

K-2 地球温暖化対策のための京都議定書における国際制度に関する政策的・法的研究
(2) 農村地域からの温室効果ガス排出量の制御可能性とその効果の国際分析

独立行政法人農業環境技術研究所 地球環境部 食料生産予測チーム 谷山一郎
豊橋技術科学大学工学部 後藤尚弘

平成12～14年度合計予算額 8,821千円
(うち、平成14年度予算額 2,812千円)

[要旨] これまでの気候変動枠組み条約締約国会議のなかで、農耕地からの温室効果ガスの排出抑制や吸収拡大が議論されてきた。本研究では吸収源対策（アクティビティ）が農耕地土壌における温室効果ガス交換へ及ぼす影響について既存の数理モデルを用いて推計し、日本、アメリカおよびEUなどでどのような違いがあり、それらの国と地域が農耕地の温室効果ガス吸収能に対してどのような戦略をとることが予測されるかを検討した。数理モデルにはローザムステッドモデルとIPCCのモデルを用いた。結果によると、二酸化炭素に関して最も有効であったのは農作物残渣の土壌還元量を増大するアクティビティであった。ただし、アクティビティによる土壌炭素増加量は農耕地の面積に大きく依存する。また、肥料投入による亜酸化窒素の発生は二酸化炭素の固定に比べて小さいことがわかった。目標削減量に占める各アクティビティ実施による削減量の割合は、必ずしも土壌炭素増加量に比例しない。また、亜酸化窒素の排出に関しては、農業、畜産業に対して、窒素施肥管理の改善と家畜糞尿処理施設の改良と増設の二つの亜酸化窒素削減対策を行った。窒素施肥管理の改善では日本がアメリカおよびEUに比べて有効であった。また、家畜糞尿処理施設の改良と増設についての対策を行った場合はアメリカおよびEUにとって有効であった。これらの結果から、削減策の効果は、各国や地域における農業の特性および土壌種、気候、作物種によって違ってくるということがわかった。しかし、アクティビティによる削減分を計上する上で最も有利となるのは広大な農耕地面積を持つ国といえる。

[キーワード] 農耕地、二酸化炭素、亜酸化窒素、数理モデル、京都議定書

1. はじめに

地球温暖化と農耕地、森林などの陸上生態系の間には環境問題を考える上で極めて重要な結びつきがある。今後急速な地球温暖化が進行する場合には、陸上生態系が適応の限度を超え、劣化していくことが懸念されているが、現在のところ陸上生態系全体は二酸化炭素の吸収源と考えられている。1997年、COP3(気候変動枠組み条約第3回締約国会議)で採決された京都議定書¹⁾において、農耕地への炭素増大を目的とした人為的活動に限り、その吸収分を削減量として計上できることが合意されている。

京都議定書では人為的な吸収源の拡大活動が各国における排出削減数値目標の達成のために用いられることが認められた。更に2001年7月ドイツのボンで開催されたCOP6の再開会合において、農耕地については「農耕地管理等による追加的人為的活動で1990年以降に実施された分について、その吸収量を削減量として計上できる」ことが合意された。しかし京都議定書の吸収源、

特に農耕地関連の条文の解釈は未だ明確になっていない。どのような吸収源活動(アクティビティ)が認められるのか、どのように炭素蓄積量の変化を評価すべきなのかは、未だ国際的に検討すべき課題となっている。

本研究内におけるアクティビティとは土壌炭素の増大を目的とした土壌保全活動をいう。アクティビティには広義(森林管理等)と狭義(管理方法の変化、農地管理、施肥など)の活動が示されている²⁾。広義の活動は「炭素吸収に関連する様々な活動が含まれる土地利用ベースの活動」と定義され、狭義の活動は「耕作低減、灌漑用水管理等炭素吸収に関連する個別の活動」と定義されている。前者はその土地における炭素ストックの吸収と排出を把握して正味の変化を推計することが可能であるが、自然現象による変化と人為起源による変化を区別できない。一方後者は自然現象と人為起源によるものを区別できるが、カウントが煩雑になる。例えば後者のアクティビティの例として以下の3つがあげられる。

①土壌への有機物投入量の増大 ②栽培作物の変更 ③不耕起栽培の実施

不耕起栽培では作物を栽培する際に通常行われる耕起作業を省略し、作物の刈株、わらなどを土壌表面に残した状態で次の作物を栽培する。不耕起栽培は土壌構造および土壌水分の保持、またエネルギーおよび労働時間の節減を目的に行われる保全的耕作の中でも中心的な方法である。表1に耕起作業を省略した場合の利点および問題点を示す。これら様々なアクティビティが温室効果ガスの排出抑制や吸収拡大にどのような影響を及ぼすかを定量的に評価することは、今後の地球温暖化に対する国際効用の中でもきわめて重要であるといえよう。

表 1 耕起作業を省略した場合の利点と問題点³⁾

	利点	問題点
耕起作業の省略	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料消費量の減少 ・作業時間の短縮 ・機械設備の削減 	<ul style="list-style-type: none"> ・作物収量の不安定性増 ・除草剤の使用回数増
土壌表面の有機物	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌侵食の防止 ・土壌水分の保全 ・土壌温度変化の緩和 ・鳥害の防止 	<ul style="list-style-type: none"> ・病虫害の発生増 ・発育初期の地温低下
土壌構造の保全	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌小動物、微生物の保全 ・浸透能の増大 →排水促進、酸素供給増大 ・地耐力の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・表面の起伏増大 ・施肥位置の制限→効率低下 ・土壌無機化窒素量の減少 ・移動しがたい養分(Pなど)の作土表面への偏在

2. 研究目的

本研究では農耕地からの温室効果ガス(二酸化炭素、亜酸化窒素)の排出量を推計する既存の数値モデルを用いて、日本、アメリカおよびEUの各国と地域からの温室効果ガス排出量を推計し、吸収拡大や排出抑制に関するアクティビティを講ずることによって各国と地域からの温室効果ガス排出量がどう変化するかを予測し、各国と地域の予測される戦略について考察することを目的とする。

3. 研究方法

(1)炭素循環モデル

本研究では土壌炭素量の推計にイギリスで開発された代表的なグローバルカーボンサイクルモデルであるローザムステッド・カーボンモデル(以下RothCモデル)⁴⁾を用いた。RothCモデルは土壌条件、環境条件を入力することにより土壌炭素量を推計する簡便で信頼性の高いモデルである。

①入力データ

モデルを走らせるために必要なデータは以下の通りである。
 月別平年降水量(mm)、月別平均気温(℃)、月別平年蒸発散量(mm)、表層土の粘土含量(%)、植物質分解比(DPM/RPM)、土壌被覆、月別作物残渣投入量(t-C/ha)、月別有機質肥料投入量(t-C/ha)、土壌深さ(cm)

②モデルの構造

RothCモデルの構造を図1に示す。

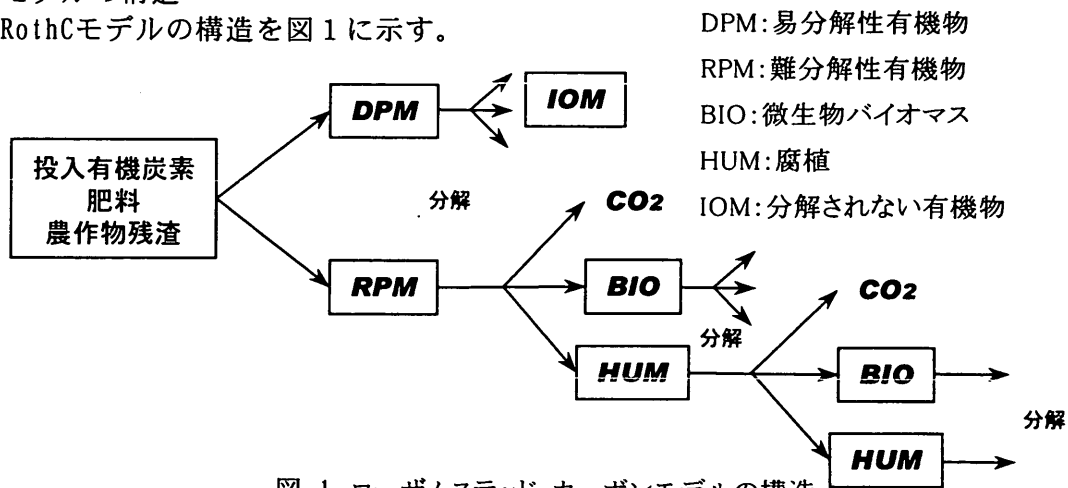


図1 ローザムステッド・カーボンモデルの構造

RothCモデルにおいて土壌有機炭素は次の5種類に分けられている。

- ・易分解性有機物(Decomposable Plant Material:DPM)
- ・難分解性有機物(Resistant Plant Material:RPM)
- ・微生物バイオマス(Microbial:BIO)
- ・腐植(Humified Organic Matter:HUM)
- ・分解されない有機物(Inert Organic Matter:IOM)

