

さとうきびから精製糖までの二酸化炭素排出原単位の算出

服部浩三¹⁾, 鈴木 章¹⁾, 江橋 正²⁾, 太田正孝³⁾, 佐藤邦光³⁾

^{1), 2)}三井製糖株式会社,

³⁾特定非営利活動法人国際資源活用協会

The Calculation of Carbon Dioxide Emission Intensity from Sugarcane to Refined Sugar

Kouzou HATTORI¹⁾, Akira SUZUKI¹⁾, Tadashi EBASHI²⁾, Masataka OTA³⁾, Kunimitsu SATO³⁾

¹⁾Environmental Management Division, Mitsui Sugar Co., Ltd.

(2-8-2 Nihonbashi-Honcho, Chuo-ku, Tokyo 103-8423)

²⁾Quality Management Division, Mitsui Sugar Co., Ltd.

(2-8-2 Nihonbashi-Honcho, Chuo-ku, Tokyo 103-8423)

³⁾NPO International Resource Use Society

(10 Suehiro-cho, Yokkaichi-shi, Mie 510-0052)

近年の消費者の環境への関心の高まりを受け、企業は環境マネジメントシステムを構築し、ISO14001 認証取得する事業所も多くなった。それに伴い企業が自己の製品やサービスのライフサイクルアセスメント (LCA) を実施している。また精製糖メーカーは、食品メーカーから精製糖のライフサイクル全体の二酸化炭素 (CO₂) 排出原単位を求められるケースも出てきている。

さとうきび・精製糖に関するライフサイクルとは、さとうきびの植付準備から育成、収穫、粗糖製造、さらに海上輸送、精製糖製造、包装、倉入れまでの全工程である。これら各段階における投入資材・エネルギーを調査し、そのデータを基に CO₂ 排出原単位を段階ごとに算出し、それらを累積し、最終製品の精製糖の CO₂ 排出原単位を算出することは、さとうきびがバイオマスとしてどれだけ優れているか、精製糖が食品としてどれだけ優れているかについてより正確に把握することを意味する。また、全工程の投入・産出そして、排出を俯瞰的に見ることにより、地球温暖化防止・省エネ・低コスト化を検討するための課題発掘に大変有意義であると考えられる。

今回、われわれは、徳之島とタイ東北部におけるさとうきび栽培、甘しゅ原料糖 (粗糖) 製造の各段階における CO₂ 排出原単位の算出を試み、その結果を得ることができた。次にこの結果を用いて、粗糖原産地や構成比についてモデルを設定して国産粗糖と輸入粗糖を原料とした精製糖の CO₂ 排出原単位を算定した上で、精製糖の食品エネルギー効率についても算出したので報告する。

調査方法

さとうきび栽培と粗糖製造について、日本とタイで調査を行った。日本は鹿児島県徳之島内の 2 工場、タイは東北部の三井製糖株式会社の関連会社であるクムパワピーシュガー株式会社クムパワピー製糖所を対象とした。

徳之島では、特定非営利活動法人国際資源活用協会が南西糖業株式会社の協力を得て、さとうきび栽培ほ場・製糖工場・自治体堆肥製造所などにおける投入資材・エネルギーと産出製品・副製品・廃棄物について現地調査を行った。

タイでは、三井製糖がクムパワピーシュガー社の協力を得て、アンケート調査とヒアリングにより同様なデータ収集を行った。精製糖製造の段階については、三井製糖の 2 工場を選んだ。

各段階の基礎データについては、日本は南西糖業及び三井製糖各々の年報 (2005 年度) 記載のデータ、タイはクムパワピーシュガー社の平均的な操業と思われる期のデータを使用した。

さとうきび栽培関連では、整地・株出・耕作・収穫・輸送に使用する農業機械やトラックの燃料・堆肥・化学肥料・農薬等を新植・株出別に調査した。粗糖及び精製糖製造関連では化石燃料・電力・用水・清浄材料・工程副資材・包装材料・排水処理・廃棄物処理など、工場で使用する資材・エネルギーを対象とした (Fig. 1)。

