

農産物生産にともなう環境負荷の定量化に関する研究
STUDY ON THE ENVIRONMENTAL LOAD
PERTINENT TO AGRICULTURAL PRODUCTS

水野 隆司*・芥川 崇*・松本 亨*・藤倉 良*・井村 秀文*
Takashi MIZUNO*, Takashi AKUTAGAWA*,
Tohru MATSUMOTO*, Ryo FUJIKURA* and Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; This study presents an estimate of the trade balance of environmental load pertinent to the commercial production and trade of grains. The energy efficiency, i.e., the ratio of the caloric value of the produced grains to the inputted energy for their production is estimated with respect to soybean, wheat, rice and maize in Japan and the United States. The efficiency in Japan is always lower than that in the United States, reflecting Japan's "intensive" agricultural practices. As for Japanese rice, the ratio proves as small as between 1.01 and 1.64. Furthermore, the international flow of the nitrogen nutrient associated with the trade of agricultural products and fertilizers is estimated. It is found that Japan accumulated 480 thousands tons of nitrogen in 1994 as a result of her import of 600 thousands tons incorporated in agricultural products and her export of 180 thousands tons in fertilizers.

KEYWORDS; trade and environment, energy input for agricultural production, international flow of the nitrogen, ecobalance, fertilizers

1. はじめに

世界経済のグローバル化に伴い、貿易が環境に及ぼす影響が注目を集めている。工業製品については、輸出品の生産拡大にともなう輸出国における汚染物質の排出量増大が懸念されている。商業的食糧生産については、農業機械の使用、水や肥料の消費に伴う環境へのインパクトが、輸出拡大にともなって増大する。逆に見れば、食糧輸入国は輸入食糧の消費によって、間接的に輸出国(生産国)の環境負荷を増加させていると言える。とりわけアジア地域では、人口が多い上に、経済発展が目覚ましく、今後その食生活が変化すれば、食糧貿易を通じて地球規模の物質循環に、大きな影響を及ぼすと考えられる。

筆者らの試算によると、日本が輸入する農産物のために、アメリカ、カナダ、オーストラリアの3ヶ国において合計約2,700万ヘクタール(日本の国土の約70%に相当)の農地が使用されている。同様に、淡水資源については、3ヶ国で合計年間約100億トンの農業用水が、肥料では、3ヶ国で合計年間約14万トンの窒素肥料が日本向け輸出のために使用されている。¹⁾

ただし上の研究では、農産物生産のために投入される肥料・農薬、機械等の生産により誘発されるエネルギー消費などの間接的な環境負荷は考慮に入っていない。また、農産物生産及び貿易と物質循環との関わりについても検討はしていない。

本研究では以下の二つについて研究を行う。第一に、農業生産のために投入される各種資材や製品(肥料・農薬、機械など)の生産までを考え、環境負荷の全体を考慮に入れた上で、農産物生産にともなう環境負荷の定量的評価を試みる。ここでの環境負荷指標としてはエネルギー消費量を使用する。次に、農産物貿易による窒素の流れを定量的に評価する。

*九州大学工学部環境システム工学研究センター

*Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

2. 農産物生産に投入されるエネルギー

本研究では農産物生産に直接投入されるエネルギー（電気、石油）だけでなく、肥料・農薬、機械の製造により誘発される間接的な環境負荷までを考慮に入れ、農産物生産全体に投入されるエネルギー量を推計する。

表1 肥料生産原単位
(TOE/t)

N	1.87
P ₂ O ₅	0.42
K ₂ O	0.33

2.1 肥料の生産エネルギー

各国の肥料データ²⁾に、単位重量当たりのエネルギー投入量³⁾（エネルギー原単位、表1）を乗じて生産に必要なエネルギーを求める。ここでは、肥料の生産方法はどの国においても同一のものであると仮定し、各国に同じエネルギー原単位を使用した。

