

B-1 地球温暖化に係る二酸化炭素・炭素循環に関する研究

(3) 農業生態系における炭素循環・収支の定量的解析

②水田における炭素循環・収支の定量的解析

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

環境資源部 土壌管理科 土壌有機物研究室 早野恒一・竹中 真・上村順子

平成5－7年度合計予算額 8,292千円

(平成7年度予算額 2,319千円)

〔要旨〕水田生態系における炭素循環を定量的に解明するために、所内の圃場に定点を設け、土壌、作物体、気体中の炭素含量を分析し、以下の結果を得た。チャンバー法による水田の気体炭素フラックスの測定において、無遮光下では光合成と呼吸・分解が同時進行下でのフラックスを測定するのに対し、遮光下では呼吸・分解のみのフラックスが測定できると判断した。このような仕分けにより光合成C量と呼吸・分解C量を分別して試算できた。この手法と土壌炭素、植物体炭素、田面水、浸透水炭素分析を組み合わせ水田生態系の炭素収支を試算した。

〔キーワード〕水田、炭素循環、二酸化炭素、メタン、チャンバー法

1. 序

大気中の二酸化炭素やメタン等の温室効果ガス濃度の増加は地球の温暖化をもたらしている¹⁾。二酸化炭素は多量に存在する温室効果ガスの一つである。地球温暖化の防止のための技術的対策を講ずるためには、さまざまな生態系における炭素循環量を定量的に解析する研究が不可欠である。本研究では水田生態系のさまざまな構成要素の炭素含量と炭素の出入りを定量的に解析しようとしている。

2. 研究目的

水田および作物体からの二酸化炭素やメタンの放出量、作物体の生産量、雨水、灌漑水からの炭素供給量、排水・浸透水からの炭素供給量、排水、浸透水としての炭素の流亡量などを測定することにより、水田生態系における炭素循環量の定量的解析を行う。そのために当研究所内の定点圃場において湛水期間中および落水期間中の作物体の生産量、液体中のC量、および水田生態系で放出または流入する二酸化炭素およびメタンの測定の検討を行った。

3. 研究方法

1) 試験圃場の概要

茨城県つくば市観音台3-1-1に所在する農業環境技術研究所内の細粒灰色低地土層からなる造成台地土の水田圃場(4 x 10 m)を調査圃場に設定し、コシヒカリを5月12日に株間15

cm、畝間30cmの間隔で移植した。施肥量は基肥として5月10日にオール16型のものを成分で4Kg/10a、追肥として7月23日にオール8型のものを成分で2Kg/10a施用した。農薬は5月20日に除草剤ザーク、8月12日に殺虫剤ディープテレックス、殺菌剤カスミを散布した。水管理は常時湛水で、必要に応じて給水を行い、9月14日に落水した。試験圃場内の試料採取地点に関する概略を図1に示した。

2) 試料の採取及び分析方法

土壌試料を湛水前に採取し、2ミリのふるいを通した部分を作土試料とし、ふるい上に残ったわらの細片等を拾い取った部分を有機性細片試料とした。それらについて乾燥粉体を調製し、その炭素含量を分析した。坪刈りおよび圃場内の有底枠コンテナにおける水稻の生育量をもとに作物体地上部および根の生育量および炭素含量を分析して試算した。根の生育量の評価では、コンテナで生育した水稻のわらと根の乾物重量比がコンテナ外で生育した水稻のわらと根の乾物重量比と等しいものとしてその比(69.4/125)を圃場のわら乾物重(653Kg/10a)に乗じて算出して評価した。坪刈り水稻の生育量をもとに作物体地上部および根の生育量および炭素含量を分析し、固定された植物体C量を試算した。稲体C量の季節的推移を調べるための試料の採取は平均的な生育状態の稲株を肉眼観察により判定して、5月24日が10株、6月27日が2株、7月27日と8月28日は1株、株を中心に径15cm、深さ15cmの円筒状に切り取って行った。炭素含量の分析はNCアナライザー(スミグラフNC90)でおこなった。

液体試料の内、田面水は圃場におけるフラックス計測時に採取した。灌漑水は給水時に流出口より開始後と終了前に採取した。浸透水量は浸透深から試算した、浸透水はポラスカップにより圃場の3地点より吸引採取した。液体中の炭素の分析はTOC分析計(島津TOC5000)で行った。

メタンおよび二酸化炭素のフラックスは陽・八木(1988)²⁾の方法に準じて測定した。すなわち、6稲株を内部に含むポリカーボネート製のガス採取チャンバー(60x60x100cm)から経時的(夏季には0、5および10分、冬季には0、10および20分)にテドラーバッグにガスを採取した。ガスの採取は午前11時に行った。落水後のガス採取は圃場に無底枠(60x60cm)を打ち込み、その上に採取チャンバーを設置して行った。遮光下でのガス採取ではチャンバー全体を赤い裏地のついた厚手の黒布で覆って5分後に採取を開始した。気体中のメタンおよび二酸化炭素の濃度はガスクロマトグラフ(島津GC-14B)によって分析した。ガス試料をカラム温度60℃に保ったポラパックQ(2m)とポラパックN(1m)の直列カラムにチャージし、キャリアーガス流速50ml/分の条件でFID、TCD付きのガスクロマトグラフによる同時分析による試料ガス濃度の変化から試算した。植生下での二酸化炭素フラックスはガス濃度の変化が概ね一次反応速度様式で進行することから、式、 $\log[A] = \log[A_0] - (k/2.3)t$ に測定値を当てはめてk値を求め、 $v = kC$ において初発の二酸化炭素濃度Cとの積から初速度を求めた。

4. 実験結果

1) 固体中の炭素

固体炭素として4月の作土層に含まれる炭素量は10地点の平均で $(2.57 \pm 0.093) \times 10^{-2} \text{ kg kg}^{-1}$ 乾土であった。作土層の厚さを15cm、仮比重を1.25とすると面積当たりでは4.81t/10aと試算された。同様な方法で試算すると11月では4.31t/10aであった。1993年12月7日に耕耘後の

