

令和4年度畜産関係学術研究委託調査報告書

日本の主な畜産物の生産・流通・加工・消費過程における窒素フロー解析と  
窒素利用効率による持続可能性評価

令和5年3月

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構  
農業環境研究部門 土壌環境管理研究領域 土壌資源・管理グループ  
江口 定夫・平野 七恵・朝田 景

日本の主な畜産物の生産・流通・加工・消費過程における窒素フロー解析と  
窒素利用効率による持続可能性評価

江口 定夫・平野 七恵・朝田 景

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構  
農業環境研究部門 土壌環境管理研究領域 土壌資源・管理グループ

## 要約

本研究では、過去 40 年間（1975～2015 年）の日本の主な畜産物（鶏卵、鶏肉、豚肉、牛乳・乳製品、牛肉）毎の窒素（N）フローを、物流データに基づき算定すると共に、主な畜産物毎の N 利用効率（NUE）を指標とした持続可能性の評価を行い、生産・流通・加工・消費過程のどの段階で NUE が上昇・低下し、どこに更なる改善点があるか等を示した。また、みどりの食料システム戦略の目標「化学肥料削減 30%、有機農業面積 25%」や飼料自給率の施策目標「粗飼料 100%、濃厚飼料 15%」に沿ったシナリオ分析により、農業生産セクター全体からの N 負荷削減効果の評価すると共に、国際的な目標「N 廃棄の半減」に向けて消費者の取り組みが必要不可欠であることを提言した。

## 1. はじめに

様々な人間活動による地球上の窒素（N）循環の人為的攪乱は、「地球の限界（planetary boundary）」を大幅に超えたと報告されており（Rockström et al, 2009）、N 負荷の削減は、地球規模での喫緊の課題となっている。2019 年 3 月の第 4 回国連環境総会（4<sup>th</sup> session of the United Nations Environment Assembly [UNEA4]）では、「持続可能な N 管理」が決議された（United Nations Environment Program [UNEP], 2023）。同年 10 月には、国連加盟国による国際的な目標「2030 年までに N 廃棄（nitrogen waste）を半減」が宣言され（コロンボ宣言）、更に、2022 年 2 月に開催された第 5 回国連環境総会（UNEA5）では、「N 廃棄の顕著な減少」に関する決議が行われた。現在、国連環境計画（UNEP）の下、N 管理に関わる様々な国際的活動・条約等が連携するための条約間窒素調整メカニズム（INCOM, Interconvention Nitrogen Coordination Mechanism）の構築が検討されている（Sutton et al, 2021）。

人為的な N 負荷の大部分は、フードシステム（食料生産～消費システム）由来であり（Fowler et al, 2013; Galloway et al, 2014）、食料生産過程だけでなく、流通・加工・消費も含めたフードシステム全体の N フローを把握し、より窒素利用効率（nitrogen use efficiency, NUE）の高い食料生産～消費方式へと転換することが強く求められている。日本では、2021 年 5 月に「みどりの食料システム戦略（Strategy for Sustainable Food Systems, MeaDRI）」が策定され（農林水産省, 2023）、「2050 年までに化学肥料削減 30%、有機農業面積 25%」という高い数値目標が掲げられた。一方、「みどりの食料システム戦略（以下、みどり戦略）」によ

る N 負荷削減効果を定量的に示すためには、国内最大の有機物 N 供給源である畜産業全体の N フローや主な畜産物毎の N フローを把握し、NUE を指標とした定量的な評価を行う必要がある。なお、本研究では、NUE を次式で定義する。

$$NUE(\%) = 100 \times N_{out}/N_{in} \quad [1]$$

ここで、 $N_{in}$  は、対象とするシステム（単一のセクター・畜種、または、複数の連続したセクターが構成するシステム）に物流（飼料・材料等）として入る N 量、 $N_{out}$  は、対象システムから物流（食飼料用途の生産物）として出る N 量、である。

日本の畜産業の N フロー評価では、一般に、N 排泄量原単位（一頭羽・一日当たりの糞尿 N 排出量）を用いるが、日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2022 年版によれば、長年に渉る家畜の品種改良や給餌方法の改善等を反映して、主な畜種（採卵鶏、ブロイラー、豚、乳牛、肉牛）毎の N 排泄量原単位は大幅に改訂されている（温室効果ガスインベントリオフィス [GIO] ,2022）。特に、採卵鶏、ブロイラーでは、N 排泄量原単位の低下が著しい。しかし、これらの変化が主な畜産物（鶏卵、鶏肉、豚肉、牛乳、牛肉）の NUE 向上にどれだけ影響したかについては、定量的な解析が殆ど行われていない。また、家畜飼養期間中の N 排出は、糞尿だけではなく、飼料ロスや死廃体等も考慮する必要がある（平野ら, 2023）。したがって、環境（農地を含む）への N 排出量を求めるためには、N 排泄量原単位に基づく方法ではなく、畜産業セクターを介した物流の物質収支に基づく方法をとる必要がある。即ち、畜産業セクターから環境（農地を含む）への排出 N ( $N_{loss}$ ) は、当セクターに飼料として入った N ( $N_{in}$ ) と、当セクターから生産物（食飼料用途）として出た N ( $N_{out}$ ) の差に、当セクター内の在庫増減 N ( $\Delta N_{stock}$  : 増加で正の値をとる) を考慮して、次の物質収支式により算定できる。

$$N_{loss} = N_{in} - N_{out} - \Delta N_{stock} \quad [2]$$

即ち、様々な物流データでは把握できない N フローが、当セクターからの排出 N となる。

畜産物が消費者の口に入るまでには、流通・加工の過程で、屠畜体副産物、食品加工廃棄物、非可食部、食品ロス等により、多くの N が排出される一方、畜産副生物（内臓等）の食品利用や食品ロス由来のエコフィード等、N 排出削減に繋がるような N リサイクルもある。このような畜産業セクター及びそれを取り巻くフードシステム全体の複雑な N フローを、物流データに基づき評価すると共に、長期的な変遷も明らかにすることで、NUE 改善策を提示する必要がある。

「飼料をめぐる情勢」（農林水産省畜産局飼料課, 2021）では、日本の飼料自給率の数値目標を「2030 年に粗飼料 100%、濃厚飼料 15%」としているが、粗飼料自給率 100%を達成するには、特に粗飼料が不足する地域（例えば、南西諸島など）に注力する必要がある。これら熱帯島嶼では、飼料作用の農地面積は限られているが、例えば、製糖用サトウキビの食品加工廃棄物であるバガスを粗飼料として利用することで、島の農地面積を拡大することな

く、粗飼料自給率 100%と N 負荷削減の同時実現が期待できる。国際的な目標「N 廃棄を半減」の達成に向けては、地域レベルの N 循環・N 負荷発生の実態や改善策を検討しつつ、国全体の N フロー解析にも反映させる必要がある。更に、みどり戦略及び他の施策等を組み合わせたシナリオの下で、国レベルの農業生産セクター全体からの N 負荷削減効果を定量的に示すと共に、それでも「N 廃棄の半減」の達成が難しい場合には、食料生産側だけでなく食料消費側も含めて、更なる改善方策を提示する必要がある。即ち、食料生産・流通・加工・消費過程の全てを考慮した N フローの詳細な把握が必要である。

そこで、本研究では、過去 40 年間（1975~2015 年）を対象に、日本の主な畜産物（鶏卵、鶏肉、豚肉、牛乳、牛肉）毎の生産・流通・加工・消費過程の N フローの長期変遷を、国レベルの物流データ（食料需給表、畜産物流通統計、飼料月報、貿易統計、等々）に基づき明らかにする。国産または輸入による粗飼料 N 及び濃厚飼料 N を主な畜種毎に分配し、主な畜産物・畜種毎の NUE を算出することで、NUE を指標とした持続可能性の評価を行うことを主な目的とする。この 40 年間、日本の主な畜産物の生産・流通・加工・消費過程のどの段階で NUE が向上したかを示すと共に、どこに更なる改善点があるか等を検討する。更に、みどり戦略の数値目標「化学肥料削減 30%、有機農業面積 25%」や飼料自給率の施策目標「粗飼料 100%、濃厚飼料 15%」から成る N 負荷削減シナリオの下で、日本の農業生産セクターからの N 負荷削減効果を定量的に示し、より持続可能な畜産業を推進するための具体的方策について提言を行う。

## 2. 調査研究の実施方法

### (1) 日本の畜産物毎の N フローに関わる文献調査

日本の畜産物毎の N フロー（生産～消費過程）に関わる既往知見について、情報収集すると共に、N フローの詳細な把握や N 負荷削減対策を検討する上で必要となる手法や情報等について整理した。

