

B - 6 陸域生態系の二酸化炭素動態の評価と予測モデリングに関する研究

(2) 人為的生態系の二酸化炭素変動機構のモデル化と予測

①農耕地における炭素のシーケストレーションの評価

研究代表者 農業環境技術研究所 袴田共之

農林水産省 農業環境技術研究所

環境生物部 植生生態研究室 小泉 博・西村誠一・中台利枝

平成8年度～10年度合計予算額 7,505千円
(平成10年度予算額 2,515千円)

〔要旨〕陸稲と大麦を二毛作した農耕地において土壌呼吸速度とそれに関わる環境要因との関係を解析し、夏作期と冬作期における農耕地の土壌呼吸速度を推定するための数種類のモデルを構築した。さらに、各モデルの妥当性を検討し、各作期における最適なモデル式を提案した。

水稲を一毛作した水田および陸稲、トウモロコシ、大豆を一毛作した畑地と陸稲-大麦、落花生-小麦、トウモロコシ-大麦を二毛作した畑地を対象に、水田と畑地生態系および作付体形の異なる畑地生態系において炭素の動態と収支を解明し、炭素(CO₂)の吸収源・供給源の視点から農耕地の評価を試みた。一毛作と二毛作耕地では収支が異なり、一毛作畑地の年間の炭素収支は270～320gCm⁻²のマイナスを示したのに対して、二毛作畑地の収支は160～270gCm⁻²のマイナスを示した。畑地を二毛作として利用することにより、年間当たり50～110gCm⁻²の炭素(CO₂)の放出を低減することが可能であることが示唆された。これに対して、水田の炭素収支は22.3gCm⁻²のマイナスを示した。このマイナス分は、地下70cmまでの炭素の蓄積量のわずか0.22%にすぎず、水田における炭素収支は、畑地の場合と大きく異なり、比較的バランスがとれていることが示唆された。

〔キーワード〕一毛作・二毛作・畑地・水田・土壌呼吸・炭素収支

1. 背景と目的

平成9年12月の京都における気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)の決議を受けて、人間活動に伴うCO₂放出量の削減およびその固定・吸収量の増大のための対策技術の定量的評価が緊急の課題となっている。なかでも、CO₂の循環・収支とりわけ森林生態系と農耕地生態系の炭素固定・吸収における役割の定量的評価が重要な課題となっているが、未だ確立されていないのが現状である。

農耕地生態系においては、IPCCの第二作業分科会(1995)が、農耕地の従来の管理・利用方法を改善することにより、現在化石燃料から放出されているCO₂の5～10%に相当する量を農耕地生態系に蓄積(固定)することが可能であると報告しているが、その具体的な利用・管理方法については未だ解明されていない。農耕地の管理・利用方法の違いによって、二酸化炭素の動態・収支がどの様に変化するのか、またどの様な管理方法により持続的かつCO₂の放出を低減した農業が可能であるかを解明し、農耕地生態系に

における炭素のシーケストレーションを評価する必要がある。ここでは以下の二点を研究の目的とした。

①シーケストレーションの評価の中で最も重要な部分は、土壌呼吸速度を推定するためのモデルの構築である。土壌呼吸速度は温度や土壌水分等の物理的環境によって大きく影響される。温度は土壌微生物や植物根の活性に影響し、CO₂の生産速度を変化させる。また、土壌水分はCO₂の拡散過程（通気性）に影響し、CO₂の移動速度を変化させていると考えられる。したがって、これら生物現象と物理現象が関わっている土壌呼吸速度を理解するには、各因子を組み込んだモデルの構築が必要である。そこで、二毛作耕地における土壌呼吸速度を推定するためのモデルの構築とモデルの妥当性を検討する。

②水稲を一毛作した水田および陸稲、トウモロコシ、大豆を一毛作した畑地と陸稲 - 大麦、落花生 - 小麦、トウモロコシ - 大麦を二毛作した畑地を対象に、水田と畑地生態系および作付体型の異なる畑地生態系において炭素の動態と収支を解明し、炭素（CO）の吸収源・供給源の視点から農耕地の評価を試みる。

