

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

中村嘉孝¹⁾・山本 拓²⁾・久野智香子¹⁾・大橋祥範¹⁾・山本 岳¹⁾・安藤 薫¹⁾・瀧 勝俊¹⁾・大竹敏也¹⁾

摘要: 愛知県の露地畑における土壌炭素動態モデルを用いた有機質資材の施用による土壌管理技術の確立に向け、栽培作物の種類、作物の残さのすき込みの有無、有機質資材の施用法、土壌の粘土含量が異なる露地畑において、Rothamsted Carbon Model(RothCモデル)の適合性の検証を行った。有機質資材の連用により土壌全炭素含量が増加する場合だけでなく、試験開始時の土壌全炭素含量が多いため有機質資材を施用しても減少する場合や、有機質資材の施用を中断した場合、有機質資材をまとめて施用した場合でも、RothCモデル値は実測値と同様な変化を示した。これら各処理区の土壌全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めた二乗平均平方根誤差(RMSE)は小さかった。これらのことから、露地畑におけるRothCモデルの適合性は高いことが示唆された。

キーワード: 土壌全炭素含量、粘土含量、露地畑、Rothamsted Carbon Model、有機質資材

Testing the Suitability of Soil Carbon Dynamics Using the Rothamsted Carbon Model in Upland Fields of the Aichi Prefecture with Different of Organic Matter Application Methods

NAKAMURA Yoshitaka, YAMAMOTO Taku, KUNO Chikako, OHASHI Yoshinori,
YAMAMOTO Takeshi, ANDO Kaori, TAKI Katsutoshi and OTAKE Toshiya

Abstract: We tested the suitability of soil carbon dynamics using a soil carbon dynamics model (Rothamsted Carbon Model, RothC model) in upland fields of the Aichi prefecture, where the application of organic matter or clay content of the soil varied. The test fields differed in the types of cultivated crops, the presence or absence of residual crops, the rate of application, and the method of application of organic matter, as well as the level of clay. The RothC model value of total soil carbon content in the treatment plots with different organic matter application methods showed the same fluctuation as the measured value. Similarly, the RothC model values in the treatment plots where the application of cattle manure compost for 3 years was collectively applied or the plots where the application of rice straw compost was halted showed the same fluctuations as the measured values. In soils with different clay contents, the root mean square error obtained from the measured values of the total carbon content of the soil and the RothC model value was small. Therefore, the RothC model can be used to analyze changes in soil total carbon content in upland fields in the Aichi Prefecture.

Key Words: Total soil carbon, Clay content, Upland field, Rothamsted carbon model, Organic matter

緒言

土壌有機物は、土壌の化学性、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7割の露地畑の土壌有機物含量は、普通畑の適正基準下限値である30 g kg⁻¹以下と少ない²⁾。このため、堆肥等の有機質資材の施用は、愛知県の露地畑の作物生産性を向上させるために極めて重要な土壌管理である。また、土壌有機物含量の増加は土壌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の削減にも寄与する。有機質資材の施用に伴う土壌有機物含量の変化は、施用する有機質資材の種類、量及び期間だけでなく、気象条件、土壌の粘土含量や種類等によっても変化する。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。有機質資材を施用した露地畑において、土壌有機物含量の指標となる土壌全炭素含量の変化をモデル化することができれば、ほ場試験を実施しなくても様々な条件下における有機質資材の施用効果を推定することができ、土壌管理に活用することができる。

Shirato and Taniyama³⁾は、日本の黄色土等の非黒ボク土の露地畑において、英国で開発されたRothamsted Carbon Model⁴⁾(RothCモデル)の適合性が高いことを報告している。また、中村ら⁵⁾は愛知県の黄色土の砂質露地畑におけRothCモデルの適合性が高いことを報告している。愛知県の畑土壌は、主に黄色土、灰色低地土及び褐色森林土の非黒ボク土が分布しており⁶⁾、RothCモデルを広く適応できると考えられる。しかし、既報^{3,5)}では稲わら堆肥や家畜ふん堆肥等の有機質資材の連用あるいは無施用とした場合のRothCモデルの適合性について検証されているものの、有機質資材を複数年に1回施用する場合や残効についてはさらなる検証が必要である。例えば、愛知県の有機質資材施用基準⁷⁾では牛ふん堆肥等の肥効の緩やかな資材について、3年分

を限度として1回に施用基準×施用間隔(年)まで施用することも可能としている。実際、現地の露地野菜畑における有機質資材を施用する労力の負担が大きいこと等から、2～3年分の牛ふん堆肥を一括して施用する場合^{8,9)}や、一時的に施用を中断する場合も見られる。有機質資材の種類についても、汚泥肥料や緑肥として利用されているソルガムやクロタリリア等についての報告は少ない³⁾。また、愛知県の露地畑において、土壌有機物の分解に影響する粘土含量は既報³⁾の試験ほ場の粘土含量(11.8～27.7%)よりも少ない砂質な土壌から、多い粘質な土壌まで幅広く分布している。

そこで本研究では、愛知県の露地畑における土壌炭素動態モデルを用いた有機質資材の施用による土壌管理技術の確立に向け、有機質資材の種類や施用法、または粘土含量が異なる露地畑におけるRothCモデルの適合性を検証することを目的とする。

材料及び方法

1 有機質資材の施用試験データ

検証には、愛知県長久手市(愛知県農業総合試験場)及び愛知県豊橋市(愛知県農業総合試験場東三河農業研究所)で実施された有機質資材の施用試験データ⁸⁻¹⁹⁾を用いた(表1)。長久手市の試験土壌は褐色森林土または黄色土²⁰⁾で、いずれも粘土含量は5%であった。豊橋市の試験土壌はいずれも黄色土で、粘土含量は8%または40%であった。各試験ほ場における土壌全炭素含量の改善目標値として、土壌有機物含量の適正基準下限値30 g kg⁻¹から土壌有機物中の炭素含有率を58%として炭素に換算した値を算出した(表1)。

試験1は、長久手市において1981年から実施された^{10,11)}。家畜ふん堆肥または稲わら堆肥を夏作または冬作で施用し、1回当たりの施用量が異なる家畜ふん堆肥15t-15t区、家畜ふん堆肥30t-30t区及び家畜ふん堆肥60t-0t区、同様に稲

表1 試験ほ場の概要

試験番号	試験地	土壌名 ¹⁾	解析年(年)	粘土含量(%)	作土深(cm)	初期 TC ²⁾ (t ha ⁻¹)	初期炭素投入量 ³⁾ (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	土壌炭素目標値 ⁴⁾ (t ha ⁻¹)
試験 1	長久手市	褐色森林土	1981-1997	5	18	15.4-58.8 ⁵⁾	2.09-7.86	42
試験 2	長久手市	黄色土	2013-2019	5	20	22.1	3.36	38
試験 3	長久手市	黄色土	2016-2019	5	20	18.0	3.01	42
試験 4	豊橋市	黄色土	2005-2014 ⁶⁾	40	20	45.1	7.61	35
試験 5	豊橋市	黄色土	1981-1995	40	15	20.9	2.28	34
試験 6	豊橋市	黄色土	1981-1984	40	15	20.9	3.11	34
試験 7	豊橋市	黄色土	1988-1995	8	10	2.5	0.37	23
試験 8	豊橋市	黄色土	2005-2010	40	20	54.2	6.00	45

