

愛知県の水田における土壌炭素動態モデルの適合性の検証

中村嘉孝¹⁾・日置雅之²⁾・尾賀俊哉³⁾・久野智香子⁴⁾・大橋祥範⁴⁾・安藤 薫⁴⁾・大竹敏也⁴⁾

摘要: 愛知県の水稲を連作した水田または田畑輪換を行った水田における土壌炭素動態モデル (Rothamsted Carbon Model及びそれを水田向けに改良したモデル、それぞれ畑用RothCモデル、水田用RothCモデル)の適合性の検証を行った。有機質資材の種類や施用法が異なる水田において、水田用RothCモデルによる土壌全炭素含量のモデル値は実測値と同様の変化を示し、その二乗平均平方根誤差は小さかった。水稲-小麦-大豆の2年3作体系の田畑輪換を行った水田において、夏作が水稲の場合は水田用RothCモデル、大豆の場合は畑用RothCモデルを用いて求めた土壌全炭素含量のモデル値は実測値と同様な変化を示し、その二乗平均平方根誤差も小さかった。これらのことから、愛知県の水田における土壌炭素動態モデル(水田用RothCモデル、畑用RothCモデル)の適合性は高いことが示唆された。

キーワード: 水田、田畑輪換、Rothamsted Carbon Model、有機質資材

Testing the Suitability of the Soil Carbon Dynamics Model in Paddy Fields in the Aichi Prefecture

NAKAMURA Yoshitaka, HIOKI Masayuki, OGA Toshiya, KUNO Chikako,
OHASHI Yoshinori, ANDO Kaori and OTAKE Toshiya

Abstract: We tested the suitability of the soil carbon dynamics model (Rothamsted Carbon Model and its modified model for paddy fields) in paddy fields or paddy-upland rotation fields in the Aichi Prefecture. In paddy fields with different types and application methods of organic matter, the modeled values of soil total carbon content by the RothC model showed similar changes to the measured values, and their root mean square errors were small. The model values of total soil carbon content calculated by the RothC model for paddy fields (when the summer crop was rice) and upland regions (when the summer crop was soybeans) in paddy fields under a two-year, three-crop rotation system of rice, wheat, and soybeans showed similar changes to the measured values, and the root mean square errors were small. These results suggest that the soil carbon dynamics model can be well fitted by using either the RothC model for paddy fields or the RothC model for upland fields, depending on the summer crops in the Aichi Prefecture.

Key Words: Paddy field, Paddy-upland rotation, Rothamsted carbon model, Organic matter

緒言

土壤有機物は、土壤の化学性、物理性及び生物性に関与するため¹⁾、作物の生産性に大きく影響する。しかし、愛知県における水田の土壤有機物含量の平均値は 17 g kg^{-1} で、全国平均の 28 g kg^{-1} に比べて少ない²⁾。このため、堆肥等の有機質資材の施用は愛知県の水田の作物生産性を高める上で極めて重要な土壤管理である。また、有機質資材の施用により土壤有機物含量を高めることは土壤中に炭素を貯留することにつながり、地球温暖化の要因とされる二酸化炭素の純排出量を減らすことにも寄与する。

有機質資材の施用に伴う土壤有機物含量の変化は、施用する有機質資材の種類、施用量及び施用期間だけでなく、気象条件等によっても変化する。このため、有機質資材の施用効果を明らかにするためには様々な条件で長期間にわたる試験を実施しなければならず、多大な労力を必要とする。水田において、土壤有機物含量の指標となる土壤全炭素含量の変化をモデル化することができれば、様々な条件下における有機質資材の施用効果を推定し、土壤管理に活用することができる。

水田土壤は、水稻栽培期間に湛水されることで土壤有機物の分解が畑土壤よりも遅い。Shirato and Yokozawa³⁾は、英国で畑土壤向けに開発されたRothamsted Carbon Model⁴⁾(以下、畑用RothCモデル)の分解率を低く調整したところ、日本の水田に適用できることを報告している(以下、水田用RothCモデル)。この水田向けに調整された分解率は愛知県以外の長期連用試験の結果から調整したもので、愛知県の水田における適合性は明らかではない。また、既報³⁾では稲わら堆肥や家畜ふん堆肥、もみがらといった有機質資材を施用した場合や、愛知県で普及している直播栽培(不耕起V溝直播栽培⁵⁾)における適合性は未検証である。

これまでの水田は夏作に水稻を連作する栽培体系であったが、米の消費減少に伴う生産調整が進み、水田と畑を交互に管理する田畑輪換が推進されている。田畑輪換では、畑状態の期間の比率が大きいほど土壤の作物生産性の指標となる可給態窒素含量は減少する⁶⁾。そこで、堆肥などの有機質資材の施用が推奨されているが、有機質資材の過剰な施用は水稻の倒伏を招くことが懸念されるため、水稻と畑作物の両方の生産性を向上させる施用技術を確立することが必要である。田畑輪換を行う水田における土壤の炭素動態をモデル化することができれば、個々の水田の田畑輪換歴に応じた最適な土壤全炭素含量とするために必要な有機質資材の施用量を算出することができると考えられる。

