

地球温暖化防止への効果が期待される農業技術動向

坂井直樹^{1*}

¹ 筑波大学農林学系, 305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1

キーワード：地球温暖化, 防止技術, 農業, 二酸化炭素, メタン, 亜酸化窒素

はじめに

地球温暖化は、現代人が快適さや便利さを得るために支払うべき代償とも考えられ、人々の関心が高い環境問題である。地球温暖化はエネルギー問題と表裏一体の関係にあることが知られている。石油などの一次エネルギーは、エネルギー転換部門で都市ガスや電力のような使いやすい形態に転換されるが、もともとわが国のエネルギー自給率は1998年で21.6%にしかすぎない（東京電力 2001）。直接間接に化石燃料に依存している現代人のエネルギー源については、すべてが地球温暖化の進行を加速する立場にあるといっても過言ではない。例えば、クリーンエネルギーといわれる電力についても、電力化率の最新値が約41%で約6割が転換ロスになっており（東京電力 2001）、やはり地球温暖化を加速する要因となっている。

エネルギー転換部門の自家消費から出る転換ロスを除くと、わが国の最終エネルギー消費は3億7600kL（1996年、原油換算）であり、一次エネルギー供給量の約65%が実際に利用可能となっている。最終エネルギー消費は、統計上、a) 産業、b) 民生、c) 運輸の3部門（セクター）に分類されるが、このうち農業で使用されるエネルギーは産業部門の〈その他製造業〉と運輸部門の〈自動車（ガソリンの使用に当たる）〉の両方に属している。例えば、総合エネルギー統計では、燃料動力源としてのガソリンのほとんどが運輸部門に含まれていることから、農業への正味の投入量を推定し、厳密な意味で農業用エネルギーとして抽出する作業はさほど容易でない（道宗 1997）。

筆者は、平成3～10年度の間、(財)農業技術協会が農林水産省から委託を受けた調査事業に専門委員の一人として参画してきた。一連の調査報告書では、地球温暖化防止を主眼に今後のわが国農業が目指す方向や技術について示唆を与える部分が少なくないと考えられるが、必ずしも一般に浸透しているようには感じられない。

今回、これらを含めて、地球温暖化防止に貢献しうる最近の農業技術を改めて整理することにした。なお、地球温暖化と農業活動に関しては二つの視点がある。それらがプラスであるかマイナスであるかは別にして、a) 地球温暖化が農業活動にどのように影響するのかというものと、b) 逆に農業活動が地球温暖化にどのように影響するのかというものである。本稿は、おもに後者の視点からまとめたものである。

* Corresponding Author: nsakai@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

温室効果ガス発生の現状

わが国は世界の二酸化炭素 (CO₂) 発生量の約 5 % を占める。部門別発生量 (発電については各部門に配分済み) をみると、1995年には 3 億4500万 Ct (炭素換算) を発生し、そのうちの40%が産業部門、20%が運輸部門、13%が家庭部門、12%が民生部門、14%がその他からの発生であった。それが、1999年には 3 億5645万 Ct を発生し、前年度に比べて2.1%の増加となった。二酸化炭素発生量は、家庭など民生部門が前年度比5.3%増、産業部門が同4.2%増、オフィスなど業務の民生部門が同3.3%増と、軒並み増加した。1999年において、1990年比でもっとも増加したのは運輸部門 (23.0%増) であった (朝日新聞2001年 7月10日版)。

産業や民生、運輸などから発生する二酸化炭素総量において、わが国農業が関係する直接分に限ると、二酸化炭素は全体の 2 ~ 3 % を、メタン (CH₄) は55%を、亜酸化窒素 (N₂O) は 8 % を占めると大まかに推定される。当然、間接分まで含めるとこれらの値は急増する。農業分野における二酸化炭素発生源は、自然的色彩の濃い部分と人為的色彩の濃い部分に大別される。前者には動植物の呼吸や有機物の分解 (Jeppson 2000, Watts ら2000)、土壌呼吸 (Oriov and Biryukova 1998, Pomanzkina ら1998) が、後者には炭素含有肥料や農業用プラスチック、農薬や燃料などの石油製品が関係する。なお、窒素含有肥料からは別途亜酸化窒素が発生するが (Simojoki and Jaakkola 2000, Watanabe ら2000)、その発生フラックスは地球温暖化にともなう地上昇の影響を受けるといわれる (Kamp ら1998)。

世界的には、エネルギー問題と表裏一体で存在する二酸化炭素発生量の削減が重視されている。一種の強度を表す〈地球温暖化ポテンシャル〉をみると、二酸化炭素= 1 とした場合、メタン=26、亜酸化窒素=270となる。この場合〈強度×量〉が意味をもつが、他の温室効果ガスに比べて量的に突出していることから、二酸化炭素に対する関心が一般に高い。なお、フロン類の地球温暖化ポテンシャルは大きく、CFC-11と CFC-113=4500、CFC-12=7100である。地球大気を構成するガスのうち、波長10 μ m 程度の赤外線吸収するものとして、CO \cdot NO \cdot HCl \cdot CO₂ \cdot H₂O \cdot N₂O \cdot CH₄ \cdot NH₃ \cdot O₃ \cdot フロン類が知られている。しかし、通常は H₂O を温室効果ガスには含めない (環境庁 1993)。