試験圃場の10地点から採取した土壤に含まれる有機性細片は乾重で $2306 \pm 1687 \text{ kg} / 10\text{a}$ （±は標準偏差）であり、その炭素含量は $(12 \pm 4) \times 10^{-2} \text{ kg} / \text{kg}$ 乾土であった。作土層の厚さを15cmとすると有機性細片C量は $(278 \pm 202) \times 10^{-2} \text{ kg} / 10\text{a}$ と試算された（図2）。1993年、1994年および1995年の玄米収量は500kg、550kgおよび403kg/10aで3年間の平均収量は484kg/10aであった。作物体生産C量は玄米、籾殻、わら、根およびひこばえで、それぞれ、191kg、42kg、263kg、136kg、および16kg/10aであった（図2）。コンテナで生育した稲については地下部も定量的に回収することができた。1993年のコンテナ生育稲わらと地下部の乾重の2連の平均と範囲はそれぞれ、 $125 \pm 14 \text{ kg} / 10\text{a}$ および $69.4 \pm 4 \text{ kg} / 10\text{a}$ に相当した。1993年の坪刈りの稲わらの乾重の2連の平均と範囲は $653 \pm 5 \text{ kg} / 10\text{a}$ であった。コンテナ生育の稲わら量（125kg/10a）は坪刈り稲わら量（653kg/10a）の19.1%にすぎなかった。このことから圃場生育稲の根量はコンテナ生育稲の根量よりかなり多いであろうと判断した。地上部と地下部の生育比率は一定であると仮定して、コンテナの地下部/稲わら比（69.4/125）に坪刈りの稲わら量（653kg/10a）を乗じて1993年の圃場の稲体根C量を試算した。前述の根C量136kg/10aは3年間の平均である。生育に伴う稲体C含量の推移を図3に示した。1995年5月12日、5月24日および6月27日に採取した稲株の地下部C/地上部C比はそれぞれ、0.37、0.36および0.35と一定していたが、7月27日および8月28日のその比はそれぞれ、0.15および0.10と低下していた。その原因は稲株を中心に径15cm、深さ15cmの円筒状の採取では地下の根系を十分に回収できなかったためと判断した。そこで1995年の地上部C（443.7kg/10a）/地下部C（128.9kg/10a）比、0.29を用いて、0.29に7月27日、8月28日および9月8日の地上部Cに乗じて得られた値をプロットしたのが図3の凡例の（地下部Cの対数）の線である。1995年8月28日に採取した稲体の地上部の下方の葉には一部に枯葉がみられた。地上部と地下部に仕分けた時に自然に離れ落ちた部分を枯葉部として回収した。枯葉の乾重は1株当たり3.64gであり、枯葉部C含量は $29.8 \times 10^{-2} \text{ kg} / \text{kg}$ 乾重であった。したがって、1株当たりの枯葉C含量は1.08gと試算された。この量は面積当たりに換算すると23.4kgC/10aとなり、地上部C量の5.1%に相当した（図4）。

2) 液体中の炭素

田面水中のC濃度の季節変動を図5に示した。田面水の平均C濃度は $15.7 \text{ g} / \text{m}^3$ であり、無機態C量の含有率は60%であった。平均の水深を10cmとすると田面水量は $100 \text{ m}^3 / 10\text{a}$ なので、田面水C量は1.6kg/10aと試算された。1993年8月4～5日にかけての田面水中のC濃度とpHの日変化を図6に示した。昼間は夜間に比べてC含量が低い傾向がみられた。それに対して田面水のpHはほとんど変わらなかった。灌漑水中のC濃度の季節変動を図7に示した。給水時の水量計の動きから読みとられた灌漑水量は'94では $471 \text{ m}^3 / 10\text{a}$ であった。1994年の灌漑水の平均C含量は $17.1 \text{ g} / \text{m}^3$ であった。その内無機態Cの含有率は $11.8 \text{ g} / \text{m}^3$ （69%）であった。それぞれの給水時の給水量とその時のC濃度から灌漑水C量を試算すると'94では8.1kgC/10aであった。浸透水中のC含量の季節的推移を図8に示した。供試水田圃場の降下浸透水量は3mm/日であった。湛水期間を150日間とすると平均浸透水量は 450 m^3 と試算された。浸透水の採水位置①、②および③（図1）における1993年8月3日のC濃度は45.4mg/l、63.8mg/lおよび125.3mg/l、9月22日におけるC濃度は58.1mg/l、66.1mg/lおよび104.4mg/lと位置によってばらつきが大きかった。また、1993年や1994年に比べて1995年の8月29日と9月8日の浸透水のC濃度はかなり高かった。このようなばらつきはあるが、'93～'95の平均C濃度は $66.4 \text{ g} / \text{m}^3$ であり、平均浸透C量は29.9

kg/10aと試算された。以上の結果から液体中の炭素は湛水期間中に灌漑水として8kg、雨水として0.4kg流入し、浸透水として26kg/10a流出したと試算された。

