

B-6 陸上生態系における炭素循環機構の解明に関する研究

研究課題代表者 広島大学総合科学部 中根周歩

(1) 農業生態系における炭素循環系の定量的解析に関する研究

① 農業的土地利用の変化に伴う炭素循環系の定量的解析

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

環境管理部	資源・環境動態研究室	松本成夫・袴田共之
環境資源部	土壌有機物研究室	竹中 眞・原田靖生 ^{*1}
企画連絡室	地球環境研究チーム	池田 浩明・竹澤 邦夫・福原道一・湯畑 典子 ・山田一郎 ^{*2}
環境管理部		太田 顕・西村 格 ^{*3}
環境生物部	植生管理科	塩見正衛 ^{*4}

(現在：^{*1} 農研センター，^{*2} 九州農試，^{*3} 岐阜大学，^{*4} 茨城大学)

平成2-4年度合計予算額 26,082千円

〔要旨〕畑，水田，農用林の農業生態系につき，代表的調査地において，植生・土壌等の炭素現存量，土壌呼吸量等を正確に実測する手法を開発し，それぞれの農業生態系における炭素収支を定量的に解明することを試みた。

畑に関し，農業環境技術研究所内の実験圃場に，サツマイモ・コマツナ二毛作畑と放棄畑を設け，その炭素収支を実測した結果，それぞれ-168，-187gC/m²/yrと赤字の炭素収支を示した。これらのことは，畑地が二酸化炭素の発生源になっていることを示すものと考えられる。

水田生態系に液体として流入する灌漑水および雨水に含まれる炭素は3.1kg/10aであり，流出する浸透水に含まれる炭素は1作期で2kg/10a，1年で7~8kg/10aであった。水田から失われる炭素は固体として，作物体の炭素が596kg/10aであり，このうち圃場に還元される量は97kg/10a，土壌有機物，肥料に含まれる炭素量はそれぞれ3,760kg/10a，0.5kg/10aであった。水田では，土壌中の炭素が最も多く，水に溶けて循環する炭素は少量なので，固体と気体に含まれる炭素の循環が重要であることが判明した。

農用林について，茨城県北浦村の15年生のコナラ林に下草刈りおよび落葉掻きを行う管理区と管理作業を行わない放置区を設置し，また，栃木県藤荷田山の50年生のクレーコナラ林に自然林の調査区を設置した。森林生態系としての炭素のストック量は管理区，放置区，藤荷田山のそれぞれで62.9，79.7，331.7tC/haであり，管理区，放置区では植物体蓄積量が多く，藤荷田山では土壌蓄積量が多かった。下草刈りおよび落葉掻きによりリター層の蓄積量が大きく減少し，それ

が土壌の炭素量，林床からの二酸化炭素発生量の減少をもたらした．根の呼吸量を林床からの二酸化炭素発生量の半分と仮定すると，これら森林生態系はシンクになっていると推定され，シンク量は管理区，放置区，藤荷田山のそれぞれで，3.7，2.2，3.9tC/ha/yearであった．

[キーワード] 炭素循環，畑，水田，農用林，農業

1. 序

近代以降，旺盛な人間活動により陸域生態系の炭素収支のバランスは崩れ，二酸化炭素やメタンの急激な増加をもたらされている．しかし，今日，陸域のそれぞれの土地利用上の各種植生が炭素循環にどのように関与しているかの測定例は少なく，不確実なデータに基づく論議がなされている現状にある．また，予想される二酸化炭素濃度の上昇や温暖化などの環境変化に対応して，炭素循環がどのように変化するかを予測するデータは皆無に等しい．まして，わが国の各種の土地利用における炭素循環量推定のためのモデルは開発されていない．そこで，農業生態系における炭素循環量とその変化を定量的に解析・評価・予測することが必要となる．