とくに、人為的要素の強い地球温暖化という視点から選ばれた温室効果ガスは、つぎの通りである。a) 二酸化炭素：石油・石炭・天然ガスなどの化石燃料から発生する、b) フロン (CFCs)：ポリウレタン発泡・スプレー噴射剤・冷媒・半導体洗浄などから発生する、c) メタン：石油・天然ガス井戸の漏出、水田・湖沼、森林、家畜などから発生する、d) 亜酸化窒素：有機物や窒素肥料の分解・化石燃料・海洋有機物の酸化などから発生する、e) オゾン：窒素酸化物やメタンなどの光化学反応から発生する。

このうちフロンについては、モントリオール議定書により1995年末で製造や消費が禁止され、製品としては代替フロンに移行することが決まった。しかし、新たに開発された代替フロンは、オゾン層破壊に対して一定の削減効果があっても、温室効果ガスとしての作用を依然として残したままである。最近では、オゾン層破壊に顕著な影響をもつとされる燻蒸剤の臭化メチル (CH₃Br) が、温室効果ガスとして注目されている。このような中で、農業活動と密接な関係をもつ温室効果ガスとして、二酸化炭素・メタン・亜酸化窒素が重視されるようになった。

地球温暖化を防止するための国際的取り決めが1992年に採択された〈気候変動枠組条約〉で

あり、1995年から毎年締約国会議が開かれている。1997年のCOP3で採択された京都議定書には、2008～2012年の間に先進国全体で二酸化炭素を5%削減（1990年比）することが盛り込まれた。EUは8%、米国は7%、日本は6%の削減を約束した。同時に森林による二酸化炭素吸収分を排出量から差し引くことや排出権取引、先進国が途上国で排出削減事業を行うCDM（Clean Development Mechanism）などの〈京都メカニズム〉と呼ばれる方式が導入された。しかし、各国の利害とともに算定システムが複雑化したこともあり、先行きは不透明である。2001年、Bush政権のもとで米国は京都議定書の批准を拒否する姿勢を明確にした。

農耕地から発生する二酸化炭素とメタン

1. 水田と畑地では、一般に水田の方が二酸化炭素発生量は少ない。年間4～5ヵ月間湛水状態にあるわが国水田の湿田率は、東南アジア諸国に比べて低い。わが国畑地の50%近くは傾斜地にあり、酸性土や不良火山灰土、重粘土、微量要素欠乏土などの不良土が大部分を占める。また、有機物の分解速度が水田と畑地で異なることも特徴である。二酸化炭素発生量の多いわが国土壌は、①灰色低地土（38%）、②灰色土壌（26%）、③湿潤黒ぼく土（16%）の順になり、これら3種類でわが国土壌から発生する二酸化炭素総量の80%を占めると推定される。黒ぼく土水田において、二酸化炭素は湛水期間中は流入的に、落水期間中は発生的に推移すること、またメタンは湛水期間中のみ発生するといわれる（金澤 1997）。

2. 水田と畑地では、水田（イネ単作）の方が炭素収支のバランスがよい。畑地における一毛作（陸稲・トウモロコシ・ダイズ各単作の例）と二毛作（陸稲ーオオムギ輪作、ラッカセイーコムギートウモロコシーオオムギ輪作の例）での炭素収支の違いは、一毛作では作物を栽培しない期間が長く、その間炭素を固定しないことで生じる。水田の方が炭素収支のバランスがよいのは、夏期に湛水下の土壌が還元状態になり有機物の分解が抑制され、炭素収支をプラスの方向に誘導しやすいことで説明される（小泉 1999）。

3. 大気中のメタン濃度増加が報告されたのが1980年頃で、そのおもな原因として水田が目された。当時、わが国では大気中のメタンの約半分が水田由来という水田悪玉論がまかり通っていた。その後80年代の終わりから90年代にかけて多くの測定がなされた結果、以前ほどには水田からのメタン発生量は多くないのではと考えられている。メタン発生量は、土壌型や化学組成に大きく影響されるので、データベース構築の必要性が提案されている（八木 1999）。