3) 気体中の炭素

水稻生育下の二酸化炭素フラックスの計測の一例('95/7/27)を図9a, bに示した。上段の図は普通目盛り、下段は対数目盛である。0' -5'の平均速度で試算した。CO₂-Cフラックスは456mg/m²/hrであった。水稻生育下の計測時のガス濃度の変化は一次反応速度様式で進行していた(図9a, b)。log[A]=log[A₀]- (k/2.3)tに測定値を当てはめてk値を求め、v=kCにおいて初発の二酸化炭素濃度Cとの積から初速度を求めたフラックス値は690mg/m²/hrであった。このように水稻生育下ではCO₂-C取り込みのフラックスにはCO₂の初発濃度が影響するので、水稻生育期間中のCO₂-Cフラックスはこのような初速度法で評価した。水稻生育期間中の測定時の気温、二酸化炭素とメタンフラックスの季節的推移を図10に示した。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し、メタンは湛水期間中にのみ発生した。'93に比べて'94と'95は高温年であったが、Cの流入量は低く計測される傾向があった。二酸化炭素とメタンフラックスの日変化の事例を図10に示した。メタンフラックスの11時の測定値と周日(4, 8, 11, 17, 20および24時)測定の平均値との比は1:0.87であった。したがって11時測定値を周日の平均フラックスに変換する場合は係数として0.87を用いた。3年間計測した各月の二酸化炭素フラックスの絶対値とその時のチャンバー内温度との関係を図12に示した。温度が30℃を超える7月と8月では正味の二酸化炭素の流入量は温度の増加とともに減少する傾向が認められた。また、30℃以下の6月と9月では温度とフラックスは呼応する傾向があった。図12の一次回帰直線からチャンバー外温度におけるフラックス値を読みとり測定値を補正した。例えば1995年7月27日のCO₂-C取り込みの計測値は646mg/m²/時間であったが、その時のチャンバー内温度は平均39℃であった。このときのチャンバー外気温は36℃であったので図12の7月の回帰直線から800mgCO₂-C/m²/時間と読みとり補正した。また、1995年8月28日の計測値は311mg/m²/時間であったが、その時のチャンバー内温度は平均41℃であった。この時の外気温は37℃であったので図12の8月の回帰直線から410mgCO₂-C/m²/時間と読みとり補正した。補正した二酸化炭素フラックスの季節的推移を図13に示した。遮光下(呼吸・分解が進行)および無遮光下(光合成と呼吸・分解が進行)で午前11時に測定された二酸化炭素の発生・取り込みの季節的推移を図14に示した。無遮光下でのチャンバーでは光合成と呼吸・分解が同時に進行している状況下でのみかけの光合成フラックスが測定される。遮光下では光合成は無く、呼吸・分解のみが進行している状況下でのフラックスが測定されている。その差が真の光合成フラックスを示している。このように仕分けすると光合成C量と呼吸・分解C量が分別して試算できると判断した。1995年8月28日の植生下暗条件のCO₂-Cフラックスは341.1mg/m²/時間であったが、裸地のフラックスは38.5mg/m²/時間と低く、11%にすぎなかった。

以上のデータを基にして水田における年間のCの収支を試算した(図15)。一番大きいCのプールは土壌、次いで植物であり、雨水・灌漑水として10kg流入し、30kg流出した。水田生態系には大気からCO₂-Cとして1200kgが流入し、その内500kgが呼吸・分解によって、10kgがCH₄-Cとして流出した。植物として650kgが固定され、その内500kgが人為的に糞、わらとして系外に流出し、150kgが刈り株として土壌に供給されたと試算した。

5. 考察

本研究では水稻玄米収量は93', 94' および95' でそれぞれ, 550, 500および403kg/10aであった。試験圃場は3年間常時湛水で管理された。93' は低温年であったが, この水管理は低温年に適した方法である。このことは低温年で収量が高かった一因と考えられる。土壌の炭素含量が4月に比べて11月で低いことは夏の湛水期間中も土壌有機物が分解していることを示している。1994年4月13日における土壌炭素量は4810kgC/10aで1994年11月17日における土壌炭素量は4310kgC/10aでその間土壌に供給された有機物は刈り株の133kgC/10a以外にないものとみなすとJennyの数式^{8, 9)} $dX/dt = A - rX$ から年間の炭素の分解率が試算される。この数式は土壌有機物の変化量 dX/dt は添加量 A から土壌有機物の分解量 rX を引いたものに等しいという前提から成り立っている。ここで, r : 年間の分解率, X : 土壌中の有機物量, A : 年間に供給される有機物量である。測定値を本研究の測定値をこの数式に入れて r を求めると本試験圃場におけるこの時期の r は0.2と試算された。 r の逆数は土壌有機態-Cの平均ターンオーバー時間であり, この場合は5年と試算された。伊藤・飯村(1989)³⁾は北陸地方の細粒質強グライ土水田の稲株を含まない土壌からのガス発生量をチャンバー法で測定して, 一作期間中の CO_2-C 発生量を289kg/10aと評価している。これは土壌微生物と植物根に由来する呼吸量とみなすことができる。1995年8月28日に計測した裸地区のフラックス値、38.5mg/m²/時間を1作期150日として面積当たり換算すると139kg CO_2-C /10a/作期と試算された。この試算値は伊藤・飯村(1989)³⁾らのデータに比べて5割低い。本研究の測定では裸地区のため根の呼吸由来の CO_2-C 発生への寄与の乏しいことが低い原因の一つではないかと判断した。また、この139kg/10aは年間の刈り株由来の供給C量とほぼ見合っていた。

図3によれば、1995年5月12日～6月27日の期間に稲が固定したC量は66kg/10aと試算された。同様に、6月27日～7月27日、7月27日～8月28日および8月28日～9月8日の期間に稲が固定したC量はそれぞれ、168、328および10kg/10aと試算された。図13によれば、1995年5月12～6月27日の期間に試験圃場が固定したみかけの CO_2-C 量はチャンバー法によって96kg/10aと試算された。同様に、6月27日～7月27日、7月27日～8月28日および8月28日～9月8日の期間に試験圃場が固定したみかけの CO_2-C 量はそれぞれ、チャンバー法によって181、187および48kg/10aと試算された。両者の測定値を比較すると、1995年7月27日～8月28日のような高温の時期に大きな隔たりが認められた。このことはチャンバー法による CO_2-C フラックスの評価は図13のような温度補正をした後においてもなお、高温の時期には CO_2-C フラックスを過小評価する傾向のあることを示唆している。'94や'95は'93に比べて気温は高く、植物体Cの生産量も多かったが、湛水期間中の正味の二酸化炭素吸収量は低温年に比べて少なかった。このことは植物体の呼吸や土壌有機物の分解作用が低温年に比べて高温年で大きかったことを示唆している。稲におけるみかけの光合成速度は18℃以下や33℃以上では低下することが知られている¹⁰⁾。この傾向はジャポニカ(ニホンバレ)でもインディカ(IR8)でも認められている¹¹⁾。