投入される有機物はDPMおよびRPMであり、土壌中でそれぞれCO₂、BIO、HUMへと分解される。CO₂は大気中に放出され、土壌中に蓄積する炭素のうちBIO、HUMいずれに分解されるかの割合は粘土含量により決定される。BIO、HUMはそれぞれCO₂、BIO、HUMへと分解及び蓄積されていく。各有機炭素の分解速度は入力するパラメータにより決定される。投入される有機物である堆肥はDPM 49%、RPM 49%、HUM 2%、農作物残渣はDPM 59%、RPM 41%と仮定されている。

③有機物分解過程

いずれかの有機物を Y (t-C/ha) 含んでいる時、その有機物のひと月の減少量は

$$Y e^{-abckt} \tag{1-1}$$

となる。ここで、

- a: 温度による影響因子
- b: 土壌湿度による影響因子
- c: 植生の保持による影響因子
- k: 炭素の分解速度定数 t:1/12

各影響因子およびパラメータについて以下に述べる。

a: 温度による影響因子

$$a = \frac{47.9}{1 + e^{\left(\frac{106}{tm+18.3}\right)}} \quad (1-2)$$

tm: 月別平均気温

b: 土壌湿度による影響因子

土壌水分不足量(SMD: Soil Moisture Deficit)の最大量は以下の式より算出される。

$$\max.SMD = -(20.0 + 1.3 \times (\text{粘土含量}\%) - 0.01 \times (\text{粘土含量}\%)^2) \quad (1-3)$$

各月の土壌水分量(acc.SMD)は以下の式より算出される。

$$\text{acc.SMD} = \text{降水量(mm)} - 0.75 \times (\text{蒸発散量(mm)}) + \text{前月の土壌水分量} \quad (1-4)$$

acc.SMD < 0.444 × max.SMD の月では b = 1、 そうでない場合は

$$b = 0.2 + (1.0 - 0.2) \times \frac{(\max.SMD - \text{acc.SMD})}{(\max.SMD - 0.444 \times \max.SMD)}$$

c: 植生の保持による影響因子

作物が栽培されている場合は c = 0.6

作物が栽培されていない場合は c = 1.0

k: 炭素の分解速度定数

炭素の種類により分解速度は異なる。以下に各炭素の分解速度定数(1/yr)を示す。

DPM	:10.0	RPM	:0.3
BIO	:0.06	HUM	:0.02

④ 分解した炭素の放出および蓄積の配分: 二酸化炭素/(BIO+HUM)比

土壌に投入された炭素が大気へ放出されるか、微生物及び腐植のかたちで土壌に蓄積するかを表す CO₂/(BIO+HUM)比は粘土含量により決定するものであり、以下の式より求められる。

$$\text{CO}_2/(\text{BIO}+\text{HUM}) = 1.85 + 1.60 \exp(-0.0786 \times \text{年度含有量}\%) \quad (1-5)$$

(2) 農業、畜産での亜酸化窒素フローモデル

本研究ではIPCCによりまとめられた農業および畜産における温室効果ガス発生のモデル⁵⁾を使用し、排出量の推計を行った。このモデルを使用した理由は、温暖化に関する情報を広く取りまとめている、妥当性のあるものと考えられているためである。FAO(国連食糧農業機関)データベース⁶⁾から肥料投入量、家畜種、頭数、作物収穫量および各排出因子などのデータを導入し、地域の気候を考慮して排出量の推定を行う。IPCCにおける農業および畜産からの亜酸化窒素排出モデルでは、亜酸化窒素排出量(kg N/yr)は次の式により求められる。

$$\text{N}_2\text{O} = \text{N}_2\text{O}_{\text{DIRECT}} + \text{N}_2\text{O}_{\text{ANIMAL}} + \text{N}_2\text{O}_{\text{INDIRECT}} \quad (2-1)$$

N₂O_{DIRECT}: 直接的な排出 N₂O_{ANIMAL}: 動物からの排泄、堆肥に関わる排出

N₂O_{INDIRECT}: 間接的な排出

① N₂O_{DIRECT}: 農耕地土壌からの亜酸化窒素排出

農耕地土壌では土壌中の微生物の活動によって亜酸化窒素が生成される。微生物活動には脱窒作用と硝化作用がある。脱窒過程では亜酸化窒素と窒素が気体として発生し、また硝化反応においては好気性条件下において土壌中のアンモニウムイオンが硝酸態窒素に酸化される過程で亜酸化窒素が生成される。N₂O_{DIRECT}は土壌の様々な環境要因(pH、温度、土壌

水分、有機物含有量、その他)により影響される。これらの影響をふまえ、 N_2O_{DIRECT} は以下のように表される。

$$N_2O_{DIRECT}=[(F_{SN}+F_{AW}+F_{BN}+F_{CR})\times EF_1]+F_{OS}\times EF_2 \quad (2-2)$$

○ F_{SN} (kg N/yr) : 化学肥料投入による亜酸化窒素排出への影響

$$F_{SN}=N_{FERT}\times(1-Frac_{GASF}) \quad (2-3)$$

N_{FERT} : 化学肥料使用量(kg N/yr)

$Frac_{GASF}$: 投入肥料中窒素が土壌中へ供給される割合 (kg NH_3-N and NO_x-N /kg of N 投入)

○ F_{AW} (kg N/yr): 堆肥中窒素の亜酸化窒素排出への影響

$$F_{AW}=N_{ex}\times(1-(Frac_{FUEL}+Frac_{GRAZ}+Frac_{GASM})) \quad (2-4)$$

N_{ex} : 家畜によって排出される窒素の量(kg/animal/yr)

$Frac_{FUEL}$: 燃料として燃やされた排泄物中の窒素の割合(kg N/kg N totally excreted)

$Frac_{GRAZ}$: 放牧中の家畜排泄物中窒素の土壌蓄積の割合(kg N/kg N excreted)

$Frac_{GASM}$: NH_3 、 NO_x として揮発する窒素排泄物の割合(kg NH_3-N & NO_x-N /kgN ex.)