### (2) 主な畜産物毎の N フローの実態把握と NUE の算定

過去 40 年間（1975~2015 年）を対象に、日本の主な畜種毎及び畜産物毎の生産・流通・加工・消費に関わる国レベルの統計データ（食料需給表、畜産物流通統計、飼料月報、貿易統計、等々）や関連する文献データを収集し、物流データとして整理すると共に、品目毎の N 含量を乗じて、年毎の N フローに換算した。国レベルの畜産業セクター及びそれを取り巻く食飼料供給システム全体を通じた N フロー解析の詳細は、平野ら（2023）の方法に準じて実施した。

主な畜種別（採卵鶏、ブロイラー、豚、乳牛、肉牛）の輸入飼料 N 及び国産飼料 N の分配は、主に飼料月報を利用した。食品ロス N 由来のエコフィードの分配についても、飼料月報に準じて推定した。主な畜産物（鶏卵、鶏肉、豚肉、牛乳・乳製品、牛肉）別の N フローを算定すると共に、異なる物流段階別の NUE を算定した。即ち、家畜飼養期間中の NUE

は、畜肉については、飼料 N に対する屠畜体 N の比（屠畜体 NUE）、鶏卵と牛乳・乳製品については、飼料 N に対するこれらの国内生産 N の比（国内生産 NUE）として計算した。また、これらの生産物を出荷した後の流通・加工過程（畜肉の場合は、屠畜体→国内生産→供給粗食料 [枝肉] →供給純食料 [精肉＝可食部のみ]；鶏卵と牛乳・乳製品の場合は、国内生産→供給粗食料→供給純食料）の NUE については、屠畜体 N または国内生産 N に対する供給純食料 N の比として計算した。

屠畜体副産物のうち、食料（内臓等の畜産副生物）としてのリサイクル（飼料・肥料としての利用は downcycle、食料としての利用は upcycle）や、食品ロスのうち、エコフィードとしての利用（downcycle）が、N 負荷低減に及ぼす影響を、定量的に評価した。

### (3) 南西諸島（石垣島）におけるサトウキビの N フロー解析

南西諸島における粗飼料としての利用が期待されるバガス（製糖用サトウキビの食品加工廃棄物）の現在の利用実態（燃料、堆肥、飼料等）について、石垣島のフードシステムにおける N フローに詳しい国際農研・濱田研究員（本事業の研究協力者）の協力の下、様々な統計データ・文献データ等、定量的な情報を収集した。また、石垣島のサトウキビ栽培～製糖過程の現地視察及び現地関係者との意見交換等を行い、サトウキビ栽培～食品利用（島外への輸出）に関わる N フローを把握・算定した。更に、南西諸島における今後の粗飼料としての利用拡大可能性等について検討した。これら現地で得られた情報を活用し、国レベルでのサトウキビの N フローを算定すると共に、島レベルでの N 負荷削減策の検討を行った。

### (4) 農業生産セクターからの N 負荷削減シナリオの検討

国レベルの N フロー解析結果に基づき、過去 40 年間ににおける主な畜産物別・物流段階別の NUE の向上（低下）要因を検討した。また、みどりの食料システム戦略の目標「化学肥料削減 30%、有機農業面積 25%」や飼料自給率の施策目標「粗飼料 100%、濃厚飼料 15%」の達成を想定し、日本の農業生産セクターからの N 負荷をどれだけ削減できるのか、またそれは、コロンボ宣言による国際的な目標「N 廃棄を半減」をクリアできるのかどうかについて、検討した。更に、これをクリアできない場合には、他の有効と考えられる具体的な対策（生産現場だけでなく流通・加工・消費段階における取り組みを含む）の提示と、その効果の定量的な評価を試みた。

## 3. 日本の主な畜産物毎の窒素フローに関する既往知見の整理

日本の主な畜産物毎の N フローについては、これまで、N フットプリント研究による知見がある（Shibata et al, 2014; Mori et al, 2020）。但し、これらの報告値は、他の文献値の引用や畜産統計・畜産物生産費統計等に基づく推計値となっており、N フロー算定の面では不確実性が大きい（例えば、配合飼料中の N 濃度が不明、飼料ロスが考慮されていない等）。ま

た、長期的な経年変化は調査されていない。日本の畜産業について、物流の実態を反映した N フローと NUE の長期変遷の知見は殆どなく、物流データ（食料需給表、畜産物流通統計、飼料月報、貿易統計、等々）に基づく解析を新たに行う必要がある。

日本の食飼料供給システム全体としての N フローについては、物流データに基づく一連の研究（岩本・三輪, 1985; 三輪・岩本, 1988; 袴田, 1996; 1998; 織田, 2006; 2007; 松本ら, 2017）がある。これらの研究では、畜産業からの全排出 N も算定されている。しかし、全排出 N の内訳や畜産物別の N フローは把握できていない。これに対して、平野ら（2023）は、物流データに基づく畜産からの排出 N の内訳を、初めて畜種（畜産物）別・物流段階別に明らかにすると共に、家畜飼養過程からの N ロスには、飼料ロス N や死廃体 N が含まれることを示した。一方、これらの物流データ解析では、食料需給表を柱としており、糖料作物（サトウキビ、ビート）に関わる N フロー解析が不十分となっている。このほかの研究としては、約半世紀の日本の食飼料供給システム全体の N フローを推計した研究（Shindo et al, 2009）もあるが、糞尿 N 量は畜種毎の N 排泄量原単位（経年変化なし）に基づくため、畜種毎の飼養期間中の NUE 向上（低下）効果等を反映することが出来ていない。

国レベルの家畜糞尿 N 量を推定した文献（原田・築城, 1993; 西尾, 2003; 寶示戸ら, 2003; 神山ら, 2006; 生雲ら, 2007; 三島ら, 2008; Mishima et al, 2009; 2012; 2017）は多いが、N 排泄量原単位を設定する際の給餌量の仮定が大きく異なること等が主因となり、各文献値間のバラつきが非常に大きい。そのため、これらの文献値から経年変化や実態を知ることは出来ない（平野ら, 2023）。公的機関では、経済協力開発機構（OECD）の OECD.Stat（OECD, 2023）及び GIO（2022）による日本国 GHG インベントリ報告書が、1990 年以降の年毎の糞尿 N 量を報告している。両者の値は、以前はどちらも同等の N 排泄量原単位（一定値）を使用していたため、2016 年版の日本国 GHG インベントリ報告書までは OECD.Stat とほぼ一致していた。しかしその後、日本国 GHG インベントリ報告書では、主な畜種毎の糞尿 N 計算式についての見直しが進められ、その結果、日本国 GHG インベントリ報告書の最新版（GIO, 2022）では、糞尿 N が OECD の 8 割以下にまで減少している（平野ら, 2023）。一方、OECD.Stat では、長年、同じ N 排泄量原単位を使用しているため、精緻化が行われた日本国 GHG インベントリ報告書の方が、信頼性が高いと考えられる。

家畜糞尿 N 量が、2016 年版以前の日本国 GHG インベントリ報告書より大幅に低下した主な要因は、品種改良や給餌方法の改善等を反映させた計算式を導入したことにより、特に鶏（採卵鶏、ブロイラー）の N 排泄量原単位（経年変化する）が大幅に低下したことにある。また、乳牛では、N 排泄量原単位が経年的にやや上昇した一方、一頭当りの生乳生産量は格段に向上しているため、生産システムという観点で牛乳・乳製品の NUE がどう変化したかについては、家畜の N 排泄量原単位だけでは評価できない。したがって、物流データに基づき N フローを解析し、飼料 N に対する生産物 N の比である NUE を指標として、生産システムとしての畜産業の NUE を評価する必要がある。