さとうきび栽培、粗糖製造、精製糖製造の各段階にお

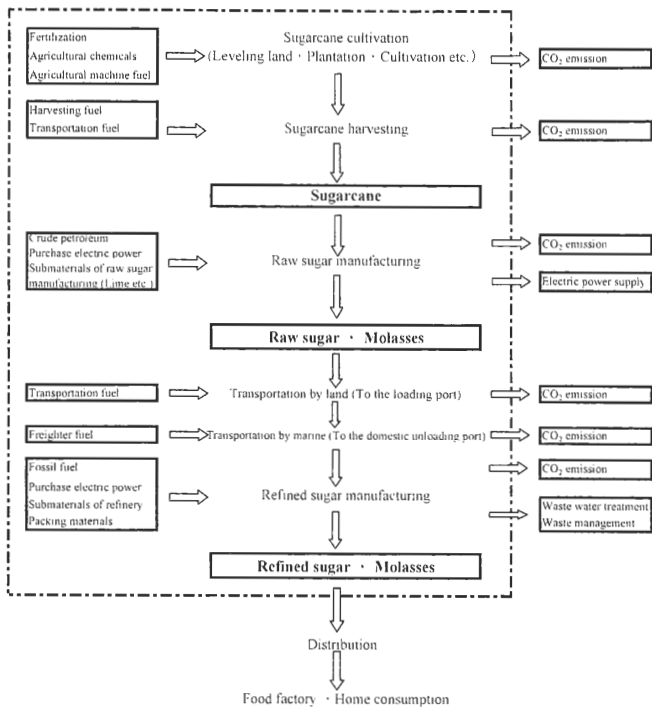


Fig. 1 System boundary chart

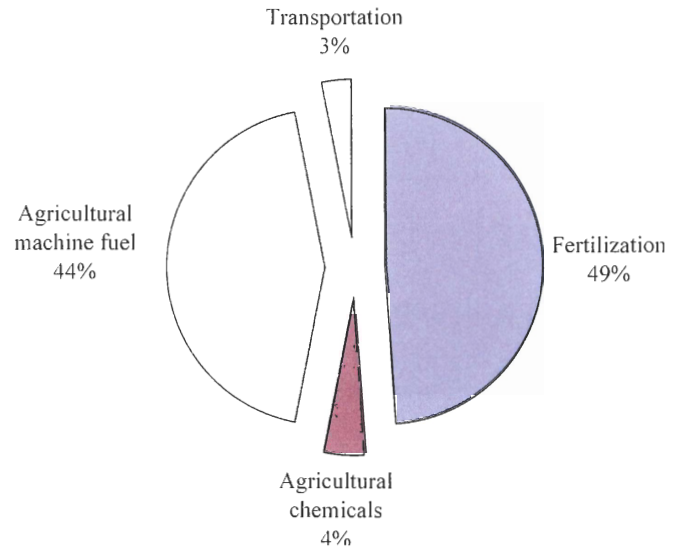


Fig. 2 The composition ratio of LC-CO₂ in sugarcane cultivation, Tokunoshima

産出量は、調査結果を利用した。

結果及び考察

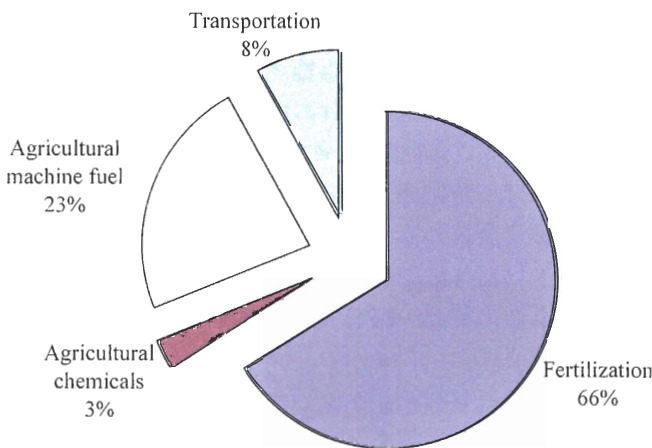


Fig. 3 The composition ratio of LC-CO₂ in sugarcane cultivation, Thailand

いて、それぞれの工程で投入される資材・エネルギーのCO₂排出係数を用いて、それぞれの段階のCO₂排出原単位を積み上げ法により算出した。

CO₂排出係数については、化石燃料は環境省公開データ、電力は調査工場地域の電力会社のデータ、投入資材の中で積み上げ法によるデータが報告されているものはそのデータを使用し、データを見出せないものは、独立行政法人国立環境研究所が公開している“環境負荷原単位データブック(3EID)”と“味の素グループ版CO₂排出係数データベース⁽⁴⁾”を使用した。対象工程の投入量・