○ F_{BN} (kg N/yr): 窒素固定作物における亜酸化窒素排出への影響

$$F_{BN}=2\times Crop_{BF}\times Frac_{NCRBF} \quad (2-5)$$

$Crop_{BF}$: 豆類の収穫量(kg dry biomass/yr)

$Frac_{NCRBF}$: 窒素固定作物により固定される窒素の割合(kg N/kg of dry biomass)

○ F_{CR} (kg N/yr): 土壌中に戻される農作物残渣の亜酸化窒素排出への影響

$$F_{CR}=(Crop_0\times Frac_{NCR0}+Crop_{BF}\times Frac_{NCRBF})\times(1-Frac_R)\times(1-Frac_{BURN}) \quad (2-6)$$

$Crop_0$: 豆類以外のすべての作物量(kg dry biomass/yr)

$Frac_{NCR0}$: 窒素固定しない作物種に含まれる窒素の割合(kg N/kg of dry biomass)

$Frac_R$: 農耕地から運び出された農作物残渣の割合(kg N/kg crop-N)

$Frac_{BURN}$: 耕作地で燃やされる農作物残渣の割合(kg N/kg crop-N)

○ F_{OS} (kg N/yr): 気候と有機質土壌による亜酸化窒素排出への影響

○ EF_1 (kg N_2O-N /kg N input): 直接排出因子

○ EF_2 (kg N_2O-N ha/yr): 耕作による土壌有機物の無機化による排出因子

② N_2O_{ANIMAL} : 動物からの排出、堆肥に関する排出

動物からの排出とは、家畜糞尿中の窒素が堆肥として使われることや排泄物そのものから亜酸化窒素排出につながるものを指す。その排出量を求める式を以下に示す。

$$N_2O_{ANIMAL}=N_2O_{AWMS} \\ =\sum(N_T\times N_{exT}\times AWMS_T\times EF_{3,AWMS}) \quad (2-7)$$

T: 家畜の種類 N_T : 家畜Tの頭数 (head)

N_{exT} : 家畜Tの年間排泄量 (kg/animal/yr)

$AWMS_T$: 家畜Tにおける異なった処理方法で作られた堆肥中窒素の割合(%)

$EF_{3(AWMS)}$: AWMSによる亜酸化窒素排出因子(kg N_2O-N /kg nitrogen excreted)

③ $N_2O_{INDIRECT}$: 間接的な排出

間接的な亜酸化窒素の排出には以下の経路が考えられている。

- ・ 肥料投入に由来する大気中のアンモニアと窒素酸化物の亜酸化窒素への変換
- ・ 土壌からの窒素溶脱と流出

・ 下水処理過程によって引き起こされる硝化脱窒反応からの亜酸化窒素排出
これらを式に示すと以下のようになる。

$$N_2O_{INDIRECT} = N_2O_G + N_2O_L + N_2O_S \quad (2-8)$$

N_2O_G : 大気中のアンモニアと窒素酸化物の亜酸化窒素への変換(kg N/yr)

N_2O_L : 土壌からの窒素の浸出と流出からの亜酸化窒素発生 (kg N/yr)

N_2O_S : 下水処理による亜酸化窒素の発生 (kg N/yr)

$$N_2O_G = (N_{FERT} \times \text{Frac}_{GASF} + N_{ex} \times \text{Frac}_{GASM}) \times EF_4 \quad (2-9)$$

EF_4 : 大気中への排出による排出因子(kg N_2O -N/kg NH_3 -N and NO_x -N emitted)

$$N_2O_L = N_{LEACH} \times EF_5 \quad (2-10)$$

$$N_{LEACH} = (N_{FERT} + N_{ex}) \times \text{Frac}_{LEACH} \quad (2-11)$$

N_{LEACH} : 窒素溶脱(kg N/yr)

Frac_{LEACH} : 溶脱、流出の過程で失われる土壌中の窒素割合(kg N/kg of N applied)

EF_5 : 溶脱、流出による排出因子 (kg N_2O -N/kg N溶脱・流出)

$$N_2O_S = N_{SEWAGE} \times EF_6 \quad (2-12)$$

N_{SEWAGE} : 下水処理(kg N/yr)

$$N_{SEWAGE} = \text{PROTEIN} \times N_{rPEOPLE} \times \text{Frac}_{NPR} \quad (2-13)$$

PROTEIN : たんぱく質消費量(kg protein/person/yr)

$N_{rPEOPLE}$: 人口(person)

Frac_{NPR} : たんぱく質中の窒素の割合(kg N/kg of protein)

EF_6 : 下水処理による排出因子(kg N_2O -N/kg sewage-N produce)

4. 結果・考察

(1) 炭素蓄積量の推計

① 推計対象

農耕地土壌における炭素量の推計は表2にある18カ国についてそれぞれ行う。また各国の農耕地を表2にある栽培作物種別に分類しそれぞれの農耕地ごとに炭素量の推計を行い、各農耕地土壌の炭素量の合計を各国の農耕地土壌炭素量とする。

表 2 対象国及び対象作物

対象国	日本 デンマーク イタリア アメリカ フィンランド オランダ カナダ フランス ポルトガル オーストラリア ドイツ スペイン オーストリア ギリシア スウェーデン ベルギー アイルランド イギリス
対象作物	米 豆類 穀物類 テンサイ 野菜類 サトウキビ 根菜類 果物

② 推計のシナリオ

本研究ではアクティビティとして残渣投入量の増加、有機質肥料投入量の増加、不耕起栽培をそれぞれ実施した場合の土壌炭素蓄積量を検討する。以下の3つのシナリオについて推計を行った。また基準年とする農耕地土壌の状態は次のとおりであると仮定した。また、アクティビティを行う期間は京都議定書に定められている期間と等しく5年間とした。発生する農業生産物の残渣の処分方法を表3に、日本における有機系肥料の生産量を表4に示す。

表 3 農業生産物の残渣の処分方法 (%)⁷⁾

堆肥化	飼料化	焼却	埋設(すき込み)	その他
24.3	1.3	17.5	35.1	19.3

発生する残渣のうち、通常 35%程度がすき込みのかたちで農耕地へ還元されている。よって、投入残渣量は総発生量の 35%とする。

表 4 有機系肥料の生産量(1997) ⁸⁾

有機質肥料	特殊肥料	合計(t)
780,045	4,802,206	5,582,251

有機質肥料投入量を20t/haと仮定すると、有機質肥料の必要量およそ558万tから施用面積は28万haと推定され、日本の農耕地土壌のおよそ10%の面積に有機質肥料が投入されると推計できる。亜酸化窒素の発生量は施肥窒素に対して0.01~2.0%の範囲^{9),10)}であるとした。

基準年の条件	有機質肥料:全農耕地の10%に4t-C/ha施用 農作物残渣:総発生量の35%を農地に還元 初期土壌炭素:3.8t-C(不活性炭素)
シナリオ1	農作物残渣の農地還元量を総発生量の35%から50%に増加する 表3より、焼却処分されている農作物残渣は全発生量の17.5%である。焼却分のほとんどを農地還元に戻すとし、農作物残渣の農地還元量を総発生量の35%から50%に増加させた場合を仮定した。
シナリオ2	有機質肥料の施用面積を10%から20%に増大する 家畜ふん尿の発生量は年間およそ9,049万t、このうち再利用されていないのはおよそ5%の452万tである ¹¹⁾ 。表4より、有機質肥料の生産量およそ558万tと同等程度の量となることがわかり、廃棄されている家畜ふん尿を全て農地に還元されると、約2倍の面積に施用可能であると仮定した。
シナリオ3	不耕起栽培を全農耕地の50%で実施する 不耕起栽培がどの程度拡大可能であるか未知であったため、シナリオ2の効果を比較可能となるよう全農耕地の50%にアクティビティを行った場合を仮定した。

(2) 基準年の土壌炭素蓄積量の推計

① 入力データ

月別降水量(mm)	理科年表 ¹²⁾
月別平均気温(°C)	
月別蒸発散量(mm)	蒸発散量は既存のプログラムを用い、気温より求めた ¹³⁾ 。
表層土の粘土含量(%)	表層土の粘土含量(%)については各国ごとの統計データ等が得られなかったため、各国について一律35%とした。なお35%とはFAOデータ ¹⁴⁾ より算出したアメリカ、カナダ、EU各国の農耕地の平均値である。
作物残渣分解比	モデル内で易分解性有機物に対する作物残渣分解の比は農耕地の場合1.44と仮定される。
土壌被覆	各国の耕作期間、休閑期間に関するデータが入手できなかったため、北半球においては5~10月を耕作期間、11~4月を休閑期間とし、また南半球においては11~4月を耕作期間、5~10月を休閑期間と仮定した。
月別作物残渣投入量	主要作物の収穫指数より残渣部の割合を求めた。注1)
月別有機質肥料投入量	290万haの農耕地の10%に有機質肥料を4t-C/ha投入(有機質肥料区)、

