

略 歴

1987年 3月 茨城大学農学部卒業
1987年 4月 茨城県庁入庁
1988年 4月 茨城大学農学部助手
1997年 1月 博士(農学) (筑波大学)取得
1998年10月 茨城大学農学部助教授
2007年 4月 茨城大学農学部准教授
現在に至る

土壤炭素貯留を飛躍的に向上させる脱温暖化農作業管理システム

New Farming Strategy to Enhance the Soil Carbon Sequestration to Mitigate Global Warming

Today's agricultural technologies may be increasing productivity, but they may also be threatening agricultural ecosystems. Cover crops and no-tillage practices may be effective tools for ensuring sustainable agriculture and eco-system service; because these soil management strategies increase soil organic matter and improve soil biological diversities and activities in intensively managed summer field cropping system. And also these farming system may contribute to mitigate global warming because these farming system strongly enhance the soil carbon sequestration. A 5 years field research in the field science research & education center, Ibaraki University, Japan, revealed that a combined with no-tillage system with cover cropping showed significantly high crop productivities and environmental advantages compare with conventional system, because these soil managements can improve carbon sequestration.

緒 言

IPCCは2007年2月に、温暖化の主因は二酸化炭素などの温室効果ガスと断定し、その被害は地球全域に及ぶと警告を発し、温暖化は戦争や核の拡散と同じように人類の生存の脅威とみなされつつある。わが国では、京都議定書に定められた温室効果ガスの削減目標の達成が危ぶまれる一方で、二酸化炭素の吸収源として森林管理に加えて、農耕地土壌の炭素吸収機能に注目が集まっている。農耕地における炭素貯留機能を高める手法としては、堆肥の投入と並びカバークロップの導入が注目される。

カバークロップは、比較的粗放で乾物生産量の高い作物を利用することが多く、これらのもつ炭素固定能力は極めて高い。カバークロップなどの植物体は光合成により大気中の二酸化炭素を取り込み、これらの植物遺体が土壌中で分解する過程で「腐植」や「土壌有機物」として数百年から数千年という長期間にわたって安定的に土壌中に蓄積される。土壌中に蓄積された炭素は長期間にわたって大気中の炭素循環から隔離されることから、土壌における炭素隔離機能(carbon sequestration)とよばれ、二酸化炭素の吸収源となる。

土壌中に存在する炭素量は、2兆5000億トン(有機炭素として1兆5500億トン、無機炭素として9500億トン)と見積もられ、土壌の炭素貯留は大気中の炭素量(7600億トン)の3.3倍であり、生物界の炭素量(5600億トン)の4.5倍に相当する(Lal 2004)。土壌の炭素貯留量は莫大であり、その増減によって大気中の二酸化炭素濃度の変化に大きな影響を及ぼすことになる。例えば、Lal(2004)は、産業革命以前までの炭素放出は、農地開発などの土地利用の変化により3200億トンのみであったのに対し、産業革命以降の最近200年の間をみると化石燃料の使用による放出が 2700 ± 300 億トンであり、土地利用の変化による放出が 1360 ± 50 億トンとなることを試算し、土壌管理のあり方によって非常に多くの炭素を放出してきたことを述べている。

このような背景から、1997年12月の気候変動枠組条約・第3回締約国会合(COP3)で採択された京都議定書では、森林や農業などによる「追加的かつ人為的活動」による炭素吸収源を拡大することで二酸化炭素の数値目標達成のために利用できることを認めた。しかし、「追加的かつ人為的活動」の定義については、極めてあいまいなものであり、議論が多い。まず、グローバルレベルでの陸域生態系の炭素固定量について誤差が大きく、不確実性が極めて高い(高村・亀山 2002)。また、土壌などに吸収した炭素の永続性についても議論が多い。吸収源活動による炭素吸収が永続的に維持されなければ、将来的に排出源となってしまうリスクも指摘されている(Ciais et al. 2005)。しかし、各国において京都議定書の温室効果ガス削減目標の達成が厳しい状況から、土壌の炭素貯留機能に対する注目が高まり、ドイツのボンで開催されたCOP6(2001年7月)では、「農耕地管理などによる追加的人為的活動(土地利用変化)に限り、その吸収分を削減量として計上できる」ことが暫定的に合意され、その後COP7で正式合意された(マラケシュ合意)。そこでは、2008年から2012年(第一約束期間)においては、京都議定書第3条4項に基づく1990年以降の森林経営・農地管理等による純吸収量を総排出量から控除することを認めている。