1) さとうきび栽培におけるCO₂排出原単位

南西糖業とクムパワピー製糖所の全面的な協力のもと、徳之島とタイのさとうきび栽培に関わるCO₂排出原単位を積み上げ方式によって算出した (Fig. 2, Fig. 3, Table 1)。

CO₂排出原単位を算出するのに用いた投入資材・エネルギーのCO₂排出係数の出典はTable 1の脚注に示した。

肥料・農薬・農業機械用燃料の使用量は、新植と株出の収穫面積比で重み付けした結果をha当りで記入した。近年のさとうきび平均株出し回数は調査の結果、徳之島1.34回、タイ0.5回である。

農業資材・さとうきびなどの輸送用燃料は、輸送車輛の大きさで変化する。それぞれの輸送過程で燃料消費量を算出し、これを収穫さとうきび量で除して単位重量当たりで消費した燃料を記入した。

項目ごとのCO₂排出原単位を徳之島とタイで比較すると肥料と農業機械燃料で徳之島が多く、徳之島がタイと比較してさとうきびトン当たりCO₂排出原単位が多い理由になっている。

2) 粗糖製造におけるCO₂排出原単位

徳之島(南西糖業の2工場平均)及びタイ(クムパワピー製糖所)の粗糖生産と国内精製糖工場までの輸送に関わるCO₂排出量を積み上げ方式によって算出した

Table 1 CO₂ emission intensity per sugarcane ton in sugarcane cultivation

Large item	Small item		CO ₂ emission coefficient		Tokunoshima			Thailand			Source of emission coefficient
	Item name	unit	Tokunoshima	Thailand	Amount of turning on	LC-CO ₂ emission amount		Amount of turning on	LC-CO ₂ emission amount		
			kg-CO ₂ /unit	unit/ha	kg-CO ₂ /t-cane	%	Unit/ha	kg-CO ₂ /t-cane	%		
Fertilization	N element	kg-N	3.11	3.57	239	13.5		186	11.7		*1
	P ₂ O ₅ element	kg-P ₂ O ₅	0.88	1.02	106	1.7		111	2.0		
	K ₂ O element	kg-K ₂ O	0.4	0.63	127	0.9		121	1.3		
	Compost	t-compost	70	—	0.7	0.9		—	0.0		*2
	Subtotal					17.0	49 %		15.0	66 %	
Agricultural chemicals	Herbicide	kg-chemicals	21.6	9.63	3.14	1.2		4.4	0.7		*3
	Others	kg-chemicals	21.6	—	0.25	0.1		—	0.0		
	Subtotal					1.3	4 %		0.7	3 %	
Agricultural machine fuel	New plantation	Liter	2.62	2.62	181	8.6		66	3.0		*4
	Stock turning out	Liter	2.62	2.62	80	3.8		18	0.8		
	Harvesting	Liter	2.62	2.62	61	2.9		26	1.2		
	Subtotal				322	15.3	44 %	109	5.1	23 %	
Large item	Item name	unit	kg-CO ₂ /unit		unit/t-cane	kg-CO ₂ /t-cane	%	unit/t-cane	kg-CO ₂ /t-cane	%	
Transportation	Harvesting cane	Liter	2.62	2.62	0.32	0.83		0.68	1.8		*5
	Others	Liter		2.62	0.07	0.17		0.05	0.1		
	Subtotal				0.38	1.0	3 %	0.73	1.9	8 %	
Total (kg-CO ₂ /t-cane)						34.6	100 %		22.7	100 %	

*1: We used the fertilization coefficient of Tokunoshima from "Hisashi Kobayashi, Ryuichi Sagou: Eco-balance meeting No. 4 rejuve collection" and these fertilization coefficient in Thailand were used from Table 2 in document (6)

*2: We decided these coefficient by results of hearing from two compost factories in Tokunoshima and Isen town.

*3: ∇ Life cycle energy for each active ingredient of agricultural chemicals used in the vicinity of the raw sugar factory are described in the following, so we used this data and calculated LC-CO₂ emission coefficient.

Dr. Michael S. Graboski "Fossil Energy Use in the Manufacture of Corn Ethanol" PP. 91 August 2002

http://www.ncga.com/ethanol/pdfs/energy_balance_report_final_R1.PDF

∇ We cannot research about the emission coefficient of agricultural chemicals in Tokunoshima, so we used the coefficient of Table S-1 in document (6).