2. 方法

(1) 土壌呼吸速度推定のためのモデル

土壌呼吸速度の測定は赤外線ガス分析装置を用いた通気法で行った。夏作期・冬作期を通して作物を栽培した試験地の畝間に4個のチャンバーをランダムに設置し、24～48時間の連続測定を行った。土壌呼吸速度の測定と同時に、熱電対（銅-コンスタンタン）によって、地上5cmと0cmの気温と地表下5cmの地温を測定した。土壌含水率は、土壌呼吸速度測定開始時に重量法により測定した。採土管（100mL）で表層土（0～5cm）を採取し、重量（FW）を測定した。さらに、採取した土壌を採土管ごと低水位の水槽に浸し、徐々にその水位を上げ、土壌間隙を水で満たし、再び重量（WW）を測定した。最後に、土壌サンプルを105℃で十分に乾燥させ、乾燥重量（DW）を測定した。これらの重量差から、含水比（乾土当たり）、体積含水率（液相率）および気相率を算出した。

(2) 農耕地の炭素収支

1992年5月から1995年4月までの3年間にわたり、陸稲、トウモロコシ、大豆（1993年のみ栽培）を一毛作した畑地と1995年5月から1998年4月までの4年間にわたり、陸稲-大麦、落花生-小麦、トウモロコシ-大麦を二毛作した畑地と水稲を一毛作した水田において、炭素の動態と収支を解析した。それぞれの耕地に栽培した作物は、地下部を含めて2～3週間の間隔で採取した。採取した作物体は葉・茎・根・穂・種子・枯死部に分けられ、乾燥重量を測定した。さらに各サンプルは細かく粉碎され、CNコーダーを用いて炭素濃度を測定した。作物体の呼吸速度および土壌・田面水-大気間におけるCO₂のフラックスは赤外線ガス分析装置を用いた通気法で測定した。

3. 結果と考察

(1) 土壌呼吸速度推定のためのモデル

土壌呼吸速度とそれを限定する環境因子との関係を表1にまとめた。土壌呼吸速度は温度と土壌水分の二つの環境要因によって強く影響を受けていた。とくに、夏作期の土壌呼吸速度は地表面温度と高い正の相関（ $R^2=0.808$ ）を示したが、土壌含水率とは負の相関

を示した ($R^2=0.692$)。また、それぞれの関係は指数関数と一次式で近似することができた。これらの結果を基礎に、地表面温度と土壤含水率を変数とするモデル式 ($SRd=7.30\exp(0.035TFd)-0.196Wv$; 記号は表1参照) を求めたところ、 $R^2=0.925$ の最も高い相関の回帰式を得ることができた。一方、冬作期の土壤呼吸速度は気温・地表面温度・地温と高い正の相関 ($R^2=0.850 \sim 0.854$) を示したが、土壤水分とは有意な相関を示さなかった。以上の結果から、二毛作耕地の土壤呼吸速度を推定するためには、夏作期には $SRd=7.30\exp(0.035TFd)-0.196Wv$ 、冬作期には $SRd=0.965\exp(0.120TFd)$ の回帰式が最適であることが示唆された。

表1 二毛作耕地における土壤呼吸速度(SRd)と温度及び土壤水分との関係

環境因子			土壤呼吸速度 SRd (g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹)	
			Adj- R ²	回 帰 式
夏作期	温度 (°C)	+5 cm (TAd)	0.773***	SRd=0.777exp(0.111TAd)
		0 cm (TFd)	0.808***	SRd=1.31exp(0.0856TFd)
		-5 cm (TSd)	0.707***	SRd=1.01exp(0.0946TSd)
	土壤水分 (%)	含水比 (Wm) ¹	0.452**	SRd=26.5 - 0.355Wm
		体積含水率(Wv) ²	0.692***	SRd=23.5 - 0.425Wv
温度(°C), 土壤水分 (%)		(TFd, Wv) ²	0.925***	SRd=7.30exp(0.035TFd)-0.196Wv
冬作期	温度 (°C)	+5 cm (TAd)	0.850***	SRd=0.937exp(0.117TAd)
		0 cm (TFd)	0.854***	SRd=0.965exp(0.120TFd)
		-5 cm (TSd)	0.852***	SRd=0.948exp(0.126TSd)
	土壤水分 (%)	含水比 (Wm) ¹	NS	—
		体積含水率(Wv) ²	NS	—
温度 (°C), 土壤水分 (%)		(TFd, Wv)	NS	—

