

日本の主要食料消費における温室効果ガス排出のライフサイクル分析と その削減ポテンシャルの評価

Life Cycle Analysis of GHG Emission related to Major Food Consumption in Japan
and Evaluation of its Reduction Potential

吉川 直樹*・天野耕二**・島田幸司***

Naoki Yoshikawa, Koji Amano, and Koji Shimada

1. はじめに

食用消費に由来する環境負荷の把握を行うことは、日常生活における消費と環境の関係を捉える上で重要である。日本においては、食料の生産に置ける環境負荷に加え、輸入等の輸送に伴う環境負荷についても相当程度排出していると考えられるため、これらを総合的に捉えるためにライフサイクル評価(LCA)を用いることが適当である。

一方、農業活動に伴う温室効果ガス(GHG)排出は、日本全体の環境負荷からみるとその寄与は小さいと考えられるが、産業部門と比較すると、削減における費用対効果の大きい対策も存在するといわれている。

そこで本研究では、日本において消費されている主要な食料を対象に、LCA手法を用いて、その生産・輸送過程におけるGHG排出量を推計するとともに、農業部門を中心としたいくつかのGHG対策について、地域性と費用対効果を考慮したポテンシャル評価を行う。

2. GHG 排出量の推計

本研究で対象とする品目は、本研究対象とする食料品目は、穀類(2品目)、肉類(3品目)、魚類(5品目)、野菜類(14品目)、果実類(9品目)とする。いずれも、各品類において国内での消費量の多い品目を選定している。対象品目を表1に示す。これらの品目について、生産・輸送および廃棄におけるGHG排出量を推計した。推計は、国内産品を中心として行ったが、小麦・牛肉・豚肉については、輸入割合が比較的高いため、輸入品の環境負荷についても検討した。推計対象年度は2005年とし、可能な限り2005年のデータを中心に用いた。

生産段階のGHG排出量推計においては、農林水産省による各品目の生産コストに関する統計データ¹⁾⁻³⁾を

表1 推計対象品目

穀類	畜産物	水産物	野菜		果実	
米	牛肉	まぐろ	キャベツ	にんじん	みかん	もも
小麦	豚肉	さけ	はくさい	さといも	りんご	すいか
	鶏肉	さば	ほうれんそう	ばれいしょ	なし	メロン
		ぶり	ねぎ	トマト	ぶどう	いちご
		さんま	レタス	きゅうり	かき	
			たまねぎ	なす		
			だいこん	ピーマン		

* 立命館大学理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 TEL077-561-2666 E-mail:ec081018@ed.ritsumei.ac.jp

** 立命館大学理工学部

*** 立命館大学経済学部

用いる。各品目の費目別の生産費に、3EID⁴⁾をもとにした部門別購入者価格あたりのCO₂排出原単位を乗じて算出した。ただし、排出量への寄与が大きいと考えられる光熱費・飼料費については、各生産費データに物量ベースでの投入データがある場合、物量ベースの原単位を用いて推計した。飼料については、牧草・乾草等の粗飼料については、別途牧草等の生産費データ³⁾から重量あたりの排出原単位を算出し、とうもろこしを中心とする濃厚飼料についても、米国産を仮定し、後述の輸入小麦と同様の手法を用いて重量ベースの原単位を推計した。各品類の環境負荷推計の対象とした費目と、用いた原単位を表2に示す。また、農業におけるメタン・亜酸化窒素、畜産におけるメタン排出についても、温室効果に対する寄与が大きいとため、別途推計した。推計方法は、日本国温室効果ガスインベントリ報告書⁵⁾に準じ、窒素肥料の施肥・作物残渣のすき込み・家畜糞尿処理によるN₂Oと、稲作・家畜の消化管発酵・家畜糞尿処理に伴うCH₄を計上した。なお、農業副産物（稲わら・家畜糞尿など）への環境負荷の配分は行わず、環境負荷はすべて主産物に負担させるものとした。