4. 土壌の劣化は、食料やエネルギーだけでなく、水質汚染や地球温暖化などの環境面とも密接に関係している（Lal 1999）。

投入資材からの二酸化炭素発生量

ここでは、a) 肥料、b) 農業用プラスチック、c) 農薬、d) 燃料油を対象に、わが国農業分野が発生する人為的二酸化炭素量を推定した（坂井1998）。

1. 肥料：肥料のうち、炭素含有の尿素・石灰窒素・炭酸カルシウムが該当する。二酸化炭素発生量（炭素換算、以下同じ）は、尿素＝28184Ct、石灰窒素＝8119Ct、炭酸カルシウム＝45659Ctで、発生量小計は81962Ctとなった（1997年）。人為的投入部分（肥料＋農業用プラスチック＋農薬＋燃料油の合計、以下同じ）に占める内訳は1.1%となった。発生量の多い順に、

①北海道, ②愛知県, ③青森県, ④静岡県, ⑤千葉県となった。

2. 農業用プラスチック: 二酸化炭素発生量は, 塩化ビニールフィルム=57325Ct, ポリエチレンフィルム=57979Ct, その他プラスチック=4221Ctで, 発生量小計は119525Ctとなった。人為的投入部分に対する内訳は1.5%となった(1996年)。発生量の多い順に, ①北海道, ②熊本県, ③茨城県, ④鹿児島県, ⑤宮崎県となった。

3. 農薬: 二酸化炭素発生量は, 殺虫剤(16種類計)=13109Ct, 殺菌剤(11種類計)=2849Ct, 殺虫殺菌剤(3種類計)=169Ct, 除草剤(13種類計)=3137Ctで, 発生量小計は19264Ctとなった(1996年)。人為的投入部分に占める内訳は0.3%となった。発生量の多い順に, ①千葉県, ②茨城県, ③鹿児島県, ④東京都, ⑤宮崎県となった。

4. 燃料油: 二酸化炭素発生量は, ガソリン= 1772×10^3 Ct, 灯油= 2135×10^3 Ct, 軽油= 1761×10^3 Ct, 重油= 1819×10^3 Ct, 潤滑油= 20×10^3 Ctで, 発生量小計は 7507×10^3 Ctとなった(1994年)。人為的投入部分に対する内訳は97.1%というきわめて高い値となった。なお, データの不備から地域別の発生順位を列挙することはできなかった。

5. 人為的投入部分から発生する総量: わが国の二酸化炭素年間総発生量は3億4500万Ct(1995年)であることから, 農業分野の直接的シェアとしては2.2%となる。これは, わが国農業生産額のGDPに対する比率に近い値である。しかし, ここで対象としたのは直接分だけであり, 農産物の輸送や貯蔵, 加工などに関係する間接分を加味すると, この値は最終的にかなり上昇すると推定された。

水田作業からの二酸化炭素発生量

以下は, 一定の前提条件の下で, それぞれ二酸化炭素発生量を推定したものである。

1. 水稲: 稚苗移植自己完結型の中型機械化体系からの二酸化炭素発生量は約224Ckg/haとなった。作業工程別では, 乾燥調製=91Ckg/ha, 収穫=40Ckg/ha, 耕うん・代かき=33Ckg/haとなり, これらからの発生量が多い。燃料動力源からの二酸化炭素発生量198Ckg/haに比べて, 肥料や農薬からは26Ckg/haと少ない。二酸化炭素発生量合計は, a) 稚苗移植栽培で中型機械化体系=198Ckg/ha, 大型機械化体系=201Ckg/ha, 大区画体系=186Ckg/ha, b) 乳苗移植栽培で大区画大型機械化体系=186Ckg/ha, c) 直播栽培で乾田直播=186Ckg/ha, 湛水土中=146Ckg/ha, 潤土表面=172Ckg/ha, へり散播=154Ckg/haとなった。直播栽培では, 育苗が省略されるので, その分二酸化炭素発生量は減少する。移植栽培では, 不耕起や部分耕などの耕うん省略が有効となる。管理作業としては, 作業の複合同時化や被覆肥料の活用が有効となる(鹿子嶋 1994)。

2. 裏作ムギ: 水田裏作のムギ(田作ムギ類)栽培からの二酸化炭素発生量は, コムギ中型機械化体系(東北南部)=219Ckg/ha, 二条オオムギ中型機械化体系(九州)=194Ckg/ha, 二条オオムギ大型機械化体系=190Ckg/ha, 六条オオムギ中型機械化体系(北陸南部)=163Ckg/haとなった。いずれも, 乾燥調製が総発生量の60%を占める。この場合, 耕うんや中耕培土がおもな発生源になっていることから, 不耕起栽培や無培土栽培が有効となる(鹿子嶋 1994)。

3. 転作ダイズ: 転作水田におけるダイズ作からの二酸化炭素発生量は216Ckg/haとなり, その約半分が土壌改良資材や肥料由来である。燃料動力源では, 乾燥調製からの発生が多いが, 中耕培土からの発生も多い。水稲・田作ムギ類・転作ダイズのいずれにおいても, 乾燥調

製からの発生が多く、その改善が鍵となる。地域的には、北海道における二酸化炭素発生量が多く、作付規模の拡大にともない発生量が増加する傾向がみられる（鹿子嶋 1994）。