畜産業が盛んな地域を対象とした地域レベルの N フロー解析については、これまで多く

の研究事例があるが、対象地域内または近隣地域において粗飼料生産が盛んな場合（大村, 1994; 竹中・秦, 2002; 平賀, 2004; 白波瀬・小林, 2009）や、粗飼料を要する牛よりも豚・鶏が主体の場合（松本ら, 1992a; 1992b）が多く、自給粗飼料が不足する地域の N フローの知見（田代・高平, 2001）は乏しい。南西諸島のうち、石垣島等では肉牛（子牛）生産が盛んだが、島の面積は限られ、台風・干ばつ等の影響も大きい。南西諸島は、国内でも特に粗飼料不足が起き易い地域とされており、島によっては輸入粗飼料への依存度も高い。現在、輸入粗飼料及び濃厚飼料の高騰により、島の畜産業は大きな影響を受けている。南西諸島については、飼料用サトウキビの開発・利用（服部・境垣内, 2015; 服部ら, 2015）だけでなく、新たな農地面積を要しない粗飼料供給源として、製糖用サトウキビのバガスの利用（岡田・塩原, 2004）が有効と考えられている。これまで、バガスの大部分は製糖工場のボイラー用燃料とされている（守川, 2000）が、近年はボイラー性能が向上しつつあるため、バガスの利用実態が大きく変化していく可能性がある。バガスの粗飼料としての利用に加えて、サトウキビ栽培への牛糞堆肥等の有機物還元など、島嶼環境における粗飼料自給率向上と N 負荷削減を同時に進める方策を検討する必要がある。

以上のように、国レベルの畜産物毎の N フロー及び NUE の実態については知見が乏しく、糞尿 N については、N 排泄量原単位に基づく文献値間のバラつきが大き過ぎて実態が把握できない。物流データに基づく N フロー解析では、糞尿 N だけでなく、畜産物毎の異なる物流段階における N ロスが初めて算定されたが、糖料作物の N フロー解析が不十分となっている。また、GIO (2022) の糞尿 N だけを見る方法では、生産システムとしての畜産業及び畜産物の NUE を評価することが出来ない。南西諸島については、粗飼料自給率向上に向けて飼料用サトウキビの開発・利用が進められているが、N フローの実態やバガス利用等による N 負荷削減効果についての知見が乏しい。

#### 4. 日本の畜産業セクターとそれを取り巻く食飼料供給システム全体の窒素フロー

日本の畜産業セクター及びそれを取り巻く食飼料システム全体の物流過程について、図 1 に示す概要図を基に、物流データの解析と N フロー解析を行った。

その結果（図 2）、過去 40 年間（1975、1990、2005 及び 2015 年の 4 か年）の N フローを見ると、1975～1990 年の 15 年間は全体的に大きく増加し、特に輸入食飼料 N は約 1.7 倍に増大した（654.0→1092.6 Gg-N/yr）。1990 年は、輸入食飼料 N、国内生産食飼料 N 及び環境（農地を含む）への排出 N が、何れも最大となった。その後、1990～2015 年の 25 年間、国内生産食飼料 N は大きく減少し（643.0→417.6 Gg-N/yr）、他の大部分の N フローも減少したが、輸入飼料 N、輸入畜産物 N、畜産業セクターから食生活セクターへの供給純食料 N については、この 40 年間、増加し続けた（それぞれ、30.2→184.5、26.2→101.2 及び 101.2→169.5 Gg-N/yr）。

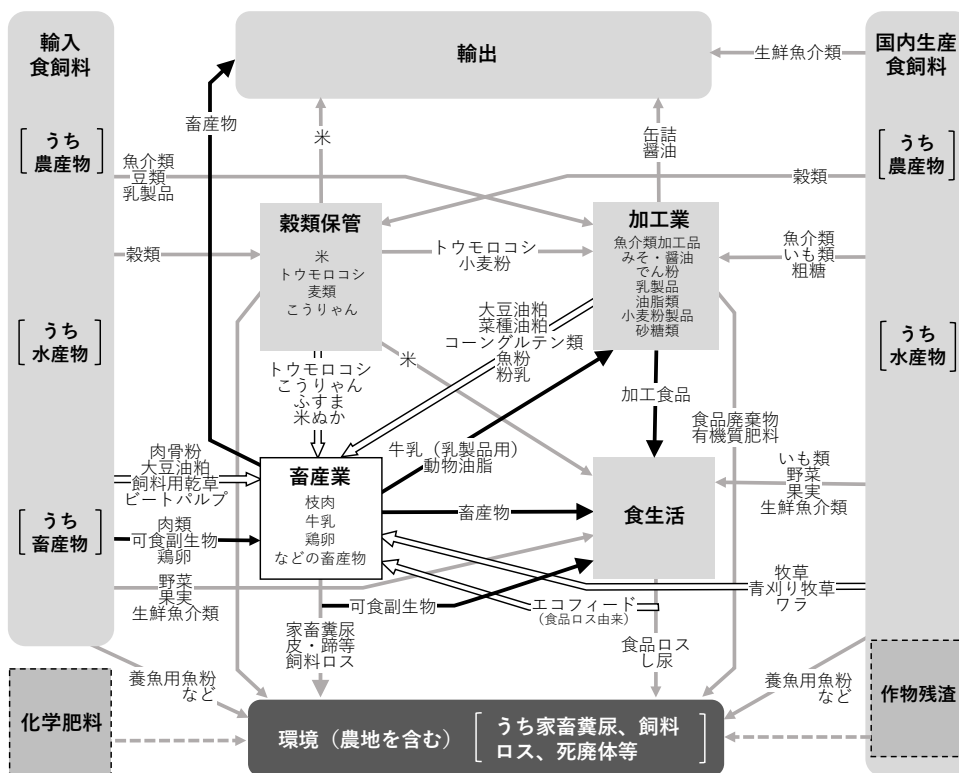


図 1 日本の畜産業セクター及びそれを取り巻く日本の食飼料供給システム全体の物流過程を構成する主なセクターと主な品目の概要（平野ら [2023] を一部改変）  
 各ボックス内の [生産物名] は、そのボックス内に含まれる生産物名を示すが、[うち家畜糞尿、飼料ロス、死廃体等] については、環境（農地を含む）への排出物名を示す。矢印は物流を表し、特に畜産業セクターに入る飼料を白色、同セクターから出る物流を黒色で示す。点線（化学肥料と作物残渣）のボックスは、食飼料供給システム外（農地内）における投入や生産物を示す。

畜産業セクターから環境（農地を含む）への排出 N 量についても、1990 年が最大であり（825.8 Gg-N/yr）、2015 年にはその 83%まで減少した。1990～2015 年の 25 年間、畜産業セクターからの排出 N は、他のどのセクターからの排出 N よりも大きな値を示し、環境（農地を含む）へ排出される全 N 量（1440.6～1717.7 Gg-N/yr）の 48%を占めていた。家畜飼養期間中に排出される N 量（家畜糞尿、飼料ロス、死廃体等に含まれる N）は、1975～1990 年には、畜産業セクターからの排出 N の 92%～93%（508.9～767.1 Gg-N/yr）を占めていたが、2005～2015 年には、同 88%～89%（605.2～672.5 Gg-N/yr）に低下していた。このことは、生産物出荷後の流通・加工過程からの排出 N が、相対的に増大したことを示している。

畜産業セクターから排出される N フローの途中から食生活セクターへ向かう国産の可食副生物（内臓等）N 量は、4.5～7.3 Gg-N/yr であった。これらの値は、畜産業セクターから排出される糞尿等 N（飼料ロス、死廃体等 N を含む）以外の排出 N（42.4～94.2 Gg-N/yr）の 7%～12%に相当していた。即ち、可食副生物を食用として upcycle することで、畜産物の流通・加工過程からの排出 N を 6%～11%削減する効果があった。



食生活セクターの人体に含まれる N 量は、この 40 年間、増大し続けた (137.7→182.9 Gg-N)。一方、当セクターからの排出 N 量は、1990 年が最大 (665.1 Gg-N/yr) であり、2015 年にはその 85%まで減少していた。1990 年以降の 25 年間、当セクターからの排出 N 量は、畜産業セクターからの排出 N 量の次に大きい値を示しており、環境 (農地を含む) への全排出 N 量の 39%~42%を占めていた。

