

氏名(本籍) しら と やす ひと
 白 戸 康 人

学位の種類 博 士 (農 学)

学位記番号 農 第 6 9 8 号

学位授与年月日 平 成 17 年 9 月 8 日

学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当

学位論文題目 農耕地における土壌有機物動態のモデリング

論文審査委員 (主 査) 教 授 南 條 正 巳
 (副 査) 教 授 國 分 牧 衛
 教 授 三 枝 正 彦

論文内容要旨

第1章 緒論

土壌有機物(Soil Organic Matter: SOM)は多様な機能を発揮して土壌の質(物理性・化学性・生物性)に大きな影響を及ぼす土壌の基本的な構成物質である。よって、適正な有機物管理のためにその変動を予測することは農業的な意義が大きく、古くからの研究課題である。一方、近年、地球規模での炭素循環における土壌有機炭素(Soil organic carbon: SOC)の重要性が注目されてきている。土壌有機物の中には大気CO₂の約2倍、陸上の植物バイオマスの約3倍に相当する多量の炭素がSOCとして存在するため、そのわずかな増減が地球規模の炭素循環に大きく影響すると考えられている。このように、圃場レベルにおける土壌の適正な有機物管理だけでなく、国レベルのCO₂の排出、吸収量の把握のためにも、気候変動や人為的活動の変化による将来のSOCの変動を定量的に予測することの必要性が高まっている。

SOCの変動は一般にゆっくり起こるため、実測により変動を検出するには長期の観測が必要である。世界中で多数の長期連用試験が行われているが、想定される全ての気候、土壌、農法等の条件下で長期連用試験を行うのは少なくとも現時点では不可能である。そのため、気候や農法が変化した場合の近い将来における土壌炭素の変動を予測するには、有機物の集積・分解過程に関わる主要な因子を数式として取り入れたSOM動態モデルの活用が必須である。土壌有機物の集積・分解を規定するさまざまな因子についての研究の蓄積を基礎として、世界では多数のモデルが提案されている。しかし、ほとんどが欧米で開発されたモデルであるため、その適用例は欧米における温帯の畑土壌に偏っており、熱帯や、日本を含むアジアにおいて重要である水田や火山

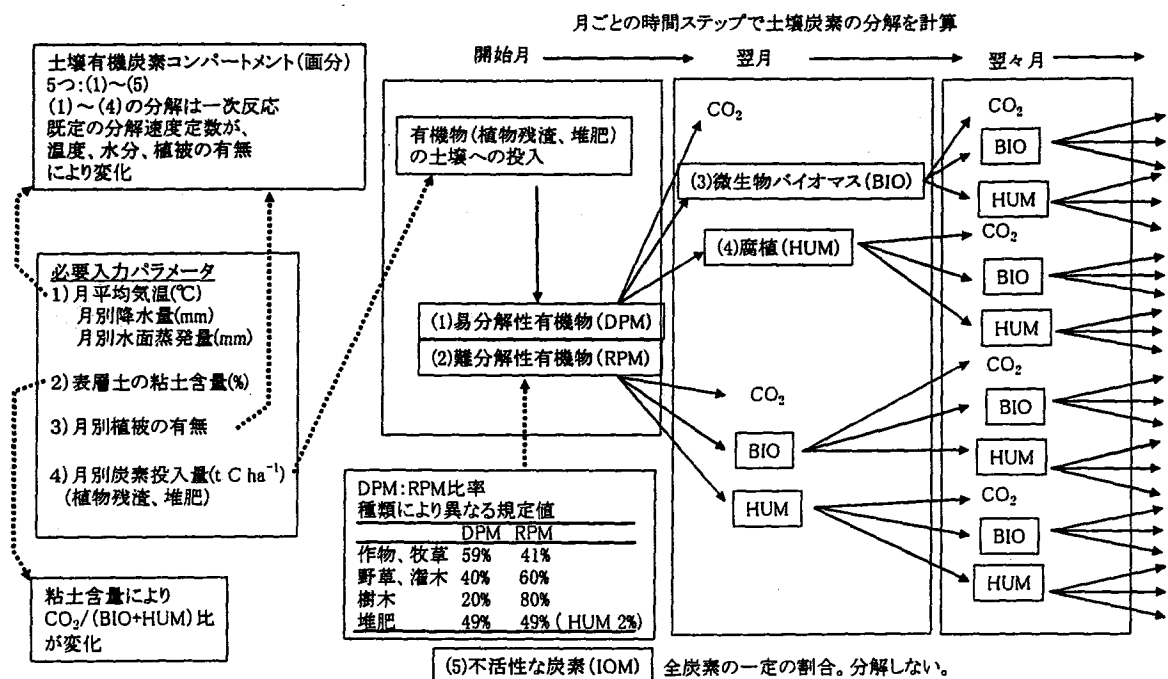


図1. ローザムステッド・カーボン・モデル(RothC)の構造、入力パラメータなどの概要

灰土壌で十分に妥当性が検証されているモデルはない。

そこで本研究では、既存の主要なモデルのなかでも簡便で信頼性が高い、英国で開発されたローザムステッド・カーボン・モデル(RothC)を中心に、日本やタイにおけるモデルの妥当性の検証と改良を行った。

第2章 日本およびタイの畑土壌におけるモデルの検証と改良

第1節 日本の非黒ボク土畑における RothC の検証

日本の非黒ボク土畑土壌における長期連用試験6地点(秋田・熊谷:褐色低地土;安城・出雲:黄色土;長沼:灰色低地土;宇佐:褐色森林土)のデータを用いて RothC の適合精度を検証した。6地点の全ての処理区において、SOC の経年変化のモデル予測値は実測値と精度良く一致した(図1)。検証に用いた6地点は日本全国の南北に広く分布しており、年平均気温は 7.0~15.5℃、年降水量は 1215~1873mm、土壌の粘土含量も 11.8~27.7%と広範な