畑作業からの二酸化炭素発生量

1. 畑穀作：最近の畑穀作は、北海道の畑ムギ作以外それ自体が経営の中心となっているものは少なく、他の畑作物や園芸作物との輪作の中で、連作障害の回避や有機物供給源として一定の役割を担わされている場合が多い。したがって、発生量にかかわる直接分のみならず、輪作後作物の連作障害軽減による農業や資材量の削減という間接効果にも着目する必要がある。

作付面積の多い陸稲やコムギ、二条オオムギ作からの二酸化炭素発生量は、陸稲直播体系＝88Ckg/ha、陸稲移植体系＝117Ckg/ha、コムギ大型機械化体系＝223～270Ckg/ha、コムギ中型機械化体系＝288Ckg/ha となった。乾燥調製からの発生が多いのが特徴である。ムギ類の二酸化炭素発生量は、陸稲に比べて多いが、ムギ類では収穫時の穀物水分が高く、乾燥用燃料を多く必要とすることがおもな原因であった。作業工程別にみると、二酸化炭素発生量は、①乾燥、②収穫・耕うん、③同時工程播種の順であった。また、二条オオムギの二酸化炭素発生量の方がコムギより多いのは、投入された土壌改良資材量の違いによる。

畑穀作における二酸化炭素発生量を削減するには、自然エネルギーの活用推進による圃場乾燥の改善が鍵となる。圃場作業では、工程の省略化や簡略化、複合同時化、作業精度の見直しなども有効である（金子1994）。例えば、不耕起栽培は温室効果ガスの発生量削減に大きく貢献する（坂井ら1994a, Robertsonら2000）。

2. 畑作ダイズ：これは、普通畑でのダイズ作を指す。畑作ダイズ単作における二酸化炭素発生量は、燃料動力源と資材由来合計で68～333Ckg/ha（3事例の平均＝179Ckg/ha）となるが、体系間の違いは大きい。これらの違いは、機械化の程度や石灰施用の有無、乾燥条件の違いなどで生じる。管理作業では、とくに申耕培土からの発生量が多い（森泉 1994）。

3. イモ作：二酸化炭素発生量は、バレイショ作＝87Ckg/ha（山名1993）、カンショ機械移植栽培＝165Ckg/ha、カンショマルチ栽培＝561Ckg/ha、サトイモ作＝283Ckg/ha、ヤマノイモ作＝1038Ckg/ha、コンニャク作＝967Ckg/ha となった。二酸化炭素発生量の多い工程は、植え付け前の耕うんや整地、収穫である。投入資材類からの二酸化炭素発生では、マルチフィルム、次いで土壌改良資材由来が多い。発生量の削減策としては、マルチフィルムを使わない栽培や耕うんの見直しが鍵となる（金子 1994）。

4. 露地野菜作：野菜作では機械化が遅れており、もともとが人力に依存する作業が多い。したがって、作業改善だけでは顕著な二酸化炭素発生量の削減効果を得にくい。一方、野菜作では年々投入資材量が増加する傾向にあることから、資材類に焦点を当てた削減対策が鍵となる。なお、必ずしも野菜作に限定されるものではないが、使用機械の適正な選択は容易ではない。例えば、1台の大型汎用機による体系と複数の小型専用機による体系を比較する場合、二酸化炭素発生量の面だけでは得失は決まらず、作業能率や精度からも制約を受ける（坂井1994b）。

施設園芸からの二酸化炭素発生量

施設園芸からの二酸化炭素発生量の90%近くは、暖房を中心とした環境制御関連機器による。その場合、加温が必要な時期や地域で二酸化炭素発生量が大きく異なることから、具体的な削減技術の適用場面も違ってくる。施設園芸で行われる機械作業には、耕うん・整地、運搬、防除などがある。露地栽培では定植や収穫の機械化が比較的進んでいるが、施設栽培では遅れ気味である。ガラス室などの園芸施設は一般に気密性が高いので、施設内作業ではエンジンの排気ガス対策が必要となる（杉本 1994）。

施設園芸からの発生量は、暖房装置由来が大部分を占めるため、温暖地域や暖房の設定温度が低い作物・作型では少なくなる。例えば、関東北部におけるトマト促成栽培からの二酸化炭素発生量は35937Ckg/haであり、南九州における促成栽培の8.6倍となる。東海地方におけるキュウリの促成栽培からの二酸化炭素発生量は73421Ckg/haであり、同地方におけるトマトの促成栽培の3.9倍となる。電力由来の二酸化炭素発生量が多いことも施設園芸の特徴である。トマトの長段促成栽培をみると、暖房装置による発生量の割合が高い関東北部でも、総発生量の9.2%は電力関係であった。各地域とも、暖房装置分を除いた発生量の90%以上は電力関係であった。