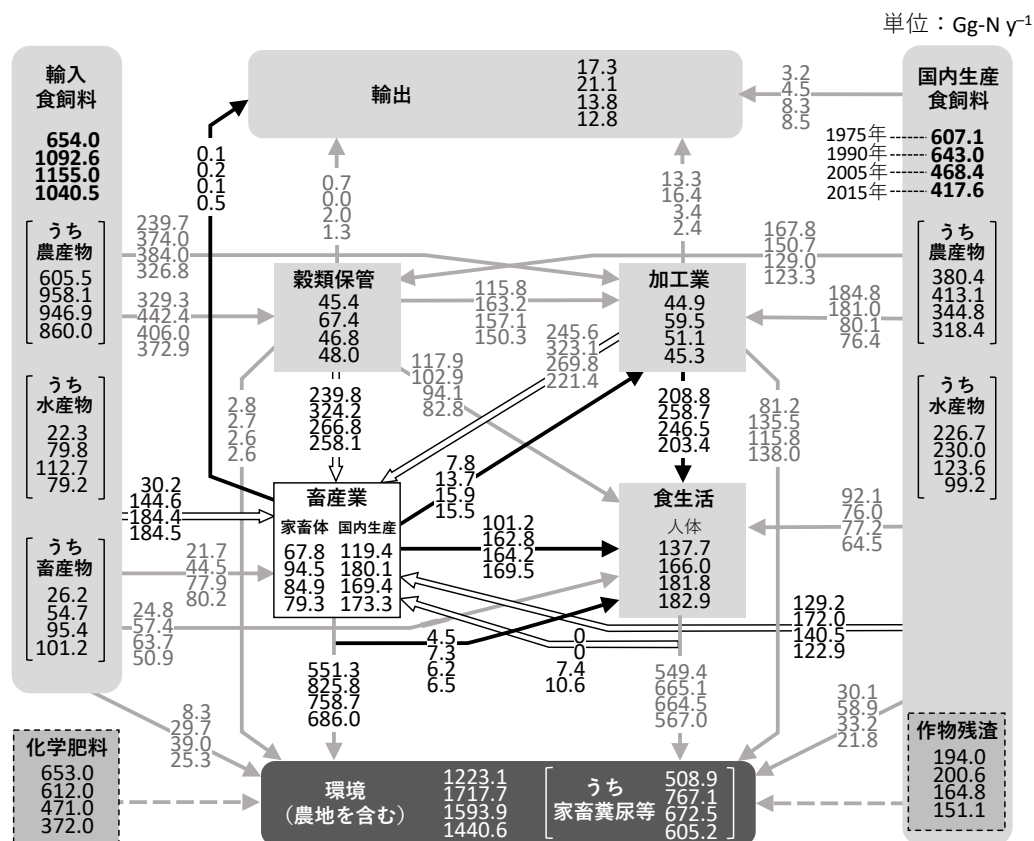


図2 日本の畜産業セクター及びそれを取り巻く日本の食飼料供給システム全体の窒素(N)フローの長期変遷 (1975~2015年)

各ボックス内の [数値] は、そのボックス内に含まれる生産物 N の内数を示す。環境 (農地を含む) の中の [うち家畜糞尿等] は、糞尿が大部分だが、飼養期間中 (出荷前) の飼料ロス・死廃体等を含む。点線 (化学肥料 N と作物残渣 N) のボックスは、食飼料供給システム外 (農地内) における投入 N や生産物 N を示す。

江口・平野 (2019) によれば、日本の食生活セクターでは、1970 年代後半から、食品ロスによる排出 N が顕著に発生し (図 3)、2015 年には供給純食料 N の約 11%が食品ロスとなっている。一方、本研究では、2005→2015 年における食品ロス由来エコフィード N は、7.4→10.6 Gg-N/yr と増大しており (図 2)、図 3 に示す食品ロス N を 7.7%~16.5%削減する効果があったと言える。また、日本の食生活セクターでは、日本人の食事摂取基準によるタ

ンパク質摂取量（推奨値）から考えると、食べ過ぎが顕著に発生しており（図3）、2015年には、供給純食料Nの約22%が食べ過ぎとなっている。即ち、2015年の食生活セクターでは、供給純食料Nの約33%が食品ロス・食べ過ぎとなっており、食料消費側の対策として、これらを削減することが、食料生産～消費過程全体からのN排出削減に効果的である。

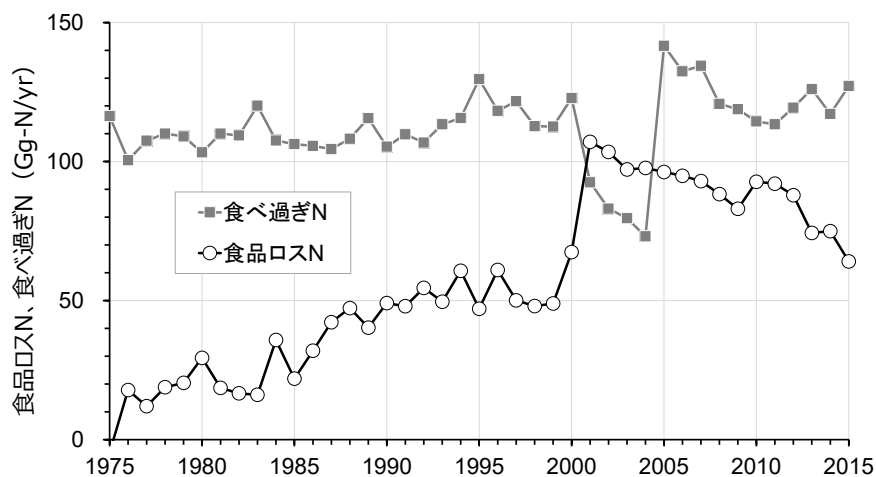


図3 日本の食生活セクターにおいて発生する食品ロス及び食べ過ぎに含まれる窒素（N）量の長期変遷（1975～2015年）（江口・平野 [2019] より作成）

図2のうち、加工業セクターからの排出N（有機質肥料等を含む）は、2015年に最大値（138.0 Gg-N/yr）を示した唯一の排出Nフローである。この排出Nフローが、環境（農地を含む）への全排出Nに占める割合についても、2015年の値（9.6%）が、この40年間で最大となった。前述のように、畜産業セクターにおいても流通・加工過程からの排出Nの割合が増加しており、これらを飼料または食料として有効活用（リサイクル）し、環境（農地を含む）への排出Nにしないことが、日本の食料供給システム全体のNUE向上に有効と考えられる。

1990～2015年の25年間、家畜飼養期間中に排出されるN量（家畜糞尿、飼料ロス、死廃体等に含まれるN）は、減少し続けた（767.1→605.2 Gg-N/yr）（図2）。その値は、OECD.Statの家畜糞尿Nより、32～80 Gg-N/yr小さかった（図4）。一方、日本国GHGインベントリ報告書の最新版（GIO, 2022）の家畜糞尿Nからは、79～98 Gg-N/yr大きく、およそ並行して推移した（図4）。本研究とGIO（2022）の差は、飼養期間中の飼料ロス・死廃体等による排出Nに相当し、飼料ロスNが大部分を占めると考えられる。2015年の死廃体N量は、計7.7 Gg-N/yr（主な畜種別では、採卵鶏、ブロイラー、豚、乳牛及び肉牛の順に、それぞれ、1.1、2.1、2.2、1.6及び0.8 Gg-N/yr）と見積もられており（平野ら, 2023）、全体（98 Gg-N/yr）の7.9%を占める。したがって、2015年の飼料ロスNは90 Gg-N/yrと見積もられ、同年の食品ロスN（64 Gg-N/yr）（図3）の1.4倍に相当する。

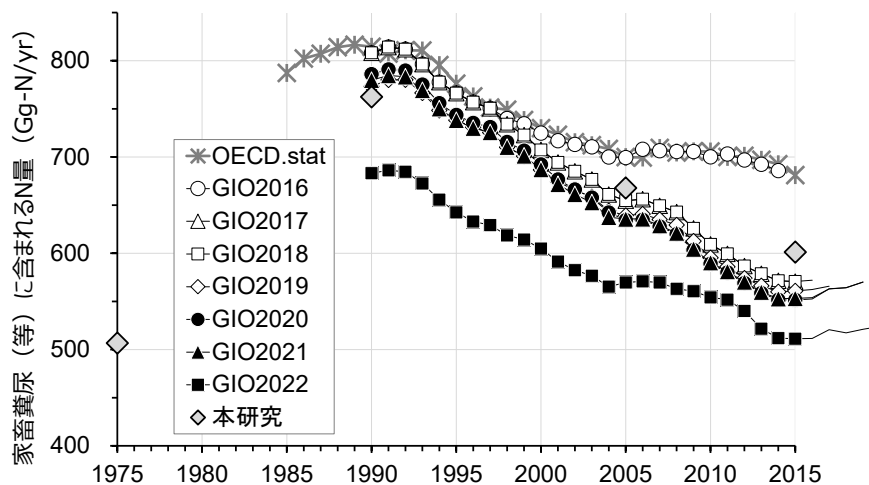


図4 公的機関(経済協力開発機構[OECD]及び温室効果ガスインベントリオフィス[GIO])による日本の家畜糞尿窒素(N)量の長期変遷(1990~2015年)と本研究による家畜糞尿等N量(飼料ロス・死廃体等による排出N量を含む)の算定値(1975、1990、2005及び2015年)の比較