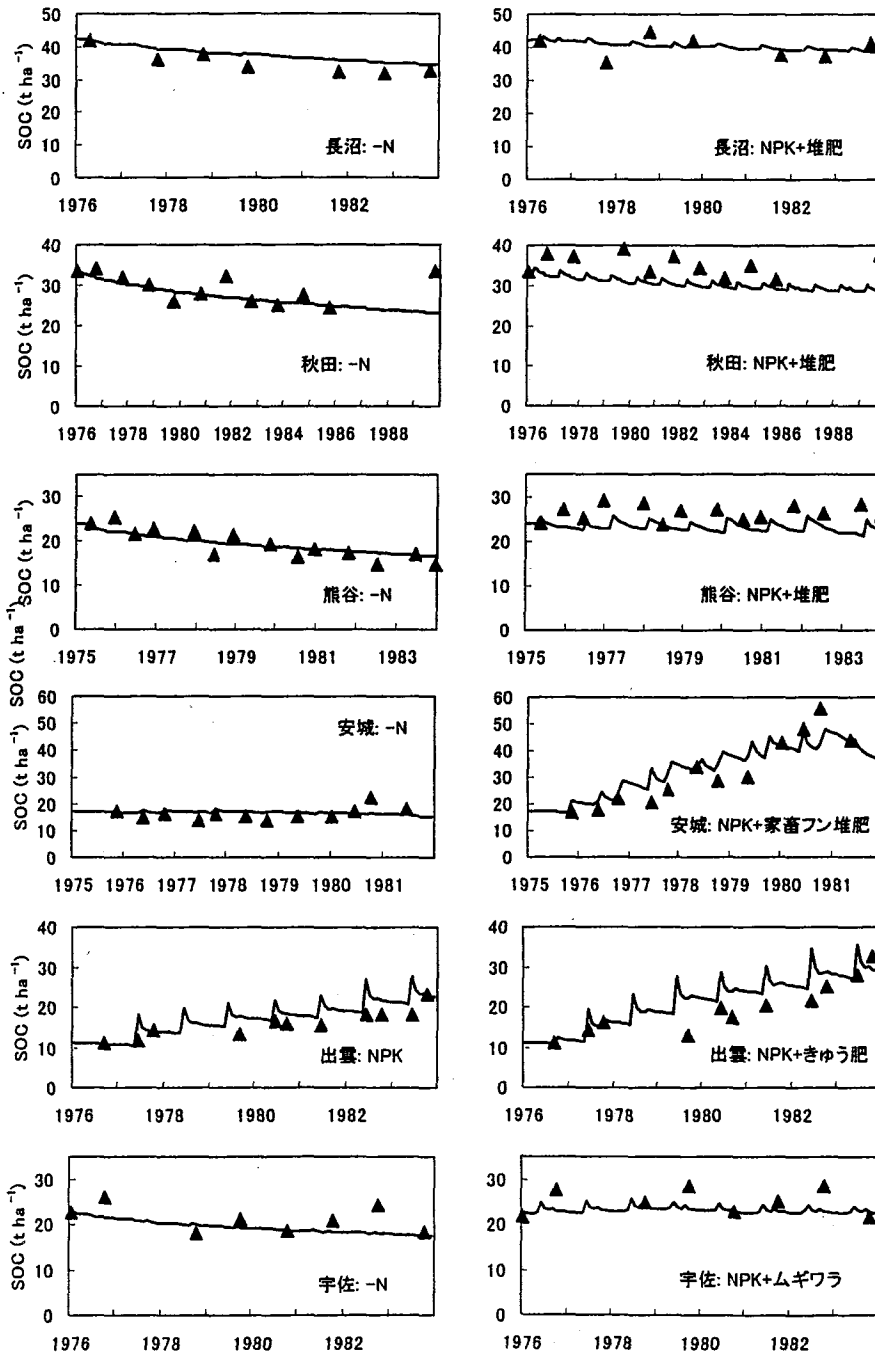


図2. 日本の非黒ボク土畑の6ヶ所の連用試験地におけるSOCの実測値(▲)とモデル計算値(—)の経年変化。

値を含んでいる。さらに、各試験地は異なる作物によるさまざまなC投入量、堆肥やワラなど有機物資材の施用の有無など多様な管理条件を含んでおり、C投入が多くSOCが増加傾向にある処理区、逆にSOCが減少傾向にある処理区、SOCがほとんど増加も減少もせず維持されている処理区など、さまざまなSOCの経年変化のパターンを含んでいることから、RothCは日本の非黒ボク土畑においてSOCの経年変化を精度良く予測できると結論した。

第2節 日本の黒ボク土畑におけるRothCの検証

日本の黒ボク土畑におけるさまざまな気象・土壌・管理条件下の長期連用試験4地点(北見・藤坂・塩尻・大隅)のデータを用いてRothCの適合精度を検証した。4地点の全ての処理区において、SOCの経年変化のモデル計算値は実測値を大きく下回り、黒ボク土ではモデルが想定するよりも有機物の分解が遅いことを意味する結果となった。これは、RothCで採用されている土壌パラメータが粘土含量だけであるため、他の土壌と比べて腐植が非常に安定であるという黒ボク土の特性がモデルで考慮されていないことが原因と考えられた。

第3節 黒ボク土の特性を反映したRothCの改良

表1. ANDISOL TU DATABASEに含まれる日本の黒ボク土32地点の概要。全ての土壌特性値は、深さ20cmまでの平均値に直して表示。RothCのHUM面分の分解率を変化させるファクター「H(f)」は、IOMをゼロにした現行のRothCの計算値から、次の式により計算した。

$$H(f) = \{ \text{SOC}_{\text{実測値}} - (\text{SOC}_{\text{計算値}} - \text{HUM}_{\text{計算値}}) \} / \text{HUM}_{\text{計算値}}$$