2. 研究目的

本研究課題の目的は，農業的土地利用のうち，葉・根菜類などの栽培畑，放棄された農耕地，炭素がメタンや水溶性炭素の形態で生成するなど極めて複雑な現象を有する水田，林木生産を主目的とせずもっぱら下草を利用・管理する農用林などを対象として炭素循環を調査・検討することにある．これらの系の炭素収支を定量的に明らかにすることにより，種々の土地利用が混在する面的広がりをもつ農業生態系における炭素循環モデルの作成，温暖化等の環境変化に対応した炭素循環への影響の評価・予測を行うための基礎資料を提供することが出来ると期待される．

3. 研究方法

(1) 畑地

①二毛作畑

農業環境技術研究所内の畑地約2aで，1990年10月22日にコマツナ（マルハコマツナ）を50cm間隔の畝状に播種し，月1回のサンプリング調査を行った．サンプリングは50cm×50cmのコドラートを6ヶ所掘取った．1991年3月20日にコマツナを収穫し，約2ヶ月休閑した後，耕起して80cm間隔の畝を作った．1991年6月5日にサツマイモ（ベニアズマ）の苗を畝に沿って30cm間隔で植え込み，月1回のサンプリング調査を行った．サツマイモのサンプリングは隣接する2個体を6ヶ所掘取り，雑草のサンプリングは50cm×50cmのコドラートを6ヶ所掘取った．なお，サンプル個体を室内に持ち帰り暗呼吸を同化箱法にて測定し，土壌呼吸は，通気法・密閉法^{4,7)}にて月1回測定した．また，堆肥等の有機肥料は一切施用しなかった．

また，1992年度も同様な調査を継続して行った．

②放棄畑

農業環境技術研究所内の圃場約2aを1991年5月30日に耕起した後放棄し，1ヶ月に1回のサンプリング調査と月1回の土壌呼吸測定を行った．サンプリングは，50cm×50cmのコドラートを6ヶ所掘取り，乾重測定を行った．この時，優占種3種（各3個体）を別にサンプリングし，暗呼吸を同

化箱法にて測定した。土壌呼吸は、密閉法 (n=4) と通気法 (n=2) にて測定した。その後、1992年4月13日と5月20日に耕起し、繰り返し実験を行った。

なお、植物の炭素率は全て0.44を用いた。

(2) 水田

農業環境技術研究所内の水田圃場 (4 m × 10 m, 造成台地土 (細粒灰色低地土)) を調査圃場に設定し、茨城県で行なわれる標準的な耕種法に従ってコシヒカリを栽培した。土壌中の炭素量は、圃場の作土層 (0~15 cm) より試料を採取し測定した。作物体の地上部生産量については、調査圃場より1 m × 1.2 m面積 (2連) を刈り取り算出した。根量および切り株量は、30.5 cm × 46 cm × 26 cmの枠 (2連) 中の量をもとに算出した。これら試料の一部を微粉碎して、NCアナライザー (スミグラフ NC-90) およびCNコーダー (柳本MT-500) を用い炭素量を測定した。水溶性炭素量は、灌漑水、雨水および浸透水に含まれるものをTOC分析装置 (島津TOC-5000) を用いて分析した。灌漑水量は流量計を水口につけ測定し、雨量は雨量計、浸透水量は減水深の測定により求めた。ガス状炭素として、二酸化炭素の土壌呼吸速度をアルカリ密閉吸収法 (桐田法)³⁾、メタン測定法を応用したガスクロマトグラフを用いた密閉法⁶⁾ および赤外線ガス分析計を用いた通気法で測定し、それぞれの測定手法の比較を行なった。

(3) 農用林

茨城県北浦村の15年生のコナラ林に、下草刈りおよび落葉掻きが行われている管理区と、管理作業が行われず林床がおおよそ1.5mのササで覆われた放置区とを設置した。また、人為影響をほとんど受けていない森林として、栃木県西那須野町にある農林水産省草地試験場内の藤荷田山の約50年生のクリーコナラ林に調査区を設置した。