#### 5. 主な畜産物毎の生産・流通・加工・消費過程における窒素フロー

図5は、畜産業セクターに入った飼料Nが、生産・流通・加工を経て、食生活セクターで消費される供給純食料NになるまでのNフロー(2015年の例)を、主な畜種別に示したものである。主な畜種(採卵鶏、ブロイラー、豚、乳牛及び肉牛)への飼料Nは、それぞれ、176.9、118.0、156.8、192.7及び172.8Gg-N/yrであり、うち24.0%、24.6%、15.6%、17.5%及び4.5%が、供給純食料Nとして食生活セクターに供給されていた。供給純食料Nは、採卵鶏(鶏卵+肉)が最も大きく、肉牛が最も小さかった。

全ての畜肉の供給純食料N(64.4Gg-N/yr)のうち、可食副生物Nが占める割合は、10.1%であった(図5)。即ち、可食副生物を食用としてupcycleすることは、畜肉のNUEを約10%上昇させる効果があった。畜産物毎に見ると、可食副生物Nが占める割合は、豚肉(14.3%)>牛肉(10.7%)>鶏肉(6.5%)の順に高かった。

畜種毎の排出N量は、どの畜種においても、飼養期間中(飼料Nから、屠畜体N、鶏卵Nまたは牛乳Nが生産されるまでの過程)の糞尿等N(飼料ロス・死廃体等を含む)が最も大きかった。畜種毎の全排出Nに占める糞尿等Nの割合は、ブロイラーで最も小さく(64.9%)、乳牛で最も大きかった(98.4%)。一方、排出Nが二番目に大きい過程は、畜種によって異なっており、採卵鶏と豚は、供給粗食料→供給純食料の過程(非可食部N)、ブロイラー、乳牛及び肉牛は、屠畜体→国内生産の過程(屠畜体副産物N)だった。

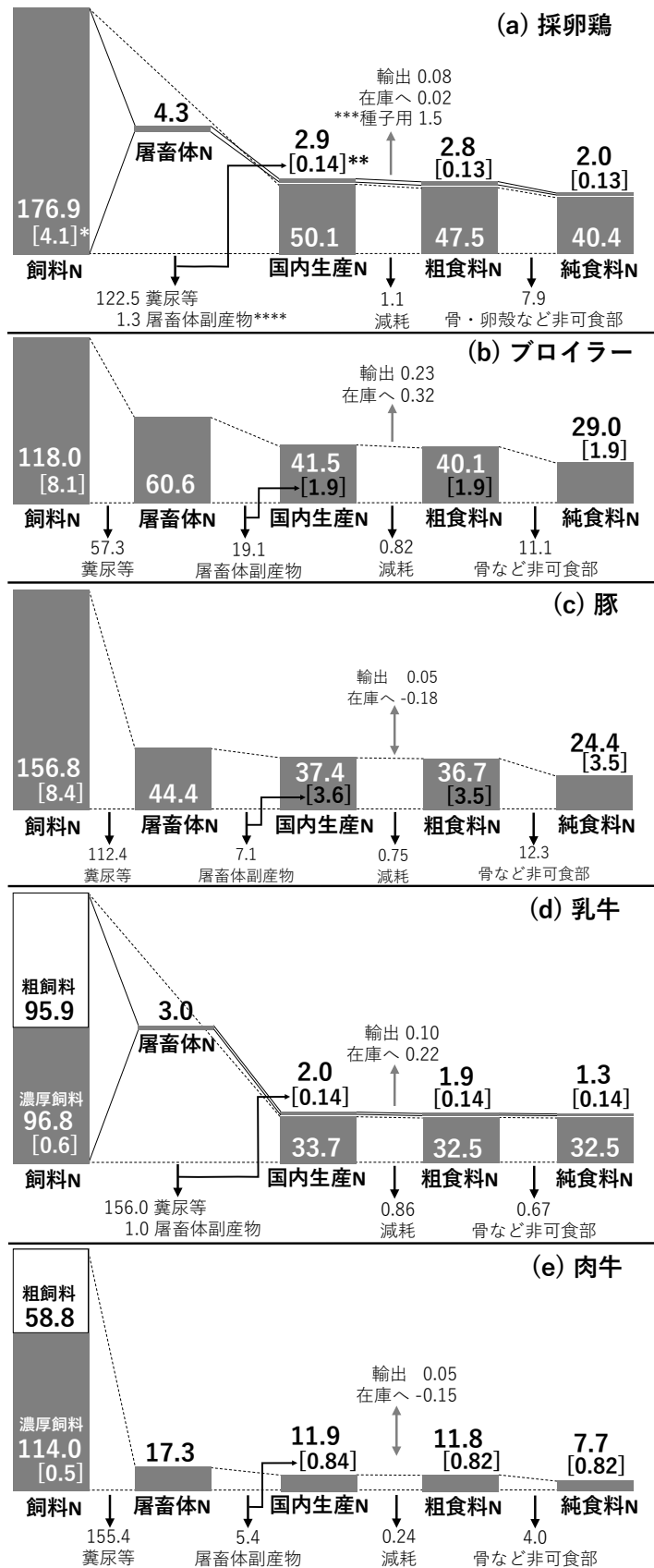
図 5 2015 年における日本の  
 主な畜種毎の窒素 (N) フロー  
 (単位 : Gg-N/yr) : (a) 採卵鶏  
 (鶏卵+鶏肉)、(b) ブロイラー  
 (c) 豚、(d) 乳牛 (牛乳・乳  
 製品と牛肉)、(e) 肉牛

\* 飼料 N のボックス内の [数値] は、  
 内数であり、国産リサイクル飼料  
 (肉骨粉、フェザーミール及び様々  
 な食品ロス由来のエコフィード) の  
 N を表す。但し、肉骨粉とフェザー  
 ミールが給与されるのは(a)、(b)及び  
 (c)のみ。

\*\* 国内生産 N、粗食料 N 及び純食  
 料 N のボックス上またはボックス  
 内の [数値] は、内数であり、可食  
 副生物 N を表す。

\*\*\* 孵化の目的で使用された卵 (受  
 受精卵) の N を表す。

\*\*\*\* 屠畜体副産物は、屠畜体のう  
 ち枝肉にならなかった部分 (蹄や皮  
 等)。



## 6. 石垣島におけるサトウキビの窒素フロー

石垣市及び沖縄県の統計データ、関連する文献データ、石垣島製糖株式会社及び現地関係者との情報交換等に基づき、石垣島の製糖用サトウキビの生産・加工・流通過程における N フローの概要図を作成した (図 6)。製糖工場からの主な食品加工廃棄物としては、バガスとフィルターケーキがあり、バガスの大部分は工場の燃料として使用され、バガス N は主に窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) として環境に排出されていた (排出規制を遵守)。一方、フィルターケーキは全て、サトウキビ畑土壌等への有機質肥料として還元されていた。また、最大の排出 N フローは、畑土壌からの N 溶脱等による作物吸収ロスであった。したがって、サトウキビの NUE 向上のためには、作物栽培過程における N 溶脱の削減と製糖過程における NO<sub>x</sub> 排出の削減 (バガスを粗飼料や有機質肥料としてリサイクルする等) が、最も効果的と考えられる。

粗飼料としてのバガスの利用可能性については、石垣島では、他の南西諸島に比べて、牧草地が広く分布し、粗飼料自給率は 100%に近いとの情報が得られた。一方、徳之島のように、肉牛生産が盛んで粗飼料不足の島では、飼料用サトウキビやバガスが粗飼料として利用されている (神谷, 2014)。したがって、島の状況に応じて、粗飼料としてのバガス利用や、濃厚飼料としての糖蜜利用等について、検討する必要がある。