Shiratoら⁷⁾は、田畑輪換の土壤におけるRothCモデルの適応性について、夏作が水稻の年は水田用RothCモデルを、夏作が畑作物の年は畑用RothCモデルを併用することで適合性が良いことを報告している。愛知県では転作率が50%近くまで増加し、水稻-麦-大豆の順に2年間に3作を行う田畑輪換が普及している⁵⁾。既報⁷⁾では水稻期間を1~2年とした後の畑期間を1~3年あるいは、水稻期間を3~4年とした後の畑期間を1~2年としており、畑作物は大豆のみであった。愛知県で主流の2年3作体系は既報⁷⁾に比べて水稻期間に対する畑期間の比率が高く、土壤中の有機物の減少も著しいと考えられることから、土壤の作物生産性を維持、向上させるためには有機質資材の施用が特に必要である。そのため、2年3作体系の田畑輪換において土壤炭素動態モデルを活用した適切な有機質資材の施用技術を確立することは、田畑輪換を行う水田における作物の生産性を向上させるうえで重要である。

そこで本研究では、愛知県の田畑輪換も含めた水田における土壤炭素動態モデルを用いた土壤管理技術の確立に向け、水田における畑用RothCモデル及び水田用RothCモデルの適合性を検証することを目的とした。

表1 試験ほ場の概要

試験番号	試験地	土壤 ¹⁾	解析年	粘土含量 (%)	作土深 (cm)	初期 TC ²⁾ (t ha^{-1})	初期炭素投入量 ³⁾ ($\text{t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$)	土壤全炭素含量の目標値 ⁴⁾ (t ha^{-1})
試験1	安城市	黄色土	1955-2018 ⁵⁾	30	9~13 ⁶⁾	11.9~21.3 ⁷⁾	0.63~1.13	14~15*
試験2	日進市	灰色低地土	1977-1982	20	15	18.0	1.06	21*
試験3	日進市	灰色低地土	1984-1996	14	18	21.6	1.27	25*
試験4	長久手市	灰色台地土	1978-1980	26	14	12.7	0.66	21*
試験5	長久手市	灰色台地土	2015-2020	26	13	26.7~33.3	1.38~1.78	15*, 29
試験6	長久手市	灰色台地土	2010-2020	26	10, 13 ⁸⁾	14.0~30.6	0.74~1.61	14*, 27

1) 農耕地土壤分類第3次改訂版¹⁵⁾

2) 試験開始時の土壤全炭素量

3) 水田用 RothC モデル³⁾の繰り返し計算により算出される水田条件として初期土壤全炭素含量を維持するために必要な炭素投入量

4) 印(*)がある場合は、水稻の土壤有機物の基準¹⁶⁾の下限値(20 g kg^{-1})の炭素含有率を58%として炭素に換算

印(*)がない場合は、小麦及び大豆の土壤有機物の基準¹⁶⁾の下限値(30 g kg^{-1})の炭素含有率を58%として炭素に換算

5) 一部の処理区は1966年から解析した

6) 解析開始時点で処理区ごとに作土深に違いが見られたため、各処理区で分けて解析した

7) 解析開始時点で各処理区の土壤全炭素含量の差が大きかったため、各処理区で分けて解析した

8) 水稻栽培のみ行った期間は10 cm、田畑輪換を行った期間は13 cm とした

材料及び方法

1 有機質資材の施用試験データ

検証には、愛知県の安城市(愛知県農業総合試験場水田利用研究室)、日進市(現地生産者ほ場)、長久手市(愛知県農業総合試験場作物研究室)で実施された試験データ⁸⁻¹⁴⁾を用いた(表1)。試験土壌は、安城市は黄色土¹⁵⁾、日進市は灰色低地土、長久手市は灰色台地土であった。粘土含量は、試験1の安城市は30%、試験2及び試験3の日進市はそれぞれ20%、14%、試験4～試験6の長久手市はいずれも26%であった。

試験1は、安城市において1926年から実施された⁸⁻¹⁰⁾。水稲の移植栽培で、冬作は休閑した。稲わら堆肥を水稲の移植前に施用し、稲わら堆肥の施用量が異なる「稲わら堆肥7.5t区」、「稲わら堆肥22.5t区」、稲わら堆肥を施用しなかった「稲わら堆肥無施用区」の計3処理区のデータを解析に用いた(表2、表3)。解析には土壌全炭素含量の調査が開始された1955年または1966年から2018年までのデータを用いた。作土深は処理区ごとに差がみられたことから、処理区ごとの報告値を用いた。地上部の作物残さは持ち出した。

試験2は、日進市において1977年から開始された¹¹⁾。水稲の移植栽培で、冬作は休閑した。3月に稲わらを還元した「稲わら還元CL区」、または家畜ふん堆肥を施用した「家畜

ふん堆肥CL区」、稲わらの還元も家畜ふん堆肥も施用しなかった「化学肥料CL区」の計3処理区の1982年までのデータを解析に用いた。地上部の作物残さは持ち出した。

試験3は、試験2のほ場が基盤整備により継続が困難となったことからその継続試験として、同じ日進市の別のほ場において1984年から開始された¹²⁾。水稲の移植栽培で、冬作は休閑した。3月に稲わらを還元した「稲わら還元SL区」、または家畜ふん堆肥を施用した「家畜ふん堆肥SL区」、稲わらの還元も家畜ふん堆肥も施用しなかった「化学肥料SL区」の計3処理区の1996年までのデータを解析に用いた。地上部の作物残さは持ち出した。

試験4は、長久手市において1978年から開始された¹³⁾。水稲の移植栽培で、冬作は休閑した。6月にもみがらを施用した「もみがら区」の1980年までのデータを解析に用いた。地上部の作物残さはすき込んだ。

