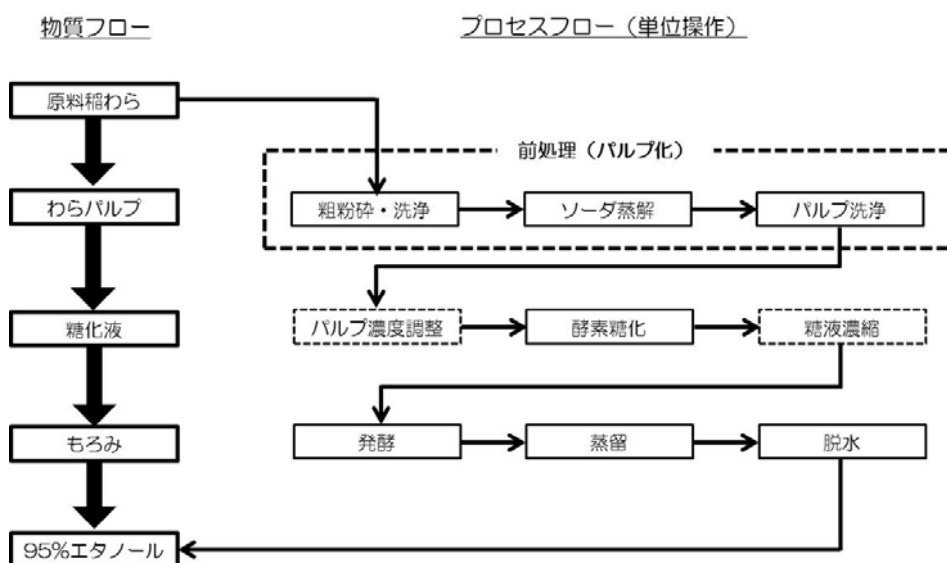


図 4.1 前処理工程にクラフトパルプの製法を取り入れたバイオエタノール製造フロー

表 4.1 バイオエタノール製造に供試した機械装置一覧

単位工程	機械装置の名称	性能・数量	製造元, 所在地
粗粉碎・洗浄	マッシャー	500kg h ⁻¹ * 1	大善, 静岡
アルカリ蒸解	地球釜 (高温耐圧容器)	1.8m ³ * 1	加藤製缶鉄工所, 静岡
パルプ洗浄	ドラム型洗浄機	460kg h ⁻¹ * 1	大善, 静岡
(パルプ濃度調製)	希釈タンク	5.0m ³ * 2	増幸産業, 東京
酵素糖化	攪拌装置付き糖化ジャー	3000L * 4	高杉製作所, 東京
(糖液濃縮)	エバポレータ	200kg h ⁻¹ * 1	大川原製作所, 静岡
発酵	攪拌装置付き発酵ジャー	1000L * 1	高杉製作所, 東京
蒸留	試験用常圧蒸留装置	20L * 1	高杉製作所, 東京
ユーティリティ	ガス貫流ボイラー	2000kg h ⁻¹ * 1	三浦工業, 東京



図 4.2 パイロットプラントの主要な機械装置

(A) マッシャーから排出された粗粉碎・洗浄わら

(B) 蒸解釜（地球釜）およびドレーナー

(C) ドラム型洗浄機（外観）

(D) ドラム型洗浄機によるパルプ洗浄およびパルプの分離

(E) 糖化ジャー

(F) 糖化液

4.3 結果および考察

4.3.1 粗粉碎・洗浄

図 4.3 は，粗粉碎・洗浄工程における原料稲わら投入量と粗粉碎わらの収率の関係，および原料稲わら投入量と粗粉碎わらの水分の関係を示す．粗粉碎わらの収率は，原料稲わら投入量の増加に伴って 98.5 % から 96 % 程度に減少し，粗粉碎わらの水分は 55 % から 65 % 程度に増加した．また，原料稲わら投入量の増加とともに，収率と水分は一定の値に近づく傾向を示し，原料稲わら投入量がおおよそ 3000 B D k g 以上で収率は約 96 %，水分は約 65 % となった．

図 4.4 は，粗粉碎・洗浄処理の前後の稲わらの外観を示す写真である．マッシャー処理は温水を注入しながら行った．そのため，粗粉碎わらは高含水状態となり，茶褐色を呈していた．粗粉碎わらは，原料稲わらに比べて繊維がほぐれ，細かくなっていることが観察された(図 4.4(A)(B))．ラボスケールでは通常，稲わらのマッシャー処理を模してカッターミルやアトマイザーで稲わらの繊維を粉碎する．そのため，実際の粉碎処理の状況や処理前後の繊維の変化を肉眼で確認することができない (S m a l l, 1969)．しかし，パイロットスケ

ールでの処理により，粗粉碎・洗浄工程により粗粉碎わらは高含水状態にあること，稲わらの約4%が損失流出することが確認された．

粗粉碎わらは繊維が短く，水分が多い．マシンの廃液排出口にナイロン製脱水袋を取り付けて粉碎・洗浄処理を行ったところ，粗粉碎わらの一部を捕獲することができた．従って，マシンの廃液排出口にスクリーン等を取り付け，粗粉碎わらの収率を改善することが可能と考えられる．また，粗粉碎わらは，夏季は一昼夜，常温で保管した場合に腐敗が進行するため，原料稲わらよりもハンドリング性が悪化する可能性が示された．本研究では粗粉碎わらを1m³フレコンバックに受け取っているが，次工程に移送する方法，装置を工夫する必要があると思われる．

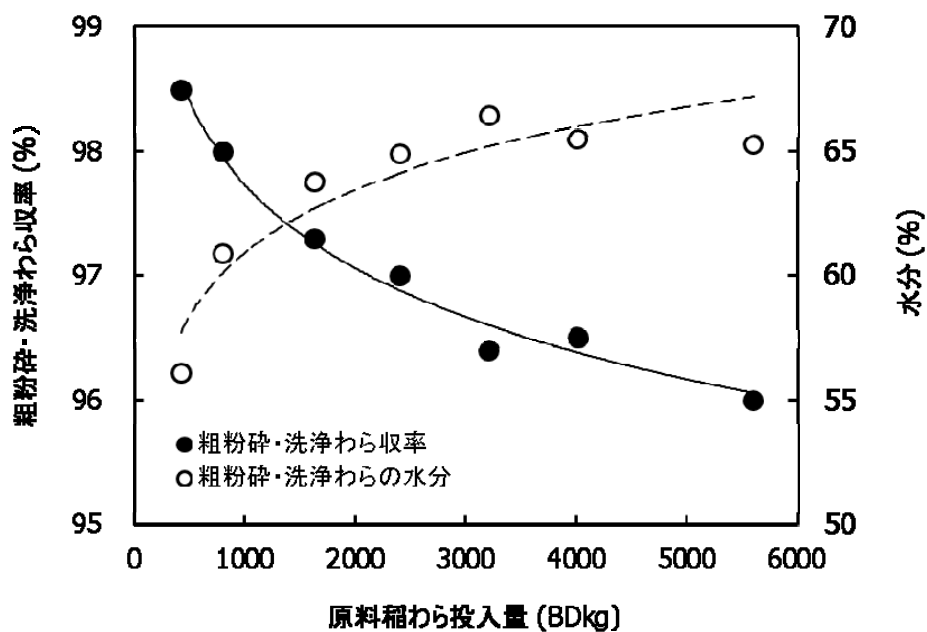


図 4.3 原料稲わら投入量と粗粉砕・洗浄わらの収率および水分の関係



(A)

(B)

図 4.4 原料稲わらと粗粉碎・洗浄パルプ

(A) 原料稲わら

(B) 粗粉碎・洗浄パルプ

4.3.2 ソーダ蒸解

図 4.5 は、アルカリ蒸解工程での粗粉碎わら投入量 (200 ~ 5600 BDkg) と蒸解パルプの収率およびカップー価の関係を示す。パイロットプラントにおける蒸解パルプの収率はカップー価が 32 ~ 34 のときに 66 ~ 68% であり、粗粉碎わら投入量の多少にかかわらず安定して、高い収率が得られた。なお、この結果は、同じカップー価の範囲で行ったラボスケールの収率 60 ~ 62% (Yang et al. 2012) よりも高かった。

4.3.3 パルプ洗浄

図 4.6 は、パルプ洗浄工程における蒸解パルプ投入量と洗浄パルプ収率の関係を示す。蒸解パルプ投入量 250 ~ 3600 BDkg の範囲における洗浄パルプ収率は 80 ~ 95% であった。洗浄パルプの繊維長はおよそ 0.3 ~ 0.6 mm の範囲であったが、標準的な製紙原料である LBKP (広葉樹晒クラフトパルプ) の繊維長 0.6 ~ 0.7 mm (Guo et al. 2009) に比べて短い。ドラム型洗浄機は LBKP に適した設計となっており、洗浄パルプを分離するスクリーンは 100 メッシュとなっている。そのため洗浄パルプのうち微細なパルプが漏えいし、収率が 5% 以上低下したと考えられる。今後、わらパルプに適した

装置の改良が必要と思われる。

表 4.2 は、稲わらの前処理工程各段階における稲わらあるいはパルプの組成を示す。蒸解パルプは粗粉碎わらよりもリグニンが少なく、洗浄パルプは蒸解パルプよりもリグニンが少なくなった。この結果は蒸解およびパルプ洗浄の脱リグニン効果を表している。蒸解およびパルプ洗浄工程では、脱リグニンが進み、相対的にセルロースとヘミセルロースの割合が高いパルプとなることが確認された。灰分の割合は変化が少なく、23～25%のままであった。稲わらに含まれているシリカ等の灰分は、蒸解等の前処理工程では除去されないことが示唆された。

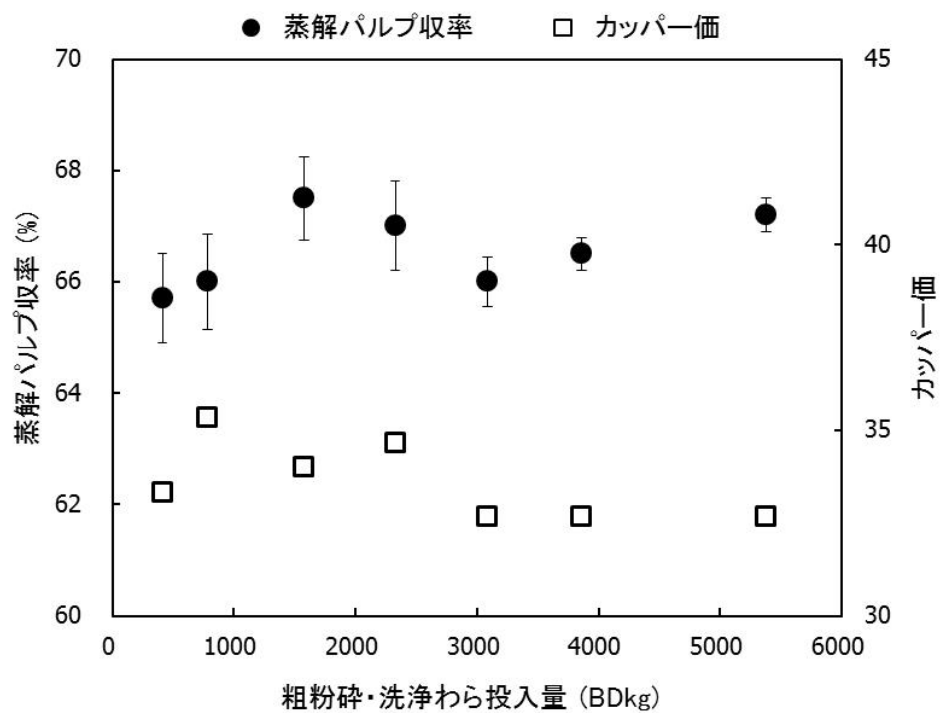


図 4.5 粗粉碎・洗浄わら投入量と蒸煮パルプ収率およびカッパー価の関係

z 図中のエラーバーは標準偏差を示す (n = 3 - 30)

