

農業・廃棄物部門における CH₄と N₂O の排出量 とその削減ポテンシャルの将来推計

長谷川知子¹・花岡達也²・松岡 譲³

¹ 学生会員 京都大学大学院地球環境学舎環境マネジメント専攻 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail: thasegawa@globalenv.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 国立環境研究所 研究員(〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

³ 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科・地球環境学舎

農業部門・廃棄物部門でのメタン(CH₄)と亜酸化窒素(N₂O)の排出削減対策は二酸化炭素(CO₂)より比較的安価であるため、京都議定書の削減目標の達成に向けた取り組みとして着目されている。本研究では世界 67 地域を対象にこれらの部門における 2000 年から 2030 年の排出インベントリを構築し、対策技術の導入にかかる費用と削減ポテンシャルを評価した。その結果、削減効果が期待できる地域は、アジア、南米、アフリカであり、その排出源は家畜反芻、家畜糞尿管理、廃棄物部門であった。高い削減効果が見込まれる対策技術は、家畜飼料の変更、廃棄物の嫌気発酵処理であり、比較的安価な対策は、家畜飼料の変更や糞尿の嫌気発酵処理であることがわかった。

Key Words: methane, nitrous oxide, agriculture, waste, mitigation options, reduction potential, cost analysis

1. 背景・目的

IPCC は第 4 次報告書¹⁾の中で、地球の平均気温は過去 50 年間に起こった気温上昇の主要因は温室効果ガス(以下、GHG)である可能性が極めて高いと報告している。このまま温暖化が進むと非常に深刻な問題が予想されるため、大気中の GHG 濃度の安定化に向けて、国際的な取り組みがなされるようになった。地球温暖化対策における重要な課題として、CO₂に加えて CH₄、N₂O、HFC、PFC、SF₆を含めた多様な温室効果ガスを対象とした削減対策が挙げられる。本研究で対象とする CH₄、N₂O は CO₂に比べてそれぞれ 21 倍、310 倍と高い地球温暖化係数を有しており、温暖化への寄与率はそれぞれ 19.8%、6.2%である(IPCC,2001)²⁾。CH₄は主に家畜の糞尿処理、家畜の反芻作用や埋立て処分場から排出され、N₂O は窒素肥料を投与した農耕地土壌から排出される。農業部門での削減対策は CO₂より比較的安価であるため、削減目標の達成に向けた取り組みとして着目されており、行動計画の策定のため排出量の解明と重点的に対策を講ずる必要のあるポテンシャルの高い排出源や優先すべき技術と地域の特定が必要となっている。

このような背景を受け、本研究では世界 67 地域を対象に 2000 年から 2030 年の農業部門、廃棄物部門における CH₄、N₂O の排出インベントリを構築し、対策技術の導入にかかる費用と排出削減対策による削減可能な GHG

量を評価した。

2. 排出量の将来推計

(1) 推計方法

a) 対象地域と排出部門

本研究では、Hertel(2005)³⁾を基にした表-1 に示す世界 67 地域を対象とする。また表-2 に CH₄及び N₂O の排出部門と各部門における排出源の分類を示す。

表-1 世界 67 地域

対象地域		
オーストラリア	アルゼンチン	その他のヨーロッパ
ニュージーランド	ブラジル	アルバニア
その他オセアニア	チリ	ブルガリア
中国	ウルグアイ	チェコ
日本	その他の中央アメリカ	キプロス
韓国	その他中南米	ハンガリー
インドネシア	オーストリア	マルタ
マレーシア	ベルギー	ポーランド
フィリピン	デンマーク	ルーマニア
タイ	フィンランド	旧ソビエト連邦
ベトナム	フランス	トルコ
バングラデシュ	ドイツ	その他の中東
インド	イギリス	モロッコ
スリランカ	ギリシャ	チュニジア
その他アジア	アイルランド	その他の北アフリカ
カナダ	イタリア	ボツワナ
アメリカ	オランダ	南アフリカ
メキシコ	ポルトガル	モザンビーク
その他の北アメリカ	スペイン	タンザニア
コロンビア	スウェーデン	ザンビア
ペルー	スイス	ジンバブエ
ベネズエラ	その他のヨーロッパ	その他アフリカ
その他のアンデス	自由貿易協定	
地域統合協定		

表-2 CH₄およびN₂Oの排出部門と排出源の分類

排出部門	排出源の分類
家畜反芻・ 家畜糞尿管理	対象家畜
	牛(乳牛、肉牛) バックファロー
	羊 山羊
	ラクダ 馬
	ラバ ロバ
農耕地土壌	豚 鶏
	アヒル 七面鳥
	対象作物
	米 小麦
	大麦 とうもろこし
稲作	ダイズ サトウキビ
	てんさい ジャガイモ
	米
廃棄物管理	廃棄物分類
	埋立て処分・紙 埋立て処分・繊維
	埋立て処分・木材 埋立て処分・厨芥
	焼却 コンポスト
	野焼き

b) 農業部門

CH₄、N₂Oの排出量の推計方法はIPCC(2006)⁹⁾のTier 1に基づき、排出源となる家畜の頭数や農耕地の面積を算出し、排出源1単位当たりのGHG排出量(以下、排出係数)を乗ずることで算出した。排出係数はIPCC(2006)の地域分類を、地理的気候の条件や経済状況を考慮し、対象とする世界67地域に割り当てた。