NSは有意差なし、また、**と*** は有意水準 $P<0.01$ と $P<0.001$ を示す。

¹は含水比30-60%、²は体積含水率20-40%の範囲で得られたことを示す。

この最適なモデル式を用いて、1992年に農業環境技術研究所で測定された環境要因(地表面温度と土壤含水率)を基礎に、土壤呼吸速度の季節変化を推定したところ、図1のように実測した土壤呼吸速度の季節変化と良く一致していた。このような二つの環境要因を変数とした単純なモデル式により土壤呼吸速度を高い精度で推定できることが明らかになった。さらに、1991年から1994年の環境要因を基礎に土壤呼吸量を推定したところ、夏作期に $1,100\text{g} \sim 1,300\text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ 、冬作期に $600 \sim 700\text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ 、年間当たり $1,700 \sim 2,000\text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ の二酸化炭素が耕地土壤から放出されていることが明らかになった。

本研究において、夏作期の土壤呼吸速度は土壤水分により影響を受けていることが明らかとなった。土壤呼吸速度と温度の関係については多くの解析・報告がなされているが、土壤水分との関係については十分に検討されているとは言えない。一般に土壤水分は土壤微生物の活性に強く影響するものと考えられ、土壤試料を用いた室内実験においては、両者の間には正の相関が示されている^{1)・2)・3)}。野外測定においても、森林ではRout & Gupta(1989)⁴⁾が、草原ではGrahamer et al.(1991)⁵⁾が、土壤呼吸速度と含水比との正の相関を報告している。しかしながら本研究では、夏作期の畑地において土壤呼吸速度と土壤

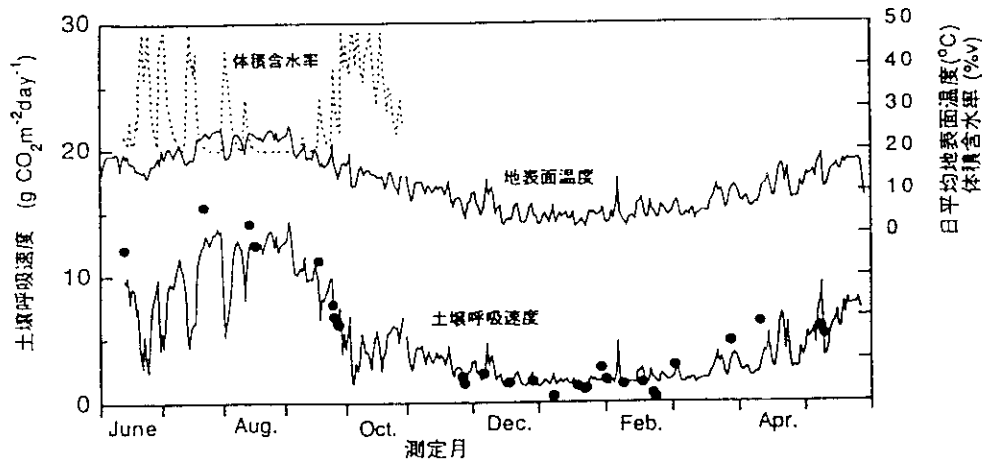


図1 二毛作耕地における土壌呼吸速度の季節変化の推定
●；実測値、実線；回帰式による推定値を示す。

水分との間に負の相関関係がみられた(表1)。また、体積含水率 ($\text{Adj-R}^2=0.692, 0.704, 0.527$)の方が含水比 ($\text{Adj-R}^2=0.452, 0.264, 0.514$)より高い相関を示した。本研究と同様の結果は、野外条件下においてはわずかであるが報告されている。Kowalenko et al. (1978)⁶⁾は休耕地において土壌呼吸速度と含水率(%mm)との負の相関を、Seto(1982)⁷⁾は裸地において土壌呼吸速度が降雨後に急激に低下したと報告している。本研究では、体積含水率(Wv)とともに気相率(AFP)の測定も行ったが、その結果、両者は反比例の関係にあることが確認された($Wv=65.7 - 0.94 \text{ AFP}, R^2=0.830$)。したがって、本研究において示された、夏作期の体積含水率の増加にともなう土壌呼吸速度の低下は、気相率の低下に伴う土壌呼吸速度の低下と考えることができる。このような気相率の低下は、畑地土壌層における生物への酸素供給の低下を示唆している。Linn & Doran (1984)⁸⁾は、土壌試料の液相率(%v)が20%から60%において土壌中のCO₂生産速度は増加し、液相率が60%以上では、逆に減少するとの報告をしている。また、Grant & Rochette (1994)⁹⁾も室内実験において同様の結果を示している。