メタンはメタン生成細菌によってつくられるが、水田土壌からは*Methanobrevibacter arboriphilicus*⁵⁾や*Methanosarcina mazei*⁶⁾が分離されている。前者はメタンをH₂存在下で二酸化炭素から生成し、後者はこのほかにメチルアミン、メタノールおよび酢酸も利用する。水田ではH₂+CO₂と有機物の中でどちらの基質からメタンをよくつくっていたかはよくわからない。水田土壌にはメタン酸化菌も存在する⁷⁾。本研究で評価されたメタンフラックス、10kg/10aはメタン

生成菌によるグロスの生成量からメタン酸化菌による酸化を差し引いた正味の生成量であろう。

7. 本研究によって得られた成果

農業環境技術研究所内の造成台地土（細粒灰色低地土）水田を定点として3年間、固体、液体、気体中の炭素量と年間の収支を調査した。固体炭素として作土層に含まれる炭素量は4400kg/10aで、田面水に含まれる炭素量は2kg/10aであった。作物体生産C量は玄米、もみ殻、わら、根およびひこばえで、それぞれ、191kg, 42kg, 263kg, 136kgおよび16kgであった。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し、メタンは湛水期間中にのみ発生した。10a当たり年間に大気から二酸化炭素-Cとして1200kgが流入し、植物体として650kgが固定され、雨水・灌漑水として約10kg流入した。その内500kgが呼吸・分解によって、500kgが人為的持ち出しによって系外に出た。また、30kgが浸透水として、10kgがメタン-Cとして流出し、刈り株等として170kgが土壌に供給されたと試算した。チャンバー法は高温の時期には植生下の圃場によるCO₂-Cの取り込み量を過小評価する傾向があった。

8. 引用文献

1. 内嶋善兵衛(1990)ゆらぐ地球環境. 合同出版、東京
2. 陽 捷行・八木一行(1988)水田から発生するメタンのフラックスの測定法. 土肥誌 59 458-463
3. 伊藤滋吉・飯村康二(1989)北陸地方の細粒質強グライ土水田における有機物の分解とガス発生量について. 土肥誌、60 290-297
4. Yagi K and Minami K(1990) Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. Soil Sci. Plant Nutr. 36 599- 610
5. Asakawa S., Morii H., Akagawa-Matusita M., Koga Y. and Hayano K.(1993) Characterization of Methanobrevibacter arboriphilicus SA isolated from a paddy field soil and DNA-DNA hybridization among M. arboriphilicus strains. Int. J. Syst. Bacteriol. 43 683-686
6. Asakawa S., Akagawa-Matsusita M., Morii H., Koga Y. and K. Hayano (1995) Characterization of Methanosarcina mazei TMA isolated from a paddy field soil. Current Microbiol. 31 34-38
7. 犬伏和之・村松康彦・梅林正直(1992)水田土壌におけるメタンの発生機構（第8報）湛水期間中のメタノトローフ菌数の変動. 日本土壌肥料学会講演要旨集 38 51
8. Jenny, H. (1941) Factor of soil formation, McGraw Hill, New York
9. 井の子昭夫 (1981) 土壌中における有機物の分解と集積 その数式化へのアプローチ, 土肥誌 52 548-558
10. 稻学大成第2巻生理編. 松尾孝嶺編, 469-495 農分協 (1990)
11. N. Q. Bong and Y. Murata(1977) Study on the physiological characteristics of C3 and C4 crop species. I. The effects of air temperature on the apparent photosynthesis, dark respiration, and nutrient absorption of some crops. Jpn. J. Crop Sci. 46 45-52