試験5は、長久手市において2015年から開始された¹⁴⁾。水稲を不耕起V溝直播栽培後、小麦を栽培し、その翌年の夏作は大豆を栽培し、翌々年はまた水稲と小麦を栽培する田畑輪換とした。1～2月に牛ふん堆肥を施用し、施用量が異なる「牛ふん堆肥20t区」、「牛ふん堆肥30t区」、「牛ふん堆肥40t区」及び牛ふん堆肥を施用しなかった「牛ふん堆肥無施用区」の計4処理区の2020年までのデータを解析に用いた。牛ふん堆肥は大豆作後に、2年に1回の頻度で施用した。地上部の作物残さはすき込んだ。

表2 各試験における有機質資材由来の施用管理と1年間の平均炭素投入量

試験番号	処理区 ¹⁾	資材名	有機質資材		平均炭素投入量 ⁴⁾ (t ha ⁻¹ y ⁻¹)
			施用量 ²⁾ (t ha ⁻¹)	施用月 ³⁾ (月)	
試験1	稲わら堆肥7.5t区	稲わら堆肥	7.5	5	0.53
	稲わら堆肥22.5t区	稲わら堆肥	22.5	5	1.58
	稲わら堆肥無施用区	-	-	-	-
試験2	稲わら還元 CL 区	稲わら	5.0	3	2.83
	家畜ふん堆肥 CL 区	家畜ふん堆肥	10.0	3	1.92
	化学肥料 CL 区	-	-	-	-
試験3	稲わら還元 SL 区	稲わら	5.0	3	2.56
	家畜ふん堆肥 SL 区	家畜ふん堆肥	10.0	3	1.92
	化学肥料 SL 区	-	-	-	-
試験4	もみがら区	もみがら	20.0	6	6.66
試験5	牛ふん堆肥20t区	牛ふん堆肥 ⁵⁾	20.0	1～2	4.67
	牛ふん堆肥30t区	牛ふん堆肥 ⁵⁾	30.0	1～2	7.03
	牛ふん堆肥40t区	牛ふん堆肥 ⁵⁾	40.0	1～2	9.34
	牛ふん堆肥無施用区	-	-	-	-
試験6	牛ふん堆肥07-14区	牛ふん堆肥	20.0	11	2.64
	牛ふん堆肥10-13区	牛ふん堆肥	20.0	11	2.64
	堆肥無施用区	-	-	-	-

1) 処理区の名前は引用文献中の試験区名とは異なる

2) 1回当たりの現物施用量

3) 栽培履歴を基に解析に用いた有機質資材を施用した月

4) 1回の施用時における炭素投入量の平均値

5) 試験5の牛ふん堆肥は大豆作後に2年に1回の頻度で施用した

試験6は、長久手市において2007年から開始された¹⁴⁾。2014年まで水稲を不耕起V溝直播栽培で、冬作は休閑とした。2015年から水稲の不耕起V溝直播栽培後に小麦を、その翌年の夏作は大豆を栽培し、翌々年はまた水稲と小麦を栽培する田畑輪換とした。2007～2014年まで11月に牛ふん堆肥を施用した「牛ふん堆肥07-14区」、2010～2013年まで同様に牛ふん堆肥を施用した「牛ふん堆肥10-13区」、堆肥を施用しなかった「堆肥無施用区」の計3処理区のデータを解析に用いた。解析には土壌全炭素含量の調査が開始された2010年から2020年までのデータを解析に用いた。地上部の作物残さはすき込んだ。

各試験の作土の乾燥密度及び作土深は報告値とした。作物残さからの炭素投入量は調査データがある場合は報告値とし、報告値がない切り株や根等の作物残さは小川ら¹⁷⁾による各種作物の部位別乾物重構成比を用いて収量から乾物重を換算し、炭素含有率を40%として算出した。

2 Rothamsted Carbon Model(RothCモデル)による土壌炭素含量の変化の解析

(1) ほ場管理に応じたRothCモデルの選択と入力パラメータ

土壌全炭素含量の変化の解析は、Rothamsted Carbon Model¹⁸⁾(以下、畑用RothCモデル)及び分解率を水田向けに改良したRothCモデル³⁾(以下、水田用RothCモデル)で行った。水田連作の場合は水田用RothCモデルを、田畑輪換の場合はShiratoら⁷⁾に準じて、夏作が水稲の場合は水田用

RothCモデルを、夏作が大豆の場合は畑用RothCモデルを併用した。入力パラメータである月別平均気温、月別平均降水量は、試験地の近隣にある気象庁観測所の観測データ(安城市は岡崎、日進市及び長久手市は豊田のそれぞれの観測点における1981～2010年の平均値)¹⁹⁾を用いた。月別の水面蒸発量は、Thorntwaiteの可能蒸発散量²⁰⁾から算出した。月別の植被の有無は栽培履歴から求めた。

(2) 各炭素画分の初期値と特性値

試験開始時点で土壌全炭素含量が平衡に達していたと仮定し、RothCモデルの繰り返し計算(Equilibrium)によって、計算に必要な4つの炭素画分である、Decomposable plant material(DPM)、Resistant plant material(RPM)、Microbial biomass(BIO)およびHumified organic matter(HUM)の初期値を逆推定した²¹⁾。Inert organic matter(IOM)はFalloonらの提案した土壌全炭素含量とIOMの関係式²²⁾を用いて推定した。地上部の作物残さ及びもみがらといった作物由来の炭素画分の構成比(DPM:RPM比)は農作物におけるRothCモデルの既定値である1.44(DPM=59%、RPM=41%)¹⁸⁾を用いた。稲わら堆肥、家畜ふん堆肥及び牛ふん堆肥由来の炭素画分の構成比は、RothCモデルのFarmyard manure(FYM)の既定値(DPM=49%、RPM=49%、HUM=2%)¹⁸⁾を用いた。