1) 農耕地土壌分類委員会²⁰⁾

2) 試験開始時の土壌全炭素含量

3) RothC モデルの繰り返し計算により算出される試験開始時の土壌全炭素含量を維持するために必要な炭素投入量

4) 土壌有機物の適正基準下限値(30 g kg⁻¹)中の炭素含有率を58%として炭素に換算

5) 解析開始時点で各処理区の初期土壌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

6) 一部の処理区は2019年まで解析した

わら堆肥の施用量が異なる稲わら堆肥30t-30t区及び稲わら堆肥15t-15t区、堆肥を施用しなかった堆肥無施用区の計6処理区の1997年までのデータを解析に用いた(表2、表3)。各処理区は、試験開始前にそれぞれ異なる有機質資材の施用歴があった¹⁰⁾。その前歴は、家畜ふん堆肥15t-15t区、家畜ふん堆肥30t-30t区及び家畜ふん堆肥60t-0t区は1976年から本試験と同様に家畜ふん堆肥が施用された。稲わら堆肥30t-30t区は春作と秋作ごとに家畜ふん堆肥50 t ha⁻¹が施用され、稲わら堆肥15t-15t区は1976年のみ春作と秋作でそれぞれ家畜ふん堆肥20 t ha⁻¹が施用され、堆肥無施用区は有機質資材が施用されなかった。施用した家畜ふん堆肥

は、1989年まではおがくず入り豚ふん堆肥を、1990年から牛ふん堆肥とした。地上部の作物残さは持ち出した。試験開始前の有機質資材の施用歴の違いから試験開始時の土壤全炭素含量の差が大きかったため、試験開始時の土壤全炭素含量は処理区ごとに解析した。

試験2は、長久手市において2013年から開始された¹²⁾。試験開始前の試験ほ場は野菜畑として20年以上利用されていた。10～11月に豚ふん堆肥を施用し、その後タマネギを栽培した豚ふん堆肥施用区、豚ふん堆肥を施用せずタマネギを栽培した豚ふん堆肥無施用区の計2処理区の2019年までのデータを解析に用いた。両処理区ともに2016年は休耕し、堆

表2 各処理区における有機質資材由来の1年間の炭素投入量

試験番号	処理区 ¹⁾	有機質資材				年間炭素投入量の平均値 ⁴⁾ (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	平均C/N比
		資材名	施用量 ²⁾ (t ha ⁻¹)	施用月 ³⁾ (月)			
試験1	家畜ふん堆肥15t-15t区	家畜ふん堆肥 ⁵⁾	15 [*] 、15 [*]	4～8、9～11	4.90	15.7	
	家畜ふん堆肥30t-30t区	家畜ふん堆肥	30 [*] 、30 [*]	4～8、9～11	9.80	15.7	
	家畜ふん堆肥60t-0t区	家畜ふん堆肥	60 [*]	4～8	9.90	15.7	
	稲わら堆肥30t-30t区	稲わら堆肥	30 [*] 、30 [*]	4～8、9～11	4.04	17.0	
	稲わら堆肥15t-15t区	稲わら堆肥	15 [*] 、15 [*]	4～8、9～11	2.12	17.0	
	堆肥無施用区	-	-	-	-	-	
試験2	豚ふん堆肥施用区	豚ふん堆肥	10	10～11	3.55	7.9	
	豚ふん堆肥無施用区	-	-	-	-	-	
試験3	堆肥と緑肥区	豚ふん堆肥、ソルガム	10	5、7	3.49(5.67)	7.9(44)	
	堆肥区	豚ふん堆肥	10	5	3.49	7.9	
	堆肥緑肥無し区	-	-	-	-	-	
試験4	牛ふん堆肥7.5t区	牛ふん堆肥	7.5	8	3.08	22.3	
	牛ふん堆肥15t区	牛ふん堆肥	15	8	6.11	21.6	
	牛ふん堆肥22.5t区	牛ふん堆肥	22.5	8	9.23	22.3	
	豚ふん堆肥5t区	豚ふん堆肥	5	8	1.85	9.4	
	豚ふん堆肥10t区	豚ふん堆肥	10	8	3.69	8.9	
	豚ふん堆肥15t区	豚ふん堆肥	15	8	5.56	9.4	
	牛ふん堆肥45t/3y区	牛ふん堆肥	45	8(3年に1回)	18.85 ^{**}	20.9	
	家畜ふん堆肥無施用区	-	-	-	-	-	
試験5	稲わら堆肥10t区	稲わら堆肥	10、10	4～5、9	5.42	15.6	
	稲わら堆肥20t区	稲わら堆肥	20、20	4～5、9	10.84	15.6	
	稲わら堆肥30t区	稲わら堆肥	30、30	4～5、9	16.26	15.6	
	稲わら堆肥40t区	稲わら堆肥	40、40	4～5、9	21.69	15.6	
試験6	下水汚泥肥料10t連用区	下水汚泥肥料	10、10	5～7、9～10	2.39	8.2	
	下水汚泥肥料20t残効区	下水汚泥肥料	20	7(初作のみ)	4.50 ^{**}	8.2	
	下水汚泥肥料40t残効区	下水汚泥肥料	40	7(初作のみ)	9.23 ^{**}	8.2	
	稲わら堆肥10t連用区	稲わら堆肥	10、10	5～7、9～10	3.33	17.9	
	稲わら堆肥20t残効区	稲わら堆肥	20	7(初作のみ)	6.66 ^{**}	17.9	
	稲わら堆肥40t残効区	稲わら堆肥	40	7(初作のみ)	13.32 ^{**}	17.9	
	有機質資材無施用区	-	-	-	-	-	
試験7	汚泥発酵肥料10t連用区	汚泥発酵肥料	10、10	4、7	4.59	9.9	
	汚泥発酵肥料60t残効区	汚泥発酵肥料	60	4(初作のみ)	9.48 ^{**}	8.9	
	汚泥発酵肥料無施用区	-	-	-	-	-	
試験8	ソルガム区	ソルガム	-	-	(3.94)	(42)	
	クロタラリア区	クロタラリア	-	-	(2.64)	(17)	
	夏作休耕区	-	-	-	-	-	

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回当たりの施用量。1年間に2回施用した場合は1作目、2作目の順に記載。

印(*)がある場合は現物重、印(*)がない場合は乾物重を表す

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。括弧内は連用しない場合の施用法

4) 1年間に施用した炭素投入量の平均値。印(**)がある場合は1回の施用時における平均値。

括弧内は緑肥(ソルガムまたはクロタラリア)の数値

5) 1989年まではおがくず入り豚ふん堆肥、1990年から牛ふん堆肥へ変更

肥の施用またはタマネギの作付けを行わなかった。地上部の作物残さは持ち出した。

試験3は、長久手市において2016年から開始された¹³⁾。試験開始前の試験ほ場は野菜畑として20年以上利用されていた。5月に豚ふん堆肥を施用し、同時に緑肥としてソルガムを栽培し、冬作にキャベツを栽培した堆肥と緑肥区、緑肥を栽培せず豚ふん堆肥を施用した堆肥区及び堆肥を施用せず緑肥も栽培しなかった堆肥緑肥無し区の計3処理区の2019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4は、豊橋市において2005年から開始された^{8,9,14)}。試験開始前の試験ほ場はブドウ園として23年間利用され、その後3年間は休耕地として管理されていた。8月に牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を施用し、その施用量がそれぞれ異なる牛ふん堆肥7.5t区、牛ふん堆肥15t区、牛ふん堆肥22.5t区、豚ふん堆肥5t区、豚ふん堆肥10t区、豚ふん堆肥15t区、1年間当たりの施用基準上限値(15 t-乾物 ha⁻¹ y⁻¹)⁷⁾の牛ふん堆肥の3年間分を一括して3年間に1回施用した牛ふん堆肥45t/3y区及び家畜ふん堆肥を施用せず化学肥料のみを施用した家畜ふん堆肥無施用区の計8処理区の2014年(牛ふ

