

日本におけるイネのバイオエタノール化

東京大学大学院 農学生命科学研究科 塩津文隆・森田茂紀

1. バイオエタノールを巡る世界と日本の状況

近年、地球温暖化対策あるいは石油枯渇対策として、石油代替エネルギーのひとつとなるバイオエタノールの生産と利用が国内外で推進されている。世界における総生産量は、2000年の約3000万kLから2007年の約6300万kLへと、この数年で2倍以上になった(Licht 2007)。しかし、バイオエタノールの生産量が急激に増加したことが、原料となる穀物価格の急騰を引き起こす要因のひとつとなり、食料とエネルギーとの競合が問題となっている。バイオエタノールの生産拡大は、確かに穀物価格の異常な高騰の引き金の一つではあるが、原因はそれだけではなく、投機マネーが流入したことや、各国が穀物の輸出規制を行ったことの影響が非常に大きいと考えられ(鈴木 2008)、冷静な分析が必要である。そこで、エネルギーと食料との競合を避けるため、食用として利用しない原料作物からセルロース系バイオエタノールを生産する方向へ世界中が動き始めている。

日本では2007年11月に、経済産業省と農林水産省とが連携して「バイオ燃料技術革新協議会」を設置し、2008年3月に、セルロース系原料からバイオ燃料を効率的に生産する「バイオ燃料技術革新計画」を提出した。この計画では、バイオエタノールを40円/Lで生産することを目指している。また日本政府は、2030年頃まで

に、食料供給と競合しない稲ワラや間伐材等のセルロース系原料や資源作物から年間600万kLのバイオエタノールを供給するという数値目標を設定している。国内では、年間約6000万kLのガソリンが消費されているので、これはE10(ガソリンに10%のバイオエタノールを混合)を実施できる量に相当する。

政府が目標としている600万kLのバイオエタノールを供給するためには、原料のバイオマスが多量に必要である。しかし、エネルギー安全保障の観点からは、原料はできるだけ国内で確保することが重要である。国内で原料バイオマスを確保するとすると、規格外農作物や未利用バイオマスの利用だけでは賄うことが困難である。そのため、耕作放棄地を利用して資源作物を目的生産することに加え、いわゆる休耕田を中心に現在、利用されていない水田でイネを栽培してバイオエタノール原料として利用することが考えられる。

2. 休耕田を利用したバイオエタノールの生産

現在、日本では米の消費量の減少、米価の下落、減反に伴う生産調整面積の増加、水田農家の高齢化に伴う後継者の不足など、稲作を取り巻く環境が変化している。これに対応するため、また、活力ある新しい水田農業を実現するために、旧来とは違った新しい稲作の可能性を模索

し、そのなかから新たな活路を切り拓いていく必要がある。その打開策の一つとして、休耕田や生産調整水田に資源作物としてのイネを栽培し、バイオエタノール用原料として利用することが注目されている。休耕田を利用してイネを栽培すれば食料との競合は起こらない。反対に、このようにして水田機能を維持することで食料不足時には食用米を栽培することができるため、食料安全保障の観点からもメリットがある。

それでは、イネからバイオエタノールを生産するポテンシャルが、日本にはどれくらいあるのだろうか。ここでは、耕作放棄地における水田（いわゆる休耕田）について、現在すぐに利用可能な面積だけでなく、潜在的に利用可能な面積についても推定したうえで、そこに資源作物としてのイネを栽培し、ホールクロップ利用した場合に生産することができるバイオエタノール

の量を試算した。また、現在の稲作から毎年発生する稲ワラと籾殻（未利用バイオマス）を利用して生産できるバイオエタノールのポテンシャルも検討した（塩津ら 2008）。