表2 使用した環境負荷原単位（国内産）

品類	費目	原単位	単位	出典	品類	費目	原単位	単位	出典	品類	費目	原単位	単位	出典		
畜産物	もと畜費	1.78			穀類・野菜・果実	窒素質肥料(単肥)	9.00			水産物	融雪剤	3.82				
	光熱動力費	25.91				リン肥料(単肥)	9.00				穀類・野菜・果実	その他諸材料	2.11			
	その他の諸材料費	2.11	g-CO ₂ /円	4)		複合肥料	5.90	g-CO ₂ /円	6)		野菜・果実	土地利用・水利権	3.01			
	獣医師料・医薬品費	2.11				その他化学肥料	5.03				果実	農用建物	2.76			
	建物費	2.76				有機質肥料	2.26					自動車費	2.38			
	自動車費	2.38				穀類・野菜・果実	農業薬剤	2.99			4)		農機具費	3.78	g-CO ₂ /円	4)
	農機具費	3.78				重油	2.71						漁船費	7.19		
	麦	0.39				軽油	2.62	kg-CO ₂ /l	7)				漁具費	2.98		
	とうもろこし	0.36				灯油	2.49						油費	47.72		
	大豆	0.27		8)9)		ガソリン	2.32						えさ代	2.24		
配合飼料※	0.29			電力	26.60	kg-CO ₂ /kWh	7)			その他の材料費	2.11					
生牧草	0.04	kg-CO ₂ /kg		光熱動力費(露地)	27.71					修繕費	4.57					
いね科乾牧草	0.16			光熱動力費(施設加温)	53.92					減価償却費	4.59					
まめ科乾牧草	0.22		3)4)	ビニールシート	3.30	g-CO ₂ /円	4)									
いね科サイレージ	0.08			ポリエチレン	3.30											
まめ科サイレージ	0.09			なわ	2.98											

表3 使用した環境負荷原単位（海外産）

	費目	CO ₂ 排出原単位 (g-CO ₂ /\$)
Grain farming	Seed	729
	Fertilizer	4324
	Chemicals	779
	Custom operations	729
	Fuel, lube, and electricity	9069
	Interest on operating capital	402
	Capital recovery of machinery and equipment	266
Livestock farming	Grain	1080
	Protein sources	1050
	Complete mixes	1080
	Veterinary and medicine	320
	Custom services	729
	Fuel, lube, and electricity	9069
	Repairs	266
Interest on operating capital	402	

輸入品の環境負荷推計を行う品目（小麦・牛肉・豚肉）については、米国産を仮定して環境負荷を推計した。輸入品についても、国内産と同様、CO₂排出量に関しては生産費⁸⁾に費目別の原単位⁹⁾を乗じることで算出した(表 3)。

輸送段階においては、卸売市場データをもとに排出量を推計した。生産・消費都道府県間の品目別輸送量を品目別に推定し、都道府県間距離（都道府県間の道路距離を代表値として設定）と普通貨物車のトンキロベースのGHG排出原単位により都道府県間輸送によるGHG排出量を算出した。また、都道府県間の輸送の他に、県内の配送によるGHG排出として、小型貨物車による25kmの輸送を仮定して推計した。ただし、穀類・畜産物に関しては、都道府県間輸送量の推計に十分な資料が得られなかったため、産業連関表と3EID⁴⁾より、各品目の平均的なCO₂排出量を推計した。輸入品についても、米国の生産地から輸出港までの自動車輸送と米国からの海上輸送（穀物：ばら積み船、畜産物：コンテナ船）を計上した。

以上の品目別の重量あたり GHG 排出量に各品目の消費量を乗じることで、主要食料の生産・輸送に伴う環境負荷を推計した。

品目別のGHG排出量の推計結果を図1～図5に示す。穀物では、稲作に伴うメタンの発生が米のGHG排出量に大きな影響を与えることが分かる。小麦では、国内産と輸入品がほぼ同等の排出となった。畜産品では、消化管発酵や糞尿処理に伴うCH₄やN₂Oの占める割合が高い。輸入品との排出量の差は、国内産の飼料輸入による差に加え、糞尿処理方法の違いによる部分も大きい。また、飼料の生産による間接排出も多いが、とうもろこし等の飼料輸入に伴う輸送による排出も一定割合の割合を占めた。魚類では、養殖を除き、GHG排出のほとんどが漁船の燃油による排出という結果となった。また、さけ漁業の定置網漁、まぐろのはえなわ漁など、漁法の違いに由来して、品目間の差も大きくなった。ぶり類については、養殖による排出が、天然物の漁獲による排出を上回った。野菜類・果実類では、施設野菜の加温による燃料消費により、冬季の果菜類やみかんについて、同一品目の露地栽培の2～20倍の排出量となった。したがって、環境負荷の削減のためには、稲作のメタン排出、畜産の飼料生産・輸送と糞尿処理・消化管発酵、魚類の燃油消費、施設野菜・果実の重油消費といった排出源への対策を重点的に行う必要があるといえる。