表3 各処理区における作物残さからの1作あたりの炭素投入量

試験番号	処理区	栽培品目(栽培月間) ¹⁾	炭素投入量の平均値 ²⁾ (t ha ⁻¹)		
			1作目 ³⁾	2作目	3作目
試験1	家畜ふん堆肥 15t-15t 区	1 作目タマネギ(12~5月)	0.01, 0.03 ⁴⁾	0.85, 1.66	0.00, 0.07
	家畜ふん堆肥 30t-30t 区	またはキャベツ(5~7月)	0.01, 0.03	0.86, 1.84	0.00, 0.09
	家畜ふん堆肥 60t-0t 区	2 作目ソルガムまたはミレット(6~8月)	0.01, 0.03	0.94, 1.32	0.00, 0.08
	稲わら堆肥 30t-30t 区	3 作目ダイコン(9~11月)	0.01, 0.03	0.92, 1.90	0.00, 0.10
	稲わら堆肥 15t-15t 区	またはハクサイ(9~11月)	0.01, 0.03	0.79, 1.69	0.00, 0.08
	堆肥無施用区		0.01, 0.03	0.39, 0.81	0.00, 0.07
試験2	豚ふん堆肥施用区	1 作目タマネギ(11~5月)	0.01	-	-
	豚ふん堆肥無施用区		0.01	-	-
試験3	堆肥と緑肥区	1 作目ソルガム(5~7月)*	5.67	1.45	-
	堆肥区	2 作目キャベツ(7~12月)*	-	1.33	-
	堆肥緑肥無し区		-	1.40	-
試験4	牛ふん堆肥 7.5t 区	1 作目スイートコーン(5~7月)*	0.95	1.92	-
	牛ふん堆肥 15t 区	2 作目キャベツ(9~1月)*	1.26	1.93	-
	牛ふん堆肥 22.5t 区		1.13	1.98	-
	豚ふん堆肥 5t 区		1.05	2.00	-
	豚ふん堆肥 10t 区		1.45	1.94	-
	豚ふん堆肥 15t 区		1.45	2.05	-
	牛ふん堆肥 45t/3y 区		0.91	1.74	-
	家畜ふん堆肥無施用区		0.82	1.97	-
試験5	稲わら堆肥 10t 区	1 作目ソルガム(5~9月)	0.92, 0.56	0.02, 0.03	-
	稲わら堆肥 20t 区	またはスイートコーン(4~8月)	1.04, 0.57	0.03, 0.04	-
	稲わら堆肥 30t 区	2 作目キャベツ(9~2月)	1.20, 0.58	0.03, 0.04	-
	稲わら堆肥 40t 区	またはハクサイ(9~12月)	1.27, 0.60	0.03, 0.03	-
試験6	下水汚泥肥料 10t 連用区	1 作目ソルガム(5~9月)	0.60	0.03, 0.02	-
	下水汚泥肥料 20t 残効区	2 作目キャベツ(9~2月)	0.52	0.02, 0.02	-
	下水汚泥肥料 40t 残効区	またはハクサイ(9~2月)	0.54	0.02, 0.02	-
	稲わら堆肥 10t 連用区		0.58	0.03, 0.02	-
	稲わら堆肥 20t 残効区		0.53	0.02, 0.02	-
	稲わら堆肥 40t 残効区		0.55	0.02, 0.02	-
	有機質資材無施用区		0.53	0.03, 0.02	-
	試験7	汚泥発酵肥料 10t 連用区	1 作目スイートコーン(5~7月)*	4.29	1.19
汚泥発酵肥料 60t 残効区		2 作目キャベツ(8~12月)*	4.44	1.20	-
汚泥発酵肥料無施用区			4.51	1.16	-
試験8	ソルガム区	1 作目緑肥 ⁵⁾ (6~8月)*	3.94	1.87	-
	クロタラリア区	2 作目キャベツ(9~2月)*	2.64	1.98	-
	夏作休耕地		-	1.95	-

1) 栽培履歴を基に解析に用いた栽培期間

印(*)がある場合は作物残さをすき込み、印(*)がない場合は地上部の作物残さを持ち出したことを表す

2) 各作の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

3) 1年間における栽培順。

4) 栽培品目の表記の順に表記

例) 1 作目タマネギまたはキャベツの場合は、0.01(タマネギの数値)、0.03(キャベツの数値)

5) ソルガム区はソルガム、クロタラリア区はクロタラリア

実測値にない残さ部は、小川ら²¹⁾による各種作物の部位別乾物重構成比を用いて収量データから換算した。ソルガムは未成熟トウモロコシの部位別乾物重構成比を参照した

ん堆肥15t区、豚ふん堆肥10t区及び堆肥無施用区は2019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、豊橋市において1981年から開始された^{15,16)}。稲わら堆肥を夏作と冬作で施用し、1回当たりの施用量がそれぞれ異なる稲わら堆肥10t区、稲わら堆肥20t区、稲わら堆肥30t区及び稲わら堆肥40t区の計4処理区の1995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6は、豊橋市において1981年から開始された¹⁷⁾。供試された下水汚泥肥料は、豊橋市公共下水道中島処理場から排出されたもので、凝集剤として塩化鉄及び水酸化カリウムを用いて真空脱水機により処理された生汚泥であった。下水汚泥肥料を夏作と冬作でそれぞれ施用した下水汚泥10t連用区、初作のみ下水汚泥肥料を施用した下水汚泥20t残効区及び下水汚泥40t残効区、下水汚泥肥料に替えて愛知県農業総合試験場東三河農業研究所で作成された稲わら堆肥をそれぞれ同様に施用した稲わら堆肥10t連用区、稲わら

堆肥20t残効区及び稲わら堆肥40t残効区、下水汚泥肥料や稲わら堆肥を無施用とした有機質資材無施用区の計7処理区の1984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7は、豊橋市において1988年から開始された¹⁸⁾。五条川左岸浄化センターで製造された汚泥発酵肥料を夏作と冬作で施用した汚泥発酵肥料10t連用区、初作のみ汚泥発酵肥料を施用した汚泥発酵肥料60t残効区及び汚泥発酵肥料を施用しなかった汚泥発酵肥料無施用区の計3処理区の1995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8は、豊橋市において2005年から開始された¹⁹⁾。試験開始前の試験ほ場は野菜畑として20年以上利用されていた。夏作に緑肥としてソルガムを栽培したソルガム区、またはクロタリヤを栽培したクロタリヤ区、夏作に緑肥を栽培しなかった夏作休耕区の計3処理区の2010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。

