

水および窒素のマテリアルフローに着目した 宮古島のバイオエタノールの蒸留残渣液の 農地還元に関する研究

岡寺 智大¹・渡辺 正孝²・奥島 憲次³・稲田 雄二⁴・丹治 三則⁵

¹正会員 独立行政法人国立環境研究所 研究員 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail:okadera@nies.go.jp

²正会員 慶應義塾大学 環境情報学部 教授

³株式会社りゅうせき 産業エネルギー事業本部 バイオエタノールプロジェクト推進室 室長

⁴エナジーファーム株式会社 代表取締役

⁵慶應義塾大学 環境情報学部 講師

温室効果ガス削減の一環として、バイオエタノールのエネルギー利用が注目されているが、バイオエタノールの生産に伴い排出される廃水の処理問題が議論となる。本研究では、バイオエタノールの生産時に排出される廃水の農地還元に着目し、宮古島市のバイオエタノール事業を対象として水及び窒素についてマテリアルフロー分析を行った。その結果、現在のバイオエタノールの事業から排出される廃水に含まれる窒素は、サトウキビ畑に投入される化学肥料の総量の約2%と微量であることから、農地還元は十分可能と考えられる。一方で、溶脱窒素が溶脱を促進する可能性が危惧され、サトウキビの生長期に集中的な投入を行うなどの、適切な施肥管理の下での農地還元が必要性が示された。

Key Words : bio-ethanol, wastewater, land application, nitrogen, Miyakojima, material flow analysis

1. はじめに

近年、温暖化対策技術の一つとして、バイオ燃料に注目が集まっている。特にバイオエタノールは、移動手段のバイオ燃料として世界規模で生産、活用され、我が国でも、政府の補助の下、北海道（ビート、規格外小麦）、大阪（建築廃木材）、北九州（食品廃棄物）、沖縄（サトウキビ由来の廃糖蜜）などで、バイオエタノールの実証実験事業が進められている。

カーボンニュートラルの概念に基づき温暖化の抑制が期待される一方で、バイオ燃料の原料（トウモロコシ等）の生産による土地利用変化によりカーボンフットプリントが増える可能性を指摘されており¹⁾、原料となるバイオマスの生産を含めた評価が必要となる。本研究ではバイオエタノールのカーボンフットプリントを増加させる別の要因として、バイオエタノールの生産に伴ない発生する廃水に着目をする。その理由は、バイオエタノール 1kl の生産にともない 10 倍～20 倍の廃水が発生するが、これらは無機塩類が豊富な高濃度廃水であり、従来の好気性生物処理だけでは処理が困難であるため、通常

の廃水処理以上のエネルギー投入が必要と考えられるからである。また、ロンドン条約でこれらの廃水の海洋投棄は禁止されているほか、地球温暖化との関係から焼却処理が困難であるなど、処理に関する社会的制約が厳格化されているのもその一因である。

これらの状況下で、バイオエタノールの廃水の主要な処理方法としては、「メタン発酵」、「飼料化」、「肥料化」の3つの技術が用いられている²⁾。メタン発酵処理は、有機物を嫌気分解して、その過程で生成する有機酸等をメタンに還元する技術で、UASB などによって効率的にメタンを回収することが可能となってきた。我が国でもメタンガスの場内利用がなされているが、十分なエネルギーを回収するには至っておらず、補助的エネルギーとして利用がされているのが実情である。飼料化については、UFG(未確認成長因子)を含む高栄養飼料(DDG, DDGS)として流通しているが、主に穀類を原料とする発酵残渣液で活用されている技術であり、適用範囲が限定的である。肥料化は、高濃度廃水に豊富に含まれる有機物やミネラルを肥料として土壌に還元することで、クローズドシステムを形成する技術である。バイ

オエタノール生産過程から発生する廃水を農地に還元できるとすれば、廃水処理に伴うエネルギー消費を回避する事が可能である他、廃水中に含まれる豊富な栄養塩を化学肥料と代替することで、カーボンフットプリントの削減を促進する事も考えられる。