*4: We used the same fuel emission coefficient as the Ministry of the environment making public, when same kind of oil were used both in Tokunoshima and in Thailand.

*5: A column in others transportation is vacant because gasoline was used in part of transportation.

(Table 2. Fig. 4)。南西糖業の2工場では粗糖と糖みつを、クムパワピー製糖所では粗糖・白糖・精製糖・糖みつ・その他を生産しており、エネルギーや製糖副資材のほとんどが共通して使用され、分割把握することは困難であることから、粗糖の生産に関わるCO₂排出原単位はこれらの生産額を按分することにより求めた。輸送などその使用目的が明確に分割可能な項目は個々に求めた。使用電力のCO₂排出係数は、徳之島は九州電力徳之島発電所からのヒアリング値を、タイは公開されているタイ国内電力会社の値を使用した。クムパワピー製糖所では、バガスによる発電電力の一部を売電しているため、売電電力にタイ国内電力CO₂排出係数を乗じたCO₂排出量を控除してマイナス値で表中に現した。原料

であるさとうきび由来のCO₂排出原単位が粗糖のCO₂排出原単位の7割以上を占め、他は輸送にかかわるCO₂排出原単位がほとんどである。製造にかかわるエネルギーはバガスボイラ及び発電により賄っており、これが粗糖のCO₂排出原単位が低い要因であると言える。

精製糖工場到着の粗糖のCO₂排出原単位について、徳之島とタイを比較すると、Table 2で明らかな通り、徳之島では原料のCO₂排出原単位が高く、売電も行っていないため、輸送距離が短いにもかかわらず、311 kg-CO₂/t-RS(Raw Sugar)とタイの約1.5倍の値となった。一方、タイでは、原料のCO₂排出原単位が低く、また売電による控除があるので、工場が内地にあるための陸上輸送及び日本への海上輸送にかかわるCO₂排

Table 2 CO₂ emission intensity per raw sugar ton before arrival of refinery

Item	Content	Tokunoshima		Thailand	
		Amount of CO ₂ emission (kg/product-t)	% (Total of factory and transportation)	Amount of CO ₂ emission (kg/product-t)	% (Total of factory and transportation)
Raw material	Sugarcane	272.5	88 %	152.9	75 %
Energy	Fuel/Electric power	9.8		1.5	
	Electric power supply	—		-39.7	
Subtotal		9.8	3 %	-38.1	-19 %
Materials of raw sugar manufacturing	Lime	0.5		1.8	
	Other materials	0.5		1.2	
Subtotal		1.0	0 %	3.0	2 %
Total of raw sugar manufacturing		283.3	91 %	117.8	58 %
Transportation	Land	1.7		37.4	
	Marine	25.7		48.0	
Total of transportation		27.4	9 %	85.4	42 %
Total		311	100 %	203	100 %