これら品類を合わせた排出量（なお、野菜・果実・魚介類の比対象品目については各品類の平均値を外挿入）は、約9.8百万t-CO₂eqとなった。品類別の構成比を図6に示す。蛋白質源である肉類、魚介類の占める割合が相対的に多くなった。

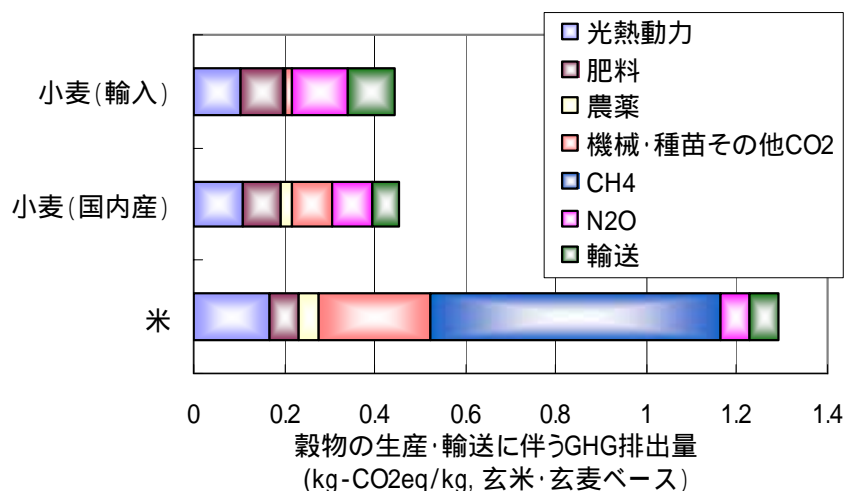


図1 穀物生産・輸送による GHG 排出量

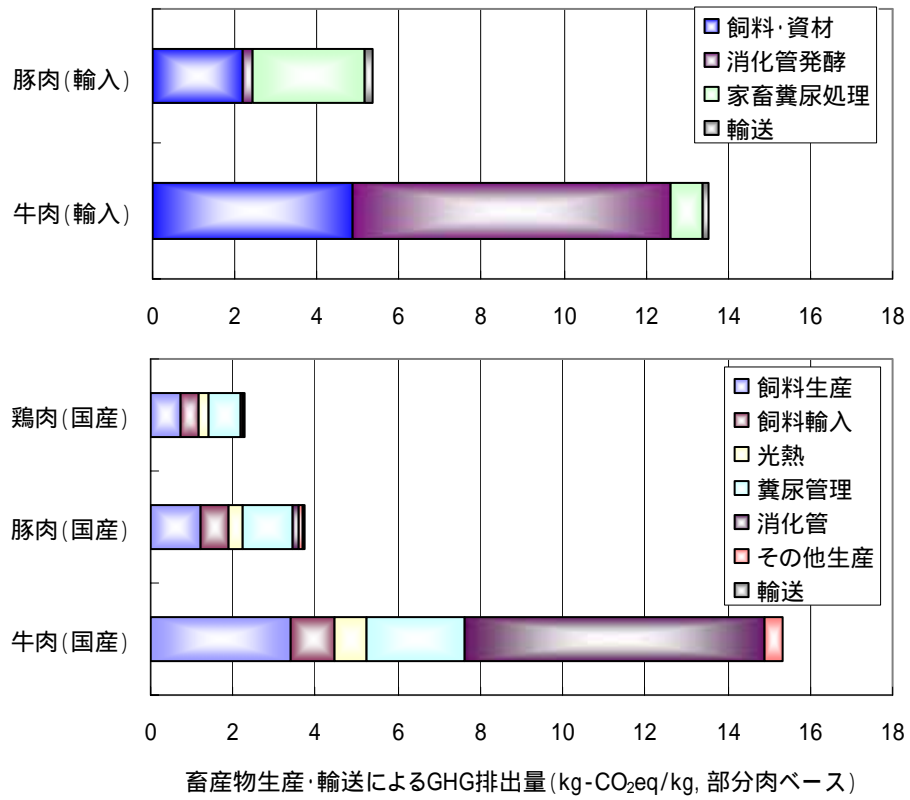


図2 畜産物生産による GHG 排出量

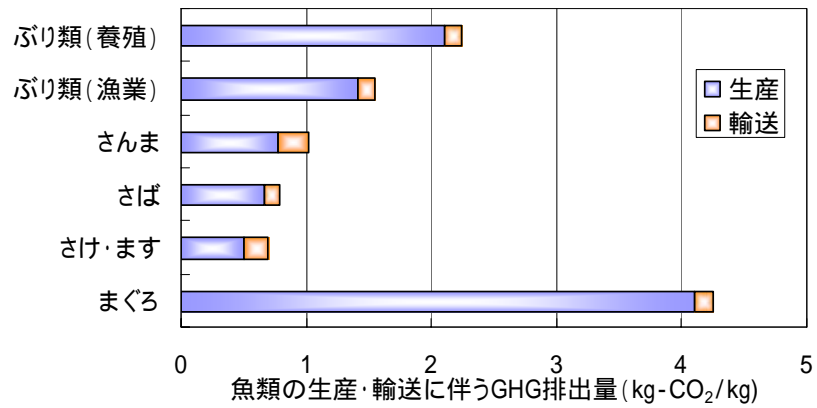


図3 水産物の生産・輸送に伴う GHG 排出量

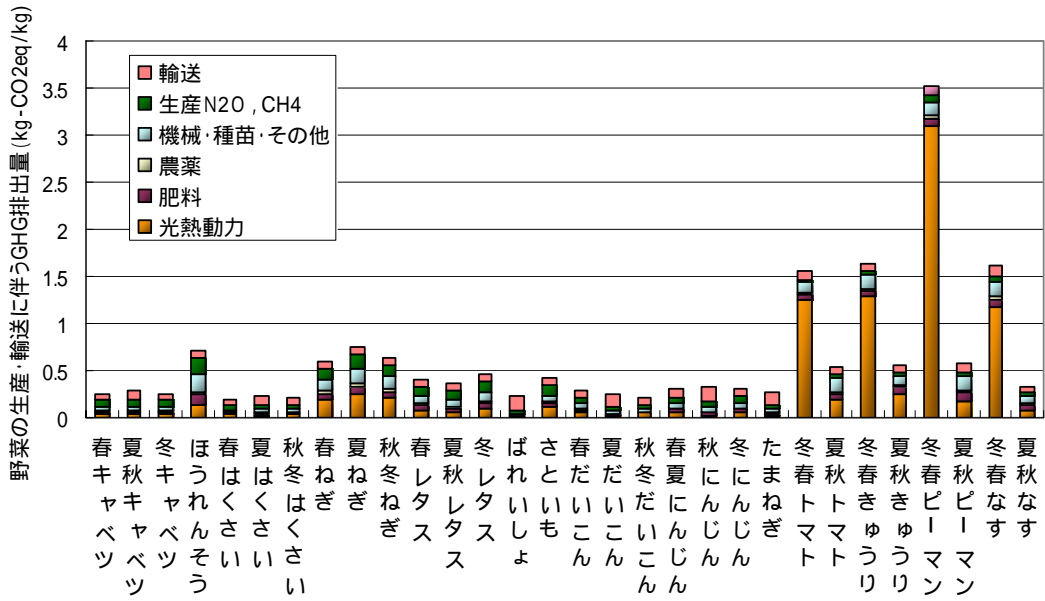