農林水産省が発表している農林業センサスによると、耕地面積は1961年に609万haであったのをピークに、その後、減少の一途をたどり、最新データの2005年には469万haとなり、ピーク時より約20%減少した。一方、耕作放棄地面積は1975年には13.1万haであったのが年々増加し、2005年には38.6万haと、30年間で約3倍に増加した（図-1）。この耕作放棄地には水田と畑とが含まれ、畑には普通畑、牧草地、樹園地がある。農林水産省が作成した遊休農地対策データベースによると、全体の約41%が水田で、その約23%がすぐに利用できるものなので、2005年にすぐ利用可能な休耕田の面積は、

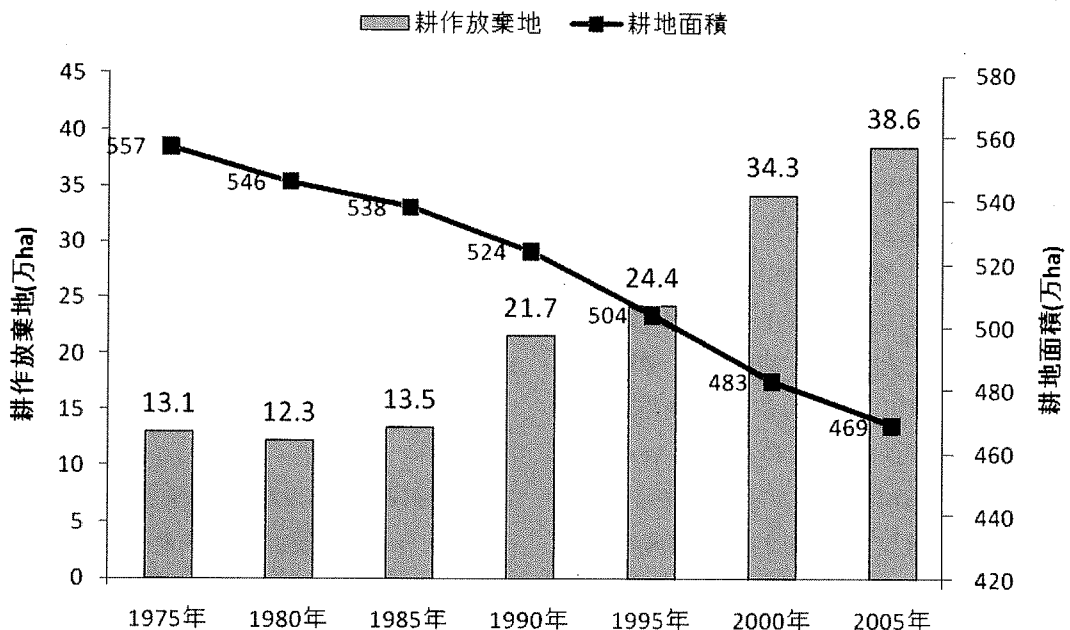


図-1 耕作放棄地および耕地面積の推移

耕作放棄地とは、過去1年以上作物を栽培せず、しかもこの数年間に再び耕作する意思がない土地を指す。農林業センサス（農林水産省大臣官房統計部 2008）を改変。

耕作放棄地の面積 (38.6 万 ha) $\times$ 41% $\times$ 23% = 約 3.6 万 ha という計算になる。このほか、実際に稲作は行われていないが、いつでも再開できるように管理されている生産調整田が約 11.7 万 ha あるので、合計約 15 万 ha の水田がすぐに利用可能な状態にあると考えた。

農林業センサスでは、耕作放棄地に関する調査対象を土地持ち販売農家、土地持ち自給農家および非農家の 3 つに区分している。このうちで、土地持ち販売農家と土地持ち自給農家については、耕作放棄地に占める水田や畑の内訳データがあるが、非農家についての内訳は明らかになっていない。最新データにおける土地持ち販売農家と土地持ち自給農家の休耕田面積割合は、それぞれ 2005 年に 44% (6.3 万 ha) および 2000 年に 41% (2.3 万 ha) である。そこで、非農家の休耕田面積割合を、土地持ち販売農家および土地持ち自給農家における割合の平均値 42% と仮定すると、2005 年における休耕