3 実測値とモデル値の適合性の評価

土壌全炭素含量の実測値とモデル値の二乗平均平方根誤差(RMSE)を計算し適合性を評価した。

表3 各試験における栽培体系と作物残さからの1作あたりの平均炭素投入量

試験番号	処理区	栽培体系 ¹⁾			平均炭素投入量 ²⁾ (t ha ⁻¹)		
		水稲(栽培方法)	小麦	大豆	水稲	小麦	大豆
試験1	稲わら堆肥7.5t 区	6～10月(移植)	-	-	0.49	-	-
	稲わら堆肥22.5t 区	6～10月(移植)	-	-	0.55	-	-
	稲わら堆肥無施用区	6～10月(移植)	-	-	0.43	-	-
試験2	稲わら還元 CL 区	6～10月(移植)	-	-	0.58	-	-
	家畜ふん堆肥 CL 区	6～10月(移植)	-	-	0.56	-	-
	化学肥料 CL 区	6～10月(移植)	-	-	0.57	-	-
試験3	稲わら還元 SL 区	6～10月(移植)	-	-	0.60	-	-
	家畜ふん堆肥 SL 区	6～10月(移植)	-	-	0.65	-	-
	化学肥料 SL 区	6～10月(移植)	-	-	0.59	-	-
試験4	もみがら区	6～10月(移植)	-	-	3.27	-	-
試験5	牛ふん堆肥20t 区	4～11月(不耕起 V 溝直播)	12～7月	8～12月	4.04	3.62	1.54
	牛ふん堆肥30t 区	4～11月(不耕起 V 溝直播)	12～7月	8～12月	4.00	3.55	1.59
	牛ふん堆肥40t 区	4～11月(不耕起 V 溝直播)	12～7月	8～12月	4.14	4.03	1.62
	牛ふん堆肥無施用区	4～11月(不耕起 V 溝直播)	12～7月	8～12月	3.83	2.89	1.46
試験6	牛ふん堆肥07-14区	4～11月(不耕起 V 溝直播)	12～7月	8～12月	3.51	4.93	2.11
	牛ふん堆肥10-13区	4～11月(不耕起 V 溝直播)	12～7月	8～12月	3.27	4.62	1.77
	堆肥無施用区	4～11月(不耕起 V 溝直播)	12～7月	8～12月	3.32	3.98	1.54

1) 栽培履歴をもとに解析に用いた栽培期間

2) 各作の作物残さ由来の炭素投入量の平均値。解析は解析期間における各年の値または平均値を用いた実測値にない作物残さ部は小川ら¹⁷⁾による各種作物の部位別乾物重構成比を用いて収量から換算した

試験結果

1 試験1

解析開始時点の土壤全炭素含量の実測値は、試験開始から29年または40年が経過した時点からの分析値のため、解析前の稲わら堆肥の施用量の差を反映して処理区間に差が見られた(図1)。稲わら堆肥7.5t区の土壤全炭素含量の実測値は解析開始時点で稲わら堆肥無施用区よりも多かったが、解析期間ではほとんど増加しなかった。稲わら堆肥22.5t区の土壤全炭素含量の実測値は、解析開始後も増加傾向を示した。稲わら堆肥無施用区の土壤全炭素含量の実測値は、解析期間ではほとんど増加しなかった。各処理区のモデル値も実測値と同様の傾向を示した。実測値とモデル値から求めたRMSEは1.5~3.0であった。

