

B-6 陸域生態系の二酸化炭素動態の評価と予測のモデリングに関する研究

(2) 人為生態系の二酸化炭素変動機構のモデル化と予測

③ 安定同位体存在比による土壤有機炭素の蓄積・分解過程の定量的評価

研究代表者 農業研究センター 土壤肥料部 栄養診断研究室 米山 忠克
平成8～10年度予算額 7,485千円
(平成10年度予算額 2,493千円)

[要旨]

1) 植物試料の分析に用いたオンライン ANCA-SL 質量分析計 (Europa Scientific, UK) による $\delta^{13}\text{C}$ 値の分析方法は土壤試料についても可能であった。土壤がアルカリ性で無機の炭酸塩が含まれている場合は、0.5 M 塩酸で処理して有機炭素のみとし分析に供した。その概要は C 量で 150 ~ 1000 μg 含む量の土壤の粉碎試料をスズカップに秤りとり、ヘリウム気流中で燃焼して、ガスクロマトグラフ質量分析計のオンラインシステムにより分析した。一点の分析は約 6 分であった。

2) 宮古島土壤を含む日本の土壤約 500 点の分析から、林地と北海道では $\delta^{13}\text{C}$ 値が約 -24 ‰ (C₄ 植物) であったが、本州、四国、九州では -22 ~ -18 ‰ で C₄ 植物 (ススキと推定) の影響がみられた。また宮古島ではサトウキビの栽培年数の進行に併行して土壤有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値が上昇し、約 25 年で平衡化した。

3) フィリピン土壤約 500 点の分析からの土壤 C 含有率は日本の土壤の 1/5 ~ 1/10 であり、殆どの耕地土壤の $\delta^{13}\text{C}$ 値には C₄ 植物の影響がみられ、-13 ‰ の低い値もみられた。フィリピン土壤の $\delta^{13}\text{C}$ 値をみると、サトウキビの栽培で 10 ~ 50 年でほとんどの炭素がサトウキビからの炭素に交替することが明らかとなった。これは日本の耕地でススキ (C₄ 植物) の影響が長く残っているのと対照的であった。

4) タイの土壤は約 500 点採取したが、分析はまだ一部である。現在までの分析結果をみると東北タイの土壤は、C 含有率が極めて低いが、中央タイの土壤の C 含有率は、フィリピンと同程度である。両地域の林地の $\delta^{13}\text{C}$ 値は C₃ 植物の値で、サトウキビの栽培 8 ~ 20 年で $\delta^{13}\text{C}$ 値は平衡になった。

[キーワード] ^{13}C 自然存在比 ($\delta^{13}\text{C}$)、土壤有機炭素、代謝回転、C₃ 植物、C₄ 植物

1. 序

地球的な炭素循環のいくつかの部分について、モデルを使った精度の高い評価が出来るようになってきたが、陸域についてはデータやモデルに不十分さが残っているとされている。特に土壤機能については、土壤特有の複雑性の故に、グローバルな評価に向けての一般化が、海洋、大気などに比べて困難であった。近年の安定同位体存在比を用いた研究の進展の中で、土壤有機炭素の蓄積・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^{1, 2, 3)}。陸上生態系の土壤の炭素のうち有機炭素は、その場の植生の地上部のリッターや残渣として、また根部の残渣とし

て供給される。これらの有機物は土壤中で土壤動物や土壤微生物によって分解され、消失していく。分解過程で、土壤微生物は低分子の炭素化合物やデンプン、セルロースなどの高分子を異化作用によって低分子化し、最後は炭酸ガスとして大気に炭素がもどるが、これらの有機炭素の一部は、土壤微生物の蛋白質などの生体成分として新構成されて、土壤により長時間保持される。植物(特にイネ科植物や材木)の炭素化合物には土壤微生物が直接分解できないリグニンが含まれている。この分解はシロアリなど土壤動物により分解されると考えられ、シロアリが生息する熱帯では分解されるが、リグニンの分解者の少ない温帯や寒帯では土壤に長く残留して、土壤の粘土などと結合して、非常に分解され難いフミンなど腐植物質となり、炭素は土壤に蓄積される。

炭素には ^{12}C と ^{13}C の二つの安定同位体があり、自然の ^{13}C の存在比 $^{13}\text{C} / (^{12}\text{C} + ^{13}\text{C})$ は約 1.10 % である。炭素化合物の ^{13}C 自然存在比を精密に測定すると 1.00 ~ 1.12 % 程の変異があり、この小さいが有意な変異 ($\delta^{13}\text{C}$) は次の式で計算される。

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = (R_{\text{試料}} / R_{\text{標準}} - 1) \times 1000$$

ここで R は $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ である。標準としては伝統的に PDB (アメリカ白亜紀 Pee Dee 層の巻貝化石 Belemnite, CaCO_3) が使われている。また $\delta^{13}\text{C}$ 値は 1000 分の 1 率 (‰) で表示する。

植物が大気の炭酸ガスを固定し、有機炭素に変換する光合成反応では ^{12}C を含む $^{12}\text{CO}_2$ と ^{13}C を含む $^{13}\text{CO}_2$ でその固定率に違いがあり、大気の炭酸ガスの $\delta^{13}\text{C}$ 値 (-7 ‰) と植物が固定した有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値 (-9 ~ -30 ‰) には明らかな差異が生じる。

興味深いことに C_3 型光合成をおこなう植物の有機炭素は -22 ‰ ~ -30 ‰ (平均 -27 ‰), C_4 型光合成をおこなう植物では -9 ~ -15 ‰ (平均 -13 ‰) と二つのグループに分かれる。