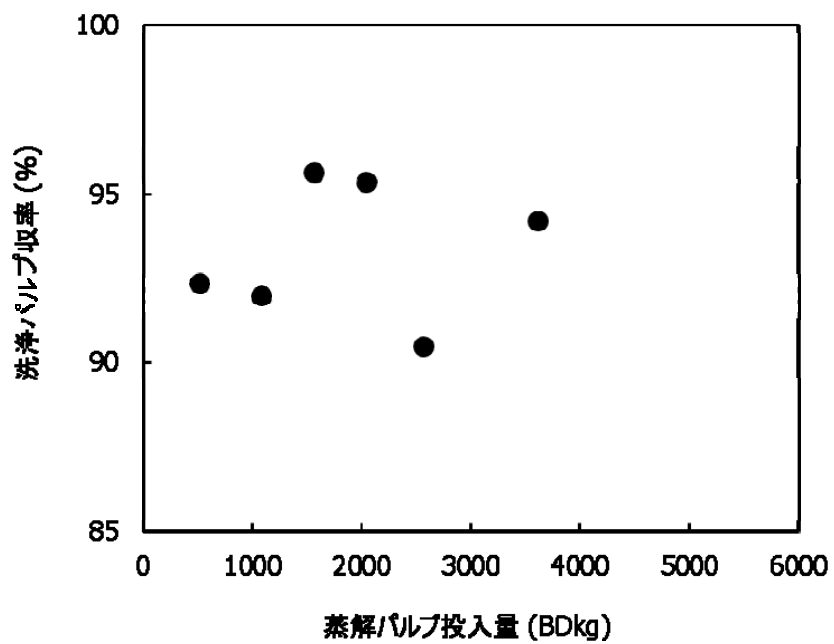


図 4.6 蒸解パルプ投入量と洗浄パルプ収率の関係

表 4.2 原料稲わらおよび前処理したパルプ等試験料の化学組成

工程	組成 (%)					収率 (%) (対原料稲わら, 重量ベース)
	セルロース	ヘミセルロース	リグニン	灰分	その他	
原料受入 (ペール)	29.1±1.0	21.3±1.0	13.4±3.0	24.8±3.0	11.4±8.0	100.0
粗粉碎・洗浄	27.0±1.0	16.5±1.5	15.3±4.0	23.4±2.0	17.8±8.5	95.0
ソーダ蒸解	51.1±0.5	17.1±1.0	5.05±0.5	23.9±0.5	2.9±2.5	63.8
パルプ洗浄	51.5±0.5	17.1±0.5	1.7±2.0	25.5±1.0	4.2±4.0	60.1

注) 組成の表記方法: 平均値 ± 標準偏差 (n = 3)

4.3.4 糖化・濃縮

図 4.7 は、洗浄パルプ投入量 (200 ~ 3600 BDkg) とグルコース濃度の関係を示す。洗浄パルプ量の増加に伴い、グルコース濃度 (24h 終濃度) は対数的に減少し、洗浄パルプ投入量 1500 BDkg 以上で約 20% となった。この結果は、同じセルラーゼを使用したラボスケールの実験における糖化率と同程度であった (地域環境資源センター 2011)。

本パイロットスケールの糖化反応では、パルプ希釈液 (基質濃度 5%) を移送し、ダイレクトドライブ攪拌機 (回転数 30 rpm) により攪拌した。糖化ジャーの内径は約 2.5 m、パルプ液の粘度は回転粘度計 (BH-1, 東京計器) により約 0.002 Pa·s と推定された。攪拌の分野で一般に用いられている攪拌レイノルズ数 NR_e は (4.1) 式により 1640 と算出された。

$$NR_e = \rho \cdot n \cdot d^2 / \mu \quad (4.1)$$

$$= 1.05 \times 0.5 \times 2.5^2 / 0.002 = 1640.6$$

ρ : 密度 (kg/m³), n : 翼回転数 (rps), d : 糖化ジャー内径 (m), μ : 液粘度 (Pa·s)

NR_e の計算値から、洗浄パルプ投入量 200 ~ 36

00 BDkg に応じた仕込み量の範囲では，糖化ジャーの攪拌が層流と乱流の遷移域で行われていたことが推定された．

なお，本実験の糖化ジャー攪拌翼は4枚・45°傾斜パドル翼であったが，より大量のパルプを糖化するためには糖化ジャーの形状変更，中高粘度向け攪拌翼の採用なども必要と思われた．

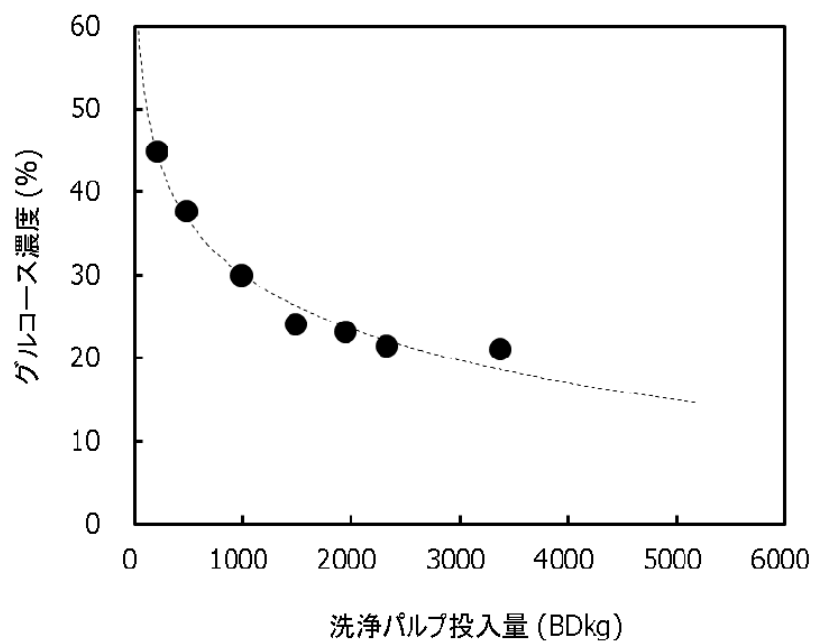


図 4.7 洗浄パルプ投入量と糖化液のグルコース濃度の関係

z グルコース濃度は24h酵素糖化を行ったときの終濃度

4.3.5 発酵および蒸留

図 4.8 は、原料稲わら投入量 (200 ~ 5600 BDkg) タノール収率 (95 %エタノール換算値) の関係を示す。原料稲わら投入量の増加に伴い、95 %エタノール収率は対数的に増加した。本研究のパイロットプラントでは、原料稲わら投入量が 2000 BDkg を超えると、1000 BDkg 当たり約 100 L の 95 %エタノールを製造可能であることが確認できた。しかし、この結果はラボスケールの実験で報告されているエタノール収率に比べて低かった (Brodin et al. 2013)。

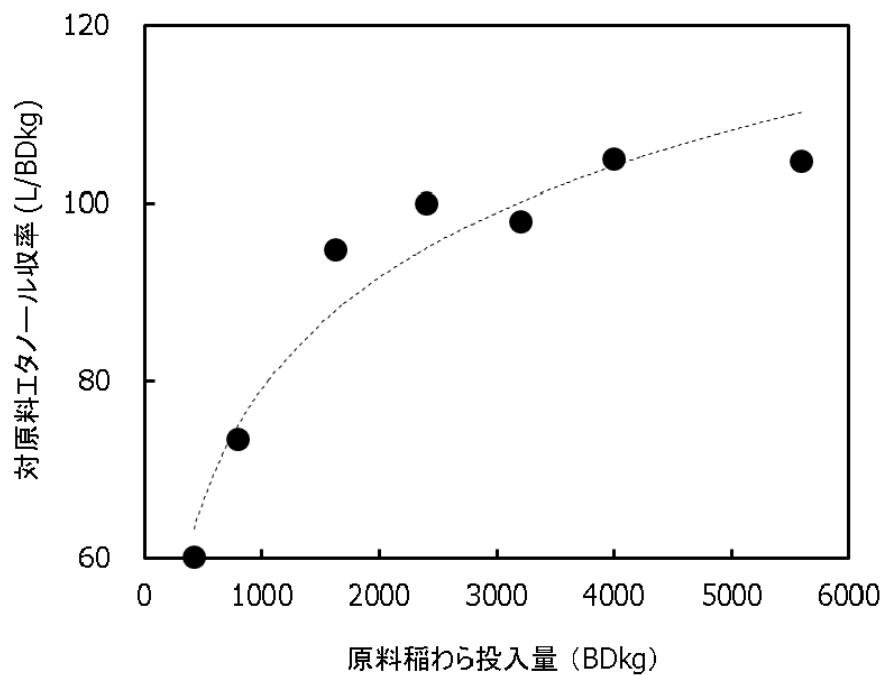


図 4.8 パイロットプラントにおける対原料エタノール収率 z 24h 発酵もろみのエタノール濃度の 95%エタノール換算値

4.3.6 プロセス全体について

一般に，バイオエタノール製造プラントの建設コストは規模の0.6乗に比例するとされている．また，大量のバイオマスを処理する場合は，処理効率の高い大型の機械装置による消費エネルギー削減等のスケールメリットが期待できると考えられている．本研究では，パイロットスケールにおける単位工程ごとの収率を確認し，次工程の収率が前工程で投入する物質量に対して線形ではなく，指数的あるいは対数的な増減となることを確認し，大量の稲わらを処理する際の単位工程の収率の目安値を明らかとした．しかし，本実験におけるパイロットプラントは原料稲わら投入量約2000～3000BDkgに適した設計となっていた．より大量の原料稲わら処理においても，プロセス効率を維持し，収率低下を防止するために，バッチ式蒸解釜から連続式蒸気釜への変更，エバポレータから多重効用缶への変更，固液分離や物質移送におけるパルプ漏えい防止対策等を盛り込んだプラント設備設計が必要と考えられた．

4.4 摘要

本研究は、稲わらのパルプ化を前処理法とするバイオエタノール製造プロセスのスケールアップに資する基礎データの取得を目的として、パイロットプラントを用いて、稲わらのパルプ化、酵素糖化およびエタノール発酵等の単位工程（粗粉碎・洗浄、蒸解、パルプ洗浄、糖化、発酵および蒸留）ごとの投入物質量と処理効率を調査したものである。