本研究で用いたデータを表-3に示す。基準年2000年の農耕地面積や家畜頭数は、FAOSTAT⁹⁾が示す値を世界67地域に集約した。IFPRI(2002)⁹⁾やFAO(2002)⁷⁾の将来推計値から成長率を算出し、これを用いて将来値を算出した。農耕地への窒素肥料投入量についてはIFA/FAO/IFDC(1999, 2002)⁹⁾から平均窒素肥料投入量を求め、これを基準値とし、FAO(2002)の将来値から成長率を求め、2030年まで算出した。農耕地に投入された窒素肥料の排出係数、土壌中の鉱石由来の排出係数は、0.01[kgNout/kgNin]、8.0[kgN/ha]を用いた(IPCC, 2006)。

表-3 本研究で用いたデータ

データ	対象年	対象地域	文献
人口	1950-2050	世界226カ国	UN, 2004 ¹⁰⁾
都市人口	1950-2030	世界226カ国	UN, 2005 ¹¹⁾
GDP	1965-2004	世界208カ国	WDI, 2006 ¹²⁾
GDP (PPP)	2000-2100	世界11地域	IPCC, 2000 ³³⁾
農耕地面積	1965-2004	世界208カ国	WDI, 2006 ¹²⁾
家畜頭数	2000	世界248カ国	FAOSTAT ⁵⁾
農耕地面積	2000	世界248カ国	FAOSTAT ⁵⁾
家畜生産量	1995-2025	世界38地域	IFPRI, 2002 ⁹⁾
家畜生産量	1997-2030	世界8地域	FAO, 2002 ⁷⁾
窒素肥料投入量	1990-2000	世界106カ国	IFA/FAO/IFDC, 1999 ⁹⁾ , 2002 ⁷⁾
肥料消費量	1997-2030	世界12地域	FAO, 2002 ⁷⁾
気温	1971-2000	世界152カ国	気象庁 ¹³⁾
エネルギー中間投入額、投入量	2001	世界85カ国	GTAP, 2005 ³⁾
廃棄物発生量	1995-2003	欧州29カ国	EEA, 2005 ¹⁴⁾
	1996, 2000	世界23地域, 69カ国	IPCC, 2006 ⁴⁾

c) 廃棄物部門

廃棄物部門におけるCH₄、N₂Oの排出量の推計方法に

ついてはIPCC(2006)のTier 1に基づき、地域別に処理方法別廃棄物を算出し、同文献の排出係数を用いて算出した。今回、CH₄、N₂Oの排出量推計においては一般廃棄物からの排出のみを考慮し、IPCC(2006)から世界13地域と74カ国の廃棄物管理方法別割合を用いて、埋立て処分、焼却、コンポストの3つの処理方法に分類し、同文献から排出係数を得た。

過去の国別一人当たりの廃棄物発生量(以下、MSWcap)(IPCC, 2006, EEA, 2005¹⁴⁾)と同年の一人当たりGDP(以下、GDPcap)から関係式を作成し、地域別廃棄物発生量を算出した。GDPが1万US\$に達するまではMSWcapはGDPcapの増加に伴って急激に増加するが、それを越えると緩やかに増加する。将来のGDPcapについては、人口はUN(2004)¹⁰⁾の中位推計の値を用い、GDPはSRES B2シナリオを169カ国に案分したものをを用いた。対象人口は廃棄物を回収する人口のみを考慮するため、先進国では国内総人口、途上国では都市人口(UN, 2005)¹¹⁾とした。

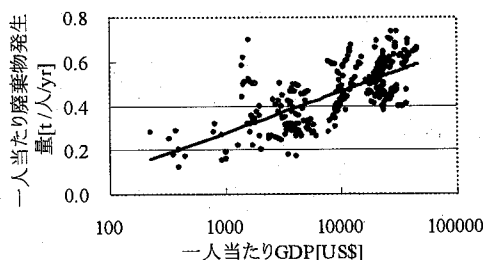


図-1 GDPcapと1人当たり廃棄物排出量の関係

(2) 結果

a) 現在までの排出量

排出量の推計結果を部門毎、地域毎にそれぞれ表-4、表-5に示す。2000年における農業、廃棄物部門のCH₄、N₂Oガスの排出総量は7589MtCO₂eqとなり、そのうち農業由来が6679MtCO₂eq、廃棄物由来が910MtCO₂eqとなった。