しかし、農地還元を行う際に、問題となるのは地下水の汚染である。今回取り扱う高濃度廃水は窒素成分を大量に含むため、これらが地下水へ溶脱することにより地下水の硝酸態窒素を増加させる危険性が予想され、地下水への影響を評価する必要がある。そこで、本研究では、原料の生産、バイオエタノール生成プロセスに排出される廃水処理を含めたマテリアルフロー分析によるバイオエタノールの蒸留残渣液の農地還元について、宮古島を対象に研究を進める。その理由は、宮古島は隆起サンゴ礁からなる水の透過性が大変高い島であるため地下ダムという特有の水資源貯留インフラを整備し、農業、工業生活に必要な水の多くを地下水で賄っており、地下水の水質保全是島民の生活や健康の維持する上で極めて重要となるためである。第2に、地下ダムを整備している事で、頻繁に地下水質調査を実施しており、地下水データのアクセスビリティが高いためである。そこで、地下水の汚染因子となりうる窒素と、それを運搬する水のマテリアルフローを定量化し、それに基づいて、バイオエタノールプラントの廃水の農地還元の実行可能性について分析を行う。また、宮古島市環境モデル都市行動計画の関連施策を、水および窒素循環の観点から考察する。

2. 宮古島のバイオエタノール事業と物質フロー

宮古島市は、沖縄本島から約 290km 南西に位置し、隆起サンゴ礁をベースとする大小 6 つの島（宮古島、池間島、大神島、伊良部島、下地島、來間島）からなる総面積 204.5km²の自治体である。亜熱帯海洋気候に属し、年平均気温約 23 度で、年平均降水量 2,000mm 以上という高温多湿な環境にある。総人口は約 53,500 人で、15 年間で 5,000 人の人口が減少している。基盤産業はサトウキビの生産と、それを原料とする製糖業である。サトウキビの収量面積は約 4,000ha で、年間約 28 万 t のサトウキビの生産している。また、製糖業は年間約 90 億円を出荷し、製造業全出荷額の半分を占めている。

宮古島市は、平成 16 年より環境省の補助を受け、バイオエタノールの生産から利用まで一貫した実証事業が株式会社りゅうせきを中心に進められている。宮古島のバイオエタノール技術は、主要産業である製糖工場から廃棄される廃糖蜜を原料とした技術であり、発酵（培養）、濃縮・蒸留、脱水というプロセスにより 2.5kl/日のバイオエタノールを生産し、E3 ガソリンを生成・販売の実証実験を行っている。バイオエタノールの生成

段階で発生する廃水の内、タンクの洗浄時に生じる洗缶廃水は UASB によるメタンガスの回収を行い、蒸留残渣液は、水処理後、一部は回収して場内利用しているほか、サトウキビ畑への液肥散布や飼料との混合などの実証実験を行いつつ、処理プロセスを検討している段階にある。

本研究では、サトウキビ畑、製糖工場、バイオエタノールプラントの3つの生産プロセスと、農地還元プロセスを組み合わせた閉鎖系の物質フローを分析の対象とする。サトウキビの生産プロセスにおいては、化学肥料、水が投入され、農業排水の排出がなされる。農業排水はさらに地下浸透し、それに伴い硝酸態窒素が地下へと流出する。製糖工場には、収穫されたサトウキビが搬入され、搾汁、濃縮プロセスをへて砂糖が生産される。搾汁により砂糖の原料となるケーンジュースとバガスに分離され、濃縮段階では廃糖蜜が副産物として生成される。搾汁と濃縮を行うために、水が投入され、それに伴い工場排水が排出される。バイオエタノールの生成プロセスにおいては、製糖工場から排出される廃糖蜜を原料とし、発酵、蒸留、濃縮、脱水という段階を経て、バイオエタノールを生成している。蒸留・濃縮段階で、蒸留残渣液が廃水として排出される。また、濃縮塔の洗缶時に発生する排水は、UASB を使用してメタンガスを回収しているため、今回の分析の対象としていない。また、脱水プロセスにおいても、膜分離された水が発生するがこちらの水は汚濁物質を含んでいないため、廃水の対象とはしない。