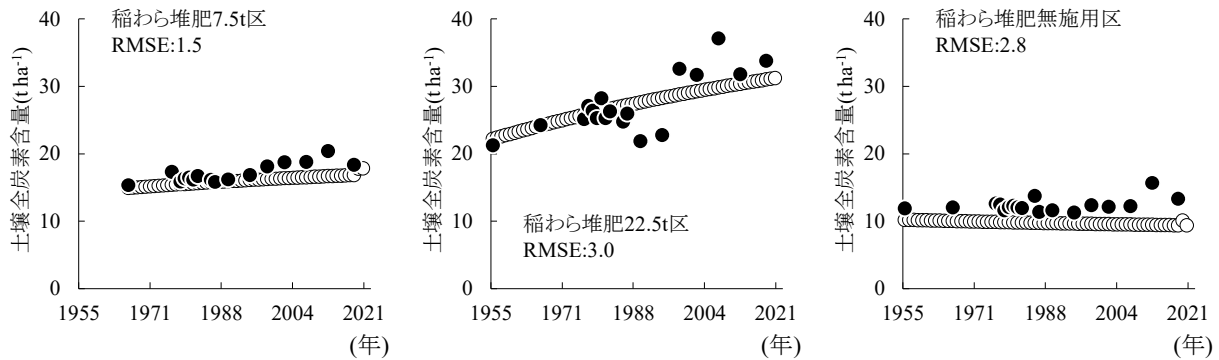


図1 試験1における土壤全炭素含量の実測値(●)とモデル値(○)の経時変化

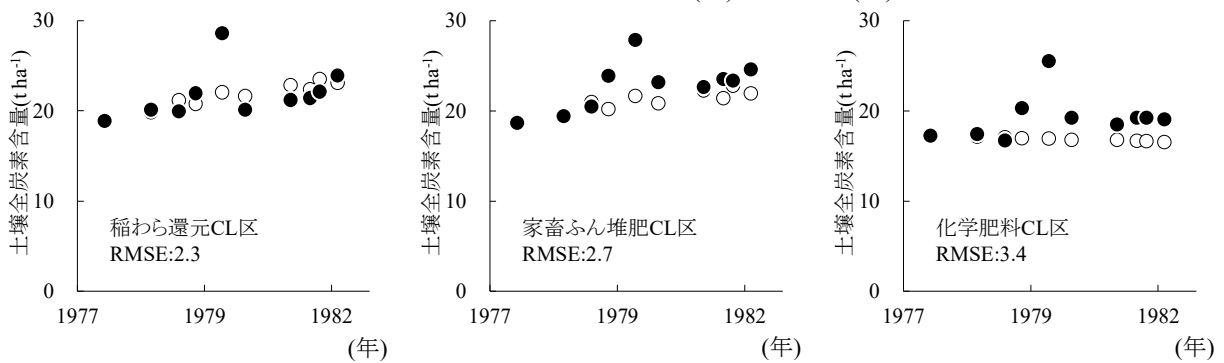


図2 試験2における土壤全炭素含量の実測値(●)とモデル値(○)の経時変化

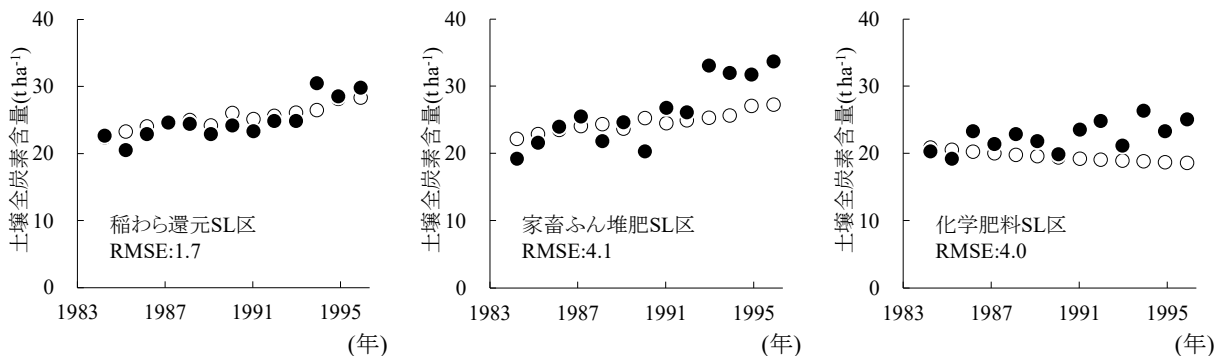


図3 試験3における土壤全炭素含量の実測値(●)とモデル値(○)の経時変化

2 試験2

稲わら還元CL区及び家畜ふん堆肥CL区ともに土壤全炭素含量の実測値は試験開始から増加傾向を示した(図2)。化学肥料CL区の土壤全炭素含量の実測値は試験開始時と同程度のまま推移した。各処理区のモデル値は実測値と同様の变化を示した。実測値とモデル値から求めたRMSEは3前後であった。

3 試験3

稲わら還元SL区及び家畜ふん堆肥SL区ともに土壤全炭素含量の実測値は試験開始から増加傾向を示した(図3)。化学肥料SL区の土壤全炭素含量の実測値は試験開始時と同程度のまま推移した。稲わら還元SL区及び家畜ふん堆肥SL区のモデル値は実測値と同様の变化を示し、実測値とモデル値から求めたRMSEは1.7、4.1であった。一方、化学肥料SL区のモデル値と実測値の差は経時的に大きくなったが、RMSEは4.0であった。

4 試験4

もみから区の土壌全炭素含量の実測値は増加傾向を示し、試験開始3年後にはほぼ2倍まで増加した(図4)。モデル値も実測値と同様の変化を示した。実測値とモデル値から求めたRMSEは2.5であった。

5 試験5

各処理区の土壌全炭素含量の実測値は、牛ふん堆肥の施用量の違いを反映し、牛ふん堆肥無施用区は試験開始時と同程度のまま推移したのに対し、牛ふん堆肥40t区では顕著な増加傾向を示した(図5)。各処理区のモデル値も実測値と同様の変化を示した。実測値とモデル値から求めたRMSEは2.2~4.5であった。

6 試験6

牛ふん堆肥の施用歴のある牛ふん堆肥07-14区及び牛ふん堆肥10-13区における土壌全炭素含量の実測値は増加し(図6)、施用期間の違いを反映して牛ふん堆肥07-14区で顕著に増加した。田畑輪換を開始した2015年以降は両区とも牛ふん堆肥は無施用であったが、2016年時点の土壌全炭素含量を維持する傾向であった。堆肥無施用区における土壌全炭素含量の実測値は、2015年までの不耕起V溝直播栽培期間は16 t ha⁻¹前後で、田畑輪換を開始した2016年以降は21 t ha⁻¹前後で推移した。各処理区のモデル値も実測値と同様の変化を示した。実測値とモデル値から求めたRMSEは3.0~7.5であった。