結果を図1に示す。アメリカと中国で肥料生産に投入されるエネルギーが他の国と比較して大きなものとなっている。特に中国は、1970年代から急激な伸びを示している。図2に単位面積あたりの施肥量を示す。日本とアメリカの単位面積あたりの施肥量はほぼ横這いである。これに対し中国は1970年に約10kg/haであったのが、1991年には約60kg/haと6倍に伸長している。この単位面積あたりの施肥量の増大が、中国の肥料生産に投入されるエネルギーの急激な伸びの一因になっている。

図3にアメリカの肥料生産の内訳を示す。窒素肥料の生産に投入されたエネルギーが、リン酸肥料・カリ肥料の生産に投入されたエネルギーより大きいことが顕著である。表1は各肥料の製造原単位であるが、窒素肥料の原単位は他の数倍大きい。これは、窒素肥料が製造される過程において、石炭を原料として多量に消費するが、この分をエネルギー投入として勘定しているためである。この結果として、窒素肥料の見かけ上の製造エネルギーはリン酸肥料やカリ肥料よりもかなり大きくなっている。⁴⁾

2.2 各農産物のエネルギー投入量

日本とアメリカの農産物について、生産のために用いられるエネルギー量と生産物である食料に含まれるエネルギー量とを比較し、農業生産におけるエネルギー産出/エネルギー投入量の比を評価する⁵⁾。計算の対象とする農産物は、日本は、小麦・大豆・米、アメリカは、小麦・大豆・とうもろこしとした。

エネルギー投入量は、肥料・農薬・農業機械の生産により誘発されるエネルギー量と電気・石油使用量⁶⁾⁷⁾との総和とした。農業・機械製造

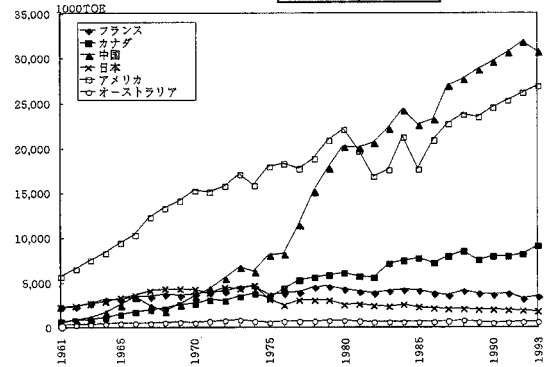


図1 各国の肥料生産への投入エネルギー
(1000TOE)

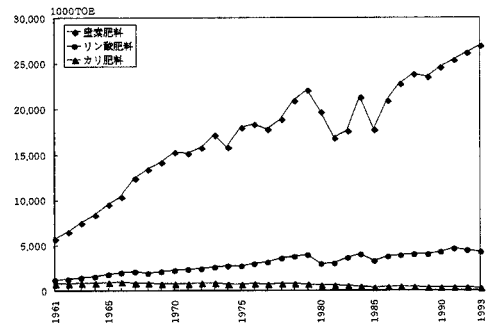


図2 肥料生産への投入エネルギー
(米国、1000TOE)

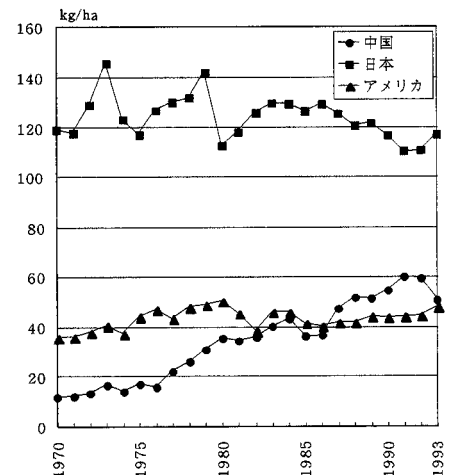


図3 単位面積当たりの施肥量 (kg/ha)

表2 農産物生産への投入エネルギー
(アメリカ, TOE)

