

福岡県の二毛作水田における有機物施用による炭素貯留効果

藤富慎一*・黒柳直彦・小田原孝治・山口 修

本県水田土壌における炭素含量は、経年的に低下傾向にある。また、温室効果ガス排出の抑制手段として、農地における有機物施用による二酸化炭素の封じ込め効果が期待されている。そこで、土壌タイプの異なる灰色低地土の二毛作水田において、堆肥等有機物を施用した場合の土壌炭素含量の変化および炭素貯留効果を検討した。その結果、①中粗粒質土における炭素貯留量は経年的に有機物無施用および稲わら全量還元で減少し、稲わらおよびおがくず入り乳用牛ふん堆肥（以下、堆肥）20t/haの施用で維持される傾向にあった。②細粒質土における炭素貯留量は作付け年数と正の相関が認められ、わら等収穫残渣の全量還元で緩やかな増加、残渣および堆肥15t/haの施用で著しい増加がみられた。③有機物無施用に対して、わら等収穫残渣を還元した場合および残渣還元と堆肥15~20t/ha施用を併用した場合の炭素貯留量の年間の増加量（炭素貯留効果）は、それぞれ中粗粒質土では0.28t/ha/yおよび0.69t/ha/y、細粒質土では0.17t/ha/yおよび1.06t/ha/yと推定された。④年間炭素投入量と③から求めた年間の炭素貯留効率（炭素貯留効果/炭素投入量×100）は、同様に中粗粒質土が16.3%および14.9%、細粒質土が5.8%および21.9%であった。⑤この結果から、細粒質土の炭素貯留において、堆肥の施用が有効であることが示唆された。⑥本県全域の二毛作可能な水田（全面積の53%）を対象に有機物施用による年間の炭素貯留増加可能量を試算すると、わら等収穫残渣を還元した場合が7,366t、残渣還元と堆肥施用を併用した場合が33,655tと推定された。

[キーワード：水田、二毛作、有機物施用、土壌炭素貯留]

Effect of Organic Matter Application on Soil Carbon Accumulation in Double-cropped Paddy Fields in Fukuoka. FUJITOMI Shin-ichi, Naohiko KUROYANAGI, Koji ODAHARA and Osamu YAMAGUCHI (Fukuoka Agricultural Research Center, Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan) *Bull. Fukuoka Agric. Res. Cent.* 33: 1-7 (2014)

The soil carbon content in paddy soils in Fukuoka Prefecture has gradually declined. On the other hand, soil carbon sequestration in arable lands is a suitable option for mitigating the rising level of atmospheric CO₂. We studied the variations in the soil organic carbon (SOC) content with time, and subsequently estimated the effect of different carbon input management approaches on the SOC accumulation, for the double cropping of paddy fields in two types of Gray Lowland soil in Fukuoka. In medium- and coarse-textured soil, the SOC storage level was maintained through rice straw return and cow dung manure application at a rate of 20 t ha⁻¹ year⁻¹ on a flesh-weight basis. On the other hand, in fine textured soil, the amount of SOC storage was positively correlated with the cropping years. This result indicated that only the crop residue return gradually increased the SOC storage level, whereas the combination of this residue return with manure application at a rate of 15 t ha⁻¹ year⁻¹ on a flesh-weight basis rapidly increased it. A 10-year simulation in terms of SOC storage data was run for two carbon input management approaches: case A (crop residue return) and case B (combination of crop residue return with manure application at a rate of 15 and 20 t ha⁻¹ year⁻¹). The annual SOC accumulation per unit area (ΔC_s) for case A and B was estimated to be 0.28 and 0.69 t C ha⁻¹ year⁻¹, respectively, for medium- and coarse-textured soil, and 0.17 and 1.06 t C ha⁻¹ year⁻¹, respectively, for fine textured soil. Similarly, the annual SOC accumulation efficiency (ΔC_s divided by the amount of carbon input) for case A and B was 16.3% and 14.9%, respectively, for medium- and coarse-textured soil, and was 5.8% and 21.9%, respectively, for fine textured soil. Consequently, the prefecture-scale effects of organic matter application on the annual SOC accumulation in paddy fields for which double cropping was possible was estimated to be 7,366 t C and 33,655 t C for case A and B, respectively.