図4 野菜の生産・輸送に伴うGHG排出量

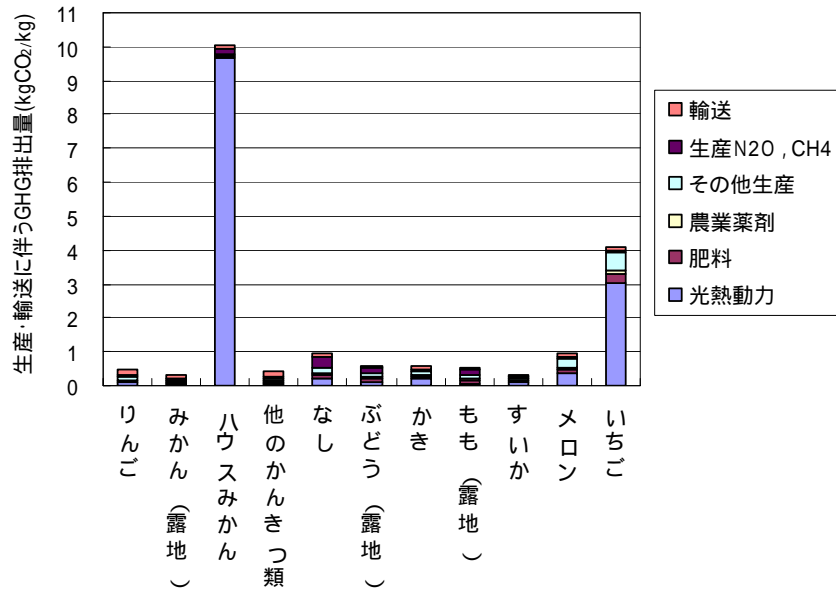


図5 果実の生産・輸送に伴うGHG排出量

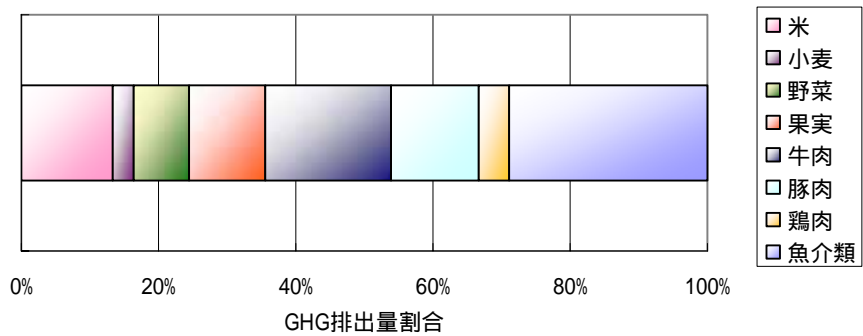


図6 主要食料生産・輸送に伴うGHG排出量の構成割合

3. 環境負荷削減対策の効果

以上のような食料生産・輸送による環境負荷を削減するために、多くの削減手法が提案されている。本稿では、農業残渣である稲わらの利活用を取り上げ、環境負荷削減効果・費用対効果の比較を行う。取り上げる対策は、バイオエタノール化と粗飼料化である。対策の具体的な内容は以下の通りである。

バイオエタノール化は、各都道府県（北海道は支庁単位）に1か所の設置を仮定する。これは比較的広域の収集を仮定することにより規模の経済による費用逡減を想定するためである。収集対象は、発生稲わらのうち、堆肥化等のように積極的に利用されておらず、圃場へのすきこみや焼却の行われているもの（割合は全国一律で74.9%¹⁰⁾と仮定）とし、その7割が収集されるものとした。バイオエタノール化は硫酸法を想定し、籾殻とともに処理を行い、副産物であるリグニンは焼却して発電・熱利用を行い、プラント内でのエネルギー利用の一部をまかなうものとした。稲わら賦存量はNEDO¹⁰⁾収集コスト・環境負荷は佐賀ら¹¹⁾や秋田県の検討事例¹²⁾を、製造の環境負荷・コストは佐賀ら¹³⁾、朝野・美濃輪¹⁴⁾、みずほ情報総研¹⁵⁾を基に設定した。主要な設定条件を表4に示す。