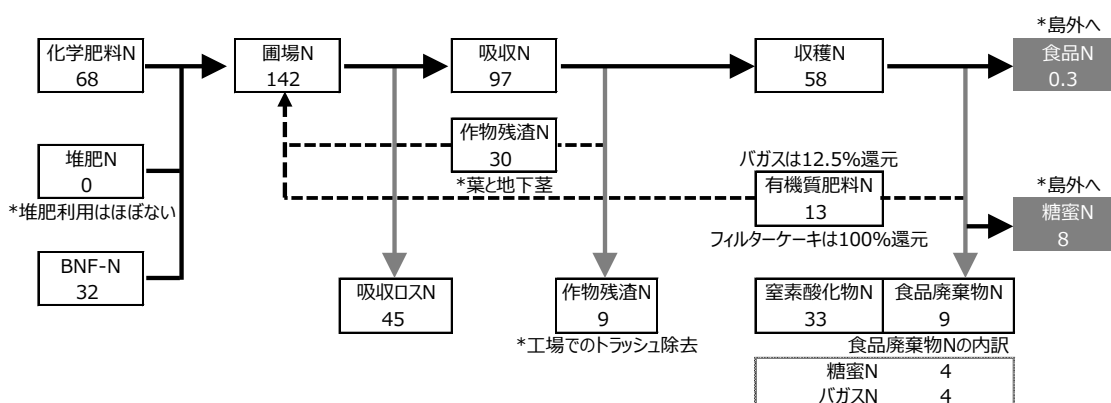


図 6 石垣島のサトウキビ生産・加工・流通過程における窒素 (N) フローの概要

各ボックス内の数値は、農地への新しい N 投入量 (化学肥料 N + 生物学的窒素固定 [BNF] N) を 100 としたときの相対値。

## 7. 窒素利用効率を指標とした持続可能性の評価

図 7 は、主な畜産物毎に、家畜飼養過程 (飼料の給与から、国内生産または屠畜体まで) と流通・加工過程 (生産物の出荷から、供給純食料 [可食部のみ] まで) の NUE の長期変遷を示したものである。流通・加工過程の NUE は、一般に、家畜飼養過程の NUE (国内生産 NUE、屠畜体 NUE) より高かったが、2015 年の鶏肉だけは、前者の方が後者よりも僅かに小さい値を示した (図 7b)。また、家畜飼養過程の NUE は、牛肉を除き、長期的に上昇

する傾向を示したが、流通・加工過程の NUE は、牛肉を除き、長期的に低下する傾向を示した。したがって、家畜飼養期間中の糞尿等（飼料ロス・死廃体を含む）の削減を更に進めること、また、特に畜肉の流通・加工過程での N 排出を削減すること（歩留まりの向上）が、畜産物 NUE の更なる向上のために必要と考えられる。

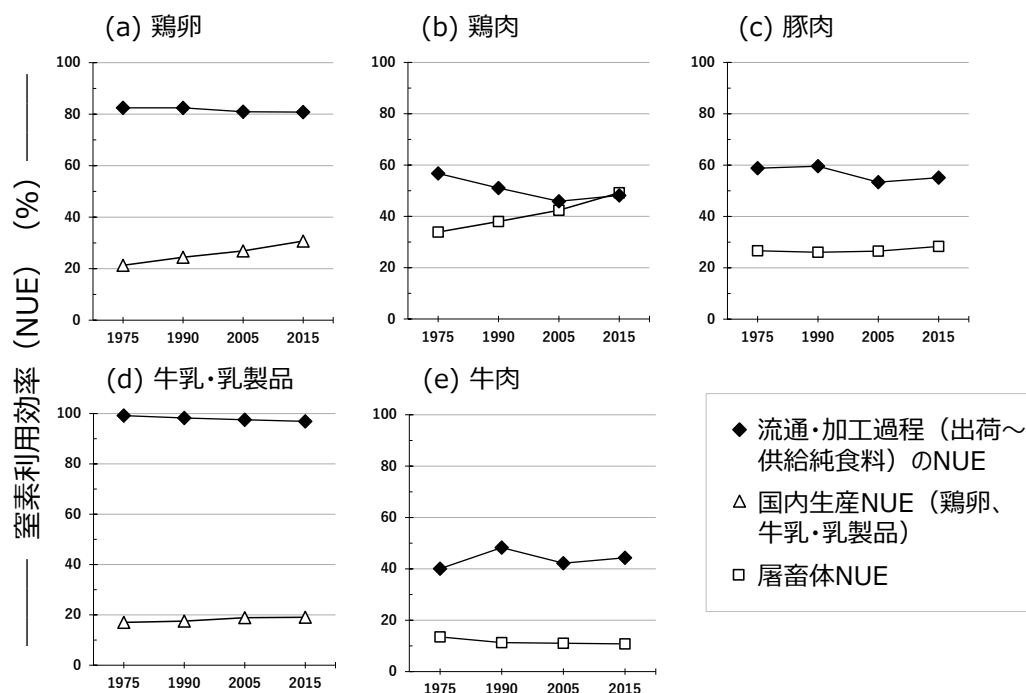


図7 主な畜産物毎の家畜飼養過程（飼料の給与から、国内生産または屠畜体まで）及び流通・加工過程（出荷から、供給純食料 [可食部のみ] まで）における窒素利用効率（NUE）の長期変遷：(a) 鶏卵、(b) 鶏肉（ブロイラー＋採卵鶏の肉）、(c) 豚肉、(d) 牛乳・乳製品、(e) 牛肉（肉牛＋乳牛の肉）

牛肉については、歩留等級が A（産肉性が標準より上）に格付けされる牛肉の割合が、過去 40 年間で顕著に増大しており（27.3%→44.2%）（日本食肉格付協会, 2022）、流通・加工過程の NUE 上昇（図 7e）に繋がっていたと考えられる。一方、肉質等級が 4～5 級（高品質）の牛肉の割合も同期間に顕著に増大しており（24.1%→35.8%）、肉質を向上させるための飼養期間後半の肥育期間の増大（畜産物生産費調査より、乳用種雄：11.2→14.2 か月、和牛：17.5→19.8 か月）が、屠畜体 NUE 低下（図 7e）の一因と考えられる。また、牛の屠畜体の丸ごと廃棄率及び一部廃棄率は、長期的に上昇しており（2001～2015 年：0.63%→0.84%及び 54.7%→65.5%）（厚生労働省, 2022）、疾病による内臓の廃棄等が、屠畜体 NUE の低下に繋がったと考えられる。肉牛では、消費者ニーズに合わせて肉質等級を向上させるための濃厚飼料の多給等による生産病の多発が問題となっており、動物としての家畜への大きな負担が、飼養期間中の NUE 低下に繋がったと考えられる。より動物福祉に重視した飼養方法

を選択することで、より NUE の高い牛肉生産が可能になると考えられる。

図 8 は、主な畜種毎に、家畜飼養過程（飼料の給与から、国内生産または屠畜体まで）の NUE と流通・加工過程（生産物の出荷から、供給純食料 [可食部のみ] まで）の NUE の長期変遷を示したものである。これらのうち、特に NUE 向上が顕著だったのは、採卵鶏とブロイラーの家畜飼養過程の NUE である。これらの畜種は、主に育種改良により、飼料要求率（生産物重量当りの飼料消費重量）がこの 40 年間で大幅に低下した（採卵鶏：2.95→1.95、ブロイラー：2.70→1.81）（井土, 2010; 農林水産省生産局畜産部畜産振興課, 2019）。これが、鶏卵の国内生産 NUE 及び鶏肉の屠畜体 NUE を大幅に向上させ（図 7a; 7b）、鶏の N 排泄量原単位の低減（1990 年以後の 25 年間で 74%~94%に低下）（GIO, 2022）に繋がった。

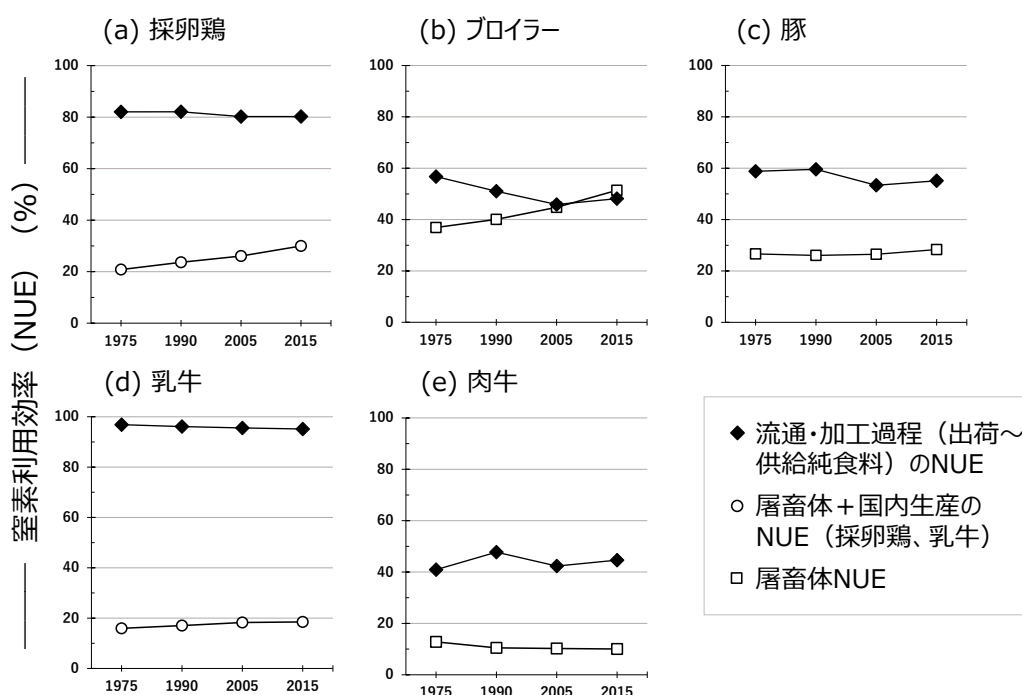


図 8 主な畜種毎の家畜飼養過程（飼料の給与から、国内生産または屠畜体まで）及び流通・加工過程（出荷から、供給純食料 [可食部のみ] まで）における窒素利用効率 (NUE) の長期変遷：(a) 採卵鶏（鶏卵+鶏肉）、(b) ブロイラー（鶏肉）、(c) 豚（豚肉）、(d) 乳牛（牛乳・乳製品+牛肉）、(e) 肉牛（牛肉）