現在、農地土壌を吸収源として選択している国々としては、ポルトガル、スペイン、デンマーク、カナダがある。カナダでは、京都議定書第一約束期間においても農地土壌を吸収源としてカウントすることとしており、土壌浸食防止等のための取り組みや不耕起栽培の推進により900万CO₂トン(1

トン炭素は3.67トンCO₂に換算できる)を計上している (Greenhouse Gas Divisions Environment Canada 2007)。

わが国では、農地土壌の純吸収量の算出に必要なデータが十分でないことから第一約束期間については農地土壌を吸収源として選択していない。しかしながら、土壌が有する公益的機能が注目される中で、農耕地土壌のもつ炭素貯留機能は改めて注目されつつあり、農水省は地球温暖化対策で2013年以降の新しい国際協定(ポスト京都議定書)の策定に向け、これまで温室効果ガスの排出源に分類していた農地を二酸化炭素の吸収源として扱う本格的な検討を開始している。

わが国ではカバークロップ導入による土壌炭素貯留量の増加についての検討事例は少ない。カバークロップが固定した炭素は、その残渣が圃場に還元されることで土壌中において急速に分解される。カバークロップ残渣の分解速度は、カバークロップ残渣のリグニン、ヘミセルロースおよびセルロースなどの組成の違い、炭素率(C/N比)の違い、およびカバークロップ残渣の圃場還元方法による違いにより大きく影響を受ける(Waggen *et al.* 1998)。

ここでは、農耕地土壌の炭素貯留機能を最大限に発揮させる農作業システムとして、カバークロップの利用と不耕起栽培を取り上げ、これらの農法が土壌炭素貯留にどのような影響を及ぼすのか検討した。

材料および方法

圃場設定

試験は茨城大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センター内の試験圃場(洪積台地, 土性: CL, LiC)で行った。試験期間は2003年より継続中で、主要作物は2003年から2007年まではオカボを栽培し、2008年からはダイズを栽培している。品種はオカボはユメノハタモチ、ダイズは2009年まではエンレイ、2010年から納豆小粒である。さらに2010年より肥料を鶏糞堆肥に変え、化学肥料や農薬の使用を行わない有機栽培として試験を継続させている。試験要因は耕うん方法3水準(1. プラウ, 2. ロータリー, 3. 不耕起)、カバークロップ3水準(1. ヘアリーベッチ, 2. ライムギ, 3. 裸地)、窒素施肥2水準(0.0kg ha^{-1} , 12.0kg ha^{-1})とし、試験区画はsplit - split plot design を用いて準ランダムに配置し4反復、計72区画で試験を行った。1区画の面積は6m \times 3mの18m²とした。

2009年度においては、10月15日にカバークロップ区においてカバークロップを播種し、2008年5月21日、22日にカバークロップを刈り取った。6月5日、6日に耕起区において耕うんを行い、6月10日にダイズを播種した。品種はエンレイを使用し、畝間cm、株間cmで植え付けた。6月11日に除草剤(ラウンドアップ)を散布した。6月25日には施肥区において規定量の窒素施肥を行った。7月8日にウサギからの食害を防ぐため電気柵を取り付けた。8月27日、9月27日には害虫対策としてスミチオンを散布した。10月20日にダイズを収穫した。10月29日にはカバークロップ区においてカバークロップを播種した。

土壌炭素貯留量の測定

土壌サンプラーを用いてサンプリングを行った。また表層土はスコップを用いて土壌を採取した。サンプリングされた土は深さごとに4つ(0~2.5cm, 2.5~7.5cm, 7.5~15cm, 15~30cm)に分

けた。また均一性に配慮するため1区画につき2箇所 of 土を採取し、それらを混ぜて1区画分のサンプルとした。

サンプルは1週間の風乾後グラインディングを行い、2mmのふるいによって異物を取り除いた後、100℃の炉で24時間炉乾し水分を取り除いた。その後CNコーダーによって炭素量を分析した。

乾燥密度を計測するため、年1回カバークロップ刈り倒し前に施肥区から2反復計18区画の土壌を採取した。土壌は直径5cm、深さ29.5cmのコアサンプラーを用いて非破壊で採取した。採取した土はコアのまま4つ(0～2.5cm, 2.5～7.5cm, 7.5～15cm, 15～30cm)に切り分け炉乾し、それぞれの重さから乾燥密度を求めた。