樹木現存量は、20m x 20m方形区内の樹木の樹高、胸高直径を、管理区および放置区は1991年と1993年に、藤荷田山は1990年と1992年に測定し、これらのデータをもとに推定式⁹⁾ および根の現存量の比²⁾ を用いて求めた。林床植物現存量は刈り取り調査の結果と根の現存量の比¹⁾ より求めた。樹木の増加量は2年間の樹木の現存量の差から求めた。倒木量は2年後の毎木調査で枯死していた樹木の現存量である。落葉落枝量は、1m²リタートラップを各調査区に4ヶ所設置し、1~2ヶ月ごとに、落葉、小型落枝、その他を測定した。大型落枝量は、10m x 10mの方形区内に落下した直径1cm以上の枝の量である。リター層の現存量はリター層を定期的に採取し測定した。土壌中の炭素量に関し、深さ1mまでの各土層の厚さ、容積重、炭素含有率をもとに、深さ1mまでの土壌の炭素蓄積量を求めた。林床からの二酸化炭素発生量は、桐田法 (スポンジアルカリ吸収法³⁾) を用いて10箇所測定し、土壌水分率も測定した。また、林内気温を年間を通じて測定した。

4. 結果および考察

(1) 畑地

① 二毛作畑

1990年10月22日から一年間の炭素循環量を表1に示す。炭素収支は、夏期のサツマイモ畑で黒字を示すものの年間では赤字となった。1991年10月22日から一年間の炭素循環量を表2に示す。前年とほぼ同様な傾向を示し、年間の炭素収支も赤字を示した。したがって、サツマイモ・コマツナ二毛作畑の年平均炭素収支は、-168gC/m²/yrと算出され、サツマイモ・コマツナ二毛作畑は二酸化炭素のソースとして働いていると推定された (表4)。

表1. 1990年～1991年の二毛作畑における1年間の炭素収支(gC/m²)

期間	'90 10/22～	'91 3/20	3/21～6/4	6/5～10/4	10/5～10/21	計
作物		コマツナ	(休閑)	サツマイモ	(休閑)	
収入						
総生産		315.6	10.8	1025.7	0.0	1352.1
支出						
植物呼吸		128.9	3.0	534.6	0.0	666.4
土壌呼吸		129.4	87.5	248.2	45.4	510.5
収穫		165.5	0.0	206.2	0.0	371.6
残高		-108.1	-79.6	36.7	-45.4	-196.4

表2. 1991年～1992年の二毛作畑における1年間の炭素収支(gC/m²)

期間	'91 10/22～	'92 3/20	3/21～6/4	6/5～10/4	10/5～10/21	計
作物		(休閑)	コマツナ	(休閑)	サツマイモ	
収入						
総生産		0.0	107.0	0.0	1177.9	1284.9
支出						
植物呼吸		0.0	36.1	0.0	491.9	528.0
土壌呼吸		98.7	207.8	59.3	253.1	618.9
収穫		0.0	11.5	0.0	265.7	277.2
残高		-98.7	-148.5	-59.3	167.2	-139.2

②放棄畑

1991年5月30日から一年間の炭素循環量を表3に示す。炭素収支は、夏期の7月上旬から8月上旬にかけて黒字を示すが、年間では赤字となった。サツマイモ・コマツナ二毛作畑の年平均炭素循環量と比較すると、放棄畑は収穫による炭素の持ち出しがないものの、二毛作畑に比して総生産が低く、土壌呼吸が高いために二毛作畑よりやや赤字の炭素収支となった(表4)。しかし、放棄畑は植物が固定した炭素が確実に蓄積されていくため、長期間放棄すれば黒字の炭素収支に転ずる可能性がある。今後、この点を考慮し、二次遷移にともなう炭素循環量の変遷を解明する必要がある。

表3. 1991年～1992年の放棄畑における1年間の炭素収支(gC/m²)

期間	'91 5/30～7/2	7/3～8/8	8/9～9/5	9/6～10/3	10/4～12/17	12/18～'92 5/29	計
収入							
すきこみ	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.4
総生産	30.5	542.3	308.4	193.6	39.4	0.8	1114.9
支出							
植物呼吸	5.7	198.2	247.1	193.6	39.4	0.4	684.3
土壌呼吸	98.0	143.7	98.4	75.9	82.7	141.4	640.0
残高	-50.7	200.4	-37.2	-75.9	-82.7	-141.0	-186.9