原料稲わら投入量の増加に伴い、粗粉碎わらの収率は約96%、水分は約65%に近づく傾向を示した。粗粉碎わらは繊維がほぐれて、高含水状態であるため取扱いが難しくなる可能性が示された。粗粉碎わらの移送ならびに損失流出分の回収については、機器装置（マッシャー）の改良が必要と考えられた。

粗粉碎・洗浄工程では、粗粉碎わら投入量が3000BDkg以上になると、蒸解パルプの収率が線形に増加し、カップー価が32～34となった。蒸解パルプの収率は、同じカップー価で行ったラボスケールの収率よりも高かった。

蒸解工程では、蒸解パルプ投入量250～3600BDkgの範囲における洗浄パルプ収率は80～95%

であった。洗浄パルプが5%以上損失流出する原因は、ドラム型洗浄機のスクリーンのメッシュが洗浄パルプの微細繊維を捕獲できなかつたためと推定される。

糖化工程では、洗浄パルプ量の増加に伴い、グルコース濃度(24h終濃度)は対数的に減少した。大量のパルプを糖化するためには、攪拌装置の改良が必要と思われる。

発酵および蒸留工程では、原料稲わら投入量の増加に伴い、95%エタノール収率は対数的に増加した。本研究のパイロットプラントでは、原料稲わら投入量が2000BDkgを超えると、1000BDkg当たり約100Lの95%エタノールが製造できることが確認できた。

本研究では、パイロットスケールにおける単位工程ごとの収率を測定した。その結果、稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産の前処理工程のスケールアップ可能性を確認することができた。また、大量の稲わらを処理する大規模なプラントにも適用可能な単位工程の収率の目安値が示された。しかし、パイロットプラントは原料稲わら投入量約2000~3000BDkgに最適化されているため、より大量の原料稲わらを処理する場合は、紙

パルプ産業で実績のあるプロセス機械装置への変更ならびにスクリーンメッシュや攪拌装置の出力等の改良が必要と考えられた。

4.5 引用文献（アルファベット順）

Andersson, E., Harvey S. Comparison of pulp mill-integrated hydrogen production from gasified black liquor with stand-alone production from gasified biomass, *Energy*, 32 : 399-405. 2007.

Binod, P., Sindhu, R., Singhanian, R.R., Vikram, S., Devi, L., Nagalakshmi, S., Kurien, N., Sukumaran, R.K., Pandey, A. Bioethanol production from rice straw: An overview, *Bioresource Technology*, 101 : 4767-4774, 2010.

Brodin, F.W., Sonavane, Y., Theliander, H. Preparation of absorbent foam based on softwood kraft pulp: Advancing from gram to kilogram scale, *Bioresources*, 8 : 2099-2117. 2013.

地域環境資源センター（2011）：バイオエタノール通信（7），地域環境資源センター，東京，pp.23-26.

Guo, S., Zhan, H., Zhang, C., Fu, S., Heijnesson-Hulten, A., Basta, J., Greschik, T. Pulp and fiber characterization of wheat

straw and eucalyptus pulps - A comparison, *Bioresources*, 4 : 1006-1016.2009.

Humbird, D., Davis, R., Tao, L., Kinchin, C., Hsu, D., Aden, A., Schoen, P., Lukas, J., Olthof, B., Worley, M., Sexton, D., Dudgeon, D. Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol, Technical Report NREL/TP-5100-47764, Contract No. DE-AC36-08GO28308.2011.

五十嵐泰夫・斉木隆.稲わら等バイオマスからのエタノール生産.社団法人地域資源循環技術センター.東京.56-70.2008.

Koizumi, T. The Japanese biofuel program-developments and perspectives, *Journal of Cleaner Production*, 40 : 57-61.2013.

大蔵省印刷局研究所.研究所時報別冊.禾本科植物.87-92.1976.

Parker, J.L., Hensel, R.P., Wagoner C.L. Measurement of total solids in black liquors, *TAPPI*, 53: 874-877.1970.菅谷邦夫.非木材パルプの染色性.紙パ技協誌.53(10): 64-69.1999.

Small, W.M. Scaleup problems in reactor design, Chemical Engineering Progress, 65: 81-82.1969.

竹林 絜 矩・他 著 .バ ッ チ プ ロ セ ス の ス ケ ー ル ア ッ プ と ラ ボ 検 討 の 進 め 方 .サイ エ ン ス & テ ク ノ ロ ジ ー .東 京 .1-55.2012.

東 邦 ワ ラ パ ル プ (1985):工 場 紹 介 (75),紙 パ 技 協 誌 39(9);34-37.

Yang.L,Cao J,Jin Y,Chang H,Jameel H,Phillips R and Li Z. Effects of sodium carbonate pretreatment on the chemical compositions and enzymatic saccharification of rice straw. Bioresource Technology.124: 283-291.2012.

横 山 伸 也 ・ 芋 生 憲 司 .バ イ オ マ ス エ ネ ル ギ ー .森 北 出 版 ,東 京 .89-102.2009.

Zhao, X., Zhang, L., Liu, D. Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose, Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 6: 465-482.2012.

第5章 バイオエタノール生産システムの持続性および経済性に関する検討

5.1 緒言

温室効果ガス削減に向けた取り組みがさまざまな産業分野で進められる中，ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment, LCA)の考え方に基づく評価手法が定着しつつある．LCA手法は，ISO14040シリーズにおいて標準化されており，対象となる製品の原材料採取から加工，製造，流通，使用，メンテナンス，最終的な廃棄あるいはリサイクルまでの環境影響を評価するものである．製品に関するLCAは4つの段階に区分されており，目的と範囲の設定，インベントリ分析，影響評価，解釈を実施することとされている(日本エネルギー学会 2007)．

LCAは再生可能エネルギーに関する技術の開発や導入，実用化，普及における評価手法として注目されている．なかんづくバイオエタノールについては，数多くのLCA研究成果が報告されている．例えば原料バイオマスの生産においては投入エネルギーの最小化が必要であること(Rosenberger 2001, 服部ら 2008)，副生成物の積極的な利用が不可欠であること(佐賀ら 2009)，稲わらからのバイ

バイオエタノール生産においてはリグニンの熱利用による化石エネルギー投入量の削減が可能であること(楊ら 2009)など、バイオエタノール生産プロセスの改善方法が示唆されている。また、稲わら等の草本系バイオマスからバイオエタノールを生産する場合は製造コスト、エネルギー収支、温室効果ガス排出量を総合的に勘案することが必要とされている(林ら 2009, 椎名ら 2013)。

バイオエタノールは、環境中のCO₂収支に対して中立な液体燃料と見られているが、バイオエタノール生産工程では化石エネルギーを大量に必要とする。さらにセルロース系原料からのバイオエタノール製造コストはガソリン価格に比べて高価であることが知られている(五十嵐ら 2008)。

2009年から、我が国では木本系・草本系原料によるバイオエタノール生産実証が行われており、2014年現在も一部の要素技術開発が進められている(農林水産省 2011, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 2014)。しかしながら、これらの実証試験や技術開発の成果を踏まえた環境優位性、コスト目標への接近の状況に関する研究報告は少なく、現時点ではLCAのインプット/アウトプットデータとして使用できる最新の実証

データが公表，整理されていない．そのため，稲わら等からのバイオエタノール生産のライフサイクル思考による解釈が困難な状況にある．

そこで，本研究では稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産について，実規模の稲わら収集試験やパイロットスケールによるバイオエタノール製造実証データを使用したインベントリ分析を行い，再生可能エネルギー生産方式としての適性を検討した．

5.2 方法

5.2.1 システム境界

我が国では，暖地を除けば水稲の二期作はほとんど行われていない．また，稲わらべールを屋外で半年以上保存することは困難である（関根ら 2014a）．そのため，本研究では，稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産システム（以下「システム」）について，ライフサイクル1年での検討を行うこととした．

図 5.1 は，稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産のシステム境界を示す．評価範囲は，水稲生産から 95 % エタノールの製造および貯留までとした．

水稲生産の投入エネルギーや CO₂ 排出量については，粃と稲わらの質量比 (1:1) によるアロケーションを行った．コンバインにより分離された粃や玄米については評価範囲に含めないこととした．

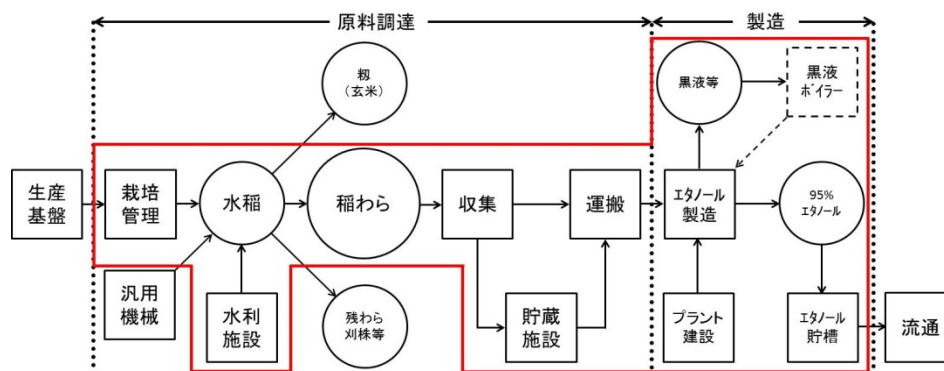
周年的な原料供給を視野に入れると，稲わらべールの輸送には 2 つの方法があると考えられる．当該年 9 月から翌年 2 月までの期間は，稲刈り後に稲わらの圃場乾燥を行いつつ，稲わらべールを随時作成し，集荷することができる（関根ら 2014a）．そのため，当該期間は，圃場からバイオエタ

ノール製造プラントに直接輸送できると思われる。しかし、3月から8月までの期間は、稲わらベールを貯蔵施設まで移動して貯蔵し、貯蔵施設からバイオエタノール製造プラントまで輸送する方法に依らざるを得ない。

一方、農作物栽培の環境影響評価では、農業用の建物や農業機械等の固定資産等は検討対象から除外することが推奨されている（農業環境技術研究所 2003）。また、本研究の評価対象は水稻全体ではなく、副産物の稲わらである。そこで、本研究では、水稻生産のための基盤整備、トラクタやトラックなどの汎用的な農業機械は検討範囲に含めないこととした。即ち、評価対象としたインフラストラクチャーは、水利施設、稲わらベール貯蔵施設、バイオエタノール製造プラント（以下「プラント」）、エタノール貯槽の4施設であり。機械などの耐久資材のうち、ベールなどの稲わら収穫専用機械については、その製造段階も考慮した。

なお、算定事業モデルにおいては、黒液ボイラー設備（苛性化・蒸気製造・自家発電）の導入を想定したが、それにより都市ガスの使用量が60%削減され、電気の使用量が25%削減される。また、黒液ボイラー設備の導入に伴い、蒸解薬品の95%

が再生利用されるため蒸解薬品の調達量が5%となり、黒液の廃棄物処理量が減少する。ただし、黒液ボイラー設備の建設・運用が追加されるため、工場および設備の製造に由来するCO₂およびコストが増加する。