		1985	1990	1994
大豆	a エネルギー産出	24.735	22.696	29.662
	肥料	1.413	1.296	1.396
	電気・石油	2.176	1.996	2.149
	農薬	754	957	1.138
	農業機械	83	56	58
	b 合計	4.425	4.305	4.742
	a/b 投入比	5.59	5.27	6.26
小麦	a エネルギー産出	22.530	-	-
	肥料	2.382	-	-
	電気・石油	2.901	-	-
	農薬	272	-	-
	農業機械	89	-	-
	b 合計	5.645	-	-
	a/b 投入比	3.99	-	-
とうもろこし	a エネルギー産出	78.909	70.537	89.820
	肥料	8.873	7.899	8.602
	電気・石油	5.117	4.547	4.948
	農薬	1.447	1.253	1.407
	農業機械	367	117	188
	b 合計	15.803	13.815	15.145
	a/b 投入比	4.99	5.11	5.93

表3 農産物生産への投入エネルギー
(日本, TOE)

		1985	1990	1994
大豆	a エネルギー産出	-	113	41
	肥料	-	8	3
	電気・石油	-	356	12
	農薬	-	55	2
	農業機械	-	15	4
	b 合計	-	435	22
	a/b 投入比	-	0.261	1.89
小麦	a エネルギー産出	291	317	188
	肥料	42	47	27
	電気・石油	99	57	38
	農薬	71	9	5
	農業機械	35	34	11
	b 合計	248	147	81
	a/b 投入比	1.17	2.16	2.31
米	a エネルギー産出	4.093	3.685	4.205
	肥料	637	554	601
	電気・石油	2,120	1,310	1,331
	農薬	230	173	152
	農業機械	1,078	525	475
	b 合計	4,064	2,572	2,569
	a/b 投入比	1.01	1.43	1.64

1TOE = 10⁷ kcal

注 合計とは肥料、電気・石油、農薬、農業機械の総和である

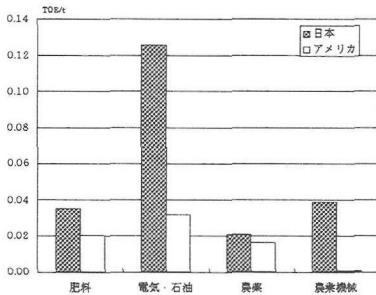


図4 1 トンあたりのエネルギー投入の日米比較
(大豆, 1985年)

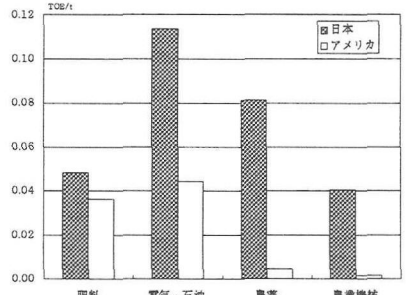


図5 1 トンあたりのエネルギー投入の日米比較
(小麦, 1995年)

に投入されるエネルギーは、各作物の農薬・農業機械への支払金額⁸⁾⁹⁾に産業連関表より求めたエネルギー原単位¹⁰⁾(単位金額当たりのエネルギー投入量)を乗じて求めた。エネルギー産出量は、各農産物の100グラムあたりのエネルギー(kcal)¹¹⁾から求めた。

表2と3に計算結果を示す。疎放的大規模農業のアメリカの場合、どの作物においてもエネルギー産出/エネルギー投入量の比は3.99～6.26である。これに対し、集約的農業の日本の場合には、この比は1.01～2.31前後となり、投入に対する算出で見た場合のエネルギー算出は低い。

図4と5に日本とアメリカの各農産物生産量1トン当たりのエネルギー投入を示す。すべての農産物・投入資材において日本はアメリカより高い数値を示している。とりわけ、農業機械における格差が大きい。1000ヘクタール当たりのトラクター使用台数²⁾は、アメリカが1970年から1993年までの間、約10台のレベルに留まっているのに対し、日本は1970年の約50台が、1993年には約400台と8倍に伸びている。この結果、日本の農業機械使用におけるエネルギー投入量が増大した。日米間のスケールメリットの違いが顕著に現われている。