農業部門に関しては、排出総量の37.0%が農耕地土壌、30.3%が家畜反芻に起因している。USEPA(2006a)¹⁵⁾では、2005年に農業由来の排出量は5573MtCO₂eqで農耕地土壌からのN₂O(47.5%)と家畜反芻によるCH₄(33.3%)に起因すると示しており、それに類似する結果となった。地域別に見ると、農業由来の排出量の約半数の46.6%を中国、インドを含めるアジア地域が占め、次いで南米地域(13.3%)、アフリカ(9.1%)での排出量が多いことがわかった。これらもまた家畜反芻と農耕地土壌が主要因であり、USEPA(2006a)と類似した結果となった。

廃棄物部門に関しては、2000年で世界での廃棄物発生量が年間約11億トンで、このうち67%が埋立て処分さ

表-4 排出源別排出量の比較

排出量 [MtCO ₂ eq]	本研究(基本ケース)								①**				②**	③**	④**	
	排出部門	対象ガス	排出量*				増加率		排出量*				増加率		排出量	
			2000年	2005年	2020年	2030年	2000-2030	2005-2020	1990年	2005年	2020年	2005-2020	2000年	2000年	2000年	2030年
家畜反芻	CH ₄	2027	2097	2331	2509	24%	11%	1649	1854	2243	21%	1680	1745	-	-	
		30.3%	30.6%	31.6%	32.5%			34.3%	33.3%	32.8%						
家畜糞尿	CH ₄	341	349	375	395	16%	7%	389	436	510		-	429	-	-	
		5.1%	5.1%	5.1%	5.1%			8.1%	7.8%	7.5%	17%	-	2607	-	-	
	N ₂ O	795	829	943	1032	30%	14%	8.1%	7.8%	7.5%		-				
		11.9%	12.1%	12.8%	13.4%			2190	2646	3351	27%	819	649	-	-	
農耕地土壌	N ₂ O	2472	2529	2726	2810	14%	8%	45.5%	47.5%	49.0%						
37.0%		36.9%	37.0%	36.4%			583	637	740	16%	-	-	-	-		
稲作	CH ₄	1044	1045	993	970	-7%	-5%	12.1%	11.4%	10.8%						
15.6%		15.3%	13.5%	12.6%			4811	5573	6843	42%	2499	5430	-	-		
農業部門	CH ₄ +N ₂ O	6679	6849	7368	7717	16%	8%	100%	100%	100%						
廃棄物部門	CH ₄ +N ₂ O	910	1017	1425	1755	93%	40%	760	820	1000	22%	1386	803	450	1500	
		100%	100%	100%	100%			6393	7843	23%	3885	6233	-	-		
排出総量	CH ₄ +N ₂ O	7589	7866	8794	9472	25%	25%	5571	6393	7843	23%	3885	6233	-	-	

*排出量の農業部門の下段の割合は部門内の内訳[%]を示す。

**①USEPA, 2006a¹⁵⁾, ②Olivier et al., 2005¹⁶⁾, ③Weyant et al., 2006¹⁷⁾, ④Monni et al., 2006¹⁸⁾表-5 2000年、2030年における地域別CH₄、N₂O排出量

CH ₄ +N ₂ O 排出量 [MtCO ₂ eq]	農業部門								廃棄物部門		
	本研究(基本ケース)							文献値**	本研究		
	2000*					2030	2000-2030	1990-2020	2000	2030	2000-2030
	家畜反芻	家畜糞尿	農耕地土壌	稲作	合計	合計	増加率	増加率	排出量	排出量	増加率
日本	8	9	10	17	44	35	-20%	-	13	13	0%
中国	18.8%	21.1%	21.8%	38.3%	0.7%						
	203	136	420	284	1043	1184	14%	-	123	350	185%
インド	19.4%	13.1%	40.3%	27.2%	15.6%						
	290	113	377	264	1044	1058	1%	52%	46	141	209%
その他 アジア地域	27.8%	10.8%	36.1%	25.3%	15.6%						
	187	116	345	382	1031	1153	12%	54%	79	238	201%
北米	18.2%	11.3%	33.5%	37.0%	15.4%						
	270	197	246	12	726	787	8%	16%	158	219	38%
南米	37.2%	27.2%	33.9%	1.7%	10.9%						
	428	150	272	39	890	1200	35%	55%	94	171	82%
西欧	48.1%	16.9%	30.6%	4.4%	13.3%						
	201	112	198	9	520	538	3%	-14%	160	181	13%
東欧	38.7%	21.6%	38.1%	1.7%	7.8%						
	41	24	118	1	184	222	21%	-3%	47	75	60%
中東	22.1%	13.3%	64.3%	0.3%	2.8%						
	13	10	26	1	50	62	23%	81%	49	98	102%
アフリカ	26.3%	19.7%	52.1%	1.9%	0.8%						
	255	169	153	31	608	886	46%	70%	55	157	185%
オセアニア	42.0%	27.8%	25.1%	5.0%	9.1%						
	73	48	68	1	190	202	6%	-	23	33	44%
ロシア	38.4%	25.0%	35.9%	0.7%	2.8%						
	56	50	238	5	349	389	12%	-22%	64	81	25%
世界	16.1%	14.4%	68.2%	1.3%	5.2%						
	2027	1136	2472	1044	6679	7717	16%	38%	910	1755	93%
	30.3%	17.0%	37.0%	15.6%	100%						

