

K-1 陸域生態系の吸収源機能評価に関する研究

(3) 人為的活動による農耕地における炭素収支変動の評価

独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部 生態システム研究グループ

食料生産予測チーム

白戸康人、谷山一郎

袴田共之（現農業工学研究所）

（研究協力機関）独立行政法人国際農林水産業研究センター

環境資源部

松本成夫（前農業環境技術研究所）

東京大学農学生命科学研究科

米山忠克

静岡大学農学部 人間環境科学科

早野恒一

豊橋技術科学大学工学部

後藤尚弘

平成11～13年度合計予算額 38,198千円
(うち、平成13年度予算額 11,881千円)

[要旨]

石垣、徳之島および浜頓別で採取した土壌*Penicillium*のセルラーゼ活性の最適温度

$f(x)$ は年平均気温(x)と相関($r = 0.565^*$)し、 $f(x) = 0.17x + 58.1$ の一次回帰の関係があった。他方、土壌菌セルラーゼ活性の Q_{10} は年平均気温と相関せず2.0近傍であった。セルロース濾紙片の分解の Q_{10} は北の方がより大きく温暖化の影響を受けた。腐植や粘土含量がセルロースの分解に及ぼす影響は、腐植酸が拮抗型、ベントナイトおよびカオリンは非拮抗型、アロフェンは混合型でいずれもセルラーゼ活性を阻害した。

土壌有機炭素の $\delta^{13}C$ 値はその場の過去現在の植生(C3植物、C4植物)の影響を受けていた。1) $\delta^{13}C$ 値を用いて林地のサトウキビへの変換後の年数(x)に伴う土壌炭素量(y)の減少は、タイ東北地域で $y = 1.0 + 2.8\exp(-0.63x)$ 、半減期1.1年、タイ中央平原地域では $y = 4.2 + 13.2\exp(-0.14x)$ 、半減期5.0年となった。他方、サトウキビ由来炭素の集積は、東北地域で約5年で平衡値2.7mg/g乾重、中央平原地域では約20年で平衡値7.0mg/g乾重となった。2) フィリピンでは、林地のサトウキビ畑化によって林地起源炭素が減少し(半減期約2年)、サトウキビ起源炭素が集積した。3) 日本各地の農耕地及び森林土壌のC含有率と $\delta^{13}C$ 値についてはじめて実態をまとめた。

タイ国コンケンにおいて、耕起法や施肥法の変化が農耕地土壌炭素の蓄積に及ぼす影響を明らかにするため、トウモロコシ畑で慣行栽培、牛糞施用および不耕起栽培を行い、炭素収支を測定した結果、開始2年間の炭素蓄積量は、対照区、牛糞区、不耕起区でそれぞれ年間 -0.1 ± 0.1 、 $+3.8 \pm 0.3$ 、 $+0.7 \pm 0.2$ t ha⁻¹増加した。これら増加量の試験開始前の土壌炭素蓄積量に対する割合は、それぞれ-1、+26、+4%であった。炭素収支を解析したところ、牛糞施用により、牛糞の炭素供給だけでなく、植物根からの炭素供給が増大し、土壌炭素蓄積量の増加をもたらしたと推測された。

ローザムステッド・カーボン・モデル (Roth-Cモデル) を日本の農耕地土壌に適用したところ、非黒ボク土畑では土壌炭素蓄積量変化の予測値が実測値に精度良く適合した。黒ボク土畑土壌では予測値が実測値を大きく下回ったが、活性アルミニウムが腐植を安定化させていることに着目してモデルを改良した結果、精度が向上した。日本全国の畑土壌において炭素投入量を現在よりも0.5~1tC/ha/年増加させた場合の土壌炭素蓄積量の変化を予測したところ、全畑土壌で炭素量が10年後までに2.2~4.4Mt, 50年後までに5.6~11.1Mt増加するという結果が得られ、農耕地土壌も管理によっては大きな吸収源になることが示された。

Roth-Cモデルを使用して、次のようなアクティビティの実行による土壌炭素変化量を推計した。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。シナリオ2：肥料の施用面積を10%から20%に増大。シナリオ3：不耕起栽培を全農耕地の10%で実施。各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おける削減量の割合は、シナリオ1、2、3の各々に対し、日本：4.7%、2.4%、0.7%、アメリカ：24.5%、16.8%、4.3%、EU：22.9%、13.7%、3.7%であった。この結果から、アクティビティの実施は二酸化炭素の削減手段として有効であった。これらの中では残渣の農地還元量を増加したシナリオ1が最も効果的であった。土壌炭素量は面積に大きく依存するため、アクティビティによる吸収分の計上は広い農耕地を持つ国にとって、より有効といえる。

[キーワード] 土壌有機炭素, 農耕地土壌, 安定同位体存在比, セルロース分解, 炭素動態モデル

1. はじめに

京都議定書第3条第4項に関し、農耕地における人為的活動による炭素収支変動の評価を行うことが必要となる。しかるにそのための手法は未だ確定されておらず、その手法開発が待たれている。本サブ課題は、そのために必要な主要問題点を解明し、手法確定に資することを目的とする。

本稿において(1)~(5)として示す各サブサブ課題は、次のような位置づけがなされる：ローカルかつグローバルに農耕地土壌をめぐる炭素収支の動態を認識・評価し、対策の指針を明らかにするためには、まず、土壌の有機物や炭素の分解・蓄積に関する基礎的な知見

「(1)」のモデルへの反映や、グローバル・カーボン・モデルによる基本的統計情報の解析に基づく炭素収支傾向の国別把握「(5)」が重要であり、さらに、農耕地の炭素収支を長期にわたり追跡した実験情報は極めて有効であり、英国のローザムステッド試験場の160年にわたる実験結果は、その情報をもとに開発されたローザムステッド・カーボン・モデル (Roth-Cモデル) による研究成果とともにIPCCにおける論議に貢献しており、わが国でも、20数年から40数年にわたる実験結果がモデルの開発・改良に利用可能となっている。しかし、Roth-Cモデルは、我が国などに多い火山灰土壌 (黒ボク土) や水田土壌への適合が良くないので、その改良「(4)」が必要とされている。他方、他のアジア諸国においては、そのような長期実験の結果がないため、他の情報を利用せざるを得ない。本研究では、タイ東北部の農耕地における炭素収支の実態をトウモロコシ畑を対象に把握し、炭素収支に及ぼす諸条件を明らかにし「(3)」つつ、同じくタイを対象に、森林(C3植物)とサトウキビ(C4植物)

に起源をもつ土壌炭素の安定同位体存在比 $\delta^{13}\text{C}$ 値が C3 植物と C4 植物とでは相互に異なることを利用して、森林がサトウキビに転換した時期とその後の栽培履歴が明らかな多数にのぼる圃場の土壌炭素 $\delta^{13}\text{C}$ 値を解析し、もって長期実験と同等な情報を得ようとした「(2)」。

これらの結果を、Roth-Cモデル及びグローバル・カーボン・モデルによる解析に反映させて総合的な検討を行う。

2. 研究目的

京都議定書第3条第4項に関し、農耕地における人為的活動による炭素収支変動の評価を行うに当たって、我が国の農耕地および主として日本とフィリピン、タイ等の東アジアの農村地域を対象に、実験/観測的知見に裏付けられた炭素動態モデルを構築し、農耕地における人為的活動による炭素収支変動の評価・予測に関する研究を行い、併せて、世界の主要国の土地利用変動等に伴う炭素収支変動を既存の情報をもとに時系列的に分析し、もって我が国をはじめとする当該評価の手法開発に資することを目的とする。個別には下記の通り：

(1) 土壌セルロース分解の地域性と炭素蓄積分解過程との関連の評価

土壌におけるセルロース分解酵素系は植物残体が腐植化していくうえで欠くことのできない過程であり、土壌有機物の蓄積分解に影響する。そこで、1) セルロース分解菌のセルロース分解温度特性と土壌採取地点の気温との関係の解析、2) 土壌中におけるセルロース濾紙片の分解の温度特性と土壌採取地点の気温との関係の解析、3) セルラーゼ活性におよぼす腐植や粘土鉱物の影響の調査を行う。

(2) 土壌有機炭素の安定同位体存在比の変動からみた土壌炭素の動態評価

本研究では日本、フィリピン、タイの農耕地の土壌有機炭素(C)含有率とその炭素同位体自然存在比 ($\delta^{13}\text{C}$) の分析を行う。広い地域の多様な生態系の解析なので、きわめて多数の試料の分析を必要とする。各国でそれぞれ500点以上の分析試料を採取、収集する。さらに森林(C3型光合成)からサトウキビ(C4型光合成)畑への耕地化にともなう土壌有機炭素の変動を追跡するため、有機炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値の計測をおこない、土壌有機炭素が蓄積・分解する過程を定量化する。この情報によって、農耕地における土壌有機炭素の蓄積・分解過程を推定し、モデルリングを行う。

(3) タイ国農村地域における炭素収支評価

タイ国コンケンで、牛糞施用および不耕起栽培のトウモロコシ畑において、農地土壌への炭素のインプットおよびアウトプットを測定し、農地土壌における炭素収支を明らかにし、熱帯において、牛糞施用および不耕起栽培が土壌への炭素蓄積量に及ぼす影響を定量的に明らかにする。

(4) 農耕地土壌における炭素収支の変動評価

広域評価に適用可能な土壌炭素循環モデルの一つで簡便かつ信頼性が高いローザムステッド・カーボン・モデル (Roth-C) を用いて予測を行うため、まず代表的な地点においてモデルの検証を行い、必要であればモデルの改良を行った上で、モデルを面的に適用して日本の農耕地土壌全体の炭素収支が、人為的活動によりどう変化するかを評価・予測する。

(5) グローバル・カーボン・サイクル・モデルによる炭素収支評価

本研究では耕作形態、環境条件などをパラメータとした既存のモデル(Roth-C)を用い、日本をはじめ世界各国の農耕地土壌について様々なアクティビティを実施した場合の農耕地土壌炭素蓄積量の変化のより詳しい評価を行う。また京都議定書において定められている目標削減量に対して農耕地による削減でどの程度を賄うことができるかの評価を行う。

3. 研究方法

(1) 土壌セルロース分解の地域性と炭素蓄積分解過程との関連の評価

① セルロース分解菌のセルロース分解温度特性の解析

土壌試料は夏期に石垣(年平均気温23.8℃)、徳之島(同21.2℃)および浜頓別(同5.3℃)で採取した。セルロース分解菌株をHankinの培地¹⁾を用いて分離した。それらのうちで、南と北の地点の土壌から分離されたセルロース分解性*Penicillium*属菌株各6株をそれぞれ、ふすま培地上で培養し、0.1 Mリン酸緩衝液(pH7)によりセルラーゼ酵素を抽出して得た粗酵素液のセルラーゼ活性の温度に関連した特性を調べた²⁾。セルラーゼ活性の最適温度はアレニウスプロットの交点から求めた。

