

土壤炭素動態モデルを用いた茶園における茶樹由来の炭素投入量の 逆推定と土壤全炭素含量の変動解析の可能性

中村嘉孝¹⁾・白井一則²⁾・久野智香子¹⁾・大橋祥範¹⁾・安藤 薫¹⁾・瀧 勝俊¹⁾・大竹敏也¹⁾

摘要: 土壤炭素動態モデル(Rothamsted Carbon Model、以下、RothCモデル)を用いて土壤全炭素含量の変動から茶樹由来の炭素投入量の逆推定及びバーク堆肥を施用した茶園における土壤全炭素含量の変動を解析可能か検討した。土壤全炭素含量の実測値と、剪定枝等の残さのみすき込まれた試験区における1年間当たりの土壤への炭素投入量を3、5、8及び12 t ha⁻¹ y⁻¹と仮定して算出したRothCモデル値により得られた回帰直線の傾きから、茶樹由来の炭素投入量を逆推定した。試験区でのバーク堆肥の施用は、茶樹の樹冠の拡大により畝間に集約されていたので、この点を考慮した条件で算出したRothCモデル値は、実測値と同様な変動を示した。これらのことから、RothCモデルを茶園の炭素動態の解析に活用できることが示唆される。

キーワード: Rothamsted Carbon Model、茶園、土壤全炭素含量、バーク堆肥

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し¹⁾、作物の生産性に大きく影響する。このため、永年作物である茶樹を栽培する茶園土壤において、長期的な計画に基づいた有機質資材の施用が重要である。

土壤有機物含量の変動は、施用する有機質資材の分解特性、施用量及び施用期間だけでなく、気象条件、土壤の粘土含量や種類等によっても影響される。有機質資材の施用が土壤有機物含量に及ぼす影響を明らかにするためには、長期間にわたる調査や試験を実施しなければならず、多大な労力を必要とする。茶園において、土壤有機物含量の指標となる土壤全炭素含量の変動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明らかにすることができる。また、茶園は森林や果樹園に匹敵する炭素吸収能を有することが指摘されている²⁾。茶園における土壤全炭素含量の変動をモデル化することは、茶園における土壤管理だけでなく、茶園の持つ炭素貯留機能を評価することにも役立つ。

英国における畑土壤の長期栽培試験のデータを基に開発された土壤炭素動態モデルRothamsted Carbon Model(以下、RothCモデル)³⁾は、入力パラメータが少なく簡便であり、日本の農耕地土壤の土壤炭素の変動に対する適合性の検証や、改良がなされている⁴⁾。このRothCモデルは、炭素投入量から土壤全炭素含量を算出することから、逆に、土壤全炭素含量の実測値からほ場に投入される炭素量を推定することも可能と考えられる。しかしながら、茶園においてこれら

は十分に検討されていない。

そこで本試験では、土壤炭素動態モデルによる茶園の土壤炭素動態の解析に向けた可能性を検証するため、RothCモデルを用いて、茶園における茶樹由来の炭素投入量の逆推定と土壤全炭素含量の変動解析について検討した結果を報告する。

材料及び方法

1 解析データ及び栽培概要

解析には、愛知県豊橋市(愛知県農業総合試験場東三河農業研究所)の茶園で実施された有機物の施用試験のデータ⁵⁻¹³⁾を用いた(表1)。試験は、1982年に2年生苗の茶樹「やぶきた」を畝間1.8 m、株間0.3 m、単条で定植したほ場で行われた。作土の深さは、毎年8月に行った耕うんの深さにあわせて20 cmとした。剪定枝はすべて畝部にすき込んだ。施用試験のデータは、定植時と毎年のバーク堆肥施用量を表2のとおり設定された4試験区で得られた。各区2連制で、解析には平均値を用いた。なお、施用したバーク堆肥の水分及び炭素含有率は、全国バーク堆肥工業会の品質基準¹⁴⁾から、それぞれ60%及び40%とした。年間の化学肥料の施肥量は、窒素が定植後1年目は290 kg ha⁻¹、2年目は390 kg ha⁻¹、3年目は455 kg ha⁻¹、4年目は520 kg ha⁻¹、5年目以降は650 kg ha⁻¹とした。リン酸(P₂O₅)及びカリウム(K₂O)は毎年、それぞれ300 kg ha⁻¹施肥した。栽培期間中に石灰質肥料は施用しなかった。秋肥前の8月に畝間の作土を採取した。解析期間は1982年から1991年までとした。

¹⁾ 環境基盤研究部 ²⁾ 東三河農業研究所(退職)