[Key words: paddy field, double cropping, organic matter application, soil carbon accumulation]

緒言

本県における水田耕地面積は2011年度現在67,700haであり、全耕地面積の78%を占める。米、麦および大豆が占める農業産出額の割合は野菜の35%に次ぐ21%と多く、これらは本県農業において重要な基幹作物である（福岡県2012）。しかし、1989~1993年の土壌環境基礎調査（渡邊ら1996）および1999~2007年の土壌環境モニタリング調査（藤富ら2008）の結果、水田土壌中の腐植（炭素）含量は、堆肥を施用する農家戸数やその施用量の経年的減少に伴い、徐々に低下傾向にある。ま

た、本県では近年、水田における大豆の作付け頻度が増加し（吉野ら2011）、このことに伴う土壌炭素含量の減少が明らかにされている（小田原ら2012）。

一方、わが国は、京都議定書における第2約束期間（2013~2020年）に毎年、温室効果ガス排出量の国連への報告義務がある。温室効果ガスの一つである二酸化炭素は光合成によって作物体内に固定されるため、収穫残渣の農地への還元によってこれを土壌中に封じ込めることができる。このため、農地は重要な二酸化炭素吸収源として位置付けられており、水田面積の割合が大きい本県では、水田において堆肥等有機物を施用した場合の土

第1表 供試圃場の試験開始前¹⁾における作土の主要理化学性

供試圃場	試験区	pH (H ₂ O)	全炭素 (%)	全窒素 (%)	CEC ²⁾ (cmol _c /kg)	交換性陽イオン			可給態 リン酸 (g/kg)	作土深 (cm)	乾燥 密度 (Mg/m ³)
						CaO	MgO (g/kg)	K ₂ O			
中粗粒質	—	6.1	2.77	0.23	14.2	2.10	0.20	0.16	4.37	15.0	1.09
細粒質	化学肥料単用 ³⁾	4.9	1.50	0.19	28.8	3.22	0.47	0.56	0.97	9.0~10.5 ⁴⁾	0.79
	残渣施用										
	残渣+堆肥施用 ³⁾										
—	—	5.2	1.85	0.20	29.4	3.57	0.61	0.62	1.57	9.0~11.7 ⁴⁾	0.76

1) 土壌試料は中粗粒質が1981年11月、細粒質が2004年5月に採取した

2) CECは陽イオン交換容量

3) 試験開始以前、化学肥料単用区および残渣施用区は同一管理で有機物無施用、残渣+堆肥施用区のみ有機物施用歴あり

4) 試験開始前の実測値がないため、第5~9作後の測定値を示した

壤炭素貯留効果を明らかにすることは環境施策上において重要である。これまでも、全国規模では水田における二毛作および有機物施用による土壌炭素貯留可能性が評価されている (Yokozawaら 2010) が、本県における土壌類型の構成と大きく異なるため、直接は適用できない。

そこで、本県に多い灰色低地土の二毛作水田において、収穫残渣の還元および堆肥の施用が土壌中の炭素含量の変化および炭素貯留に及ぼす影響を検討した。さらに、得られたデータを用いて、本県全域の二毛作水田における有機物施用による炭素貯留増加可能性を試算した。

材料および方法

1 供試圃場および作付け体系

本試験は土壌類型の異なる福岡県内の二か所の水田圃場で実施した。圃場1は、福岡県筑紫野市大石の現地農家圃場で、1982~1997年の16年間有機物の連用試験を行った (酒井ら 1999)。土壌類型は礫質灰色低地土、灰色系 (追子野木統)、作土の土性は砂壤土で下層に礫層が存在し、排水は良好である。なお、本研究では土壌類型およびタイプを農耕地土壌分類第二次案改訂版 (農業技術研究所 1973) に準拠した呼称で表記する。以下、圃場1を中粗粒質と呼ぶ。作付け体系は、水稲-麦類 (小麦、大麦および裸麦) の二毛作である。試験開始前までに稲わらおよび牛ふん堆肥が長期間施用されていたため、試験開始時の作土中の全炭素含量は2.77% (腐植含量: 全炭素含量×1.723=4.77%) と高い (第1表)。

圃場2は、福岡県三潴郡大木町の農業総合試験場筑後分場内圃場で、2004~2012年の9年間有機物の連用試験を行った。土壌類型は細粒灰色低地土、灰色系 (佐賀統) で、土性は作土が軽塩土、下層土が重塩土であり、クリーク地帯に立地するため地下水位が高い。以下、圃場2を細粒質と呼ぶ。作付け体系は、水稲-小麦-大豆-小麦の2年輪作による二毛作である。試験開始前までイグサ栽培が行われ、有機物は長期間施用されていなかった。試験開始時の作土中の全炭素含量は1.50~1.85% (腐植含量2.58~3.19%) と、少から中程度の水準である (第1表)。