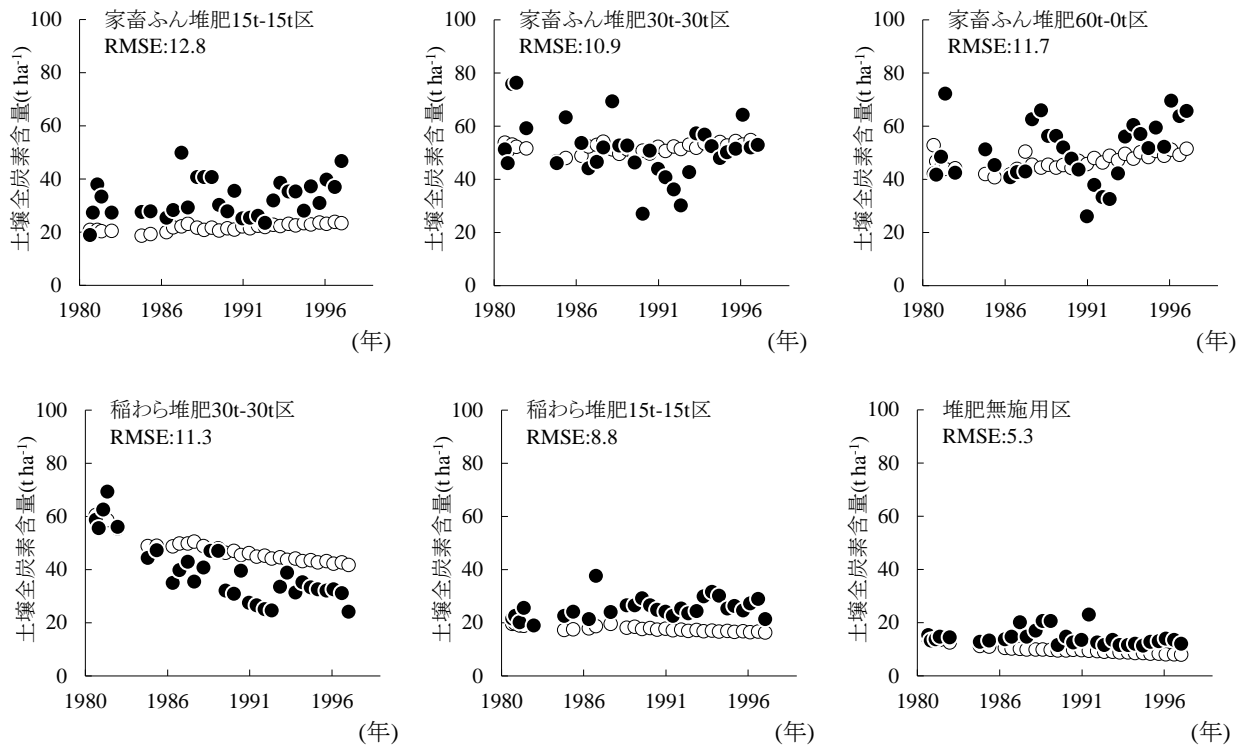


図1 試験1における土壌全炭素含量の実測値(●)とRothCモデル値(○)の経時変化

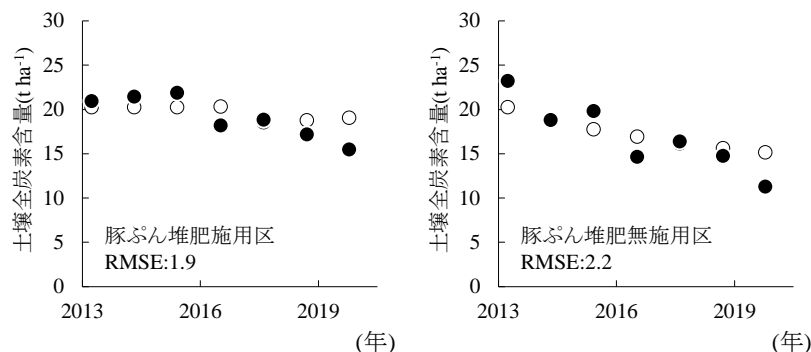


図2 試験2における土壌全炭素含量の実測値(●)とRothCモデル値(○)の経時変化

各試験の作土の乾燥密度及び作土深は調査値または報告値とした。土壤全炭素含有量($t\ ha^{-1}$)は、土壤全炭素含有率($g\ kg^{-1}$)、乾燥密度及び作土深から算出した。作物残さからの炭素投入量は調査データがある場合は実測値とし、報