2 Rothamsted Carbon Modelによる土壌全炭素含量からの茶樹由来の炭素投入量の逆推定と土壌全炭素含量の変動解析

(1) RothCモデルと入力パラメータ

作土の土壌全炭素含量の変動解析は、Rothamsted Carbon Model(RothCモデル)³⁾バージョンRothC-26.3¹⁵⁾で行った。入力パラメータは次のとおりとした。気象データは試験ほ場の近隣にある気象庁豊橋観測所の観測データ(2009～2018年の平均値)¹⁶⁾を用いた。月別の水面蒸発量は、Thorntwaiteの可能蒸発散量¹⁷⁾から算出した。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)及びHumified organic matter(HUM)の初期値を逆推定した¹⁸⁾。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¹⁹⁾から推定した。

(2) 土壌全炭素含量からの茶樹由来の炭素投入量の逆推定

剪定枝や落葉等の茶樹由来の炭素投入量(1年間の平均値)は、有機質資材を無施用としたBC-0-0区における土壌全炭素含量の変化から逆推定した。逆推定の手順は、まず、1年間当たりの炭素投入量を3、5、8または12 t ha⁻¹ y⁻¹としたRothCモデル値と、土壌全炭素含量との回帰直線を求めた。次に、その回帰直線の傾きが1となる炭素投入量(逆推定値)を算出した。この茶樹由来の土壌へ投入される炭素画分の構成比は、RothCモデルにおける落葉樹の既定値(DPM=20%、RPM=80%)¹⁵⁾を用いた。

(3) バーク堆肥を施用した茶園の土壌全炭素含量の変動解析

(2)で逆推定した茶樹由来の炭素投入量を基に、BC-200-20区及びBC-0-20区における土壌全炭素含量の変動解析を行った。定植時のバーク堆肥は深さ30 cmまで混和したため、定植時におけるバーク堆肥から作土への炭素投入量は、作土の深さに合わせて3分の2に案分した。BC-200-20区及びBC-0-20区におけるバーク堆肥の施用法について、バーク堆肥を畝間に面積当たりで施用した場合(20 t ha⁻¹、以

下、Pt1)と、ほ場全体の面積当たりの施用量を畝間に集約して施用した場合(20 t 畝間⁻¹、以下、Pt2)の2つの条件で解析した。Pt2における茶樹の生育に伴う畝間の変化は次のとおり仮定した。定植後1年目の畝間は1.6 m、2年目以降は樹冠の拡大により毎年0.325 m狭くなり、5年目以降の畝間は0.3 mで一定になるとした。バーク堆肥の炭素画分の構成比は、RothCモデルの既定値(DPM=49%、RPM=49%、HUM=2%)¹⁵⁾を用いた。

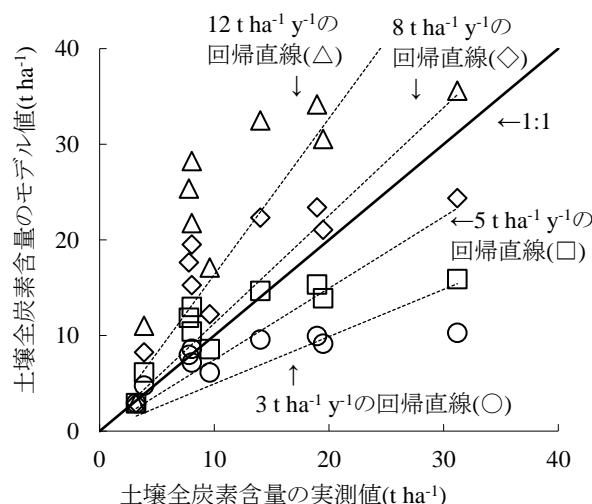
(4) 実測値とRothCモデル値の適合性の評価

土壌全炭素含量の実測値とRothCモデル値から決定係数(R²)を算出した。

結果及び考察

1 RothCモデルを用いた茶樹由来の炭素投入量の逆推定

有機質資材を無施用としたBC-0-0区において、1年間当たりの土壌への炭素投入量を3 t ha⁻¹ y⁻¹または5 t ha⁻¹ y⁻¹と仮定して得られた土壌炭素含量の実測値とRothCモデル値の回帰直線の傾きは1よりも小さく、同様に炭素投入量を8 t ha⁻¹ y⁻¹または12 t ha⁻¹ y⁻¹と仮定して得られた回帰直線の傾きは1よりも大きかった(図1)。このことから、RothCモデルによる土壌炭素含量の変動解析からみた1年間の平均炭素投入量は、5 t ha⁻¹ y⁻¹から8 t ha⁻¹ y⁻¹の間であることが示唆された。この4つの回帰直線の傾きから、実測値とモデル値の回帰直線の傾きが1、すなわち実測値と最も一致すると考えられる炭素投入量を逆推定すると6.99 t ha⁻¹ y⁻¹であった(図2)。この値(6.99 t ha⁻¹ y⁻¹)は解析期間における1年間の平均値であり、茶樹の生育に伴う剪定枝等の残さ量の変動は考慮されていない。しかしながら、この逆推定値を炭素投入量とし