3. 方法論

(1) 水フローの算定方法

a) サトウキビ畑

サトウキビ畑の水フローは、灌漑用水および降水による水資源供給があり、一部はサトウキビに吸収され、残りは蒸発散、地下浸透、表面流出するものとする。灌漑用水量は、宮古土地改良区の調査データ³⁾を用い、降水量は年平均降水量(2,242 mm)⁴⁾と作付面積(3,755 ha)⁴⁾から求めた。その後、土壌の地下浸透率、蒸発散率、表面流出率を文献値⁵⁾より設定し、蒸発散、地下浸透、表面流出の水量を推計した。サトウキビに含まれる水分量は、製糖工程でサトウキビから発生するバガスの発生率から含水率を設定することで算定した。

b) 製糖工場

製糖業での水投入は生産要素となる工業用水および原料となるサトウキビの水分とし、これらの水は製糖プロセスにおいて、蒸発、原料及び副産物へ取り込まれた後、廃水として排出されるという構造を想定する。製糖業で必要となる工業用水は、沖縄県の製糖業の1日あたりの

用水量⁶⁾と製糖工場の稼働日数から算定した。その内、原料用水は、サトウキビ重量当たりの用水量から求め⁷⁾、ボイラー用水は沖縄県の食品製造業の用途別工業用水に占めるボイラー用水の割合⁸⁾から推計した。ケーンジュースの濃縮段階で発生する廃水については、搾汁によるケーンジュース生成量、石灰投入量の総和から最終製品である砂糖と副産物（ケーキ、糖蜜、灰）の差分とした。また、副産物の糖蜜については発生量に含水率⁹⁾を乗じることで、糖蜜に含まれる水分量を算定し、それ以外の用水は、濃縮過程で蒸発するものとした。

c) バイオエタノールプラント

バイオエタノールプラントでは、希釈水と廃糖蜜に含まれる水分が投入され、酵母残渣及び蒸留残渣液として排出される。いずれも、株式会社りゅうせきのヒアリングデータから推計を行った。

(2) 窒素フローの算定方法

a) サトウキビ畑

サトウキビ畑の窒素投入は、化学肥料、降水および灌漑からなされると仮定した。化学肥料のサトウキビ畑への投入量は、収穫面積に面積あたりの化学肥料投入量の平均値を乗じて求める。ただし、サトウキビの育成手法（春植、夏植、株出し）によって育成期間が異なるため、手法ごとに化学肥料の投入係数を設定し、宮古島では主に普及している2種類の化学肥料の普及割合と窒素成分

比¹⁰⁾を用いて、実際の利用形態に基づいた化学肥料投入量を推計した。降水からの窒素投入量は、既存の畑地の窒素収支¹¹⁾をベースに、化学肥料投入量に対する降水の窒素投入比を設定して算定した。灌漑による窒素供給は灌漑用水量と地下ダムの窒素濃度から推計した。なお、土壌中の無機窒素の投入は対象としていない。

サトウキビ生産に伴う窒素のアウトプットは、作物吸収、土壌への残存及び流出、溶脱、脱窒と仮定した。作物吸収、土壌への残存、溶脱は、既存の畑地の窒素収支から、化学肥料投入に対するそれぞれの割合を設定することで推計した。

b) 製糖工場

製糖工場の窒素フローは、原料のサトウキビの窒素成分が投入され、それらが廃水、もしくは製品および副産物という形で排出される構造を想定する。廃水中の窒素については、砂糖製造業の用に供する施設の全窒素濃度の全国平均値¹²⁾と製糖工場の廃水量から算定する。糖蜜中の窒素は、バイオエタノールプラントからサンプリングした糖蜜を成分分析して得られたデータに基づいて推計した。

c) バイオエタノールプラント

バイオエタノールプラントの窒素収支は、糖蜜及び酵母の培養に使用される硫酸が投入され、蒸留残渣液および残渣酵母を介して廃棄されるというフローを想定し、株式会社りゅうせきの実証データから算定した。