(参考)

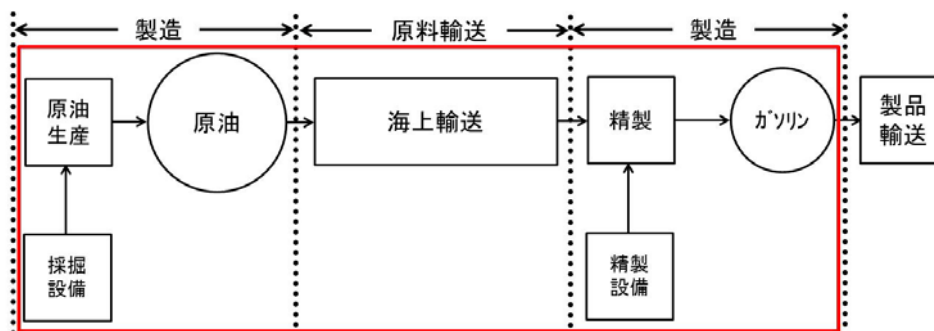


図 5.1 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産システム境界図

z □ 囲い込み内は検討対象範囲を示す。

y パイロットプラントに黒液ボイラー（破線部）は設置されていない。

x 参考としてガソリンのシステム境界図を付記した（出典：環境省 2010）。

5.2.2 評価項目および活動量データ

1) 原料調達

(1) 稲わら生産

エネルギーと物質収支については、千葉県柏市上利根地区において、100 ha 超規模で水稲栽培を行っている農場の実測値を用いた。また、水田生態系における炭素収支については関東圏の標準的なコシヒカリを対象とした既往研究(袴田ら 1995, 農業環境技術研究所 2003, 野口ら 2008)の一部を参考とした。

(2) 稲わら収集および貯蔵

2009年に千葉県柏市上利根地区で実施したバイオエタノール粗原料用稲わらの圃場収集試験の成果を活用した。この試験では、約1 haの試験区を2ヶ所ずつ設定してコシヒカリを栽培し、稲わらの収集運搬および長期貯蔵を実施しており、稲わら収集に係る燃料消費量(L)およびコストを測定している(関根ら 2014a)。また、農業機械等(動力)、水利施設(製造)、肥料(製造)、農薬(製造)コンバインおよびトラクタ(製造)から排出されたCO₂を算定した。稲わら収集のCO₂排出量(kg-CO₂/10a)はコンバインおよび稲わら収集作業に供試したトラクタ等の燃料、テッダ・レーキなどの専

用機械（製造）、ベール梱包ネット、貯蔵サイトの設置に関わる資材等のCO₂とした。

(3) 稲わらベール運搬

2009年に実施した稲わらベール運搬試験の結果を活用した。稲わら収集圃場（千葉県柏市上利根地区）からプラント（千葉県柏市柏の葉）の間、往復距離3.2 kmをディーゼル駆動のキャリアカー（三菱ふそう、SKG-FEB80）で30回往復した。その結果、道路交通法を遵守しつつ、平均質量207.5 BDkg/個のベールを5個積載して、安全に運搬できることが明らかとなった。また、稲わらベール運搬時の平均燃費は3.6 L/hであった。稲わらベールの運搬距離は、圃場とプラントの立地や道路インフラ等により異なると思われるが、稲わらの収集範囲がプラントを中心とする半径Rの円形と仮定して算出する方法が知られている。稲わらの運搬距離の平均値Sは(5.1)式により算出できる（横山ら 2008）。

$$S = \frac{\int_0^R r \cdot 2\pi r dr}{\pi R^2} = \frac{2}{3} R \quad (5.1)$$

ここで、S(km)を40 km/hで走行したと仮定した場合、稲わらベール運搬に係る所要時間はS/40となる。

2) エタノール製造

2009年に築造したパイロットプラント(千葉県柏市柏の葉地区)において、稲わらを用いた実証運転を行って収集したデータを活用した。パイロットプラントの稲わらパルプ製造能力は、最大5600BDkgであり、想定する商業規模の1/40に相当する(Sekine et al.2014)。パイロットプラントでは、稲わらのパルプ化を前処理とするバイオエタノール生産プロセスを一体的に試験できる。敷地面積は825.00 m²であり、その中に生産実証棟336.96 m²の他2棟の建物(いずれもSRC造)が配置されている。生産プロセスを維持管理するために必要となる上下水道、都市ガス及び電気が引き込まれている。評価項目は、プロセスに投入した蒸解薬品(苛性ソーダ、炭酸ソーダ)、酵素、pH調整用の硫酸、酵母の質量(kg)とエネルギー(MJ)である。排出された物質については、粗粉碎・洗浄の排水、黒液・希黒液、糖化残渣、濃縮廃液、発酵に伴い生じる二酸化炭素、蒸留廃液の質量(kg)とエネルギー(MJ)を集計した。なお、黒液、希黒液以外の排水・残渣は中和して下水放流もしくは産業廃棄物として専門業者に処理を委託し、その委託料金に基づいて算出し、計上した。

5.2.3 算定事業モデル

表 5.1 は、本研究のエネルギー及び CO₂ 算定事業モデルを示す。化学プラントでは定期修理等のために一斉設備停止を行う必要がある（新エネルギー・産業技術総合開発機構 2008）。また、稲わらの長期貯蔵利用は困難であり、3月から8月の間は貯蔵コストが加算された割高な原料の利用を強いられる（関根ら 2014c）。そのため、3月から8月の間に65日の一斉設備停止を行うこととし、年間の稼働日数を300日とした。算定事業モデルの95%エタノール年間製造量は、商業規模の1230 kLとした。そのために必要となる原料稲わら（ベール）は、7330 BDt/yで、35325個と試算された。一方、稲わらベールの平均運搬距離は、前出の(5.1)式により片道1.5kmと算出された。また、キャリアカーによるベール運搬回数は、1年間で7711回（往復）と試算された。

第5章 バイオエタノール生産システムの持続性および経済性に関する検討

表 5.1 エネルギーおよびCO₂算定事業モデル

項目	設定条件	摘要
基本条件 稼働日数	300 d	3月～8月に65日間の定期修理を想定した。
原料調達 稲わら収集面積	1800 ha	稲わら収集量を収量 5.0 BDt/haで除して算出した。
稲わら収集量	9000 t/y	3月～8月の貯蔵損失等20%を見込む。
仮想収集範囲の半径	2.4 km	稲わら収集面積(km ² 換算値)を円周率で除した値の平方根
平均運搬距離	1.6 km	仮想収集範囲(円形)の半径の2/3
ペール運搬回数	7711 往復/y	運搬するペール 個数 ÷ 5 (キャリアカー1台に積載できるペール個数)
製 造 原料稲わら(ペール)	8000 t/y	運搬(搬入)ペール数 : 38555個
稲わらパルプ製造量	4800 t/y	パイロットスケールの40倍とした(商業規模を想定)。
95%エタノール製造量	1350 kL/y	対原料エタノール収率 0.169 kL/BDt より算定。

5.2.4 インベントリ・コスト原単位

1) ガソリン・軽油・電気・都市ガス

CO₂排出量は、特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令（平成18年3月29日経済産業省・環境省令第三号）別表の値を使用した。各燃料のコストは、千葉県柏市の実勢価格を使用した。ガソリンは130円/L、軽油は113円/L（2010年3月石油情報センター調べ）、電気は24円/kWh（東京電力）、都市ガスは145円/m³（京葉ガス）とした。

2) 農業機械（製造）・水利施設（製造）・専用機械（製造）・肥料（製造）・農薬（製造）・消耗品

CO₂排出量は、国立環境研究所の産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）の農業機械・セメント製品・化学肥料・農薬・石油製品の原単位（kg-CO₂/千円）を使用した。各品目の価格は稲わらの圃場収集試験に協力していただいた農業生産法人（水田120ha経営）の購入価格、施工価格、10a当たりの使用量・消費量を聞き取り、使用した。

3) 水

CO₂排出量は0.2kg-CO₂/m³とした（東京都環境局2009）。水道料金は35円/m³を使用した（柏市水

道局調べ)。

4) 下水道

CO₂排出量は上水道・簡易水道の原単位 9.14 kg-CO₂/m³を使用した(国立環境研究所 2005)。下水道負担金は 190 円/m³とした(柏市水道局調べ)。

5) 廃棄物処理

表 5.2 に、バイオエタノールの生産に伴い排出する排水等の成分分析の結果を示す。4種類の排水等のうち「排水」は固形分量が多く、産業廃棄物処理を行う必要がある。CO₂排出量は廃棄物処理(産業)の原単位 7.67 kg-CO₂/m³を使用した(国立環境研究所 2005)。コスト算定においては、実際の処理委託料 20,000 円/m³を使用した。「黒液、希黒液、糖化残渣」については、黒液ボイラー燃料として利用可能と考えられた。

なお、排水等の成分分析は、試料 5 検体を用いて、水質、発熱量および灰分の測定試験を行った。水質分析は、5A 濾紙を用いて固形分を分離し、液分を工業排水試験方法 JIS K 0102 に準拠して、TOC(全有機炭素)、全窒素、アンモニア態窒素、全リン、カリウム、pH を測定した。濾紙の残った固形分は、廃棄物固形化燃料の発熱量試験 JIS Z 7302-2 に準拠して高位発熱量を測定し、さらに灰

分試験方法 JIS Z 7302-4 に準拠して灰分の比率を測定した。

6) 貯蔵サイト(使用)・プラント(建設および運用)

CO₂排出量は建築物の環境総合評価マニュアルにおけるSRC造の工場の係数を使用した(日本サステイナブル建築協会編 2010)。貯蔵サイトおよび工場の整備コストは実際に施工業者に発注し、検収した金額(基本設計, 実施設計, 設計監理費を含む)を使用した。貯蔵サイトは 11m×20m×0.4m の基礎コンクリートのみの構造で, 整備コストは 200万円, 償却年数は 24年とした。稲わらベールの野外貯蔵試験の結果から, 稲わら 480BDkg の専有面積を 1m²とした(関根ら 2014c)。

プラント本体の整備コストは,パイロットプラントの整備費(1.5億円)に 40^{0.6}を乗じて 13.7億円とした。また, 黒液ボイラー設備の整備費はプラントと同額の 13.7億円とした。これらのプラントの償却年額は,「パルプ、紙又は紙加工品製造業用設備」の法定耐用年数 12年, 償却率 0.084(定額法)により, 2.3億円と試算された。コスト計算においては, 各工程に按分して計上した。

7) 苛性ソーダ

CO₂排出量はソーダ工業会の資料に基づいて算

出した(トクヤマ 2004)。調達コストは実勢価格を使用した。

8) 炭酸ソーダ・硫酸

CO₂排出量は、独立行政法人国立環境研究所の産業関連表による環境負荷原単位データブック(3EID)のソーダ工業製品の原単位 19.48 kg・CO₂/千円を使用した。調達コストは実勢価格を使用した。