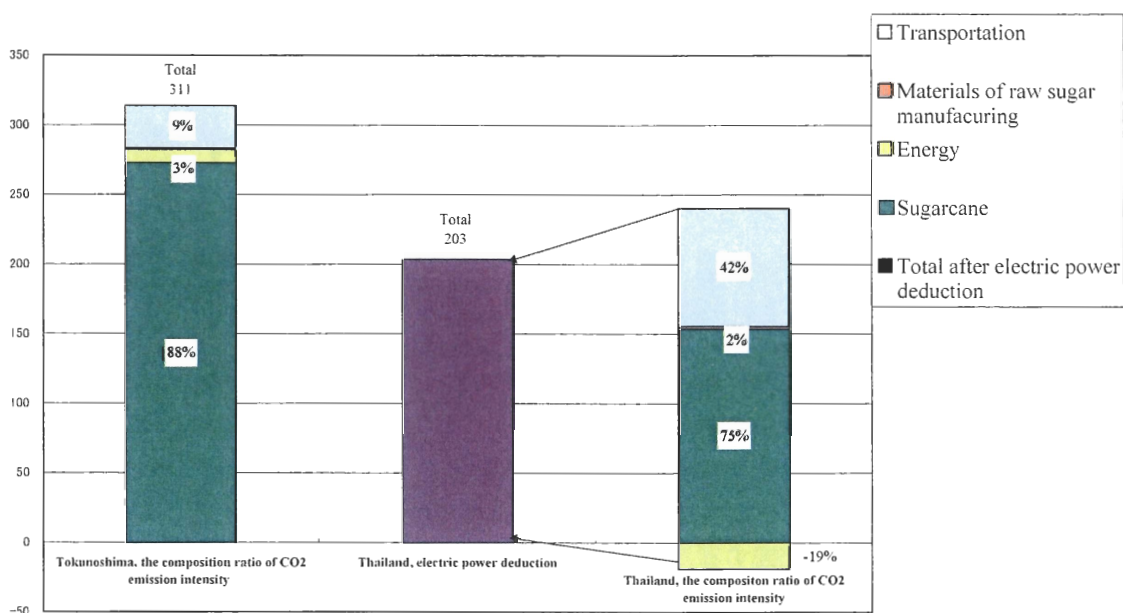


Fig. 4 CO₂ emission intensity in raw sugar manufacturing, Tokunoshima and Thailand

出原単位は比較的大きいにもかかわらず、トータルでは小さな値となった。

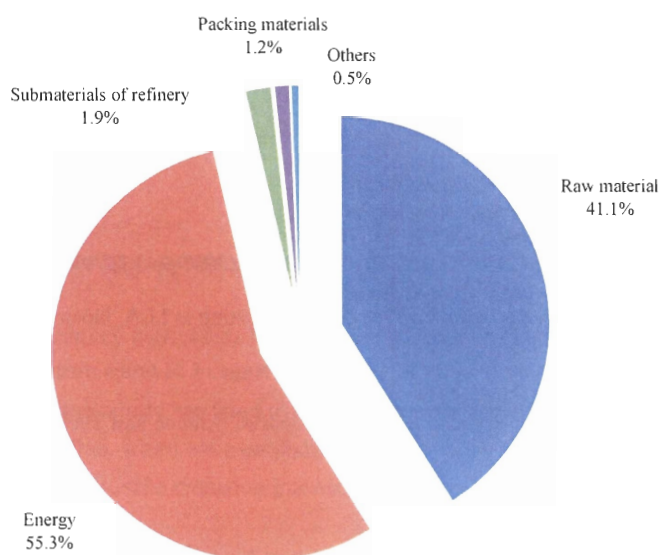
3) 精製糖製造における CO₂ 排出原単位

南西糖業及びクムパワピー製糖所における CO₂ 排出

原単位の解析を基に、三井製糖 2 工場の精製糖製造に関する CO₂ 排出原単位を積み上げ方式によって算出した。てん菜原料糖は CO₂ 排出原単位の積み上げに必要な投入資源・エネルギーの値が入手できなかったため、今回の計算では除いた。粗糖の CO₂ 排出原単位は、今回算

Table 3 The composition of CO₂ emission intensity in refinery
(Average of two refineries in Mitsui Sugar Co., Ltd.)

Large item	Content	kg-CO ₂ /product-t	Ratio %
Raw material	Import raw sugar	192.2	41.1 %
	Domestic raw sugar	27.4	
Total of raw material		219.6	
Energy etc.	Fuel/Electric power/Water	295.3	55.3 %
Submaterials of refinery	Decolorizer/Salt etc.	10.0	1.9 %
Packing materials	Polyethylene/Craft paper	6.6	1.2 %
Waste water treatment	Chemicals of waste water	0.3	0.1 %
Others	Transportation in factory	0.0	0.0 %
Waste	Industrial waste	2.0	0.4 %
Total		534	100 %

Fig. 5 The composition ratio of CO₂ emission intensity in refinery

出したクムパワピー製糖所（輸入粗糖）及び南西糖業（国産粗糖）の積み上げ値をモデルケースとして使用した。すなわち、南西糖業データを国産粗糖のCO₂排出原単位の代表値、クムパワピー製糖所データを輸入粗糖のCO₂排出原単位の代表値として、使用比率で重み付けし、精製糖のCO₂排出原単位を求めた。（Table 3, Fig. 5）その結果、精製糖製造に占めるCO₂排出原単位は、粗糖由来が約41%、エネルギー由来が約55%である。今回明示していないが、エネルギー由来のCO₂排出量は90%内外が購入燃料由来、残りが買電由来である。

4) 精製糖の食品エネルギー効率

今回、積み上げ法により、精製糖のCO₂排出原単位を得ることができたので、さらに精製糖の投入エネルギーに対する産出栄養エネルギーの比率、すなわち食品エネルギー効率を算出した。他の食品生産における食品エネルギー効率については、食品素材については発表⁽⁵⁾されているが、投入エネルギーについては産業連関表を基にしている。