告値がない切り株や根等の作物残さは小川ら²¹⁾による各種作物の部位別乾物重構成比のデータを用いて収量データから乾物重を換算し、炭素含有率を40%として算出した。

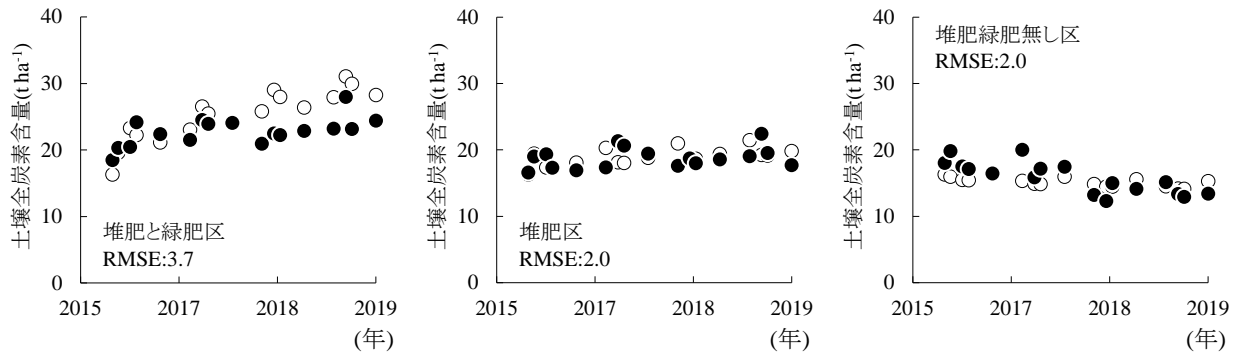


図3 試験3における土壤全炭素含量の実測値(●)と RothC モデル値(○)の経時変化

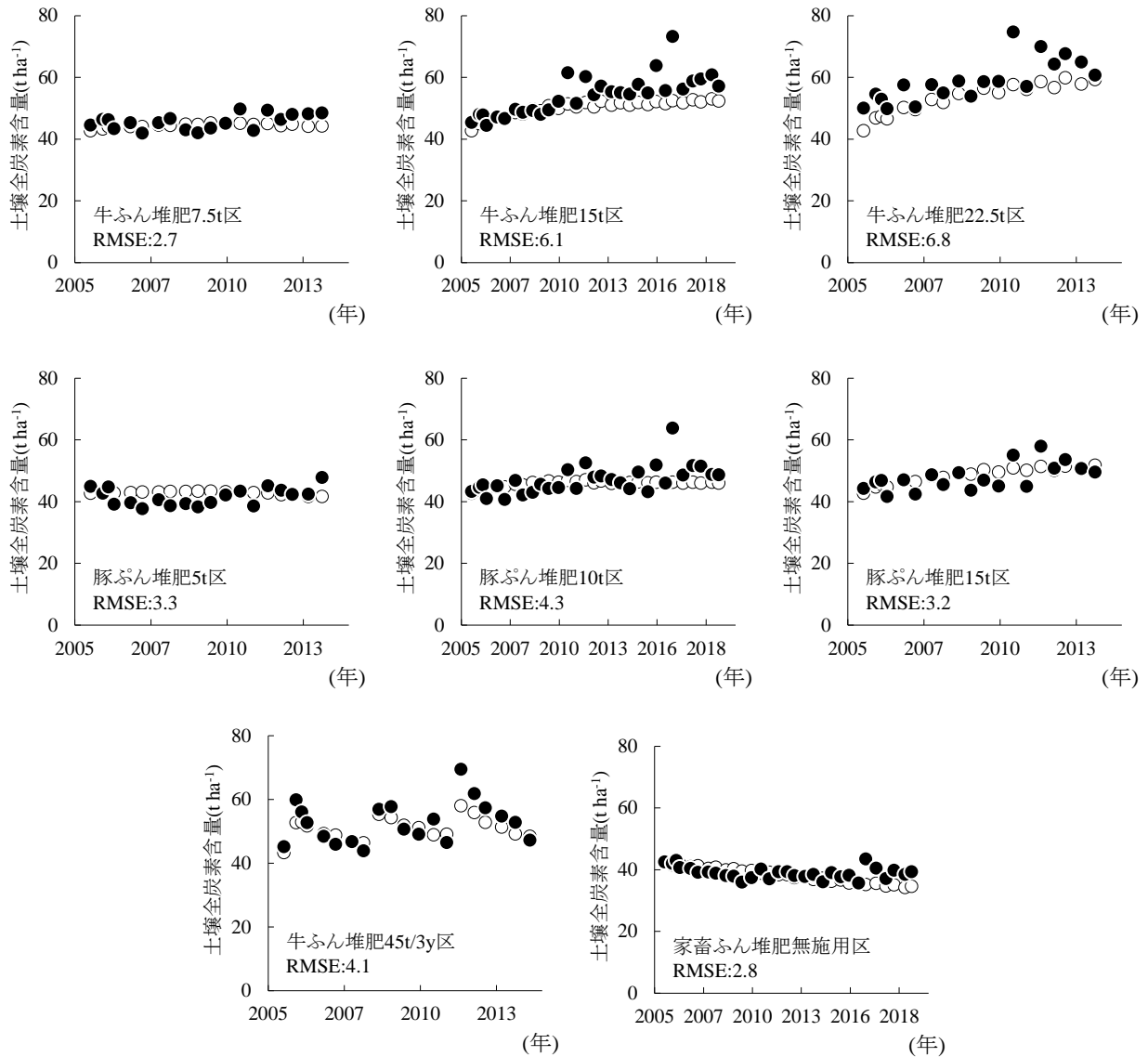


図4 試験4における土壤全炭素含量の実測値(●)と RothC モデル値(○)の経時変化

2 Rothamsted Carbon Model(RothCモデル)による作土の土壤全炭素含量の変化の解析

(1) RothCモデルと入力パラメータ

作土の土壤全炭素含量の変動の解析は、Rothamsted Carbon Model(RothCモデル)⁴⁾のバージョンはRothC-26.3²²⁾で行った。入力パラメータである、月別平均気温及び月別平均降水量は、試験地の近隣にある気象庁観測所の観測データ(長久手市は豊田観測点における1981～2010年の平均値、豊橋市は豊橋観測点における2009～2018年の平均値)²³⁾を用いた。月別の水面蒸発量は、Thornthwaiteの可能蒸発散量²⁴⁾から算出した。月別の植被は栽培履歴から求めた。

(2) 各炭素画分の初期値と特性値

試験開始時点で土壤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)及びHumified organic matter(HUM)の初期値を逆推定した²⁵⁾。Inert organic matter(IOM)はFalloonらの提案した土壤全炭素含量とIOMの関係式²⁶⁾を用いて推定した。作物残さ及び緑肥由来の炭素画分の構成比は農作物のRothCモデルの既定値(DPM=59%、RPM=41%)²²⁾を用いた。牛ふん堆肥や豚ふん堆肥、稲わら堆肥、下水汚泥肥料、汚泥発酵肥料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%)²²⁾を用いた。

(3) 実測値とRothCモデル値の適合性の評価

土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値の二乗平均平方根誤差(RMSE)を計算した。

試験結果

1 試験1

有機質資材の施用歴の違いを反映して、各処理区の試験開始時の土壤全炭素含量の実測値には大きな差が見られた(図1)。このため、家畜ふん堆肥30t-30t区及び家畜ふん堆肥60t-0t区における試験開始時の土壤全炭素含量の実測値は、家畜ふん堆肥15t-15t区よりも多かった。これら家畜ふん堆肥を施用した3処理区では解析期間中に家畜ふん堆肥を多量に施用したにも関わらず、試験開始時と同程度で推移するか、微増傾向であった。一方、稲わら堆肥30t-30t区における試験開始時の土壤全炭素含量の実測値は稲わら堆肥15t-15t区よりも多かったが、解析期間中に稲わら堆肥を施用したにも関わらず減少傾向を示した。堆肥無施用区の土壤全炭素含量の実測値は微減傾向を示し、試験ほ場における改善目標値 42 t ha^{-1} (表1)に達しなかった。各処理区のRothCモデル値は実測値と同様の变化傾向を示した。家畜ふん堆肥を施用した処理区の土壤全炭素含量の実測値のバラツキが大きかったものの、各処理区の土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは5.3～12.8であった。

2 試験2

豚ふん堆肥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たのに対し、豚ふん堆肥無施用区の土壤全炭素含量は試験開始から減少した(図2)。両処理区とも試験ほ場における改善目標値 38 t ha^{-1} (表1)に達しなかった。両処理区の土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル

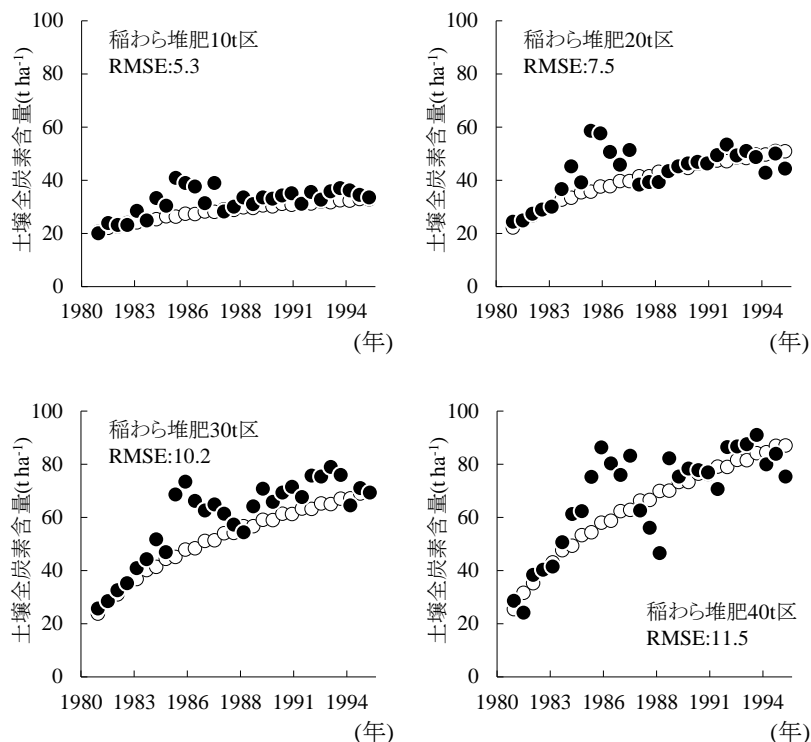


図5 試験5における土壤全炭素含量の実測値(●)とRothCモデル値(○)の経時変化

値から求めたRMSEは2前後で小さかった。

3 試験3

各処理区の炭素投入量の違いを反映し、堆肥と緑肥区の土壤全炭素含量の実測値は増加し(図3)、堆肥区は試験開始時と同程度で推移した。一方、堆肥緑肥無し区の土壤全炭素含量の実測値は減少傾向を示した。全処理区で試験ほ場における改善目標値 42 t ha^{-1} (表1)に達しなかった。堆肥と緑肥区のRothCモデル値は実測値をやや上回ったものの、各処理区の土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは2.0~3.7で小さかった。

4 試験4

牛ふん堆肥7.5t区及び豚ふん堆肥5t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たのに対し、堆肥からの炭素投入量が多かった牛ふん堆肥15t区、牛ふん堆肥22.5t区、豚ふん堆肥10t区及び豚ふん堆肥15t区の土

壤全炭素含量の実測値は増加傾向を示した(図4)。家畜ふん堆肥無施用区では、土壤全炭素含量は減少傾向を示した。牛ふん堆肥または豚ふん堆肥の施用量が異なる各処理区のRothCモデル値は、土壤全炭素含量の実測値と同様の变化傾向を示し、土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは2.7~6.8であった。また、牛ふん堆肥45t/3y区における土壤全炭素含量の実測値は、3年ごとに多量に施用される牛ふん堆肥を反映して、3年ごとに急増してその後は減少する変化を示した。同処理区におけるRothCモデル値も同様の变化を示し、土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは4.1であった。