第2表 試験区設定および年間の有機物施用量 (現物 t/ha)

供試圃場	試験区	施用有機物			
		稲わら	大豆残渣	麦稈	堆肥 ¹⁾
中粗粒質	稲わら施用	5 ²⁾	—	—	—
	稲わら+堆肥施用	5 ²⁾	—	—	20 ²⁾
	化学肥料単用	—	—	—	—
細粒質	残渣施用	2.5 ³⁾	0.5 ³⁾	5 ³⁾	—
	残渣+堆肥施用	2.5 ³⁾	0.5 ³⁾	5 ³⁾	15 ³⁾
	化学肥料単用	—	—	—	—
	—	—	—	—	—

1) 堆肥はおがくず入り乳用牛ふん堆肥

2) 毎年夏作 (水稲または大豆) 後に施用

3) 毎年冬作 (小麦) 後に施用

4) 稲わらと大豆残渣は交互に夏作後に施用したため、年間施用量を実際の量で示した

2 試験区の設定

中粗粒質: 水稲収穫後に稲わらを現物で5t/ha (全量還元相当) 施用した稲わら施用区、稲わらに加えておがくず入り乳用牛ふん堆肥 (以下、堆肥) 20t/ha を麦類の基肥施用時に全面施用した、稲わら+堆肥施用区を設定した (第2表)。対照として、有機物を施用せずに化学肥料を単用し続けた区 (以下、化学肥料単用区) を設定した。いずれの区も麦稈は圃場から全量持ち出しとした。1区当りの試験面積は20m²とし、2反復で実施した。

細粒質: 水稲収穫後の稲わら、大豆収穫後の大豆茎葉 (莢を含む) および小麦収穫後の麦稈を全量還元した残渣施用区、水稲、麦および大豆の収穫残渣に加えて堆肥15t/ha を小麦の基肥施用時に全面施用した、残渣+堆肥施用区を設定した (第2表)。麦稈は毎年夏作前に施用したが、夏作として水稲と大豆を隔年で作付けしたため稲わらおよび大豆茎葉は隔年施用とした。なお、供試堆肥の乾物当たり全炭素含量および水分含有率は、調査期間の平均で37.6%および66.0%であった。対照として、中粗粒質と同様に化学肥料単用区を設定した。1区当りの試験面積は126m²とし、反復なしで実施した。

供試作物の施肥法はいずれの圃場も福岡県水稲・麦施肥基準および福岡県大豆栽培技術指針に準じた。

3 有機物施用による炭素貯留効果および炭素貯留効率の推定

毎年夏作後の作土を対象として、中粗粒質は地表から深さ15cmまで、細粒質は同じく深さ9~12cmまでを採

取した(第1表)。土壌は風乾後、植物根および粗大有機物を取り除き2mm目の篩を全通させた。さらに、乳鉢で磨砕後0.5mm目の篩を全通させたものを測定用試料として供試した。全炭素含量はチューリン法(土壤標準分析・測定法委員会1986)で測定した。また、土壤採取時に作土深および100cm³の試料採取用円筒を用いて乾燥密度(現地容積重)を測定した。

まず、作土におけるha当たりの炭素貯留量(C_s : t/ha)を式(1)により求めた。

$$C_s = \sigma \times d \times a \times (TC/100) \times 10,000 \quad (1)$$

ここで、 σ は作土の乾燥密度(t/m³)、 d は作土深(m)、 a は単位面積:1m²、 TC は各作後における作土の全炭素含量(%)である。なお、ここでは乾燥密度の単位にt/m³を用いたが、第1表で示したSI単位系のMg/m³と同意である。また、細粒質の第1~4作後の作土深は未測定のため、第5~9作後の平均値で代用した。続いて、各圃場の区毎の作付け年数と炭素貯留量の回帰式から、作付け10年目における炭素貯留量推定値(C_{10})を求めた。さらに、式(2)、(3)のように、稲わら施用区もしくは残渣施用区の C_{10} および稲わら+堆肥施用区もしくは残渣+堆肥施用区の C_{10} から化学肥料単用区の C_{10} を差し引いた値を10年で除して、稲わら等収穫残渣還元のみの場合(2)と残渣還元と堆肥施用を併用した場合(3)の有機物施用による年間の炭素貯留効果(ΔC_s)を算出した。

$$\text{残渣還元: } \Delta C_s = \frac{\text{稲わら(残渣)施用区 } C_{10} - \text{化学肥料単用区 } C_{10}}{10} \quad (2)$$

$$\text{残渣+堆肥施用: } \Delta C_s = \frac{\text{稲わら(残渣)+堆肥施用区 } C_{10} - \text{化学肥料単用区 } C_{10}}{10} \quad (3)$$