一方、冬作期における土壌呼吸速度と体積含水率には有意な関係がみられなかったが(表1)、この理由としてまず第一に、冬作期の含水率の変化域が夏作期に比べて小さいことがあげられる。含水率の変化の範囲が狭いために、土壌呼吸速度に対する体積含水率の影響を捉えにくくしている可能性がある。また、冬作期のような低温期の土壌呼吸速度は主に温度によって影響を受けるのかもしれない。微生物の活性は、高温下においてより土壌含水率への感受性が高まるという報告もある¹⁰⁾。

(2) 農耕地の炭素収支

①炭素の循環経路

水田における炭素の循環経路を図2に模式的に示す。大気中の炭素は、水稻の光合成によって、総生産として固定され、そのうちの一部が水稻の呼吸として消費され大気中にもどっていく。その残りの炭素が純生産として作物体に固定される。さらにこの固定された炭素は、一部が昆虫などに捕食された後、収穫物として系外へ持ち出される。一方、リタ

一や、根などの作物残渣は土壌中の分解者に供給される。土壌への炭素の供給源としては、このリターおよび作物残渣の他に厩肥があり、移出は土壌微生物・動物の呼吸による土壌有機物の分解に伴う炭素の放出によって起こる。

このように炭素 (CO₂) は大気から作物に固定され、それから作物の呼吸により大気にかえる経路、収穫物として我々に利用された後で大気にかえる経路、そして作物残渣などの有機物として土壌に入り、そこから大気にかえる経路から成り立っており、土壌から作物へという再循環経路は無視できる程度と考えられている。したがって、土壌中の炭素収支、すなわち、土壌への炭素の供給と移出の量的なバランスを評価する上で、作物の光合成速度と呼吸速度、土壌中の有機物の無機化速度は重要な要因となっている。

さらに、湛水期間の水田における炭素の循環経路は、もう一つの大きな特徴を持っている。それは図1に示したように土壌表面と大気との間に水の層 (田面水) が存在する。

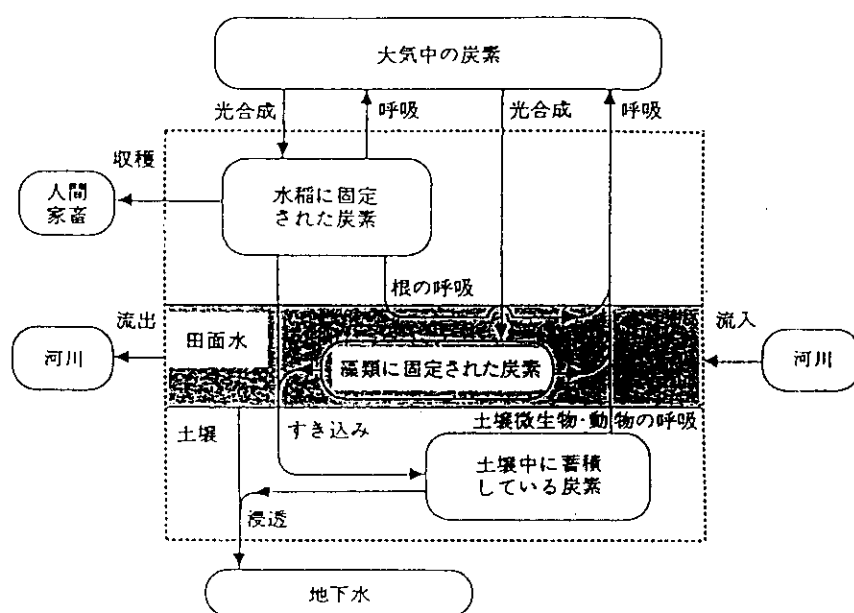


図2 湛水期の水田生態系における炭素の循環経路の模式図

ことである。田面水における炭素の循環は河川・雨による流入の経路と河川への流出および地下水への浸透による田面水からの移出の経路から成り立っている。さらに田面水に生育する藻類の光合成による炭素の固定、すなわち大気から田面水への移入の経路と土壌微生物・藻類の呼吸により田面水から大気にかえる経路を考慮する必要がある。