食品の積み上げ法によるCO₂排出原単位の解析は、近年、日本LCA学会食品研究会で進められており、その結果が発表されている。積み上げ法で得たCO₂排出原単位を原油の発熱量当たりのCO₂排出係数(0.286 g-CO₂/kcal, ただし、発熱量は高位発熱量ベース)で除することにより、食品の投入化石資源エネルギーの原油換算量を得ることができる。今回得た精製糖のCO₂排出原単位及び日本LCA学会食品研究会等から発表されている炭水化物・油脂関連食品を選び、そのCO₂排出原単位から原油換算投入化石エネルギーを計算し、食品エネルギー効率を計算した。その結果がTable 4である。精製糖は、その産出・投入エネルギー比は2を超えており、調査した範囲では喫食可能な状態の食品として最もエネルギー効率の高い食品に位置し、食品エネルギー効率が優れた食品と言える。なお、食品産業においては、液体の蒸発を伴う工程を持つ業種は、エネルギー多消費型とされる。甘じゃ原料糖工場は、甘じゃ汁から結晶を取り出す工程を持つので、産業形態はエネルギー多消費型となるものの、Table 4に示すとおり、精製糖の産出・投入エネルギー比が優れているのは、さとうきびからエタノールを生産するときと同様、甘じゃ原料糖

Table 4 The ratio of production-turning on energy about food

Food name	Prediction condition by the piling method	unit	A	B	C	D	Source of A row	Source of C row
			LC-CO ₂	Turning on energy (HHV) equivalent crude oil	Production nourishment energy	The ratio of Production-turning on energy C/B		
			g-CO ₂ /unit	kcal/unit	kcal/unit			
Flour	The first prize storong powder	kg	520	1,816	3,680	2.03	*1	#1
Improvisation chinese noodles	Type of fried bean curd	kg	1,210	4,225	4,580	1.08	*2	#1
Cooking improvisation chinese noodles	Volume of adding water 550ml per a food	A food	152	531	431	0.81	*3	#1
Bread	Production line in large scale company	kg	746	2,607	2,640	1.01	*1	#1
Typical breakfast menu	European style breakfast for 4 persons	4 Feed	1,200	4,190	2,040	0.49	*4	#1
Cleaned rice	Cleaned rice for ordinary family	kg	430	1,502	3,560	2.37	*5	#1
Rice	IH jer cooking rice (720 ml)	kg	298	1,041	1,680	1.61	*6	#1
Soybean oil	with 1L bottle	kg	1,420	4,960	9,210	1.86	*1	#1
Refined sugar (from sugarcane)	The prediction volume of this report	kg	528	1,844	3,840	2.08		#1

Source

*1 Lecture summary collections of research society meeting in Life Cycle Assessment, Japan, (March 2007)

*2 "LCA of food and Index development for sustainable consumption" Report of Food's research society in LCA, Japan

*3 Lecture collections of lecture meeting in Food's research society of LCA, Japan (August 10 2007) pp 114

*4 Menu contents are toasts, salad, yogurt, coffee, fried eggs, derived from "Journal of LCA, Japan vol. 3, No. 3, July 2007 pp 162" We originally used "five correction supplement Japanese food standard ingredients label" to calculate nourish calorimeter.

*5 Untrodden science and technology society: Sustainable production and consumption report of Food's research meeting in LCA, Japan pp 5, pp 8

*6 We used data about cleand rice derived from *4 and about rice derived from Consumer center in Nagoya. (average of 33 times measurement frequencies) <http://www.seikatsu.city.nagoya.jp/test/shibai/MUSENMAI.pdf>

#1 Five correction supplement Japanese food standard ingredients label. The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology report (January 24 2005)

工場においてエネルギー源としてカーボンニュートラルのバガスを使うシステムができているからである。

要 約

5) 結びに

地球温暖化に関心が集まり、企業の環境に対するマネジメントシステムについて ISO14001 の認証取得を受ける企業も多くなり、企業の CSR の最大の関心事として“企業の環境報告書”を出すところも多くなってきた。

今回、さとうきびから精製糖までのライフサイクルにおける CO₂ 排出原単位を詳細な積み上げ方式で算出し、産出栄養エネルギーと投入化石資源エネルギーとの比が 2 を超え、喫食可能食品では最もエネルギー効率が高い食品であることを示した。今後は日本のてん菜原料糖・てん菜糖についても、関係者のご協力を得て詳細な積み上げ方式で算出を試みてみたい。