	90%の農耕地には有機質肥料は投入されていない(有機質肥料無使用区)と仮定する。よって推計は有機質肥料区、有機質肥料無使用区それぞれ推計を行う。
土壌深さ	RothCモデルでは土壌炭素の大部分が表面からの深さ23cmまでに集積していると考えられており、計算は深さ23cmまでの土壌分で行われている。農耕地土壌の深さは23cm以上と考えられるが、各国一律で土壌深さは23cmとする。
窒素肥料投入量	FAOデータ ⁶⁾ から各国の窒素肥料投入量を引用する。
肥料成分	肥料便覧 ⁸⁾ より
各国の窒素投入量	各国内の肥料投入量と肥料成分から計算をした。

注1) 月別作物残渣投入量の計算方法

残渣部の割合及び作物残渣中の炭素含有量(%)を表 注-1に示す。ただし、穀物類は小麦、野菜は主要なものの平均、イモ類はパレイショ、豆類は大豆の値を代表とし、またサトウキビの収穫係数は推測によるものである。

表 注-1 主要作物の収穫指数、残渣の割合、及び作物残渣中の炭素含有量(%)

	作物種						
	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ
収穫指数 ¹⁰⁾	37	32	50	80	33	63	33
残渣割合	63	68	50	20	67	37	67
炭素含有率(%) ¹⁰⁾	38	46	40	37	43	40	40

また収穫指数は次式で求められる。収穫指数 = $\frac{\text{可食部}}{\text{可食部} + \text{残渣部}}$ ¹⁵⁾

月別残渣発生量(t-C/ha)は、各国の農作物生産量に残渣部の割合を乗じ推計した。各国の2000年度の主要作物生産量(10⁴t)、および主要作物の耕作面積(10³ha)は表 注-2、表 注-3の通りである。また極少量であるため統計値のないものは0とした。各国各作物の残渣量を面積で除した値を残渣投入量(t/ha)とし、また残渣投入量に炭素含有量/100 を乗じた値のうちの35%が農耕地への炭素投入量となる。対象各国における作物別残渣投入量(t-C/ha)を表 注-4に示す。

表 注-2 各国の主要作物生産量(10⁴t) ¹⁶⁾

	作物種						
	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ
日本	1,186	93	1,271	449	5	380	151
アメリカ	866	33,520	3,770	2,404	1,612	2,943	3,276
カナダ	0	5,132	216	457	701	82	0
オーストラリア	175	3,501	194	121	95	0	3,816
EU	251	21,516	5,448	4,960	759	11,140	8

表 注-3 各国の主要作物耕作面積(10³ ha) ¹⁴⁾

	作物種								合計
	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ	果物	
日本	1,770	275	458	174	134	69	23	240	2,903
アメリカ	1,230	57,402	2,201	586	37,246	556	415	1,297	99,636
カナダ	0	18,323	104	158	6,742	15	0	74	25,342
オーストラリア	145	17,094	86	43	2,044	—	428	231	19,840
EU	398	37,805	2,031	1,371	10,694	1,833	1	5,724	54,133

表 注-4 各国の作物別残渣投入量(tC/ha)

	作物種								
	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ	果物	
日本	1.5	1.2	3.9	0.8	0.1	4.5	18.7	0.1	
アメリカ	1.6	2.0	2.4	1.3	0.1	4.3	22.4	0.1	
カナダ	0	0.9	2.9	0.9	0.3	4.6	0.0	0.3	
オーストラリア	2.7	0.7	3.2	0.9	0.1	0	25.3	0.1	
EU	1.4	2.0	3.8	1.2	0.2	5.0	20.9	0.2	

表 注—5 窒素肥料投入量(1999)⁶⁾

	窒素肥料投入量(10 ⁶ t)		
	農耕地土壌全体	硝酸アンモニア	尿素
日本	479,500	2,900	99,400
アメリカ	11,249,206	562,460	1,846,140
カナダ	1,610,000	74,000	642,700
オーストラリア	1,089,000	16,000	537,500
EU	10,038,738	1,881,975	1,344,685

表 注—6 各種肥料の窒素含有率 (%)⁸⁾

硫安	硝安	尿素	塩安	石灰窒素	有機質肥料
21	10	46	25	21	1~15

表 注—7 窒素投入量(1999)

窒素投入量(10 ⁶ t)	
日本	95,900
アメリカ	2,249,841
カナダ	322,000
オーストラリア	217,800
EU	2,007,747

②基準年の土壌炭素蓄積量の推計

有機質肥料区の作物別土壌炭素量の推計結果を表5に、有機質肥料無使用区の推計結果を表6に示す。

表 5 有機質肥料区の作物別土壌炭素量

	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ	果物
	SOC(t-C/ha)							
	SOC(10 ⁴ t-C)							
日本	47.1	44.5	64.4	42.1	36.8	69.2	173.0	36.8
	834	123	295	73	49	48	40	88
アメリカ	52.8	56.1	59.4	50.6	40.8	75.5	224.4	40.8
	649	32,226	1,308	296	15,184	420	932	529
オーストラリア	58.6	43.3	61.8	45.0	39.1	0	228.6	39.1
	85	7,407	53	19	800	0	978	90
EU	42.6	62.7	68.2	58.3	40.4	94.4	167.6	37.8
	169	23,699	1,383	798	4,318	1,733	2	2,163
カナダ	0	67.1	90.1	66.6	59.4	109.7	0	59.4
	0	12,300	94	105	4,003	16	0	44

表 6 有機質肥料無使用区の作物別土壌炭素量

	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サウキビ	果物
	SOC(t-C/ha)							
	SOC(10 ⁴ t-C)							
日本	14.9 834	12.4 123	32.3 295	4.7 73	37.0 49	140.8 48	4.7 40	14.9 88
アメリカ	16.9 649	20.3 32,226	23.6 1,308	14.7 296	4.9 15,184	39.6 420	188.5 932	4.9 529
オーストラリア	24.4 85	9.1 7,407	27.5 53	10.7 19	4.9 800		194.3 978	4.9 90
EU	13.3 169	22.3 23,699	35.4 1,383	15.6 798	5.7 4,318	53.8 1,733	139.0 2	5.3 2,163
カナダ	0 0	15.3 12,300	38.2 94	14.8 105	7.5 4,003	57.9 16	0 0	7.5 44

基準年の農耕地土壌の炭素量は、表7のとおりとなる。

表 7 基準年における農耕地土壌の炭素量

	土壌炭素量(10 ⁶ t-C)		
	有機質肥料使用区	有機質肥料無使用区	農耕地土壌全体
日本	49	16	64
アメリカ	1,380	515	1895
カナダ	305	166	470
オーストラリア	230	94	324
EU	1,017	343	1,358

亜酸化窒素の発生量を投入された窒素の1%とすると、各国の肥料由来の亜酸化窒素排出量は表8のとおりとなる。

表 8 亜酸化窒素発生量(1999)(10⁶t)

日本	3,151
アメリカ	73,923
カナダ	10,580
オーストラリア	7,156
EU	65,969

(3) シナリオの推計

①シナリオ1: 残渣の投入量を発生残渣のうち35%還元から50%還元へ増加する

(2)で求めた現在の農耕地土壌炭素量を初期状態とし、推計を行った。肥料、その他の条件は基準年と等しいとする。各国の農耕地土壌における残渣量投入は表9のとおりである。

表 9 シナリオ1における残渣投入量

	作物種(t-C/ha)						
	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ
日本	2.2	1.7	5.6	1.2	0.2	6.5	26.7
アメリカ	2.3	2.9	3.5	1.9	0.2	6.2	32.1
カナダ	0	1.4	4.2	1.4	0.5	6.6	0
オーストラリア	3.9	1.0	4.5	1.3	0.2	0.0	36.2
EU	2.0	2.8	5.4	1.7	0.3	7.2	29.9