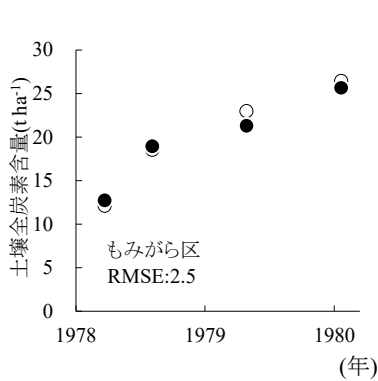


図4 試験4における土壌全炭素含量の実測値(●)とモデル値(○)の経時変化

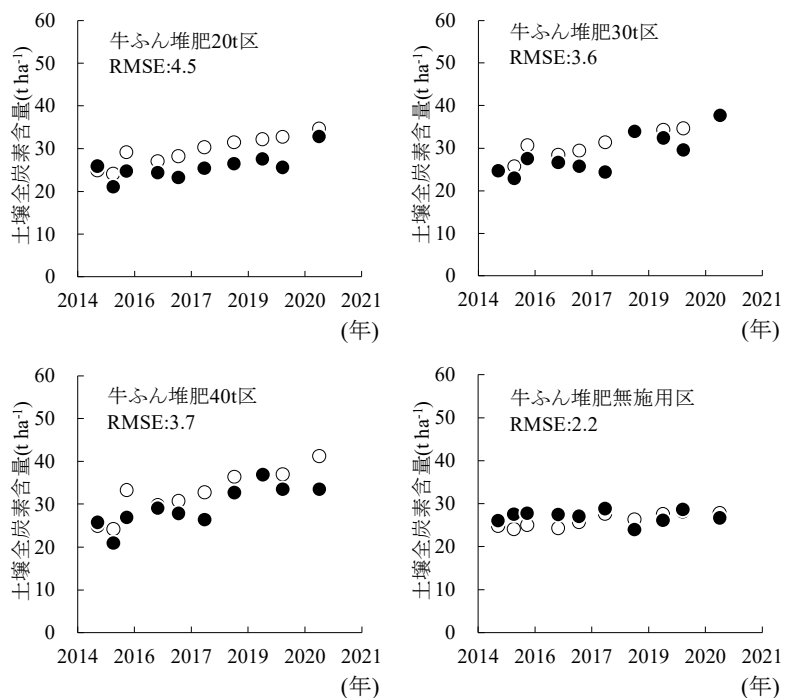
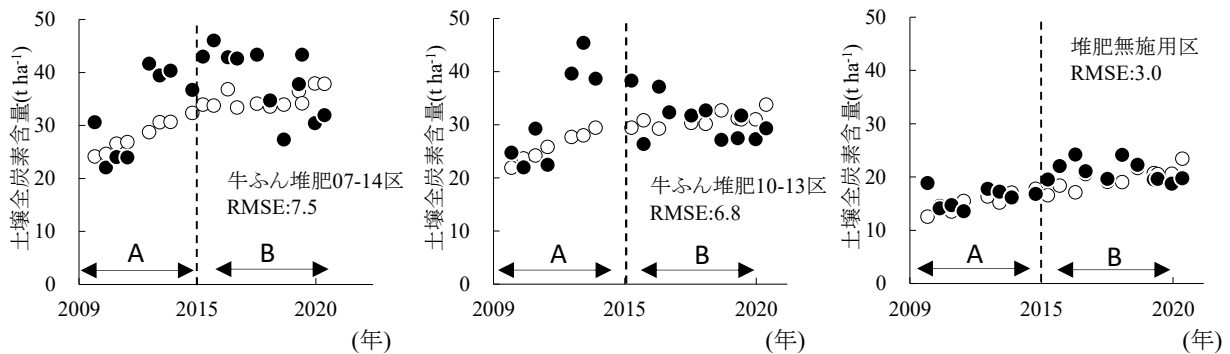


図5 試験5における土壌全炭素含量の実測値(●)とモデル値(○)の経時変化



期間 A: 水稻を不耕起 V 溝直播栽培、冬作は休閑
 期間 B: 田畑輪換(水稻を不耕起 V 溝直播栽培後に小麦、翌年の夏作は大豆、翌々年は水稻と小麦を栽培)
 牛ふん堆肥10-13区の2014年11月のデータは欠損

図6 試験6における土壌全炭素含量の実測値(●)とモデル値(○)の経時変化

考察

1 有機質資材を無施用とした処理区における土壤全炭素含量の推移から見た有機質資材施用の必要性

試験6の堆肥無施用区を除いて、有機質資材を施用しなかった各処理区(試験1の稲わら堆肥無施用区、試験2の化学肥料CL区、試験3の化学肥料SL区及び試験5の牛ふん堆肥無施用区)の土壤全炭素含量の実測値は試験開始時と同程度で推移し、土壤全炭素含量の目標値に達しなかった。試験6の堆肥無施用区の土壤全炭素含量の実測値は田畑輪換開始後に増加したものの、小麦及び大豆の土壤全炭素含量の目標値には達しなかった。一方、稲わらや家畜ふん堆肥、もみがらの施用歴のある処理区の土壤全炭素含量の実測値は増加傾向を示した。

愛知県の露地畑において土壤全炭素含量を目標値まで増加させるためには有機質資材の積極的な施用が必要であることが指摘されている²³⁾。また、土壤全炭素含量と各土壤化学性の相関関係を利用して、砂質露地畑における有機質資材の施用に伴う土壤全炭素含量の変化の予測から土壤化学性の変化を予測できる可能性が報告されている²⁴⁾。水田においても、土壤全炭素含量を土壤有機物含量の適正基準まで増加させるためには有機質資材の積極的な施用が必要であり、有機質資材の施用による土壤全炭素含量の変化の予測と、その予測に基づいた土壤管理法の確立が有効であると考えられる。