なお、施設の建設コスト・人件費は各県の稲わら利用量の関数で、平均輸送距離は各都道府県の面積に応じて推計する。施設の建設コストは、以下の式¹⁵⁾で算出する。

$$y = 75427x^{0.7}$$

ただし、xは1日当たり原料投入量(t/day)、yは初期投資額(千円)である。

人件費は文献¹⁴⁾をもとに、以下の式を用いた。

$$L = \frac{C * 1.2 * n_2 * (E / E_2)^{0.27}}{E}$$

ここで、Lはエタノール生産量あたりの人件費、Cは人件費単価(476万円/人・年)、 n_2 は基準ケース(エタノール生産2万kl/年のプラント)における人員数¹⁶⁾、Eはプラントの規模(年間エタノール生産量)、 E_2 は基準ケースのエタノール生産量(2万kl/年)である。

輸送距離は、各都道府県を正方形の格子型都市と仮定し、以下の式のような都市内の任意の2点間の距離の期待値を用いる。

$$D = \frac{2}{3} A^{0.5}$$

ここで、Dは片道輸送距離(km)、Aは都道府県総面積(km²)である。

表4 バイオエタノール化評価の設定条件

収集・製造諸条件	原単位	単位	出典	プロセス投入量	原単位	単位	出典	CO ₂ 排出原単位	単位	出典
年間稼働日数	300	日	15)	電力	0.529	kWh/l	13)	0.379	kg-CO ₂ /kWh	
エタノール収率(稲わら)	175	l/wet-t	13)	水蒸気	6.5	kg/l	13)	0.124	kg-CO ₂ /kg	
エタノール収率(籾殻)	154	l/wet-t	13)	工業用水	125	kg/l	13)	0.095	kg-CO ₂ /m ³	16)
ランニングコスト		円/wet-t	15)	硫酸	94	g/l	13)	0.048	kg-CO ₂ /kg	
収集コスト	8750	円/wet-t	12)	生石灰	36	g/l	13)	1.12	kg-CO ₂ /kg	
軽油価格	100	円/l	-	プラント建設	-	-	-	3.24	kg-CO ₂ /千円	4)
収集車(4tトラック)積載量	2	t	-	軽油	-	-	-	2.62	kg-CO ₂ /l	7)
収集車(4tトラック)燃費	5	km/l	-							
エタノール生産量当たり										
リグニン発熱量	9.6	MJ/l								
リグニン発電効率	24	%	13)							
熱回収効率	50	%								

粗飼料化は、現在、飼料として供給されている稲わらのうち、中国・韓国等から輸入されているものを、国産稲わらに置き換えるものである。これにより、稲わらの輸送に伴う環境負荷が削減されることになる。稲わらの収集に関する環境負荷は国産・輸入バイオエタノール化と同様とし、輸入はコンテナ船輸送による

ものとして、2006年実績による国別輸入量で輸出国別環境負荷を加重平均することにより、算出した。コストは輸入品の輸入価格(CIF価格)と国内産の生産者価格¹⁹⁾²⁰⁾を比較した。表5に主要な設定条件を示す。

表5 粗飼料化評価の設定条件

生産地	海上輸送距離 ¹⁷⁾	コンテナ船 CO ₂ 排出原単位 ¹⁸⁾	国内輸送距離 (km)	堆肥輸送距離 (km)	価格 ¹⁹⁾²⁰⁾ (円/kg)
中国	2527	21	100	0	26.8
韓国	1361	g-CO ₂ /t-km	100	0	57.3
日本	0		50	50	29.0

また、両対策ともに、稲わらが圃場外に持ち込まれることにより、圃場へのすき込みによる有機物の投入が減少する。本稿では、これを補うために畜産堆肥の投入を仮定した。稲わらをすき込むと、水田土壌において稲わら中の有機物が嫌気分解することにより、メタンが排出される。そのため、すき込みを行う水田は、堆肥施用の水田に比べメタン発生が少ない。そのため、米の生産・輸送におけるGHG排出のうち高い割合を占める農地からのメタン排出が減少する効果も期待される。堆肥生産の環境負荷は、畜産廃棄物処理に帰属されるとして算入せず、堆肥の輸送にかかるCO₂排出(4tトラック、積載率100%で50km輸送)を考慮した。