9) 酵素・酵母

酵素のCO₂排出量は医薬品の原単位 2.75 kg・CO₂/千円を使用した(国立環境研究所 2005)。酵母のCO₂排出量は16Lフーマンタ装置の1日当たりの消費電力を用いて電気の原単位を乗じて算出した(オリエンタル酵母 2009)。なお、酵素・酵母の調達コストは実勢価格を使用した。

10) プラント操業体制(人件費)

プラントの操業は、作業員延べ9名で行うこととした。人件費は、時給1500円(8時間労働)をベースに算定した。300日の操業を通じて、作業員に支払う人件費総額は32,400千円となる。例えば、バイオエタノール製造量が1350 kL/yの場合、バイオエタノール1L当りの人件費は32.4円と試算できる。

表 5.2 稲わら 5600 B D k g を粗原料としたるエタノール生産の排水成分等

項目	単位	排水	黒液	希黒液	糖化残渣
pH	-	4.9	9.6	9.7	4.3
TOC	mg/L	7100	20000	6600	33000
T-N	mg/L	630	760	240	560
T-P	mg/L	85	76	24	58
K	mg/L	630	700	180	220
灰分	%	54.7	43.1	56.1	31.8
固形分量	%	40.5	24.7	25.3	23.6
発熱量	MJ/kg	8.8	11.9	8.4	12.6

5.3 結果および考察

5.3.1 稲わらの利活用による温室効果ガス削減効果

水田では稲が光合成によって CO_2 を固定し、一部は呼吸によって大気中に放出される。籾や稲わらなどの収穫部位は持ち出されるが、根および刈り株等は土壌有機物となり、微生物によって分解され、淡水による嫌氣的条件下で CH_4 に変化する(袴田ら 1995)。

1) CO_2 固定量

稲わらの収穫に伴い持ち出される炭素量は、1年間で 5.43 t/ha とされており、 CO_2 に換算すると $19.9 \text{ t-CO}_2/\text{ha}$ となる(農業環境技術研究所 2004)。本研究の事業モデルでは、バイオエタノール 1350 kL の製造に要する稲わらの収集面積を 1800 ha とした(表 5.1 参照)。既往の報告値に基づいて試算した結果、収穫部位の CO_2 固定量は 35838 Mg-CO_2 ($19.9 \text{ Mg}(=\text{t})/\text{ha} \times 1800 \text{ ha}$)となる。籾と稲わらの質量比を考慮すると、稲わらの CO_2 固定量は 35838 Mg-CO_2 の $1/2$ 相当の 17919 Mg-CO_2 程度と推定される。また、この試算値 17919 Mg-CO_2 は、バイオエタノール 1 kL 当たり 13273 kg-CO_2 ($17919 \text{ Mg-CO}_2/1350 \text{ kL}$)と試算された。

2) CH₄ 排出抑制量

稲わらを秋に土壌還元した場合，水稻一作当りの CH₄ 発生量は 190 ± 125 t/ha とされている（農業環境技術研究所 2004）。一方，算定事業モデルにおける稲わら収集面積（1800ha）について，稲わらを持ち出したことによる CH₄ 排出抑制量を試算すると， $117 \sim 567$ Mg-CH₄ (190 ± 125 t/ha \times 1800ha) に達すると考えられた。CH₄ は温室効果の高いガスであり，CO₂ に対する温暖化効果の比率を表す地球温暖化係数が 21 である（地球温暖化対策の推進に関する法律施行令，平成 11 年 4 月 7 日政令第 143 号）。また，水田を起源とする CH₄ 排出量は過少に見積もられているという指摘もある（Yan et al. 2009）。さらに，稲のバイオエタノール粗原料利用は，水田の持ち出しを通じて CH₄ 排出量の削減に効果が高いという報告もある（Koga et al. 2011）。上記の CH₄ 排出抑制量は，CO₂ 相当量に換算すると， $2457 \sim 11907$ Mg-CH₄ となり，稲わらのバイオエタノール粗原料活用においては，水田起源の CH₄ 排出削減効果を軽視できないと考えられた。

5.3.2 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産のCO₂排出量

表 5.3 a は算定事業モデルにおける CO₂ 排出量の試算結果を示す。CO₂ 排出量は、バイオエタノール製造量 1 kL 当りの試算値である。原料調達、バイオエタノール製造、機械・施設の区分ごとに、各工程に投入したエネルギー等の使用量、消費量に CO₂ 排出原単位を乗じて算出した(表 5.3 b 参照)。システムの CO₂ 排出量は、約 16833 kg-CO₂/kL と試算された。

各工程の内訳(表 5.3 a, 最右列)を区分別に見ると、製造の排出量が 76 % と大きな割合を占めている。また、工程別に見ると、製造の内、「ソーダ蒸解」、「糖化液濃縮」の占める割合が大きく、次いで機械・施設の「プラント(建設)」が大きな割合を占めている。今回試算した稲わらを粗原料とするバイオエタノール生産では、原油採掘・海上輸送・ガソリン精製までの CO₂ 排出量の報告値 327 kg-CO₂/kL(経済産業省 2003, 環境省 2010)の 50 倍以上の CO₂ が排出される。さらに、エタノールの発熱量は 23.9 MJ/L, ガソリンの発熱量は 34.6 MJ/L であるため(資源エネルギー庁 2007), 稲わらから製造したエタノールのガソリン代替利用に

よる CO₂ 削減効果は殆ど期待できないと思われた。

表 5.3a 算定事業モデルにおけるCO₂排出量の試算結果

区分	物質名	製造量	工程	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /kL)	CO ₂ 排出量 (%)
原料調達	稲わら	6.67 t	栽培管理	570.6	3.4
			水利施設	218.4	1.3
			稲刈り	68.4	0.4
			稲わら収集	373.5	2.2
			ペール貯蔵	71.7	0.4
			ペール運搬	53.9	0.3
			原料調達 計	1356.6	8.1
製造	稲わら(ペール)	5.93 t	粗粉砕・洗浄	35.8	0.2
			ソーダ蒸解	2567.8	15.3
	稲わらパルプ	3.56 t	パルプ洗浄	34.9	0.2
			糖化	969.3	5.8
			糖化液濃縮	8335.9	49.5
	95%エタノール	1.00 kL	発酵	695.7	4.1
			蒸留	291.4	1.7
製造 計	12931.0	76.8			
機械・施設	稲わら	6.67 t	水利施設	321.5	1.9
			コンバイン	128.5	0.8
	稲わら(ペール)	5.93 t	収穫専用機械	359.9	2.1
			ペール貯蔵施設	40.7	0.2
	95%エタノール	1.00 kL	プラント(操業)	32.6	0.2
			プラント(建設)	1662.8	9.9
機械・施設 計	2546.0	15.1			
合計	16833.6	100.0			

表 5.3b 算定事業モデルにおけるCO₂排出量の試算結果(詳細)

工程	算定対象	投入エネルギー等	区分	95%エタノール 1kL当り使用量	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	出典	
栽培管理	田植機	ガソリン	使用	19.7 L	45.8	z	
		肥料	堆肥	製造	27.8 千円	73.9	y
			単質肥料	製造	20.8 千円	172.0	y
			複合肥料	製造	10.4 千円	86.0	y
		農薬	除草剤一式	製造	4.2 千円	28.8	y
		除草機	ガソリン	使用	27.8 L	64.5	z
		防除ヘリ	ガソリン	使用	13.9 L	32.2	z
		管理機	軽油	使用	4.2 L	10.9	z
		残わら処理	軽油	使用	21.5 L	56.4	z
	水利施設	排水ポンプ	軽油	使用	83.4 L	218.4	z
稲刈り	コンバイン	軽油	使用	26.1 L	68.4	z	
稲わら収集	集草(トラクタ)	軽油	使用	28.1 L	73.5	z	
	梱包(トラクタ)	軽油	使用	36.4 L	95.4	z	
	積込(トラクタ)	軽油	使用	78.1 L	204.6	z	
バール貯蔵	消耗品	ビニルシート等	製造	13.0 千円	71.7	y	
バール運搬	キャリアカー	軽油	使用	20.6 L	53.9	z	
粗粉碎・洗浄	マッシャー	電気	使用	98.0 MJ	31.4	z	
		水	使用	22.3 t	4.5	x	
ソーダ蒸解	地球釜	都市ガス	使用	5027.9 MJ	2564.2	z	
		水	使用	17.8 t	3.6	x	
		苛性ソーダ	使用	0.001 t	0.001	w	
		炭酸ソーダ	使用	0.1 t	0.024	w	
バルブ洗浄	ドラム型洗浄機	電気	使用	71.8 MJ	23.0	z	
		水	使用	59.6 t	11.9	x	
糖化	糖化ジャー	電気	使用	216.6 MJ	69.3	z	
		都市ガス	使用	1752.4 MJ	893.7	z	
		水	使用	23.0 t	4.6	x	
		酵素	使用	0.4 t	1.0	y	
		硫酸	使用	0.1 t	0.7	y	
糖化液濃縮	エバポレータ	電気	使用	549.8 MJ	175.9	z	
		都市ガス	使用	16000.0 MJ	8160.0	z	
発酵	発酵ジャー	電気	使用	49.0 MJ	15.7	z	
		都市ガス	使用	1333.3 MJ	680.0	z	
		酵母	使用	0.1 MJ	0.02	y	
蒸留		都市ガス	使用	571.3 MJ	291.4	z	
プラント(操業)	照明・維持管理	電気	使用	101.9 MJ	32.6	z	
水利施設	用排水路	セメント製品	製造	20.8 千円	204.7	y	
	ポンプ	ポンプ設備	製造	28.5 千円	116.8	y	
稲刈り	コンバイン	償却年額	製造	34.7 千円	128.5	y	
収集専用機械	テッド・レーキ	償却年額	製造	34.7 千円	128.5	y	
	ベアラ	償却年額	製造	55.6 千円	205.7	y	
	バールグラブ	償却年額	製造	6.9 千円	25.7	y	
バール貯蔵施設	基礎コンクリート	償却年額	製造	4.2 m ²	40.7	v	
プラント(建設)		償却年額	製造	170.4 千円	1662.8	v	

z 特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令(平成18年)

y 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID),2005年更新版

x 総量削減義務と排出量取引制度におけるその他ガス排出量算定ガイドライン(東京都環境局)

w 総合資源エネルギー調査会省エネルギー部会資料(ソーダ工業会)

v CASBEE-新築(簡易版)建築環境総合性能評価システム・評価マニュアル

5.3.3 バイオエタノール製造コスト

表 5.4 は、算定事業モデルにおけるバイオエタノール 1 L 当りの製造コストを示す。原料調達、製造、減価償却、人件費に係るコストを足し上げた結果、バイオエタノール製造コストは 625 円/L と試算された。粗原料用稲わらのコストは、バイオエタノール 1 L を製造するために必要な稲わら量約 5.93 BDkg に、既往の報告(関根ら 2014a)における稲わら収集コスト 7 円/BDkg を乗じて算出した。同じく既往の報告(関根ら 2014a)における貯蔵コスト単価 12 円/BDkg を用いて、3 月～6 月までの 4 ヶ月間の貯蔵コストを算出した。算定事業モデルにおける稲わらベールの 1 年間の輸送時間は、平均輸送距離 1.6 km(片道)を時速 40 km で 7711 往復走行した場合、616.9 h と試算される。積載車両の燃費を 3.6 L/h とし、バイオエタノール 1 L 当りに換算すると、0.001 円/L と少額であった。これらのコスト試算結果から、原料調達に係るコストは 65.2 円/L と推定された。