二酸化炭素施肥では、ロスが問題となる。施設内の二酸化炭素濃度を外気よりかなり高くするために、作物に固定されずに施設の隙間や換気による流出量が多くなる結果、暖房や電力からの発生量に次いでいる。トマトの水耕促成栽培における発生量は、土耕のそれに比べて約24%増加する。これは、水耕栽培が二酸化炭素施肥をセットにすることが多いからである。また、水耕栽培では養液循環ポンプによる発生量を別途見込む必要がある。施設園芸における二酸化炭素削減策としては、温室の光エネルギー補足率の向上や蓄熱性の向上、ヒートポンプの活用、栽培品目の見直しなど、作物や地域に適した削減技術の選択が鍵となる（杉本 1994）。

畜産施設からの二酸化炭素発生量

畜産施設は、搾乳牛舎や育成牛舎、資料調整室、牛乳処理室、サイロ、飼料タンク、糞尿処理施設などで構成されるが、飼料給与方式や搾乳方式、糞尿処理方式などで発生量が異なる。例えば、経産牛40頭（うち搾乳牛34頭）の繋ぎ飼いや搾乳牛舎をもつ畜産施設からの二酸化炭素発生量は2306Ckg/yrで、内訳は給飼=9%、搾乳=49%、糞尿処理など=42%となる。畜産施設からの発生量のうち、90%は搾乳・糞尿搬出・堆積・切り返しに関係し、搾乳による発生量の62%は冷却貯蔵に関係する。

年々多頭化傾向にある畜産施設が発生する二酸化炭素を削減するには、移動距離を短くするなど各施設の適正配置が有効となる。また、ミルクングパーラー方式の導入も搾乳作業の効率化という点で有効となる（加茂 1993）。

飼料作からの二酸化炭素発生量

1. 乾草生産：大型ロールペーラを用いる乾草生産体系からの二酸化炭素発生量は、17Ckg/haとなる。収穫機の高性能化はこれまで高動力化と引き換えに達成されてきた感があり、刈取作

業における発生量はとくに多い。通常、永年牧草地では数年程度をめぐりに草地の更新が必要で、そのために耕うん・整地、播種、施肥などが行われる。この場合も作業工程の省略化や複合同時化、簡易更新法の採用などが、発生量の削減に有効となる（山名 1993）。

2. サイレージ生産：ロールベアラを中心とする作業体系とフォーレージハーベスタを中心とする作業体系がある。機械化3体系を比較した結果、二酸化炭素発生量は21～37Ckg/haの範囲にあった。サイレージ生産では、予乾が鍵となり、これが発生量の多寡を分ける。すなわち、原料水分をいかに早く圃場で低下させ、収穫作業につなげるかが重要となる。一連の工程の中で、フォーレージハーベスタによる拾い上げ・細断・吹き上げ時の発生量はとくに多いからである（山名 1993）。

3. 青刈りトウモロコシ生産：青刈りトウモロコシはほとんどがサイレージ用であり、フォーレージハーベスタによる作業が中心となる。この場合、牧草とは異なり単年利用となるので、耕うんや施肥などの全作業時間に占める割合が増す。播種（トラクタ+コンプラクタ）+収穫（トラクタ+フォーレージハーベスタ）+運搬（トラクタ+ワゴン）合計で28Ckg/haの二酸化炭素発生量が見込まれる（山名 1993）。

自給的エネルギーの利用

農業分野では、従来から自給的エネルギーを積極的に利用しようとする試みがさまざまになされてきたが、実用技術として現場に定着したものはさほど多くない。それは自給的エネルギーがもつ不利な点、a) エネルギー密度が低く供給が不安定、b) 利用適地の制限、c) 高度な利用技術と安価なシステムの両方が必要、d) 太陽エネルギー以外は移動エネルギー源としての利用が容易でない、e) コスト的に成り立ちにくいなどが障害となってきたからである。一方、農業自体はこのように密度が低く気まぐれなエネルギーを利用する場面として、本来最もふさわしいという見方もある（坂井1995）。

1. バイオマスエネルギー：エネルギー源から陸生と水生に大別され、さらに陸生は農産バイオマス（糖料作物・澱粉作物・油料作物など）、林産バイオマス（燃料用など）、廃棄物バイオマス（廃棄物の直接燃焼・メタン発酵など）に分けられる。ドイツの例では、バイオマス利用の推進で住民1人当たりの二酸化炭素発生量が年間11%削減可能と試算されている（Ahl 2000）。

2. 畑作物を原料とする代替エネルギー：植物油利用やアルコール発酵などがある。バイオ燃料には、二酸化炭素発生量の顕著な削減効果が期待されている（Ulgiati 2001）。燃料油関係ではエステル化により利用上のいくつかの問題がクリアされてきたが、依然として未解決の問題も少なくない。生産性の問題を別にすれば、今後の最大の障壁は食料との競合である。世界人口の急増が懸念されるなかで、耕地面積についても単収についても大幅な向上は容易に期待できない（ワールドウォッチ研究所 2000）。