*排出源別の割合は地域内の内訳[%]、合計の割合は排出総量に対する内訳[%]を示す。

**USEPA, 2006a¹⁵⁾

れる。地域別に見ると、北米(18%)、西欧(18%)、ついで中国(12%)で発生量が多いという結果になった。CH₄、N₂O ガスの排出総量は 910MtCO₂eq となり、UESPA(2006a)による 760MtCO₂eq、Monni et al.(2006)¹⁸⁾による 450 MtCO₂eq よりも大きな値となった。このうち 95%が埋立て処分地から排出されるという結果を得た。

b) 将来の排出量

表-4 に示す 2000 年、2030 年における排出量の変化を見ると、2000 年から 2030 年に CH₄、N₂O の排出総量は農業部門で 16% 増加し、廃棄物部門で 93%増加する結果となった。農業部門では、家畜反芻からの CH₄排出量が 24%増加し、家畜糞尿、農耕地土壌からの N₂O の排出

量はそれぞれ 30%、14%増加しており、これは家畜生産量の増加、農耕地面積の拡大や肥料投入量の増大に起因するものと考えられる。

稲作に関しては、水田の灌漑化による単位面積当たりの排出量の増加は見込まれるものの、水田面積の減少により(FAO,2002)、排出総量は 7%減少する結果となった。人口を用いて将来値を算出している USEPA(2006a)は 16%の増加を示しており、本研究ではこれと異なる結果となった。

農耕地土壌に関しては、2020 年の排出量、2005～2020 年の増加率はともに、USEPA(2006a)と異なる結果となった。これは将来値の算出方法や対象とする排出要因の違

いによるものと考えられる。USEPA(2006a)では、化学肥料のほか、窒素固定作物、食物残渣、家畜糞尿由来の排出を考慮している。また、本研究では穀物面積の成長率(FAO,2002)により将来の農耕地面積を推計したのに対し、USEPA(2006a)では、穀物生産量の成長率を用いて推計していることも要因として挙げられる。しかし、排出源別の傾向は類似する結果となり削減ポテンシャルを評価、検討するに当たって問題にならないと考える。

「稲作」を除くと、いずれも今後30年間に於ける増加が示され、これらの排出源における対策が必要であるといえる。地域別に見ると、アフリカ地域、南米地域、中東地域において急激な増加が示された。USEPA(2006a)でも中東、アフリカ地域で1990-2020年にかけてそれぞれ81%、70%増加すると見込まれており、これらは途上国での人口増加や経済成長に起因すると考えられる。最大排出国である中国では2000年から2030年まで14%増加し1184MtCO₂eqに達し、その多くは家畜と農耕地からの排出である。その他のアジア地域でも同様な傾向が見られ、人口増加に伴い1995-2025年に農耕地面積が3.8倍に拡大し、肥料消費量も2000年から50%増加するという要因を反映した結果となった(FAO,2002)。

一方、廃棄物部門に関しては、世界での廃棄物発生量が2030年には2000年の約2倍の年間21億トンまで増加するという結果を得た。これに伴いCH₄とN₂Oの排出総量が93%増加する。2005-2020年の増加率はUSEPA(2006a)と異なっているが、その要因としてUSEPA(2006a)は将来の廃棄物発生量を推計する方法の違いが考えられる。Monni *et al.* (2006)でも2030年に1500MtCO₂eqになり、2000年からの年率に直すと4%/年で、いずれも廃棄物量の増加に伴ってCH₄とN₂Oの排出量が今後急激に増加することを示している。

これらの急激な増加の背景には、アジア、アフリカ地域の人口増加や経済発展による一人当たりの廃棄物発生量の増加があると考えられる。最大排出国である中国では2030年まで185%増加し年間3.7億トンの廃棄物が発生する。また、アフリカ、インド、その他のアジア地域での廃棄物発生量は2030年までにそれぞれ212%、209%、187%増加し、それに伴いGHG排出量の急激な増加が見込まれた。

3. 削減ポテンシャルと削減費用

(1) CH₄、N₂O 削減に有効な対策と地域

農業、廃棄物部門の排出量はCH₄、N₂O 排出総量の半分以上を占め(Bhatia *et al.*,2004)¹⁹⁾、高い削減ポテンシャルを有する。これらの分野の対策技術は経済効率がよく、今後温室効果ガスの大気中濃度の安定化を図る上で重要

な役割を果たすと考えられる。なかには、乳牛、肥育牛の生産性の向上や農業の生態系の改善、埋立地でのガスの有効利用などCH₄やN₂Oの排出抑制以外の効果が期待できるものが多い。

本研究では、農業、廃棄物部門におけるCH₄やN₂Oの対策技術を対象に、2000年を基準年、分析対象を2030年として、地域別、部門別、ガス種別の削減ポテンシャルと削減コストを分析した。ここで評価する対策技術は、現時点で用いられているものが少ないため、対策を実施しないケースを基準シナリオとし、対策技術の導入によって削減可能なCH₄とN₂Oの排出量を削減ポテンシャルとした。