以上のデータを用いて、0から30cmまでの土壌炭素貯留量を算定した。

結果および考察

2002～2007年までの5年間における0～30cmにおける土壌炭素貯留量の推移をみると、耕うん方法とカバークロップの利用により、土壌炭素貯留は著しく変化した(図1)。不耕起栽培での裸地およびカバークロップ利用並びにロータリ耕のカバークロップ利用で土壌炭素貯留量は増加傾向を示したが、プラウ耕の裸地およびカバークロップ利用並びにロータリ耕の裸地で土壌炭素貯留量はやや減少傾向を示した。また、試験開始5年後における土壌炭素貯留量(春と秋の平均値)をみると、不耕起栽培の導入により、ロータリ耕やプラウ耕などの耕うん体系に比べそれぞれ0.04および0.40トンC/haの土壌炭素を増加させている。また、カバークロップの利用はそれぞれの耕うん方法において裸地に比べて著しく土壌炭素を増加させており、プラウ体系では、裸地に比べてライムギおよびヘアリーベッチ利用でそれぞれ0.62および0.42トンC/haの土壌炭素の増加が認められ、ロータリ耕体系では同様に裸地に比べてライムギおよびヘアリーベッチ利用でそれぞれ1.43および0.97トン/haの土壌炭素の増加が認められている。これに対し、不耕起体系では、ライムギおよびヘアリーベッチ利用で裸地に比べてそれぞれ1.16および0.65トン/haの土壌炭素の増加が認められた。

これらのデータから、5年間の土壌炭素貯留量の年間の変動率を求めてみると、表1のとおりである。これによれば、いずれの耕うん体系においても冬作裸地条件下では土壌炭素貯留量が減少した。また、プラウ耕では、カバークロップ導入によって、土壌炭素貯留量が維持されるが、ロータリ耕および不耕起体系では、土壌炭素貯留量は著しく増加し、年間最大で1.36トンC/haの増加を示している。

農業生産の持続性確保に向けて、土壌有機物を増加させることは、二酸化炭素の吸収源のほかに、投入施肥量削減、長期的な収量の安定などの効果がある。たとえば、Lal(2004)は、劣化した農耕地における1トン/haの土壌炭素の増加により、コムギで20～40kg/ha、およびトウモロコシで10～20kg/haの収量増があることを述べている。

欧米などで実施されている長期圃場試験の結果をみると、土壌有機物の増減が作物生産性の持続的な向上にきわめて重要であることが示されている(Weil and Magdoff 2004)。例えば、米国アラバマ州のOld Rotation圃場では、1986年から耕地生産の持続性とカバークロップの利用について世界でもっとも古い連輪作の試験を実施しているが、カバークロップの作付により綿花の収量が100年にわたって高く維持することが可能であり、化学肥料のみでは得られない効果があることを実証

している (Mitchell 1996)。その理由として、土壌有機物含有量がカバークロープ利用により高く維持されることが生産性持続の鍵となることが指摘している (Mitchell 1996)。輪作やカバークロープの利用により土壌有機物含有量が高まることは周知のことでもある。しかしながら、現実には100年間