5 試験5

稲わら堆肥の施用量が多くなるほど、各処理区の土壤全炭素含量の実測値は増加する傾向を示した(図5)。稲わら堆肥40t区の解析期間の最終時における土壤全炭素含量は 80 t ha^{-1} 前後で、試験開始時の4倍程度まで増加した。各処理

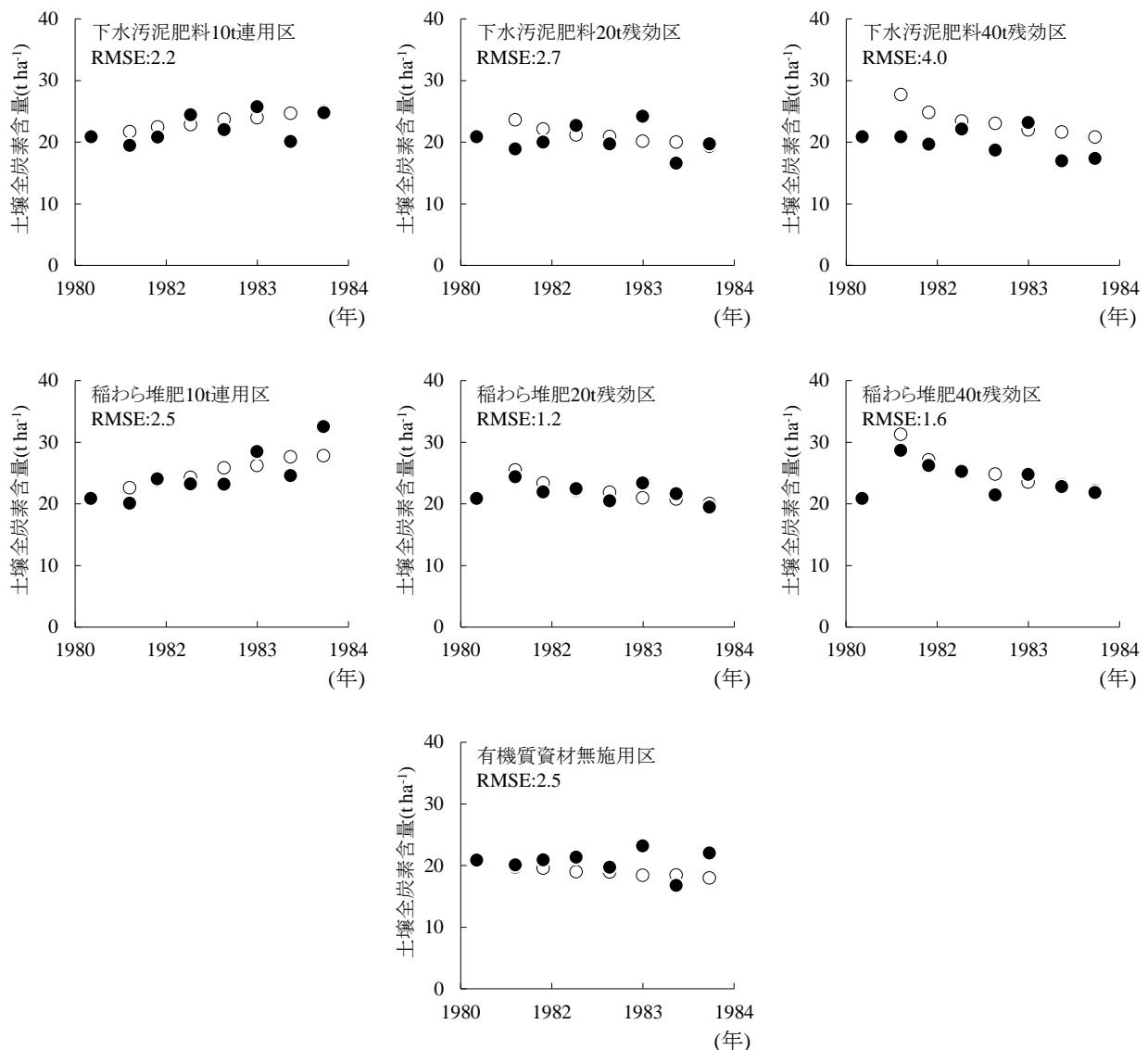


図6 試験6における土壤全炭素含量の実測値(●)とRothCモデル値(○)の経時変化

区の土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは、稲わら堆肥の施用量が多くなるほど大きくなったが、最も大きかった稲わら堆肥40t区のRMSEは11.5であった。

6 試験6

下水汚泥肥料10t連用区と稲わら堆肥10t連用区における土壤全炭素含量の実測値はともに増加傾向を示し、炭素投入量が多かった稲わら堆肥10t連用区でより増加した(図6)。下水汚泥肥料20t残効区及び下水汚泥肥料40t残効区における土壤全炭素含量の実測値は、下水汚泥肥料施用後に増加しなかったものの、その後は実測値もRothCモデル値もともに試験開始時と同程度で推移した。一方、稲わら堆肥20t残効区及び稲わら堆肥40t残効区の土壤全炭素含量の実測値はともに稲わら堆肥の施用後に増加し、その後は減少した。有機質資材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、試験ほ場における改善目標値34 t ha⁻¹に達しなかった(表1)。各処理区におけるRothCモデル値も土壤全炭素含量の実測値と同様の变化を示し、土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは1.2~4.0であった。

7 試験7

試験開始時の土壤の全炭素含量は2.5 t ha⁻¹と少なく、作物残さのみすき込んだ汚泥発酵肥料無施用区でも土壤全炭素含量の実測値は増加傾向を示した(図7)。汚泥発酵肥料10t連用区は作物残さに加えて汚泥発酵肥料による炭素投入があったため、土壤全炭素含量の実測値は汚泥発酵

肥料無施用区よりも増加した。汚泥発酵肥料60t残効区は汚泥発酵肥料施用後に増加したが、その後は同程度で推移し、試験ほ場における改善目標値23 t ha⁻¹(表1)に達しなかった。各処理区のRothCモデル値も土壤全炭素含量の実測値と同様の变化傾向を示し、土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは1前後で小さかった。

8 試験8

いずれの処理区も土壤全炭素含量の実測値は減少傾向を示したが、緑肥からの炭素投入があったソルガム区やクロタラリア区における土壤全炭素含量の実測値の減少程度は夏作休耕区よりも小さかった(図8)。試験開始時における試験ほ場の土壤全炭素含量は、試験ほ場における改善目標値45 t ha⁻¹(表1)よりも多かったが、夏作休耕区の解析期間の最終時の土壤全炭素含量は40 t ha⁻¹前後で、改善目標値よりも少なかった。各処理区のRothCモデル値も土壤全炭素含量の実測値と同様の变化傾向を示し、土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは4.3~5.2であった。