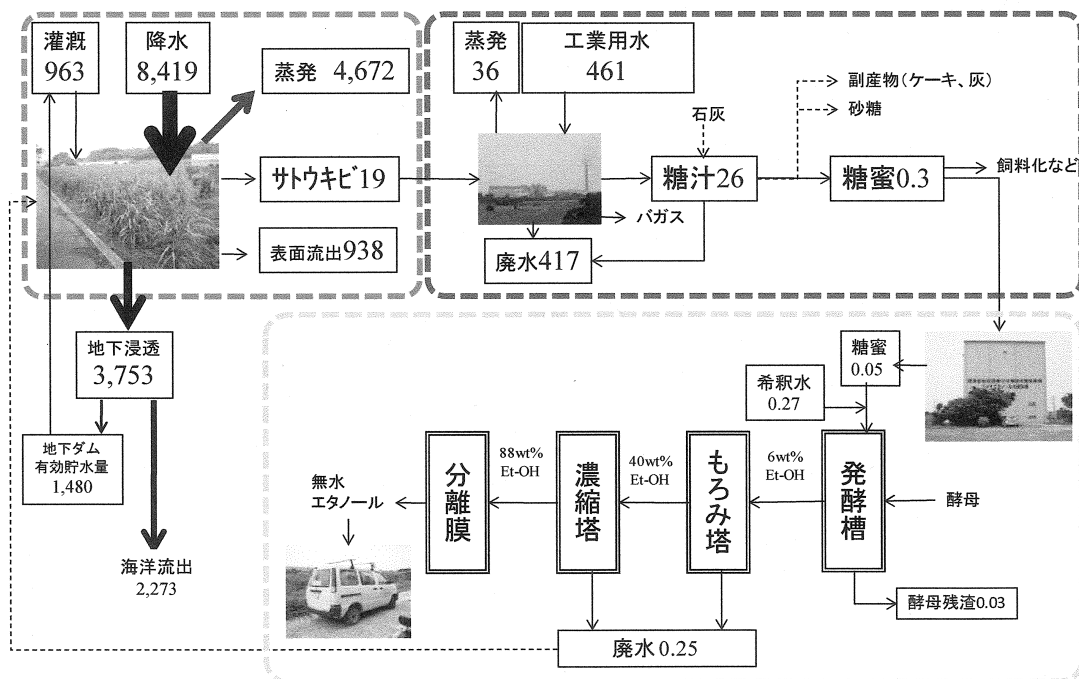


図-1 宮古島のバイオエタノール事業の水フロー (万 m³/年)

産するのに必要となる化学肥料投入量は128t-Nとなり、1割程度が化学肥料と代替効果が見込まれる。

ここで、蒸留残渣液の投入による地下への溶脱について考察する。上述したとおり、サトウキビへの窒素投入量の20%が溶脱するため、蒸留残渣液の投入により2.6t-Nが溶脱すると推計される。つまり、地下ダムの硝酸態窒素潜在量の12%に相当する量が溶脱する計算となる。しかし、液肥という形で投入となるため、化学肥料よりも地下への溶脱が容易であると予想されるため、適切な管理に基づいた投入が必要といえる。中西¹⁵⁾によれば、施肥の時期を収穫期前半の12月から収穫期後期の3月頃（生長期）に移行することで、さとうきびへの窒素吸収率が増加し、地下水への窒素負荷低減が可能との結論が得られており、さとうきびの生長期に集中的に蒸留残渣液を施肥することが有効と考えられる。