地点名	緯度 N	経度 E	植生	粘土 (%)	現行RothC計算値		SOC 実測値 (t ha ⁻¹)	H(f)	HUM面分 (%)			
					SOC (t ha ⁻¹)	HUM (t ha ⁻¹)			Alp	Alo	Feo	Sio
Abashiri1	43°51'	144°32'	樹木	5.3	27.9	18.5	40	1.7	0.28	0.76	0.39	0.28
Abashiri2	44°00'	144°10'	樹木	18.5	34.7	24.9	118	4.4	0.78	1.13	0.59	0.19
Abashiri3	43°54'	144°14'	樹木	17.0	33.8	24.1	86	3.2	0.58	0.78	0.58	0.09
Chasikotsu	43°36'	145°07'	樹木	11.2	34.3	23.8	86	3.2	0.74	0.95	0.71	0.12
Erimo	42°01'	143°09'	牧草	46.0	62.3	52.1	235	4.3	1.11	1.26	0.99	0.04
・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
Tanabu88	41°20'	141°05'	樹木	35.1	34.6	25.6	65	2.2	0.51	0.53	2.39	0.02
Tsutanuma	40°35'	140°58'	樹木	15.8	28.9	20.5	108	4.9	1.06	1.50	0.61	0.31
Wakami	39°58'	139°54'	樹木	37.9	25.6	19.0	106	5.2	0.73	0.96	1.06	0.03
Yunodai	40°35'	141°01'	ススキ	19.6	54.2	41.5	103	2.2	1.08	1.38	0.70	0.22
Yunodai2	40°37'	140°59'	ススキ	24.8	63.9	49.5	170	3.1	0.84	0.93	0.78	0.05

黒ボク土においては現行モデルの精度が悪いことが明らかになったため、黒ボク土の特性を反映させることで精度が向上するようにRothCの改良を試みた。黒ボク土のSOCが他の土壌に比べて多量であることは明らかであるが、その主な原因は、母材である火

山灰の風化の過程で生成される活性のアルミニウム (Al) や鉄 (Fe) が腐植と結合して安定な複合体を形成するためと考えられている。そこで、RothC で定義されているコンパートメントのうち腐植に相当する HUM 画分の分解率を変えることによりモデルを改良することとし、さらに、HUM の分解率を全ての黒ボク土において一律に変えるのではなく、活性の Al や Fe の量をモデルの入力パラメータに取り入れ、それらの土壌中の含有量に応じて分解率を調整することとした。また、新鮮な火山灰から黒ボク土の生成が開始される時点では SOC はゼロに近いことから、現行モデルにおいて土壌生成過程のはじめから常に一定量存在していると定義されている IOM について、黒ボク土ではゼロに設定することとした。

黒ボク土の理化学性データベース (Andisol TU Database) から抽出した日本全国の

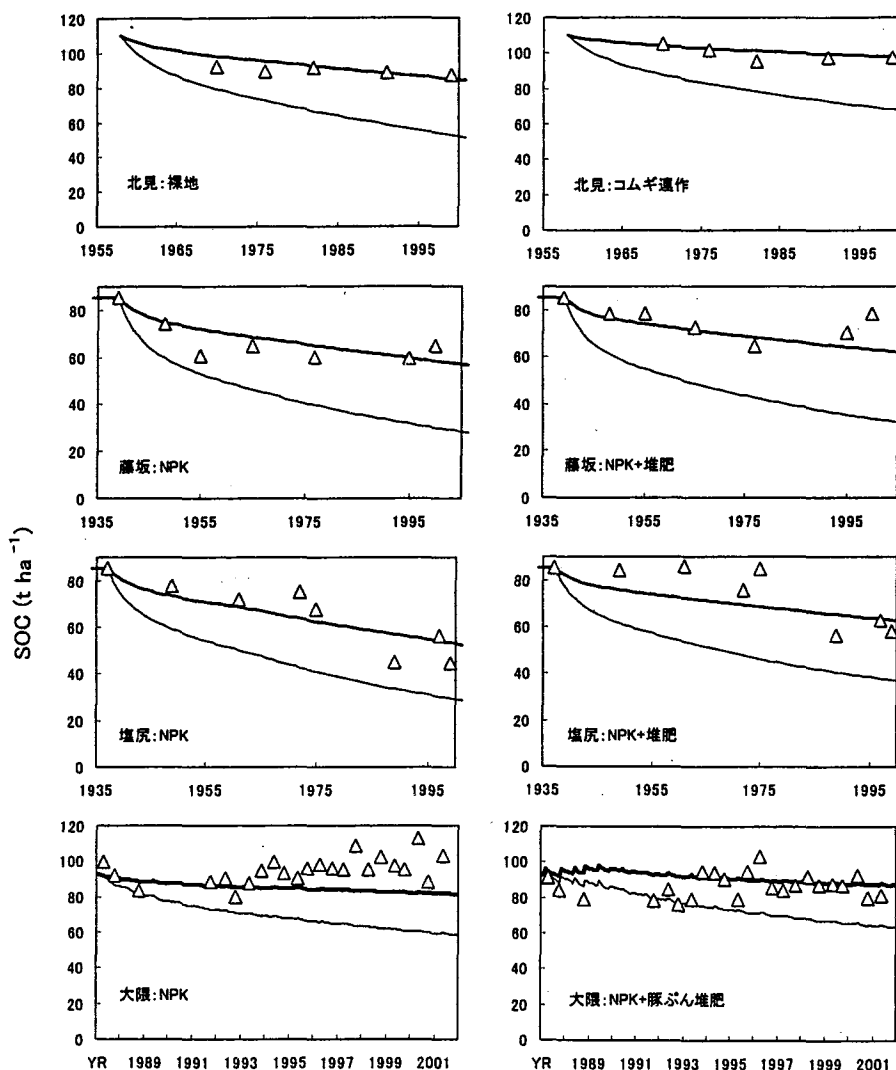


図3. 日本の黒ボク土畑の4ヶ所の連用試験地におけるSOCの実測値(△)とRothCによるモデル計算値(細線:現行モデル、太線:改良モデル)の経年変化。

林地および草地の32地点のデータを用い、各地点において、「SOCのモデル予測値が実測値と一致するためにはHUM画分の分解率を何分の一にすれば良いか」を表す係数 $H(f)$ を定義した(表1)。その上で、各地点の $H(f)$ と、活性の Al・Fe 含量の指標である酸性シユウ酸塩可溶 Al、Fe との回帰分析を行った結果、