表4. 二毛作畑と放棄畑における1年間の炭素収支(gC/m²)

	収入		支出		収支	
	総生産	すきこみ	植物呼吸	土壌呼吸		
二毛作畑	1319	0	597	565	324	-168
放棄畑	1115	22	684	640	0	-187

(2) 水田

調査圃場の作土(0～15cm)中に含まれる炭素量は3,760kg/10aと推定された。コシヒカリの玄米収量(水分13%)は、552kg/10aであった。部位別の生産量および炭素含量を表5に示す。全乾物生産量は1,649kg/10a、596kgC/10aであり、圃場から持ち出される炭素は茎葉部とモミとを併せて499kgC/10aであり、圃場に還元される炭素は切り株および根の97kgC/10aであった。

灌漑水は、1作期間中(5月～9月)に79,243l/10a使用し、平均全炭素(TC)濃度は20.32ppmで、含まれる炭素量は、1.730kg/10aであった。降雨量は、1992年に1,316mm、5月～9月では367mmで炭素濃度は0.9～6.2ppmであり、流入した炭素量は1作期で0.37kg/10a、1年で1.4kg/10aと推定された。以上から、流入炭素量は、約3.1kg/10aと推定された。浸透水は、平均TC濃度19.80ppmで1作期で約2kg/10a、1年で5～6kg/10aの炭素を圃場から流出させたと推定された(表6)。

赤外線ガス分析計を用いた通気法による土壌呼吸速度の測定では(図1)、1992年7月7日16時より8日9時まで15～20mgCO₂/m²/hrの範囲で推移したが、その後気温の上昇とともに増加し、12時には最高値の52.8mgCO₂/m²/hrに達し、温度の低下とともに減少した。土壌呼吸速度とチャンバー内

表5 作土, 肥料および作物中の炭素量

	乾物重量(kg/10a)	炭素含有率(%)	炭素量(kg/10a)
作土	187,440	2.00	3,760
肥料投入量	36.5	1.39	0.5
作物体生産量			
もみ	616	35.30	217
わら	760	37.05	282
株	109	37.50	41
根	164	33.95	56

表6 1作期間の灌漑水, 雨水および浸透水に含まれる炭素

	水量(l/10a)	平均全炭素濃度(ppm)	炭素量(g/10a)
灌漑水	79,243	20.32	1,730
雨水	367,000	2.79	347
浸透水	102,000	19.80	2,020