② 土壌中におけるセルロース濾紙片の分解の温度特性の解析

土壌試料は夏期に石垣(年平均気温23.8℃)、藤枝(同16℃)および札幌(同8℃)で採取した。供試土壌の理化学性を表1に示した。セルロース濾紙片(2 x 4cm)をガラス繊維濾紙で作った袋に土壌試料とともに詰め³⁾、ポットに埋設し、5℃、15℃および25℃の室内で保温静置した。経時的にガラス繊維濾紙袋を回収し、袋内のろ紙の重量保持率を計測した。重量保持率の減少から分解速度を求め、分解速度に及ぼす温度の影響を検討し、温度感受性の尺度(Q_{10})を求めた。地温の推移が類似で、土壌の粘土含量が異なる藤枝と浜岡において原位置埋設試験を実施した。原位置埋設試験からセルロース濾紙片・フミン酸塗布セルロース片(2×4cm)の分解速度を求めた。

③ セルラーゼ活性におよぼす腐植や粘土鉱物の影響

供試セルラーゼは市販(Sigma)の*Trichoderma reesei*起源の標品であった。カオリナイト、ベントナイトも市販の標品を用いた。アロフェンは農環研牧野氏の調製した標品を供試した。フミン酸水溶液は腐植酸を0.1 mol mL⁻¹NaOHに溶かして、pH6に調整して調製した。p-ニトロフェニル-β-D-セロビオシドを基質として30℃、pH5でインキュベートし、酵素活性に及ぼす腐植や粘土鉱物の影響を動力的に解析した⁴⁾。

(2) 土壌有機炭素の安定同位体存在比の変動からみた土壌炭素の動態評価

① 日本の土壌は3年間に採取した土壌試料の他、帯広畜大の近藤鍊三教授、九州農業試験場の吉田澤博士の協力で各種地層の土壌を得た。植物試料は、八甲田山の林葉、霧ヶ峰の草地、つくば、静岡、沖縄宮古島の圃場から200点採取した。タイ国の土壌は、1997年10月にタイ東北部、1998年11月にタイ中央部から西部にて栽培年数の違うサトウキビ畑と森林から土層別に採取した(約300点)。それに加えてタイ農業局土壌部の協力でタイ各地の土壌約200点を得た。タイの植物試料は全国から約150点採取した。フィリピン土壌は1996年10月にルソン島、1997年10月ネグロス島で栽培年数の違うサトウキビ畑と森林から土層別に採取した(約150点)。それに加えてフィリピン土壌研究開発センターの協力でフィリピン各地の

土壌約250点を得た。フィリピンの植物試料はルソン島とネグロス島から約100点採取した。以上すべての試料は乾熱器で乾燥した後、微細粉末とした。

② 土壌の分析にあたってそのpHが7以上になると、炭酸塩によるC含有率の増加があり、それにともない $\delta^{13}\text{C}$ 値は上昇することが明らかとなった。この結果から、pHが7以上の土壌については炭酸塩を除去する塩酸処理をおこない、土壌有機炭素とした。ANCA-SL質量分析計で分析した。

(3) タイ国農村地域における炭素収支評価

試験は、タイ国コンケンにおいて、トウモロコシ畑で、1999年から2001年まで行った。試験区は、対象区 [Conventional] (慣行栽培：耕起、化学肥料)、牛糞区 [Cow dung] (耕起、化学肥料+牛糞) および不耕起区 [No-tillage] (不耕起、化学肥料) を設定した(2反復)。化学肥料は、全区画で、播種時に31-62-31 kg N-P₂O₅-K₂O ha⁻¹、1ヶ月後に31 kg N ha⁻¹を施用した。牛糞区では、播種前日に牛糞10 t DM / ha (80-18-100 kg N-P-K ha⁻¹) を施用した。対象区および牛糞区では、作物残渣と雑草を鋤込み、不耕起区では、除草剤を散布し、枯れた雑草はマルチとした。

初年目の土壌炭素蓄積量の変化量を明らかにするため、試験開始直前(1999年7月)、1年後(2000年6月)および2年後(2001年5月)に、深さ50 cmまでの土壌を採取し、土壌炭素量を分析した。

炭素収支を明らかにするため、トウモロコシの収穫量および残渣量とそれぞれの炭素含有率、雑草の鋤込み量と炭素含有率、施用した牛糞の炭素含有率を測定した。トウモロコシ畑の土壌表面からの二酸化炭素放出量は、スポンジアルカリ吸収法⁵⁾を用い、播種後から1~3週間ごとに年間を通して測定した。

(4) 農耕地土壌における炭素収支の変動評価

① 黒ボク土畑6地点(北海道、青森県、栃木県、長野県、三重県、鹿児島県)、非黒ボク土畑5地点(秋田県：褐色低地土、埼玉県：褐色低地土、愛知県：黄色土、島根県：黄色土、大分県：褐色森林土)、水田2地点(滋賀県：灰色低地土、栃木県：多湿黒ボク土)における有機物等連用試験結果をRothC(次項参照)に適用し、炭素蓄積量の実測値とモデルの予測値を比較することによりモデルの妥当性を検証した。

② 黒ボク土について、活性アルミニウム量などの土壌特性値をパラメータとして腐植面分の分解率が変化するようにモデルを改良した。

③ 国土数値情報、気象庁メッシュ気候値および地力保全基本調査データベースの1kmメッシュデータを用い、全国の畑地にRothCを適用した。非黒ボク土にはRothCを、黒ボク土には改良モデルを用い、全国の1kmメッシュのうち、土地利用に占める畑の割合が20%を超えた36214メッシュについて、炭素の投入量が現在よりも増加した場合の炭素蓄積量変化を予測した。

(5) グローバル・カーボン・サイクル・モデルによる炭素収支評価

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Roth-Cモデル⁶⁾を用いた。Roth-C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。モデルを走らせるために

必要なデータは、月別平年降水量、月別平均気温、月別平年蒸発散量、表層土の粘土含量、植物質分解比、土壌被覆、月別作物残渣投入量、月別有機肥料投入量、土壌深さ、である。

4. 結果・考察

(1) 土壌セルロース分解の地域性と炭素蓄積分解過程との関連の評価

① セルロース分解菌のセルロース分解温度特性の解析

水田土壌試料のセルラーゼ活性も、畑土壌の結果と同様に、比活性は有機性細片で高かったが、分布割合は2mm以下で高かった。以前のデータから、畑状態の土壌におけるセルロース分解の主な担い手は糸状菌と見なされている⁷⁾。2mm以下の土壌試料を用いて希釈平板法によってセルロース分解菌を分離したところ、*Penicillium*属菌株が多数普遍的に分離された。石垣（年平均気温23.8℃）、徳之島（年平均気温21.2℃）および浜頓別（年平均気温5.3℃）で採取した土壌から分離した*Penicillium*属菌株の粗酵素液セルラーゼ活性の最適温度は年平均気温（図1）と相関（ $r = 0.565*$ ）した。このことは土壌菌セルラーゼにも温度特性に関する地域性のあることを示している。両者の間には $f(x) = 0.17x + 58.1$ の一次回帰の関係があった。この回帰式から環境温度が1℃上昇すると土壌*Penicillium*のセルラーゼ活性の最適温度は平均0.17℃高温側にシフトすると予測された。

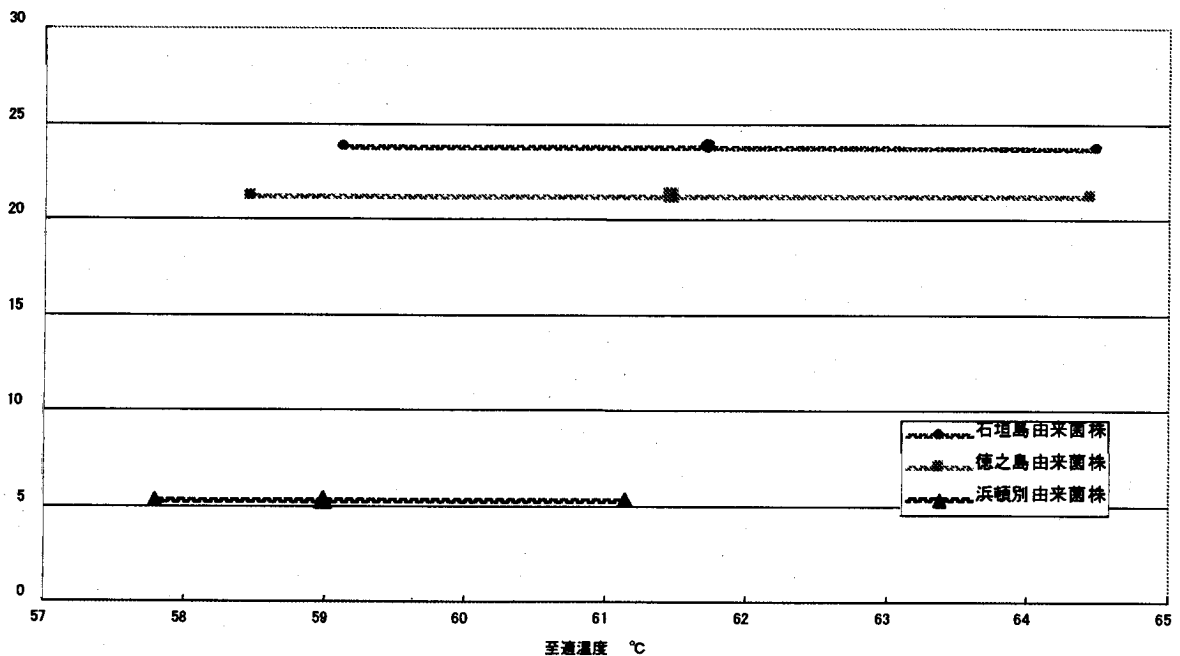


図1. 土壌菌セルラーゼ活性の最適温度と年平均気温

土壌菌セルラーゼ活性の温度感受性の尺度として測定した Q_{10} と年平均気温との間の回帰式は $f(x) = 0.01x + 1.98$ となり、相関性はなかった（図2）。この回帰式から5.3℃から23.8℃の範囲では環境温度に関係なく Q_{10} は2.0近傍であることを示している。