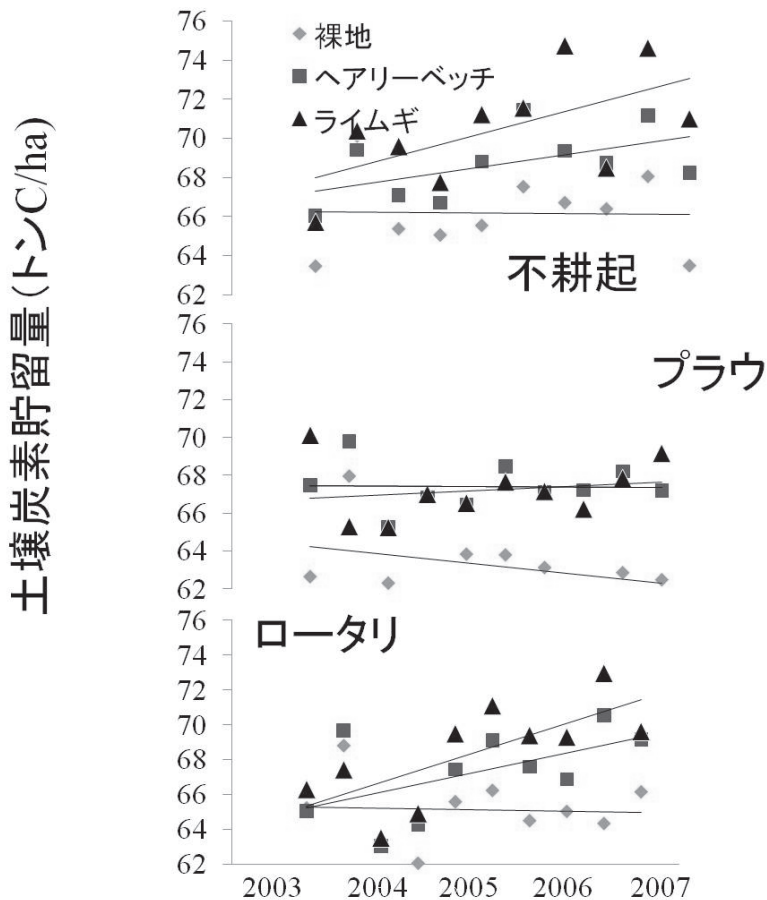


図1 異なる耕うん方法とカバークロープの利用が土壌炭素貯留量に及ぼす影響

表1 カバークロープと耕うん方法別の年間の土壌炭素貯留の増加率 (tonC/ha/年)

カバークロープの種類	不耕起	プラウ耕	ロータリ耕
裸地	▲0.03	▲0.43	▲0.07
ヘアリーベッチ	0.62	▲0.01	0.90
ライムギ	1.13	0.19	1.36

注) 試験期間中春と秋の年2回測定した全炭素含有率 (%) に仮比重を乗じて深さ30cmあたりの炭素貯留量を求め、この推移を回帰直線に表し、当該回帰直線の傾きから年間の土壌炭素増加量を求めた。▲印はマイナスを示す。

という土壌管理において土壌そのものが変化し、農作業という人間の働きかけに対して、まったく異なる生産性を示す事実は、わが国の農業生産の持続性を考えていくうえで示唆の多いものと考えられる。

土壌有機物のもつ農業生産上の役割については、土壌養分の供給源と保持能力の強化、土壌水分保持能力と排水性の向上、土壌病害虫の発生抑制、水食・風食などによる土壌流失の抑制などに加えて耕地内の栄養塩類の利用効率向上に起因する地域の水質改善などの多面的な効果がある(Weil and Magdoff 2004; Komatsuzai and Ohta 2006)。しかしながら、土壌環境基礎調査の結果をみると、たとえば普通畑(黒ボク土)では、1960年から2000年の間に約5%の土壌有機物量が減少しており、地力増進基本指針では年間の堆肥の標準施用量として15～30トン/haと定めているが、農業労働力の減少・高齢化などにより有機物投入量は年々減少し、普通畑の4割で土壌中の有機物量に関わる改善目標を下回っているのが実情である(草場 2001)。

わが国において、農業の持続的発展と多面的な機能の健全な発揮を図るためには、土壌炭素に注目した土壌管理手法は極めて重要であり、「持続農業法」では、土壌炭素の増加・保全にむけて堆肥などの有機物投入を促している。しかし、土壌炭素の向上と地域の環境保全との両立を考えると、耕地に土壌有機物を投入するという視点に加えて、残留土壌養分を積極的に回収・制御するという視点も重要である。たとえば堆肥などの有機物由来の養分流出などの問題や(越野 1989)、畜産系堆肥の過剰施用による野菜の硝酸集積や溶脱などの問題を生じる可能性が指摘されている(Maeda et al. 2003)。このため土壌炭素を積極的に増加させる一方で土壌養分の溶脱防止など耕地内の養分循環の最適なマネジメントとを可能にするカバークロップの利用がますます重要となるものと考えられる。

有機物連用試験による土壌炭素の増加量をみると、黒ボク土での稲わら堆肥を15～30トンを連年施用した場合の年間の炭素貯留増加量は0.251～0.593トン炭素/haと試算される(農林水産省生産局環境保全型農業対策室 2007)。これに対し、カバークロップ連用による土壌炭素貯留増加量は、ライムギの利用により、0.49～0.57トン炭素/haであり、堆肥投入とほぼ同等の炭素貯留増加量が期待できる。

カバークロップによる有機物供給は、堆肥利用に比べて①大量の有機物を容易に農耕地に返すことができる、②土壌中の残留養分を回収・再利用できる、③土壌微生物相への活性化程度が堆肥よりも高い、④団粒化が進みやすく土壌物理性改善効果が高い、⑤土壌の侵食を防ぐことができるなどの極めて多面的な効果がある。しかし、欠点としては未熟有機物のすき込みによる糸状菌類の増加や有機酸の増加など、すき込み—後作物播種までの期間を十分にとることが必要となるなど、現行の農作業体系・計画の変更が必要となる場合もある。