炭素投入量の仮定値: 実測値(x)、モデル値(y)の回帰式
 3 t ha⁻¹ y⁻¹ : y = 0.4943 x
 5 t ha⁻¹ y⁻¹ : y = 0.7477 x
 8 t ha⁻¹ y⁻¹ : y = 1.1277 x
 12 t ha⁻¹ y⁻¹ : y = 1.6343 x

図1 BC-0-0区における土壌全炭素含量の実測値と異なる炭素投入量の仮定値から得られたモデル値との関係
 図中の○は3 t ha⁻¹ y⁻¹、□は5 t ha⁻¹ y⁻¹、◇は8 t ha⁻¹ y⁻¹、△は12 t ha⁻¹ y⁻¹の炭素投入量と仮定した場合、点線は各回帰直線、実線は1:1の直線を示す

表1 試験ほ場の概要

緯度	経度	作土深	粘土	初期SOC ¹⁾	IOM ²⁾
N	E	(cm)	(%)	(t ha ⁻¹) ³⁾	
34°75	137°44	20	5.0	3.2	0.18

試験土壌は赤黄色土に花崗岩の風化土を38 cm 客土

1) 試験開始時の土壌全炭素含量

2) Inert organic matter¹⁹⁾

3) 作土20 cm 当たり

表2 試験区の概要

試験区	バーク堆肥の施用量(t ha ⁻¹)	
	定植時	毎年
BC-0-0区	0	0
BC-200-0区	200	0
BC-200-20区	200	20
BC-0-20区	0	20

たBC-0-0区及びBC-200-0区における土壤全炭素含量のRothCモデル値は実測値と同様な変動を示した(図3、図4)。

2 RothCモデルを用いたバーク堆肥の施用量の推定

バーク堆肥を毎年施用したBC-200-20区及びBC-0-20区における土壤全炭素含量の実測値は、データ解析期間の1982年から1991年にかけて、3.2 t ha⁻¹から90 t ha⁻¹前後に増加した(図5、図6)。両区において、Pt1における1991年のRothCモデル値は、30 t ha⁻¹前後で実測値よりも少なかった。一方で、Pt2のRothCモデル値は実測値と同様に試験開始から急増し、1991年には70 t ha⁻¹前後となった。この値は、実測値よりも少ないものの、Pt1のRothCモデル値よりも実測値に近かった。Pt1において、炭素投入量が最も多いBC-200-20区の解析期間におけるバーク堆肥からの積算炭素投入量は50 t ha⁻¹で、土壤全炭素含量の実測値の増加量よりも少なかった。一方、Pt2のBC-200-20区における解析期間のバーク堆肥からの積算炭素投入量は141 t ha⁻¹で、土壤全炭素含量の実測値の増加量よりも多かった。両区とも、RothCモ

デル値はPt2の値の方がPt1の値よりも土壤全炭素含量の実測値に近似していたことに加え、土壤の全炭素含量の増加が炭素投入量を上回ることにはないことから、本試験において施用したバーク堆肥は、ほ場全体の面積当たりの施用量を畝間に集約して施用していた(Pt2)と考えられる。

3 RothCモデルの適合性

全区の土壤全炭素含量の実測値とRothCモデル値(BC-200-20区及びBC-0-20区におけるバーク堆肥の施用方法はPt2)から求めたR²は0.791で、1%水準で有意な相関関係があった(図7)。このことから、茶園における土壤全炭素含量の変動解析にRothCモデルが適合することが示唆された。