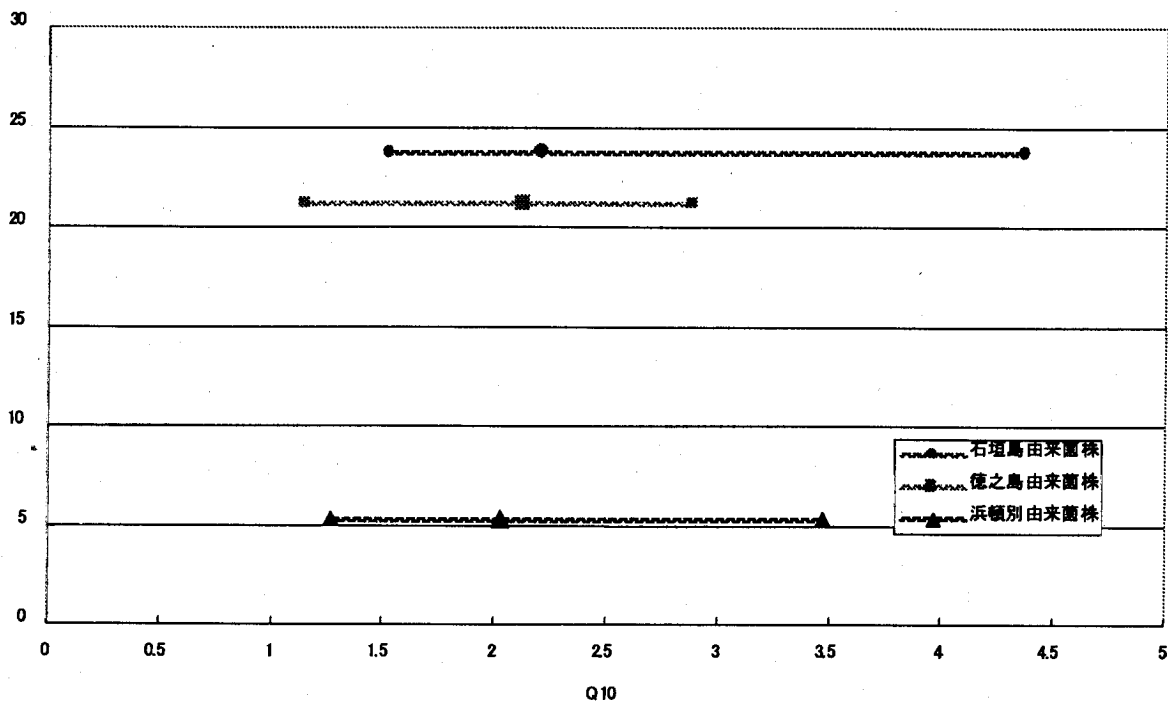


図2. 土壌菌セルラーゼ活性のQ10と年平均気温の関係

② 土壌中におけるセルロース濾紙片の分解の温度特性の解析

藤枝および浜岡におけるセルロース片の分解パターンを図3に示した。藤枝の夏期におけるセルロース分解の初速度は0.18 (week⁻¹)、冬期は0.14となり地温が高い方が分解速度は高かった。また冬期の浜岡土壌は0.23であった。希釈頻度法で計測されたセルロース分解菌最確値数は、藤枝および浜岡でそれぞれ、 $2.7 \times 10^5 \text{g}^{-1}$ 乾土および $2.2 \times 10^5 \text{g}^{-1}$ 乾土であった。このことは地温やセルロース分解菌密度に差がないにもかかわらず砂質土壌では分解が速いことを示している。この両者の粘土含量を比較すると藤枝土壌の方が高かった(表1)。フミン酸塗布セルロースは、どの土壌においてもセルロースより分解は遅かった(図4)。

表1 供試土壌の理化学性

	pH	含水比 (10^{-2}KgKg^{-1})	全C (10^{-2}KgKg^{-1})	全N (10^{-2}KgKg^{-1})	C/N	粘土含量 (10^{-2}KgKg^{-1})
藤 枝	5.38	0.215	0.80	0.09	9	12
浜 岡	7.58	0.017	0.42	0.03	14	0.2以下
石 垣	6.27	0.094	0.41	0.04	10	19
札 幌	5.47	0.503	5.72	0.41	14	6

原位置埋設試験と同様に温度が高いほど、またフミン酸が塗布していないセルロースの方が分解が速かった。年平均気温(x)と分解速度(y)の関係を式で表すと、セルロース分解の分解速度は $y=0.0029x+0.0082$ 、フミン酸塗布セルロースは $y=0.0029x+0.0011$ という関係式が得られた。セルラーゼ活性はどの土壌でも変化

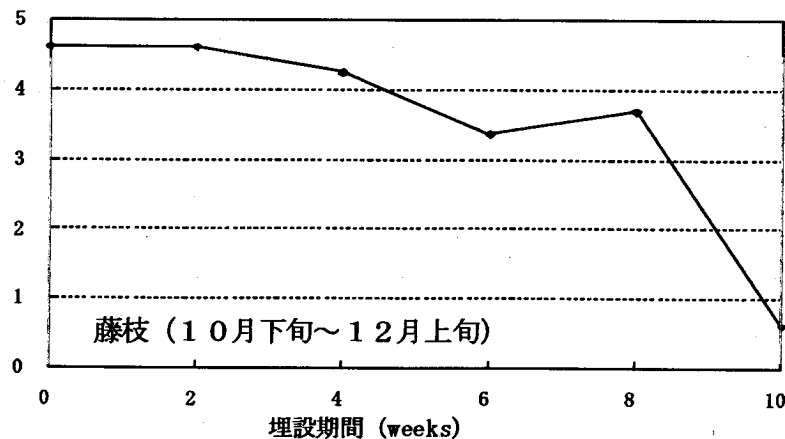


図3a. セルロースろ紙片の分解パターン (藤枝、晩秋)

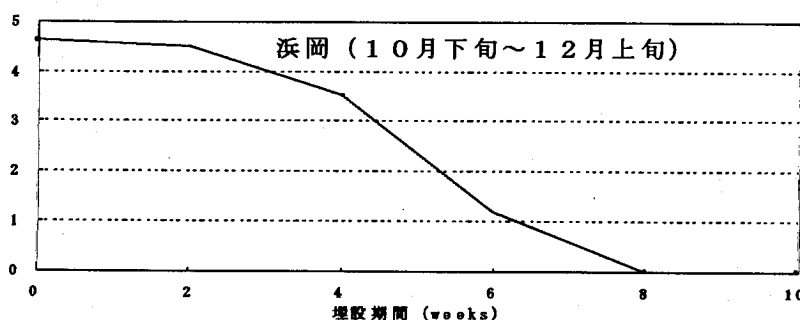


図3b. セルロースろ紙片の分解パターン (浜岡、晩秋)

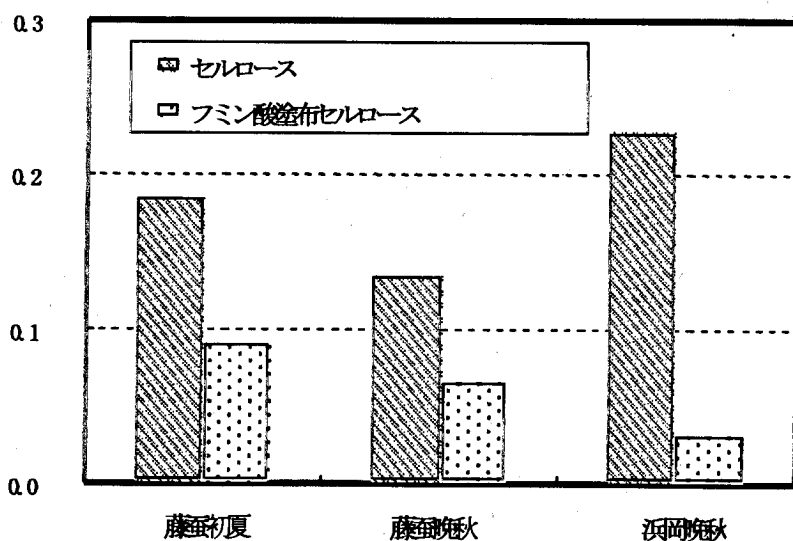


図4. セルロースろ紙片の分解におよぼす腐植酸の影響

はあまり見られなかったことから原位置の温度の影響が大きいと考えられた。セルロース分解における Q_{10} をガラス繊維濾紙内の紙片の分解速度から求めた。この Q_{10} は土壤採取地点の気温によって異なり、石垣島の年平均気温 23°C に対して3.3、藤枝 16°C に対しては4.6、札幌 8°C に対しては4.8であった。また、フミン酸塗布セルロース濾紙の分解の Q_{10} はそれぞれ石垣、藤枝、札幌で5.2、6.2、1.6であった。この結果から気候変動により温度が 1°C 上昇すると土壤中のセルロース分解率は、札幌・藤枝・石垣でそれぞれ9.2%、5.3%、及び3.9%高くなると試算された。これらの結果より、温暖化が生じると北の地方の方がその温度の影響をより大きく受けることが示唆された。

③ セルラーゼ活性におよぼす腐植や粘土鉱物の影響

腐植酸、粘土鉱物によるセルラーゼ活性の阻害のパターンを図5に例示した。腐植酸によるセルラーゼ活性の阻害様式は拮抗阻害、

カオリナイトおよびベントナイトは非拮抗阻害的、アロフェンは非拮抗阻害と不拮抗阻害の混合型を示した。各図x切片、y切片から阻害定数(Ki)を算出した。Kiは $[E][I]/[EI]$ または $[ES][I]/[ESI]$ で示され、値が小さいほど、その阻害剤としての腐植酸や粘土鉱物の酵素と

の親和性が高いことを意味する。アロフェンの阻害パターンは混合型だったことから、阻害定数

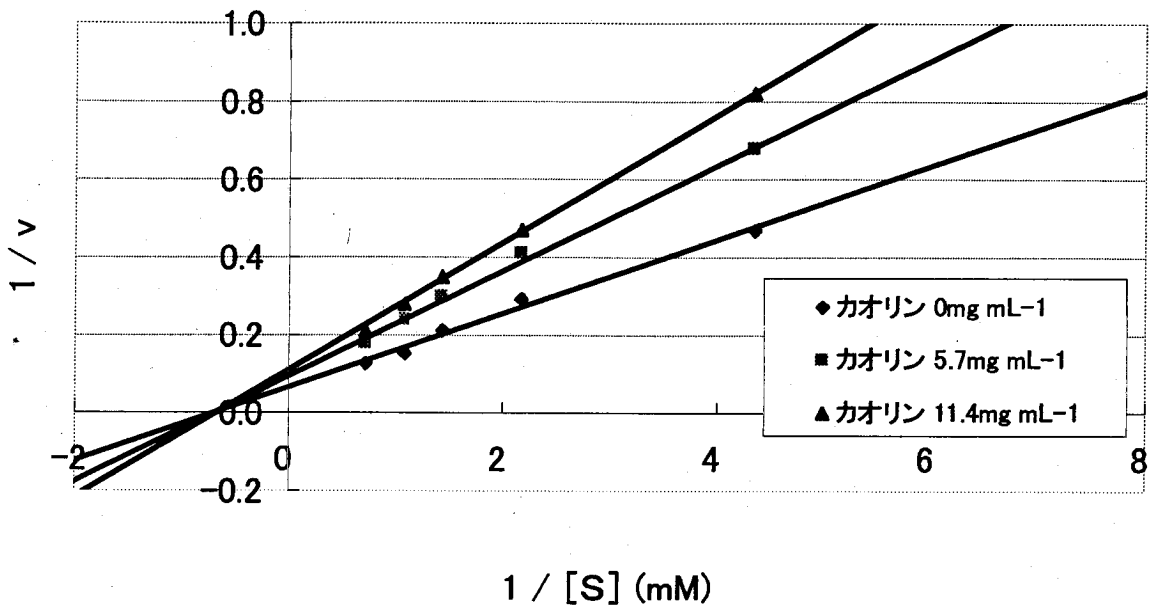


図5. カオリナイトによるセルラーゼ活性の阻害 (例示)