田面積は約 6.8 万 ha となる。このほか、生産調整田が約 11.7 万 ha あるので、合計約 27.1 万 ha の水田が潜在的に利用可能と考えられる。

3. イネのバイオエタノール化のポテンシャル

以上のようにして利用可能面積を推定した休耕田で、どんなイネを栽培するかが、次に問題となる。バイオエタノール原料として利用する場合は、食用米のように食味や品質を考える必要はない。コメだけではなく、セルロース系原料となる籾殻と稲ワラも含めた地上部全体のバイオマス生産量が高いことが必須条件であり、これを低投入持続的に栽培することが必要となる。したがって、バイオエタノール原料とするイネを既存品種の中で考えるとすれば、飼料稲品種や多収稲品種が有力候補となる。これらの候補品種の地上部全乾物重は、食用稲品種 (全国平均で 1313kg/10a) の約 1.1 ~ 1.5 倍あることが理由である (表-1)。

表-1 飼料稲・多収稲と 2008 年の全国平均収量の乾物生産量

品種名	栽培適地	全乾物重 (kg/10a)	玄米重 (kg/10a)	籾殻重 (kg/10a)	ワラ重 (kg/10a)
きたあおば	寒地	1562	807	177 (253)	578 (826)
べこあおば	寒冷地	1507	717	158 (225)	632 (903)
夢あおば	寒冷地	1667	706	155 (222)	806 (1152)
モミロマン	温暖地	1800	807	177 (253)	816 (1166)
北陸193号	温暖地	1710	764	168 (240)	777 (1111)
タカナリ	温暖地	1763	743	163 (233)	857 (1224)
クサホナミ	温暖地	1900	685	151 (215)	1064 (1520)
リーフスター	温暖地	1918	412	91 (129)	1416 (2023)
ニシアオバ	暖地	1969	522	115 (164)	1332 (1903)
2008年の全国平均		1313	543	119 (170)	651 (930)

籾殻重は、玄米に対する副産物比(0.22)から算出し(小川ら 1988)、ワラ重は全乾物重から玄米重と籾殻重を引いて求めた。全国平均の全乾物重は、玄米重、籾殻重およびワラ重を合計した。籾殻重およびワラ重の()内の数値は、含水率を 30%とした場合。「多収品種の用途と適正」(農林水産省総合食料局食糧部 2008)を改変。

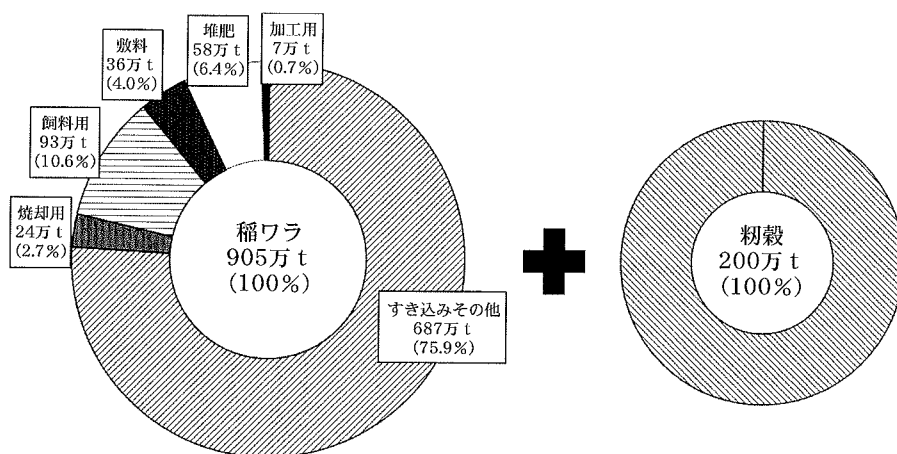
表－2 飼料稲・多収稲からのバイオエタノール生産量

品種名	玄米から (L/10a)	籾殻から (L/10a)	ワラから (L/10a)	合計 (L/10a)
きたあおば	350	56	206	612
べこあおば	311	50	226	587
夢あおば	306	49	288	643
モミロマン	350	56	291	697
北陸193号	332	53	278	662
タカナリ	322	51	306	680
クサホナミ	297	47	380	725
リーフスター	179	28	506	713
ニシアオバ	227	36	476	738
2008年の全国平均	236	37	233	506