バイオエタノール化・粗飼料化の環境負荷削減効果の比較を図7に示す。バイオエタノール化は、都道府県ごとに算出しているが、ここでは新潟県での推計結果を用いた。稲わら現物1kgの利活用によるGHG削減効果は、バイオエタノール化が0.28kg-CO₂eq、粗飼料化が0.19kg-CO₂eqとなった。バイオエタノール化がガソリン燃焼の回避に加え、稲わらすき込み回避による効果が大きい。仮に国産稲わらの利用可能量の70%をバイオエタノール化した場合、約150万t-CO₂eqのGHG削減が見込まれる。また、日本が輸入している稲わら類(16.1万t,2008年)をすべて国産稲わらに代替した場合、未利用稲わらの2.3%が利用され、3.4万t-CO₂eqの削減となる。

バイオエタノール化のコストは、各都道府県を対象に試算した結果、ガソリン換算で178~223円/lとなった。図8に、環境負荷削減の費用対効果として、ガソリン価格が120円/l,150円/l,200円/lの場合におけるGHGの削減費用を示す。ここでは、都道府県別に供給コスト、LC-GHG排出量の推計を行い、ガソリン価格との差によりライフサイクルGHG1t-CO₂あたりの削減費用を算出している。未利用稲わらの70%をエタノール化した場合、ガソリンの発熱量換算で57万kl程度の供給ポテンシャルがあるが、各都道府県の状況(施設規模・輸送距離)により高コストの県と低コストの県では20千円/t-CO₂程度の削減費用の差があることがわかる。しかし、現状のコスト構造においては、ガソリン価格がいずれのケースにおいても費用効果的とはいえない。稲わらエタノールのLCAとしてあまり考慮されてこなかった、稲わらのすき込み回避による効果を考慮しても、国産稲わらのエタノール化が費用効果的な対策となるためには、更なるコスト削減が必要であるといえる。

飼料化については、2006年の輸入価格と国産生産者価格の差額は2.2円/kgであり、これを削減費用として考えると、10.3千円/t-CO₂となる。しかし、粗飼料の自給には飼料の安定供給・輸入価格による畜産経営の安定といった効果を狙って行われており、GHG削減をそれらの効果に付随するものとして考えると、費用対効果は必ずしも低くはないと考えられる。