②田面水と土壌表面における炭素 (CO₂) フラックス

水田生態系は、畑地と異なり湛水状態と乾燥状態 (落水状態) を繰り返し、毎年栽培が行われている。したがって水田における炭素 (CO₂) の動態と収支を明らかにする場合、湛水期 (稲栽培期) と落水期 (休閑期) の両期における炭素の動態を詳細に把握する必要がある。

図3に湛水期の7月 (快晴日) に測定した田面水表面における炭素 (CO₂) フラックスと環境条件 (水温、地温、田面水の pH、光量子密度等) の日変化を示した。CO₂ は日中

に大気中から田面水に吸収され、夜間に田面水から大気へ放出されており、その日変化のパターンは湛水期を通して同じであった。一方、落水期の2月に測定した土壌表面における炭素 (CO₂) フラックスと地表面温度の日変化をみると、畑地土壌と同様にCO₂は一日を通して土壌表面から大気中へ放出されており、その日変化のパターンは地表面温度の変化のパターンとよく対応していた。

次に炭素 (CO₂) フラックスと環境条件の関係をみると、湛水期 (5月～9月) の炭素フラックスは水温および田面水の pH に対して負の相関を、DIC (田面水に溶解している CO₂ 量) に対しては正の相関を示した。一方、落水期 (10月～翌年4月) の炭素フラックスは地表面温度と正の相関を示した。

以上のデータを基礎にして湛水期と落水期の炭素 (CO₂) フラックスの季節変化を推定すると、その値は湛水期と落水期で大きく異なっていた。湛水期は大気中から田面水への負のフラックスと、田面水から大気中への正のフラックスを繰り返す日変化パターンが認められた。また6月から7月の水稻の生育中期においては負のフラックスの値が高くなっていた。これに対して、落水期は全期間を通して地表面から大気中への正のフラックスが認められた。

③水田の炭素収支

1995年10月から1997年9月までの2年間にわたり測定した水田における年間の炭素の収支を表2に示した。土壌への炭素の供給源としては、先に述べたように作物のリターおよび残渣中の炭素と、厩肥中の炭素、さらに河川・雨からの炭素と藻類の光合成により固定された炭素がある。作物残渣およびリターとして土壌中の分解者に供給された炭素は、2年間の平均で206.4 gC m⁻²、河川等からの流入により供給された量は32.7 gC m⁻²、藻類に固定されその後遺体として土壌に供給された炭素は25.7 gC m⁻²となり、合計で264.8 gC m⁻²の炭素が移入したことになる。

一方、土壌からの炭素の移出としては、土壌有機物の分解に伴う炭素放出と灌漑水の河川への流出および地下水への浸透がある。有機物の分解に伴い放出された炭素は、238.2 gC m⁻²、さらに灌漑水として流出した炭素と地下水へ浸透した炭素は、それぞれ23.1 gC