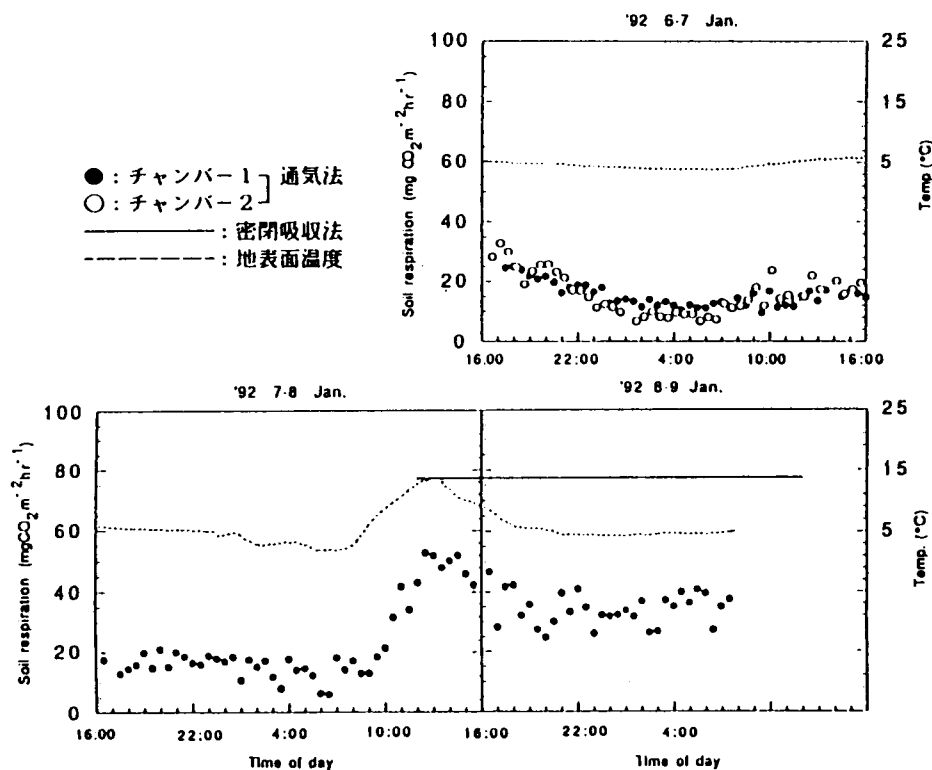


図1 水田圃場において通気法と密閉吸収法により測定した土壌呼吸速度

地表温度との間に極めて高い相関が認められた ($r=0.912$)。密閉吸収法による8日12時より9日12時までの土壌呼吸量は、 $1,857\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{hr}$ で、平均土壌呼吸速度は $77.3\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{hr}$ となり、通気法で得られた測定値の約2倍の値となった。冬期、チャンバーを設置して経時的にガスクロマトグラフ (TCD検出器) で土壌呼吸速度の測定を試みたが、感度が低く測定は困難であった。

以上の結果より、水田に付加される炭素と失われる炭素の差約 $90\text{kg}/10\text{a}$ が、土壌中の炭素の蓄積に関与すると考えられる。このうち、水溶性の炭素量に関しては、高村ら¹⁰⁾の報告と同様に流入量より流出量が多かったが、土壌と搬出する植物体を除いた炭素循環に占める割合は約10%と少なかった。付加される炭素の大部分は、土壌生物により分解され二酸化炭素とメタンとして大気中に揮散すると考えられるので、正確な炭素収支には水田圃場から揮散する気体中の炭素の測定が必要である。密閉吸収法による二酸化炭素発生量の測定は、発生量を過大評価する可能性が高いと考えられた。ガスクロマトグラフを用いた密閉法は二酸化炭素と同時にメタンの発生量も正確に測定できるが、冬期の二酸化炭素発生量の少ない時期には適さないと考えられた。二酸化炭素の測定では、赤外線ガス分析計による測定が適当と考えられるが、メタン発生量は測定できない。今後、これらの手法の組み合わせを考える必要がある。

(3) 農用林

管理区および放置区の植物体現存量は藤荷田山に比べるとおよそ1/3程度であった。放置区は植物体現存量の14%を林床植物が占めていたが、管理区はわずか3%であった。植物体現存量に比べ、植物体増加量は管理区、放置区で約10%、藤荷田山で3%であり、倒木量はかなり少なかった (表7)。下草刈りにより刈り取られた植物体量は $1.2\text{t}/\text{ha}$ であった。

表7 植物体の現存量, 増加量, 倒木量および落葉落枝量

	管理区	放置区	藤荷田山
植物体現存量	75.27	82.30	206.83
樹木現存量	73.16	70.77	206.83
林床植物現存量	2.11	11.53	-
植物体増加量	7.47	6.95	6.08
倒木量	0.76	0.33	0.56
落葉落枝量	6.19	7.14	7.92
落葉量	4.72	5.18	4.27
小型落枝量	1.12	1.55	1.80
大型落枝量	0.23	0.33	0.99
その他	0.12	0.08	0.86

落葉落枝量は大半が落葉であり、いずれの調査区も主な落葉時期は11月であった。落枝については特に多い時期は認められないものの、1991年と1992年の落枝量に違いが認められた。