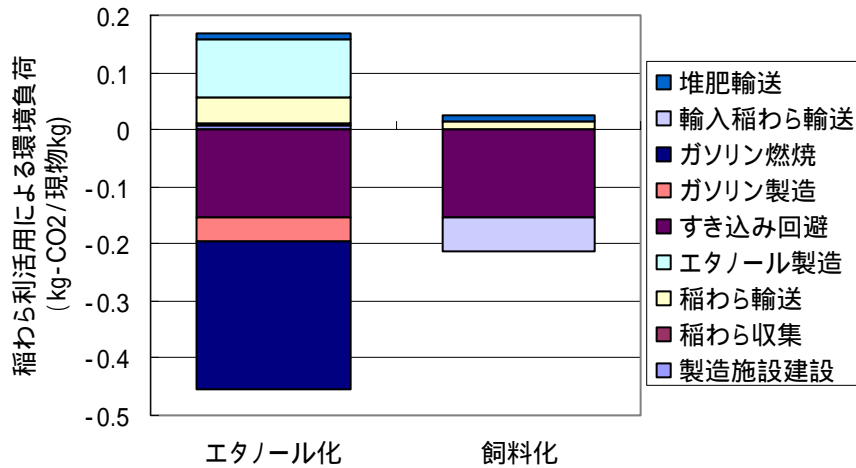


図7 稲わらの利活用による環境負荷削減効果の推計結果

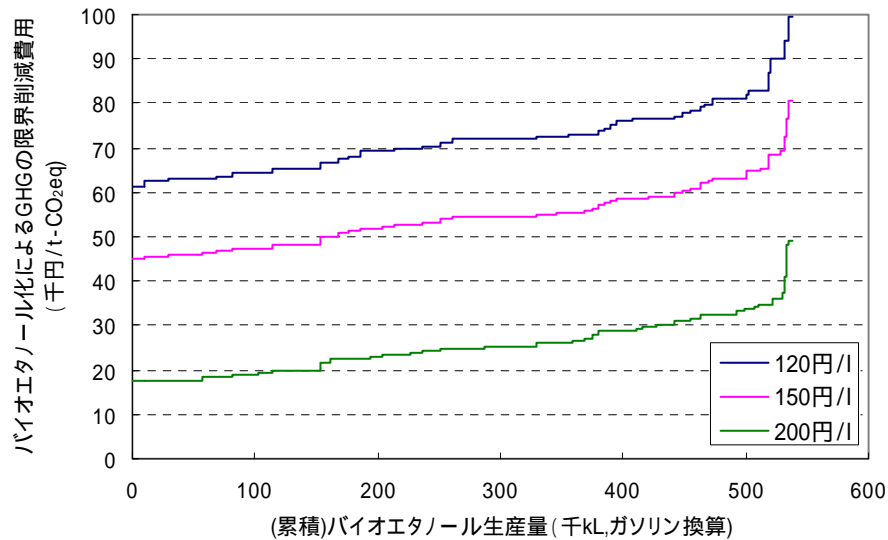


図8 稲わらのバイオエタノール化の費用対効果の推計

4. まとめ

本研究では、生産費調査を中心とした比較的簡便な LCA を用いて、日本における食料消費における温室効果ガスの発生構造を明らかにした。そのうえで、稲作における残渣すき込みによる GHG 排出の削減を考慮して、稲わらの利活用による GHG 削減対策の効果を LCA 手法を用いて評価した。その結果、

畜産物では飼料の生産に加えて、飼料の輸入にかかる GHG の寄与が大きい。

野菜・果実では温室加温栽培品は、同一品目の露地栽培品の 2~20 倍の GHG を排出する。

米栽培ではメタンの寄与が大きい。

魚類では、養殖を除いて漁船の燃料による排出がほとんどを占める。

ことがわかった。

また、稲わら利活用効果の推計では、1kg あたりの稲わら利用に対して、エタノール化の GHG 削減効果が粗飼料化よりも高いものの、費用対効果の観点からは、エタノール化のコストが低減しなければ飼料化が優位である可能性が高いことを示した。

今後は、環境負荷やコスト評価の条件等をさらに精査し、評価の信頼性を高めることが課題である。また、本稿では稲わらの活用対策のみしか取り上げることができなかったが、さらに多彩な対策を横断的に評価し、食料消費に伴う環境負荷削減の、より費用効果性の高い対策を抽出し、環境負荷削減施策の方向性について提案していきたい。

参考文献

- 1) 農林水産省：品目別経営統計。
- 2) 農林水産省：漁業経営調査報告。
- 3) 農林水産省：畜産物生産費。
- 4) 南齋規介，森口祐一，東野達：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 - ，(独)国立環境研究所 地球環境センター，2009。
- 5) 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス：日本国温室効果ガスインベントリ報告書
- 6) 農業環境技術研究所：LCA 手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル，2003。
- 7) 環境省：温室効果ガス算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧。
- 8) USDA Economic Research service: Characteristics and Production Costs, 2002-2006.
- 9) Carnegie Mellon University Green Design Institute: Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA), US 1997 Industry Benchmark model [Internet],2008.
- 10) NEDO: バイオマス賦存量および利用可能量の推計～GIS データベース～。
- 11) 佐賀清崇，藤本真司，柳田高志，美濃輪智朗，芋生憲司，横山伸也：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)，pp371,2008。
- 12) 秋田県:秋田県バイオエタノール推進戦略。
- 13) 佐賀 清崇 ， 横山 伸也 ， 芋生 憲司: 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，29(1),pp56 ,2008。
- 14) 朝野 賢司,美濃輪 智朗:日本におけるバイオエタノールの生産コストと CO₂ 削減コスト分析,日本エネルギー学会誌，86(12),pp957-963 ,2007。
- 15) みずほ情報総研:バイオマスエネルギー導入支援データベースの構築調査 調査報告書,2007。
- 16) 山田 富明 ， 斉木 隆 ， 齋藤 熹敬 ， 本波 康由 ， 横尾 一: 高効率エタノール発酵に基づくセルロース系バイオマスからの燃料用エタノール生産プロセスの開発と評価，バイオマス科学会議発表論文集,1, pp28-29,2006。
- 17) 海上保安庁：距離表。
- 18) 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団：平成 12 年度船舶からの温室効果ガス(CO₂等)の排出量削減に関する調査研究報告書 平成 13 年 6 月，2003。
- 19) 農林水産省：農業物価統計。
- 20) 財務省：貿易統計。