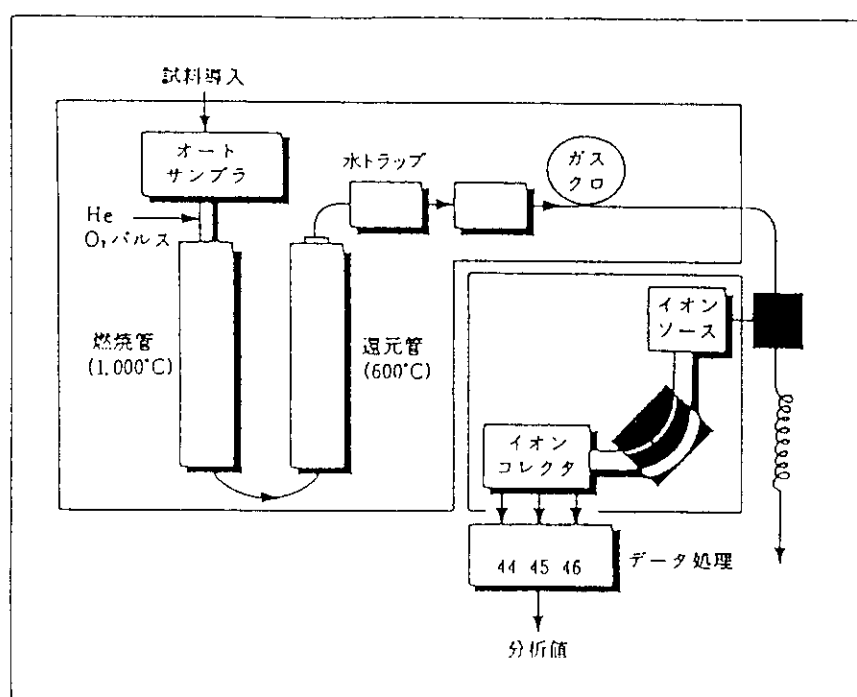


図 1 土壤の炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値の分析に用いたオンラインANCA-SL 質量分析計

先に述べたように、土壌に加えた植物有機炭素は土壌生物により分解され、一部は呼吸で失われる。この呼吸によるCO₂放出の結果、残った有機物のδ¹³C値は1～3%高くなるが、植物有機物のうち、分解抵抗性のリグニンのδ¹³C値は有機物全体より5～6%低く、全体としては、植物の残渣リッターのδ¹³C値と土壌有機物のそれは0.5%以内の差となっている。このように植生のδ¹³C値は、土壌の有機炭素のδ¹³C値に大略記録されることになるため、土壌の有機炭素のδ¹³C値を計測すると過去の植生の光合成タイプの相対的な寄与の割合が次の式で計算され得る。

$$\delta_s = \delta_{c_3} \cdot X + \delta_{c_4} \cdot (1 - X)$$

ここでδ_sは土壌の有機炭素のδ¹³C値、δ_{c₃}はC₃型光合成の植物のδ¹³C値(≒-27‰)、δ_{c₄}はC₄型光合成の植物のδ¹³C値(≒-13‰)、Xは過去のC₃型植生由来炭素の割合である。植生の光合成タイプの変化、C₃型からC₄型へ、またC₄型からC₃型へは、乾燥化と湿潤化などの環境の変化や耕作作物の変化によって生じる。先に述べたように土壌に供給される有機物の分解・代謝による炭素同位体の分別は小さく、もとの植生のδ¹³C値は維持される。即ち、植物の光合成タイプ(C₃、C₄)により土壌有機物のδ¹³C値が決まり、自然植生や栽培植物の光合成タイプが変わると土壌有機物のδ¹³C値もそれに応じて変化する。このことを利用して、C₃からC₄へ、またはC₄からC₃へと植生が変化した土壌の同位体比を測定することにより、土壌有機物の半減期や回転率を求めることができる¹⁾。

2. 研究目的

本研究では熱帯、亜熱帯での森林(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含有率とδ¹³C値の変異の計測をおこなった。日本の宮古、フィリピン、タイで森林と栽培年数の違うサトウキビ畑の土壌を採取して分析した。また日本、フィリピン、タイの土壌の多様な生態系や土壌の違いによる炭素含有率とδ¹³C値の変異を計測した。現在までに日本の土壌約500点、フィリピンの土壌500点の分析を終了し、タイ土壌は約150点の分析を行った。この情報によって、土壌有機炭素の蓄積・分解過程が従来に増して正確に推定できるとともに、それぞれの生態系の炭素の動態に関するモデルの高精度の検証が可能となると考えられる。

3. 研究方法

(1) 土壌試料の採取

日本の土壌は、1996年10月、宮古島の黄色土、灰色低地土、暗赤色土の栽培年数の違うサトウキビ畑と森地から土壌を採取した。また日本各地の耕地火山灰土壌(黒ボク土)を採取した。フィリピンの土壌は、1996年フィリピン本島(ルソン島)、1997年本島とサトウキビ栽培の最も長いネグロス島で、栽培年数の違うサトウキビ畑と林地の土壌を採取した。表土は20cmまで混合して、深さごとの土壌は、土壌アウガーで採取した。フィリピン Bureau of Soils and Water Managementa の協力によってフィリピン各地からの土壌を200点程得た。

タイの土壌は、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壌オウガーで土層別(0～10、10～20、20～30cm、場所