3. 風・水力エネルギー：水力に比べて風力のエネルギー変換効率は半分程度と低く、風力では同じ出力で設備が大型化する傾向にある。水力の場合は貯水池を設けることでエネルギーの貯蔵が可能となるが、風力の場合はそれも難しい。一方、風力には水路や導水管などの付帯設備が不要という利点がある（世良田 1993）。しかし、局地的な環境問題を引き起こす可能性がある（例えば、朝日新聞2001年7月20日版）。

4. 太陽エネルギー：太陽電池による光発電と太陽熱エネルギー利用に大別される。太陽電池の発電コストは年々低下していることから、強気の将来展望もなされている (Kimら2000)。

農業分野から発生するメタンと亜酸化窒素

従来からの二酸化炭素に加えて、農業分野が関係する温室効果ガスとしてのメタンと亜酸化窒素の重要さが増している (Minamiら1994)。デンマークの例では、人為的原因に由来するメタン総量の20%が、亜酸化窒素総量の40%がそれぞれ家畜排泄物から発生するといわれる (Sommer and Moller 2000)。

1. メタン：大気中に放出されるメタンは、酸素のない状態で微生物の働きにより生成される過程と、微生物に無関係に生成される過程がある。前者には湿地や水田、廃棄物埋立地などが発生源として働く。反芻動物やシロアリ、海洋、湖沼なども発生源として働く。後者には石油や石炭、天然ガスの採掘・輸送・使用中の漏れ、マントルやマグマ生成火山、さらには地震による放出などがある。メタンは、不完全燃焼でも、自動車の排気ガスやバイオマス燃焼からも発生する。IPCC (1994) によると、湿地 (21%)、水田 (11%)、家畜 (16%) からの発生が全体の50%近くを占める。一方、土壌には大気中のメタンを吸収する作用のあることが知られている。

反芻家畜から発生するメタンは約 $80\text{CH}_4\text{Mt/yr}$ で、このうちの80%は牛と水牛由来といわれる。反芻家畜では、飼料から摂取した全エネルギーの3~8%がメタン発生に使われる。したがって、飼料の摂取エネルギー効率を増加させる技術開発が鍵となる。これまで、メタン発生量を削減するように働く飼料添加物や穀物ワラのアンモニア処理などの研究例がある。

一方、家畜排泄物由来のメタン発生量削減技術としては、a) 家畜排泄物のラグーンを被覆することで発生量の40%を、b) 嫌気分解を利用した有機物消化槽を設置することで発生量の70%をそれぞれ回収可能と見積もられている。

水田由来のメタン発生量としては、 $25\sim 54\text{CH}_4\text{Mt/yr}$ という値が推奨されている。メタンは一般に土壌の酸化還元電位が -200mV のオーダで生成されるので、間断灌漑や中干し灌漑によって発生量削減が可能といわれる (陽 1998)。

2. 亜酸化窒素：亜酸化窒素は、同時にオゾン層破壊物質でもある。大気中に放出される亜酸化窒素には、微生物の働きで生成される過程と、微生物に無関係に生成される過程がある。前者では海洋や自然土壌、窒素施肥、家畜排泄物などが発生源となり、後者ではバイオマス燃焼や鋳工業、自動車の排気ガスなどが発生源となる。

一方、農耕地への転用にとまなう熱帯や温帯の森林および草地土壌が重要な亜酸化窒素発生源となることもある。窒素施肥による農耕地からの発生量は全体の約24%にすぎないが、人為的発生源の中では61%を占める。農耕地から発生する亜酸化窒素の多くは、作物要求に見合った窒素量、窒素循環の適正管理、新施肥技術、最適耕作や灌漑排水などの管理手法の組み合わせにより削減可能といわれる (陽 1998)。

おわりに

本稿では、地球温暖化と農業活動とのかわりについて、とくに進行防止の視点から最近の

技術動向をみてきた。この他にまだ多くの技術が提案されているが、紙数の関係で割愛した。

地球温暖化は、多くの環境問題、例えば地球生態系の存続という生物生存上の問題だけでなく、砂漠化や塩類集積 (Utset and Borroto 2001)、土壌の劣化や流亡などの農業上の深刻な問題とも関係する。しかも、それらの根幹をなす問題であると認識されている。地球温暖化は、日常生活とのかかわりが強いことに加えて、現象の複雑さや影響圏の大きさ、進行程度を感覚的に捉えにくいなどの特徴により、削減対策を具体化することが容易でない。換言すれば、だれもが被害者になり、だれもが加害者になるという、発生者と被害者を特定しにくい問題でもある。