土壌炭素を増加させる農業システムは、農家にとって短期的に必ずしも経済的な得策となるとは限らない。たとえば、国内企業が自主的に二酸化炭素の排出量を削減して過不足分を企業間で売買する「自主参加型排出権取引制度」による取引価格は二酸化炭素1トンあたり平均1,212円であり(日本経済新聞社 2007年9月12日付)、農耕地の炭素貯留量から試算される1haあたりの排出権料は年間1000円程度となる(参考:EUの排出権取引価格では約4000円となる)。このため、経営面積の小さい日本の農業経営において、農耕地の炭素クレジットの割当てにより直接的なメリットは限定的である。しかしながら、土壌劣化と気候変動との相互作用により農業の脆弱性が增大することが予測される中で、カバークロップの導入により耕地に生物的な多様性をもたせ、耕地内の炭素供給を増

加させることは、農業生産の持続性のみならず窒素循環や土壌線虫などの生物相を改善することで農薬・肥料を削減でき、農業生産の健全性を高める可能性がある。カバークロップを導入した農法は石油資源に過度に依存しない生産システムの構築に寄与するものであり、わが国における長期的な食料安全保障の視点からも極めて重要である。

摘 要

カバークロップの利用と耕うん方法が土壌炭素貯留量に及ぼす影響を明らかにするために、茨城大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センターの長期輪作試験圃場において土壌炭素貯留量のモニタリングを行った。その結果、いずれの耕うん体系においても冬作裸地条件下では土壌炭素貯留量が減少した。また、プラウ耕では、カバークロップ導入によって、土壌炭素貯留量が維持されるが、ロータリ耕および不耕起体系では、土壌炭素貯留量は著しく増加し、年間最大で1.36トンC/haの増加を示した。

カバークロップを利用して土壌炭素を増加させることは、二酸化炭素の吸収源のほかに、投入施肥量削減、長期的な収量の安定に加え、土壌保全や生物相の健全化など多面的な効果がある。とくに、カバークロップの導入は、土壌炭素を増加させると同時に、積極的に土壌残留養分を回収・ストックする機能をもつことから、堆肥では得られない極めてユニークな土壌管理手法である。土壌のもつ公益的な機能や生態系サービスに対する関心が高まる中で、これらの農法の導入には農家個人のみが対応するものではなく、地域のサステナビリティ向上という大きな目標をもって個々の土壌管理活動を改めて見直す必要がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました財団法人アサヒビール学術振興財団に深く感謝いたします。

文 献

- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Oge´e J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend AD, Friedlingstein P, Grunwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival JM, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana JF, Sanz MJ, Schulze ED, Vesala T, Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437(7058):529-533.
- Greenhouse Gas Division Environment Canada. 2007. National Inventory Report Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada 1990-2005. Available online at http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/inventory_report/2005_report/2005_report_e.pdf.
- Komatsuzaki, M. and Ohta, H. 2006. Soil management practices for sustainable agro-

- ecosystems, *Sustainability Science* 2:103-120.
- 越野正義.1989.「有機農業」と化学肥料, *農業および園芸*, 64(1) : 117-122.
- 草場敬.2001.土壌診断の現状と将来展望.*農業技術*56(11) : 487-492.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623-1627.
- Maeda, M., Zhao, B., Ozaki, Y. and Yoneyama, T. 2003. Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers. *Environmental Pollution* 121:477-487.
- Mitchell CC, Arriaga FJ, Entry JA, Novak JL, Goodman WR, Reeves DW, Rungen MW and Traxler GJ 1996. The old rotation. 1896-1996. 100 years of sustainable cropping research, Alabama Agricultural Experiment Station Bulletin, AL, pp1-26.
- 農林水産省生産局環境保全型農業対策(2007) 農地土壌が有する多様な公益的機能と土壌管理のあり方(1) Amiable online at http://www.maff.go.jp/j/study/kankyo_hozen/04/pdf/data2.pdf.
- 高村ゆかり・亀山康子. 2002.京都議定書の国際制度. 信山社. 東京.
- Wagger, M. G., Cabrera, M.L.and Ranells, N.N. 1998. Nitrogen and carbon cycling in relation to cover residue quality, *Soil and water conservation*, 53(3), 214-218.
- Weil RR and Magdof F 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. In: Magdof F and Weil R R (eds) *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC press, Florida, pp1-44.