本研究で取り上げた対策技術を表-6に示す。将来における削減効率、普及率などの技術データはBates (1998a)²⁰⁾、Bates(1998b)²¹⁾、Bates(2001)²²⁾、USEPA(1999)²³⁾、USEPA(2006b)²⁴⁾、Graveland *et al.*(2002)²⁵⁾、Graus *et al.*(2004)²⁶⁾などを参照して設定した。これらの技術を図-2に示すよう、対策にかかる費用とそれによる削減ポテンシャルの2つを指標として評価する。ここでは費用については

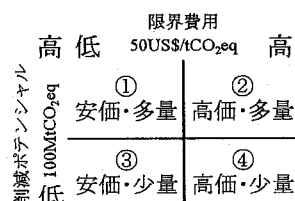


図-2 対策技術の評価分類

表-6 本研究で取り上げた対策技術

排出源	評価した技術*	評価しなかった技術**
家畜	添加物による生産性向上④	家畜の生産性向上(3技術)
反芻	プロバイオネートの投与②	飼育方法の変更
	高脂質飼料への変更③	添加物によるメタン発生抑制(4技術)
	遺伝子改良①	放牧マネジメントの強化
	濃厚飼料への変更①	反芻効率の向上
家畜糞尿	小規模嫌気発酵処理②	飼育方法の変更
	嫌気発酵処理②	小規模貯留池の覆土
	水平型嫌気発酵処理①	糞尿の散布
	完全混合処理①	簡易非加熱式貯留槽(3技術)
	貯留池の覆土①	糞尿貯留システム
		加熱式タンク
		糞尿の清掃、貯蓄
稲作	肥料の変更④	コンポストの利用
	中間期の排水③	耕作手法の変更
	耕作期の変更③	肥料の変更
	耕作手法の変更①	陸稲への変更
農耕地	肥料吸収効率の向上③	肥料の削減
土壌	耕作手法の変更③	家畜糞尿による肥料の代替
	散布方法の変更③	窒素肥料の効率向上
	肥料散布効率の向上③	耕作期の変更
廃棄物	発電・発熱③	肥料の削減
	酸化効率の向上③	埋立地の覆土
	メタンガスの直接利用③	フレア処理
	焼却④	天然ガスへの転換
	生物処理②	廃棄物発生抑制
	嫌気発酵処理②	
	コンポスト②	
	リサイクル④	

*番号は評価分類を示す。

**データ不足のため評価不可。

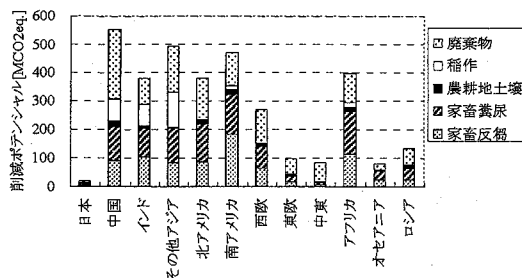


図-3 2030年における地域別削減ポテンシャル

50US\$/tCO₂eq, 削減ポテンシャルについては100MtCO₂eqを境として, ①安価でかつ削減量が多い, ②費用はかかるが削減量が多い, ③安価だが削減量は少ない, ④費用はかかる上, 削減量が少ない, の4つに分類した。なお, この分類に使用した削減ポテンシャルは本章の後半の計算から求めたものである。

その結果, ①安価でかつ削減量が多い有効な技術には, 家畜反芻を抑制する濃厚飼料への変更や家畜糞尿の嫌気発酵処理, 完全混合処理, 糞尿貯留池の覆土が挙げられ, 反対に, ④高価で削減量あまり期待できない対策は, 農業部門では耕作期の変更や肥料の変更, 添加物による生産性の向上, 廃棄物部門ではリサイクルであることがわかった。次に, 削減ポテンシャルを地域別に見ると, 図-3 から中国(553MtCO₂eq), その他アジア地域(494MtCO₂eq), 南アメリカ(469MtCO₂eq), アフリカ地域(398MtCO₂eq)などの排出量の多い地域において削減ポテンシャルも高いことがわかった。それらの多くは廃棄物, 家畜反芻, 家畜糞尿からの排出を削減できることが示された。途上国での家畜や廃棄物からの排出が多く, かつそれらの対策の削減効率が高いことが反映されたと考えられる。

(2) 対策技術の限界削減費用と削減ポテンシャル

対策技術別に限界削減費用(以下, 限界費用)と削減ポテンシャルを算出し, 経済効率性から優先すべき技術と地域を特定する。なお, 各地域における初期費用, 維持管理費用の配分には, USEPA (2006b) にならって固定資本費, 人件費, 材料費, エネルギー費が占める割合を表-7のように仮定し, それぞれの説明変数を用いた。