## 8. 日本の農業生産セクター全体からの窒素負荷削減シナリオ

日本の畜産業セクター及びそれを取り巻く食飼料供給システム全体の N フロー (2015 年) (図 2) に基づき、日本の農業生産セクター全体からの「N 廃棄を半減」(コロンボ宣言による国際的な目標) するために必要な施策や取り組み等を検討した (図 9)。その結果、日本の農業生産セクター全体からの「N 廃棄を半減」するためには、食料生産側の対策だけでは実現困難であり、食料消費側の対策 (食品ロス・食べ過ぎの半減) との連携 (耕畜食連携)

が必要であることが示された。即ち、みどり戦略に従って有機農業面積を 25%まで拡大すると共に、残りの農地面積 75%における慣行農業で化学肥料Nを大幅に削減したとしても、「N 廃棄の半減」は達成できない（図 a：シナリオ (a)）。また、シナリオ (a)に加えて、畜産局飼料課（2021）による飼料自給率向上の数値目標（粗飼料自給率 100%、濃厚飼料自給率 15%）に沿って、国産の粗飼料作物及び濃厚飼料作物を増産し、化学肥料 N を 100%削減したとしても、「N 廃棄の半減」は達成できない（図 b：シナリオ (b)）。これに対して、シナリオ (b)に加えて、日本の消費者による食品ロス N（供給純食料の 11%）及び食べ過ぎ N（同 22%）を半減させると共に、日本の農業全体での化学肥料 N を約 80%削減させると、ようやく、「N 廃棄の半減」を達成できる（図 c：シナリオ (c)）。

以上の結果は、日本の農業生産セクターからの「N 廃棄の半減」を達成する上で、生産者だけでなく、消費者の役割が非常に大きいことを明示している。また、消費者ニーズは、畜産物の生産量だけでなく品質（例えば、牛肉の肉質等級）にも影響を及ぼし、そのことが、家畜飼養過程の NUE の低下に繋がる場合もある（図 7e）。消費者ニーズ（市場ニーズ）は、食料生産～消費過程の物質フローを動かす最大の駆動力であり、食料生産側における耕畜連携だけでなく、食料消費側も巻き込んだ耕畜食連携システムの構築と制御が、「N 廃棄の半減」を実現する上で必要不可欠である。

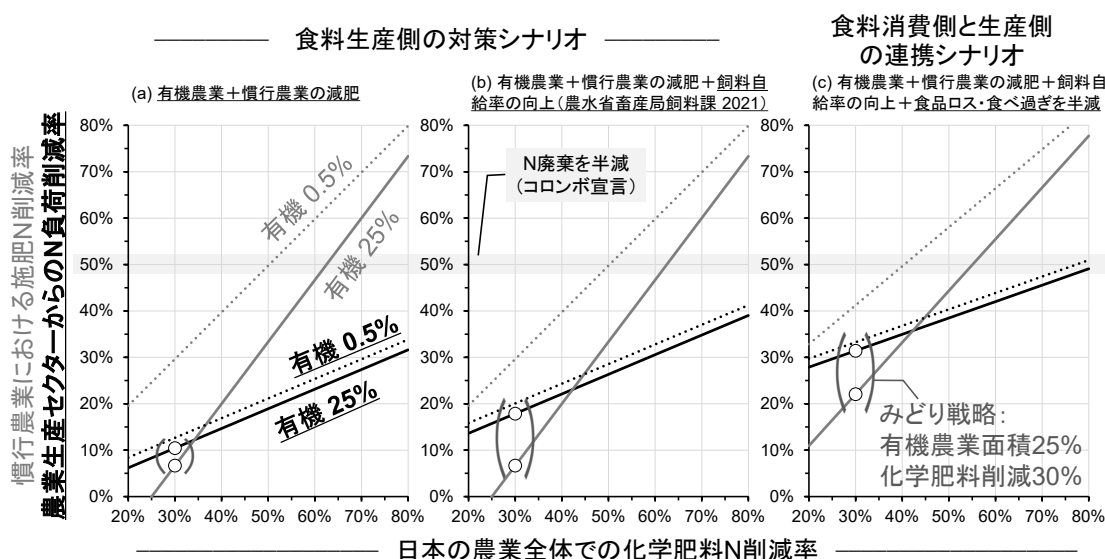


図 9 日本の農業生産セクターからの窒素 (N) 負荷削減シナリオ：(a) 有機農業面積の拡大 (0.5%→25%) + 慣行農業における化学肥料削減シナリオ、(b) 「シナリオ (a)」 + 飼料自給率の向上（粗飼料自給率 100% + 濃厚飼料自給率 15%）シナリオ、(c) 「シナリオ (b)」 + 消費者の食品ロス・食べ過ぎの半減シナリオ

## 9. 本研究成果の特徴・活用面

本研究では、過去 40 年間（1975～2015 年）の日本の畜産業セクターにおける N フローの



実態を詳細に明らかにすると共に、主な畜産物毎の NUE を持続可能性の簡易指標として用いることで、日本の畜産業の持続可能性を定量的に評価した。これまでは、主な畜種別の N 排泄量原単位に依存する（注目する）報告や、食飼料供給システム全体を対象とした物流データに基づく報告等が多く、畜産物毎に細分化した N フロー及び NUE を物流データの実態に基づき算定した報告は殆ど無かった。これらの知見は、それぞれの畜産物の生産者、流通・加工業者、消費者等を対象とした食育・環境教育等により知識普及・理解醸成を図るための科学的情報として活用できる。

また、本研究では、日本の畜産業の更なる持続的発展に向けた取り組みとして、みどりの食料システム戦略の数値目標「化学肥料削減 30%、有機農業面積 25%」及び国産飼料の生産拡大に向けた施策目標「粗飼料自給率 100%、濃厚飼料自給率 15%」に注目し、これらの数値目標を達成した場合に、日本の農業生産セクター全体からの N 負荷削減効果はどの程度か、それはコロンボ宣言による国際的な目標「N 廃棄を半減」をクリアできるのか、出来ないとすれば更にどのような取り組みが必要か、等について、生産現場だけでなく流通・加工・消費段階における取り組みも含めて、具体的な改善方策を提示した。また、特に輸入粗飼料への依存度が高いとされる南西諸島における製糖用サトウキビの N フローや食品加工廃棄物であるバガスの利用実態・利用拡大可能性等に関する現地調査を行い、農地面積を拡大することなく、粗飼料自給率 100%と N 負荷削減を同時に達成する方策を検討した。

本研究で得られた情報は、みどりの食料システム戦略等の国行政施策の推進や、第 5 回国連環境総会（UNEA5）で決議された「N 廃棄の顕著な減少」の達成に向けた様々な取り組みに対して、大いに貢献するものである。

## 謝辞

本研究の研究協力者である濱田耕佑研究員（国立研究開発法人国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点）に深く感謝する。

## 引用文献

江口定夫・平野七恵（2019）日本の消費者の食生活改善による反応性窒素排出削減ポテンシャルと国連 SDGs シナリオに沿った将来予測. 日本土壌肥科学雑誌 90(1): 32-46

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2021) Upcycling for a more sustainable food system and the key to reduce food waste.