このような飼料稲品種や多収稲品種を休耕田で栽培し、ホールクロップ利用して（コメだけでなく、籾殻や稲ワラも利用して）バイオエタノールを生産した場合のポテンシャルを試算してみる。ここでは佐賀ら（2007）の仮定を採用し、玄米、稲ワラ、籾殻のそれぞれ1,000kgから、434L、250L、220Lのバイオエタノールができるとすると、10アールあたりでは587～738L（1ha当たり6～7kL）となる（表－2）。したがって、すぐに利用可能な休耕田約15万ha

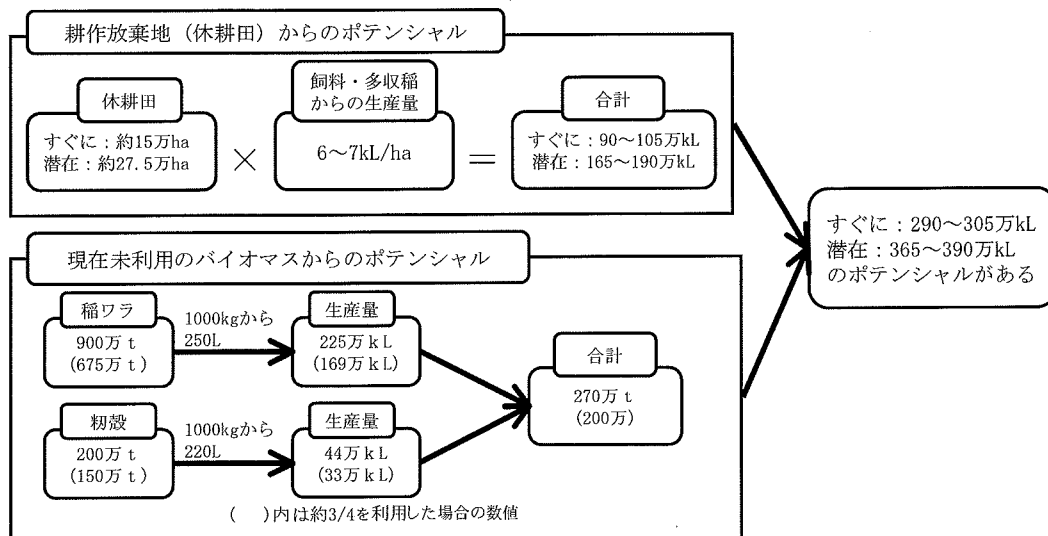
および潜在的に利用可能な休耕田約27.1万haにバイオマス生産性が高い飼料稲・多収稲を栽培し、コメだけでなく、籾殻や稲ワラも利用してバイオエタノールを生産すると、それぞれ90万～105万kLおよび165万～190万kLが得られる計算になる（図－3）。

このほか、日本の稲作からは毎年、約900万トンの稲ワラと、約200万トンの籾殻とが発生している（図－2）。これらのすべてをバイオエタノールに変換すると約270万kL生産できる。し



図－2 稲ワラと籾殻（未利用バイオマス）の状況

「国産稲わらの用途別利用状況 平成18年産」（農林水産省生産局畜産部 2008）。



図－3 日本におけるイネからのバイオエタノール生産ポテンシャル

塩津ら（2008）を一部修正。

かし、現在、稲ワラの約25%が飼料用、敷料、堆肥などに利用されているので、稲ワラと籾殻のそれぞれ75%を利用してバイオエタノールを生産すると、それぞれ169万kLおよび33万kL、合計で約200万kLということになる（図－3）。