(K_i および K_i')は次式より求めた。

$$1/v_i = (1 + I/K_i) \times K_m/V_{max} \times 1/S + (1 + I/K_i') \times 1/V_{max}$$

ただし、 $K_i = [E][I]/[EI]$ 、 $K_i' = [ES][I]/[ESI]$ 、 $K_m =$ 解離定数、 $S =$ 基質濃度、 $v_i =$ 阻害剤存在下での初速度である。

算出した阻害定数 (K_i) は腐植酸、カオリン、ベントナイトおよびアロフェンでそれぞれ、16.4、23.6、17.0および6.7mg/mlであった。

有機物分解において土壌中では腐植や粘土鉱物に基質が収着し、そのために分解酵素が接近を妨げられて分解が遅れることがあり得る。本研究では腐植酸や粘土に酵素が収着し、複合体を形成することによって分解が遅れることがセルラーゼについても確認された。このことが浜岡の砂質土で分解が速いこと、腐植酸の塗布が分解を遅らせることに一因になっていることを示唆している。

(2) 土壌有機炭素の安定同位体存在比の変動からみた土壌炭素の動態評価

近年の安定同位体存在比を用いた研究の進展の中で、土壌有機炭素の蓄積・分解過程の *in situ* の定量的評価が新たな前進を見せている⁹⁾。本研究課題の耕地化に伴う土壌窒素の動態は、タイ、フィリピンで採取した林地とサトウキビ畑の土壌分析から、きわめて明確になったので、それらを中心に記載する。

① タイの農耕地と林地の試料約500点分析した。タイのC3植物33種(43試料)の $\delta^{13}C$ 値は-31.4‰~-26.0‰(平均-29.0‰)、C4植物15種(29試料)の $\delta^{13}C$ 値は-15.7‰~-10.9‰(平均-13.7‰)であった。由来別の土壌炭素量の推定に用いたC3植物の森林リター $\delta^{13}C$

C値は-28.8‰、C4植物サトウキビの $\delta^{13}\text{C}$ 値は-12.2‰であった。採取した時の作物別に土壌有機炭素の含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値の分布を見ると落花生やソルガムの栽培土壌の炭素含有率は低く、 $\delta^{13}\text{C}$ 値はクワの栽培地では、C3植物の値、サトウキビ栽培地ではC4植物の値に近かったが、コトシ、イネ、トウモロコシ、ソルガム、ダイズ、ササゲ、落花生の栽培土壌ではC3植物とC4植物の値の間に分散していた。

タイ東北部は砂質の土壌で炭素含有率は林地すらも約5~7mgC/g乾重と低い。林地の表層土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値は-28‰付近であり、サトウキビへ転換後急速に上昇し、8年後には-17‰に平衡化する。タイ中央部から西部の林地は20~25mg/g乾重の炭素含有率で、サトウキビ畑に転換すると10~15mg/g乾重に低下する。 $\delta^{13}\text{C}$ 値は林地で-28.5‰付近であるが、サトウキビ栽培20年位で-17‰付近に平衡化した。土壌有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値を用いてサトウキビ栽培年数(x)に伴う森林由来の炭素量(y)を計算すると、タイ東北地域で $y = 1.0 + 2.8 \exp(-0.63x)$ 、半減期1.1年であり(図6)、中央平原地域では $y = 4.2 + 13.2 \exp(-0.14x)$ 、半減期5年(図7)となった。他方サトウキビ由来炭素の集積は、東北地域では約5年で平衡値2.7mg/g乾重、中央平原地域では約20年で平衡値7.0mg/g乾重となった。サトウキビ栽培年数が100年になっても、森林炭素の残留が認められた。

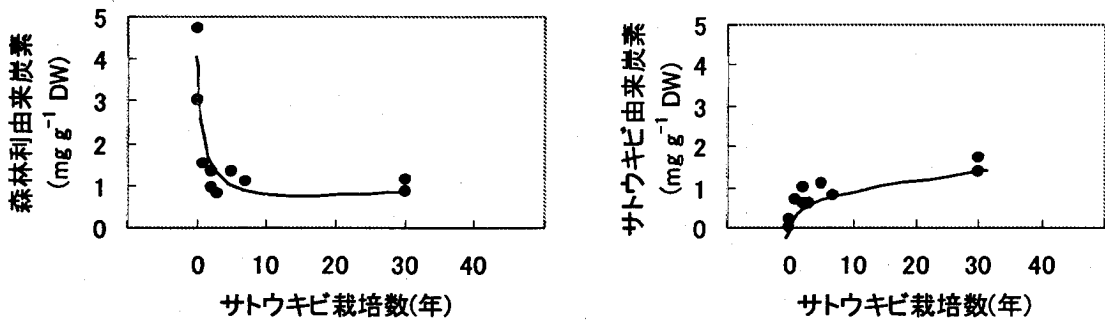


図6 東北地域のサトウキビ栽培土壌における栽培年数に伴う森林由来、サトウキビ由来炭素含有量の変化

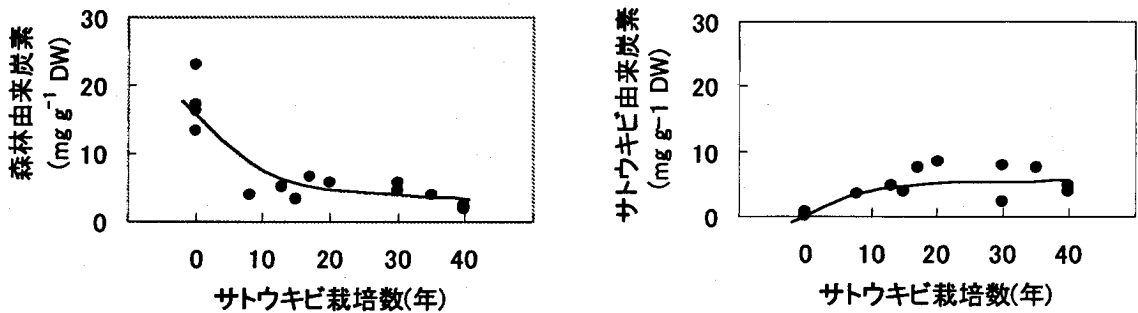


図7 中央平原地域のサトウキビ栽培土壌における栽培年数に伴う森林由来、サトウキビ由来土壌の炭素含有量の変化

② フィリピンの試料約500点を分析した。植物の $\delta^{13}\text{C}$ 値はC3植物で -31.1‰ ~ -27.2‰ 、C4植物で -15.2‰ ~ -11.8‰ と光合成タイプで明瞭に分かれた。土壌有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値はその場の過去現在の植生(C3植物、C4植物)の影響を受けていた。自然林土壌 $\delta^{13}\text{C}$ 値は -27‰ 、二次林竹林土壌の表層で -27‰ 、下層で上昇した。ケソン国立公園では、土層100cmまで -25‰ 前後であり、林地から変換した野菜畑では、表層は -25‰ 以上であったが下層は -28‰ であった。50年サトウキビの栽培では表層 -15‰ 、下層は -23‰ であった。長年水稻栽培の水田土壌では表層が、 -24‰ ~ -23‰ 、中層(30~50cm)にゆくと1~6%上昇した。中央ルソン、ネグロスのサトウキビ圃場の作土(0~20cm)では、林地が -27‰ に対し、サトウキビ畑化によって土壌有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値は上昇した。そこでは林地起源炭素が減少し(半減期約2年)、その代わりサトウキビ起源炭素が集積した(図8、図9)。

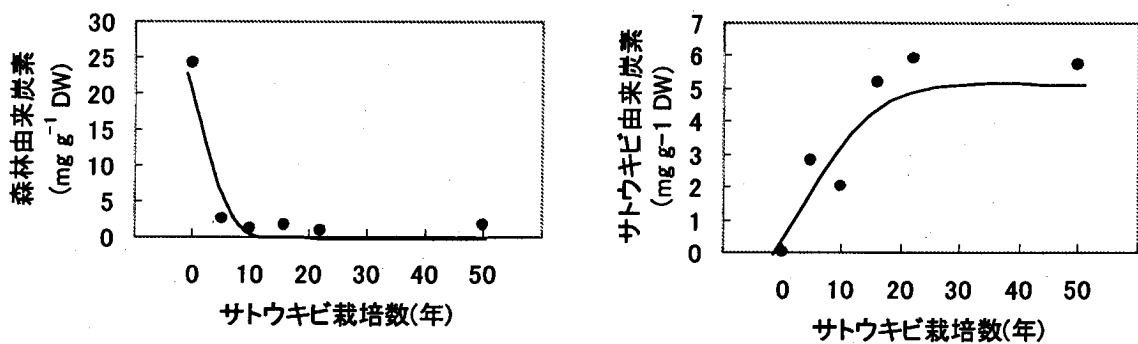


図8 ルソン島中央地域のサトウキビ栽培土壌における栽培年数に伴う森林由来、サトウキビ由来土壌の炭素含有量の変化

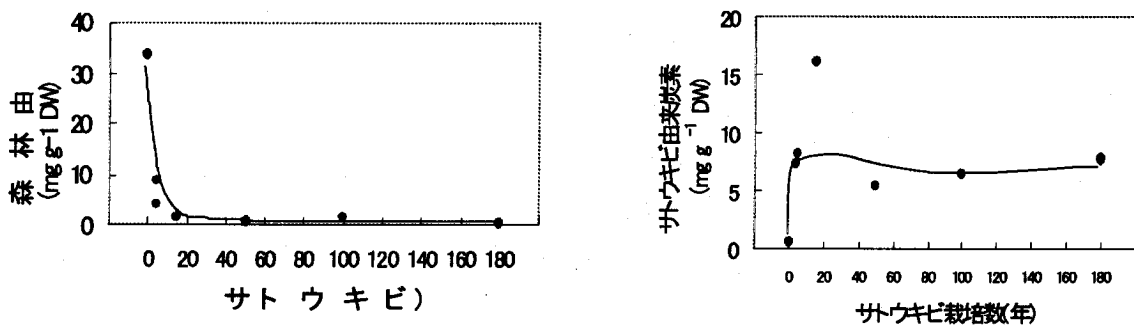


図9 ネグロス島のサトウキビ栽培土壌における栽培年数に伴う森林由来、サトウキビ由来土壌の炭素含有量の変化

③ 日本の土壌の炭素含有率はタイやフィリピンに比べ高い。 $\delta^{13}\text{C}$ 値は北海道ではC3植

物の値に近いが、本州ではC4植物(ススキ)の影響が強く見られた。オパールの $\delta^{13}\text{C}$ 値は全炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値より一般に低かった。日本の畑地、林地の初めての論文⁹⁾を発表した。