試験開始から10年目のそれを推定値として採用した理由は、志賀ら(1985)の結果から、麦稈およびおがくず入り牛ふん堆肥の連用開始から10年程度は、概ね一定の土壤炭素増加速度を示したためである。ただし、細粒質は、試験区間で調査開始時(第1または2作後)における炭素貯留量が異なったため、 $x=0$ を各回帰式に外挿し、両者の y 切片が同じになるよう推定直線を平行移動した後 $x=10$ を外挿した。

次に、供試圃場によって施用有機物由来の炭素投入量が異なるので、式(4)に従って、年間の炭素投入量当たりの ΔC_s 、すなわち年間の炭素貯留効率(%)を求めた。

$$\text{炭素貯留効率} = \frac{\Delta C_s}{A \times \{(100-w)/100\} \times OC/100} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 A は現物当たりの有機物施用量(t/ha)、 w は施用有機物中の水分含量(%), OC は同じく乾物当たり炭素含量(%)である。なお、細粒質の堆肥以外は成分データがないため文献値(伊達1988, 福岡県農政部2007)で代用した。また、細粒質の稲わらおよび大豆茎

葉の年間投入量は、これらが隔年施用のため半量とした。

4 県下全域における有機物施用による年間炭素貯留増加可能量

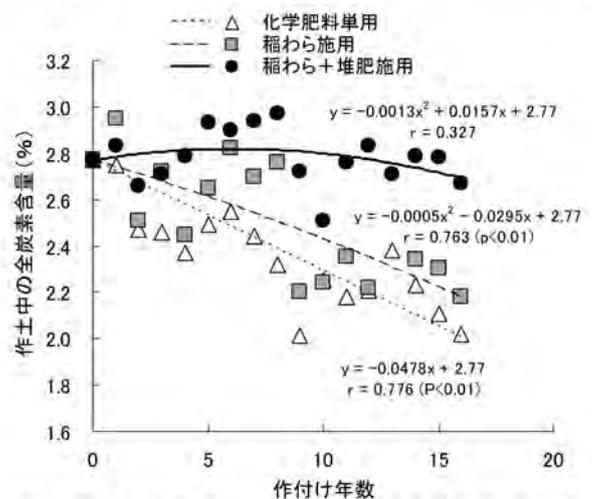
各圃場から得られた有機質資材ごとの ΔC_s を本県の水田面積に乘じることで、県下全域の有機物施用による炭素貯留増加可能量を試算した。まず、水田面積を地力保全基本調査総合成績書1(1978)に基づいて、砂壤質および砂質と強粘質および粘質のグループに類別し(黒ボク土と細粒グライ土を除く)、県全体の水田面積で除して土性別面積割合を求めた。さらに、これを2011年度の県水田総面積に乘じて土性別水田面積を推定した。細粒グライ土を除外したのは、大豆および麦の不適作地の可能性があるためである。次に、中粗粒質の ΔC_s が前記の砂壤質および砂質に、細粒質の ΔC_s が強粘質および粘質に相当すると仮定し、各々の水田面積に乘じて県下全域の炭素貯留増加可能量を試算した。

結果

1 作土中の全炭素含量および炭素貯留量の推移

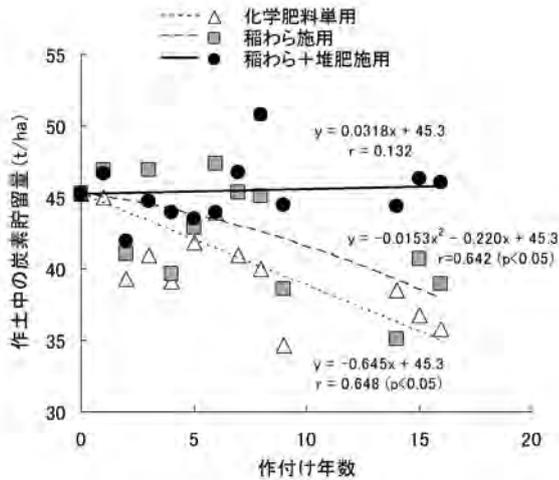
中粗粒質における作土中の全炭素含量の経年変化を第1図に示した。化学肥料単用区および稲わら施用区では、全炭素含量が経年的に減少し、作付け年数との間に1%水準で有意な負の相関($r=0.776$, $r=0.763$)が認められた。稲わら+堆肥施用区では有意な相関が認められず、全炭素含量は概ね維持される傾向であった。次に、作土中炭素貯留量(C_s : t/ha)を第2図に示した。 C_s は全炭素含量と同様に化学肥料単用区および稲わら施用区では減少し、一方、稲わら+堆肥施用区では変化がみられず、維持される傾向であった。