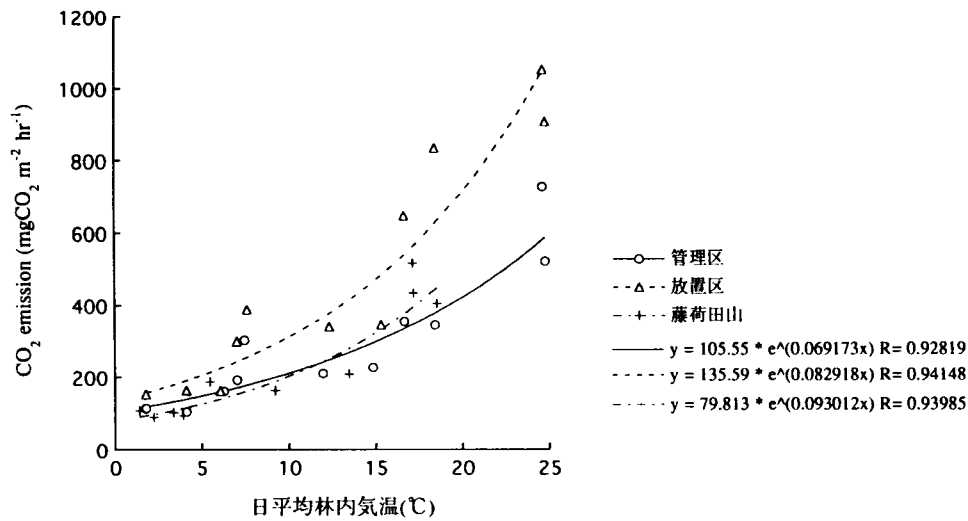


図2. 林床からの二酸化炭素の発生量と日平均林内気温との関係

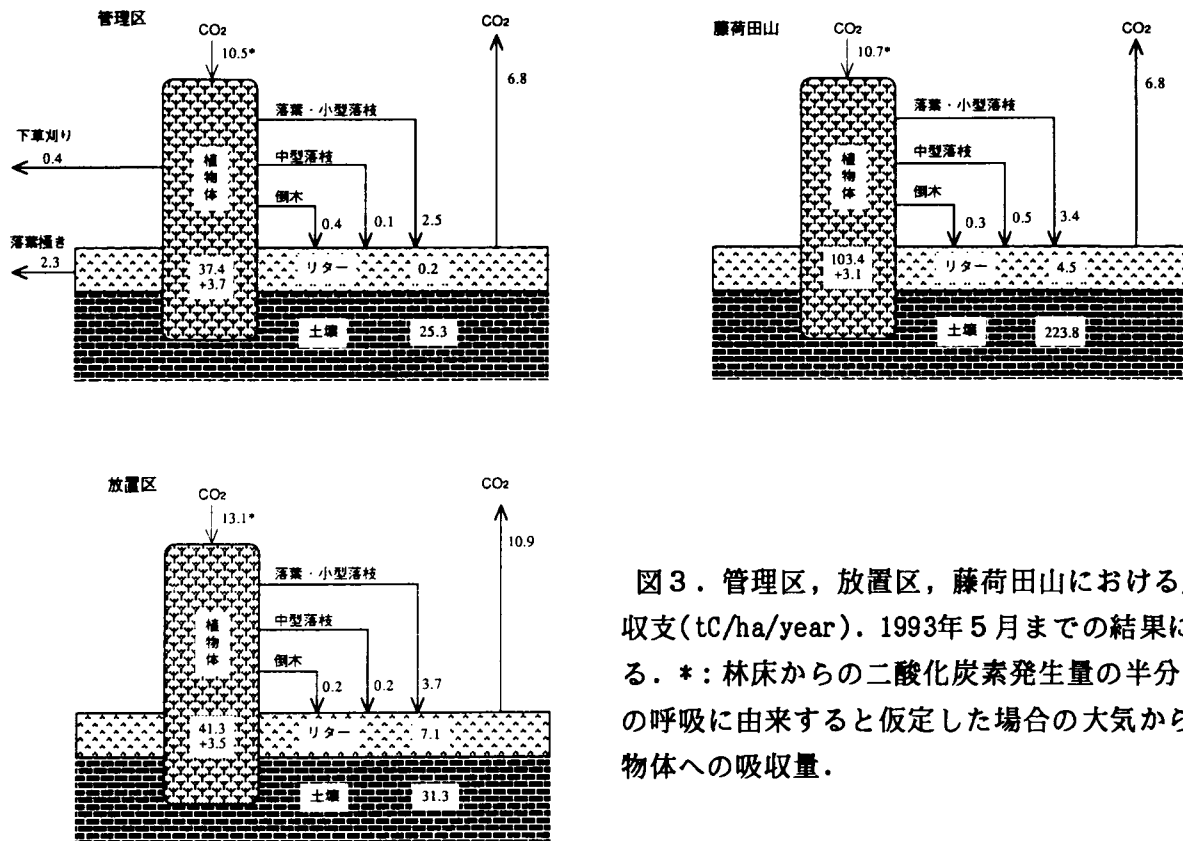


図3. 管理区, 放置区, 藤荷田山における炭素収支(tC/ha/year). 1993年5月までの結果による. *: 林床からの二酸化炭素発生量の半分が根の呼吸に由来すると仮定した場合の大気から植物体への吸収量.

管理区のリター層の現存量は約0.5t/haであったが, 落葉と共に約5t/haまで増加し, 落葉掻きにより再び約0.5t/haまで低下した. この結果, 4.6t/haの落葉が除去されたものと見積られた. 放置区は12-18t/haのリターが蓄積し, 平均すると約14t/haであった. 藤荷田山は8-12t/haで, 平

均蓄積量は9t/haであった。

土壤に蓄積されている炭素量は管理区，放置区，藤荷田山のそれぞれで25.3，31.3，223.8tC/haであった。

林床からの二酸化炭素発生量は夏の暑い時期に高く，管理区，放置区，藤荷田山のそれぞれで，およそ700，1000，500mgCO₂/m²/hourであったが，冬はいずれも約100mgCO₂/m²/hourであった。それらの変化は林内の日平均気温の変化と関係が強く，土壤水分率との関係は明らかではなかった。そこで，林内の日平均気温と林床からの二酸化炭素発生量の関係を指数関数で回帰したところ高い相関係数が得られた（図2）。この回帰式を用いて，日平均林内気温をもとに年間の二酸化炭素発生量を見積ったところ，管理区，放置区，藤荷田山それぞれで6.8，10.9，6.8tC/ha/yearの炭素が林床から大気へ放出されたと推定された。