図-4, 図-5 に部門別に2010年, 2020年, 2030年の世界の部門別限界削減費用曲線(Marginal Abatement Cost

表-7 削減技術費用の内訳

費用の内訳	初期費用	維持管理費用	説明変数
固定資本費	30%	0%	購買力平価
人件費用	70%	25%	製造業賃金
材料費	0%	25%	購買力平価
エネルギー費	0%	50%	エネルギー価格

Curve, 以下, MAC)を示し, 図-6, 図-7 に2030年における主要地域別MACを示す。MACは, 年次, 地域, 技術毎に排出源1単位当たりの削減ポテンシャル, 限界費用, 技術導入量を算出し, 部門あるいは地域別に限界費

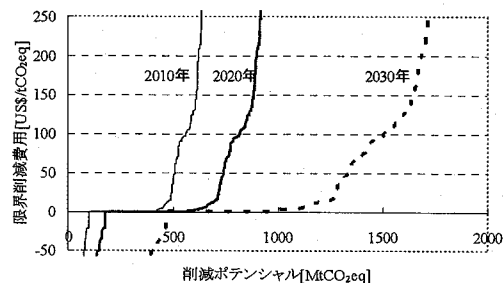


図-4 農業部門 限界費用削減曲線

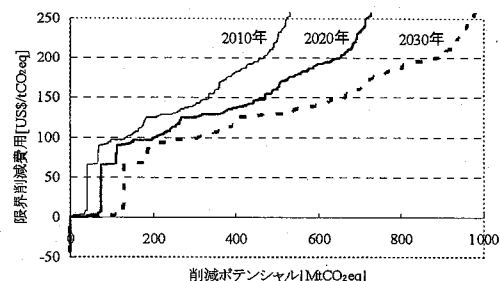


図-5 廃棄物部門 限界費用削減曲線

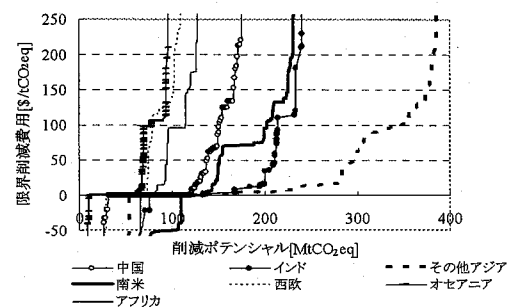


図-6 2030年における農業部門 限界費用削減曲線

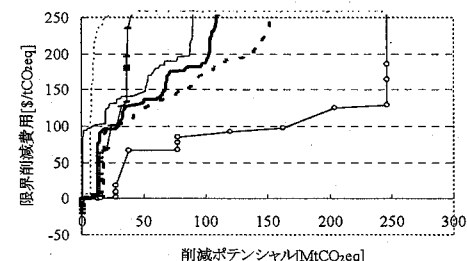


図-7 2030年における廃棄物部門 限界費用削減曲線

表-8 2030 年における CH₄, N₂O 限界費用別技術別削減ポテンシャル

2030年削減 ポテンシャル [MtCO ₂ eq]	限界削減費用 [US\$/tCO ₂ eq]							
	<=0		0-20		20-50		50-100	
	技術	削減量	技術	削減量	技術	削減量	技術	削減量
家畜反芻		512		0		25		17
	添加物による生産性向上	19			プロバイオネートの投与	25	添加物による生産性向上	8
	プロバイオネートの投与	60					プロバイオネートの投与	89
	高脂質飼料への変更	85					高脂質飼料への変更	0
	遺伝子改良	107					遺伝子改良	0
	濃厚飼料への変更	240					濃厚飼料への変更	0
家畜糞尿		388		25		10		50
	小規模嫌気発酵処理	13	小規模嫌気発酵処理	14	小規模嫌気発酵処理	4	小規模嫌気発酵処理	19
	完全混合処理	123	嫌気発酵処理	11	嫌気発酵処理	4	嫌気発酵処理	31
	貯留池の覆土	129	水平型嫌気発酵処理	0	水平型嫌気発酵処理	2	水平型嫌気発酵処理	1
	水平型嫌気発酵処理	123					水平型嫌気発酵処理	38
稲作		0		259		29		14
			中間期の排水	48	中間期の排水	17	肥料の変更	8
			耕作手法の変更	210	耕作期の変更	10	中間期の排水	1
					耕作手法の変更	2	耕作期の変更	2
							耕作手法の変更	3
								1
農耕地土壌		72		3		3		0
	肥料吸収効率の向上	5	肥料散布効率の向上	3	肥料散布効率の向上	3	肥料散布効率の向上	0
	耕作手法の変更	22						2
	散布方法の変更	5						
	肥料散布効率の向上	40						
農業部門		972		287		67		81
下段:文献値*		-		267-1518		643-1866		604
廃棄物部門		42		89		0		179
	発電・発熱	42	発電・発熱	19	廃却	0	生物処理	22
			酸化効率の向上	11			嫌気発酵処理	71
			メタンガスの直接利用	59			コンポスト	85
							生物処理	229
							焼却	8
							リサイクル	4
合計		1013		375		67		260
								1259