細粒質における作土中の全炭素含量および C_s の経年変化を第3図および第4図に示した。全炭素含量は、化学肥料単用区では維持され、残渣施用区ではわずかに増



第1図 中粗粒質における作土中の全炭素含量の経年変化

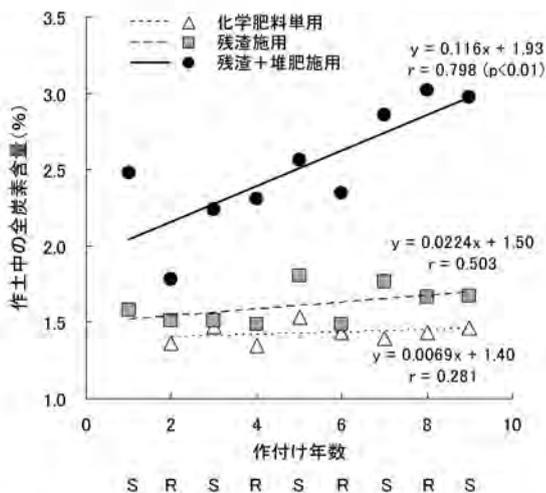
1) $p < 0.01$ は1%水準で有意であることを示す



第2図 中粗粒質における作土中の炭素貯留量の経年変化

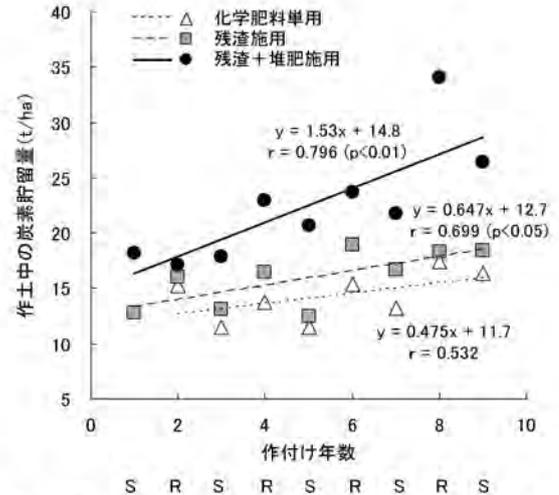
1) $p < 0.05$ は5%水準で有意であることを示す

加する傾向であった(第3図)。一方、残渣+堆肥施用区では作付け年数との間に有意な正の相関($r=0.798$, $p < 0.01$)があり、明らかな増加傾向が認められた(第3図)。 C_s は、化学肥料単用区では試験開始2年目のそれと比較すると概ね維持される傾向であった(第4図)。残渣施用区および残渣+堆肥施用区では、作付け年数との間に各々5%および1%水準の有意な正の相関($r=0.699$, $r=0.796$)が認められた(第4図)。特に、残渣+堆肥施用区の一次回帰式の傾きは1.53と、残渣施用区の2.4倍であり、著しい増加傾向を示した。



第3図 細粒質における作土中の全炭素含量の経年変化

1) 図下のSは夏作に大豆, Rは水稻の作付けを示す
2) $p < 0.01$ は1%水準で有意であることを示す



第4図 細粒質における作土中の炭素貯留量の経年変化

1) 図下の英文字は第3図を参照
2) $p < 0.01$ は1%水準で有意であることを示す

2 各種有機物施用による年間の炭素貯留効果および炭素貯留効率

作付け年数を説明変数, C_s を従属変数とする一次または二次回帰式(第2, 4図)および式(2), (3)から、有機物施用による年間の炭素貯留効果(ΔC_s : t/ha/y)を推定し第3表に示した。中粗粒質は、稲わら施用区が0.28t/ha/y、稲わら+堆肥施用区が0.69t/ha/yと、稲わらと堆肥を併用した方が稲わら還元のみの場合より2.5倍多かった。細粒質は、残渣施用区が0.17t/ha/y、残渣+堆肥施用区が1.06t/ha/yと、収穫残渣の還元と堆肥を併用した場合が6.2倍多かった。