(3) タイ国農村地域における炭素収支評価

① 土壌炭素蓄積量の変化

深さ50 cmまでの土壌に蓄積されていた炭素量は、試験開始直前、1年後および2年後で、対象区がそれぞれ 19.1 ± 0.3 、 17.5 ± 0.4 、 $18.8 \pm 1.7 \text{ t ha}^{-1}$ 、牛糞区がそれぞれ 14.8 ± 2.9 、 20.5 ± 3.6 、 $22.4 \pm 3.3 \text{ t ha}^{-1}$ 、そして、不耕起区がそれぞれ 16.7 ± 0.2 、 21.3 ± 0.6 、 $18.0 \pm 0.0 \text{ t ha}^{-1}$ であった(図10)。深さ50 cmまでの土壌炭素蓄積量の変化量は、初年目の約1年間において、対象区、牛糞区、

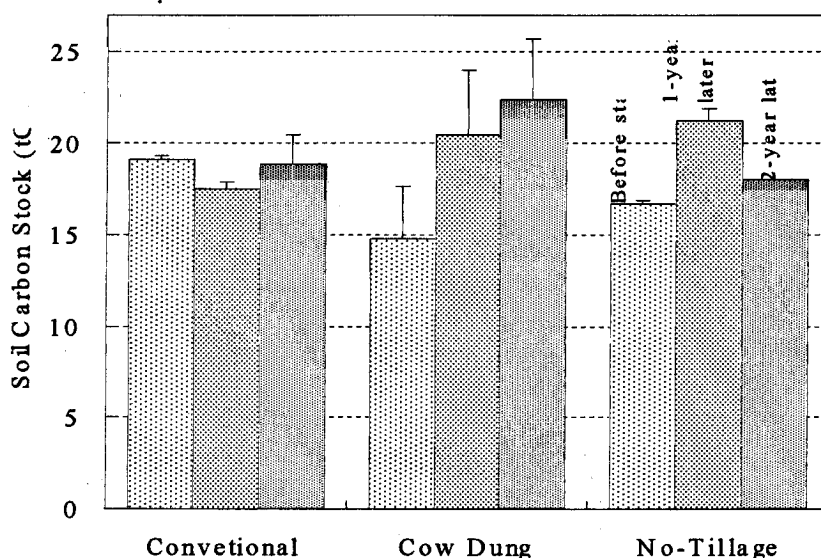


図10 Soil carbon stock in 0 - 50 cm depth at maize field in Khon Kaen, Thailand.

不耕起区それぞれで -1.6 ± 0.1 、 $+5.7 \pm 0.7$ 、 $+4.6 \pm 0.4 \text{ t ha}^{-1}$ 、2年目の約1年間において、それぞれ $+1.3 \pm 2.1$ 、 $+1.9 \pm 0.2$ 、 $-3.2 \pm 0.7 \text{ t ha}^{-1}$ 、そして、試験期間の2年間では年間でそれぞれ -0.1 ± 0.1 、 $+3.8 \pm 0.3$ 、 $+0.7 \pm 0.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ と見積もられた。また、試験期間2年間における土壌炭素蓄積の変化量は、試験開始直前に比べ、対象区、牛糞区、不耕起区でそれぞれ-1、+26、+4%であった。対象区の土壌炭素蓄積量は増減せず、一定で推移した。牛糞区は、試験期間を通して土壌炭素蓄積量が増加していた。不耕起区は増減の幅が大きく、本試験では増加すると明確に述べることができなかつた。熱帯モンスーン地域の砂質土壌の農地土壌に炭素を蓄積するには、牛糞施用が有効である。

対象区、牛糞区、不耕起区における試験開始直前、1年後、2年後の10 cmの層ごとの土壌炭素含有率を図11に示した。いずれの処理区も、試験開始直前から2年後においても、深さ20 cmより浅い層では、土壌炭素含有率は 2 g kg^{-1} を超えており、20 cm以深では、 2 g kg^{-1} 以下であった。対象区では、試験直前から2年後まで、変化が認められなかつた。牛糞区で

は、20 cmより浅い層で、土壤炭素含有率がおよそ1.8倍に増加した。不耕起区では、0 - 10 cmと20 - 30 cmの層で変動が見られたが、増加しているかどうかははっきりしなかった。牛糞の土壤炭素蓄積は、表層0 - 20 cmの耕土層で起こっていた。

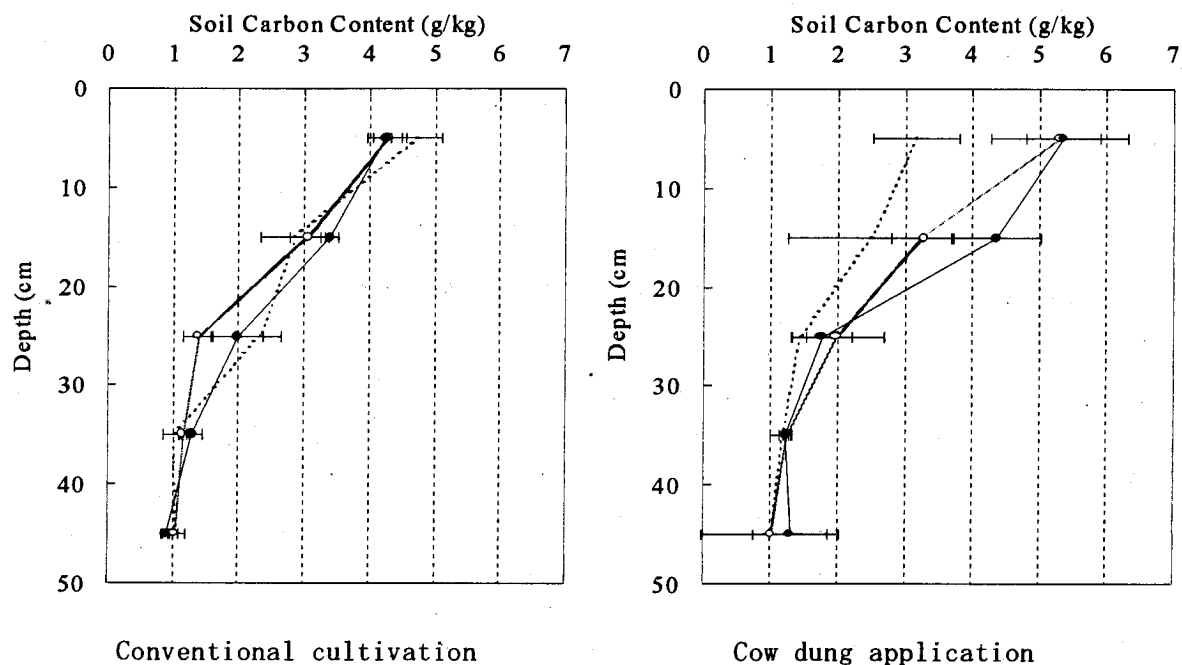


図11 Change of soil carbon content in 0 - 50 cm depth at maize field in Khon Kaen, Thailand.

----- : Before start experiment
 : 1-year later ————— : 2-year later

② 炭素収支

対象区、牛糞区および不耕起区における炭素収支を計算した(付図、本課題末尾頁参照)。炭素収支は、2年間の試験期間におけるトウモロコシの収量および茎葉の農地還元量、雑草の鋤込み量、牛糞の投入量、土壤表面からの二酸化炭素の放出量、土壤炭素蓄積量の変化量をもとに、年間当たりで見積もったものである。ここで、炭素収支を合わせるため、土壤からのアウトプット(土壤からの二酸化炭素放出+土壤炭素蓄積量の増加)から土壤へのインプット(トウモロコシ茎葉の農地還元+雑草の鋤込み+牛糞投入)を引いた差し引いた値を、トウモロコシから土壤への炭素供給量とした。この炭素供給は、根の呼吸、枯死根、根からの分泌物などにより土壤に供給される炭素である。

対象区では、トウモロコシ茎葉と雑草の鋤込みにより $4.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が土壤に供給されており、 $10.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が二酸化炭素となり放出されていた。土壤炭素蓄積量の変化は $-0.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であり、 $6.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が根の呼吸などにより土壤に供給されていたと見積もられた。

牛糞区では、トウモロコシ茎葉と雑草の鋤込みにより $4.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素と、牛糞施用により $2.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が土壤に供給されており、 $12.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が二酸

化炭素となり放出されていた。土壌炭素蓄積量の変化は $+3.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であり、 $9.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が根の呼吸などにより土壌に供給されていたと見積もられた。牛糞区での土壌炭素蓄積量の増加は施用した牛糞だけでは足りない。牛糞施用により根の呼吸や枯死根、根からの分泌物が、対象区の約1.5倍に増加することで炭素収支が合う。牛糞施用は、根の量および活性を向上させ、土壌への炭素供給量を増加させるものと想像される。

不耕起区では、トウモロコシ茎葉と雑草の鋤込みにより $3.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が土壌に供給されており、 $8.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が二酸化炭素となり放出されていた。土壌炭素蓄積量の変化は $+0.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ であり、 $6.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ の炭素が根の呼吸などにより土壌に供給されていたと見積もられた。不耕起栽培により、トウモロコシおよび雑草の生産量の低下による炭素供給量の減少の他、根の量および活性が低下することによる炭素供給量の減少が起こったものと推測される。

今後、様々な地域で農地土壌に炭素蓄積量を増加させるには、単に炭素投入量を増加させるだけではなく、根の量や活性を高めること（細根を増やし、枯死根を増加させることや、根からの分泌物を増加させるなど）が、土壌へのより高い炭素蓄積量を実現することになると思われる。このためには、異なる地域、土壌、作物の圃場での炭素収支を明らかにすること、堆肥施用などによる根の反応などを明らかにする研究が必要である。