$H(f)$ と最も相関が高いのはピロリン酸塩可溶 Al 含量 (Al_p) で、 $H(f) = 1.20 + 2.50 \times Al_p(\%)$ の式が得られた。この式を用いて HUM 画分の分解率を変化させた改良モデルを、第2節と同じ4ヶ所の黒ボク土畑における長期連用試験地のデータを使って検証した結果、

改良モデルでは SOC 計算値と予測値の適合精度が現行の RothC モデルよりも大きく向上した(図3)ため、この改良モデルは日本の黒ボク土におけるSOCの経年変化予測に有効であると結論した。

第4節 タイの熱帯畑土壌における RothC の検証

RothC の熱帯における長期間の検証例が少ないため、タイの3ヶ所の長期連用畑のデータを用いてモデルの精度を検証した。有機質資材を投入していないウモロコシとキャッサバの連用畑においては、熱帯における過去の検証例の3~5年よりも非常に長い期間(27~28年)において、RothC による SOC の経年変化の計算値が実測値と精度良く一致することが明らかになった(図4:上半分)。しかし、キャッサバの茎葉やイナワラなどの有機物を多量に施用したいくつかの試験区においては、モデル予測値が実測

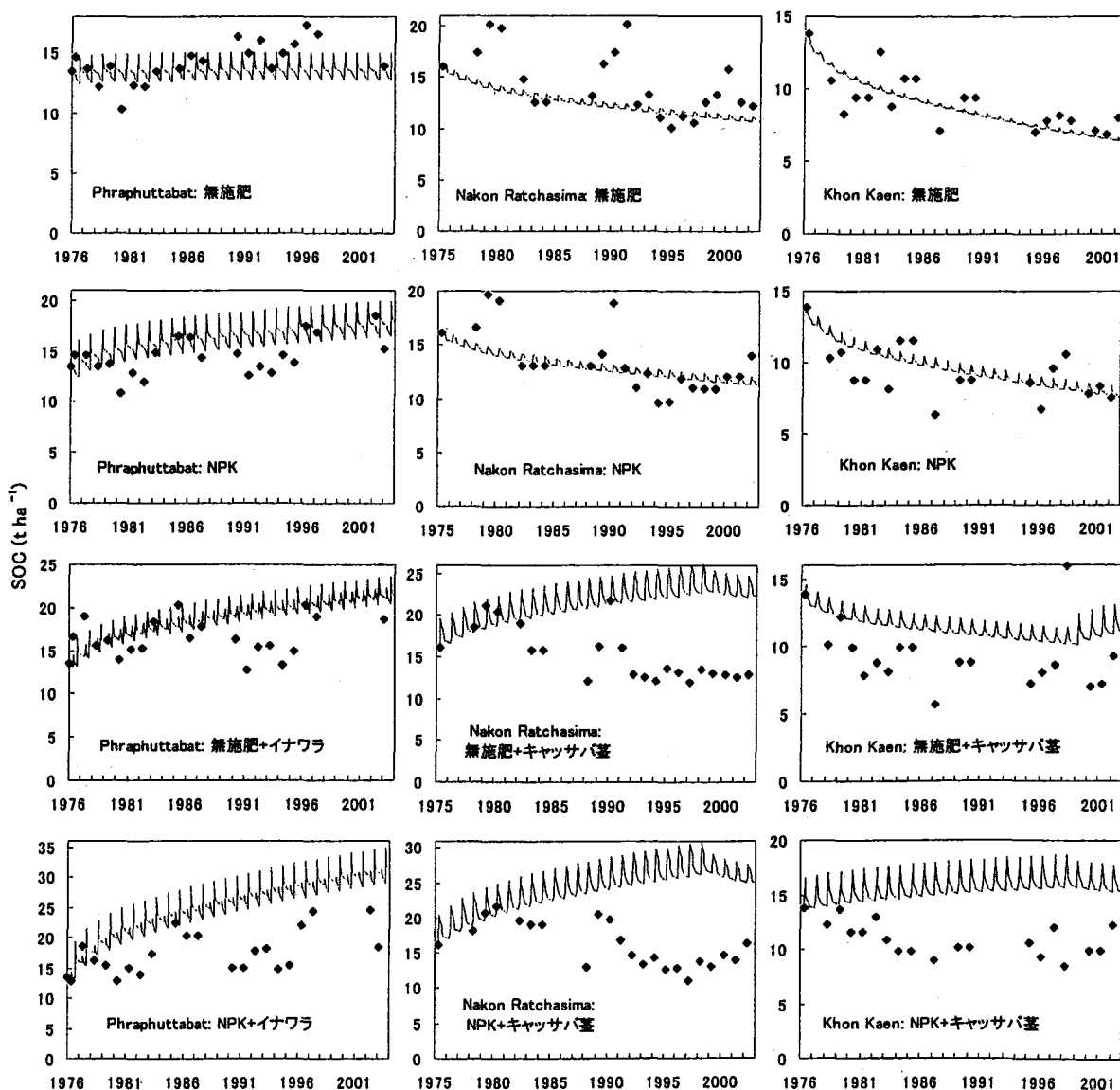


図4. タイの3ヶ所の連用試験地におけるSOC経年変化の実測値(点)とモデル計算値(線)の比較。
値を上回った(図4:下半分)。これは、モデルが想定するよりも有機物の分解が早いこ

とを意味するが、この過大評価は、モデルの入力パラメータである作物残渣の量やその質の推定の誤差では説明できなかった。土壌の有機物動態に影響を与える因子のうち温帯と熱帯で大きく異なると考えられるさまざまな因子を検討した結果、シロアリなど土壌動物の活性の違いが、有機物を多量施用した区でRothCの計算結果の精度が悪かった主な原因と考えられた。このような場合には RothC の適用に注意が必要であり、土壌動物の活性の違いをモデルに取り込むことの必要性が示された。

第3章 日本の水田土壌におけるモデルの検証と改良

第1節 DNDC(De-Nitrification and De-Composition)モデルの検証

DNDCモデルは、既存の主要なSOM動態モデルの中で唯一、水田にも適用可能なモデルであるが、短期間の温室効果ガス発生量に重点をおいて開発・検証されてきたため、長期間のSOC経年変化に対する検証例はない。そこで、日本の水田における5ヶ所の長期連用試験データを用いてSOC経年変化の予測精度を検証した。現行のDNDCではモデル中の作物生長サブモデルが作物の生長を適切にシミュレートできず、