国際共同研究 なし

研究発表

竹中 眞・原田靖生・小泉 博・早野恒一：水田生態系の炭素循環における各プールサイズの評価．日本土壤肥料学会講演要旨集，40、 215 （1994）

早野恒一・竹中 眞・上村順子：水田生態系の炭素循環における諸量の季節変動とその解析，日本土壤肥料学会講演要旨集，42、347（1995）

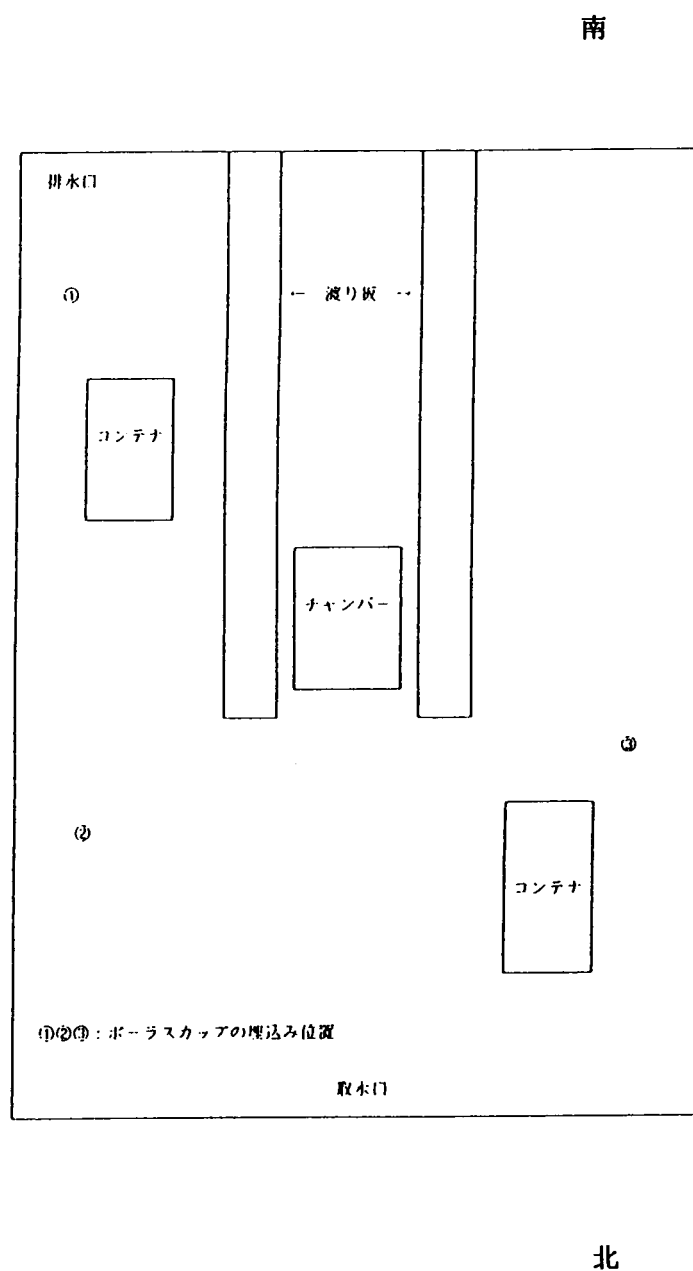


図1．試験圃場の概略図

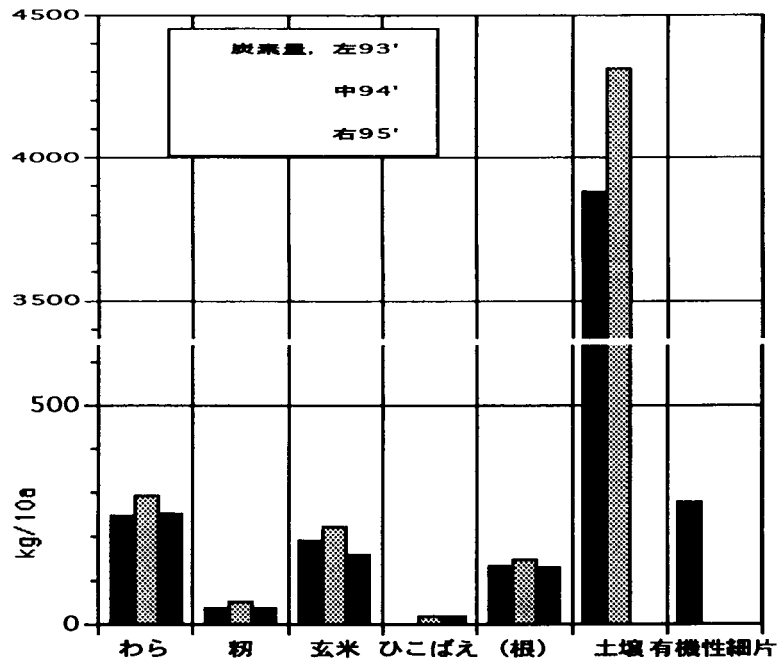


図2. 土壌および作物体中の炭素含量

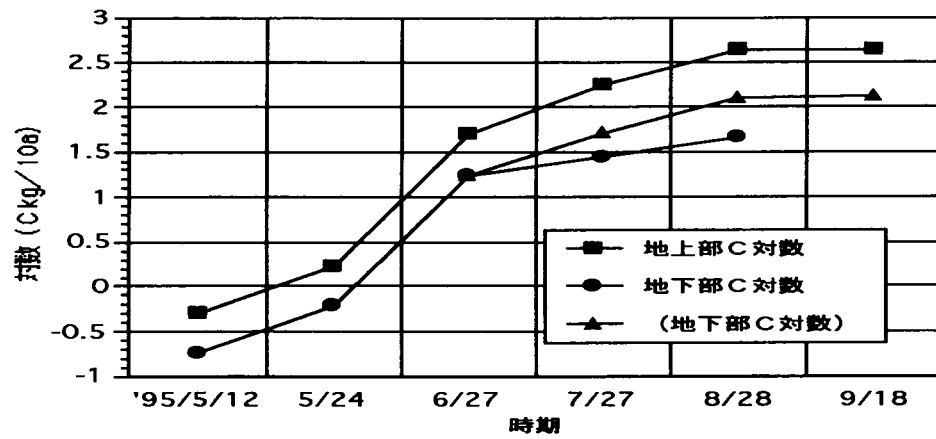


図3. 生育に伴う稲体C含量の推移

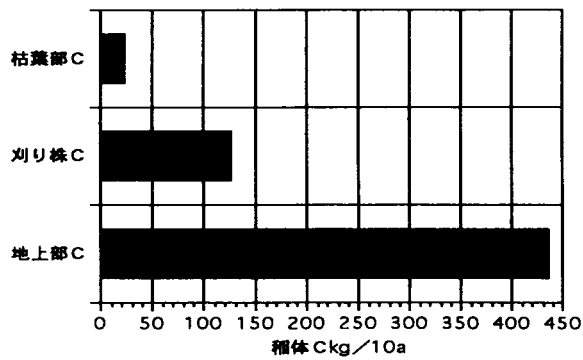


図4. 稲体中のCの分布 ('95/8/28)