(4) 農耕地土壌における炭素収支の変動評価

① 非黒ボク畑でのRothC予測値は実測値と一致した (図12)。北から南まで5箇所で、

非黒ボク土畑におけるモデルの検証

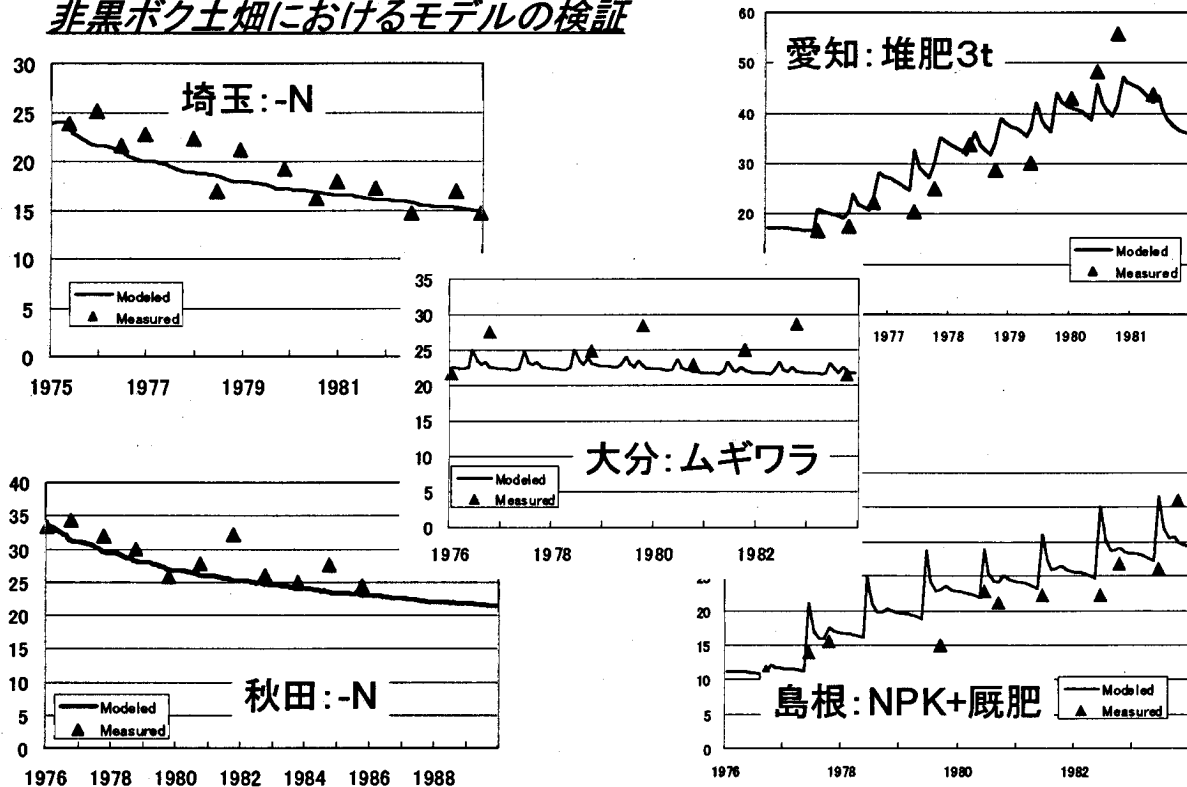


図12：非黒ボク土畑5地点におけるRothCモデルによる炭素蓄積量変化の予測値(Modeled)と実測値(Measured)の比較

褐色低地土，黄色土，褐色森林土が含まれており，有機物投入量が少なく炭素蓄積量が減少している処理区や，逆に有機物を多量に投入していて土壤炭素が増加している処理区いずれにおいても精度良く予測できていることから，非黒ボク土の畑ではRothCが問題なく使えると判断した。水田では，モデルの予測値は実測値を大きく下回り，適用できないと判断した。

② 黒ボク土では，ほとんどの地点と処理区でモデルの予測値は実測値を大きく下回った。そこで，黒ボク土は腐植が安定な形で存在するために分解が遅いことを反映させるため，活性アルミニウム量などの土壤特性値をパラメータとして腐植画分の分解率が変化するようにモデルを改良した。日本全国の林地および草地32地点 (Andisol TU Database) において，モデルの予測値が実測値と一致するように腐植画分の分解率を変えるファクターFを求め，

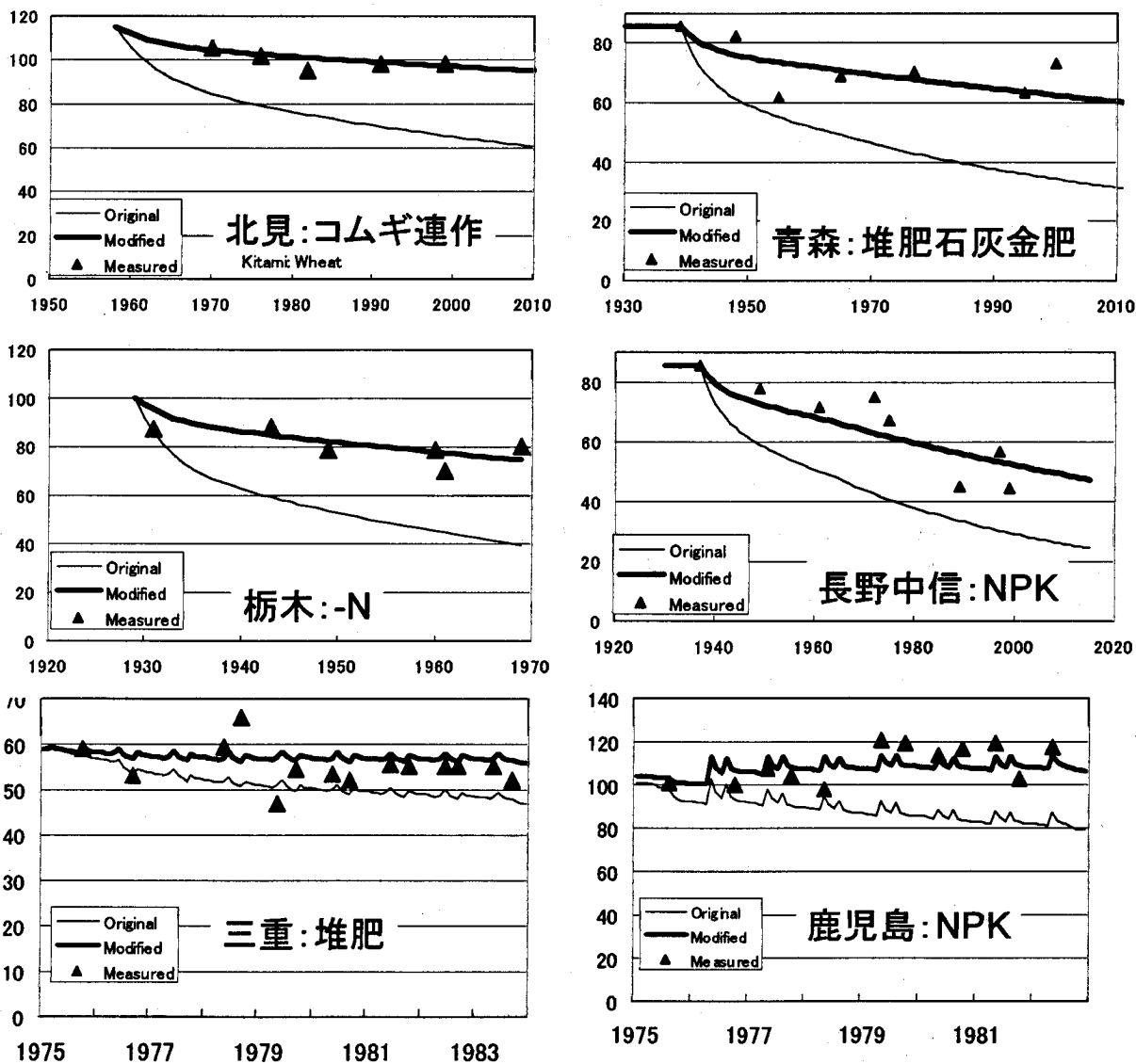


図13. 黒ボク土畑におけるRothCモデル (Original) とその改良モデル(Modified)による予測値と実測値 (Measured) の比較

各地点のFと、化学特性値との回帰分析を行った結果、ピロリン酸塩可溶アルミニウム含量 (Alp) が最も相関係数が高く、 $F=2.27Alp(\%)+1.26$ の式を得た。上記6ヶ所の黒ボク土畑において、この式を使った改良モデルでは予測値の精度が改良前に比べて大きく向上した(図13)。

③ 全ての畑において堆肥を施用し、現在よりも土壤に投入される炭素量を0.5~1.0 t/h a/yr増加させた場合、土壤炭素量は京都議定書の第一約束期間である10年後までに全畑土壤で2.2~4.4Mt, 50年後には5.6~11.1Mt増加した(図14)。

京都議定書における日本の温室効果ガス削減目標は、1990年のCO₂排出量1.2Gtの6%で、炭素量になおすと約20Mtである。このうち約13Mtが、森林などの吸収源により目標値から差し引くことができる量の上限であるが、上記の予測において土壤に貯留される炭素の量は、これに数十%の規模で貢献するほど大きい。「全ての畑」ではなく、「10%の畑」で同じことを行った場合でも、数%の規模で貢献できる計算になる。また、この堆肥投入量は、現物当り炭素含量5%の堆肥を10aあたり1~2t施用に相当し、現実に不可能な量ではない。日本の農耕地における炭素量は、全体でみると最近20年ほどはそれほど変化していないことが土壤環境基礎調査からわかっているが、この予測結果は、農耕地土壤も管理によっては大きな吸収源になる可能性があることを示している。

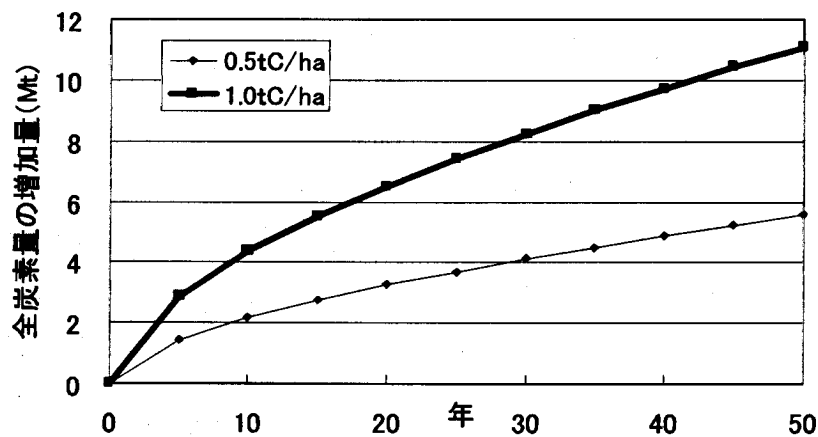


図14. 現在よりも炭素投入量を0.5~1.0t/ha/年増やした場合の全畑土壤中の炭素蓄積量の増加量

(5) グローバル・カーボン・サイクル・モデルによる炭素収支評価

農耕地土壤における炭素量の推計は18カ国についてそれぞれ行う。また各国の農耕地を栽培作物種別に8分類しそれぞれの農耕地ごとに炭素量の推計を行い、各農耕地土壤の炭素量の合計を各国の農耕地土壤炭素量とする。