このような性格の地球温暖化であるので、国際間の協力や取り決めが重要であることはいまでもないが、農業生産者に対する地道な啓蒙と行政支援も不可欠である。第二次大戦以降、資材やエネルギーの多投入、大規模モノカルチャー、機械化、化学化などを武器に、近代農業は作物や家畜の狭義の生産性向上を追求し続けてきた。最近では、このようなシステムには限界があると認識されているが、解決策として原始農業への単純回帰を選択することはできない。

今後、われわれは次世代以降に引き渡し可能な新たな農業システムを急いで探求し、具体化していかななくてはならない。このために、基礎データ類の充実は当然のこととして、加えて多様な研究手法の開発が不可欠である。例えば、研究手法については、モデル (Dhakhwa ら 1997, Lang 2001, Mendelsohn 1994, Parikh and Romanathan 1999) や LCA 解析 (Aycaguer ら 2001)、コンピュータによる農薬制御システム (Legg ら 1997) などが参考となるであろう。

最近では、土壌改良手段として有機物施用の効果を期待するだけでなく、地球温暖化防止を念頭に置いて、森林以外に農耕地を余剰炭素の蓄積源として積極的に機能させようという大きな動きがある (batjes 1996, curtin ら 2000)。米国の例では、1998年時点で約1220万 t と推定される農耕地土壌中の有機物含量を、保全耕うんの普及に合わせて、2008年までに25%増加することが確実視されている (Uri 2001)。いずれにしても、環境面を強く意識した持続的農業システムを今後展開していくには、採算面はもとより、技術の適用性や技術移転のあり方、公私の役割分担などを含めたさまざまな研究が必要とされる (Hatfield and Keeney 1994)。

最後に、本稿を草するに当たって、(財)農業技術協会発行の調査報告書を各所で引用させていただいた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Ahl, C. 2000. Biomass energy in a small-scale region of a developed country- the case of the district of Goettingen. *Ecol. Eng.* 16: S63-S67.
- Aycaguer, A.C., O.M. Lev and A.M. Winer. 2001. Reducing carbon dioxide emissions with enhanced oil recovery projects: A life cycle assessment approach. *Energy and Fuels* 15: 303-308.
- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Euro. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- Curtin, D., H. Wang, F. Selles, R.P. Zentner, V.O. Biederbeck and C.A. Campbell. 2000. Legume green manure as partial fallow replacement in semiarid Saskatchewan: Effect on carbon fluxes. *Canad. J. Soil Sci.* 80: 499-505.
- Dhakhwa, G.B., C.L. Campbell, S.K. LeDuc and E.J. Cooter. 1997. Maize growth: assessing the effects of global warming and CO₂ fertilization with crop models. *Agr. For. Meteorol.* 87: 253-272.
- 道宗直昭. 1997. エネルギー総投入量による農業の二酸化炭素発生量の推定. 平成8年度環境保全機能向

- 上農業生産方式確立調査委託事業報告書。(財)農業技術協会, 76-91.
- Hatfield, J.L. and D.R. Keeney. 1994. Challenges for the 21st century. in Sustainable Agriculture Systems by J.L. Hatfield and D.R. Karlen. Lewis Publishers. London. 287-307.
- IPCC. 1994. Climate Change 1994, Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios: eds. J.T. Houghton et al. Cambridge Univ. Press. Jeppsson, K.H. 2000. Carbon dioxide emission and water evaporation from deep litter systems. J. Agr. Eng. Res. 77: 429-440.
- 鹿子嶋力. 1994. 水田作における二酸化炭素発生に低減効果のある作業・作付体系－現行作業・作付体系による二酸化炭素発生量. 平成5年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書。(財)農業技術協会, 5-21.
- 加茂幹男. 1993. 畜産施設における二酸化炭素の抑制. 平成4年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書。(財)農業技術協会, 138-149.
- Kamp, T., H. Steindl, R.E. Hantschel, F. Beese and J.C. Munch. 1998. Nitrous oxide emissions from a fallow and wheat field as affected by increased soil temperatures. Biol. Fertil. Soils 27: 307-314.
- 金澤晋二郎. 1997. 日本の農耕地からの二酸化炭素発生量－日本の地球温暖化ガス二酸化炭素研究の現状と測定法. 平成8年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書。(財)農業技術協会, 34-60.
- 金子一也. 1994. 畑作における二酸化炭素発生に低減効果のある作業・作付体系－畑穀作, イモ作. 平成5年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書。(財)農業技術協会, 103-113, 134-144.
- 環境庁「地球温暖化問題研究会」編. 1993. 地球温暖化を防ぐ. NHK ブックス, 日本放送出版協会, 28-29.
- Kim, S.H., C. MacCracken and J. Edmonds. 2000. Solar energy technologies and stabilizing atmospheric CO₂ concentrations. Progr. Photovoltaics 8: 3-15.
- 小泉 博. 1999. 農耕地における二酸化炭素の排出・吸収と削減. 平成10年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書。(財)農業技術協会, 147-155.
- Lal, R. 1999. Soil quality and food security: The global perspective. in Soil Quality and Soil Erosion edited by R. Lal. CRC Press. New York. 3-16.
- Lang, G. 2001. Global warming and German agriculture- Impact estimations using a restricted profit function. Envir. Resource Economics 19: 97-112.
- Legg, B.J., V.R. Phillips, T.R. Cumby, C.H. Burton and P.C.H. Miller. 1997. Farming: Closing the cycle. Philosoph. Trans. Royal Soc. London Ser. A 355: 1321-1332.
- Mendelsohn, R., W.D. Nordhaus and D. Shaw. 1994. The Impact of global warming on agriculture-A Ricardian analysis. Amer. Economic Rev. 84: 753-771.
- Minami, K., A. Mosier and R. Sass. 1994. CH₄ and N₂O. NIAES Series 2. Yokendo Publishers. Tokyo.
- 陽 捷行. 1998. メタン・亜酸化窒素の発生と削減技術. 平成9年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書。(財)農業技術協会, 68-86.
- 森泉昭治. 1994. 畑作における二酸化炭素発生に低減効果のある作業・作付体系－畑作サイズ. 平成5年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書。(財)農業技術協会, 114-133.
- Oriov, D.S. and O.N. Biryukova. 1998. The stability of soil organic compounds and the emission of greenhouse gases into the atmosphere. Euras. Soil Sci. 31: 711-720.
- Parikh, J.K. and R. Ramanathan. 1999. Linkages among energy, agriculture and environment in rural India. Energy Economics 21: 561-585.
- Pomazkina, L.V., E.V. Lubnina, S.Y. Zorina, L.G. Kotova and I.V. Khortolomei. 1996. Dynamics of CO₂ emission from the gray forest soil in the forest-steppe of the Cisbaikal region. Euras. Soil Sci. 29: 1355-1359.
- Robertson, G.P., E.A. Paul and R.R. Harwood. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. Science. 289: 1922-1925.
- 坂井直樹・米川智司・木谷 収. 1994a. 不耕起栽培による二酸化炭素発生量の低減効果. 農業機械学会誌 56: 71-78.