また、大豆では電気・石油、小麦では農薬におけるエネルギー投入量の日米間の違いが目立つ。

3. 食糧供給と窒素の流れ

3.1 農耕地における窒素の流出

2.2で対象とした農産物について、農耕地における窒素肥料投入量と収量との関係を表4と5に示す。農産物中の窒素含有量は、主要国食糧需給表¹²⁾に示される各食品項目ごとの蛋白質含有量を窒素・蛋白質換算係数¹¹⁾(表6)で除すことにより求めた。各農産物の窒素肥料投入量から収穫農産物中の窒素の量を減じたものを窒素流出量(overflow)とした。

日本、アメリカのいずれにおいても窒素固定する大豆以外の農産物の生産により窒素の流出が生じている。小麦に比して米，とうもろこしの窒素流出量が多いことがわかる。また，小麦の場合では，集約的な日本がアメリカの3倍以上，窒素を流失させている。

3.2 窒素の国際的な流れ

3.2.1 計算方法

国際的取引の大きい農産物である小麦，とうもろこし，大豆，米，その他の穀物，牛肉，野菜，果実と窒素肥料の貿易について，日本，アジア，ヨーロッパ，北アメリカ，ラテンアメリカ，アフリカ，オセアニアの各地域間の窒素のフローを1980，85，90，94年について算定する。農産物の貿易量には，国連商品貿易統計¹³⁾を用いた。また，農産物の窒素含有量は3.1と同様にして求めた。

3.2.2 計算結果

3.2.1で示した方法により求めた結果を各地域間の窒素のフローを表7に示す。1994年に日本は，農産物を通じて年間約60万トンの窒素を輸入したが，農産物を通じての窒素輸出は極めて少量であり，日本への農産物貿易を通じた窒素の流れは大きく流入超過となっている。窒素肥料に着目すると，日本はその取り引きを通じて年間約18万トンの窒素を輸出している。特に，アジア地域への輸出が顕著である。窒素の流れで見ると，日本には，北アメリカからの農産物を通じて窒素が流入しており，アジア地域へ窒素肥料を通じて流出していることがわかる。また，1994年にアメリカは農産物を通じて年間約180万トンの窒素を輸出している。その相手先としては，アジア地域が最大である。

図6と7に日本の貿易に伴う窒素フローの収支を示す。1980年の日本国内には，貿易に伴い約17万トンの窒素が増えたことになる。1994年では，この値は約48万トン増加している。日本国内において増加した窒素のうち，農耕地に固定されるものを試算する。農耕地における窒素固定速度の推定は難しく，信頼すべきデータは少ないが，日本のように温帯の比較的肥沃な耕地では30kg/ha/年

表4 日本の農耕地における窒素バランス (kg-N/ha)

		1985	1990	1994
米	窒素肥料施肥料	118	118	118
	作物中の窒素分	35	36	38
	Over flow	82	82	79
大豆	窒素肥料施肥料	15	15	15
	作物中の窒素分	101	110	96
	Over flow	-86	-95	-81
小麦	窒素肥料施肥料	72	72	72
	作物中の窒素分	53	52	53
	Over flow	19	20	19

表5 アメリカの農耕地における窒素バランス (kg-N/ha)

		1985	1990	1994
とうもろこし	窒素肥料施肥料	133	133	133
	作物中の窒素分	55	55	64
	Over flow	79	79	69
大豆	窒素肥料施肥料	12	12	12
	作物中の窒素分	136	136	165
	Over flow	-123	-123	-152
小麦	窒素肥料施肥料	42	42	42
	作物中の窒素分	36	38	36
	Over flow	6	4	6

表6 窒素—蛋白質換算係数

小麦	5.83
米	5.95
大豆	5.71
その他	6.25

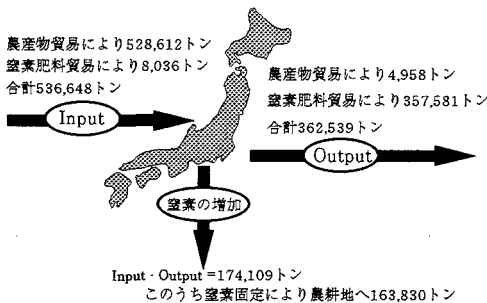


図6 日本の窒素フローの収支
(1980年, 単位:t)