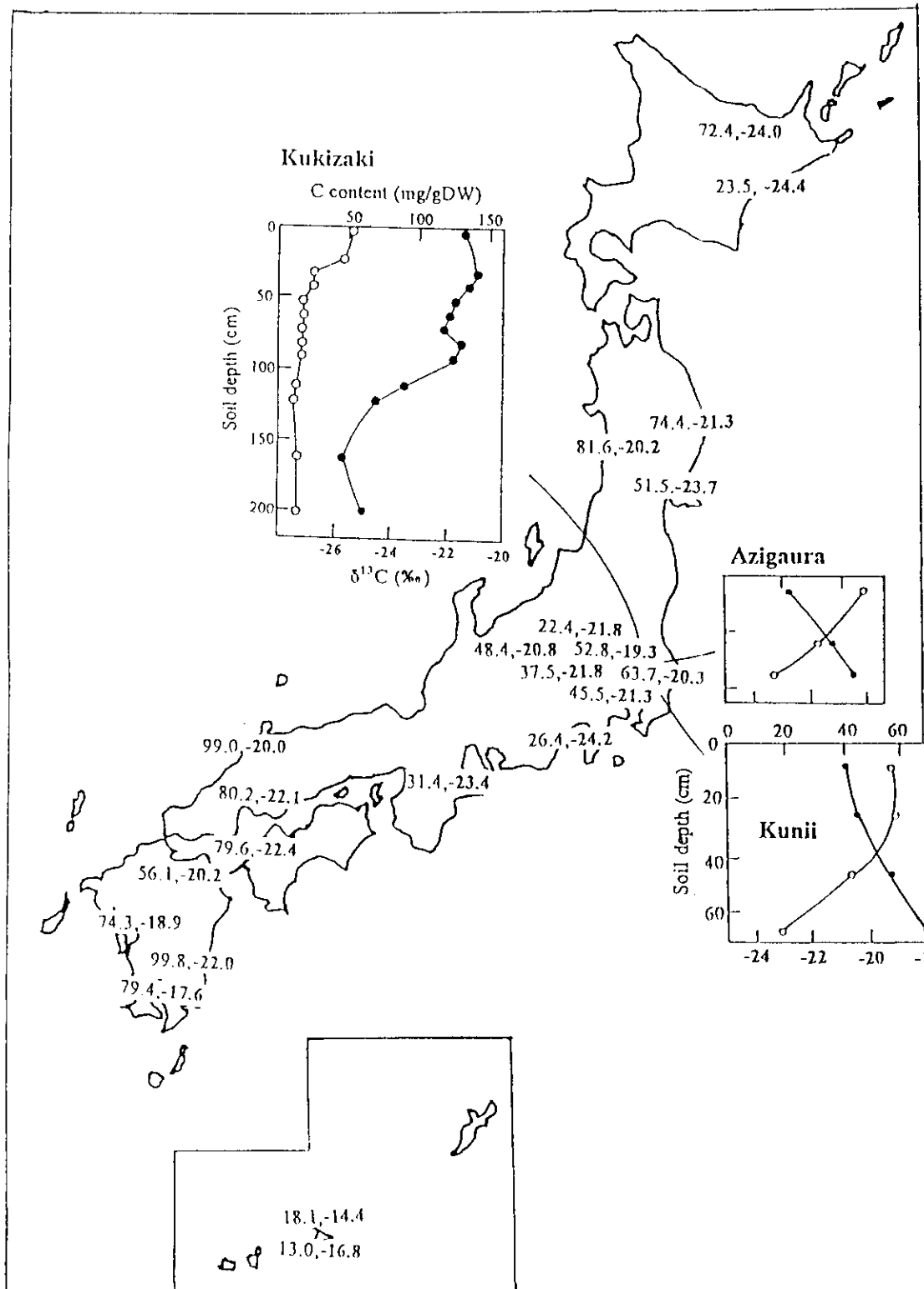


図 2 日本各地の耕地土壌の炭素含有率 (Cmg/g乾重) (左の数字、○) と $\delta^{13}\text{C}$ 値 (‰) (右の数字、●)。阿字が浦、国井、荃崎の土層別の値も枠内に示した。

によってさらに 30 ~ 40, 40 ~ 50, 50 ~ 60cm) に土壌を採取した。また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。このようにして得た土壌は、乾燥後微粉碎し、分析に用いた。

土壌炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 分析法として、従来用いられていた封管中で試料の燃焼によるガス化、炭酸ガスの精製、そして質量分析計による $\delta^{13}\text{C}$ の分析という手法に代り、植物試料の $\delta^{13}\text{C}$ の分析に用いたオンライン ANCA-SL 質量分析計による土壌炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 分析法を用いた。

(2) 土壌炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 分析法

オンライン ANCA-SL 質量分析計は図 1 に示すように、オートサンプラーに土壌試料 (150 ~ 1000 μg の C 量を含む) をスズのカプセルに入れてセットし、ヘリウムガス気流中で燃焼し、ガスクロマトグラフィーによる CO_2 と N_2 の分離、質量分析計による質量 44 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$), 45 ($^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$), 46 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$) の計測からが計測される。

日本の土壌 C 含有率は 20 ~ 200 $\mu\text{g/g}$ 乾重なので、スズカプセルには 4 ~ 20mg 採取した。フィリピン、タイ土壌は多くが 2 ~ 30 $\mu\text{gC/g}$ 乾重なので 20 ~ 60mg をスズカプセルに計量した。