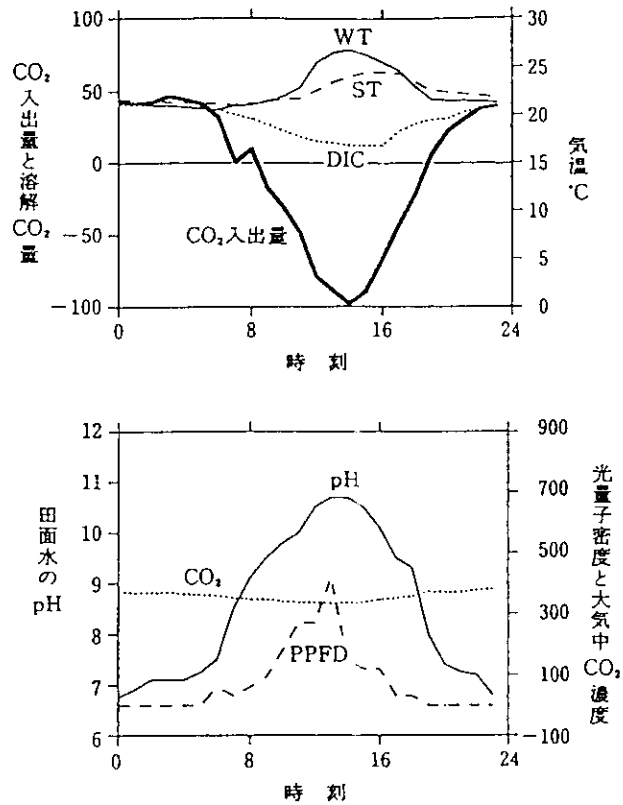


図3 湛水期の水田生態系における田面水表面と大気間のCO₂入出量と環境条件の日変化

CO₂入出量の正の値は田面水から大気中へのCO₂の放出を、負の値は大気中から田面水へのCO₂の吸収を示す。測定は1993年7月16日、快晴日に行った。WT、水温；ST、地温；DIC、田面水に溶解しているCO₂量；pH、田面水のpH；PPFD、光量子密度；CO₂、大気中のCO₂濃度

m⁻²、25.8 gC m⁻²となり、合計で 287.1 gC m⁻²の炭素が系から移出していったことになる。したがって、この水田の土壌中の炭素収支は、22.3 gC m⁻²のマイナスとなる。このマイナス分は、地下 70cm までの炭素の蓄積量のおよそ 0.22%にすぎない。以上のように水田における炭素収支は、畑地の場合と大きく異なり、比較的バランスがとれていることがわかる。

表 2 水稲を一毛作した耕地における炭素収支

	休閑期 (落水期) (gC m ⁻²)	栽培期 (湛水期) (gC m ⁻²)	通年 (gC m ⁻²)
I. 作物に固定された炭素量			
(a)総生産として固定された量	61.4*	1,311.0	1,372.4
(b)純生産として固定された量	36.1*	713.7	749.8
(i)収穫にともなう持ち出し量	0	543.4	543.4
(ii)土壌への供給量	36.1*	170.3	206.4
(iii)捕食者に利用された量	+	+	+
(c)呼吸として消費された量	25.3*	597.4	622.7
II. 藻類に固定された炭素量			
(a)総生産として固定された量	0	36.8	36.8
(b)純生産として固定された量	0	25.7	25.7
(c)呼吸として消費された量	0	11.1	11.1
III. 土壌中の炭素			
(a)厩肥として供給された炭素量	0	0	0
(b)作物遺体・刈り株として供給された量	36.1	170.3	206.4
(c)藻類の遺体として供給された量	0	25.7	25.7
(d)有機物の分解にともなう炭素放出量	106.3	131.9	238.2
IV. 田面水中の炭素			
(a)河川・降水による流入量	1.2	31.5	32.7
(b)河川への流失量	0	23.1	23.1
(c)地下水への浸透量	0	25.8	25.8
V. 土壌中の炭素収支	-69.0	46.7	-22.3

注：1) それぞれの値は2年間の平均を示す。

2) 土壌中の炭素収支 = (I a + II a + III a + IV a) - (I b + I biii + I c + II c + III d + IV b + IV c)

3) * : ひこばえにより固定・消費された炭素量

④一毛作と二毛作畑地の炭素収支

一毛作畑地と二毛作畑地における炭素収支を比較すると(表3、表4)、一毛作畑地の年間の炭素収支は 270～320gCm²のマイナスを示し、このマイナス分は地下 70cm までの炭素の蓄積量の 1.2～1.4%に相当した。一方、二毛作畑地の年間の炭素収支も 160～270gCm²のマイナスを示し、このマイナス分は地下 70cm までの炭素の蓄積量の 0.7～1.2%に相当した。以上の結果から、このような耕種方法を繰り返せば、一毛作・二毛作畑地とも土壌に蓄積されている炭素が年々消費され、耕地土壌の消耗を招くことが示唆された。

また、一毛作と二毛作の畑地における炭素収支を比較すると、二毛作畑地の方が炭素(CO₂)の放出が少ないことが明らかになった。したがって、一毛作耕地を二毛作畑地として利用することにより、年間当たり 50～110gCm²の炭素(CO₂)の放出を低減することが可能であることが示唆された。この差は、冬作期における作物の炭素固定に原因があり、畑地生態系からの炭素(CO₂)の放出量を低減するためには、休閑期を減少し、畑地の利用期間をできるだけ長くする(作物の栽培期間を長くし、畑地を裸地状態にしない)