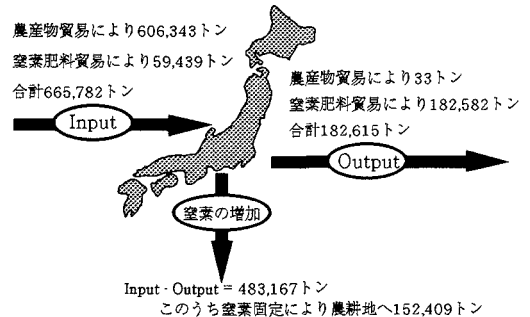


図7 日本の窒素フローの収支
(1994年, 単位:t)

表7 窒素の流れ (単位:T-N)

	年	アフリカ	北米	カナダ	アメリカ	中南米	アジア	日本	ヨーロッパ	オセアニア	オーストラリア	合計	
アメリカ 輸入	1980	農産物	20	6,150	3,836	—	6,629	78	1	217	11,223	7,955	24,317
		窒素肥料	—	275,310	275,310	—	14,140	1,989	1,881	143,787	—	—	435,225
	1985	農産物	25	16,079	16,079	—	8,574	593	4	6,624	10,183	5,802	42,079
		窒素肥料	220	321,770	321,770	—	14,657	25,047	2,792	291,640	14,923	—	668,256
	1990	農産物	9	32,374	28,551	—	7,589	1,227	7	1,190	12,167	7,909	54,557
		窒素肥料	2,536	429,180	429,180	—	83,439	8,680	551	189,330	—	—	713,166
	1994	農産物	29	106,569	106,569	—	9,157	2,055	18	12,921	9,875	6,057	140,606
		窒素肥料	31,166	556,370	556,370	—	126,490	75,624	398	279,450	—	—	1,069,100
輸出	1980	農産物	77,137	29,718	29,681	—	265,112	807,611	408,479	959,909	1,874	1,771	2,141,360
		窒素肥料	17,519	35,376	35,359	—	352,130	181,724	—	160,519	11,064	5,875	758,333
	1985	農産物	105,253	12,204	12,171	—	230,082	715,540	397,427	521,178	163	74	1,584,421
		窒素肥料	13,635	29,805	29,762	—	103,822	91,108	813	8,707	7,457	—	247,077
	1990	農産物	98,550	29,352	29,314	—	221,799	783,260	320,205	482,833	5,591	4,129	1,621,385
		窒素肥料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1994	農産物	170,653	15,393	15,364	—	352,228	881,039	369,275	456,164	6,882	6,661	1,882,358
		窒素肥料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
カナダ 輸入	1980	農産物	—	39,465	—	39,465	—	6	—	4	1,027	495	40,503
		窒素肥料	—	26,405	—	26,405	—	—	—	2,042	—	—	28,446
	1985	農産物	—	18,386	—	18,386	2,221	90	—	401	937	432	22,035
		窒素肥料	—	35,927	—	35,927	4,460	—	—	14,882	—	—	55,269
	1990	農産物	17	24,297	—	24,297	721	309	—	83	1,236	707	26,663
		窒素肥料	8,540	36,049	—	36,049	—	1,832	—	27,194	—	—	73,615
	1994	農産物	30	11,271	—	11,271	408	467	5	127	2,487	1,342	14,790
		窒素肥料	—	18,562	—	18,562	—	10,912	—	56,126	—	—	—
輸出	1980	農産物	16,049	11,016	—	51,658	45,356	90,691	30,766	63,998	14	1	227,123
		窒素肥料	—	278,760	—	278,530	1,996	17,182	—	138	4,868	4,868	302,945
	1985	農産物	23,332	18,887	—	18,873	31,684	102,373	36,608	39,926	153	137	216,357
		窒素肥料	2,469	299,230	—	299,230	5,314	40,499	—	1,826	12,863	12,863	362,201
	1990	農産物	23,084	41,874	—	43,643	30,046	172,361	21,396	11,253	154	140	278,772
		窒素肥料	840	431,020	—	431,020	12,166	11,582	1,055	9,258	31,514	31,001	496,379
	1994	農産物	28,585	120,298	—	120,346	58,197	202,361	37,775	24,964	1,315	966	435,720
		窒素肥料	—	560,050	—	560,050	19,802	1,220	1,159	87	42,578	34,561	623,737
日本 輸入	1980	農産物	6,735	473,624	33,055	439,888	4,525	9,444	—	557	33,728	33,557	584,577
		窒素肥料	—	230	—	230	5,060	1,039	—	1,707	—	—	8,036
	1985	農産物	575	461,540	37,861	423,642	36,408	42,361	—	2,418	41,276	40,936	584,577
		窒素肥料	—	1,431	—	1,431	3,818	8,522	—	1,890	—	—	15,661