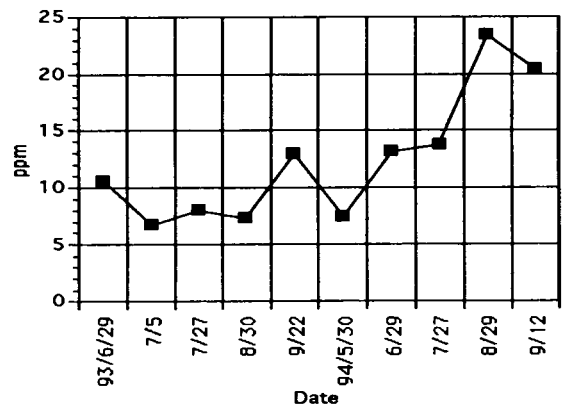


図5. 田面水中のC濃度の季節変動

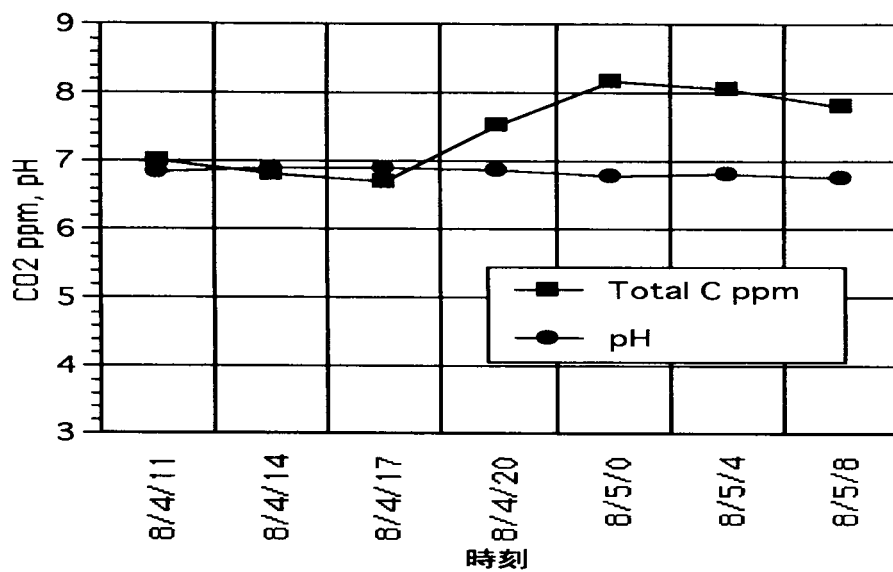


図6. 田面水のC含量およびpHの日変化

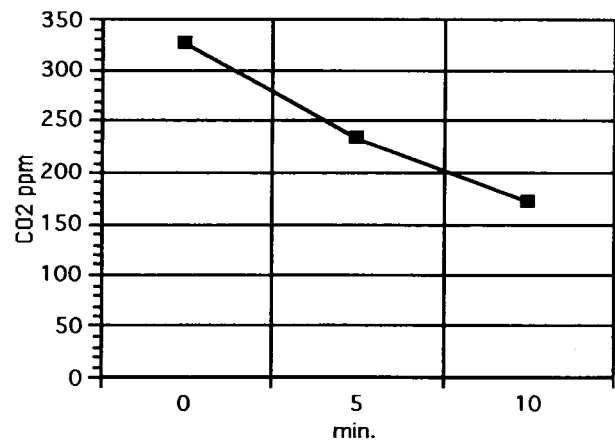
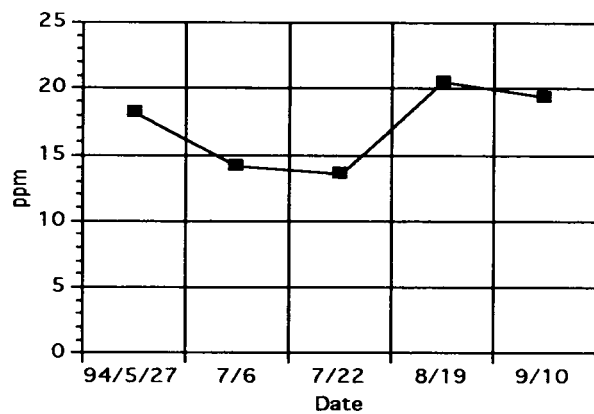