供試圃場および試験区によって施用有機物由来の炭素投入量が異なるため、 ΔC_s を圃場間および施用有機物間で単純に比較出来ない。そこで、 ΔC_s を年間の炭素投入量で除した値、すなわち年間の炭素貯留効率を求めた(第3表)。その結果、中粗粒質では稲わら施用区が16.3%、稲わら+堆肥施用区が14.9%と試験区間差がみられなかった。一方、細粒質では5.8%および21.9%と、収穫残渣の還元と堆肥施用を併用した場合の炭素貯留効率が高かった。

3 県下全域における有機物施用による年間炭素貯留増加可能量の試算

中粗粒質および細粒質の ΔC_s を用いて、本県全域の二毛作水田における有機物施用による炭素貯留増加可能量の試算結果を第4表に示した。本研究では、県内の黒ボク土と細粒グライ土を除くすべての水田において、水稻-麦もしくは水稻-麦-大豆体系の二毛作を行ったと仮定した。その結果、稲わら等収穫残渣を全量還元した場合、年間7,366t、収穫残渣の還元に加え堆肥を施用した場合、年間33,655tの増加が推定された。

第3表 有機物施用による年間の炭素貯留効果および炭素貯留効率

供試圃場	試験区	有機物	施用有機物			炭素		
			年間施用量 (現物t/ha)	水分 含量 (%)	炭素 含量 (乾物%)	投入量 ¹⁾ (t/ha/y)	ΔC_s ²⁾ (t/ha/y)	貯留効率 ²⁾ (%)
中粗粒質	稲わら施用	稲わら	5	12	39.1	1.72	0.28	16.3
		稲わら	5	12	39.1	1.72		
	稲わら+堆肥施用	堆肥	20	61	36.8	2.91		
		合計				4.63	0.69	14.9
細粒質	残渣施用	稲わら	2.5	12	39.1	0.86		
		大豆茎葉	0.5	15	48.5	0.21		
		麦稈	5	11	42.2	1.88		
		合計				2.95	0.17	5.8
	残渣+堆肥施用	稲わら	2.5	12	39.1	0.86		
		大豆茎葉	0.5	15	48.5	0.21		
		堆肥	15	66	37.6	1.90		
合計				4.85	1.06	21.9		

1) 炭素投入量は施用有機物中の炭素量で、表中の有機物データから算出した
 2) ΔC_s は有機物施用による炭素貯留効果で、炭素貯留効率は ΔC_s を炭素投入量で除した値

第4表 県下全域の二毛作水田における有機物施用による年間の炭素貯留増加可能量の試算

土性	土壌タイプ	1979年 ¹⁾		2011年 ²⁾	ケース1 (稲わら等残渣還元)		ケース2 (稲わら等残渣+堆肥)	
		面積 (ha)	面積割合 (%)	面積 (ha)	ΔC_s ³⁾ (t/ha/y)	炭素 貯留増加 可能量 ⁴⁾ (t/y)	ΔC_s ³⁾ (t/ha/y)	炭素 貯留増加 可能量 ⁴⁾ (t/y)
砂壌質～砂質	礫質灰色低地土等 ⁵⁾	8,105	11	7,447				
	中粗粒灰色低地土等 ⁵⁾	4,185	6	4,062				
	合計	12,290	17	11,630	0.28	3,256	0.69	8,025
強粘質～粘質	細粒灰色低地土	25,552	36	24,179	0.17	4,110	1.06	25,630
合計		37,842	53	35,809		7,366		33,655
県全体		71,545	100	67,700				

1) 1979年の土壌タイプ別水田面積は地方保全基本調査総合成績書(1)に基づく
 2) 2011年の土壌タイプ別水田面積は2011年の県水田総面積に1979年時の面積割合を乗じて推定した
 3) ΔC_s はha当たりの有機物施用による年間の炭素貯留効果で、中粗粒質の ΔC_s を砂壌質～砂質、細粒質の ΔC_s を強粘質～粘質に適用
 4) 炭素貯留増加可能量は土性ごとに ΔC_s を面積に乗じて算出した
 5) 礫質は他に褐色低地土、黄色土およびグライ土、中粗粒は褐色低地土およびグライ土を含む