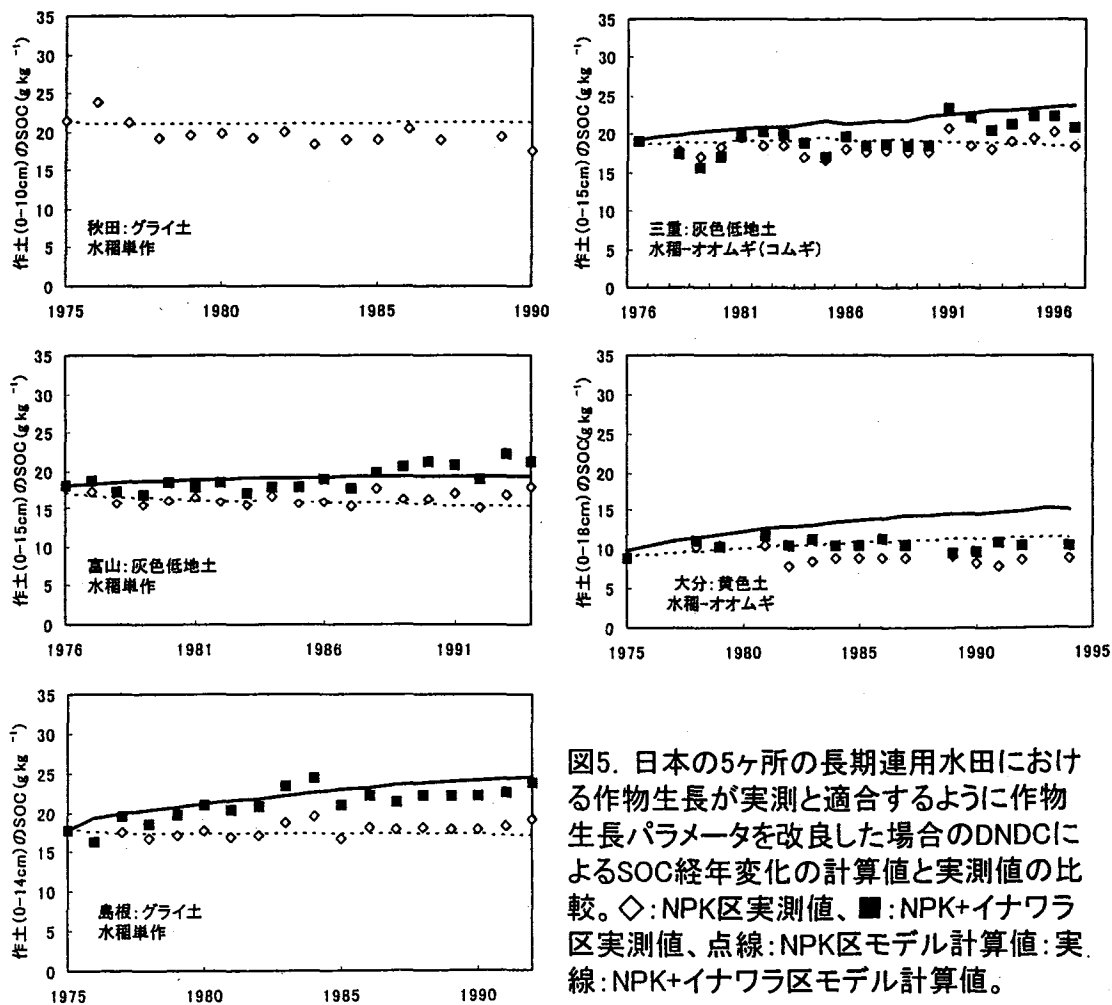
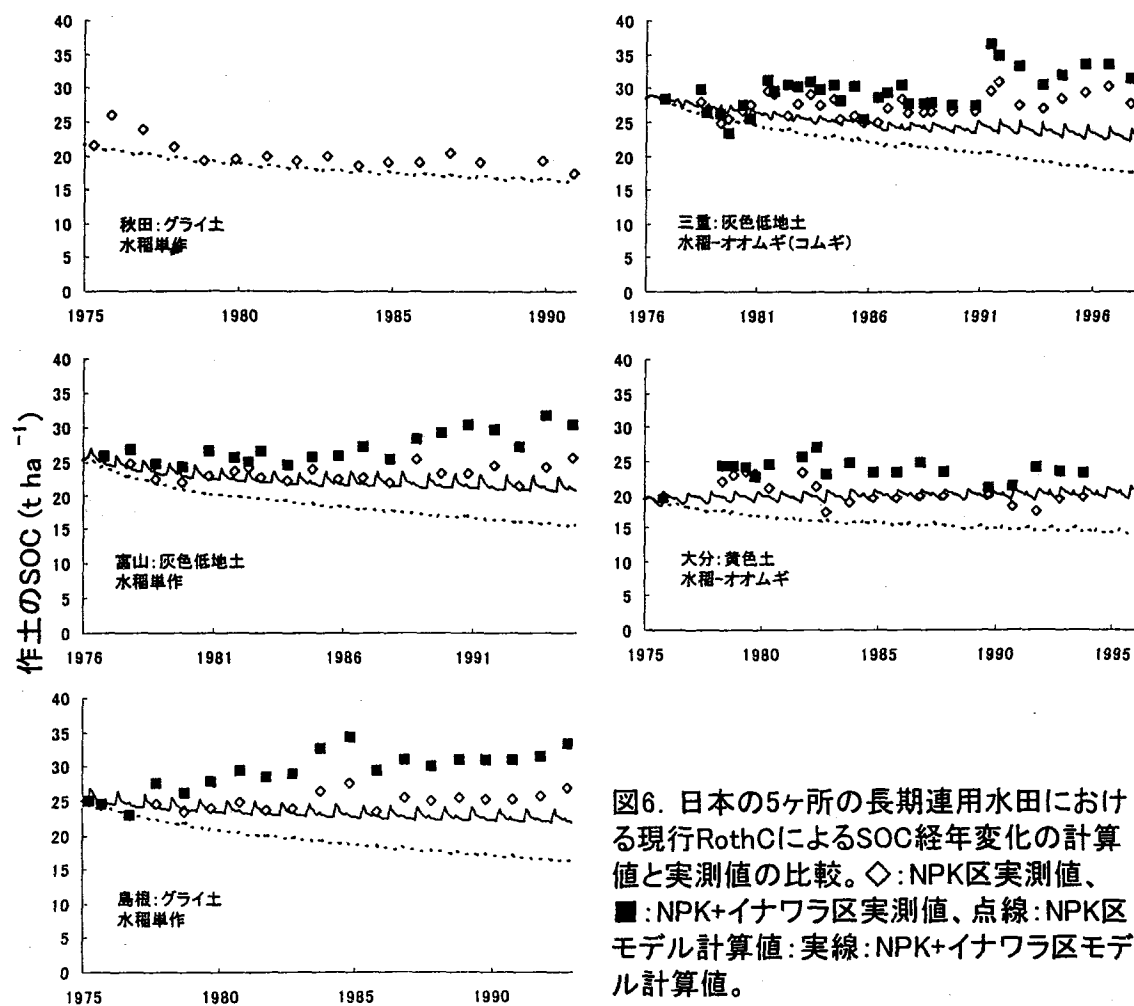