近年、消費者の環境問題への関心の高まりを受け、精製糖企業はユーザーからライフサイクル全体における CO₂ 排出原単位を求められるケースが出てきている。今回は徳之島とタイ東北部におけるさとうきび栽培、粗糖製造の各段階における CO₂ 排出原単位の算出を試み、その結果を用いて粗糖原産地や構成比についてモデルケースを設定して国産粗糖と輸入粗糖を原料とした精製糖の CO₂ 排出原単位を算出した。

さとうきび栽培において CO₂ 排出原単位を徳之島とタイで比較すると肥料由来と農業機械燃料由来で徳之島が高く、徳之島がタイと比較してさとうきびトン当たりの CO₂ 排出原単位が多い理由となっている。

精製糖工場到着の粗糖製造における CO₂ 排出原単位については徳之島、タイとも原料由来が大きく占め、他

は輸送にかかわる部分である。徳之島とタイで比較すると、タイはバガスボイラによる売電を行っており、タイにおける粗糖のCO₂排出原単位が203 kg-CO₂/t-RSと低くなっている要因である。一方、徳之島では売電も行っていないため、タイより輸送距離が短いにもかかわらず粗糖のCO₂排出原単位は311 kg-CO₂/t-RSとタイの約1.5倍となった。

精製糖製造におけるCO₂排出原単位は徳之島、タイをそれぞれ国産粗糖、輸入粗糖のモデルケースとして算出し、原料糖由来とエネルギー由来が大部分を占め、その結果、精製糖1トンあたりのCO₂排出原単位が534 kg-CO₂/製品-tとなった。

(本報文は2008年5月15日 第106回精糖技術研究会年次大会で発表)

(1) 大聖康弘, 三井物産: バイオエタノール最前線, 工業

調査会 (2004)

- (2) 柴田洋一: エネルギー資源としてのてん菜, 砂糖類情報 (2005)
- (3) 室山勝彦: 食品製造におけるバイオマス廃棄物の利活用CO₂排出に関するライフサイクルインベントリー分析, 2(4), 日本LCA学会誌 (2006)
- (4) 味の素株式会社: 味の素グループ版食品関連材料CO₂排出係数データベース ('90・'95・'00年版3EID対応)
- (5) 資源協会: 家庭生活のライフサイクルエネルギー (1994)
- (6) 佐藤邦光, 辻本進一: 輸入糖を原料とした精製糖のLC-CO₂第2回日本LCA学会研究発表会講演要旨集 (2007)
- (7) S. J. Hassuami, M. R. L. V. Leal, I. deC. Macedo: Biomass power generation; Sugarcane baggase and trash, PNUD & CTC
- (8) 比嘉明美, 伊良部忠雄他: 長期運用が作物と土壌に与える影響, 土壤保全研究室報告書, 沖縄農業試験場 (1997)
- (9) 小林久: 燃料エタノール生産・利用における温室効果ガス排出の削減効果

Summary

Recently, consumers have become concerned about the global environment.

Refinery companies have been requested to calculate the carbon dioxide emission intensity from sugarcane to refined sugar.

In this study, we tried to calculate the carbon dioxide emission intensity from sugarcane cultivation to raw sugar manufacturing. After this, when we established models for raw sugar country of origin and the composition ratios, we were able to calculate the carbon dioxide emission intensity for refined sugar, using domestic raw sugar and import raw sugar.

When we compared the sugarcane cultivation of Tokunoshima (an island located south of Kagoshima City) with that of Thailand, for carbon dioxide emission intensity, the results showed that the value of fertilization and agricultural machine fuel in Tokunoshima was higher than in Thailand. As a result, the large part of carbon dioxide emission intensity of Tokunoshima and Thailand are accounted for by sugarcane production and the remainder is accounted for by transportation.

Comparing Tokunoshima with Thailand, because electric power is sold to a power company by using baggase boiler in Thailand, the value of carbon dioxide emission intensity in Thailand was a value of 203 kg-CO₂/t-RS. In Tokunoshima the value was 311 kg-CO₂/t-RS, 1.5 times that in Thailand, because electric power is not sold in Tokunoshima.

Carbon dioxide emission intensity in refined sugar manufacturing was calculated using the values of raw sugar manufacturing in Tokunoshima and Thailand as the models of domestic raw sugar and import sugar respectively. We calculated a value of 534 kg-CO₂/product sugar-t, as being produced by raw sugar and energy use.