考察

作土中の炭素貯留量 (C_s) は、中粗粒質では、試験開始前と比較して稲わら+堆肥施用区が同等であったものの、化学肥料単用区および稲わら施用区が減少した(第2図)。土壌有機態炭素(Soil Organic Carbon: SOC)の蓄積および分解に影響を与える因子は、すべての土壌に共通して温度、水分、土性および植被であることが指摘されている(Shirato・Yokozawa 2005)。また、中粗粒質は、細粒質土に比べて元来微生物代謝が速いため、SOCが蓄積しにくいにもかかわらず、試験開始前の全炭素含量が2.77%と高かった(第1表)。一般的に、水田土壌は有機物施用により易分解性SOCが蓄積しやすいものの、乾燥や高温等によって不安定化するため分解されやすい(犬伏 1994)。すなわち、中粗粒質は、試験開始前の長期間の有機物施用により蓄積したSOCに占める易分解性画分が多く、かつ排水性が良いため、試験期間中にSOCの分解が促進されたと考えられる。一方、細

粒質では、化学肥料単用区の試験開始前の全炭素含量が1.50%と土壌改善目標値(1.74%)未満であり(第1表)、9年間に及ぶ有機物無施用条件においても C_s の減少が認められなかった(第4図)。二毛作水田では、有機態炭素が刈り株および残根から年間に1t/ha以上供給され、0.2t/ha程度貯留することが報告されている(Yokozawaら 2010)。したがって、細粒質は、当初の易分解性SOCの水準が低くかつ、強粘質でクリーク地帯に立地し地下水位が高いため分解が遅く、刈り株や残根からの供給のみでもSOCを維持できる環境条件にあったと推察された。

本研究では、中粗粒質および細粒質における有機物施用による年間の炭素貯留効果(ΔC_s)を推定した。様々な土壌から成る全国の二毛作水田について、年間に炭素として1.0t/ha相当の家畜ふん堆肥を施用した場合の ΔC_s が、25年間の平均で0.49t/ha/yと推定されており(Yokozawaら 2010)、炭素貯留効率は49%であった。ここで、本研究とYokozawaら(2010)の結果を比較する

ために、残渣還元と堆肥施用を併用した場合の炭素施用量および ΔC_s から残渣還元のみの場合のそれらを差し引くことで、堆肥の単独施用を仮定した場合の炭素貯留効率を概算した。その結果、中粗粒質が14.1%、細粒質が46.8%で、平均は30.5%とYokozawaら(2010)より低く、細粒質において同程度であった。このことは、Yokozawaら(2010)の試算には、本研究で二毛作の不適地と判断した炭素蓄積能の高い細粒グライ土が多く含まれていたためと考えられた。したがって、本研究における供試土壌および有機物施用条件で推定した ΔC_s は概ね妥当な結果と思われる。

有機物施用による土壌炭素の貯留効率を供試圃場間で比較すると、収穫残渣還元のみの場合、細粒質が中粗粒質の3分の1程度と極めて低かった(第3表)。水田土壌ではメタンガス(CH_4)の生成が有機物分解に重要な役割を果たす(犬伏1994)。供試圃場において過去に行われた水稲作期間中の CH_4 由来炭素放出量の測定結果は、化学肥料単用区では細粒質(0.49t/ha) > 中粗粒質(0.15t/ha)、また、中粗粒質の稲わら施用区では0.21t/haであった(黒柳ら1996)。細粒質の残渣施用区は測定されていないが、稲わら施用により CH_4 生成が促進されることから(若月1997)、化学肥料単用区を上回っていた可能性が高いと思われる。さらに、細粒質では隔年で大豆を作付けたが、夏期における林地からの二酸化炭素放出のほとんどが植物根の呼吸とSOCの分解に因ることが報告されている(Sakataら2007)。したがって、細粒質の残渣施用区では、水稲作期間に多量の CH_4 が生成し、さらに、大豆作期間の好氣的環境によるSOCの分解促進と相まって、炭素貯留効率が低下したと考えられた。一方、残渣還元と堆肥施用の併用の場合、炭素貯留効率は、細粒質が中粗粒質の約1.5倍高かった(第3表)。リグニン等の分解抵抗性有機物を主体とするおがくず入り牛ふん堆肥は、ヘミセルロース等を主体とする稲わらや麦稈に比べて土壌中における炭素分解が遅い。細粒質における堆肥施用(収穫残渣は圃場から全量搬出)による CH_4 由来炭素放出量が0.51t/haと、化学肥料単用区の0.49t/haに比べてわずかな差であったことは(黒柳ら1996)、前述の有機物分解特性を反映したものと思われる。また、同じ細粒灰色低地土において、 CH_4 放出量が牛ふん堆肥の施用により稲わらの秋施用・春すき込みに対して54%減少したことが報告されている(熊谷2007)。したがって、細粒質では、収穫残渣還元と堆肥施用を併用した場合、堆肥施用に伴う CH_4 放出の増加が少なく、SOCの蓄積が分解を大きく上回ったため、炭素貯留効率が高かった可能性が考えられた。これらのことから、細粒質土では、土壌炭素貯留において、おがくず等の副資材入り牛ふん堆肥の施用が稲わら等収穫残渣の還元より有効であることが示唆された。

