

いも類でん粉とバイオエタノール

農研機構 作物研究所 食用サツマイモサブチーム 中村 善行(Nakamura, Yoshiyuki PhD)

1. はじめに

地球温暖化や国際原油取引価格の高騰などを背景に、ガソリンや軽油に替わるバイオエタノール等の液体バイオ燃料の利用が二酸化炭素の排出削減と過度の化石燃料依存からの脱却を目指して世界的に進められている¹⁾。

この一環として、北海道や南九州の基幹産業の一つであるいも類でん粉の生産が停滞する現在、これらでん粉質作物のバイオエタノール生産用資源としての可能性を検討した。

2. バイオエタノール原料作物

バイオエタノール²⁾は、植物資材（バイオマス）を原料とするため、現在のところ燃焼に伴う地球上の炭素収支は不変と見なされ、また再生産可能という長所を持つ。このバイオエタノールの原料³⁾として利用されている農作物にはサトウキビ、テンサイなどの「糖質作物」とトウモロコシ、麦類、いも類などの「でん粉質作物」とがある。世界の2大バイオエタノール生産国ブラジルと米国は各々サトウキビ（単収約80t/ha）とトウモロコシ（同7t/ha）を主要原料として利用し、ヨーロッパ諸国では麦類やテンサイが主に使われるなど、各国の風土に応じた農作物が利用されている。サトウキビのエタノール収量は、原料

重量当たりで約60L/tとトウモロコシ（約350L/t）の1/5以下であるが、単位面積当たりでは逆にトウモロコシ（約2500L/ha）の2倍の約5000L/haになる。

いも類については、ジャガイモはドイツやポーランドでバイオエタノールやバイオディーゼル原料に、サツマイモは中国で燃料用および工業用エタノール原料にそれぞれ利用されている。両作物の原料重量および栽培面積当たりのエタノール収量に関しては、ジャガイモでは90L/tおよび2900L/ha、サツマイモでは128L/tおよび1900L/haというデータが米国農務省から公表されている⁴⁾。重量当たりではサトウキビに近く、面積当たりではトウモロコシ並みかそれよりやや低い。

日本におけるジャガイモとサツマイモは、その生産量がいずれも世界の約1%に過ぎないものの各々、約290万tと約105万tであり、米（約1100万t）に次ぐ重要なでん粉質作物である⁵⁾。両者由来のでん粉の生産量は30万t弱で国内流通量全体の約10%を占める⁵⁾。生いも収量は約30t/haと約24t/ha⁵⁾で、前出の米国農務省データから算出した値（約32t/ha、約15t/ha）と遜色ないので、日本における両作物の栽培面積当たりのエタノール生産性は米国とほぼ同程度と考えられる。

主な糖質、でん粉質作物の国内生産の状

表1 主な糖質，でん粉質作物の収量と炭水化物生産性

作物名	単位収量* (t/ha)	炭水化物 含量** (%)	炭水化物 収量 (t/ha)
水稻	5.2	73.8	3.8
小麦	4.1	72.2	3.0
大麦	3.3	72.1	2.4
トウモロコシ	52.6	17.0	8.9
ジャガイモ	31.7	17.6	5.6
サツマイモ	24.6	31.5	7.7
サトウキビ	61.8	12.5	7.7
テンサイ	61.6	20.0	12.3

*：2005年～2007年の作物統計の平均値

**：五訂日本食品成分表、日本標準飼料成分表より

況を表1に示す。ジャガイモ、サツマイモはイネ、ムギなどに比べて圧倒的に高収量であるので、炭水化物の収量性にも優れ（特にサツマイモはサトウキビに匹敵）、バイオエタノール原料としての潜在能力は高い。