またアクティビティによる炭素増加量は次式で求められる。

$$(\text{削減期間(a年間)の正味除去量}) - (\text{基準年の正味除去量} \times a)$$

削減期間(a年間)の正味除去量は自然による増加量とアクティビティを実施したことによる増加量の合計であるため、基準年の正味除去量すなわち自然による増加量を差し引いたものがアクティビティによる増加量となる。各国の有機質肥料区にシナリオ1を実行した結果を表10に、有機質肥料無使用区にシナリオ1を実行した結果を表11に示す。

表 10 シナリオ1実行時の有機質肥料区における土壌炭素量

	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ	果物
	SOC(tC/ha/5 yr)							
	SOC(10 ³ tC)							
日本	1.10	0.81	2.86	0.60	0.05	3.33	13.85	0.05
	195	22	131	10	1	23	32	1
アメリカ	1.28	1.60	1.93	1.06	0.08	3.52	18.30	0.08
	157	9,197	425	62	296	196	760	10
カナダ	0.0	0.89	2.86	1.01	0.28	5.14	0	0.28
	0	1,634	30	16	189	8	0	2
オーストラリア	1.33	0.96	1.41	1.00	0.85	0.00	5.50	0.85
	19	1,636	12	4	174	0	235	20
EU	7.6	26.4	48.1	15.3	11.7	50.6	29.2	1.7
	38	6,370	576	153	235	777	2	70

表 11 シナリオ1実行時の有機質肥料無使用区における土壌炭素量

	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ	果物
	SOC(tC/ha/5 yr)							
	SOC(10 ⁴ tC)							
日本	1.12	0.83	2.88	0.62	0.08	3.36	13.87	0.08
	179	21	119	10	1	21	29	2
アメリカ	1.30	1.63	1.96	1.09	0.11	3.55	18.33	0.11
	144	8,421	388	57	358	178	685	12
カナダ	0.00	0.93	2.90	1.05	0.35	5.18	0	0.35
	0	1,528	27	15	214	7	0	2
オーストラリア	1.91	0.49	2.20	0.56	0.10	0	17.68	0.10
	25	754	17	2	18	0	681	2
EU	5.2	23.3	43.9	12.9	2.6	37.3	33.7	2.6
	35	5,637	438	128	164	650	1	76

シナリオ1を実行した結果の各国の炭素増加量を表12に示す。

表 12 シナリオ1実行時の土壌炭素増加量

	土壌炭素増加量(10 ⁶ t-C)		
	有機質肥料使用区	有機質肥料無使用区	農耕地土壌全体
日本	0.4	3.8	4.2
アメリカ	11.1	102.4	113.5
カナダ	19.0	17.9	19.8
オーストラリア	2.1	15.0	17.1
EU	8.3	71.2	79.6

②シナリオ2: 有機質肥料の施用面積を10%から20%に増大させる

無施肥区の1/9の面積を有機質肥料施用区とし、有機質肥料施用区が全体20%に増大した場合を推計した。現在の無施肥区の農耕地土壌炭素量を初期状態とし、推計を行った。各国の無施肥区にシナリオ1を実行した結果を表13に示す。

表 13 シナリオ1実行時の無施肥区における土壌炭素量

	イネ	穀物類	野菜類	イモ類	豆類	テンサイ	サトウキビ	果物
	SOC(tC/ha/5yr)							
	SOC(10 ³ tC)							
日本	7.3 1,285	10.7 294	7.2 332	7.3 127	7.3 97	7.2 50	7.2 17	7.3 174
アメリカ	7.7 953	7.7 44,463	7.7 1,704	7.7 454	7.8 28,892	7.7 430	7.6 316	7.8 1,006
カナダ	0 0	9.4 17,141	9.4 97	9.4 148	9.4 6,326	9.3 14	0 0	9.4 70
オーストラリア	8.8 128	8.8 15,047	8.8 76	8.8 38	8.7 1,783	8.8 0	0 0	8.7 201
EU	35.3 276	118.8 31,007	111.7 1,439	118.8 1,158	118.8 8,097	109.4 1,532	13.2 1	118.8 4,188

シナリオ2を実行した結果の各国の炭素増加量は表14のとおりである。

表 14 シナリオ2実行時の土壌炭素増加量

土壌炭素増加量(10 ⁶ tC)	
	農耕地土壌全体
日本	2.4
アメリカ	78.2
カナダ	23.8
オーストラリア	17.3
EU	47.9

亜酸化窒素の発生量を投入した有機質肥料中の窒素分の1%とすると、表15のとおりである。

表 15 シナリオ2実行時の亜酸化窒素発生量

	亜酸化窒素発生量	
	N ₂ O-t	Mt CO ₂
日本	558	0.17
アメリカ	17,924	5.56
カナダ	4,513	1.40
オーストラリア	3,564	1.10
EU	10,629	3.3'

表14の炭素を農耕地の二酸化炭素固定分とし、表15の亜酸化窒素の発生と二酸化炭素換算で差し引きすると、有機質肥料投入による農耕地土壌の二酸化炭素固定量は表16のとおりである。有機質肥料投入による二酸化炭素の固定量は亜酸化窒素排出量よりもはるかに大きいことがわかる。

表 16 シナリオ2実行時の亜酸化窒素発生を考慮した場合の農耕地の炭素固定

	炭素の農耕地固定
	Mt CO ₂ Eq
日本	8.6
アメリカ	281.2
カナダ	85.9
オーストラリア	62.3
EU	172.6

③シナリオ3:不耕起栽培を全農耕地の10%で実施する

有機質肥料無使用区の10%で不耕起栽培を実施した場合の土壌炭素増加量の推計を行った。通常耕起の土壌炭素量SOC_{Ct}から不耕起栽培時炭素量SOC_{Nt}は以下の式で求められる¹⁷⁾。

$$SOC_{nt} = (1.283 \times SOC_{Ct}) + 0.510$$

各国の基準年の農場地土壌にシナリオ3を実施した場合の各国の土壌炭素増加量を表17に示す。

表 17 シナリオ3実行時の土壌炭素増加量

	土壌炭素増加量(10 ⁶ tC)
	農耕地土壌全体
日本	0.6
アメリカ	19.7
カナダ	6.0
オーストラリア	3.7
EU	12.9

④結果まとめ

シナリオ1から3のアクティビティを実施した結果を表18、図2にまとめる。

表 18 シナリオ1～3実施時の土壌炭素増加量

	土壌炭素増加量(10 ⁶ tC)		
	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
日本	4.2	2.4	0.6
アメリカ	113.5	78.2	19.7
カナダ	19.8	23.8	6.0
オーストラリア	17.1	17.3	3.7
EU	79.6	47.9	12.9

いずれのアクティビティを実施した場合においても土壌炭素量の増加が見られた。土壌炭素量は各国作物別に求めた原単位に面積を乗じて求めるため、面積に大きく依存する。よってアクティビティによる土壌炭素増加量も面積に大きく依存する。