以上のように、いわゆる休耕田でエネルギー作物としてのイネを栽培して利用するほか、現在の稲作から発生する稲ワラと籾殻を利用すると、毎年、合計約300万～400万kLのバイオエタノールを生産するポテンシャルがある（塩津ら 2008）。これはあくまで机上の計算であるが、2030年までに600万kLのバイオエタノールを供給するという日本政府の目標を半分以上賄えるポテンシャルであり、目標実現のために、イネのバイオエタノール化を推し進めることがいかに重要かを示唆している。

4. イネのバイオエタノール化の課題と展望

バイオエタノールの生産と利用を考える場合、変換・製造過程が注目されがちであるが、実際

の事業化を進めるにあたっては、入口（原料）と出口（利用）も含めた一環システムとして捉える必要がある（森田 2009a,b）。このような視点から、イネのバイオエタノール化を推進する場合の課題と展望について触れておきたい。

入口としての原料バイオマスの確保については、何を、どこで、どうやって栽培するかが問題となる（森田 2009a,b）。何を、どこで栽培するかについては、すでに述べたとおりで、資源作物としてのイネを休耕田を利用して栽培して、ホールクロップ利用することが考えられる。バイオエタノール生産費を抑えるためには、原料費も削減する必要があり、現在の飼料稲品種や多収稲品種が持つバイオマス生産性を超える品種の育成が必要である。また、高いバイオマス生産をあげるために、いくらでも肥料や農薬を投入してよいだろうか。現在の産業型農業は、農業機械、肥料、農薬などを多投入して高い生産性を実現するエネルギー依存型のものになっている（Pimentelら 1973）。しかし、バイオエタ

ノール利用の背景には、地球温暖化の原因と考えられている二酸化炭素の排出を削減することがある。したがって、原料イネの栽培におけるエネルギー収支（生産/投入エネルギー比）が適正でなければならない。

すなわち、これが3番目となる、どうやって栽培するかという問題であり、原料イネの栽培のために投入するエネルギーをできるだけ少なく抑える必要がある。水稻栽培に投入されているエネルギーの中では、農業機械と、肥料・農薬に係る割合が大きく（宇田川 1976）、これらの投入エネルギーを低減するには、直播栽培、不耕起栽培などの低投入省力栽培や、化学肥料の代りに堆肥を利用した栽培を導入することも考えられる。そのためには、直播栽培や不耕起栽培に適した品種の選択が必要である。また、農薬を減らすためには、病害耐性・虫害耐性・雑草耐性が強い品種の育成が必要である。さらに、収穫・運搬・保管のためのエネルギーを節約するために、新しい機械や施設の開発も必要となる。

出口としての問題としては、まず、生産したバイオエタノールをどのように利用するかがある。バイオエタノールを自動車用燃料として利用する場合、直接混合する方法と、ETBE（エチル・ターシャリー・ブチル・エーテル）という添加剤にしてから混合する方法の2つがある。現在、石油連盟はETBE方式を採用しているが、バイオエタノールを生産する側の多くは、バイオエタノールのガソリンへの直接混合を提案している（五十嵐・斉木 2008）。この問題については、混合割合や事業化のための初期投資など、様々な視点から検討する必要があるが、エタノール85%あるいは100%でも車が走ることはすでに実証されており、日本の自動車業界がどのような車を作っていくのか、またエンドユー

ザーとしての国民がどのような車を購入するかという問題とも連動してくる。

5. 日本にとってのバイオエタノールは農業問題

そもそも、エンドユーザーとしての国民がバイオエタノールをどのように捉えているかという問題もある。すなわち、稲ワラや籾殻はセルロース系原料であるから問題ないが、食用となりうるコメからバイオエタノールを作ることに対しては、生理的な嫌悪感を持つ人も少なくない。