3. いも類からのエタノール製造の歴史⁶⁾

日本におけるいも類を原料としたエタノールの工業的生産の歴史は古く、1899年にジャガイモを原料としたエタノール製造所が北海道旭川市に作られた。同所ではでん粉の糖化に麦芽由来のアミラーゼを使ったが、その後、清酒醸造用麹菌のアミラーゼを利用した強力な糖化方法が開発された。醗酵に関しても、戦前の日本統治下の台湾で醗酵能力に優れた酵母菌が多数育種され、戦後の醗酵工業の発展に繋がった。日中戦争中の1937年からはジャガイモ、サツマイモを原料とした航空燃料用エタノールの製造が本格化し、最盛期の1944年には年間約17万kLが製造された。80℃～90℃で蒸煮したサツマイモを用いる当時の製造法（低温蒸煮法）に準拠して、1tの生塊

根（でん粉含量24.3%）から95%エタノールが約166L製造できた（醗酵効率92%、蒸留効率98.5%）と報告されている。

戦後も1960年代前半までは国産いも類でん粉を用いたアルコール生産が盛んであったが、以後は、原料が輸入粗留アルコールに替わるとともに、いも類でん粉の国内生産も安価な外国産品との競合により縮小するなどして、大きく減退したまになっている。

4. いも類でん粉からのエタノール生産における技術革新

でん粉やセルロースなどからのエタノールの製造は、これら多糖類をグルコースに分解する過程（糖化）、グルコースから酵母などの微生物を利用してエタノールを作る過程（醗酵）、生成したエタノールを醗酵液から分離・濃縮する過程（蒸留）の3つのプロセスに大別される。でん粉の糖化は、 α -アミラーゼによって糊状にした（液化）でん粉にグルコアミラーゼを作用させて行われるのが一般的である。得られたグルコースから酵母の代謝（解糖系）によっ

てエタノールが生成される。グルコース 1 分子から 2 分子のエタノールが生成するので、理論上はグルコース 100g からエタノール約 51g が生成することになるが、グルコースの一部が酵母の栄養源に使われるために実際の収量はその 90% 位に低下する。

現在、糖質およびでん粉質作物からのエタノール生産技術はほぼ確立されているが、ジャガイモ、サツマイモの成分育種を中心とした近年の研究成果を踏まえて考察してみたい。

燃料用エタノールの大量生産には、糖化、醗酵の各過程での効率化が重要である。このうち、でん粉がグルコースに分解された後の過程である醗酵に関しては、反応を司る微生物の育種や反応プロセスの化学工学的改良を中心に効率化が図られている^{7~9)}。一方、糖化は最もエネルギーコストが掛かる過程で、その効率化はエタノールの生産性向上に不可欠である上にでん粉の特性が深く関与する部分でもある。サツマイモでん粉は粒径が小さいうえに、分散性が優れていることなどから酵素による液化・糖化性が高い¹⁰⁾。一方、サツマイモに比べてアミロペクチンに結合しているリンが多いジャガイモでん粉¹¹⁾は、酵素による分解性が劣るため、その液化・糖化効率はサツマイモより低いと考えられる。

サツマイモやジャガイモの中にはでん粉糊化温度が通常の品種よりかなり低い品種が存在する^{12,13)}が、これらを利用すれば糖化に要するエネルギーの大幅な低減が期待できる。アミラーゼによる分解を受けやすいようにアミロースとアミロペクチンの割合を調節することも考えられる。アミロース合成のキー酵素である粒結合型でん粉合

成酵素 (GBSS I, II) の働きを遺伝子組換え技術により制御してアミロース含量を大幅に改変したいも類が作出されている¹⁴⁾が、アミロースフリーのサツマイモ生でん粉はグルコアミラーゼによる消化性が高く¹⁵⁾、糊化处理を省略した無蒸煮醗酵に適している (野田私信)。また、同種の技術を用いてでん粉合成酵素を過剰発現させることによりでん粉含量を高める試みも行われている。遺伝子組換え技術に関しては、安全性や環境への影響の評価等多くの課題があるのも事実だが、バイオ燃料用作物の特性を画期的に向上させる上ではその活用も排除すべきではないと考える。