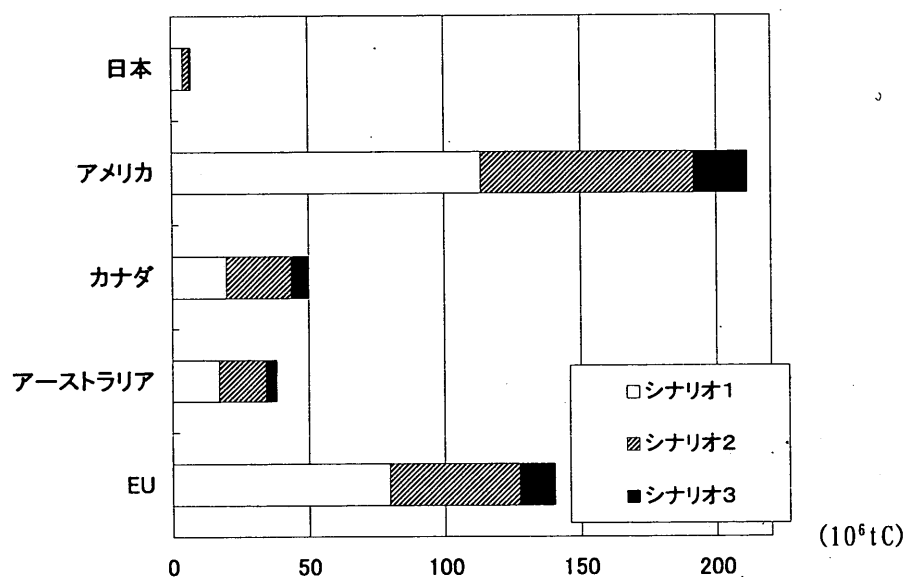


図 2 シナリオ1～3実施時の土壌炭素増加量

土壌炭素増加量と京都議定書における削減目標量との比較をするために、1990年レベルで見た5年間での削減目標量を表19に示す。

表 19 二酸化炭素排出量及び削減目標量

	1990年排出量 (10 ⁶ t-C)	削減目標率	削減量 (10 ⁶ t-C/yr)	削減量 (10 ⁶ t-C/5yr)
日本	290	-6	17	87
アメリカ合衆国	1,329	-7	93	465
カナダ	117	-6	7	35
オーストラリア	72	+8*	0	0
EU	874	-8	75	350

*オーストラリアはアルミ産業など二酸化炭素排出型の産業に経済が依存していることを考慮され、8%増が認められている。

アクティビティ実施による目標削減量に占める農耕地による削減量の割合を表20、図3に示す。

表 20 目標削減量に占める各アクティビティ実施による削減量の割合

	目標削減量に占める割合(%)		
	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
日本	4.8	2.8	0.7
アメリカ	24.4	16.8	4.2
カナダ	56.6	68.0	17.1
オーストラリア	—	—	—
EU	106.1	63.9	17.2

目標削減量に占める各アクティビティ実施による削減量の割合は、必ずしも土壤炭素増加量に比例しない。アクティビティによる削減分を計上する上で最も有利となるのは、広大な農耕地面積を持ち、かつ二酸化炭素の排出量が少ない(すなわち削減量も少ない)国である。EUにおいては、農耕地土壌に対するアクティビティのみで、削減目標量を大きく上回る結果となった。

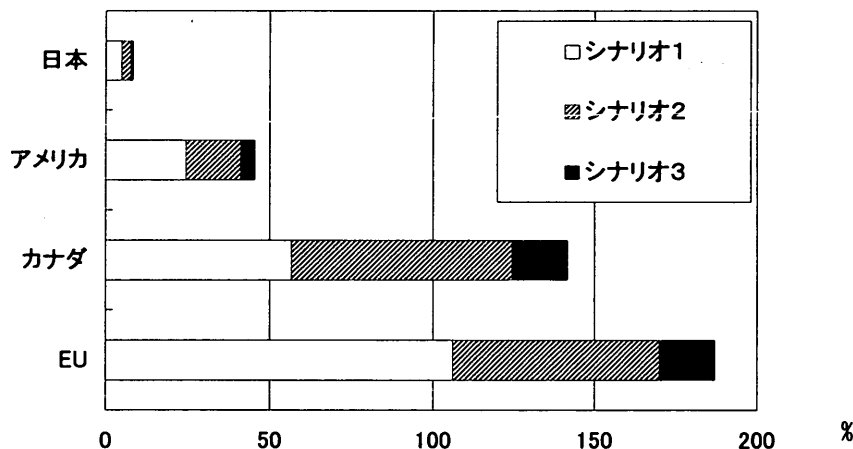


図 3 目標削減量に占める各アクティビティ実施による削減量の割合

IPCCでは、農耕地管理による最大吸収量を0.3t/ha/yrと見込んでいる。今回推計を行った日本におけるアクティビティの効果は、シナリオ1がおよそ0.3t/ha/yr、シナリオ2がおよそ0.2t/ha/yr、シナリオ3がおよそ0.1t/ha/yrと妥当な値が得られた。このことから本推計結果の妥当性が示された。

(5) 亜酸化窒素排出量の推定結果

① 基準年の亜酸化窒素排出量の推計

表21、図4に各国での基準年(1999とした)の亜酸化窒素排出量の推計結果を示す。

表 21 各国の基準年の亜酸化窒素排出量(10³t N/yr)

	N ₂ O _{DIRECT}	N ₂ O _{ANIMAL}	N ₂ O _{INDIRECT}	合計
日本	24.9	9.08	8.33	41.2
アメリカ	1513	278	52.7	1820
EU	689	168	41.9	884

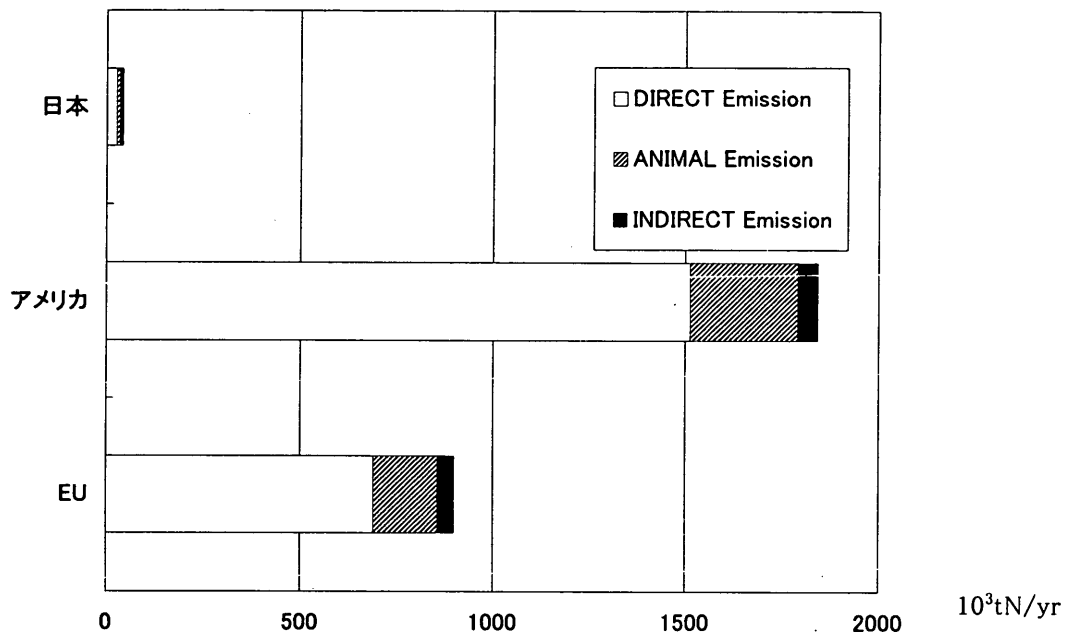


図 4 基準年のEU、アメリカ、日本における亜酸化窒素排出量

この結果から国によって亜酸化窒素排出の割合は違うが、各国に共通してDirect Emissionの割合が一番多いことが分かる。Direct Emissionとは(2-2)に示すようにF_{SN}(化学肥料)、F_{AW}(堆肥)、F_{BN}(窒素固定作物)、F_{CR}(農作物残渣)、F_{OS}(有機質土壌)の影響を考慮したものであり、農耕地面積と比較してみるとその広さと排出量が大きく関わっていることが分かる。直接的な排出の内訳と直接排出量推定に用いたデータを表22、23に示す。

表 22 N₂O_{DIRECT}のパラメータの内訳⁵⁾

	N ₂ O _{DIRECT} (10 ³ tN/yr)	F _{SN} (10 ³ tN/yr)	F _{AW} (10 ³ tN/yr)	F _{BN} (10 ³ tN/yr)	F _{CR} (10 ³ tN/yr)	F _{OS} (10 ⁶ ha)
日本	24.9	126	67.0	17.4	516	5.2
アメリカ	1513	3720	96.5	4450	12400	418.2
EU	689	1952	121	376	7200	142.1