以上の測定結果から各調査区における森林生態系の炭素収支を求めた（図3）。森林生態系に蓄積されている炭素量は管理区，放置区，藤荷田山のそれぞれで，62.9，79.7，331.7tC/haであった。森林生態系に蓄積されている炭素のうち，管理区，放置区では植物体に蓄積されている量が多く，藤荷田山では土壤に蓄積されている量が多かった。

森林生態系に入る炭素量は大気から植物体へ吸収される炭素量，すなわち，植物体の増加量，落葉落枝量，根の呼吸量，下草刈りの量の総量である。一方，森林生態系から出て行く炭素量は林床からの二酸化炭素発生量である。ここで，根の呼吸量を林床からの二酸化炭素発生量の半分と仮定すると⁸⁾，森林生態系に入る炭素量は出て行く量より多く，炭素のシンクとなっており，その量は管理区，放置区，藤荷田山それぞれで，3.7，2.2，3.9tC/ha/yearと見積られた。

5. 本研究から得られた成果

(1)畑地

- ①サツマイモ・コマツナ二毛作畑は，-168gC/m²/yrと赤字の炭素収支を示すと推定された。
- ②放棄畑も，-187gC/m²/yrと，二毛作畑とほぼ同様な赤字の炭素収支を示すと推定された。

(2)水田

- ①水田における最大の炭素プールは土壤で3,760kg/10aあるが，循環量に関しては，水田圃場に付加されるイネの根と切り株97kg/10aが主な炭素源であり，水溶性で循環する炭素量はその約1割と少なかった。
- ②循環量を正確に把握するための二酸化炭素等ガス状炭素の定量法の検討がなされ，それぞれの測定法の組み合わせを考慮する必要性が認められた。