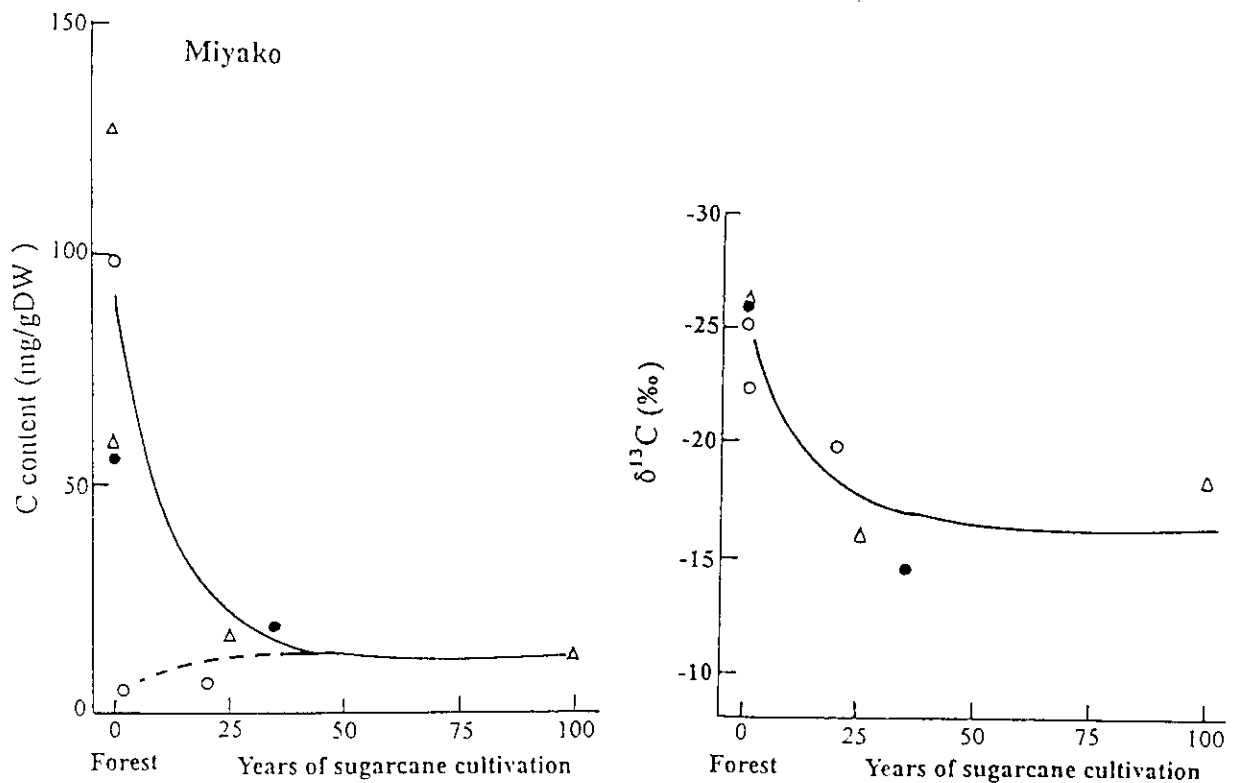


図 3 宮古の森林土壌と栽培年数の違うサトウキビ畑土壌の有機炭素含有率 (C content, mg/gDW) と $\delta^{13}\text{C}$ 値 (‰)
○: 黄色土、●: 灰色低地土、△: 暗赤色土

試料がアルカリ性の土壌では炭酸塩が含まれており、これについては0.5M 塩酸で処理して有機炭素のみとし、分析した。このように土壌有機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ の分析が可能となり、分析に要する時間は一点約6分となった。