図5. 日本の5ヶ所の長期連用水田における作物生長が実測と適合するように作物生長パラメータを改良した場合のDNDCによるSOC経年変化の計算値と実測値の比較。◇: NPK区実測値、■: NPK+イナワラ区実測値、点線: NPK区モデル計算値、実線: NPK+イナワラ区モデル計算値。

土壌にすき込まれる作物残渣量が実際と大きく異なり、従ってモデルの土壌有機物動態の予測精度を検証できなかった。そこで、デフォルト値として定められている作物生長のパラメータを作物生長が実測に適合するように調整したうえで、SOCの経年変化に対するモデルの予測精度を検証した。その結果、5ヶ所の連用試験地(秋田県と島根県のグライ土、富山県と三重県の灰色低地土、大分県の黄色土)の9処理区において、16~22年間のSOC変化のモデルによる計算値は実測値とほぼ精度良く一致した(図5)。このことから、DNDCの有機物分解サブモデルが水田における長期間のSOC経年変化をほぼ精度良く予測できることが明らかになった。しかし、いくつかの処理区、特にSOC含量が低い場合において、モデルと実測が適合しない場合もあったため、低SOCの土壌においてはモデルの適用に注意が必要なが示された(図5:大分の例)。また、精度の良い予測のためには作物生長パラメータの調整が必要であること、モデルに必要とされる営農管理に関する詳細なパラメータが、特に長期間の場合には入手困難な場合があるなどの問題点が明らかになった。

第2節 RothCの検証

水田におけるDNDCの精度が検証されたが、問題点も明らかになったため、より簡便



なモデルである RothC が水田にも適用できれば有用である。そこで、本来は湛水条件にならない畑状態の土壌を対象としたモデルである RothC を、第1節と同じ5ヶ所の長期連用水田のデータを用いて検証した。現行の RothC による SOC の計算値は、5ヶ所の連用水田土壌の9処理区全てにおいて実測値を下回った(図6)。これは、水田では畑に比べて有機物分解が遅いという当然予想された結果であった。原因は、主に稲作期間中に土壌が湛水され嫌氣的になるために有機物の分解が遅くなるためと考えられたが、一方で、畑土壌と水田土壌における土壌微生物組成の一般的な違いのため、水田では湛水期間に限らず年間を通じて土壌有機物の分解が阻害される可能性も考えられた。