5. バイオエタノールの導入促進に向けて

燃料用バイオエタノールの本格的導入に向けた課題は、①食料、飼料との競合回避 (現在、バイオエタノール原料の大半は農作物)、②原料作物や製品の生産等コストの低減の二点である¹⁶⁾。特に、食料自給率が 40% と極めて低い日本で燃料用エタノールの原料を農作物に求めることには議論の余地があろう。世界的にも、農作物のエタノール原料への転用が食料供給の逼迫に繋がる懸念が指摘され、バイオ燃料原料も従来の農作物から農産廃棄物、作物非食部、木質系廃材・未利用材木材などへとシフトしつつある¹⁷⁾。しかし、これらの主成分は強固な構造を持つ多糖類 (リグノセルロース) で、その糖化・醗酵には多くの解決すべき技術的課題が残されている。そこで、食料生産システムとの調和に配慮したバイオエタノール原料として規格外農産物が考えられる。すでに、北海道十勝地域において生産量の約 1 割に及ぶ規格外小麦の一部

(家畜飼料として市場供給された残り)を利用したエタノール生産試験¹⁸⁾が始まっている。サツマイモやジャガイモに関しても、青果用の規格外品が集荷量の2～4割(高品質を標榜する一部の品種・産地では5割に達するとの情報もある)、焼酎、でん粉用サツマイモで1～2割と見られ(吉永私信)、それらの有効活用が求められている。廃棄ジャガイモから凝集性酵母を用いた連続醗酵法でエタノールを製造する例¹⁹⁾も報告されている。この場合、でん粉製造に付随した形態では、プラントの稼動が収穫期以降の数ヶ月に限られる可能性がある等の、解決すべき問題があるが²⁰⁾、青果用を原料とした場合であれば、ほぼ周年の稼動が可能であろう(樽本私信)。また、エタノール製造に伴って生成される副産物の活用も生産コスト低減に必要かつ有効である。トウモロコシからエタノールを生産する過程で生じる蒸留副産物を家畜飼料として販売し、エタノール生産コストの大幅低減を実現している米国企業の例²¹⁾などがある。日本でも、機能性素材、食品用酵素、薬品等の高付加価値製品への利用技術の開発²²⁾が進められている。

国内における主な農業系バイオマスか

らのエタノール生産コストの試算²³⁾(表2)によると、ジャガイモとサツマイモは、作物生産に要する投入エネルギーが低いおかげでエタノール生産費が稲わら並みの低い値となり、現状ではテンサイとともに経済性担保の可能性が比較的高い原料作物であると結論されている。

また、植物体全重量の1/3～1/2を占める茎葉部(家畜飼料への利用も模索中)をいもと併せて糖化处理できる技術が実用化されれば、比較的狭いエリア内でもエタノール製造施設の稼動を賄える原料の確保が可能となろう。いも類の茎葉に含まれる炭水化物は、含有率はいもの約1/3と少ない²⁴⁾ものの、その総量は廃棄されたいもからの総量に匹敵するうえ、稲わらなどに比べてリグニンが少ないので比較的糖化されやすく、でん粉質と混ぜても糖化・醗酵反応の大きな妨げにはならないと考えられる。

原料向け農作物の低コスト生産技術の開発は農研機構を中心に取り組まれている。耕作放棄地等への作付けを前提として、病虫害抵抗性に優れ、収量性が高く、省力栽培に適した品種や栽培技術の開発が行われている。ジャガイモでは疫病・シストセンチュウ高抵抗性と多収性、サツマイモでは、

表2 各種農業系バイオマスからのエタノール製造効率の比較

	糖質作物*		でん粉質作物*			作物残渣
	サトウキビ	テンサイ	イネ	ジャガイモ	サツマイモ	稲わら
エタノール生産量(L/t)	78	92	430	139	180	255
エタノール生産量(L/ha)	6980	5710	3140	6210	7970	1030
作物生産投入エネルギー(MJ/燃料)**	260	280	280	200	110	235
エタノール生産費(円/L)	399	286	571	222	281	252