*USCCSP,2006, Rose et al., 2007, Fawcett and Sands,2006, Smith et al., 2006, Fujino et al., 2006, and Kemfert et al., 2006

用が小さい技術から順に削減ポテンシャルの累積量をプロットしたものである。

2000 年から 2030 年にかけて技術革新に伴う削減効率の向上に伴う、削減ポテンシャルの増加が示された。削減費用が 0US\$/tCO₂eq 以下であるノーリグレット対策による削減量が、特に農業部門にて多いことがわかる。2030 年にて、農業部門では 972MtCO₂eq、廃棄物部門では 42MtCO₂eq の削減が可能であった。

農業部門では、100US\$/tCO₂eq 未満での削減量が多く、技術評価①の安価で多く削減できる技術が多いことが反映されたと考えられる。一方、廃棄物部門では限界費用が 100US\$/tCO₂eq 未満で削減ポテンシャル累積量は横ばいであるが、100US\$/tCO₂eq を越えると急激に増加する。これは、廃棄物部門においてはまだ安価な技術が少ないことを示している。しかし、今後技術改革に伴う費用の低下を考慮すると十分に削減ポテンシャルを有する部門であることがわかる。

地域毎に見ると、図-6 から農業部門ではその他アジア地域、次いで、インド、南米地域、中国における削減ポテンシャルが大きく、安い費用で多くの CH₄, N₂O を削減できることが示された。廃棄物部門でも、中国、ついでアジア地域、南米地域において高い削減ポテンシャルを有するという同様の傾向が示された。

表-8 に 2030 年における限界費用で分類した部門別の削減ポテンシャルを示す。削減費用が 0US\$/tCO₂eq 以下のノーリグレット対策として、家畜飼料の高脂質飼料や濃厚飼料への変更、糞尿の嫌気発酵処理、貯留池の覆土、肥料散布効率の向上が挙げられた。これらの対策技術は

経済効率がよいにも関わらず、これまで実施されてこなかった要因として、農業主体に情報を周知していなかったことが挙げられる。今後これらの技術が優先的に実施するのが経済的にも温暖化抑制にも有効であることを周知し、普及を支援していく必要がある。

0-20US\$/tCO₂eq では、稲作や廃棄物部門においても削減ポテンシャルが増加し、稲作では中間期の排水や耕作手法の変更、埋立地での発電・発熱施設、酸化効率の向上、メタンガスの直接利用などが挙げられる。

廃棄物部門では 50-100US\$/tCO₂eq で最も多い削減量 179US\$/tCO₂eq が示された。0-100US\$/tCO₂eq を総合して考えると、家畜反芻、糞尿処理においてそれぞれ 554 MtCO₂eq と 423MtCO₂eq という高い削減ポテンシャルが示され、これらの対策が安価でかつ効果的であることを示している。反対に、高価で削減量あまり期待できない対策は、農業部門では耕作期の変更や肥料の変更、添加物による生産性の向上、廃棄物部門ではリサイクルであるといえる。100US\$/tCO₂eq 以上の費用をかければ、家畜反芻においてはメタンの発生を抑制するプロバイオネートの添加や家畜飼料を、繊維を多く含む繊維性飼料から脂質を多く含む濃厚飼料に変更することでプロバイオネートを多く生成しメタンの排出量を減らすという対策が有効であり、廃棄物部門では、コンポスト、嫌気発酵処理、生物処理により大幅な削減が可能であるといえる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 2000 年における農業、廃棄物部門の CH_4 、 N_2O の排出総量は 7589MtCO₂eq となり、そのうち 88%が農業由来、12%が廃棄物由来である。農業由来の排出量は主に農耕地土壌と家畜反芻に起因している。
- (2) 2000 年–2030 年に CH_4 、 N_2O の排出総量は農業部門で 16%増加し、廃棄物部門で 93%増加し、それは家畜反芻、家畜糞尿管理による排出に起因している。地域別にはアフリカ地域、南米地域、中東地域において急激な増加が示された。
- (3) 排出削減対策による削減ポテンシャルが高い地域は、中国、その他アジア地域、南米地域、アフリカ地域において削減ポテンシャルが高く、家畜反芻、家畜糞尿、廃棄物部門において多くの GHG を削減することができる。
- (4) 特に農業部門ではノーリグレット対策による削減量が多く、2030 年にて 972MtCO₂eq 削減可能であった。
- (5) 安価でかつ削減量が多い技術は、家畜飼料の濃厚飼料への変更や糞尿の嫌気発酵処理、貯留池の覆土などであり、反対に、高価で削減量があまり期待できない対策は、農業部門では耕作期の変更や肥料の変更、添加物による生産性の向上、廃棄物部門ではリサイクルとなった。