	1990	農産物	7,989	433,659	41,675	395,196	64,207	30,864	—	1,950	27,839	27,313	566,510
		窒素肥料	—	7,856	1,147	6,709	—	44,886	—	7,254	—	—	59,996
	1994	農産物	15,104	425,939	41,283	384,668	64,832	49,817	—	8,239	42,412	41,553	606,343
		窒素肥料	—	6,662	1,159	5,503	87	43,076	—	7,946	1,668	1,668	59,439
輸出	1980	農産物	838	11	10	1	72	4,036	—	—	2	—	4,958
		窒素肥料	3,113	—	—	—	2,554	336,260	—	—	15,654	—	357,581
	1985	農産物	1	17	14	2	—	17	—	—	—	—	34
		窒素肥料	8,271	332	—	328	752	151,003	—	—	9,821	233	170,179
	1990	農産物	—	11	8	2	—	19	—	—	—	—	30
		窒素肥料	9,074	490	—	486	3,176	159,278	—	—	1,746	113	173,764
	1994	農産物	—	22	4	18	—	10	—	1	—	—	33
		窒素肥料	207	261	—	251	4,166	176,622	—	15	1,266	141	182,528
オーストラリア 輸入	1980	農産物	—	1,857	—	1,856	—	5	—	—	67	—	1,929
		窒素肥料	—	13,768	8,380	5,388	—	92	92	2,332	—	—	16,192
	1985	農産物	—	—	—	—	—	—	—	—	155	—	155
		窒素肥料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1990	農産物	—	42	2	39	—	—	—	7	7	—	55
		窒素肥料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1994	農産物	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		窒素肥料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
輸出	1980	農産物	26,714	8,185	543	7,641	4,317	144,610	32,247	2,351	3,105	—	189,283
		窒素肥料	—	—	—	—	—	—	—	—	5,086	—	5,086
	1985	農産物	38,190	6,544	470	6,072	9,656	227,138	44,318	1,212	3,632	—	286,371
		窒素肥料	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1990	農産物	26,876	9,632	791	8,841	3,287	188,519	27,671	2,907	5,069	—	236,290
		窒素肥料	—	—	—	—	—	12,631	—	—	3,233	—	15,864
	1994	農産物	211	7,268	1,345	5,922	73	18,057	11,577	741	707	—	27,056
		窒素肥料	—	—	—	—	—	9,648	1,775	446	8,513	—	18,606
フランス 輸入	1980	農産物	851	55,219	1,877	53,342	9,139	1,149	—	18,768	45	—	85,170
		窒素肥料	689	113,574	—	113,574	—	—	—	303,600	—	—	417,863
	1985	農産物	749	29,636	1,646	27,974	12,671	1,354	—	17,392	17	—	61,819
		窒素肥料	3,082	20,141	—	20,141	3,478	—	—	601,450	—	—	628,151
	1990	農産物	891	10,996	653	10,346	13,225	1,924	—	27,200	41	—	54,278
		窒素肥料	39,038	144,432	15,807	140,797	15,420	22,280	—	753,710	—	—	974,880
	1994	農産物	1,084	18,971	6,043	12,928	11,065	2,006	—	30,767	121	—	64,013
		窒素肥料	29,542	19,219	—	19,193	16,826	643	—	687,240	—	—	753,470
輸出	1980	農産物	49,973	6	4	3	2,039	18,869	2	176,248	6	—	247,141
		窒素肥料	29,625	—	—	—	7,371	28,031	—	70,164	—	—	135,192
	1985	農産物	57,531	24	6	17	4,423	23,241	5	213,125	24	—	298,368
		窒素肥料	18,757	436	651	286	2,490	17,146	—	110,863	—	—	149,692
	1990	農産物	66,655	14	3	11	4,816	43,615	5	241,911	41	—	357,052
		窒素肥料	5,315	5,953	400	5,861	6,300	7,230	—	129,239	—	—	154,036
	1994	農産物	15,312	23	5	19	15,664	27,133	11	233,099	45	—	291,277
		窒素肥料	9,625	4,948	5,474	3,688	12,212	6,151	—	180,446	2,951	2,934	216,334