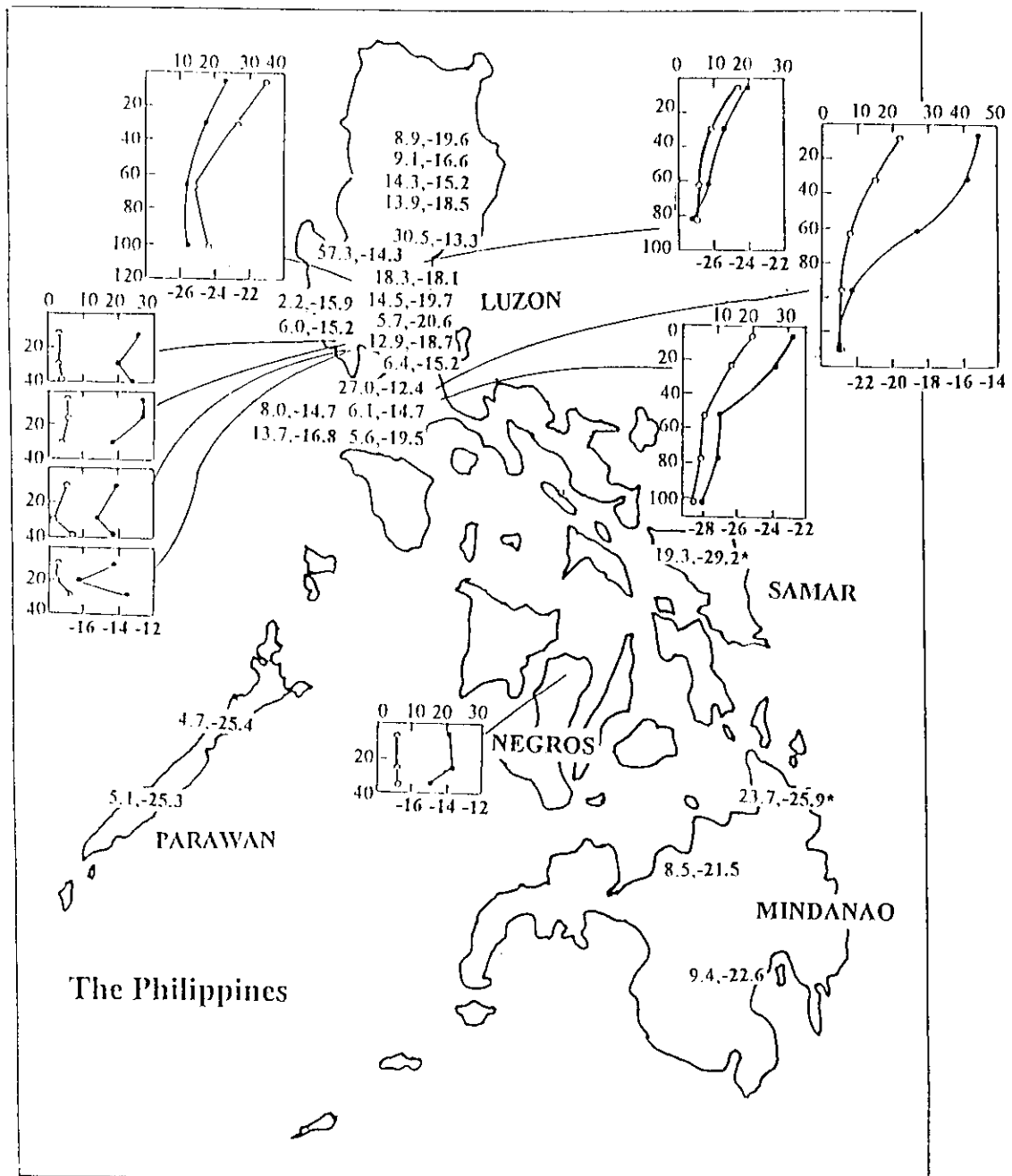


図 4 フィリピン各地の耕地土壌の炭素含有率 (Cmg/g乾重) (左の数字、○) と $\delta^{13}\text{C}$ 値 (‰) (右の数字、●)

4. 結果・考察

1) 日本の土壌試料の分析結果から、図2に日本の畑地の炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値を示した。北海道(-24%)を除き、多くの地点で-22%~-18%であり、 C_4 植物の寄与が推定された。検討の結果、過去ススキに代表される C_4 植物のイネ科やカヤツリグサ科の炭素が添加され残留しているものと考えた。

茨城県のサツマイモなど C_3 植物が栽培された阿字ヶ浦と国井で、表層よりも30~60cmには、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が高くなっていたが、より深くまで分析した茎崎では、100cmより下層では C_3 植物の-24%以下になっていた。これらの結果は日本の畑地では、一部 C_4 植物のトウモロコシが栽培されるものの、大部分の作物も C_3 植物でもあるが、土壌の炭素には強く C_4 植物(ススキが主と考えている)の影響が残留している。これはおそらく林地に火山灰がたい積した後、ススキなど C_4 植物が繁茂したと考えられる。日本の温帯のススキではリグニンなど土壌生物で分解