「製造」のコストは総コストの 58 % を占めており、そのうち「都市ガス(16.5%)」「酵素・酵母(28.6%)」「上水道(7.9%)」の占める割合が大きい。

第5章 バイオエタノール生産システムの持続性および経済性に関する検討

表 5.4 バイオエタノール 1 L 当り 製造コスト

(単位:円/L)

工程	原料調達			製造						減価償却	人件費	合計	
	粗原料用 稲わら	貯蔵	輸送	ユーティリティ関係 電 気	蒸解薬品 都市ガス	酵 素 及び硫酸 酵 母	上水道	廃棄物 処理費					
原料受入	41.5	23.7	0.001	-	-	-	-	-	-	18.9	-	84.2	
粗粉碎・洗浄	-	-	-	0.6	-	-	-	5.1	3.8	18.9	2.4	30.8	
蒸解	-	-	-	0.1	12.4	12.8	-	4.1	-	18.9	6.0	54.3	
バルブ洗浄	-	-	-	0.5	-	-	-	13.7	-	18.9	4.0	37.1	
糖化	-	-	-	11.0	4.3	-	162.2	25.8	-	18.9	2.4	224.6	
糖化液濃縮	-	-	-	2.8	39.5	-	-	0.1	-	18.9	6.0	67.3	
発酵	-	-	-	0.2	3.3	-	16.3	0.2	-	18.9	2.4	41.3	
蒸留	-	-	-	-	43.5	-	-	0.1	-	18.9	4.0	66.5	
エタノール払出	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.9	-	18.9	
合計	41.5	23.7	0.0	15.1	103.0	12.8	178.5	49.1	3.8	170.4	27.2	625.1	
構成(%)	6.6	3.8	0.0	2.4	16.5	2.0	28.6	7.9	0.6	27.3	4.4	100.0	
	10.4			58.0									100.0

5.3.4 システム改善に向けたシナリオ

稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産システムにおいては，粗原料用稲わらが固定するCO₂よりも多くのCO₂が排出される．一方，エタノール製造コストは625円/Lと試算されており，ガソリンの小売価格・卸価格（石油情報センター2014）の5倍程度となる．

そこで，プロセス投入エネルギーの縮減およびバイオエタノール製造コストの低減のために，図5.1のシステム境界を変更することが必要と考えられた．

図5.2はシステム境界の改善シナリオを示す．原料調達のシステムは変更せずに，製造および機械・施設を変更する．製造においては，エネルギー消費量，CO₂排出量の大きな蒸気製造に係る設備を外部化する（環境省2012）．機械・施設については，プラントの建設コストを30%縮減し，酵素自製のための設備を増設する．即ち，プラントの建屋を低コストのプレファブ式軽量鉄骨建物等に変更し，大量の酵素生産が可能なジャーファーマの増設費を吸収する．

図5.3は，シナリオ実施によるCO₂削減効果およびコスト削減効果を示す．CO₂排出量は，ソー

ダ蒸解および糖化液濃縮などの工程で大幅な削減が見込まれるため、 $3736 \text{ kg-CO}_2/\text{kL}$ まで削減可能と考えられた。この試算結果から、蒸気製造設備を外部化することにより、原料稲わらの固定する CO_2 量に見合ったシステム運用の可能性が示唆された。ただし、このことは、稲わらを粗原料とするバイオエタノール生産システムが自己完結的なシステムとは成り得ないことを示唆している。大量かつ効率的に蒸気を製造する産業プラントのサブシステムとして、プラントの立地条件が限定されると思われる。

一方、製造コストは、酵素自製による酵素の購入費等が削減できるため、 380 円/L 程度に削減可能と考えられた。しかし、酵素自製は実用化途上段階の技術であり、コスト削減の有力な手段の一つであるが、他のコスト項目についても削減の可能性を模索することが必要と考えられる。稲わら以外のセルロース資源の購入価格、外部調達する蒸気（熱エネルギー）の契約価格、プラントの減価償却方法などに関する調査研究を継続し、 380 円/L を下回る最善の方策を検討することが必要と考えられた。

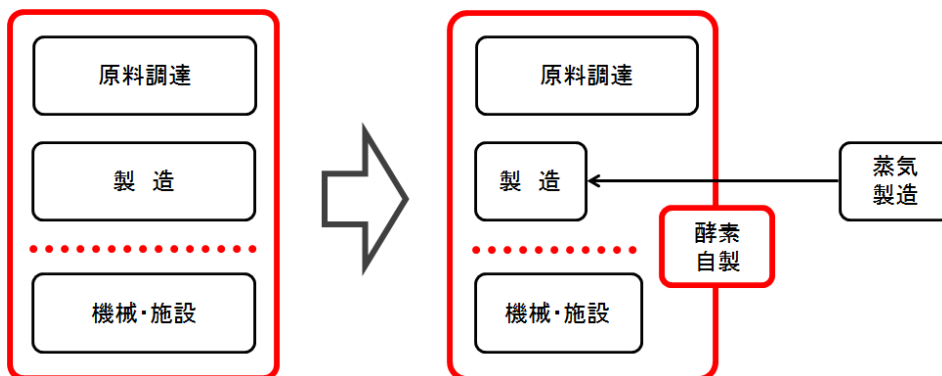


図 5.2 システム境界の改善シナリオ

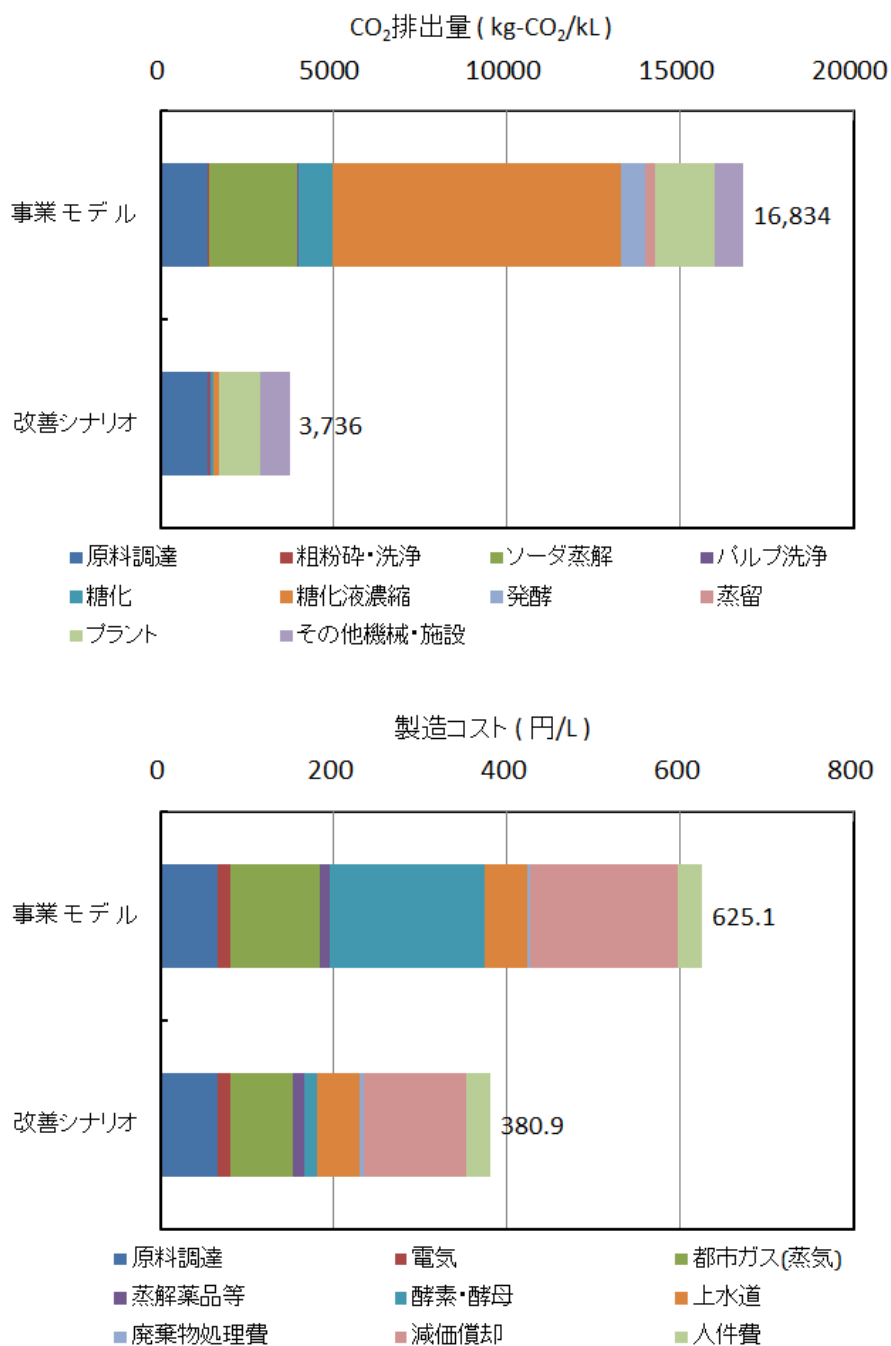


図 5.3 シナリオ実施によるCO₂削減効果およびコスト削減効果

5.3.5 システムの採算性確保に関する検討

燃料用エタノールの販売・卸価格は、ブラジル等から輸入される含水エタノール（粗溜アルコール）の価格が上限と思われる。仮に、価格を80円/L程度とすると、本研究の試算値380円/L（改善シナリオの場合）での製造・販売ではマイナス80%の逆ザヤとなってしまう。一方、本研究のシステムでは、95%エタノールを生産する過程において、稲わらパルプと糖化液が生産される（表5.5参照）。改善シナリオを実施した場合、稲わらパルプの製造コストは80円/kg、糖化液（濃度20%）の製造コストは140円/kgと試算される。ここで、稲わらパルプの販売・卸価格を50円/kg程度（パルプモールド原料など）、糖化液の販売・卸価格を200円/kg（培地用グルコース液）とすれば、前者は35%の損失、後者は43%の利益が出ると考えられる。即ち、損失の少ない糖化液、稲わらパルプの製造量を高めることによって、システムの採算性確保が可能と思われる。

システムの粗利益率 $B(\%)$ は、(5.2)式によって表される。

$$B = a \cdot p + b \cdot g + c \cdot e \quad (5.2)$$

$$p + g + e = 1 \quad p, g, e > 0$$

a : 稲わらパルプ販売の利益率(%), p : 稲わらパルプの製造比率, b : 糖化液販売の利益率(%), g : 糖化液の製造比率, c : 燃料用エタノール販売の利益率(%), e : 95%エタノールの製造比率

ここで, (5.2)式の右辺のは必ず正となるため, 単純には B が正となる p, g, e の最適値が存在する. 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産においては, 糖化液とエタノールの併産が採算性確保において有効と思われた. ブラジルのバイオエタノール生産工場の約7割が砂糖とエタノールを併産しており, それぞれの相対価格によって生産量の配分を決める仕組みが確立されており(小泉 2011), それを彷彿とさせる結果と考えられた.