著者らは、食料自給率39%に象徴される日本農業の再生を図るとすれば、耕地利用率を上げていくことが一つの有効な方策になると考え、休耕田における飼料イネの栽培の検討を通じて、イネのバイオエタノールというアイディアに至った。若干のミニマム・アクセス米の輸入を別にすれば、コメは基本的に100%自給できている食料であり、過剰生産で価格が下落することを避けるために生産調整、いわゆる減反を進めてきた。そのため、すでにみたように休耕田の面積が増加しているが、水田は稲を栽培せずに管理を怠れば、畦畔が崩れたり、雑草が入り、とくに多年生雑草が入ると、すぐに稲を栽培することが難しくなってしまう。かといって、元々、水田であったところではダイズのような畑作物をうまく栽培できないことも多く、水田は水田として稲を栽培することが効率的な保全につながる（森田 2008a,b, 2009a）。

休耕田を有効活用するには稲を栽培するのが最も効率的であるが、できた稲をどう利用するかが問題となる。もちろん、食用として利用できるにこしたことはない。最近では米粉の生産・利用に関する技術開発が進み、消費拡大が期待されている。結構なことであるが、日本で必要なパンやパスタのすべてを米粉で賄うことはでき

ない。次にくるのは、飼料としての利用であろう。日本の畜産が飼料の多くを輸入に頼っていることは、食料自給率が低い一つの大きな理由となっている。休耕田で栽培した稲を飼料として利用することができれば、食料自給率を上げるだけでなく、海外から飼料作物の形で入る窒素量を削減できるため、国内における窒素循環にとっても、いい影響が期待できる。また、バイオプラスチックなどの付加価値の高い物質を稲から製造することもあるだろう。

以上のように、休耕田を利用して栽培したイネの利用については、多くの選択があってよい。その選択の一つとして、バイオエタノール化を考えればよい。休耕田で稲を栽培すること自体は、水田の保全や景観維持につながるし、食料自給率の向上や窒素循環に貢献できるし、雇用の創出も含めて、農村振興につながる（森田 2008a,b）。バイオエタノールは、石油代替エネルギーとして利用できることから、エネルギー自給率がわずか5%（原子力を除く）の日本にとってはエネルギー安全保障の観点から大きなメリットがある。また、イネを栽培して水田を維持しておけば、いつでも必要なときに食用イネの栽培に切り替えることができるため、食料安全保障上も意義がある（山家 2008）。なお、耕地利用率を上げるという観点から、冬作に麦類を栽培できるところは合わせて検討する価値がある。収穫物にこだわるのではなく、麦ワラのバイオエタノール化にすれば稲作との競合も問題ではなく、しかも原料バイオマスの周年供給が可能となり、バイオエタノール工場の稼働率をあげることができる。

なお、日本で事業化するとすれば、アメリカやブラジルのような大規模なプラントではなく、小規模のものでエネルギーの地産地消を目指し

ていくことになるであろう。これは、イネを利用したバイオエタノール生産の日本型モデルとして、同じ稲作を基礎としているモンスーンアジア地域に広く適応できる可能性がある。日本だけでなく、アジアにおいて都市と農村とを融合させ、両者を持続的に発展させるために、バイオエタノールが一つの大きな役割を果たす可能性がある（Morita 2009c）。

このように、日本におけるバイオエタノールの生産と利用は農業問題として捉えるべきである。すなわち、休耕田でエネルギー作物としてのイネを栽培し、当初はコメの利用を中心に、将来的にはホールクロップ利用してバイオエタノールを生産して利用することで、農村振興・地域活性化に役立て、水田とイネを基盤とした日本農業を再生させるひとつの有効な手段とするということである。