(3)農用林

- ①森林生態系としての炭素のストック量は管理区，放置区，藤荷田山のそれぞれで62.9，79.7，331.7tC/haであった。森林生態系に蓄積されている炭素のうち，管理区，放置区では植物体に蓄積されている量が多く，藤荷田山では土壤に蓄積されている量が多かった。
- ②下草刈りおよび落葉掻きにより森林生態系の炭素循環量が減少した。特に，リター層の蓄積量が大きく減少し，それが土壤の炭素量，林床からの二酸化炭素発生量の減少をもたらした。
- ③根の呼吸量を林床からの二酸化炭素発生量の半分と仮定すると，森林生態系に入る炭素量は出て行く量より多く，炭素のシンクになっていると見積られ，シンク量は管理区，放置区，藤荷田山のそれぞれで，3.7，2.2，3.9tC/ha/yearであった。

6. 引用文献

- 1) 科学技術庁資源調査会編(1982)バイオマス資源のエネルギー的総合利用に関する調査.
- 2) Karizumi, K.(1977) Root biomass. "JIBP Synthesis 16: Primary productivity of Japanese forests -productivity of terrestrial communities-" (eds. T. Shidei and T. Kira), 45-52. University of Tokyo Press, Tokyo.
- 3) 桐田博充(1971) 野外における土壌呼吸の測定—密閉吸収法の検討. IV. スポンジを利用した密閉吸収法の開発. 日本生態学会誌, 21: 119-127.
- 4) Koizumi, H., T.Nakadai, Y.Usami, M.Satoh, M.Shiyomi and T.Oikawa (1991) Effects of carbon dioxide concentration on microbial respiration in soil. Ecol. Res. 6: 227-232.
- 5) Koizumi, H., Y.Usami and M.Satoh(1993) Carbon dynamics and budgets on three upland double-cropping agro-ecosystems in Japan. Agr. Ecosystems Environ. 43: 235-244.
- 6) 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, 日土肥誌, 59, 458-463
- 7) Nakadai, T., H.Koizumi, Y.Usami, M.Satoh and T.Oikawa (1993) Examinations of the method for measuring soil respiration in cultivated land: Effect of carbon dioxide concentration on soil respiration. Ecol. Res. 8: 65-71.
- 8) Nakane, K., M.Yamamoto and H. Tsubota.(1983) Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. Jap. J. Ecol., 33: 397-408.
- 9) 農林水産省草地試験場生態部(1980) 藤荷田山の生物相に関する基礎資料. 24pp.
- 10) 高村義親, 張替 泰, 片岡英明, 西村伸夫 (1984) 霞ヶ浦流域の湿田と乾田における全有機炭素の動向と収支, 日土肥誌, 55, 293-297

国際共同研究等の状況

1993年3月, カナダ, トロント大学植物学部生態学研究室のポール・F・メイコック教授を招へいし講演を頂くとともに, 当プロジェクトの内容に係わる討論・意見交換を行った。

研究発表の状況

- 塩見正衛・池田浩明・小泉 博・別宮有紀子・佐藤光政 (1992): 農耕地における炭素循環 — コマツナ畑で(10月~3月). 日本生態学会関東地区大会講演要旨集, p.17.
- 池田浩明・塩見正衛・小泉 博・別宮有紀子 (1992): 農耕地における炭素循環 — サツマイモ畑で(6月~10月). 日本生態学会関東地区大会講演要旨集, p.18.
- 松本成夫・桐田博充・袴田共之 (1993): クリーコナラ林における炭素循環量の季節変動と炭素収支. 第40回日本生態学会大会講演要旨集, p.257.
- 松本成夫 (1993): 農用林の炭素循環に対する下草刈りおよび落葉掻きの影響. 日本生態学会菅平生態学セミナー講演要旨, p.7.
- 松本成夫・袴田共之(1993): 関東地域の3つのコナラ林における炭素循環. 1. 炭素循環の全体像. 日本土壌肥料学会関東支部大会講演要旨集, p.13.