ことが必要であると考えられた。

表3 一毛作畑地における炭素収支

	一毛作		
	陸稲	トウモロコシ	ダイズ
I. 作物に固定された炭素量			
(a) 総生産として固定された量	436.1±123.6	548.1±150.2	635.9
(b) 純生産として固定された量	259.1±18.1	381.7±102.2	330.7
(i) 収穫に伴う持ち出し量	114.8±8.2	179.9±48.3	120.7
(ii) 土壌への供給量	144.3±10.3	201.8±54.2	210.0
(c) 呼吸として消費された量	177.0±12.1	166.5±48.1	305.2
II. 土壌中の炭素量			
(a) 厩肥として供給された炭素量	0	0	0
(b) リター・刈り株として供給された量	144.3±10.3	201.8±54.2	210.0
(c) 降水により供給された炭素量	1.3±0.2	1.3±0.2	1.3
(d) 有機物の分解に伴う炭素放出量	459.9±16.2	468.7±15.1	478.9
III. 土壌中の炭素収支	-314.3±5.9	-265.6±69.3	-267.6

表4 二毛作畑地における炭素収支

	二毛作		
	陸稲-大麦	落花生-小麦	トウモロコシ-大麦
I. 作物に固定された炭素量			
(a) 総生産として固定された量	1257.5±10.6	1187.7±298.1	1396.9±149.0
(b) 純生産として固定された量	641.8±73.0	609.2±111.4	789.1±39.0
(i) 収穫に伴う持ち出し量	310.3±35.3	238.7±43.6	380.6±18.8
(ii) 土壌への供給量	331.5±46.6	370.5±81.4	408.5±15.1
(c) 呼吸として消費された量	615.8±62.4	578.5±209.9	607.5±110.0
II. 土壌中の炭素量			
(a) 厩肥として供給された炭素量	0	0	0
(b) リター・刈り株として供給された量	331.5±46.6	370.5±81.4	408.5±15.1
(c) 降水により供給された炭素量	1.3±0.2	1.3±0.2	1.3±0.2
(d) 有機物の分解に伴う炭素放出量	598.6±24.1	554.1±1.5	568.4±17.3
III. 土壌中の炭素収支	-265.6±22.5	-182.2±82.8	-158.4±32.4

それぞれの値は3年間の平均±SDを示す(大豆の一毛作畑地については1年間のみの値)。作物の固定量は生長解析法で、作物体の呼吸速度および土壌・田面水-大気間のCO₂フラックスは赤外線ガス分析装置を用いた通気法で測定した。
 土壌中の炭素収支 = (I a + II a + II c) - (I b i + I c + II d)
 総生産量 = 純生産量 + 呼吸量

以上のような研究に基づいて、耕地における炭素の循環速度や収支が耕地の作付体系や管理方法によって、どのように変動するかということを知ることが出来る。ここでは、結びにかえて、水田と畑地について土壌中の炭素の収支を検討することにより、現在の耕地利用における問題点とこれからの方向について考えてみたい。

表2と表3、4を比較することにより、日本における水田と畑地生態系の炭素収支の実態を把握することができる。畑地と水田生態系の年間の炭素収支はそれぞれ 270 ~ 320 gC m⁻²と 10 ~ 30 gC m⁻²のマイナスで、畑地の方が 10 倍以上も土壌中の炭素(有機

物)の消耗が激しいことがわかる。この差は水田における湛水期の土壌有機物の分解速度の低さに原因があると考えられる。すなわち、この時期は湛水により土壌が還元状態になり、有機物の消耗が強く抑えられるのである。一方、同じ水田であっても、熱帯アジアの水田は、相対的に温度の低い雨期に稲作を行い、気温の高い乾期に休閑するため、土壌有機物の分解は激しく、有機物含有量はきわめて低いと報告されている。

以上のように水田における炭素収支は、畑地の場合と大きく異なり、比較的バランスがとれている。すなわち、この水田生態系においては、今後も同様な耕種方法を繰り返しても、土壌中に蓄積されている炭素が、大きく消費されて行くことはないと思われる。このことは炭素(有機物)収支という視点から見た場合、わが国の水田生態系は地力を維持しながら長期にわたり安全な作物を安定生産して行くことが可能であることを示唆している。このことが2,000年以上もの間、生育異常や収量の低下を起こさず稲作が毎年繰り返されている理由の一つであろう。