図7. 灌漑水中のC濃度の季節変動

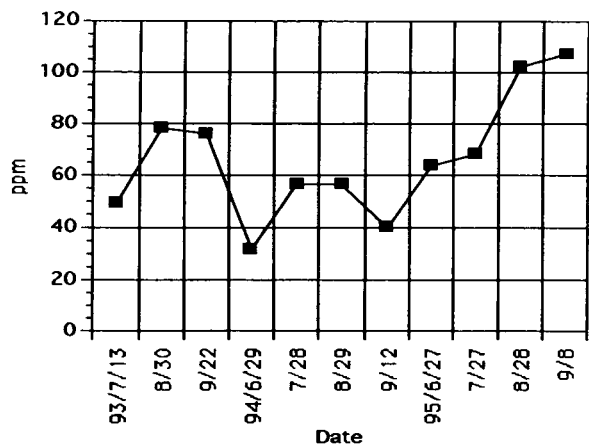


図8. 浸透水中のC濃度の季節変動

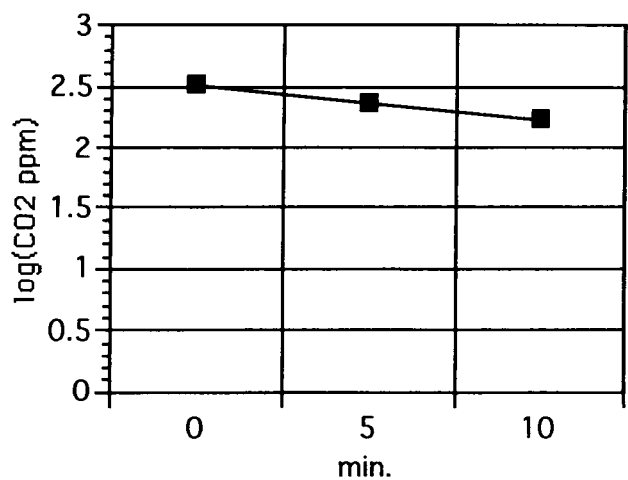


図9. 水稻生育下のフラックス測定時の二酸化炭素濃度の変化上段：普通目盛り；下段：対数目盛り

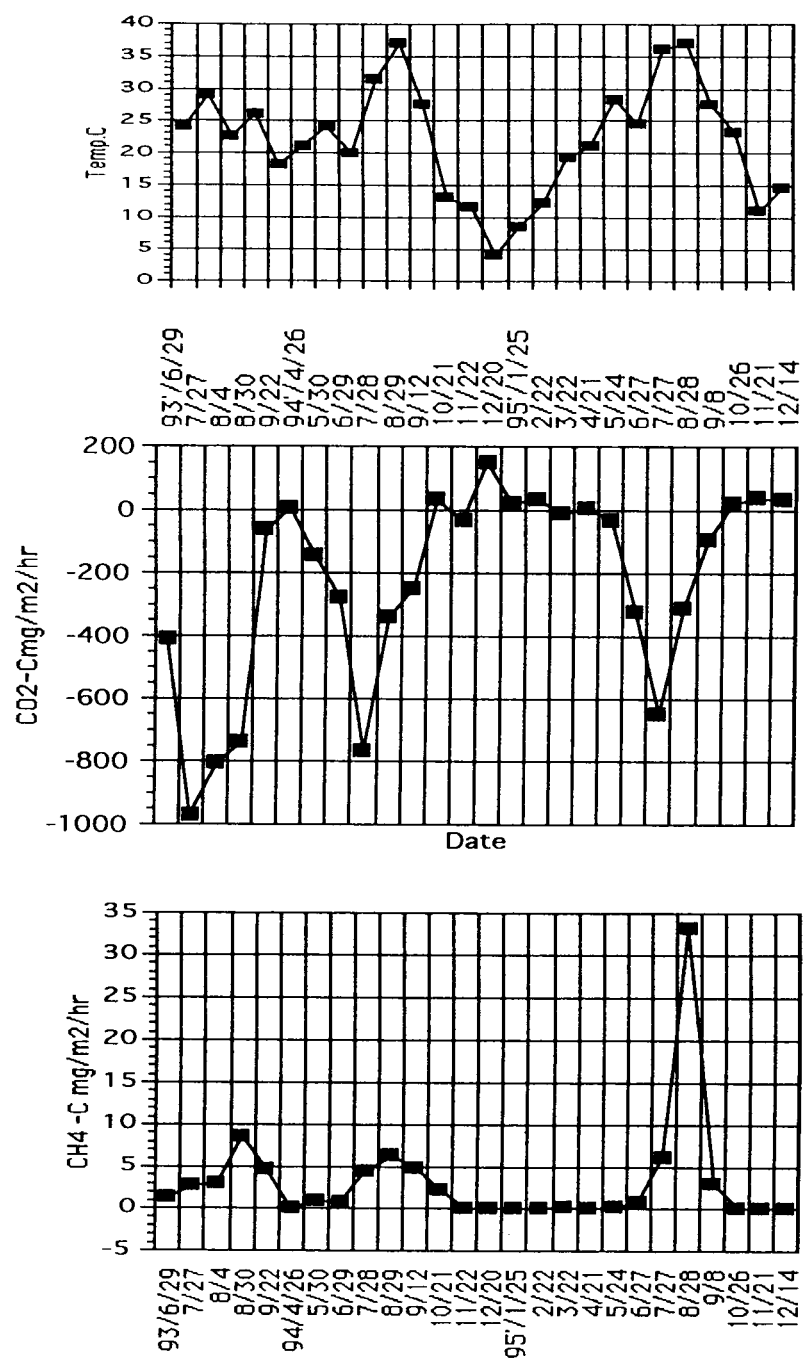


図10. 気温および二酸化炭素, メタンフラックスの季節変動

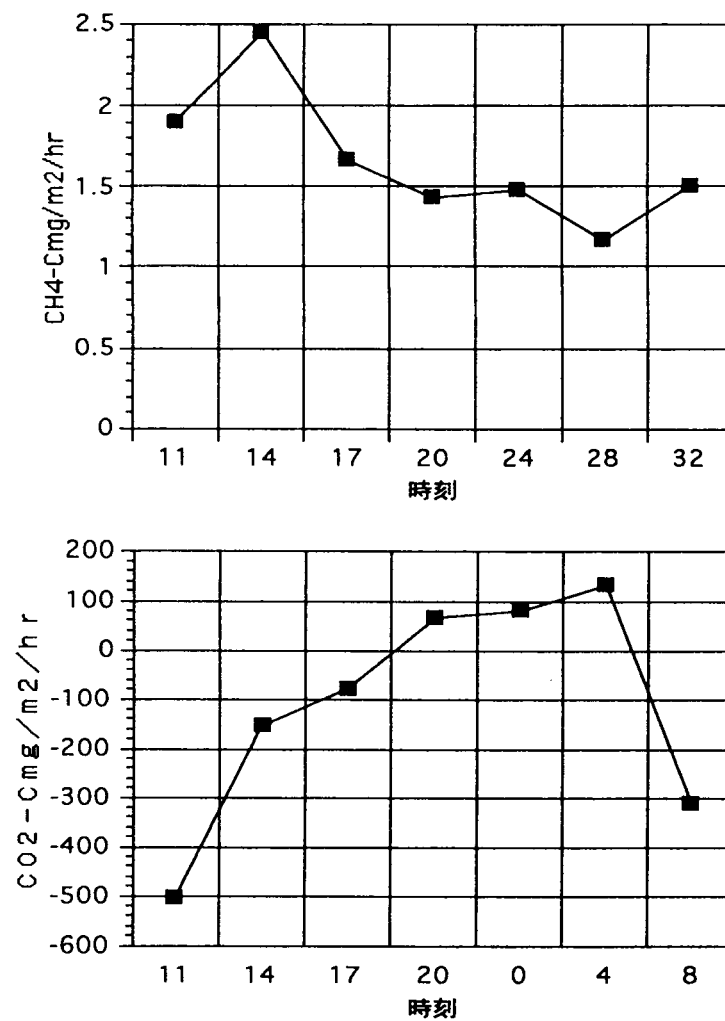


図 1 1. 二酸化炭素およびメタンフラックスの日変化の事例
上：メタン 下：二酸化炭素