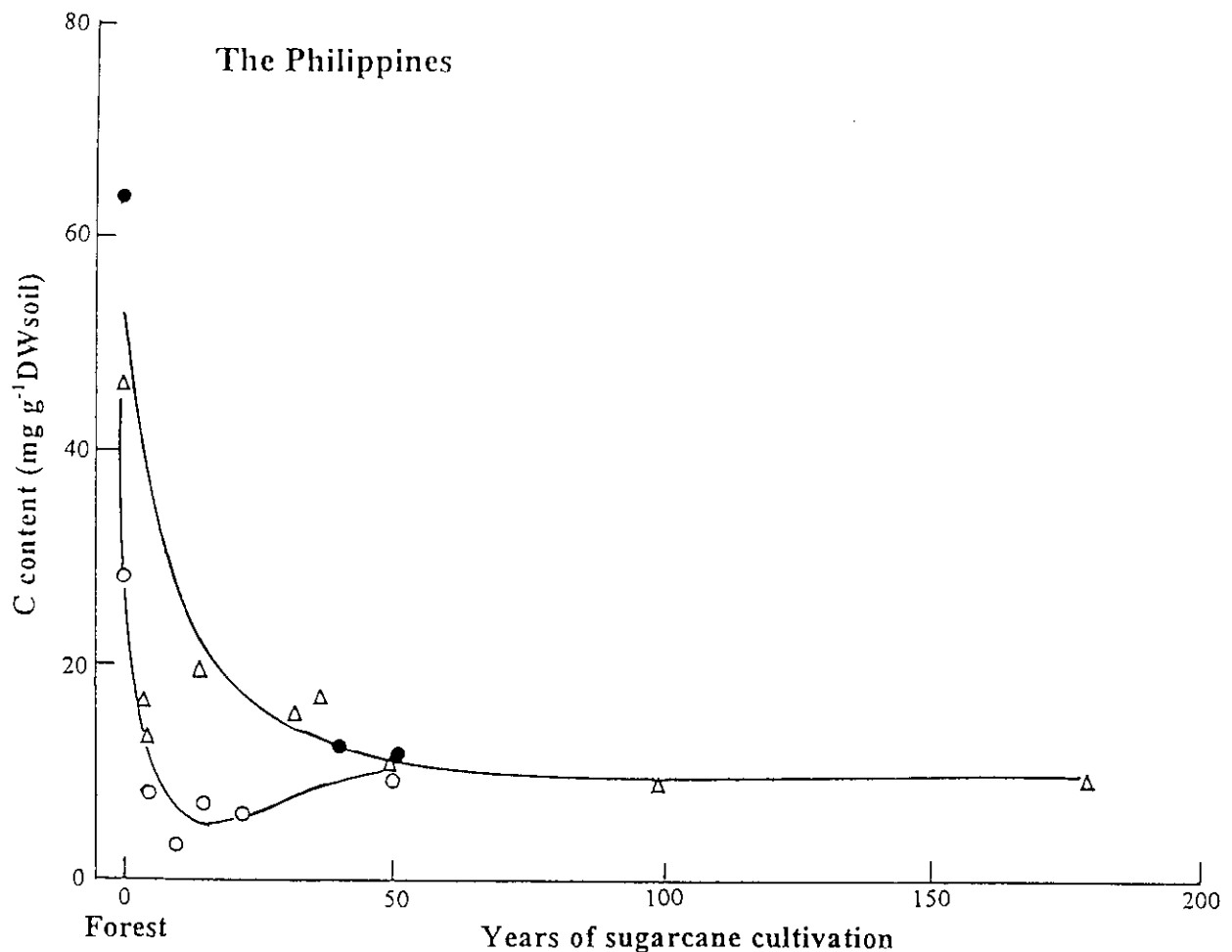


図5 フィリピン土壌の森林土壌と栽培年数の違うサトウキビ畑の有機炭素含有率(C content, mg/gDW).

○: ルソン島中央部、●: ルソン島ナスグ地区、△: ネグロス島

し難い炭素有機物が残留している。この結果、 200mg/g 乾重に達する高い炭素含有率になっていると言えよう。

図3に沖縄県宮古で採取した林地(多くはうたぎ)と栽培年数の違うサトウキビ畑から採取した表層土壌の炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値を示した。林地の炭素含有率は $60\sim 130\text{mg/g}$ 乾重とたえず植生からCが供給されている表上では有機炭素の集積がみられたが、サトウキビ畑にすると $10\sim 20\text{mg/g}$ 乾土と低下する。最近開墾されたサトウキビ畑は機械で畑を整地するために 5mgC/g 乾重の土壌もみられた。 $\delta^{13}\text{C}$ 値は林地では、 -25% 付近の C_3 植物であるが、サトウキビ(C_4 植物、約 -13%)の栽培年数にともなって上昇し、25年位の栽培で -17% 位に平衡化しているとシミュレートされた。

2) 図4にフィリピン各地の土壌の炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値を示した。炭素含有率は日本の $1/10\sim 1/5$ であり、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は表層土で $-25\%\sim -12\%$ であった。

ルソン島とネグロス島で調べた土層別の $\delta^{13}\text{C}$ 値をみると 60cm (作物の根が展開する層)までは、 C_4 植物の影響が強く見られるが、 60cm 以下では、 C_3 植物の $-23\%\sim -27\%$ になっている。このことはフィリピンで耕地化がされる以前は、森林(C_3 植物)土壌が主な炭素供給源であったことを示している。これは日本の黒ボク土壌の林地と対照的で、日本では林地以前にススキなどの C_4 植物の繁茂があった。

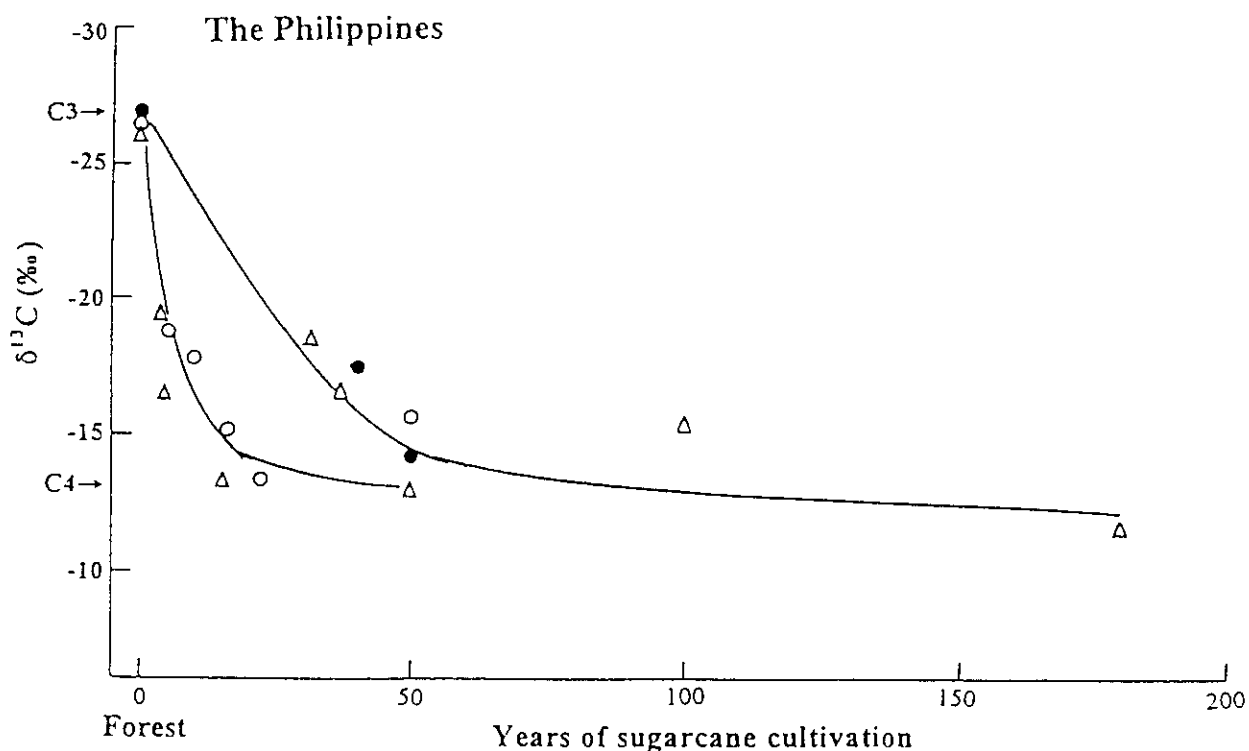


図6 フィリピン土壌の森林土壌と栽培年数の違うサトウキビ畑の $\delta^{13}\text{C}$ 値(‰)
○: ルソン島中央部、●: ルソン島ナスグ地区、△: ネグロス島