なお, 糖化液については, 培地用グルコース液としての販売以外にも, 糖化液を使用して付加価値の高い有機酸の培養を行うことも可能である. また, 燃料用途以外の汎用的なエタノール(商品名: 95度トレーサブル発酵エタノール)が最終製品であるならば, その税込み販売価格1000円/L以上であれば, 380円/Lであっても採算性が十分に確保できると考えられる.

表 5.5 稲わらバイオエタノール生産の中間物質
および副生成物

区分	名称	想定される用途	工程
中間物質	稲わらパルプ	製紙原料(特殊用途紙, 梱包材), パルプモールド等	パルプ洗浄
	糖化液	グルコース精製, 有機酸・カルボン酸の培地等	糖化液濃縮
副生成物	排水	バイオマス燃料	粗粉碎・洗浄
	黒液	"	ソーダ蒸解
	希黒液	"	パルプ洗浄
	糖化残渣	肥料成分の抽出および灰分(シリカ)の焼成利用等	糖化
	濃縮廃液	プロセス用水として再利用	糖化液濃縮
	蒸留廃液	"	蒸留

5.4 摘要

稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産について、実規模の稲わら収集試験やパイロットスケールによるバイオエタノール製造実証データを使用したインベントリ分析を行い、再生可能エネルギー生産方式としての適性を検討した。

その結果、下記の8点を結論した。

(1) 本研究の算定事業モデル(稲わら収集面積1800ha)における稲わらのCO₂固定量は8960 kg-CO₂/10aと試算された。

(2) 算定事業モデルのCH₄排出抑制量は、117000～567000 kg-CH₄と試算された。CH₄は温室効果の高いガスであり、CO₂に対する温暖化効果の比率を表す地球温暖化係数が21である。上記のCH₄排出抑制量をCO₂相当量に換算すると、2457000～11907000 kg-CH₄となる。稲わらのバイオエタノール粗原料活用においては、水田起源のCH₄排出削減効果を軽視できないと考えられた。

(3) 稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産システムのCO₂排出量は、約16833 kg-CO₂/kLと試算された。システム全体のCO₂排出量のうち、76%をバイオエタノール製造(ソーダ蒸解、糖化液濃縮、プラント(建設))のCO₂排出量が占める。

(4) 本研究における稲わらバイオエタノール 1 L の製造コストは 625 円/L と試算された。製造コストの 58 % は、製造に係るコスト(都市ガス、酵素・酵母等)が占めると考えられた。

(5) システムの CO₂ 排出量およびバイオエタノール製造コストを縮減するために、蒸気製造設備の外部化、酵素自製設備の増設、建築コストの縮減を盛り込んだシナリオを作成した。

(6) シナリオ実施により、CO₂ 排出量は 3736 kg-CO₂/kL 程度まで縮減可能と考えられた。この結果から、原料稲わらの固定する CO₂ 量に見合ったシステム運用の可能性が示唆された。ただし、このことは、稲わらを粗原料とするバイオエタノール生産システムが自己完結的なシステムとは成り得ないことを示唆している。

(7) シナリオ実施により、製造コストは 380 円/L 程度に縮減可能と考えられた。酵素自製はコスト縮減の有力な手段の一つと思われるが、他のコスト項目についても縮減の可能性を模索することが必要と考えられる。

(8) 製造コストが 380 円/L であっても、最終製品の組み合わせ(パルプ、糖化液、エタノール)により、採算性確保が可能である。また、最終製品を

汎用的なエタノールに切り替えて採算性を高める手法も考えられた。

5.5 引用文献（アルファベット順）

バイオ燃料技術革新協議会（2008）：バイオ燃料技術革新計画，<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80326c05j.pdf>
#search='%E3%83%90%E3%82%A4%E3%82%AA%E7%87%83%E6%96%99%E6%8A%80%E8%A1%93%E9%9D%A9%E6%96%B0%E8%A8%88%E7%94%BB'（2014年3月閲覧）。

藤原孝行・岡田朋和（2008）．バイオマス・都市ガス活用による再生可能エネルギー導入促進研究．東京都環境科学研究所年報 2008；75-78．

袴田共之・早野恒一・竹中真・上村順子（1995）：B-1地球温暖化に係る二酸化炭素・炭素循環に関する研究，農業生態系における炭素循環・収支の定量的解析，②水田における炭素循環・収支の定量的解析；28-39．

服部太一郎・森田茂紀（2008）：バイオエタノール原料植物の栽培におけるエネルギー収支．日本作物学会紀事．第77巻（別号1）；356-357．

林清・増田清敬・山本充（2009）：バイオ燃料導入による諸効果の定量的評価，第2章LCA分析による温室効果ガス削減効果の計測，農林水産政策研究所，環境プロジェクト研究資料第1

号 ; 24-58. <http://www.maff.go.jp/primaff/koho/seika/project/kankyol.html> (2014年5月1日閲覧)

五十嵐泰夫・斉木隆(2008):稲わら等バイオマスからのエタノール生産. 社団法人地域資源循環技術センター, 東京. 2-10.

環境省(2010):バイオ燃料の温室効果ガス削減効果に関するLCAガイドライン Ver.1.0. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/lcaguideline/guideline01.pdf> (2014年6月10日閲覧).

環境省(2012):バイオガス関連事業のLCAに関する補足ガイドライン Ver.1.0. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/lcaguideline/guideline02.pdf> (2014年6月10日閲覧).

経済産業省(2003):バイオマス燃料のCO₂排出等に関するLCA(ライフ・サイクル・アセスメント)評価について(2)～我が国で想定される導入形態へのLCA適用による試算結果～, 総合資源エネルギー調査会石油分科会石油部会第9回燃料政策小委員会配布資料;1-33. <http://www.meti.go.jp/report/> (2014.5.1閲覧)

小泉達治(2011):ブラジルにおけるバイオ燃料政

策，農林水産政策研究所研究成果報告会（2011年8月）資料。

Koga Nobuhisa, Tajima Ryosuke (2011): Assessing energy efficiencies and greenhouse gas emissions under bioethanol-oriented paddy rice production in northern Japan, *Journal of Environmental Management* 92; 967-973.

国立環境研究所（2002）：産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）-LCAのインベントリデータとして-。

那須野ヶ原土地改良区連合（2011）．平成22年度地域新エネルギー・省エネルギービジョン策定等事業，那須野ヶ原地域新エネルギービジョン事業化フィージビリティスタディ調査；77-81．

日本エネルギー学会（2007）：アジアバイオマスハンドブックーバイオマス利活用の手引ー；142-164．

日本サステイナブル建築協会編（2010）：CASBEE新築（簡易版），建築環境総合性能評価システム，評価マニュアル2010年版；5-229．

野口良造・齋藤高弘（2008）：インベントリ分析によ

る機械化水稲生産のエネルギー消費量・効率の考察．農業情報研究．17(1);20-30．

農業環境技術研究所(2003)．環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発，研究成果報告書；1-98．<http://www.niaes.affrc.go.jp/project/lca/> (2014年5月1日閲覧)

農業環境技術研究所(2004)：農業生態系における炭素と窒素の循環，農業環境研究叢書(15)，養賢堂，東京，pp.23-75．

農林水産省(2011)：ソフトセルロース利活用技術確立事業(ソフトセルロース利活用モデル事業)実施地区の概要．<http://www.maff.go.jp/j/shokusan/zyunkan/biomass/soft06/index.html>．(2014年4月1日閲覧)

農林水産省(2012)：砂糖及びでん粉政策をめぐる現状と課題について，http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kanmi/h24_1/pdf/5shiryo3.pdf#search='%E7%A0%82%E7%B3%96%E5%8F%8A%E3%81%B3%E3%81%A7%E3%82%93%E7%B2%89%E6%94%BF%E7%AD%96%E3%82%92%E3%82%81%E3%81%90%E3%82%8B' (2014年6月2日閲覧)．

オリエンタル酵母(2009)：作業手順書(案)，培養検

討 ; 1-7 .

Rosenberger, A. · Kaul, H.P. · Senn, T. · Aufhammer, W. (2001): Improving the energy balance of bioethanol production from winter cereals : the effect of crop production intensity. *Applied Energy*. 68; 51-67.

佐賀清崇・横山伸也・芋生憲司(2009): 稲作からのバイオエタノール生産システムのエネルギー収支分析. *エネルギー・資源学会誌*. 30(5); 30-35.

関根基・小川幸春・松岡延浩(2014a): バイオエタノール粗原料としての稲わらの長期圃場乾燥時における反転処理省略の効果, *農作業研究*, 第49巻第1号; 37-44.

Sekine Motoi , Ogawa Yukiharu , Matsuoka Nobuhiro & Izumi Yoshiya (2014b): Pilot-scale processing with alkaline pulping and enzymatic saccharification for bioethanol production from rice straw, *Energy Science & Engineering*, 2(1); 39-45.

関根基・小川幸春・松岡延浩(2014c): バイオエタノール粗原料用稲わらの貯蔵および蒸解条件の検討 - 稲わらベールの貯蔵および蒸解条件

の検討－，農業生産技術管理学会誌 20(4);119-125.

資源エネルギー庁(2007):2005年度以降適用する標準発熱量の検討結果と改訂値について. http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_012.pdf (2014年6月10日閲覧)

椎名武夫・折笠貴寛(2013):食糧その科学と技術.V バイオエタノール生産に関するLCA解析.(独)農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所, 食糧－その科学と技術－, 51;85-97.

新エネルギー・産業技術総合開発機構(2008).セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業. http://www.nedo.go.jp/activities/FF_00042.html. (2013年4月1日閲覧).

トクヤマ(2004):素材産業(化学、セメント)における省エネルギーの取り組み. 総合資源エネルギー調査会省エネルギー部会(第2回)資料;1-6.

東京都環境局(2009):総量削減義務と排出量取引制度におけるその他ガス排出量算定ガイドライン;1-19.

楊 翠 芬 ・ 匂 坂 正 幸 (2 0 0 9) : 稲 わ ら か ら の バ イ オ エ タ
ノ ー ル 生 産 シ ス テ ム に 関 す る 評 価 . 日 本 L C A
学 会 誌 . 5 (4) ; 5 0 1 - 5 0 9 .

X i a o y u a n Y a n , H i r o k i A k i y a m a , K a z u y u k i Y a g i , H
a j i m e A k i m o t o (2 0 0 9) : G l o b a l e s t i m a t i o n s
o f t h e i n v e n t o r y a n d m i t i g a t i o n p o t e n t i a
l o f m e t h a n e e m i s s i o n s f r o m r i c e c u l t i v a
t i o n u s i n g t h e 2 0 0 6 I n t e r g o v e r n m e n t a l P a
n e l o n C l i m a t e C h a n g e G u i d e l i n e s , G L O B A
L B I O G E O C H E M I C A L C Y C L E S 2 3 ; 1 - 1 5 .