表2. さまざまな分解率調整を行った場合のモデルと実測の適合度をあらわす統計的指標

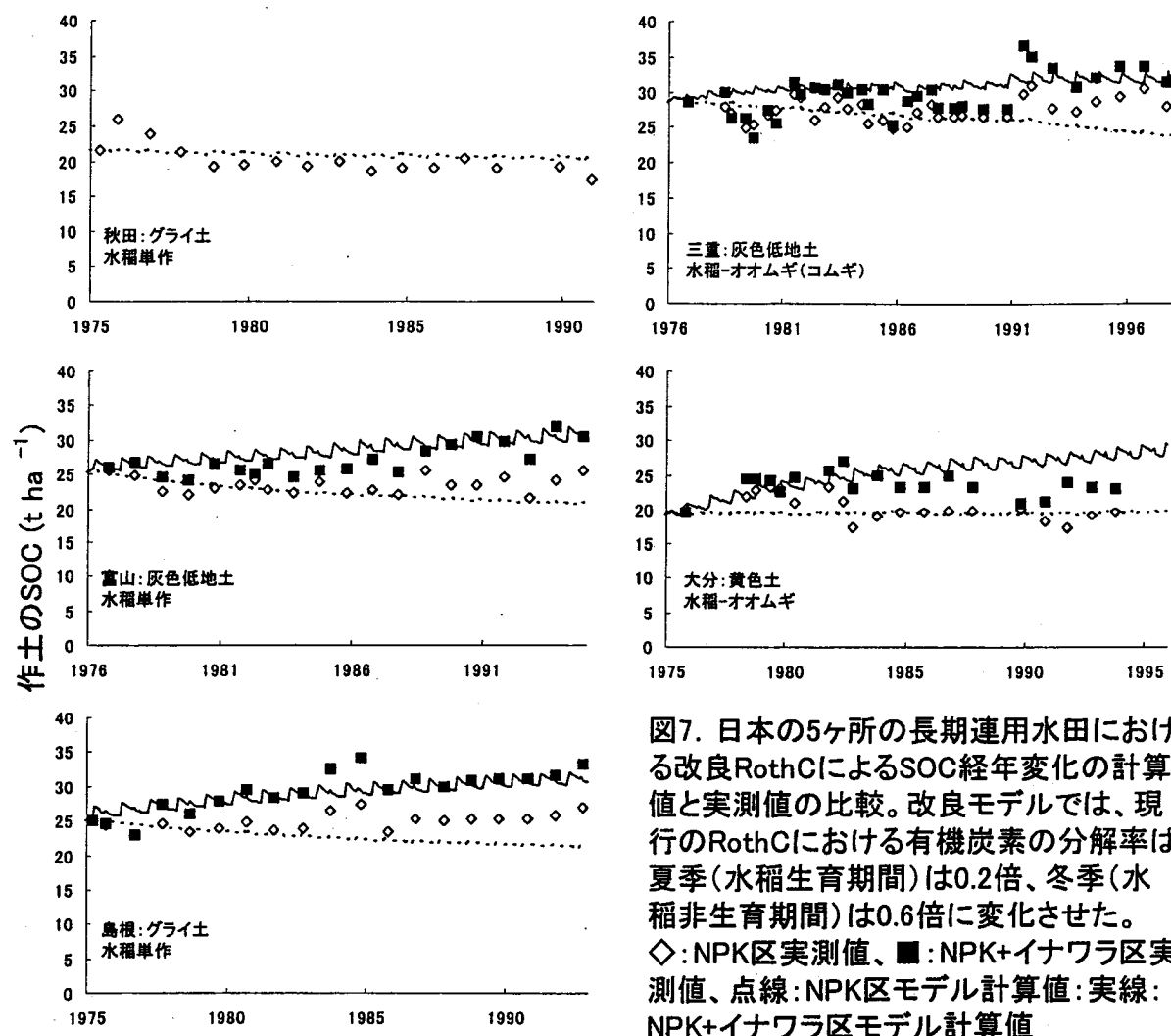
分解率調整係数 ^a		RMSE ^b		Mのt検定で
湛水期間	非湛水	平均値	平均値	有意な偏りが ない処理区数 ^c
1	1	20.83	4.51	0
0.5	0.5	10.58	1.32	4
0.4	0.4	9.37	1.01	5
0.3	0.3	9.89	1.23	5
0.25	0.25	11.21	1.70	3
0	1	9.66	1.03	4
	0.9	9.53	1.01	4
	0.8	9.72	1.15	4
	0.7	10.32	1.30	3
0.1	1	10.22	1.21	4
	0.9	9.70	1.05	5
	0.8	9.41	1.00	5
	0.7	9.42	1.02	5
	0.6	9.82	1.16	4
0.2	1	11.23	1.65	3
	0.8	9.85	1.06	4
	0.7	9.44	1.00	5
	0.6	9.31	1.00	5
	0.5	9.84	1.14	4
0.3	1	12.42	2.09	1
	0.6	9.55	1.00	4
	0.5	9.30	1.01	4
	0.4	9.39	1.01	4

a: 1なら現行モデルと同じ分解率。0なら分解しない。0.1なら10%の分解率を意味する。b: 9処理区の平均値。値が小さいほどモデルと実測の適合が良いことを示す。c: 9処理区のうち、モデル計算値が実測に比べて有意な偏りをもたないと判定された処理区数。大きな値ほどモデルと実測の適合が良いことを示す。

第3節. 水田土壌の特性を反映した RothC の改良

畑状態と異なる水田土壌の特性を反映させて RothC を改良するため、湛水状態になる水稻作付け期間と、畑状態になる水稻非作付け期間に分けて、それぞれ別に RothC の分解率を変えたさまざまな組み合わせでモデル計算を行い、実測値とモデル計算値の一致程度の尺度である RMSE (Root Mean Square Error) とモデル計算値のバイアスの程度の尺度である M (Mean Difference) の二つの統計的指標を用い、5ヶ所の試験地の9個の処理区において実測値とモデル計算値が最も良く適合する分解率の組み合わせを求めた。その結果、湛水期間では現行モデルに対して分解率を 0.2 倍、非湛水期間では 0.6 倍に設定した場合に、モデルと実測が最も良く一致した(表2)。この簡単な分解率調整による改良モデルを長期連用試験データに適用したところ、さまざま

まな気象、土性、土壌管理条件下にある5カ所の日本の水田土壌におけるSOCの経年変化の計算値は、現行 RothC に比べて大幅に精度良く実測値と適合した(図7)ため、少なくとも日本の水田においては、この改良モデルが適用可能であると結論した。



第4章 総括

本研究では、既存の SOM 動態モデルの適用例が欧米の畑土壌に偏っていたという問題点に着目し、今まで十分にモデルの検証が行われていなかったアジアにおける日本やタイにおいて、RothC を中心とした SOM 動態モデルを長期連用試験に適用することで検証し、既存のモデルの適用可能範囲を明らかにするとともに、黒ボク土と水田土壌については RothC の改良モデルを提案した。日本の非黒ボク土畑では現行の RothC が SOC の経年変化を精度良く予測できることが明らかになり、タイの畑土壌のうちイナワラやキャッサバ茎などの有機物を施用しない処理区においても同様であった。これらの検証例では、RothC を現行のまま全くキャリブレーション無しで適用したにもかかわらず高い精度が得られた。

RothC は既存のモデルの中でも単純なものであり、土壌特性に関しては粘土含量だけが採用されている。つまり、同じ粘土含量で同じ気象条件の下では、同じ有機物の添加量が与えられると同じ SOC 蓄積量になることを意味する。複雑にみえる土壌有機物の蓄積・分解過程がこのような単純なモデルであらわされ、広範な地域で共通に使えるというのは、驚くべき結果であるといえる。モデルは多数提案されているが、モデルを適用した予測結果の高い信頼性を得るには、詳細に検証されていることが前提となる。タイの熱帯土壌において多量の有機物が投入された場合には現行の RothC の精度が悪いことが明らかになり、シロアリなど土壌動物の影響をモデルで考慮する必要が示されたが、今後、さらに検証の範囲を広げ、現行モデルが改良なしで適用できる範囲を明らかにすることは有益であると考えられる。

黒ボク土では、現行モデルの精度が不十分なことを明らかにした上で、ピロリン酸塩可溶アルミニウム量を新たな入力パラメータとして取り入れることにより有機物集積のメカニズムを反映するカタチで改良を行い、RothC の精度を大幅に向上させることに成功した。また、水田では同様に現行モデルの精度が悪いことを明らかにした上で、水田では畑に比べて有機物の分解が遅いとの考えに基づき湛水期間と非湛水期間に分けて現行モデルの分解率を調整することでモデルを改良し、満足な精度が得られた。