また、図-2でわかるように、製糖工程においての多くの窒素は糖蜜以外の物質を介して排出されるため、バガスなどの副産物に蒸留残渣液を混合して、ある種の簡易の緩効性肥料という形態での投入も、窒素の溶脱を抑える方向に働くと考えられる。現地調査に基づけば、図-2中の「その他」の6割がバガスとなるため、これによって31%の化学肥料との代替が可能な計算となる。しかしながら、このケースにおいては、サトウキビへの窒素吸収率への変化を引き起こす可能性があり、窒素の作物吸収と溶脱のトレードオフを最適化する形での使用の検討が必要となる。

(4) 宮古島市環境モデル都市行動計画の評価

宮古島市は環境モデル都市行動計画¹⁶⁾を策定しており、その中から関連する施策として、「サトウキビの1.3倍増産」と「バイオエタノール750kl生産」について、水及び窒素フローの観点から考察をする。

宮古島市はサトウキビ増産アクションプランとして、平成25年までにサトウキビの1.3倍の増産することを掲げている。サトウキビの水使用率が一定とした場合、サトウキビ生産には12,197万 m^3 の水が必要となる。しかし、宮古島では約59%が畑地として使用されているため、サトウキビの収穫面積を1.3倍にすることは厳しい状況にある。そのため降水による水投入は一定とすると、3,778万 m^3 の灌漑用水が必要となる。これは現行の灌漑用水の約4倍、地下ダムの有効貯水量の2.6倍に相当する用水量であり、サトウキビの増産にあたっては水資源が制約となる可能性が高い。そのため、地下ダムの有効貯水量の増加、もしくは節水型のサトウキビの生産技術の開発が必要と考えられる。窒素投入については、化学肥料の投入が1.3倍となることで、窒素の溶脱量が30%増加すると考えられ、窒素の溶脱を抑制しつつ、サトウキビの収量を1.3倍にする生産方法の開

発が必要となる。

一方、「バイオエタノール750kl生産」プランは、バイオエタノールを生産量を3倍にする施策となるため、製糖業の廃糖蜜の約半分がプラントへと投入される事となる。それに伴いバイオエタノールプラントから排出される廃水および窒素も増加し、それぞれ7,500 m^3 /年および39t-N/年となる。ここで本研究で対象とする農地還元を導入した場合、化学肥料の約5%を代替する事が可能となる。

以上のことから、水及び窒素循環の観点において、サトウキビ1.3倍とバイオエタノール750klの増産は実行可能な行動計画といえる。しかし、これらの施策を実施するにあたっては灌漑用水の確保が問題と考えられる。特にサトウキビの灌漑が始まる6月および降水量が落ち込む7月は、この問題が深刻となる事が予想される。また、化学肥料の投入量の増加により、窒素の溶脱の増加も予想され、それら抑制する農業手法の確立も有効と考えられる。

(5) 本研究の課題について

本研究では、バイオエタノールの生産に伴い発生する廃水の農地還元による地下水環境への影響（窒素循環）を研究の対象としたため、カーボンフットプリントについての評価を行っていない。しかしながら、サトウキビの製糖工場への搬入や、製糖工場、バイオエタノールプラント等で重油、軽油等の化石燃料をはじめとするエネルギー投入により CO_2 および N_2O 排出がなされており、そうした一連のサイクルの中で、地球温暖化に対する総合的な効果の評価が必要となる。加えて、本研究の窒素フローの結果から、有機物の多くは糖蜜を介さない形でのフローが大きい事が予想され、化石燃料起因の CO_2 の排出およびサトウキビでの炭素固定に起因するカーボンフローを合わせたマテリアルフロー分析が必要と考えられる。そのため、水・窒素・炭素循環による統合評価が今後の課題と考えている。

5. 結論

本研究では、温暖化対策技術の1つと位置づけられるバイオエタノールの生産時に排出される廃水の農地循環に着目し、宮古島市のバイオエタノール事業を対象として水及び窒素についてマテリアルフロー分析を行った。その結果、現在のバイオエタノールの事業から排出される廃水に含まれる窒素は、現行の化学肥料の2%程度、代替可能であるとの知見が得られた。一方で、性状の違いから、農地還元の結果、宮古島の硝酸態窒素の溶脱が増加する可能性があることから、サトウキビの生長期に集中的な投入を行うなどの、適切な管理計画の下での農