第 6 章 総 括

6.1 研究 成果 の 概 要

本研究は、再生可能エネルギーの重要性を踏まえて、農産系バイオマス資源（廃棄物）の利活用に着目し、実規模における総合的な調査検討により、稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産に係る諸課題を解決に資することを目的とした。

第2章では、実規模に近い屋外貯蔵試験でバイオエタノール粗原料用稲わらの貯蔵性を調査検討するとともに、稲わらのパルプ化工程における課題を整理した。稲わらベールの屋外貯蔵では30日を過ぎた頃からベールの腐敗が進行し、歩留りを低下させ高コスト化につながることから、稲わらの収集からパルプ化までの作業工程についてコスト要因の見直しを行うことが必要と考えられた。また、稲わらのバッチ蒸解試験の結果から、微細パルプの漏えいが懸念され、脱リグニン効果の特定が困難であったため粗粉碎・洗浄の注水量や蒸解条件についてパイロットスケールによる連続運転を行い、プロセスの調整を行うことが必要と考えられた。

第3章では、稲わらを長期にわたって圃場に放置しても、圃場乾燥は進み、バイオエタノール粗

原料として使用可能であることが確認された。また、反転処理を省略することで、稲わらへの灰分の付着、稲わら収率の低下を軽減できることが示され、収集コストの縮減が可能と考えられた。なお、単位面積当りの収量の増加に伴い単位重量当りの収集コストの減少が確認できたため、多収穫米のわら活用の有効性が示唆された。

第4章では、パルプ化プロセスを前処理法としたバイオエタノール製造プロセスについて、パイロットスケールにおける単位工程ごとの収率の調査を行い、大量の稲わら进行处理する大規模なプラントにも適用できる収率の目安値が示された。しかし、より大量の原料稲わら进行处理するためには、プラント機械装置の改良が必要と考えられた。

第5章では、算定事業モデル（稲わら収集面積 1800ha）における稲わらの CO_2 固定量および CH_4 排出抑制効果の検討を通じて、稲わらのバイオエタノール粗原料活用による水田起源 CH_4 排出の削減効果は軽視できないと考えられた。稲わらを粗原料としたバイオエタノール生産システムの CO_2 排出量のうち、製造に係る CO_2 排出量が 76% を占める（ソーダ蒸解、糖化液濃縮、プラント（建設））と試算された。稲わらバイオエタノール 1 L の製

造コストは 625 円/L と試算された。製造コストの 58% は、製造に係るコスト（都市ガス、酵素・酵母等）と思われた。以上の結果を踏まえて、システムの CO₂ 排出量およびバイオエタノール製造コストを縮減するために、蒸気製造設備の外部化、酵素自製設備の増設、建築コストの縮減を盛り込んだシナリオを作成した。シナリオ実施により、原料稲わらの固定する CO₂ 量に見合ったシステム運用の可能性が示唆された。また、シナリオ実施により、製造コストは 380 円/L 程度に縮減可能と考えられた。酵素自製はコスト縮減の有力な手段の一つと思われるが、他のコスト項目についても縮減の可能性を模索することが必要と考えられる。なお、製造コストが 380 円/L であっても、最終製品の組み合わせ（パルプ、糖化液、エタノール）により、採算性確保が可能である。また、最終製品を汎用的なエタノールに切り替えて採算性を高める手法も考えられた。

6.2 バイオエタノール製造コストの縮減に関する追加検討

バイオエタノール製造コストは、9種類のコスト（原料調達、電気、都市ガス（蒸気）、蒸解薬品等、酵素・酵母、上水道、廃棄物処理費、減価償却、人件費）から構成されている。バイオエタノール製造プラントのスケールアップに伴い、電気および都市ガス（蒸気）に関する設備の効率が向上し、プラント建設コストに由来する減価償却が縮減すると考えた。また、プラント操業管理の効率化に伴う人件費の縮減も考慮した。なお、これらのコスト積算においては0.6乗則が成立すると考えた。

図6.1は生産規模の拡大に伴うバイオエタノール製造コストの試算結果を示す。生産規模が図5.3（第5章）の100倍（バイオエタノール製造量135000 kL/y相当）となったとき、バイオエタノール製造コストは135円/L程度と積算された。2014年7月現在、レギュラーガソリンの給油所小売価格は169円/L前後を推移しているため（資源エネルギー庁調べ）、135円/Lという試算結果はガソリンを下回るものである。一方、生産規模を10000倍まで拡大しても、バイオエタノール製造コストは100円/L以下とならないと思われた。従って、稲

第6章 総括

わらを粗原料とするバイオエタノール生産システムの採算性確保においては、135000 kL/y が生産規模の目安と考えられた。また、本試算では、生産規模拡大に伴い、バイオエタノール製造コストに占める原料調達コストの割合が高まることが示唆された。

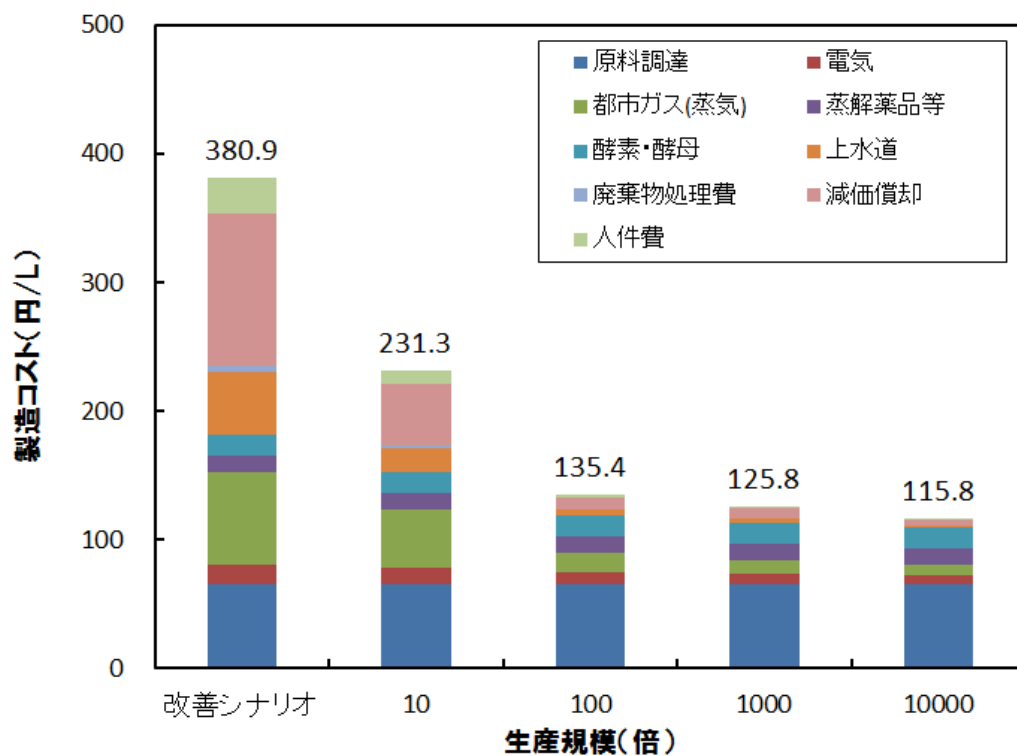


図 6.1 生産規模の拡大に伴う製造コストの試算結果

注)「改善シナリオ」は、本編第5章の図5.3におけるコスト縮減が図られた状態を指す。

6.3 今後の課題および展望

本研究では、これまで漠としていた稲わら利活用の温室効果ガス削減効果について、実規模の取組を通じた評価を試行し、 CH_4 の排出抑制効果が高く、バイオエタノール生産システムをカーボンニュートラルとすることが不可能ではないことを結論した。稲わらの資源利用は、食糧・エネルギー・環境を取り巻く諸課題を同時に解決し得る仕組みと言えよう。

稲わらを積極的に資源利用しようとする場合、食味が良く、実需者ニーズと適合し、かつ稲わらの収量が大きな品種が望ましい。本研究で供試したミツヒカリなどをはじめ、多収穫米の開発および品種改良の動向を継続的に調査することが必要と考えられる。

一方、現在の稲わら流通価格は20円/kg以上となっている（農業物価統計調査2012，飼料をめぐる情勢2008）。この価格は、リグノセルロース系バイオマスの代表格である針葉樹チップよりも高く、稲わらの価格が資源利用における阻害要因であることは否めない。稲わらは粗飼料か資材かという社会通念のハードルはあるものの、5円/kg以下の価格帯でも生産者にメリットがある稲わら

流通の仕組みづくりが必要と思われる。

また、稲わらはセルロース・ヘミセルロースの他にも、リグニンおよび灰分を含有している。リグニンについてはバイオプラスチック素材等としての活用が期待されており、植物由来のシリカ等の灰分については各種電池の素材等として活用可能と考えられている。今後は、こうした先端研究の動向も視野に入れつつ、バイオエタノール粗原料のみならず稲わらの新たな用途開発に向けた調査研究および技術開発に努めたい。

稲わらは水稲生産の副産物である。水稲生産の持続が担保されることによって稲わらの資源利用が成り立つことは言うまでもない。稲わらの利活用を自分のライフワークととらまえ、ひいては国内外に我が国の水田農業基盤の優位性を訴求できるような研究姿勢を忘れることなく、Ph.D.として社会貢献してゆきたい。

謝 辞

本研究の遂行にあたり，主指導教官である千葉大学大学院園芸学研究科の松岡延浩教授には，研究計画の作成，本論文のとりまとめ，さらには P h . D . の 在り方や研究の基本姿勢に至るまで，細部にわたり懇切なる助言を賜りました．

千葉大学大学院園芸学研究科の椎名武夫教授，磯田昭弘教授，小林達明教授，ならびに東京農工大学大学院の東城清秀教授には，本論文をご審査いただきました．

また，千葉大学大学院園芸学研究科の小川幸春准教授には，修了までの進捗管理はもとより論文投稿における貴重な指導を賜りました．心より感謝の意を表します．

本研究はソフトセルロース利活用技術確立事業（農林水産省所管補助事業）・「柏の葉ソフトセルロースプロジェクト」の成果を活用しています．農林水産省農村振興局担当官，社団法人地域資源循環技術センター関係各位，ならびに **B i o m a t e r i a l i n T o k y o** の泉可也社長，矢口時也主任研究員に深甚の謝意を表します．

後先になりましたが，平成 25 年度秋期に主査

をお引き受けくださった田川彰男（千葉大学園芸学
学 研 究 科 名 誉 教 授 ） に 記 して 謝 意 を 表 し ます 。 ま た ，
私 に バイ オ エ タ ノ ール ， バイ オ マ ス 研 究 の き っ か
け を 与 え て く だ さ っ た 都 留 信 也 氏 （ 元 農 林 水 産 技
術 会 議 ） ， 片 山 秀 策 氏 （ 元 農 業 ・ 食 品 産 業 技 術 総 合
研 究 機 構 バイ オ マ ス 研 究 統 括 監 ） ， オ エ ノ ン ホ ール
デ ィ ン グ ス 苫 小 牧 工 場 関 係 各 位 に 厚 く 御 礼 申 し 上
げ ます 。