4 RothCモデルによる茶園の炭素動態の解析の可能性

前述のとおり、バーク堆肥の畝間への集約施用が示唆されることを考慮すると、逆推定した茶樹由来の1年間当たりの

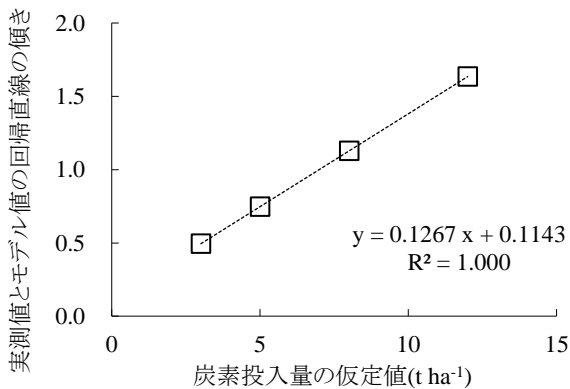


図2 炭素投入量の仮定値と土壤全炭素含量の実測値とモデル値の回帰直線の傾きの関係

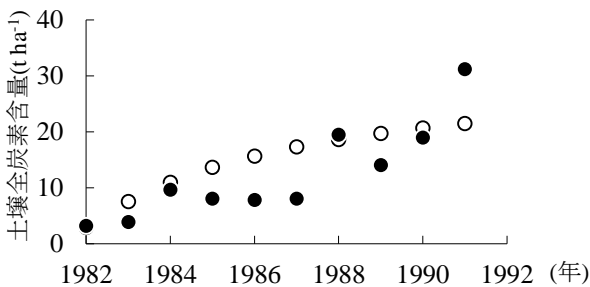


図3 BC-0-0 区の土壤全炭素含量の年次変化
図中の●は実測値、○はモデル値を示す

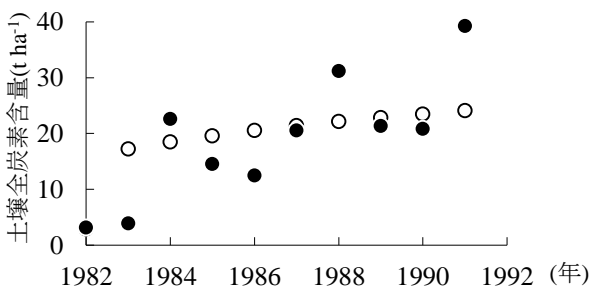


図4 BC-200-0 区の土壤全炭素含量の年次変化
図中の●は実測値、○はモデル値を示す

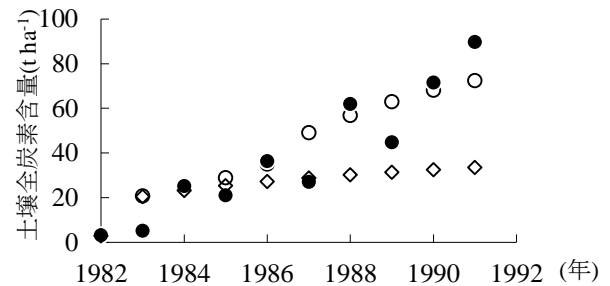


図5 BC-200-20 区の土壤全炭素含量の年次変化
図中の●は実測値、◇(:Pt1)はバーク堆肥(20 t ha⁻¹)を畝間の面積当たりで施用したと仮定したモデル値、○(:Pt2)はほ場全体の面積当たりのバーク堆肥を畝間に集約して施用したと仮定したモデル値を示す