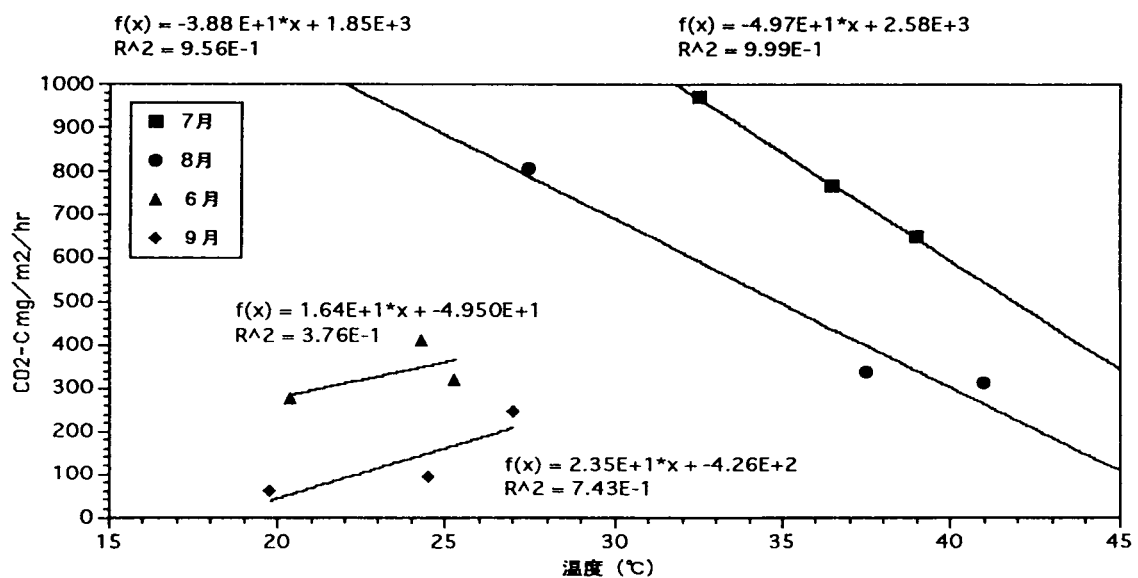


図 1 2. 二酸化炭素フラックスとチャンバー内温度との関係

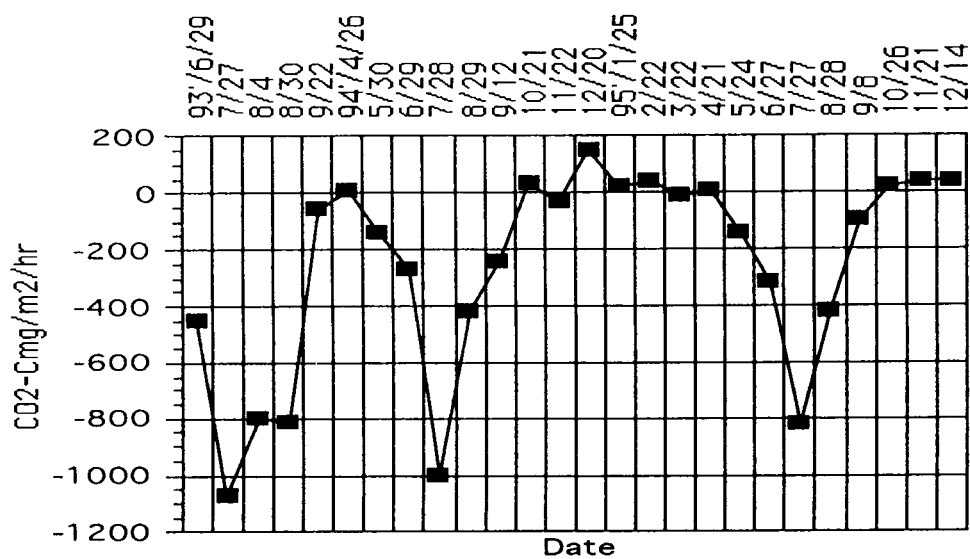


図 1 3. 測定値を温度補正した二酸化炭素フラックスの季節的推移

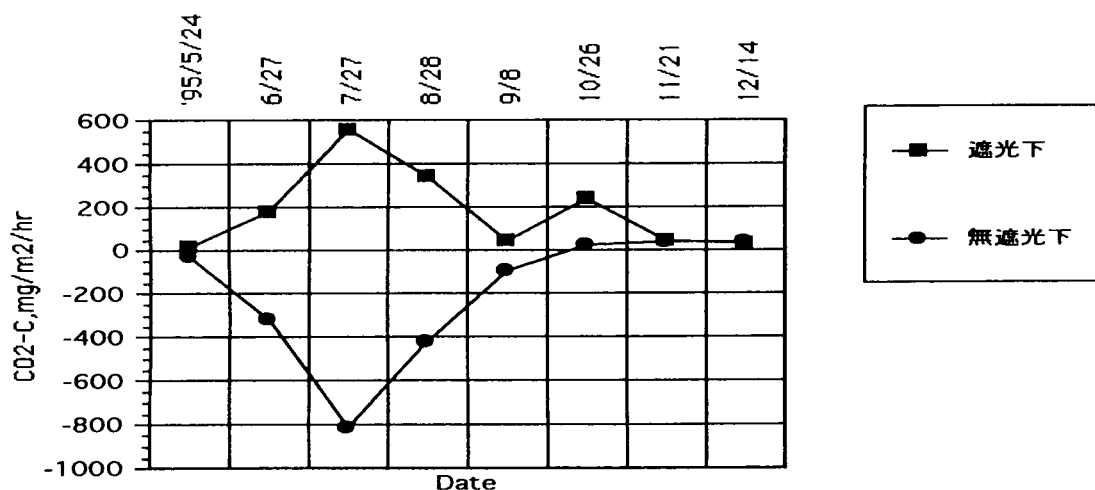


図 1 4. 遮光下および無遮光下で測定された二酸化炭素の発生・取り込みの季節変動

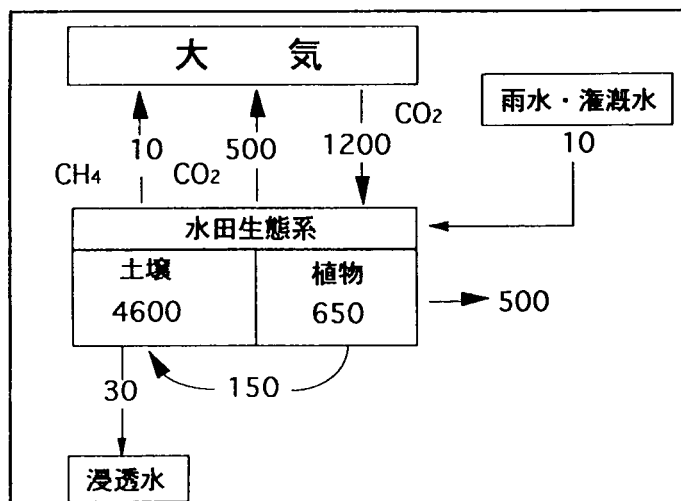


図 1 5. 水田における年間のCの収支 $\text{kg} / 10 \text{ a}$