一方、畑地の場合、現在広く行われているような化学肥料に強く依存した耕地の利用方法は、いくつかの問題点を持っている。その一つとして、今後もこのような耕種方法を繰り返せば、土壌に蓄積されている炭素が、年々かなり消費されていくことがあげられる。このことは炭素収支という視点からみた場合、畑地生態系の安定性を維持する上で、作物の収穫残渣の一部を系内にもどすといった耕種方法の工夫の必要性を示唆している。

4. 引用文献

- 1) Wilson J. M. & Griffin D. M. (1975) Water potential and the respiration of micro-organisms in the soil. *Soil Biology and Biochemistry* 7:199-204.
- 2) Orchard V. A. & Cook F. J. (1983) Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry* 15:447-453.
- 3) Orchard V. A., Cook F. J. & Corderoy D. M. (1992) Field and laboratory studies on the relationships between respiration and moisture for two soils of contrasting fertility status. *Pedobiologia* 36:21-33.
- 4) Rout S. K. & Gupta S. R. (1989) Soil respiration in relation to abiotic factors, forest floor litter, root biomass and litter quality in forest ecosystems of Siwaliks in northern India. *Acta Ecologica* 10:229-244.
- 5) Grammer K., Jawson M.D. & Skopp J. (1991) Day and night soil respiration from a grassland. *Soil Biology and Biochemistry* 23:77-81.
- 6) Kowalenko C. G., Ivarson K. C. & Cameron D.R. (1978) Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils. *Soil Biology and Biochemistry* 10:417-423.
- 7) Seto M. (1982) A preliminary observation on CO₂ evolution from soil in situ measured by an air current method. *Japanese Journal of Ecology* 32:535-538.
- 8) Linn D. M. & Doran J.W. (1984) Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal* 48:1267-1272.

9) Grant R.F. & Rochette P. (1994) Soil microbial respiration at different water potentials and temperatures: theory and mathematical modeling. *Soil Science Society of America Journal* 58:1681-1690.

10) Grant R. F. (1991) A technique for estimating denitrification rates at different soil temperatures, water contents and nitrate concentrations. *Soil Science* 152: 41-52.

[国際共同研究] なし

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

別宮有紀子、中坪孝之、久米篤、小泉博 (1997) 土壌呼吸特性の温度馴化特性. 日本生態学会大会要旨: 122.

中台利枝、横澤正幸、池田浩明、小泉博 (1997) 休耕地における土壌からのCO₂放出のモデル化. 日本生態学会大会要旨: 177.

木部剛、中台利枝、鞠子茂、唐艶鴻、小泉博 (1998) 小型多チャンネルCO₂フラックス測定システムの開発. 日本生態学会大会要旨: 133.

中台利枝、横澤正幸、池田浩明、小泉博 (1998) 休耕地における土壌呼吸速度の日変化の推定. 日本生態学会大会要旨: 114.

鞠子茂、小泉博、木部剛、西村格 (1998) 冬期における大気-土壌間炭素フラックスの温度依存性. 日本生態学会大会要旨: 119.

(2) 論文等発表

○ Koizumi, H., Kontturi, M., Mariko, S. & Mela, T. (1996) Carbon dioxide evolution from snow-covered agricultural ecosystems in Finland. *Agricultural and Food Science in Finland* 5:421-430.

○ Nakadai, T., Koizumi, H., Bekku, Y. & Totsuka, T. (1996) Carbon dioxide evolution from upland rice-barley double-cropping field in central Japan. *Ecological Research* 11: 217-227.

小泉博 (1996) 炭素循環からみた畑地および水田生態系の持続性. 農林統計協会: 75-90.

○ Bekku, Y., Koizumi, H., Oikawa, T. & Iwaki, H. (1997) Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology* 5: 247-254.

小泉博 (1997) 水田における有機物収支と動態 ---畑地との比較を通して---. 土水研究会14: 60-68.

Koizumi, H., Kibe, T., Nakadai, T., Bekku, Y., Tang, Y., Nishimura, S., Kawashima, H., Kobayashi, K. & Mariko, S. (1998) Carbon dynamics and budgets in upland and paddy agricultural ecosystems in monsoon east Asia. *INTECOL* 7: 232.