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みた有機質資材施用の必要性

試験開始時の土壤全炭素含量が多かった試験4の家畜ふん堆肥無施用区及び試験開始時の土壤全炭素含量が少なかった試験7の汚泥発酵肥料無施用区を除いて、有機質

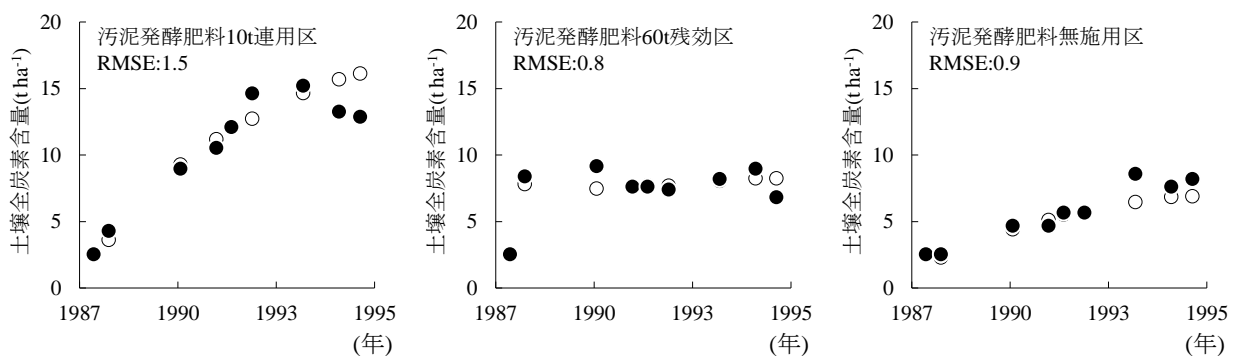


図7 試験7における土壤全炭素含量の実測値(●)とRothCモデル値(○)の経時変化

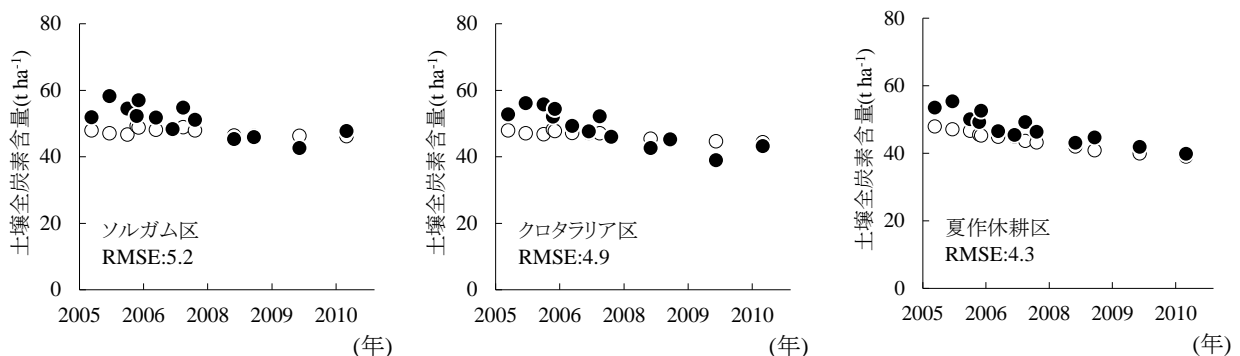


図8 試験8における土壤全炭素含量の実測値(●)とRothCモデル値(○)の経時変化

資材からの炭素投入がなかった各処理区(試験1の堆肥無施用区、試験2の豚ふん堆肥無施用区、試験3の堆肥緑肥無し区、試験6の有機質資材無施用区及び試験8の夏作休耕区)の土壤全炭素含量は減少傾向、あるいは試験開始時と同程度で推移し、各試験ほ場における土壤全炭素含量の改善目標値(表1)に達しなかった。試験4の家畜ふん堆肥無施用区は試験開始前に果樹園として利用され、その後は休耕地として管理されたことから試験開始時の土壤全炭素含量は土壤有機物含量の適正基準下限値よりも多かったものの、試験開始後は減少傾向を示したことから有機質資材の施用が必要であることが指摘されている¹⁴⁾。また、試験7の汚泥発酵肥料無施用区は試験開始時の土壤全炭素含量が少ないため、作物残さからの炭素投入だけでも土壤全炭素含量は増加傾向を示したと考えられるが、同試験の汚泥発酵肥料60t残効区における土壤全炭素含量は土壤有機物含量の適正基準下限値以下のままで推移しており、試験開始2年目以降は汚泥発酵肥料60t残効区と同様に、作物残さのみの炭素投入であった汚泥発酵肥料無施用区の土壤全炭素含量は改善目標値に達しないと考えられる。これらのことから、本試験の畑土壌において、土壤全炭素含量を土壤有機物含量の適正基準下限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と考えられる。同時に、このことは畑土壌における有機質資材の施用による土壤全炭素含量の変化予測と、その評価に基づいた土壌管理法の確立が必要であることを示している。

2 RothCモデルを用いた有機質資材の施用による土壤全炭素含量の変化予測

(1) 有機質資材の施用量及び施用頻度の検証

試験2の豚ふん堆肥施用区、試験4の牛ふん堆肥7.5t区と豚ふん堆肥10t区及び試験6の下水汚泥肥料10t連用区を除いて、有機質資材を施用した処理区のRMSEは、各試験の有機質資材を施用しなかった処理区より大きく、有機質資材の施用量が多いほど大きかった。金沢ら²⁷⁾は、牛糞厩肥の施用により、ほ場内の作土の化学性のバラツキは増大することを報告している。各試験において、有機質資材を施用した各処理区のRMSEが有機質資材を無施用とした処理区よりも大きい傾向を示した要因として、有機質資材を施用したことにより処理区内の土壤全炭素含量のバラツキが大きくなったためと考えられる。しかし、試験5の稲わら堆肥40t区における稲わら堆肥からの1年間の平均炭素投入量は 21.69 t ha^{-1} で、既報^{3,5)}における堆肥由来の1年間の炭素投入量の最大値 7.01 t ha^{-1} (もみガラ豚ふん堆肥)より多量であったが、RothCモデル値は土壤全炭素含量の実測値と同様の変化を示した。また、既報^{3,5)}で未検証であった汚泥肥料について、試験6の下水汚泥肥料10t連用区や試験7の汚泥発酵肥料10t連用区におけるRothCモデル値は土壤全炭素含量の実測値と同様の変化を示した。さらに、試験4の牛ふん堆肥45t/3y区のように牛ふん堆肥3年分を一括施用し、土壤全炭素の急増と減少が3年周期で変化する場合や、試験6の稲わら堆肥残効区のように稲わら堆肥の施用を中止したことで土壤全炭素含量が減少傾向を示す場合にもRothCモデル値は土壤全炭素含量の実測値と同様の変化を示した。本試験に

おける各処理区のRMSEは、RothCモデルを日本国内の水田向けに改良したRothCモデルのRMSEの平均値の $9.3^{28)}$ 、あるいは黒ボク土向けに改良したRothCモデルのRMSEの $6.57 \sim 12.97^{29)}$ と同程度かそれ以下と小さかった。これらのことから、有機質資材による炭素投入量が多い場合だけでなく、有機質資材の施用の中断や不定期に施用する場合といった様々な有機質資材の施用法においても、RothCモデルの適合性は高いと考えられる。

(2) RothCモデルにおける農作物及び有機質資材の炭素画分の構成比の既定値の適合性

これまでに牛ふん堆肥と汚泥肥料は分解特性が異なることが報告されている³⁰⁾。本研究では、有機質資材の炭素画分の構成比をRothCモデルにおけるFYMの既定値²²⁾として、同一の値で計算を行った結果、土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは小さかった。また、試験8では供試した緑肥のソルガムとクロタラリアは栽培された作物がそのまますき込まれるため、その炭素画分の構成比はRothCモデルにおける農作物の既定値²²⁾により求めた。ソルガムとクロタラリアのC/N比は大きく異なったが、土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値から求めたRMSEは他の試験と同様に小さかった。このため、緑肥作物の炭素画分の構成比はRothCモデルにおける農作物の既定値²²⁾が適していると考えられる。分解特性が大きく異なる有機質資材についてはさらなる検討が必要であるものの、本研究で供試した有機質資材を施用した土壌でのRothCモデルにおける農作物やFYMの炭素画分の構成比の既定値²²⁾の適合性は高いと考えられる。