2 水稲連作水田における土壤炭素動態モデルの適合性

(1) 長期試験を用いた水田用RothCモデルの分解率の検証

水田における有機物の分解は畑よりも遅いことから、水田用RothCモデルでは過去の長期試験の結果に基づいて分解率を畑用RothCモデルよりも低く設定している³⁾。そこで、モデルで設定された分解率の適合性を愛知県における有機質資材の施用歴をもつ長期試験の結果(試験1)を用いて検証した。

試験1は試験開始後29年目または40年目からの解析であるが、水田用RothCモデルの適合性を検証した既報における解析期間(16~22年間)³⁾よりも解析期間は長く(試験1の解析期間は52年間または63年間)、実測値と水田用RothCモデルから求めたRMSEは、既報³⁾のRMSEの平均値(9.3)よりも小さかった。このことから、愛知県の水稲連作の水田においても水田用RothCモデルの分解率の適合性は高いと考えられる。

(2) 有機質資材の炭素画分の構成比の既定値の適合性

有機質資材の分解の難易は種類によって差があるとされる²⁵⁾。しかし、本研究では各炭素画分の構成比を稲わら及びもみがらは農作物におけるRothCモデルの既定値¹⁸⁾、家畜ふん堆肥及び牛ふん堆肥はFYMの既定値¹⁸⁾として計算を行った結果、土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEはいずれも小さかった。特に、分解しにくいもみがらを施用した区では、試験開始後3年間で土壤全炭素

含量は2倍程度(試験開始時は 12.7 t ha^{-1} 、試験開始後3作経過した跡地は 25.7 t ha^{-1})まで増加したが、モデル値もほぼ同程度の値を示した。このことから、水田用RothCモデルの分解率と組み合わせた各炭素画分の構成比の既定値¹⁸⁾の適合性は高いと考えられる。今後、分解の速い有機質資材での適応性についてもさらに検討する必要がある。

3 田畑輪換を実施した水田における土壤炭素動態モデルの適合性

(1) 水稲-麦-大豆の田畑輪換水田における検証

愛知県で普及している水稲-麦-大豆の2年3作体系の田畑輪換を行った試験5及び試験6における各処理区のモデル値は土壤全炭素含量の実測値と同様な変化を示したが、試験6の牛ふん堆肥区07-14区及び牛ふん堆肥10-13区の土壤全炭素含量の実測値のバラツキは大きかった。金沢ら²⁶⁾は、堆肥の施用により一筆内の水田作土の土壤全炭素含量のバラツキは増大することを報告している。これら2処理区のバラツキが大きかった要因として牛ふん堆肥の施用の影響が考えられるが、試験5で牛ふん堆肥を施用した牛ふん堆肥20t区、牛ふん堆肥30t区及び牛ふん堆肥40t区におけるRMSEは小さかった。このことから、愛知県の田畑輪換を実施した水田において、水田用RothCモデルと畑用RothCモデルを併用した土壤炭素動態モデルの適合性は高いと考えられる。また、試験5及び試験6の水稲作は不耕起V溝直播栽培で実施したことから、水田用RothCモデルは不耕起V溝直播栽培にも適用できると考えられる。

(2) 田畑輪換水田における土壤全炭素含量の経時変化

田畑輪換を繰り返すと土壤全炭素含量は減少すること、さらに、10年を超える田畑輪換の繰り返しは 6 t ha^{-1} の稲わらを連用しても土壤全炭素含量の減少量を補いきれないことが指摘されている⁶⁾。しかし、試験6の堆肥無施用区は牛ふん堆肥を無施用としたが、土壤全炭素含量の実測値は田畑輪換後に増加した。その要因として、本試験では大豆に加えて小麦も栽培され、2年間でみた作物残さからの炭素投入量の合計値は水稲連作のみの場合よりも多かったことから、田畑輪換後の土壤全炭素含量は増加したと考えられる。一方、試験5の牛ふん堆肥無施用区は田畑輪換を行い、牛ふん堆肥を無施用としたが、土壤全炭素含量の実測値は田畑輪換後に増加しなかった。田畑輪換開始時の試験5の牛ふん堆肥無施用区の土壤全炭素含量は 26.0 t ha^{-1} で、試験6の堆肥無施用区の田畑輪換開始時の 18.8 t ha^{-1} よりも多かったため、田畑輪換後に作物残さからの炭素投入量が多くても土壤全炭素含量の実測値は増加しなかったと考えられる。

露地畑において、新たな土壤管理を導入した後に土壤全炭素含量が増加するのか、減少するのかは、導入時の土壤全炭素含量と、導入後の投入する炭素量によることが指摘されている²³⁾。今回、水田においても同様のことが示された。さらに、水田用RothCモデルについてもこうした土壤管理の変更に伴う炭素投入量の変化によく対応するものと考えられる。このため、水田用RothCモデルを用いた土壤全炭素含量の変化を高い精度で予測するためには炭素投入量の変化を正確に把握することが必要である。

4 まとめ

本試験の検証結果から、既報^{3,7)}で示されたとおり、水稻を連作する場合は水田用RothCモデル、田畑輪換を行う場合は夏作の栽培品目に応じて水田用RothCモデルと畑用RothCモデルを併用すれば、愛知県の水田における土壌炭素の動態に良く適合すると判断した。これにより、愛知県の水田における有機質資材の施用に伴う土壌全炭素含量の経時変化を推定できると考えられる。

謝辞: 水田用RothCモデルの使用にあたり、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究部門の白戸康人博士にご指導いただいた。深く感謝申し上げます。