*：高バイオマス品種(「コナフブキ」、「コナホマレ」等)をエタノール原料用に栽培した場合を想定。

**：作物収量当たりをエタノール製造量当りに換算。

直播適性と高でん粉をそれぞれキーワードに研究が進められている²⁵⁾。

6. おわりに

地球環境の保護、化石資源に替わるエネルギー資源の確保、農業の活性化などを目的に日本でも導入が進められているバイオ燃料にいも類がどの程度貢献できるかを考察した。食料自給率が低く、農業生産基盤も脆弱化しつつある日本において、バイオ燃料の実用的導入に農業が関わることには大きな困難も伴う。しかし、食糧の確保と地球環境の保全との両立は日本などの先進諸国のみならず開発途上国も含めた地球全体の重要課題である。日本はでん粉など糖質成分の利用技術に関して多くの優れた研究成果を有しており、この分野で先導的役割を果たすことも可能である。また、狭い耕作地でも収量の上がる品種や栽培技術の蓄積も豊富である²⁶⁾。ジャガイモやサツマイモは単位面積当たりのエネルギー収量が高く^{24,27)}、今後、アジア、アフリカ諸国等でバイオ燃料の原料に利用される可能性も否定できない。国内に留まらず世界に目を向けて、これらいも類のバイオマスとしての可能性を食用と併せて追求することは日本におけるいも類振興にも意義があると考えている。

最後に、本稿の執筆をお勧め下さるとともに懇切なるご指導を賜った樽本勲先生に心より感謝申し上げます。また、原稿を校閲下さったサブチーム各位と荒木均研究管理監、貴重な情報をお寄せ下さった九州沖縄農業研究センター吉永優博士ならびに片山健二博士、北海道農業研究センター野田高弘博士、食品総合研究所楠本憲一博士に

篤く御礼申し上げます。筆者の浅学非才に起因する誤解等があるかと思いますが、ご指摘・ご指導いただければ幸いです。

参考文献

- 1) 木下卓：農業技術 62(3)；105-111 (2007)
- 2) 大聖泰弘ら：バイオエタノール最前線 (改訂版)，工業調査会 (2008)
- 3) N. E Iバッサム：エネルギー作物の事典，恒星社厚生閣 (2004)
- 4) アメリカ合衆国農務省ホームページ
- 5) 農林水産省生産局特産振興課：いも類に関する資料 (2008)
- 6) (社)アルコール協会：バイオエタノール製造技術，工業調査会 (2007)
- 7) 植田充美，近藤昭彦監修：エコバイオエネルギーの最前線，シーエムシー出版 (2005)
- 8) バイオ液体燃料，NTS (2007)
- 9) 近藤昭彦：バイオインダストリー24(4)；24-32 (2007)
- 10) 二國二郎編：澱粉科学ハンドブック，朝倉書店 (1977)
- 11) 林一也，森元幸：日本食品保蔵科学会誌 33(1)；27-31 (2007)
- 12) 片山健二ら：作物研究所研究報告 3；35-52 (2003)
- 13) Edwards, A., et all.：The Plant Journal 17(3)；251-261 (1999)
- 14) 喜多村啓介：北農 75(3)；187-197 (2008)
- 15) Noda et al.：Carbohydrate Polymers 49；253-260 (2002)
- 16) 小島浩司：食品と容器 49(1)；22-28 (2008)
- 17) 澤山茂樹：食品と容器 49(1)；14-21

(2008)

- 18) 大庭 潔：食品と容器 49(1)；29-35

(2008)

- 19) 森村 茂, 湯岳 琴, 木田 健次：バイオインダストリー 24(4)；15-23 (2007)
- 20) 薬師堂 謙一：第21回いも類研究会資料 (2007)
- 21) 社)日本エネルギー学会：バイオマハンドブック, オーム社 (2002)
- 22) 農林水産技術会議事務局：研究成果464農林水産バイオリサイクル研究－農水産エコチーム－ (2008)
- 23) 上田 達己：農研機構総合企画調整部研究調査室小論集12 (2008)
- 24) 藤瀬 一馬：高エネルギー作物の研究, 文部省科学研究費報告書 (1983)
- 25) 農林水産技術会議事務局, 農研機構：地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発 (バイオマスプロ) 推進会議資料 (2008)
- 26) 岩永 勝：私の視点, 朝日新聞2008年7月30日 (2008)
- 27) 坂井 健吉：さつまいも, 法政大学出版局 (1999)