図5に森林土と栽培年数の違うサトウキビ畑のC含有率の変化を示した。森地土壌は40～60mgC/g乾重であるが、サトウキビの栽培によって5～20mgC/g乾重と約5分の1に低下した。近年20年位の間にはサトウキビ畑とした地区は以前すでにキャッサバ(C₃植物)を栽培していたり、機械で整地したために炭素含有率の低い地点もみられた。図6にサトウキビ栽培年数と土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値の関係を示した。森林土壌の-26%からサトウキビの栽培によって-13%(=サトウキビの $\delta^{13}\text{C}$ 値)まで変化したが、これに50年位かかるものと10年位のサイトがみられた。

3) タイの土壌の分析は林地とサトウキビ畑について約150点程終了した。図7にタイ東北部の林地と栽培年数の違うサトウキビ畑の表層土壌の炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値を示した。タイ東北部は砂質の土壌で炭素含有率は林地すらも約5mgC/g乾重と低い。サトウキビ畑への転換は最近10年以内が多く、炭素含有率はサトウキビ畑へ転換後約2mg/g乾重までさらに低下する。林地の表層土壌の $\delta^{13}\text{C}$ 値は-27%付近であり、転換後急速に上昇し、8年後には-17%に平衡化する。図8に灰色低地土やクレイ土層のタイ中央部から西部の林地とサトウキビ畑の表層土壌の炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値を示した。林地は25～50mg/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。この地域のサトウキビの栽培年数は東北地域よりも長期

North-East Thailand

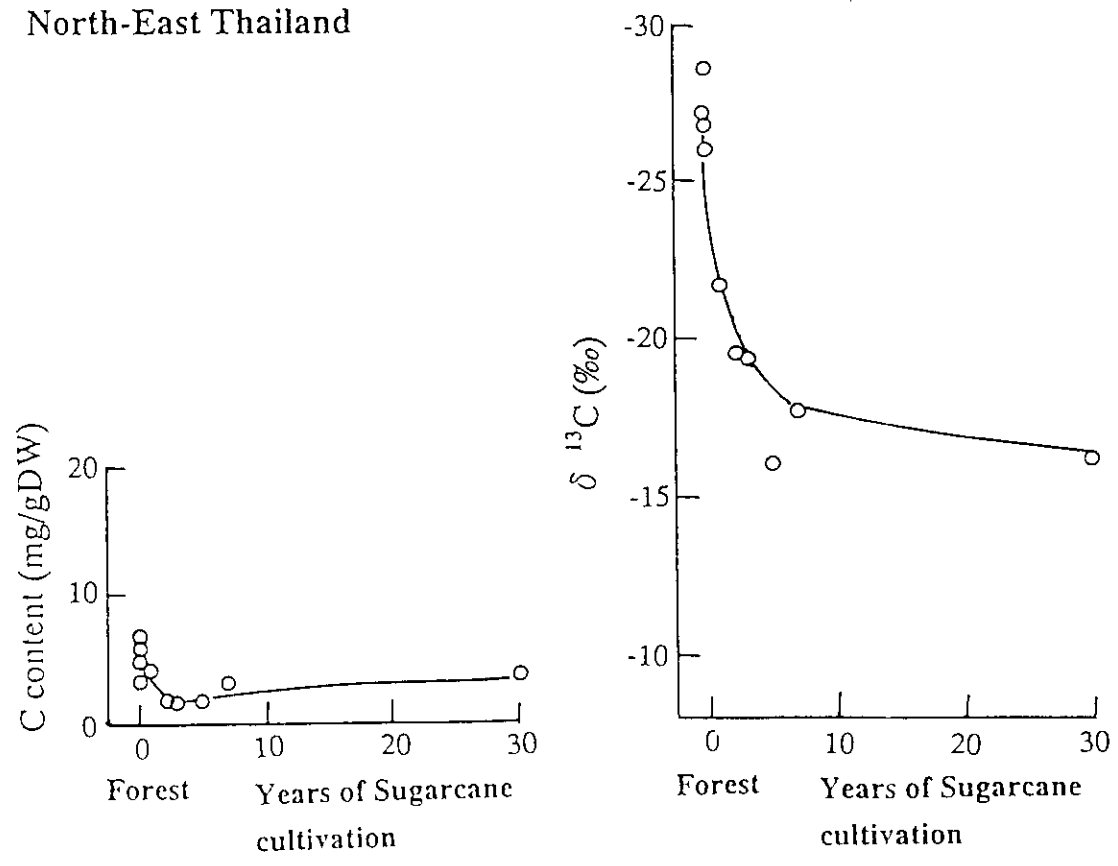


図7 タイ東北地域の森林土壌と栽培年数の違うサトウキビ畑土壌の有機炭素含有率(C content, mg/gDW)と $\delta^{13}\text{C}$ 値(‰)