表 23 直接排出導入のための投入データ (FAOデータベース⁶⁾、IPCCモデルより⁵⁾)

	窒素肥料 投入量 (10 ⁶ t)	肥料中 N割合 (%)	作物 (豆類) (窒素固定する) (10 ⁶ t)	作物 (窒素固定しない) (10 ⁶ t)	土地利用 (10 ⁶ ha)	EF ₁ (kg N ₂ O-N/kg N input)	EF ₂ (kg N ₂ O-N/ ha/yr)
日本	0.5	0.292	0.3	34.1	5.2	0.0125	3
アメリカ	11.1	0.370	74.0	690.1	418.3	0.0125	3
EU	10.0	0.217	6.2	472.6	142.1	0.0125	4

N₂O_{DIRECT}の中でもF_{OS}とEF₂の積は日本では15.813(10³t N/yr)となりの影響が一番大きくなる。次に排出への影響が大きいのはF_{CR}で日本、アメリカ、EUでは516、12400、7200(10³t N/yr)となりが多く、次に日本、EUではそれぞれ126、1952(10³t N/yr)とF_{SN}が大きい。また、すべての項に対してそれぞれのパラメータが相互に作用している。耕作面積が広くなれば、肥料投入量、堆肥、作物収穫量、残渣は増えてくる。従って、生産技術の向上を目指しながら、温室効果ガスの削減を考えていくことが課題になる。肥料中窒素分の計算は対象国で使用している窒素肥料について合計を算出し、重量割合によって求めた。EF₁は1kg窒素からの亜酸化窒素への影響、EF₂は2~15の数値で寒帯から熱帯での排出への影響を示し、寒い気候ほど値は低い。世界の気候から日本、アメリカは3、EUは4とした⁵⁾。

以下に家畜の排泄物による亜酸化窒素排出量を求めるためのデータを示す。家畜の排泄物による亜酸化窒素排出は式(2-7)より求められる。それぞれの家畜種に対し、いくつかの処理施設があり、それぞれについて推計を行った。対象とする家畜は肉牛、乳牛、家禽、羊、豚およびその他家畜であり、それぞれについて嫌気性ラグーン、排水として処理、土中投入、放牧場あるいはパドックへ放置、燃料使用およびその他の各処理方法についてそれぞれ亜酸化窒素排出量を推計した。表 24 に家畜排泄物処理施設の排出因子(AWMS)を示す。

表 24 各家畜排泄物処理施設(AWMS)の排出因子(EF₃)

	嫌気性 ラグーン	排水 として処理	土中投入	放牧場・パド ックへ放置	燃料使用	その他
肉牛	0.100	0.100	0.02	0.02	0.000	0.005
乳牛	0.100	0.100	0.02	0.02	0.000	0.005
家禽	0.100	0.100	0.02	0.02	0.000	0.005
羊	0.100	0.100	0.02	0.02	0.000	0.005
豚	0.100	0.100	0.02	0.02	0.000	0.005
その他家畜	0.100	0.100	0.02	0.02	0.000	0.005

表25にN₂O_{INDIRECT}を求めるためのデータとその内訳を示した。大気中への排出による亜酸化窒素排出因子EF₄、溶脱による亜酸化窒素排出因子EF₅、下水処理による亜酸化窒素排出因子EF₆についてはIPCCから引用した。また、PROTEIN(年間たんぱく質摂取量は)財団法人食生活情報サービスセンター¹⁸⁾より引用した。各国の人口は統計局・統計センター¹⁹⁾から引用した。

表 25 N₂O_{INDIRECT}投入データとその内訳

	N ₂ O _{INDIRECT} (10 ³ t N/yr)	N ₂ O _(G) (10 ³ t N/yr)	EF ₄	N ₂ O _(L) (10 ³ t N/yr)	N _{LEACH} (10 ³ t N/yr)	EF ₅
日本	8.33	0.140	0.01	1.05	42.1	0.025
アメリカ	52.7	4.13	0.01	31.0	1230	0.025
EU	41.9	2.18	0.01	16.3	653	0.025

	N ₂ O _(S) (10 ³ t N/yr)	N _{SWEAGE} (10 ³ t N/yr)	PROTEIN (kg protein/ person/yr)	N _{rPEOPLE} (person)	EF ₆
日本	7.13	713	35.2	0.160	0.010
アメリカ	17.6	1760	40.2	0.160	0.010
EU	23.4	2340	40.5	0.160	0.010

以下に亜酸化窒素排出量推定に必要な割合を示す。

表 26 各計算過程に使用した亜酸化窒素排出に関わるパラメータ

Frac _{GASF}	Frac _{FUEL}	Frac _{GRSM}	Frac _{NCRBF}	Frac _{NCR0}	Frac _R	Frac _{BURN}	Frac _{LEACH}	Frac _{NPR}
0.100	0.000	0.200	0.030	0.015	0.450	0.100	0.300	0.160

Frac_{BURN}: 発展途上国では 0.1 以下、先進国では 0.25(kg N/kg crop-N)

Frac_{LEACH}: 化学肥料もしくは堆肥中窒素 1kg 中に 0.3 (0.1-0.8) kg N

Frac_{NPR}: たんぱく質 1kg 中に窒素を 0.16kg

その他の割合は既定値とした。

② 亜酸化窒素削減対策案

亜酸化窒素の排出には様々な因子が盛り込まれており、ある因子がどのようにどれほど関わっているのか、現在でもその挙動は明らかにはなっていない。しかし、そのような中で亜酸化窒素排出に関わる因子を特定して排出量を予測することを、本研究で用いる式では可能とした。現在可能とされる亜酸化窒素発生削減対策案²⁰⁾は大きく分けて肥料に関するもの、農耕地管理に関するものおよび家畜糞尿管理システムに関するものに分類できる。

農作物に対する肥料の使用において、肥料の中の窒素がすべて農作物に取り込まれているわけではない。その結果、不要な窒素分は脱窒や硝化などの反応により亜酸化窒素またはその他の気体となって大気中に排出される。緩効性およびコーティング窒素肥料の使用などにより窒素の利用効率が向上して肥料使用量が減り、肥料投入による亜酸化窒素排出は減ると考えた。家畜糞尿処理施設改良・増設では、攪拌発酵処理施設の導入によって亜酸化窒素排出の削減が見込めると考えた。堆肥化処理は最も主要な処理となっているが、適正に堆肥化(発酵処理)しているもののほか、堆肥盤での堆積だけの簡易な堆肥化処理も多い。特に酪農では堆積などの簡易な堆肥化が主流を占めており、その状況は北海道で顕著である。乳牛および肉牛の堆肥のほとんどは経営内で利用されている²¹⁾。

表 27 酪農家の糞尿処理機械・施設の整備状況²¹⁾

	(戸数比率:%)		
	堆肥盤	堆肥舎	攪拌発酵処理施設 (乾燥を含む)
全国	47.9	26.8	8.2
北海道	87.4	2.1	1.6
都府県	27.7	36.0	10.7

このことをふまえて本研究では以下の対策についてモデルに適用させて推計を行った。

シナリオ4 窒素肥料投入法の改善 (本研究では投入量の軽減を考え、高効率肥料の投入、30%の効率化) 直接的な排出、間接的な排出に影響
シナリオ5 家畜糞尿処理施設の改良・増設 (家畜糞尿処理施設を15%拡張) 家畜生産による排出に影響

③シナリオ4(窒素肥料高効率化)

緩効性肥料やコーティング肥料の使用による肥料窒素の利用効率の向上というアクティビティを行ったとする。施肥技術向上の研究について、日本土壤肥料学会誌より引用し、亜酸化窒素排出削減対策とした。キャベツ、メロン、ダイズ、チャにおける窒素肥料の効率化の研究や、施肥時期の改善による窒素肥料使用法の研究^{22), 23), 24)}における窒素肥料投入量30%削減可能という報告から、将来的にこれらの作物以外においても同じように肥料の削減がはかれるものとした(表28)。