引用文献

1. 松中照夫. 土壌学の基礎生成・機能・肥沃度・環境. 農山漁村文化協会. 東京. p.1-389(2003)
2. 加藤保. 有機物施用を中心とした土壌管理による土壌への炭素蓄積-愛知県における調査成績から-. 日本土壌肥科学雑誌. 74, 99-104(2003)
3. Shirato, Y. and Yokozawa, M. Applying the Rothamsted Carbon Model for long-term experiments on Japanese paddy soils and modifying it by simple tuning of the decomposition rate. *Soil Science and Plant Nutrition*. 51, 405-415(2005)
4. Jenkinson, D. S. and Rayner, J. H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*. 123, 298-305(1977)
5. 愛知県農業総合試験場. 不耕起V溝直播栽培の手引き(改訂第4版). 愛知県農業総合試験場. p.1-52(2007)
6. 住田弘一, 加藤直人, 西田瑞彦. 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の生産力低下と土壌肥沃度の変化. 東北農業研究センター研究報告. 103, 39-52(2005)
7. Shirato, Y., Yagasaki, Y. and Nishida, M. Using different versions of the Rothamsted Carbon model to simulate soil carbon in long-term experimental plots subjected to paddy-upland rotation in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*. 57, 597-606 (2011)
8. 弘法健三, 和田秀徳. 土壌の弗化ナトリウム浸出物について(その1)堆肥の施用が土壌腐植の形態に及ぼす影響(第1報告). 日本土壌肥科学雑誌. 32, 209-212(1961)
9. 中西秋四郎, 沖村逸夫, 加藤虎治, 有沢道雄, 河合伸二. 水稻に対する継続40年間の要素試験成績について(第1報). 愛知県農業総合試験場彙報. 24, 46-60(1970)
10. 塩田悠賀里, 稲垣明, 長谷川徹, 沖村逸夫. 四要素及び堆肥の長期施用による水田土壌の理化学性と水稻の生育について. 愛知農総試研報. 12, 52-60(1980)
11. 愛知県農業総合試験場. 昭和50~57年度土壌環境基礎調査(基準点調査)成績書. p.113-157(1983)
12. 愛知県農業総合試験場. 昭和59年度~平成9年度土壌保全関係試験成績概要集. p.35-61(1998)
13. 岩田久史, 森健治郎, 澤田守男, 今川正弘, 加藤裕司, 加藤虎治. もみがらの多量連用施用が水稻生育に及ぼす影響. 愛知農総試研報. 14, 40-45(1982)
14. 久野智香子, 浅野智也, 小田紫帆里, 森崎耕平, 武井真理, 瀧勝俊, 大竹敏也. 2年3作輪作体系のダイズ作を対象とした地力改善指標の確立. 愛知農総試研報. 53, 17-24(2021)
15. 農耕地土壌分類委員会. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 農業環境技術研究所資料. 17, 1-79(1995)
16. 愛知県農業水産局農政部農業経営課. 農作物の施肥基準. 愛知県. (2021)
<https://www.pref.aichi.jp/soshiki/nogyo-keiei/sehikijun.htm>
1 (2021.5.7参照)
17. 小川和夫, 竹内豊, 片山雅弘. 北海道の耕草地におけるバイオマス生産量及び作物による無機成分吸収量. 北海道農業試験場研究報告. 149, 57-91(1988)
18. Coleman, K. and Jenkinson, D. S. RothC-26.3 A model for the turnover of carbon in soil. Evaluation of Soil Organic Matter Models: Using Existing Long-Term Datasets, Ed. by Powlson, D. S. Smith, P. and Smith, J. U. Springer. Berlin. p.237-246(1996)
[https://www.rothamsted.ac.uk/rothamsted-carbon-model-rothc\(2019.6.5.DL\)](https://www.rothamsted.ac.uk/rothamsted-carbon-model-rothc(2019.6.5.DL))
19. 気象庁. 2019. 過去の気象データ検索.
[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php\(2020.10.30参照\)](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php(2020.10.30参照))
20. 久保次郎. 蒸発散位とその推定. 天気. 2, 21-24(1955)
21. Jenkinson, D. S., Meredith, J., Kinyamario, J. I., Warren, G.P., Wong, M. T. F., Harkness, D. D., Bol, R. and Coleman, K. Estimating net primary production from measurements made on soil organic matter. *Ecology*. 80, 2762-2773(1999)
22. Falloon, P., Smith, P., Coleman, K. and Marshall, S. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted Carbon Model. *Soil Biology Biochemistry*. 30, 1207-1211(1998)
23. 中村嘉孝, 山本拓, 久野智香子, 大橋祥範, 山本岳, 安藤薫, 瀧勝俊, 大竹敏也. 有機質資材の施用法が異なる愛知県の露地畑におけるRothamsted Carbon Modelの適合性の検証. 愛知農総試研報. 53, 25-36(2021)
24. 中村嘉孝, 安藤薫, 瀧勝俊. 土壌炭素動態(RothC)モデルを用いた砂質露地畑における土壌炭素の変動解析と土壌化学性の変動予測の可能性. 愛知農総試研報. 52, 23-30(2020)
25. 前田乾一, 志賀一一. 水田条件下における各種有機物資材の分解経過. 日本土壌肥科学雑誌. 49, 455-460(1978)
26. 金沢晋二郎, Kim, H. O., 長谷部亮, 高井康雄. 水田土壌の微生物性および化学性に関する分析値のバラツキ. 日本土壌肥科学雑誌. 52, 187-192(1981)