謝辞

本研究は、環境省地球環境総合研究推進費 B-52 「アジア太平洋統合評価モデルによる地球温暖化の緩和・適応政策の評価に関する研究」による研究成果の一部である。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers, 2007.
- 2) IPCC: Climate Change 2000-Mitigation Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001
- 3) Hertel, T: Global Trade, Assistance, and Production The GTAP 6 Data Base, Purdue University, 2005.
- 4) IPCC: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006
- 5) FAOSTAT: FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/default.aspx>
- 6) IFPRI: World water and food to 2025 dealing with scarcity, 2002.
- 7) FAO: World Agriculture: Towards 2015/ 2030, 2002.
- 8) IFA/FAO/IFDC: Fertilizer use by crop fourth edition, 1999.
- 9) IFA/FAO/IFDC: Fertilizer use by crop fifth edition, 2002.
- 10) UN: World Population Prospects, The 2004 Revision, 2004.
- 11) UN: World Urbanization Prospects, The 2005 Revision Population Database, 2005.
- 12) World Bank: World Development Indicators, 2006.
- 13) 気象庁: 世界の天候,
<http://www.data.kishou.go.jp/climate/monitor/>
- 14) EEA: State of Environment report No 1/2005The European environment - State and outlook 2005, 2005.
- 15) USEPA: Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020, EPA Report 430-R-06-003, 2006a.
- 16) Olivier, J. G. J., J. A. van Aardenne, F.J. Dentener, V. Pagliari, L.N., and Ganzeveld et al.: Recent trends in global greenhouse emissions: regional trends 1970–2000 and spatial distribution of key sources in 2000, *Environmental Sciences*, 2, 81-99, 2005.
- 17) Weyant, J. P., F. de la Chesnaye, and G. Blanford: Overview of EMF – 21. Multigas Mitigation and Climate Policy. *The Energy Journal*, Special Issue, 2006.
- 18) Monni, S., R. Pipatti, A. Lehtila, L. Savolainen, and S. Syri: Global climate change mitigation scenarios for solid waste management, VTT Publications, 603, 2006
- 19) Bhatia, A., H. Pathak, and P. K. Aggarwal: Inventory of methane and nitrous oxide emissions from agriculture soils of India and their global warming potential, *Current Science*, 87, 317-423, 2004.
- 20) Bates, J.: Options to Reduce Methane Emissions (Final Report), ATA Technology Environment 3773, 3, 1998a.
- 21) Bates, J.: Options to Reduce Nitrous Oxide Emissions (Final Report), ATA Technology Environment 4180, 3, 1998b.
- 22) Bates, J.: Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change, ATA Technology Environment, 2001.
- 23) USEPA: U.S. Methane Emissions 1990–2020: Inventories, Projections, and Opportunities for Reductions, EPA 430-R-99-013, 1999.
- 24) USEPA: Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases (EPA Report 430-R-06-005), 2006b.
- 25) Graveland, C., A. F. Bouwman, B. de Vries, B. Eickhout, and B. J. Strengers: Projections of multi-gas emissions and carbon sinks, and marginal abatement cost functions modelling for land-use related sources, RIVM report, 2002.
- 26) Graus, W., M. Harmelink, and C. Hendriks: Marginal GHG-Abatement Curves for Agriculture, Ecofys, 2004.
- 27) USCCSP: Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations, 2006.
- 28) Rose, S., H. Ahammad, B. Eickhout, B. Fisher, A. Kurosawa, S. Rao, K. Riahi, and D. van Vuuren: Land in Climate Stabilization Modeling. Energy Modeling Forum Report, Stanford University, 2007.
- 29) Fawcett, A.A., and R.D. Sands: Non-CO₂ Greenhouse Gases in the Second Generation Model. Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, *Energy Journal*, Special Issue 3, 2006.
- 30) Smith, S.J., and T.M.L. Wigley: Multi-Gas Forcing Stabilization

- with the MiniCAM. Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, *Energy Journal*, Special Issue #3, 2006.
- 31) Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, and Y. Matsuoka: Multi-gas mitigation analysis 20 on stabilization scenarios using AIM global model. Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, *Energy Journal*, Special Issue #3, 2006.
- 32) Kemfert, C., T. P. Truong, and T. Bruckner: Economic impact assessment of climate change-A multi-gas investigation with WIAGEM-GTAPEL-ICM. Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, *Energy Journal*, Special Issue #3, 2006.
- 33) IPCC: Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press., 2000

A STUDY ON METHANE AND NITROUS OXIDE EMISSION AND MITIGATION OPTIONS IN AGRICULTURE AND WASTE SECTOR

Tomoko HASEGAWA, Tatsuya HANAOKA and Yuzuru MATSUOKA

The purpose of this paper is to estimate future emissions of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) in agriculture and waste sectors and to evaluate reduction potentials in 67 regions both in developed and developing countries, and to estimate marginal abatement costs through 2030. Mitigation options of CH₄ and N₂O emissions in these sectors can be relatively inexpensive to CO₂-only mitigation. They are expected to play an important role in climate strategies. In this study, we analyzed reduction potentials and the mitigation costs with current technologies using marginal abatement cost curves by region. In the result, large reduction potentials are estimated in developing regions such as Asia, Latin America, and Africa. The options with highest economic efficiency are "Replacing roughage with concentrates" and "Anaerobic Digestion".