① 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、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壤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。

- ・基準年の条件 有機肥料：全農耕地の10%に4 t-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
- ・シナリオ2 肥料の施用面積を10%から20%に増大する
- ・シナリオ3 不耕起栽培を全農耕地の50%で実施する

② シナリオの推計

アクティビティによる炭素増加量は次式で求められる。

$$(\text{削減期間}(a\text{年間})\text{の正味除去量}) - (\text{基準年の正味除去量} \times a) \quad [1]$$

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。シナリオ1～3を実行した結果の各国の炭素増加量を図15に示す。

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。

各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図16に示す。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。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且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。カナダにおいては、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。

IPCCでは、農耕地管理による最大吸収量を0.3t/ha/年と見込んでいる。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がおおよそ0.3t/ha/年、シナリオ2がおおよそ0.2t/ha/年、シナリオ3がおおよそ0.1t/ha/年と妥当な値が得られた。これより本推計結果の妥当性が示された。

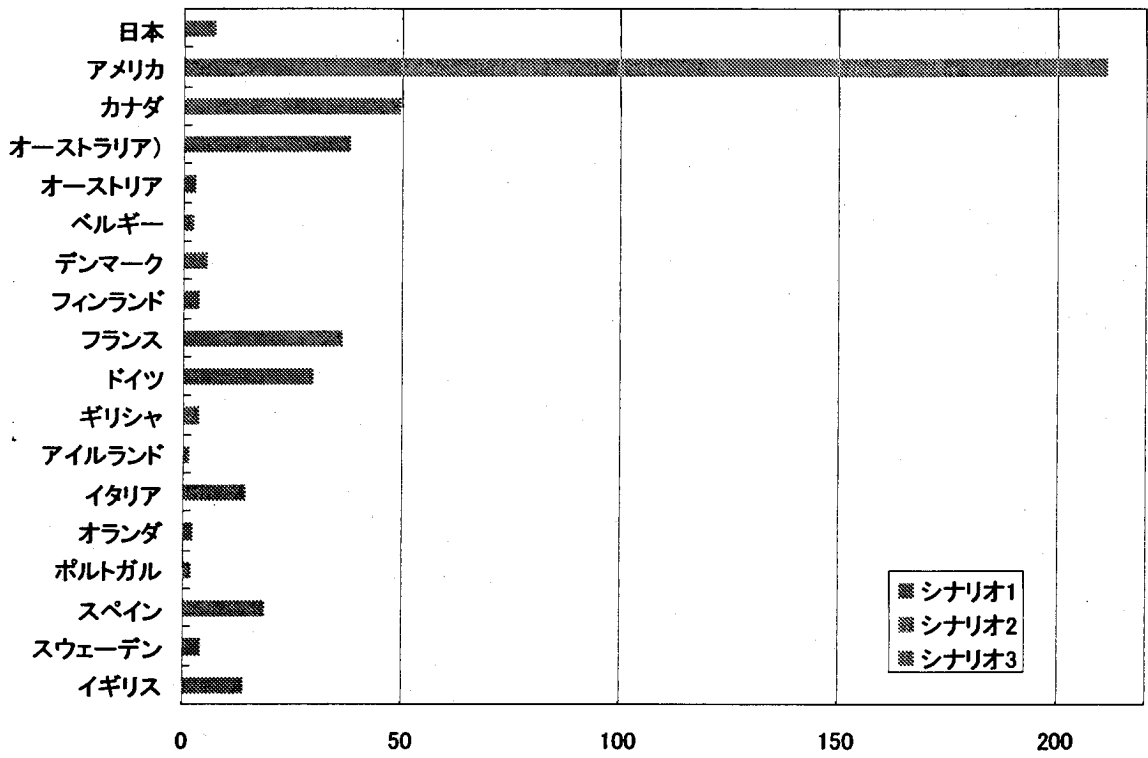


図15 シナリオ1~3実施時の土壌炭素増加量

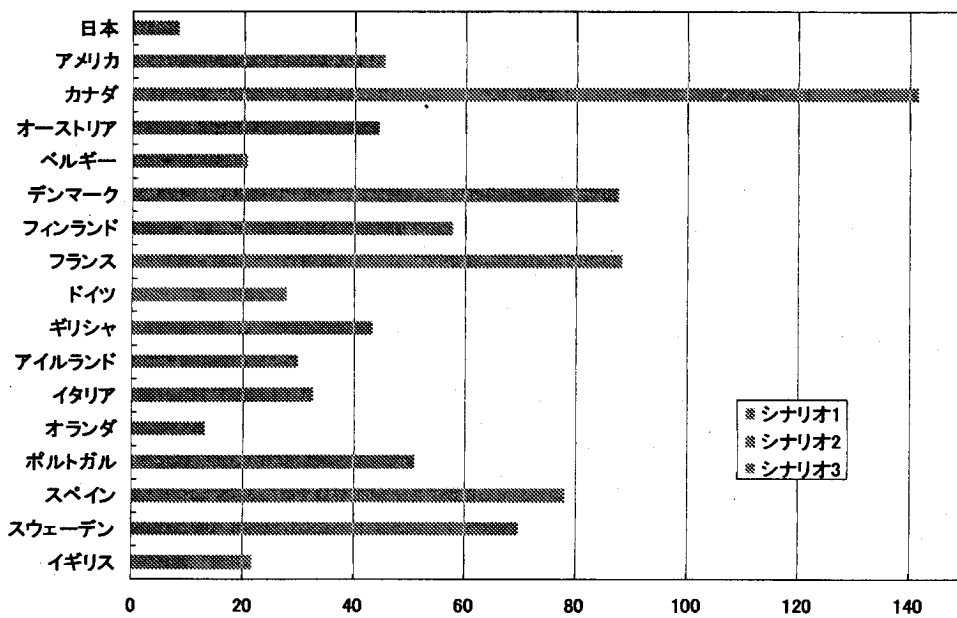


図16 目標削減量に占める各アクティビティ実施による削減量の割合

5. 本研究により得られた成果

土壌中の炭素の固定には微生物の働きが決定的に重要であり、特にセルロース分解酵素系は植物残渣が腐植化していくうえで重要な過程であって、土壌有機物の分解蓄積過程に大きく影響する。今回、土壌菌セルラーゼの温度特性に関して地域性があることが判明し、環境温度が1℃上昇すると土壌*Penicillium*のセルラーゼ活性の最適温度は平均0.17℃高温側にシフトすると予測された。他方、土壌菌セルラーゼ活性の Q_{10} は環境温度に関係なく2.0近傍であることが明らかとなった。また、セルロースの分解には、土壌の腐植や粘土含量が影響していることが示された。これらの知見は、重要であるにもかかわらずあまり知られていなかった。

土壌有機炭素の $\delta^{13}C$ 値を使って、タイ、フィリピン、日本において森林を開墾し畑にした場合の土壌有機物の分解・蓄積過程を定量的に追跡し、それぞれの地域の分解・蓄積過程の進行速度を明らかにした。このようにアジア熱帯まで含めて広く土壌有機炭素の蓄積・分解過程が $\delta^{13}C$ 値を使って測定された今回の報告は、世界でも初めてのものである。

それらの実地検証の初期段階に相当する2年間の実験がタイ東北部のコンケンにおいて行われ、牛糞施用や不耕起栽培による土壌炭素蓄積状況が明らかにされた。高温のため有機物の分解が旺盛な当地域においても、土壌炭素増加量の割合が、試験開始前に対して牛糞施用で+26、不耕起栽培で+4%であった。また、炭素収支を調べることにより、牛糞施用による炭素供給に加えて、牛糞の施肥効果により根からの炭素供給も増大し、土壌炭素蓄積量の増加をもたらしたことが明らかになり、そのような相乗的な効果を有する技術体系が効果的と考えられた。

今までモデルによる土壌中の炭素蓄積量変化の予測が困難であった火山灰起源の黒ボク土に関して、RothCモデルの改良により精度良く予測することが可能になった。また、非黒ボク土に関してはRothCモデルがそのまま使えることが確認された。これらにより、日本のような火山灰に多く覆われた国の畑土壌に関して、炭素収支の変動を、モデルにより面的にかつ定量的に把握することが可能となった。

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を18カ国を対象にRoth-C等のモデルを用いて推定したところ、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し、他方で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。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且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)国であるといえる。

6. 引用文献

- 1) Hankin, L and Anagnostases, S.L: J. Gen. Microbiol. 98, 109-115(1977)
- 2) 金沢晋二郎・森 敬太・広木幹也・松本 聡: 環境科学会誌、6 251-258 (1993)
- 3) 前田乾一・鬼鞍 豊: 土肥誌、48、567-568 (1977)
- 4) Segel, I.H.: Enzyme Kinetics, A Wiley-Interscience Publication(1975)

- 5) 桐田博充：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, Vol. 21, p. 119-127. 1971.
- 6) K. Coleman and D. S. Jenkinson: ROTH-C-26.3
- 7) K. Hayano: Soil. Biol. Biochem., 18 215-219 (1986)
- 8) 米山忠克：土壌有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値から植生の変化を読む、RADIOISOTOPE 45, 659-660 (1997)
- 9) T. Yoneyama, Y. Nakanishi, A. Morita, and B. C. Liyanage: $\delta^{13}\text{C}$ values of organic carbon of cropland and forest soils in Japan. Soil Sci. Plant Nutr. 47, 17-26 (2001)

[国際共同研究等の状況]

(2) の課題は、タイ国農業局、フィリピン土壌研究開発センターの協力で行われた。2002年8月バンコクで開かれる国際土壌科学会議でタイでの研究の発表を行う。

(3) の課題担当者が、タイ国に長期出張し、タイ国農業協同省農業局土壌科学部の Kobkiet Paisanchaoen 氏と「東北タイの牛糞施用および不耕起栽培のトウモロコシ畑における炭素収支」の研究を協同で行った。課題担当者は平成13年8月に長期出張を終了し、帰国したが、帰国後も、連絡および短期出張を行い、共同研究を継続して行った。

(4) の課題の予算で、英国ローザムステッド試験場と Roth-C モデルの黒ボク土への適合を改良する共同作業のため研究者招聘 (Kevin Coleman 氏) および日本側研究者の英国訪問を行っている。