東京大学大学院農学生命科学研究科には、産学官民連携型農学生命科学研究インキュベータ機構、通称、アグリコクーン（AGRI-COCOON）という新しい教育研究組織があり、単独の研究室や単一の専攻では対応が難しい高度化・国際化・多様化・複雑化した問題に対応している。このアグリコクーンには現在、5つのフォーラムグループがあるが、その一つに農学におけるバイオマス利用研究フォーラムグループがある。このフォーラムグループの活動の中から、イネのバイオエタノール化を通して持続的な日本社会を構築することを目指す「イネイネ・日本」プロジェクト（<http://www.ineine-nippon.jp/>）が2007年5月に立ち上がり、シンポジウムを開催したり、各地の実証事業とも連携しながら、活動を進めている。すでに、JA全農が新潟県でコメを利用した（籾殻をブリケットにして燃料として利用した）実証事業を開始しているし、秋

田県などでは、稲ワラを利用したセルロース系原料からのバイオエタノール生産の実証事業が始まるところである。バイオエタノールの事業にあたっては、農家、農業団体、企業、自治体、大学や研究機関、政府、NPOなど、様々の異なる組織や機関に所属する方々だけでなく、エンドユーザーとしての市民に係ることになる。このように立場や利害を異にする多くの関係者をコーディネートしながら、イネのバイオエタノール化を実現していくために、「イネイネ・日本」プロジェクトの活動を通じて、努力して行きたいと考えている。

引用文献

- 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.
- Licht, F.O. 2007. F.O. Lichts World Ethanol & Biofuels Report.
- 森田茂紀 2008a. バイオエタノールと持続的な日本社会の構築. 「イネイネ・日本」プロジェクトによるライス・ルネサンス. 化学経済 48-52.
- 森田茂紀 2008b. エネルギー作物イネのホールクロップ利用バイオエタノール化—日本型モデル構築によるライフ・ルネサンス—. 農林水産技術研究ジャーナル 31: 47-49.
- 森田茂紀 2009a. 休耕田の稲から作るバイオエタノールは、食料危機や環境破壊に関係なし. 日本の論点 2009. 文藝春秋編, 東京.
- 森田茂紀 2009b. 日本におけるイネのバイオエタノール化. 生物資源 2(4): 2-7.
- Morita, S. 2009c. Food and energy production from agriculture in urban rural systems of Japan. International workshop on sustainable city region. 51.
- 農林水産省大臣官房統計部 2008. 農林業センサス. (<http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/index.html>)
- 農林水産省生産局畜産部 2008. 平成20年度第1回全国飼料増産行動会議・幹事会資料一覧. 国産稲わらの利用の促進について. (http://www.maff.go.jp/j/chikusan/souti/lin/l_siryo/koudo/h200901)
- 農林水産省総合食料局食料部 2008. 多収品種の用途と適正. (<http://www.maff.go.jp/j/soushoku/keikaku/shiryoyouumai/index.html>)
- 小川和夫・竹内豊・片山雅弘 1988. 北海道の雑草地におけるバイオマス生産量及び作物による無機成分吸収量. 北海道農試研報 149: 57-91.
- Pimentel, D, L. E. Hurd, A. C. Bellotti, M. J. Forster, I. N. Oka, O. D. Sholes, and R. J. Whitman 1973. Food production and the energy crisis. Science 182: 443-449.
- 佐賀清崇・横山伸也・芋生憲司 2007. 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. Journal of Japan Society of Energy and Resources 29: 30-35.
- 塩津文隆・服部太一郎・吉田浩爾・森田茂紀 2008. 日本におけるイネからのバイオエタノール生産ポテンシャルの試算. 日作紀 77(別2): 160-161.
- 鈴木宣弘 2008. 現代の食料・農業問題 誤解から打開へ. 創森社, 東京.
- 宇田川武俊 1976. 水稻栽培における投入エネルギーの推定. 環境情報科学 5-2: 73-79.
- 山家公雄 2008. 日本型バイオエタノール革命. 日本経済新聞出版社, 東京.