そこで、施肥効果30%向上として対策を行った結果、土壌からの亜酸化窒素直接排出において、式(2-2)より F_{SN} (化学肥料による排出への影響)を減らすことができる。そこで、式(2-3)の窒素肥料投入量を減らし、また、間接的な排出においても同様に式(2-8)、(2-9)より投入量30%の効率化の結果、表29に示したような亜酸化窒素排出削減量となる。また、京都議定書で定められた温室効果ガス削減目標値に対する割合を表30に示す。

表 28 窒素肥料削減量(10⁶t)

国名	窒素肥料使用量	30%削減
日本	0.5	0.3
アメリカ	11.1	7.8
EU	10.0	7.0

表 29 シナリオ4実施後の亜酸化窒素削減量

国名	削減量 (10 ³ t)
日本	0.621
アメリカ	18.1
EU	9.54

表 30 京都議定書で定められた温室効果ガス削減目標値とシナリオ4における削減割合

	1990年(基準年) (Tg-C/yr)	削減目標	削減目標量 (Tg-C/yr)	削減割合(%)
日本	290	6%	17	0.301
アメリカ	1,329	7%	93	0.165
EU	876	8%	70	0.115

この結果、日本においては0.3%であるが、アメリカおよびEUでは、それより低く、それぞれ0.17と0.12%であった。これは対象国での農業の違いにより差があるのではないかと考えた。そこで、シナリオ5についても検討した。

④シナリオ5(家畜糞尿処理施設の改良・増設)

家畜糞尿処理施設では家畜排泄物処理法が問題となっており、これから改善していく必要があると考えられている。中でも、系外前処理および系内処理などの方法を行うことで家畜糞尿処理からの亜酸化窒素発生を減少させることができると言われている²⁵⁾。この対策を今後実現可能として、15%の処理施設拡張を考えた。家畜糞尿処理施設の改良・増設を行うと、現状のAWMS_Tの85%になり、家畜糞尿処理からの亜酸化窒素排出量は以下ようになる(表31)。

表 31 シナリオ5実施後の日本、アメリカ、EUでの削減量と温室効果ガス削減目標に対する割合

	削減量(10 ³ t)	削減割合(%)
日本	1.36	0.676
アメリカ	42	3.82
EU	25	3.62

シナリオ4と同様に対象国で削減可能であることが分かった。しかし、シナリオ4では、温室効果ガス削減目標値に対する日本の亜酸化窒素削減量の割合がアメリカおよびEUに比べて高かったに対し、シナリオ5では日本の割合が最も低かった。これは亜酸化窒素排出に対する畜産の占める割合が日本では低く、アメリカやEUでは高いことを示している。

5. 本研究により得られた成果

- (1)農耕地土壌に対して、土壌炭素量の増大を目的としたいくつかのアクティビティを行った際の炭素増加量の推計を行った。評価した中で最も有効であったのは、農作物残渣の土壌還元量を増大するアクティビティであった。ただし、アクティビティによる土壌炭素増加量は農耕地の面積に大きく依存した。
- (2)肥料投入による亜酸化窒素の発生は二酸化炭素の固定に比べて小さいことがわかった。
- (3)農業、畜産業に対して、肥料窒素の利用率向上と家畜糞尿処理施設の改良・増設の二つの亜酸化窒素削減対策を試算した。肥料窒素の利用率向上は日本がもっとも効果的であるのに対して、家畜糞尿処理施設の改良・増設は、アメリカおよびEUで効果があると予測された。

6. 参考文献

- 1) 環境庁地球温暖化対策研究会：気候変動に関する国際連合枠組条約京都議定書(暫定訳), <http://www.jccca.org/hou/kpjpn.html>
- 2) 環境庁国立環境研究所：京都議定書における吸収源プロジェクトに関する国際的動向(2000)
- 3) 長野間宏：土壌不耕起管理の意義，農業および園芸，73，171-176 (1998)
- 4) K. Coleman and D.S. Jenkinson: Roth-26.3, http://eco.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/rothc-26.3.html
- 5) IPCC(The intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2001 Synthesis Report (2001)
- 6) FAO：農業生産統計データベース <http://www.fao.org/>
- 7) 農林水産省統計情報部：農業生産環境調査報告書(2000)
- 8) 農林統計協会：ポケット肥料要覧 (1997)
- 9) 小柴守，山田正幸：畑からの亜酸化窒素発生と土壌要因、1995年度日本土壌肥料科学会講演要旨，41，219 (1995)
- 10) 秋山博子，鶴田治雄：有機質肥料を施用した畑土壌からの亜酸化窒素と一酸化窒素の発生，農業環境技術研究所 資源・生態管理科研究収録，15，29-31 (1999)
- 11) 環境省：記者発表資料(平成15年1月24日)，「産業廃棄物の排出及び処理状況等(平成12年度実績)について」
- 12) 文部省国立天文台編：理科年表 (2000)
- 13) Suzuki, M., Goto, N. and A. Sakoda: Simplified dynamic model on carbon exchange between atmosphere and terrestrial ecosystems, Ecological Modelling, 70, 161-194 (1993)
- 14) FAO-UNESCO: Soil map of the world (1974)
- 15) 小川和夫，竹内豊，片山雅弘：北海道耕作地におけるバイオマス生産量及び作物による無機成分吸収量，北海道農業試験場，149，57-91 (1998)
- 16) OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development OECD Environmental Data Compendium (1999)
- 17) J. S. Kern and M. G. Johnson: Conservation Tillage Impacts on National Soil and Atmospheric Carbon Levels, Soil Science Society of America Journal, 57 (1993)
- 18) 財団法人食生活情報サービスセンター：個人別献立内容と健康に関する実態調査報告書 (1997)
- 19) 内閣府統計局・統計センター：<http://www.stat.go.jp/>
- 20) C. Kroeze and A. Mosier: NEW ESTIMATES FOR EMISSIONS OF NITROUS OXIDE, Non-CO₂ Greenhouse Gases, J. van Ham (ed), Kluwer Academic Publishers, 45-64 (2000)
- 21) 西尾道徳，大畑貫一：農業環境を守る微生物利用技術，農林水産技術情報協会 (1998)
- 22) 小野寺正行，三輪直倫，赤司和隆：キャベツの作条施肥による窒素3割減肥技術，土壌肥料学会誌，71，714-717 (2000)
- 23) 山田和義，板橋直，木村龍介：局所施肥下で稲わら堆肥施用位置がレタスの生育と窒素吸収に与える影響，日本土壌肥料学雑誌，71，884-887 (2000)
- 24) 青久，稲垣卓次：茶栽培における被服尿素を用いた省力施肥法と硝酸態窒素の溶脱低減効果，土壌肥料学会誌，71，546-549 (2000)
- 25) J. Clemens, H.J. Ahlgrim: Greenhouse Gases from Animal Husbandry, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 60, 287-300 (2001)

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

- (1) 誌上発表(学術誌・書籍)

(査読あり)

- ① 袴田共之、波多野隆介、木村真人、高橋正通、坂本一憲：「地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 1. 二酸化炭素と陸上生態系」土肥誌、71, 263-274 (2000)
- ② Lin, B-L., Sakoda, A., Shibasaki, R., Goto, N., and Suzuki M.: “Modelling a Global Biogeochemical Nitrogen Cycle in Terrestrial Ecosystems”, Ecological Modelling, 135, 89-110, 2001

(2) 口頭発表

- ① 後藤尚弘、藤江幸一：環境科学会2000年年会(2000)、数理モデルによる農耕地土壌の炭酸ガス吸収量の推計
- ② 後藤尚弘、岩野安寿香、藤江幸一：環境科学会2002年年会(2002)、吸収源活動による農耕地土壌の温室効果ガス吸収量の推計、76-77

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、論文発表を通じ、成果の広報・普及に努める。