(5) の課題の予算で、オランダをはじめ数カ国の研究者との情報及び意見交換を行った。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① Hayano, K., Kamimura, Y. and Asano, K.: Summary of Enzyme in environment, Activity, Ecology and Application (Granada), 67 (1999)
 "Properties concerning optimum temperature and Q_{10} of cellulase activity in soil and its relation to global climate warming."
- ② 米山忠克, 吉田濤: 日本土壌肥科学雑誌 71, 6, 834-839 (2000)
 「南九州テフラ断面土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{15}\text{N}$ 値に基づく古植生推定の試み」
- ③ 早野恒一: 圃場と土壌, 32, 351-355 (2000)
 「土壌酵素活性の測定法」
- ④ Y. Kamimura and Hayano, K.: *Biol. Fertil. Soils*, 30 351-355 (2000)
 "Properties of protease extracted from tea-field soil"
- ⑤ T. Yoneyama, Y. Nakanishi, A. Morita, and B. C. Liyanage: *Soil Sci. Plant Nutr.* 47, 1, 17-26 (2001)
 " $\delta^{13}\text{C}$ values of organic carbon of cropland and forest soils in Japan"
- ⑥ 近藤錬三、岡田英樹、米山忠克: 第四紀研究 40, 3, 185-192 (2001)

「日本におけるイネ科植物由来の植物珪酸体の有機炭素量および ^{13}C 自然存在比」

- ⑦ 井上弦、米山忠克、杉山信二、岡田英樹、長友由隆：第四紀研究 40, 4, 307-718(2001)
「都城盆地の累積性黒ボク土における炭素・窒素安定同位体自然存在比の変遷—植物珪酸体による植生解析との対応」
- ⑧ 酒井康雄・磯川麻里・吉岡 寿・増田隆志・早津雅仁・早野恒一：農化誌. 75, 156(2001)
「各種生分解性プラスチックの畑土壌埋設における分解と土壌酵素活性との関連」
- ⑨ 米山忠克、山田裕、森田明雄：日本土壌肥料学会誌73, 3、(2002)
「土壌-植物系における炭素、窒素、イオウ、酸素の動態解析のための安定同位体自然存在比の利用」
- ⑩ Y. Sakai, K. Hayano, H. Yoshioka, T. Fujieda, K. Saito and H. Yoshida: Polymer. J. 34, 144-148(2002)
“Chitosan-coating of cellulosic materials using an aqueous chitosan-CO₂ solution.”

(2) 口頭発表

- ① 米山忠克、松丸泰郷、吉田濤：土肥学会講要、45, 16 (1999)
「日本の土壌炭素の ^{13}C 自然存在比 ($\delta^{13}\text{C}$)」
- ② 浅川 晋・早野恒一：日土肥講要, 45, 57 (1999)
「新規造成火山灰土圃場での水稻作付け後のメタン生成古細菌密度の検討」
- ③ Naruo Matsumoto and Kobkiet Paisanchoen: Annual Project Meeting 2000 on Comprehensive Studies on Sustainable Agricultural Systems in Northeast Thailand. Khon Kaen, Thailand (2000)
“Effects of cow dung application and no-tillage cultivation on nutrient balances and crop yields of maize field”
- ④ 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」
- ⑤ 米山忠克、岡田英樹、田瀬則雄、安藤象太郎、P. Chongpradum, P. Prasertsak, 平井敬三：土肥学会講要 47, 7 (2001)
「タイの植物、耕地および林地土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値の変動」
- ⑥ 米山忠克：安定同位体利用技術研究会 東京 (2001)
「日本の土壌有機物 $\delta^{13}\text{C}$ 値から過去の植生を読む」
- ⑦ 白戸康人、袴田共之、谷山一郎：日本土壌肥料学会 (2001)
「ローザムステッド・カーボン・モデルの日本の農耕地土壌への適用」
- ⑧ Y. Shirato and K. Coleman: 9th Japan-US Workshop on Global Change Carbon Cycle Management in Terrestrial Ecosystem (2001)
“Testing the Rothamsted Carbon Model Against Long-term Experiments on Japanese Arable Soils”
- ⑨ M. Yokozawa and Y. Shirato: 9th Japan-US Workshop on Global Change Carbon Cycle

Management in Terrestrial Ecosystem (2001)

"Spatial evaluation of soil carbon on Japanese arable lands using the Rothamsted carbon model"

⑩ 米山忠克、三浦憲三、E.V. Dacanay, O. Castelo, 新井重光：土肥学会講要 48, (2002)

「フィリピン林地、水田、畑土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値」

⑪ T. Yoneyama, H. Okada, P. Chongpradtnum, S. Ando, P. Prasertsak and K. Hirai :

17th World Congress of Soil Science, Bangkok (2002).

" $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon in croplands and forests in Thailand"

⑫ 白戸康人、横沢正幸、K. Coleman：日本土壌肥料学会 (2002)

「ローザムステッド・カーボン・モデルによる日本の農耕地土壌の炭素収支の広域評価」

⑬ N. Matsumoto, Kobkiet Paisancharoen, Chairroj Wongwiwatchai and Prapai Chairroj:

Workshop on Improving Agricultural Productivity through Local Resources Utilization and Technology Development in Northeast Thailand. Khon Kaen, Thailand (2002)

"Nitrogen cycles and nutrient balance in agro-ecosystems in Northeast Thailand"

⑭ 松本成夫・Kobkiet Paisancharoen・袴田共之：第49回日本生態学会 (2002)

「東北タイのトウモロコシ畑における土壌炭素蓄積量と炭素収支への牛糞施用および不耕起の影響」

⑮ N. Matsumoto, Kobkiet Paisancharoen and Tomoyuki Hakamata: 17th World Congress of Soil Science. Bangkok, Thailand (2002)

"Carbon sequestration in maize field with cow dung application and no-tillage cultivation in NE

Thailand". (フルペーパー提出済み)

⑯ 後藤尚弘、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」 (予定)

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

① 日本農業新聞 (平成12年12月25日、全国版)

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

本研究結果であるローザムステッド・カーボン・モデルを用いた日本の畑土壌における炭素収支の変動予測結果は、農耕地を京都議定書における吸収源として位置付ける場合、その定量的把握に貢献できる。IPCCの「土地利用、土地利用変化及び林業に関するグッドプラクティスガイダンス」執筆者を支援する「タスクフォース」委員会の場などで積極的

に成果の広報に努める。また、土壌の炭素含量の維持は、農耕地、特に畑土壌においては農業生産上も重要であり、肥沃度維持に必要な堆肥等有機物の施用量を算定する目的にも活用できる。本成果の一部は、農業環境技術研究所の農業環境研究成果情報（第17集）として採択され普及用に付された。

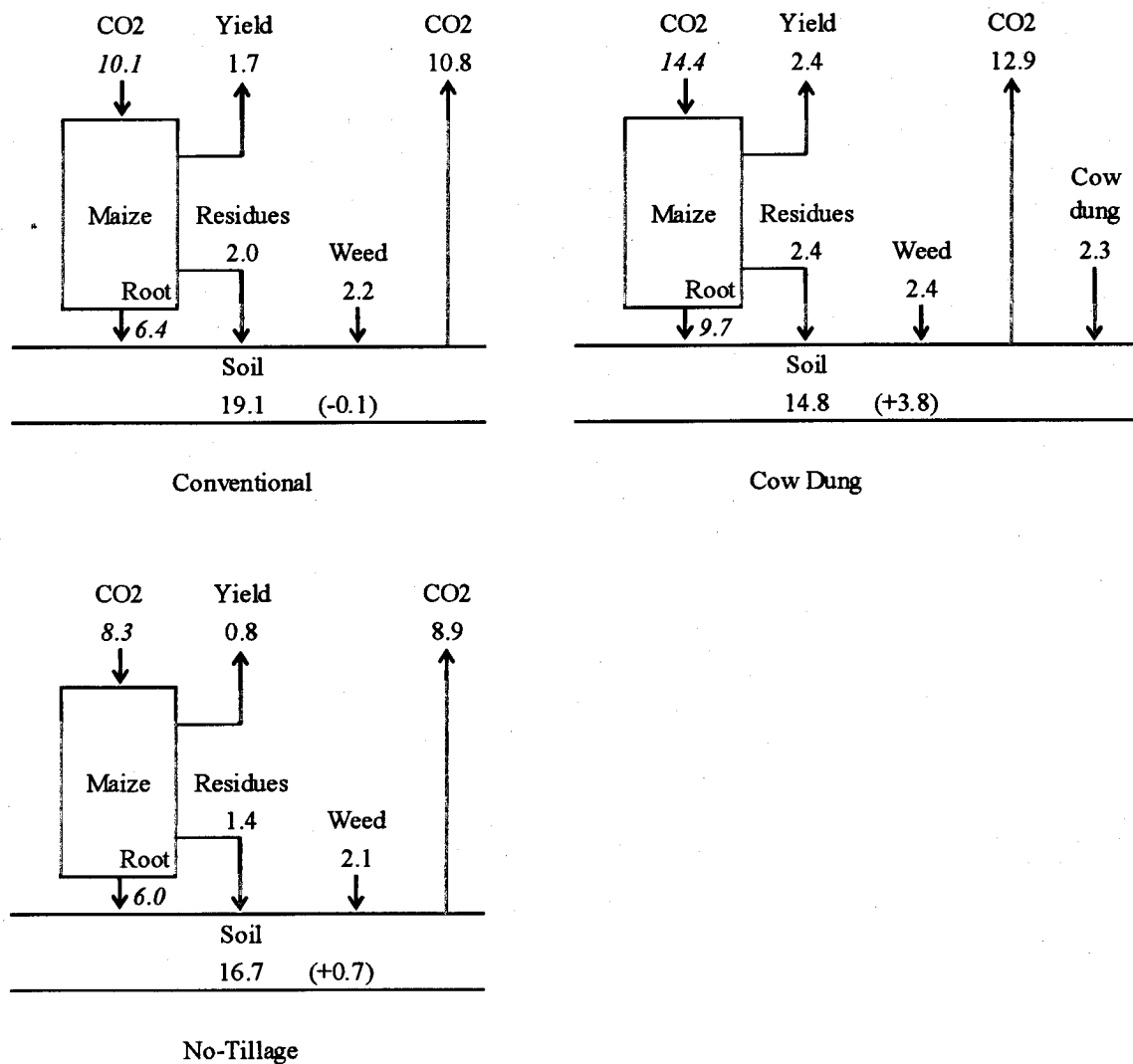


Figure 6. Carbon balance on maize field under conventional cultivation, cow dung application, no-tillage cultivation in Khon Kaen, Thailand (t C / ha / year). These balance were annual value based on data on 1st and 2nd year experiments. Normal numerals are measurement data. Italic numerals are calculation value (output - input). Numerals in () was change of soil carbon stock.

付図