注 農産物とは小麦、とうもろこし、大豆、米、その他の穀物、牛肉、野菜、果実の取引量の総和を示す。

程度とされる¹⁴⁾。これより日本の農耕地における窒素固定量は、1980年には約16万t/年、1994年には約15万t/年と算定できる。貿易に伴い日本国内において増加した窒素のうち、この窒素固定量を除いた値は、1980年には約1万トンであったのが、1994年には約33万トンと増加している。この増加分は、大気中に放出されたか、水および土壌環境に形で放出されたと考えられる。

4. おわりに

(1) 日本と米国の農産物生産におけるエネルギー効率を比較すると、集約的な農業を行っている日本農業のエネルギー効率の低さが再確認できた。とりわけ、米生産のエネルギー効率が低い。すなわち、輸送エネルギーを考慮せずに生産エネルギー消費の観点だけから見れば、日本は国内で農業生産を行うより、米国で生産された穀物を輸入した方が効率的であり、環境負荷もそれだけ小さいことを意味する。

(2) 日本は年間約60万トンの窒素を農産物として輸入し、年間約18万トンの窒素を窒素肥料として輸出している。国内の農耕地で固定される窒素量を差し引いても、日本国内で貿易にともない増加する窒素量は、1980年に約17万トンあり、さらに1994年には約48万トンへと増加している。

(3) 財・サービスの輸出入は、その財・サービスの生産によって発生する環境負荷の取り引きにはかならない。自由貿易体制の下での国同士の交易は比較優位の原則に従って行われている。環境容量の大きな国は、その容量を資源として利用することによって相対的に有利な条件で生産し、それを輸出することが出来る。それ自体は何ら批判されるべきことではない。しかし、他方で、現在の自由貿易体制が地域や国単位での食糧自給、資源循環のシステムを崩壊させつつあるとの強い批判もある。これら2つの異なる立場からの議論が互いに接点を持つためには、地域レベルでの物質循環や資源リサイクルの価値をどう評価するかが今後の1つの課題となろう。

参考文献

- 1) 芥川崇・井村秀文ほか：輸入農産物の国外環境負荷に関する研究，第4回地球環境シンポジウム講演集，pp.217-222，1996
- 2) FAO: FAOSTAT PC(1995)
- 3) Z. R. Helsel: Energy in Farm Production, vol. 6 in Energy in World Agriculture, pp. 177-201, 1992
- 4) 農林水産省肥料機械課監修：ポケット肥料要覧，農林統計協会，1996
- 5) 久馬一剛・祖田修：農業と環境，pp.13-20，1995
- 6) U. S. Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service. Agricultural Prices. Annual summaries. 1990, 1994
- 7) 日本エネルギー経済研究所：エネルギー・経済統計要覧，1995
- 8) 農林水産省統計情報部，ポケット農林水産統計，1996，1993，1989，
- 9) U. S. Department of Agriculture, Economics Research Service, Economic Indicators of the Farm Sector, 1995
- 10) 白土広信：国際貿易に付随した環境負荷移動に関する研究，九州大学修士論文，1995
- 11) 科学技術庁資源調査会：日本食品成分表，医歯薬出版，1992
- 12) FAO：主要国食糧需給表，1991
- 13) 国際連合：Commodity Trade Statistics, 1980, 1985, 1990, 1994
- 14) 川島博之：わが国における食料供給と窒素循環，環境科学会誌，第9巻第1号，pp.27-33，1996