地還元が必要であるとの結論が得られた。さらに、水及び窒素循環の観点から、宮古島市環境モデル都市行動計画のサトウキビとバイオエタノール増産について考察を行った。その結果、これらの計画は実行可能と考えられるが、サトウキビの灌漑用水の確保の問題や、施肥管理の必要性が示された。

謝辞：本研究は科学技術総合研究委託事業「アジア科学技術協力の戦略的推進バイオマス持続利用への環境管理技術開発」および環境省環境研究総合推進費「里山・里地・里海の生態系サービスの評価と新たなコモンズによる自然共生社会の再構築（E-0302）」の成果の一部をとりまとめたものである。また、中西康博准教授（東京農業大学宮古亜熱帯農場）及び後藤浩行氏（宮古島市役所）のご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) Searchinger, T.; Heimlich, R.; Houghton, R.A.; Dong, F.; Elobeid, A.; Fabiosa, J.; Tokgoz, S.; Hayes D.; Yu, T-H; Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change, Science, Vol.319, pp1238-1240, 2008.
- 2) 社団法人アルコール協会編：図解バイオエタノール製造技術, pp168-198, 株式会社工業調査会, 2007.
- 3) 宮古土地改良区資料：「地下ダム使用水量」平成13年度～平成19年度
- 4) 宮古島市；統計みやこじま
- 5) 宮古支庁農林水産整備課：国営宮古地区土地改良事業概要書～新しい亜熱帯農業を目指して～, 平成19年3月
- 6) 通商産業省大臣官房調査統計部, アイ・エヌ情報センター：INDB工業統計表CD-ROM, アイ・エヌ情報センター
- 7) 宮古島市内の製糖工場へのヒアリング.
- 8) 通商産業省大臣官房調査統計部, アイ・エヌ情報センター：INDB工業統計表CD-ROM, アイ・エヌ情報センター
- 9) 株式会社りゅうせきヒアリング.
- 10) 化学肥料メーカーヒアリング.
- 11) 久馬一剛, 佐久間敏雄, 庄子貞雄, 鈴木皓, 服部勉, 三土正則, 和田光史：土壌の事典, p504, 株式会社朝倉書店, 1993.
- 12) 環境省水・大気環境局水環境課：平成18年度水質汚濁物質排出量総合調査（調査結果概要）, 2007.
- 13) 宮古支庁農林水産整備課：国営宮古地区土地改良事業概要書～新しい亜熱帯農業を目指して～, 平成19年3月
- 14) 宮古島市企画政策部, 宮古島市水道局：平成19年度宮古島地下水水質保全調査報告書, 2009.
- 15) 中西康博：沖縄県都島におけるサトウキビの施肥実態と地下水窒素濃度の関係, 日本土壤肥料科学雑誌, 72(4), pp499-504, 2001.
- 16) 宮古島市：宮古島市環境モデル都市行動計画平成21年3月, 2009.

A case study on land application of wastewater of bio-ethanol plants in Miyakojima in the aspect of flows of water and nitrogen

Tomohiro OKADERA, Masataka WATANABE, Kenji OKUSHIMA, Yuji INADA, Kazunori TANJI

This study has focused on land application of wastewater of bioethanol plant and conducted a feasibility analysis by drawing water and nitrogen flows among sugarcane fields, sugar factories, the bioethanol plant and groundwater in Miyakojima island. As the results, it's become clear that nitrogen in wastewater discharged by the bioethanol plant shares about 2% of chemical fertilizer input to sugarcane fields in Miyakojima island, and it's possible to apply wastewater of bio-ethanol plants to sugarcane fields. At the same time, a suitable fertilizing management is necessary for land application of wastewater from the bioethanol plant because it's assumed that it's easier for liquid fertilizer to leach nitrogen than chemical fertilizer.