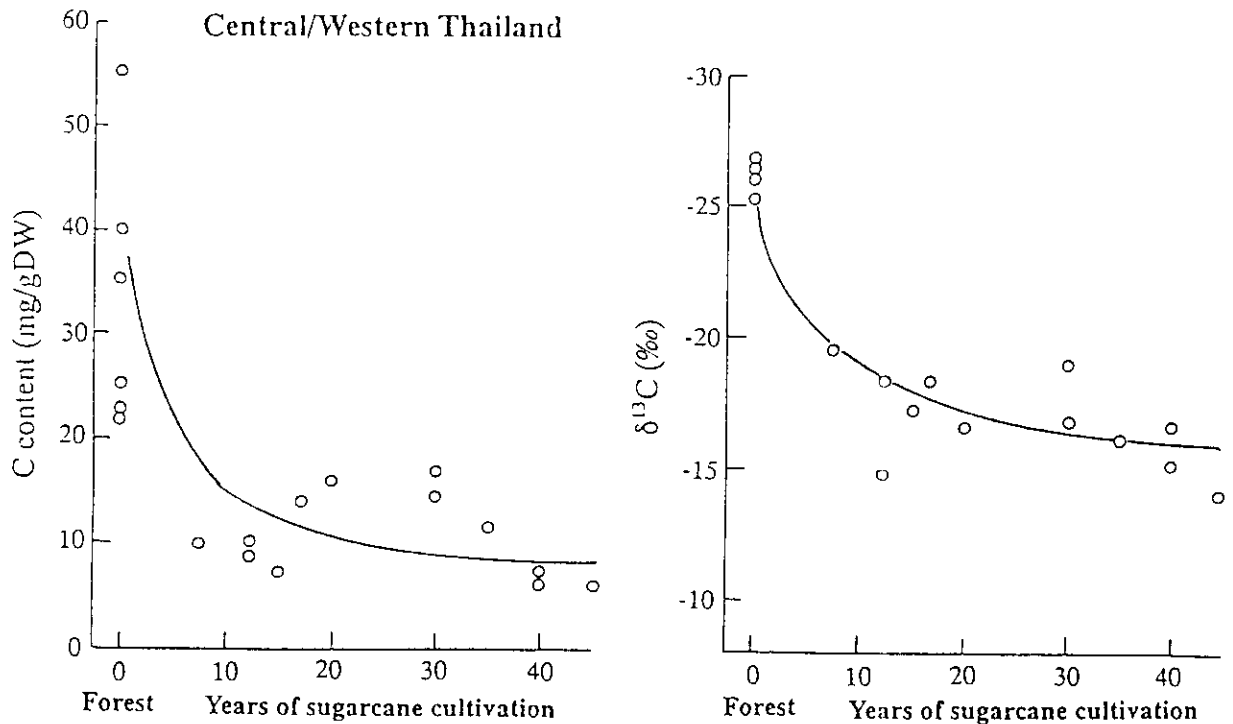


図 8 タイ中央および西地域の森林土壌と栽培年数の違うサトウキビ畑土壌の有機炭素含有率(C content, mg/gDW)と $\delta^{13}\text{C}$ 値(‰)

のものが多い。 $\delta^{13}\text{C}$ 値は林地で-27‰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。

5. 本研究により得られた成果

1996年から1998年までの3年間で日本、フィリピン、タイの土壌試料の採取、土壌の炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値の分析法の確立、日本とフィリピンの主な土壌試料とタイの土壌試料の150点の分析を終了したが、分析すべきタイの土壌は約350点残った。日本をはじめ、アジアの土壌の炭素含有率と $\delta^{13}\text{C}$ 値の系統的で多数の分析は本研究が初めてであり、植生と土壌の関係、土壌炭素の交替など新しい情報が蓄積された。過去3年間に採取した日本、フィリピン、タイの土壌試料を、主な分析対象として、土壌有機炭素が蓄積・分解する過程を、 $\delta^{13}\text{C}$ の変化から追跡し土壌炭素の動態を評価する。これらのオリジナルな情報をベースにアジア地域さらにはグローバルな炭素循環の中で、土壌有機炭素の蓄積・分解過程を推定する。

6. 参考文献

- 1) Balesdent, J., Wagner, G.H. & Mariotti, A. (1988) Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:118-124.
- 2) Mariotti, A. & Peterschmitt, E. (1994) Forest savanna ecotone dynamics in India as revealed by carbon isotope ratios of soil organic matter. *Oecologia*, 97:475-480.

3) Neill, C., Fry, B., Melillo, J. M., Steudler, P.A., Moraes, J. F. L. & Cerri, C.C. (1996) Forest-and pasture-derived carbon contributions to carbon stocks and microbial respiration of tropical pasture soils. *Oecologia*, 107:113-119.

4) 米山忠克(1996) 土壤有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値から植生の変化を読む、*RADIOISOTOPES* 45, 659-660

[国際共同研究等の状況]

本研究で、フィリピン土壤研究開発センター (Soils Research and Development Center), タイ農業局土壤部と土壤の炭素同位体比分析について協力して研究を進めた。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

① 米山忠克・大田守也・中西康博・E. V. Dacanay・O. Castelo : 沖縄, フィリピン, タイのサトウキビ圃場とその周辺土壤炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値, 日本土壤肥料学会講演要旨 44,217(1997)

(2) 論文発表

① 米山忠克 : 土壤有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値から植生の変化を読む, *RADIOISOTOPES* 45,659-660 (1996)