<https://www.fao.org/food-loss-reduction/events-and-opportunities/detail/en/c/1412062/>

Fowler D, Coyle M, Skiba U, Sutton MA, Cape JN, Reis S, Sheppard LJ, Jenkins A, Grizzetti B, Galloway JN, Vitousek P, Leach A, Bouwman AF, Butterbach-Bahl K, Dentener F, Stevenson D, Amann M, Voss M (2013) The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 368 (1621): 20130164

Galloway JN, Winiwarter W, Leip A, Leach AM, Bleeker A, Erismann JW (2014) Nitrogen footprints:

past, present and future. *Environmental Research Letters* 9: 115003

- 袴田共之 (1996) 農業における資源管理, そして環境. *環境研究* 100: 120–126
- 袴田共之 (1998) 農業における物質循環情報の特性と処理. *情報地質* 9: 155–163
- 原田靖生・築城幹典 (1993) 物質循環から見た家畜糞尿問題. *北海道家畜管理研究会報* 29: 1–9
- 服部育男・境垣内岳雄 (2015) 飼料用サトウキビ「しまのうしえ」の普及に向けた取り組み. *九州沖縄農研ニュース* 52: 9
- 服部育男・神谷充・春日久志・吉田広和・川田隆博・井将也・加藤直樹・小林良次 (2015) 製糖残さ等地域未利用資源の混合が飼料用サトウキビを主体とする繁殖牛用発酵 TMR の発酵品質と人工乾物消化率に及ぼす影響. *日本暖地畜産学会報* 58(1): 95–101
- 平賀昌晃 (2004) 岩手県における農畜産物生産・消費に係る窒素収支の推定. *岩手県農業研究センター研究報告* 4: 31–41
- 平野七恵・江口定夫・織田健次郎・松本成夫 (2023) 物流データに基づく日本の食飼料システム及び畜産業界における過去 40 年間の窒素フローと窒素利用効率の解析. *日本土壌肥科学雑誌* 94(1): 11–26
- 寶示戸雅之・池口厚・神山和則・島田和宏・荻野暁史・三島慎一郎・賀来康一 (2003) わが国農耕地における窒素負荷の都道府県別評価と改善シナリオ. *日本土壌肥科学雑誌* 74(4): 467–474
- 生雲晴久・森江昌史・山本直之・山口武則 (2007) 家畜排泄物等有機物資源の循環的利用のための調査研究と技術開発. *中央農業総合研究センター研究資料* 7: 93–117
- 井土俊郎 (2010) 日本における鶏卵・鶏肉の生産性に関する統計的解析. *鶏病研会報* 46: 67–74
- 岩本明久・三輪睿太郎 1985. 我が国の有機物動態と地力. *圃場と土壌* 17: 148–157
- 神谷充 (2014) 徳之島町 TMR センター (事例: 飼料用サトウキビを活用した TMR). *九州沖縄農研ニュース* 47(2): 7
- 神山和則・寶示戸雅之・佐々木寛幸・松浦庄司 (2006) 家畜ふん尿の処理物別, 仕向先別の肥料成分量の推定. *日本土壌肥科学雑誌* 77(3): 283–291
- 厚生労働省 (2022) 食肉検査等情報還元調査. <https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/113-1.html>
- 松本成夫・袴田共之・佐藤一良・三輪睿太郎 (1992b) 茨城県牛久沼集水域における有機物フローの地域別変動と農地還元利用の評価. *日本土壌肥科学雑誌* 63(6): 639–645
- 松本成夫・織田健次郎・三輪睿太郎 (2017) わが国の食飼料供給に伴う 1992 年から 2007 年までの窒素フローの変遷. *日本土壌肥科学雑誌* 88(1): 1–11
- 松本成夫・佐藤一良・袴田共之・三輪睿太郎 (1992a) 茨城県牛久沼集水域における有機物フローの変動評価. *日本土壌肥科学雑誌* 63(4): 415–421
- 三島慎一郎・秋山博子・八木一行・神山和則 (2008) 家畜ふん尿堆肥に含まれる肥料成分の傾向と堆肥化に伴う窒素消失率の推定. *日本土壌肥科学雑誌* 79(4): 370–375

- Mishima S, Endo A, Kohyama K (2009) Recent trend in residual nitrogen on national and regional scales in Japan and its relation with groundwater quality. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 83: 1–11
- Mishima S, Kimura SD, Eguchi S, Shirato Y (2012) Estimation of the amounts of livestock manure, rice straw, and rice straw compost applied to crops in Japan: a bottom-up analysis based on national survey data and comparison with the results from a top-down approach. *Soil Science and Plant Nutrition* 58: 83–90
- Mishima S, Leon A, Eguchi S, Shirato S (2017) Livestock waste, potential manure production and its use in Japan in 1980 and 2010. *Compost Science and Utilization* 25: sup1, S43–S52
- 三輪睿太郎・岩本明久 (1988) わが国の食飼料供給に伴う養分の動態. 日本土壤肥料学会編 土の健康と物質循環, p. 117–140. 博友社. 東京
- Mori A, Eguchi S, Higuchi M, Shibata H (2020) Nitrogen loss to the environment due to various nitrogen-use efficiencies during milk and beef production in Japan. *Environmental Research Letters* 15: 125007
- 守川信夫 (2000) 沖縄県におけるバガス利用の現状とその栄養特性. 日本草地学会九州支部会報 30(1): 19–24
- 日本食肉格付協会 2022. 牛枝肉格付結果－品種別・性別ごとの格付結果.  
[http://www.jmga.or.jp/rating/archive/#beef\\_result](http://www.jmga.or.jp/rating/archive/#beef_result)
- 西尾道徳 (2003) 統計データに基づく家畜ふん尿窒素のフローシートと土壤負荷原単位の推定. *日本土壤肥料学雑誌* 74(6): 721–730
- 農林水産省 (2023) みどりの食料システム戦略.  
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html>
- 農林水産省生産局畜産部畜産振興課 (2019) 鶏の改良増殖をめぐる情勢.  
[https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l\\_katiku/attach/pdf/niwatori-6.pdf](https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_katiku/attach/pdf/niwatori-6.pdf)
- 織田健次郎 (2006) わが国の食飼料システムにおける 1980 年代以降の窒素動態の変遷. *日本土壤肥料学雑誌* 77(5): 517–524
- 織田健次郎 (2007) わが国の食飼料システムにおける 1970 年代以降の窒素収支の変遷. *インベントリー* 6: 2–7
- 温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) (2022) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書. <https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/index.html>
- 岡田卓士・塩原将次 (2004) 「バガス」の飼料特性について. *牧草と園芸* 52(3): 10–13
- 大村邦男 (1994) 北海道の酪農地帯における窒素, リンの循環と水質保全. *日本土壤肥料学雑誌* 65(5): 573–577
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2022) OECD.Stat.  
<https://stats.oecd.org>
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin FS III, Lambin E, Lenton TM, Scheffer M,

- Folke C, Schellnhuber HJ, Nykvist B, De Wit CA, Hughes T, Van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder PK, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell RW, Fabry VJ, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J (2009) Planetary Boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32
- Shibata H, Cattaneo LR, Leach AM, Galloway JN (2014) First approach to the Japanese nitrogen footprint model to predict the loss of nitrogen to the environment. *Environmental Research Letters* 9: 115013
- Shindo J, Okamoto K, Kawashima H, Konohira E (2009) Nitrogen flow associated with food production and consumption and its effect on water quality in Japan from 1961 to 2005. *Soil Science and Plant Nutrition* 55: 532–545
- 白波瀬京子・小林久 (2009) 土地利用型畜産の飼料調達実態と窒素フローによる評価. *農業農村工学会論文集* 77(1): 27–33
- Sutton MA, Howard CM, Kanter DR, Lassaletta L, Möring A, Raghuram N, Read N (2021) The nitrogen decade: mobilizing global action on nitrogen to 2030 and beyond. *One Earth* 4: 10–14
- 竹中洋一・秦隆夫 (2002) 有畜複合農業における物質循環システム開発のための窒素フローの解析—十勝地方の畜産・畑作を事例として—. *北海道農業研究センター研究報告* 177: 133–149
- 田代豊・高平兼司 (2001) 宮古島における窒素負荷発生量と地下水窒素濃度の長期的推移. *水環境学会誌* 24(11): 733–738
- United Nations Environment Program (UNEP) (2023) The United Nations Environment Assembly. <https://www.unep.org/environmentassembly/>
- 柚山義人 (2007) バイオマスタウンつくばを目指して. 第1回つくば環境・エネルギー・経済 (3E) フォーラム. [https://eeeforum.sec.tsukuba.ac.jp/3ef/1st/pdf/1st3EF\\_yuyama.pdf](https://eeeforum.sec.tsukuba.ac.jp/3ef/1st/pdf/1st3EF_yuyama.pdf)