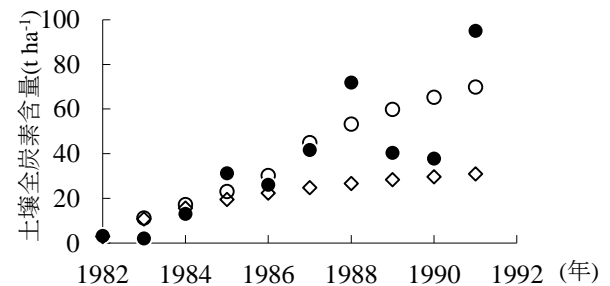


図6 BC-0-20 区の土壤全炭素含量の年次変化
図中の凡例は図5と同じ

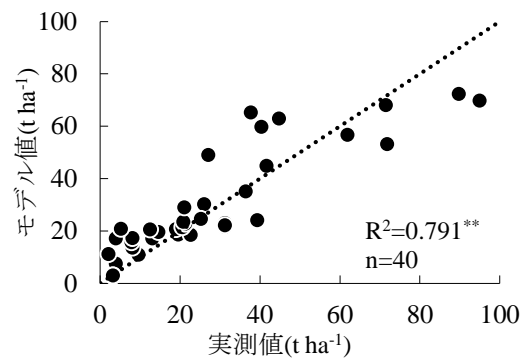


図7 土壤全炭素含量の実測値とモデル値の関係
** 1%水準で有意性あり
図中の点線は 1:1 の直線を示す

平均炭素投入量(6.99 t ha⁻¹ y⁻¹)も同様に畝間に集約的に投入されたと推測される。この茶樹由来の年間平均炭素投入量6.99 t ha⁻¹ y⁻¹を、定植5年後に一定とした畝間面積0.17 haで除してほ場全体の面積当たりに換算すると、ほ場全体でみた茶樹由来の平均炭素投入量は1.19 t ha⁻¹ y⁻¹となる。南雲・森田²⁾は、国内茶園(5年生)の茶樹由来の炭素投入量は、整枝残さ由来0.39 t ha⁻¹ y⁻¹、せん枝残さ由来0.32 t ha⁻¹ y⁻¹、落葉由来0.20 t ha⁻¹ y⁻¹、計0.91 t ha⁻¹ y⁻¹と試算している。根由来の土壌への炭素投入量は既報²⁾も本試験も明らかではないが、本試験で土壌全炭素含量から逆推定し、根も含めた茶樹由来の土壌への炭素投入量(1.19 t ha⁻¹ y⁻¹)はこの報告値(計0.91 t ha⁻¹ y⁻¹)に近い値であった。したがって、RothCモデルの逆推定値の妥当性は高いと判断した。加えて、茶樹由来の土壌への炭素投入量は樹齢²⁾やせん枝強度によって異なる²⁰⁾ものの、本結果からは土壌全炭素含量の変動から茶樹由来の炭素投入量を予測できることが示唆される。

茶園では労働力不足等から耕うんされず、その結果、畝間に剪定枝残さが堆積することが報告されている²¹⁾。耕うんされないと土壌と剪定枝残さが混和されないため、土壌全炭素含量にも影響することが考えられる。本試験は耕うんにより剪定枝残さやバーク堆肥と土壌が混和されたが、畝間を耕うんしない場合については耕耘条件を変えた研究が必要である。また、本試験における畝間の土壌全炭素含量は、剪定枝残さやバーク堆肥の投入を反映して試験開始から大きく増加した。一方で、そうした茶樹由来の炭素投入や土壌管理の影響が小さい樹冠下の土壌全炭素含量は畝間の土壌に比べて少なく、茶園全体でみた土壌中の炭素量には、大きな偏在があると考えられる。このため、茶園全体の土壌の炭素含量の評価において、畝間と樹冠下の土壌管理の違いに留意すべきと考えられる。

本試験の結果から、RothCモデルは茶園における炭素動態の解析に活用できることが示唆される。本モデルの実用性を高めるには、今後、実測値を基にした逆推定値の検証と土壌炭素動態の解明を進める必要がある。茶園における土壌炭素動態の解明にあたっては、畝間と樹冠下の土壌で土壌管理が大きく異なること、茶樹の成長による畝間の変化を考慮して解析することに留意すべきである。

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. 南雲俊之, 森田明雄. 茶園のもつ二酸化炭素吸収源機能. 日本土壌肥料学雑誌. 89, 283-294(2018)
3. 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)
4. 白戸康人. 日本およびタイの農耕地における土壌有機物動態モデルの検証と改良. 農業環境技術研究所報告. 24, 23-94(2006)
5. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 昭和58年度試験研究成績摘要集. 13, 411(1984)
6. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 昭和59年度試験研究成績概要書. 14, 427(1985)
7. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 昭和60年度試験研究成績概要書. 15, 442(1986)
8. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 昭和61年度試験研究成績概要書. 16, 452(1987)
9. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 昭和62年度試験研究成績概要書. 17, 468(1988)
10. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 昭和63年度試験研究成績概要書. 18, 408(1989)
11. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 平成元年度試験研究成績概要書. 482(1990)
12. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 平成2年度試験研究成績概要書. 475(1991)
13. 豊橋農業技術センター茶業研究室. 茶園における有機物の施用効果. 平成3年度試験研究成績概要書. 459-460(1992)
14. 全国バーク堆肥工業会. 2020. バーク堆肥の品質基準. <http://zmchip.com/bark/> (2020.8.10参照)
15. 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))
16. 気象庁. 過去の気象データ検索. (2019). <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2020.8.10参照)
17. 久保次郎. 蒸発散位とその推定. 天気. 2, 21-24(1955)
18. 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)
19. 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)
20. 中村充. 茶園のせん枝による刈り落とし枝葉の分解と養分動態. 茶業研究報告. 66, 68-75(1987)
21. 志和将一, 西野英治, 和田義彦, 仲上和博, 今村嘉博. 茶園うね間における整せん枝残さ堆積の実態とそれが施肥窒素の土壌における動態に及ぼす影響. 茶業研究報告. 108, 29-38(2009)