(3) 有機質資材を施用しても土壤全炭素含量が減少する場合の適合性

有機質資材の施用は土壤全炭素含量を増加させることが報告されている^{8,9,14-19)}。しかし、試験1の稲わら堆肥30t-30t区や、試験8のソルガム区またはクロタラリア区では、有機質資材を施用しなかった堆肥無施用区や夏作休耕区に比べて土壤全炭素含量の実測値は多いものの、堆肥や緑肥による炭素の投入があっても、土壤全炭素含量は減少傾向を示した。このことは、土壌管理の前歴によって既に土壤全炭素含量が多い露地畑では、有機質資材の施用は必ずしも土壤全炭素含量の増加をもたらすわけではないことを示している。試験1の稲わら堆肥30t-30t区のように、試験開始前に春作と秋作で 50 t ha^{-1} の家畜ふん堆肥の施用歴があった土壌では、稲わら堆肥による炭素投入があっても関わらず、土壤全炭素含量の実測値及びRothCモデル値はともに減少傾向を示した。解析期間における稲わら堆肥30t-30t区では、作物残さを持ち出していることもあり、作物残さと稲わら堆肥からの炭素投入量が、試験開始前の家畜ふん堆肥からの炭素投入よりも少なかったために減少傾向を示したと考えられる。このことは、土壤全炭素含量が増えるのか、減るのかという変化は、開始点となる土壌管理を変更する時点の土壤全炭素含量に加えて、土壌管理の変更に伴って炭素投入量が増えるのか、減るのかが重要であることを示している。RothCモデルはこうした土壌管理の変更に伴う炭素投入量の変化によく対応し、土壤全炭素含量が減少する場合にも高い適合性を示すと考えられる。

(4) 粘土含量の違いからみたRothCモデルの適合性

土壌有機物の増減に影響する粘土含量について、試験ほ場の粘土含量は、既報³⁾(粘土含量は11.8～27.7%)よりも少ない土壌(粘土含量は5%または8%)、あるいは多い土壌(粘土含量は40%)であった。さらに、作物栽培の種類や作物残さのすき込みの有無、有機質資材の種類や施用量、施用方法が異なる土壌管理がなされていたが、土壌全炭素含量の実測値とRothCモデル値は同様の増減傾向あるいは試験開始時の値と同程度の変化を示した。本試験土壌より粘土含量が少ない、あるいは多い場合には検討を要するものの、本研究の結果から、粘土含量が5～40%と大きく異なる愛知県の畑土壌条件でもRothCモデルの適合性は高いと考えられる。

3 土壌炭素動態モデルを用いた土壌管理技術の確立に向けて

中村ら⁵⁾は、RothCモデルを用いた土壌管理の活用について、砂質露地畑では牛ふん堆肥を施用基準量で16年間連用すれば土壌全炭素含量を土壌有機物の適正基準値まで増加させることができることを報告している。そして、その後は施用基準の7割の施用量でも適正基準下限値を維持することができるため、環境負荷も軽減できるとした。本研究において愛知県の露地畑におけるRothCモデルの適合性が示唆されたことから、RothCモデルを用いて土壌全炭素含量の変化を定量的に予測することが可能であり、目標とする土壌全炭素含量とするために必要な有機質資材の施用量や施用期間といった中長期的な土壌管理の策定に活用できると考えられる。

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. 愛知県農林水産部農業経営課. 農作物の施肥基準. 愛知県. p.1-117(2011)
3. Shirato, Y. and Taniyama, I. Testing the suitability of the Rothamsted Carbon Model for long-term experiments on Japanese non-volcanic upland soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. 49, 921-925(2003)
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. 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. 愛知県農業総合試験場研究報告. 52, 23-30(2020)
6. 愛知県農業総合試験場. 地力保全基本調査総合成績書. 愛知県農業総合試験場. p.1-785(1978)
7. 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.html> (2021.5.7参照)
8. 辻正樹, 山本拓, 糟谷真宏, 鈴木良地, 竹内将充. 牛ふん堆肥を3年一括施用した露地畑における野菜の収量と養分動態. 愛知県農業総合試験場研究報告. 48, 91-99(2016)
9. 辻正樹, 山本拓, 糟谷真宏, 鈴木良地. 黄色露地野菜畑のキャベツ-スイートコーン体系にける堆肥連用による施肥量削減. *日本土壌肥科学雑誌*. 89, 232-236(2018)
10. 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.158-184(1983)
11. 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.63-90(1998)
12. 山本岳, 菅野淳夫, 安井俊樹, 鈴木玉与, 瀧勝俊. 砂質畑土壌における豚ふん堆肥連用による一酸化二窒素排出量の評価. 愛知県農業総合試験場研究報告. 53, 57-66(2021)
13. 中村嘉孝, 糟谷真宏, 安藤薫, 大橋祥範, 瀧勝俊, 大竹敏也. 砂質露地畑における夏季休閑期の豚ふん堆肥の施用とソルガム栽培が秋冬作キャベツ栽培と土壌中の養分動態に及ぼす影響. 愛知県農業総合試験場研究報告. 53, 37-48(2021)
14. 糟谷真宏, 荻野和明, 廣戸誠一郎, 石川博司, 鈴木良地. 牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を連用する黄色土野菜畑における5年間の養分動態. 愛知県農業総合試験場研究報告. 43, 137-149(2011)
15. 今川正弘, 河合伸二, 木下忠孝, 真弓洋一, 大嶋秀雄. 鈳質畑土壌における炭素の蓄積とその効果. 愛知県農業総合試験場研究報告. 21, 281-288(1989)
16. 井上恒久, 今川正弘, 西脇謙二, 白井一則. 稲わら堆肥連用鈳質畑土壌における露地野菜畑の養分吸収と無化学肥料栽培. 愛知県農業総合試験場研究報告. 28, 157-164(1996)
17. 今川正弘, 加藤保, 河合伸二, 木下忠孝, 真弓洋一. 畑地土壌及び野菜に及ぼす汚泥施用の影響に関する研究(第1報). 愛知県農業総合試験場研究報告. 18, 158-167(1986)
18. 豊橋農業技術センター畑地土壌研究室. 下水汚泥コンポストの施用が畑土壌並びに作物に及ぼす影響-肥料的及び土壌改良の効果-. 平成7年度試験研究成績概要書. 521(1995)
19. 糟谷真宏, 廣戸誠一郎. 秋冬キャベツ栽培の夏季休閑期への緑肥作物導入による窒素収支の改善. 愛知県農業総合試験場研究報告. 42, 141-146(2010)
20. 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)
21. 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)
22. 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)
23. 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)
 24. 久保次郎. 蒸発散位とその推定. 天気. 2, 21-24(1955)
 25. Jenkinson, D. S. Meredith, J. Kinyamario, J. I. G. Warren, 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)
 26. 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)
 27. 金沢晋二郎, 川村征夫, 河合武彦, 広瀬春朗, 森山真明, 熊沢喜久雄, 高井康雄. 畑地圃場における土壌の多点試料間の微生物性および化学性のバラツキ. 肥料科学. 2, 99-110(1979)
 28. 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)
 29. Takata Y., T. Ito, T. Ohkura, H. Obara, K. Kohyama and Y. Shirato. Phosphate adsorption coefficient can improve the validity of RothC model for Andosols. Soil Science and Plant Nutrition. 57, 421-428(2011)
 30. 小柳渉, 安藤義昭, 棚橋寿彦. 有機質資材の分解特性とその指標. 日本土壤肥科学雑誌. 78, 407-410(2007)