- 坂井直樹, 1994b. 露地野菜作における二酸化炭素発生に低減効果のある作業・作付体系. 平成5年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書. (財)農業技術協会. 145-164.
- 坂井直樹, 1995. 自給的エネルギーの導入と展望. 平成6年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書. (財)農業技術協会. 19-26.
- 坂井直樹, 1998. わが国の農業分野からの二酸化炭素の発生と削減技術. 平成9年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書. (財)農業技術協会. 54-67.
- 世良田和寛, 1993. 熱・動力エネルギーとしての利活用による二酸化炭素発生の抑制—風・水力エネルギー—. 平成4年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書. (財)農業技術協会. 165-179.
- Simojoki, A. and A. Jaakkola. 2000. Effect of nitrogen fertilization, cropping and irrigation on soil air composition and nitrous oxide emission in a loamy clay. *Euro. J. Soil Sci.* 51: 413-424.
- Sommer, S.G. and H.B. Moller. 2000. Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production—effect of straw content. *J. Agr. Sci.* 134: 327-335.
- 杉本光穂, 1994. 施設園芸における二酸化炭素発生に低減効果のある作業・作付体系. 平成5年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書. (財)農業技術協会. 187-250.
- 東京電力広報部, 2001. 平成12年度版 数表でみる東京電力: 13, 157.
- Ulgiate, S. 2001. A comprehensive energy and economic assessment of biofuels: When “green” is not enough, *Crit. Rev. Plant Sci.* 20: 71-106.
- Uri, N.D. 2001. The potential impact of conservation practices in US agriculture on global climate change. *J. Sustain. Agr.* 18: 109-131.
- Utset, A. and M. Borroto. 2001. A modeling-GIS approach for assessing irrigation effects on soil salinisation under global warming conditions. *Agr. Water Manag.* 50: 53-63.
- Watanabe, T., P. Chairaj, H. Tsuruta, W. Masarngsan, C. Wongwiwatchal, S. Wonprasaid, W. Cholitkul and K. Minami. 2000. Nitrous oxide emission from fertilized upland fields in Thailand. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 57: 55-65.
- Watts, C.W., S. Eich and A.R. Dexter. 2000. Effects of mechanical energy inputs on soil respiration at the aggregate and field scales. *Soil & Till. Res.* 53: 231-243.
- ワールドウォッチ研究所, 2000. 地球環境データブック2000-2001. レスター・ブラウン編著, 福岡克也監訳, 家の光協会, 東京.
- 八木一行, 1999. 農耕地におけるメタンの排出・吸収と削減. 平成10年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書. (財)農業技術協会. 156-165.
- 山名伸樹, 1993. 畑作・飼料作における二酸化炭素発生抑制の作業体系. 平成4年度環境保全機能向上農業生産方式確立調査委託事業報告書. (財)農業技術協会. 62-73