以上から推定した土性別の ΔC_s を本県全域の二毛作水田に適用し、稲わら等収穫残渣および堆肥を施用した場合の炭素貯留増加可能量を全県規模で試算した(第4表)。その結果、残渣還元と堆肥施用を併用した場合、

33,600 t程度の増加が見込まれ、これは約24,000世帯分の年間炭素排出量(農林水産省2008)に相当する。しかし、これらの試算値は、麦類および大豆の作付けが少ない県北部等の地域を含めた結果である。また、調査期間が9~16年と比較的短期間のデータを元に算出しているが、有機物連用によるSOCの増加程度は、施用開始から10年目までと20年目以降とは一般的に前者の方が大きい。したがって、本研究における試算結果は、作付け体系の実態および長期的視点からみた場合、過大評価している可能性がある。

引用文献

- 伊達 昇(編)(1988)有機質肥料と微生物資材. 農山漁村文化協会, 東京, p. 41-113.
- 土壌標準分析・測定法委員会(編)(1986)有機炭素. 土壌標準分析・測定法. 博友社, 東京, p. 86-94.
- 福岡県(2012)福岡県食料・農業・農村の動向. p. 3-4.
- 福岡県農政部(2007)有機質資材等の利用上の手引き. p. 26.
- 福岡県立農業試験場(1978)地力保全基本調査総合成績書1. p. 192-199.
- 藤富慎一・黒柳直彦・茨木俊行・角重和浩(2008)農業関係試験研究の成果(平成20年度前期に取りまとめた成果). 福岡県農林水産部, p. 1-2.
- 犬伏和之(1994)土壌有機物の分解と炭素化合物の代謝. 土壌生化学, 朝倉書店, 東京, p. 106-110.
- 熊谷勝巳(2007)稲わら施用を家畜ふん堆肥施用に代えた水田のメタン発生抑制効果. 圃場と土壌 39(10・11): 13-18.
- 黒柳直彦・藤田 彰・小田原孝治・兼子 明・渡邊敏朗(1996)平成6年度農業関係試験研究の成果. 福岡県農政部, p. 217-218.
- 農業技術研究所(1973)農耕地土壌の分類. 土壌統の設定基準および土壌統一覧表. 農林水産省, p. 1-72.
- 農林水産省(2008)「今後の環境保全型農業に関する検討会」報告書. p. 4.
- 小田原孝治・福島裕助・荒木雅登・兼子 明・荒巻幸一郎(2012)筑後川流域の田畑輪換圃場における土壌肥沃度とダイズ子実収量性の実態. 土肥誌 83(4): 405-411.
- 酒井憲一・黒柳直彦・藤田 彰・小田原孝治(1999)有機物およびケイカルの長期連用が水田土壌の化学性および水稲収量に及ぼす影響. 福岡農総試研報 18: 8-12.
- Sakata T, Ishizuka S, Takahashi M(2007) Separation of soil respiration into CO_2 emission sources using ^{13}C natural abundance in a deciduous broad-leaved forest in Japan. Soil Sci. Plant Nutr. 53:328-336.
- 志賀一一・大山信雄・前田乾一・鈴木正昭(1985)水田土壌中における各種有機物の5年間の分解特徴に基づ

- く群別. 農耕地における土壌有機物変動の予測と有機物施用基準の策定. 農林水産技術会議事務局研究成果 166 : 16-20.
- Shirato Y, Yokozawa M(2005) Applying the Rothamsted carbon model for long-term experiments on Japanese paddy soils and modifying it by simple turning of the decomposition rate. *Soil Sci. Plant Nutr.* 51:405-415.
- 若月利之(1997)水田土壌. 最新土壌学. 朝倉書店, 東京, p. 167.
- 渡邊敏朗・兼子 明・黒柳直彦・小田原孝治・藤田 彰 (1996)福岡県における水田土壌の理化学性の実態と経年変化. 福岡農総試研報 15 : 18-21.
- Yokozawa M, Shirato Y, Sakamoto T, Yonemura S, Nakai M, Ohkura T(2010) Use of Roth C model to estimate the carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 56:168-176.
- 吉野 稔・石塚明子・小田原孝治・浜地勇次(2011)前年夏作のダイズを栽培した圃場において基肥窒素量が水稲の生育に及ぼす影響. 日作九支報 77 : 11-14.