以上のような検証や改良の結果は、日本やアジアにおける SOC 経年変化の予測をする際の信頼性を向上させることに寄与すると考えられ、温暖化など気候変動、あるいは農法の変化など人為の影響に伴う SOC の将来予測(予測例:図8)などに活用が可能である。また、畑用のモデルと水田用のモデルを併用することにより、例えば、田畑輪換が SOC の変動に及ぼす影響を同一のモデルを使用して評価することが可能になる。

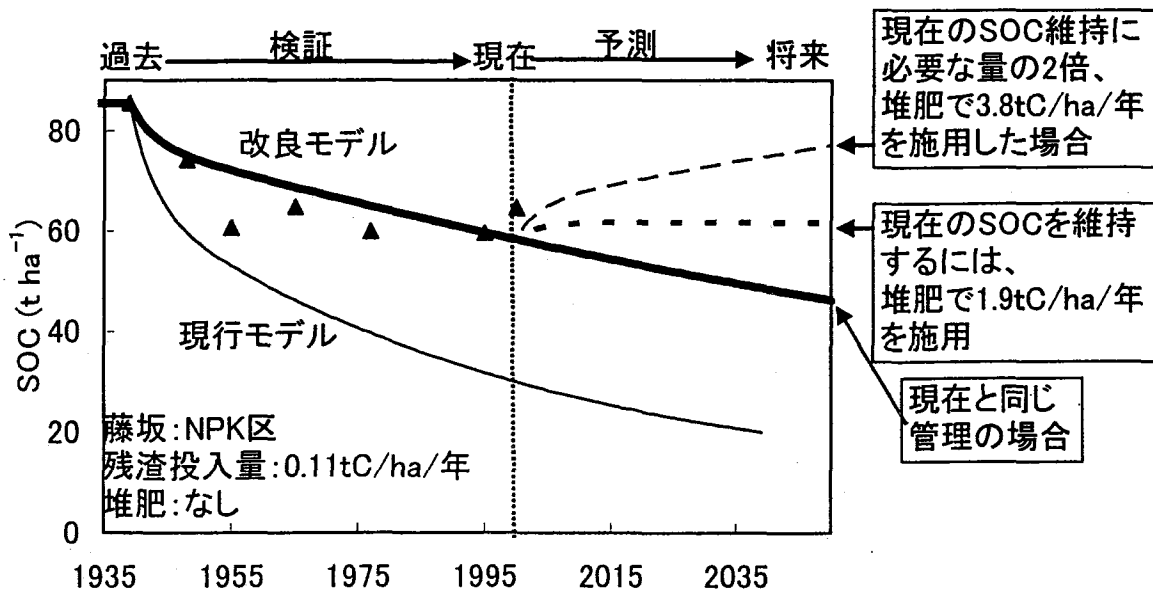


図8. 黒ボク土用改良モデルを用いた青森県藤阪試験地NPK区における管理方法を変えた場合のSOC将来予測の例

論文審査結果要旨

土壌中の有機物は土壌特性を良好に保つ他に大気中の炭酸ガス濃度とも関係が深く、近年の地球温暖化傾向との関係でも注目されている。本論文は日本やタイの農耕地における長期連用試験データを用いて、RothCなどの既存の土壌有機物動態モデルの妥当性を検証し、現行のモデルの適用可能範囲を明らかにするとともに、現行モデルが適用できない黒ボク土と水田土壌向けの改良モデルを提案したものである。

日本の非黒ボク畑土壌における長期連用試験6地点においてRothCの適合精度を検証した結果、土壌有機炭素(SOC)の時間変化のモデル計算値は実測値と精度良く一致した。検証に用いた地点はさまざまな気象・土壌・営農管理条件を含むため、RothCは日本の非黒ボク土畑においてSOCの経年変化を精度良く計算できると結論した。

日本の黒ボク畑土壌4地点において同様の検証を行った結果、SOCの経年変化の計算値は実測値を大きく下回り、他の土壌と比べて腐植が非常に安定であるという黒ボク土の特性がモデルで考慮されていないことが原因と考えられた。

黒ボク土が多量のSOCを蓄積する主な原因は、火山灰から供給される活性のアルミニウムなどが腐植と結合して安定な複合体を形成するためと考えられるため、黒ボク土の理化学性データベース32地点のデータを用い、ピロリン酸塩可溶アルミニウム含量が増加するほど腐植画分(HUM)の分解率を小さくする関係式を導いた。こうしてHUM画分の分解率を変化させた改良モデルでは精度が現行のRothCモデルよりも大きく向上したため、改良モデルは日本の黒ボク土におけるSOCの経年変化予測に有効であると結論した。

より簡便なRothCが水田にも適用できれば有用であるため、本来は畑が対象のRothCを、同じ5ヶ所の連用水田のデータで検証した。現行のRothCによる計算値は、予想通り実測値を下回った。稲作期間中に土壌が湛水され嫌氣的になるために有機物の分解が遅くなる他、畑と水田における土壌微生物組成の違いのため湛水期間に限らず有機物分解が阻害されることも考えられるため、湛水状態になる水稲作付け期間と、畑状態になる水稲非作付け期間に分けて、それぞれ別にRothCの分解率を変えたさまざまな組み合わせで計算を行った。その結果、湛水期間では現行モデルに対して分解率を0.2倍、非湛水期間では0.6倍に設定した場合に、モデルと実測が最も良く一致した。この簡単な分解率調整による改良モデルの精度は現行RothCに比べて大幅に改善したため、少なくとも日本の水田においては、この改良モデルが適用可能であると結論した。

以上のように本研究では世界的に見ればやや特殊な我が国の水田や黒ボク畑土壌における有機物動態のモデル化が行われ、大気中の炭酸ガス濃度や土壌肥沃度を適切に制御するための基礎を与えることが期待される。よって、審査員一同は博士(農学)の学位を授与するに値するものと認定した。