

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02862

研究課題名(和文) 土壌有機物の安定化 - その過程と実体の追求

研究課題名(英文) Stabilization of soil organic matter-Pursuit of its process and substances

研究代表者

渡邊 彰 (Watanabe, Akira)

名古屋大学・生命農学研究科・教授

研究者番号：50231098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：SOMの安定化過程とその実体を明らかにすることを目的として、腐植物質の化学構造と分解性の関係、結合型ヒューミンの実体、菌体由来結合型SOCの形成過程、施用有機物の化学構造とSOCの蓄積形態との関係、を調べた。その結果、物理的・化学的保護のない条件下では黒色度、芳香族性が高い腐植物質ほど微生物分解耐性が高いこと、結合型ヒューミンは鉱物への強い吸着によって抽出されないフミン酸ではないこと、菌体由来有機物のうち特に糖類が新たな結合型SOCを形成すること、有機資材連用により施用有機物・微生物両方に由来する結合型SOCが生成するが、いずれが多く蓄積するかは施用有機物の構造に依存すること、を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌への炭素蓄積量を増大させるあるいは安定的に維持することは、持続的生物生産と地球温暖化対策の両面においてきわめて重要である。そこで、土壌有機物の安定化過程とその実体について研究し、これまで不明であった化学構造に基づく微生物分解性の違い、鉱物への吸着によって安定化している腐植物質の特徴、菌体を経由した結合型土壌有機物の生成過程を明らかにし、また、施用する有機物の種類(構造)によって土壌有機炭素の生成過程と蓄積形態が異なることを示した。

研究成果の概要(英文)：To clarify the stabilization process of and nature of soil organic carbon (SOC), the relationship between the chemical structure of humic substances and their degradability, the nature of bound-type humin, the formation process of microbe derived bound-type SOC, and the relationship between the chemical structure of applied organic matter (AOM) and the accumulation form of SOC. The results revealed that humic substances with higher blackness and aromaticity are more resistant to microbial degradation under conditions without physical or chemical protection, that bound-type humin is not humic/fulvic acids that cannot be extracted by strong adsorption to minerals, that microbe derived organic matter, in particular saccharides forms new bound-type SOC, and that bound-type SOC can be produced from both AOM components and microorganisms which utilized AOM, but which one accumulates more depends on the chemical structure of the AOM.

研究分野：土壌圏物質循環学

キーワード：土壌化学 土壌有機物 炭素蓄積 腐植物質

## 1. 研究開始当初の背景

土壌有機物 (SOM) あるいは土壌有機炭素 (SOC) 量を増大させるか高く維持することは、持続的な生物生産と地球温暖化対策という農業と環境両面において最重要課題のひとつである (2015 の COP21 では土壌 C 貯留の強化を狙いとした「4/1000 イニシアチブ」が立ち上げられた)。そのためには、土壌への有機物供給量 (インプット) を増やすだけでなく、それらの一部が SOC として長く滞留する (アウトプットを減らす) ことが重要である。土壌に供給された有機物の安定化機構としては、微小団粒内への物理的隔離 (隔離型 SOC)、土壌鉱物との結合 (結合型 SOC)、難分解性有機物への構造変化 (腐植化の進行、燃焼による炭化 - ブラックカーボンの生成) 等が考えられてきた。SOM の安定化過程の詳細や安定化機構発現のための条件を把握することは、効率的に SOC 貯留量の増大を図る上で有効であるだけでなく、基本的な土壌の生成・成熟過程の理解にとっても不可欠である。しかし、土壌中における SOM の安定化では、複数のプロセスが平行し、かつ分解と拮抗しながら進むため、何が主要因であったかを明確にすることは容易ではない。結合型 SOC (重い)、隔離型 SOC および団粒外にある粒子状有機物 (遊離型 SOC) (ともに軽い) といった土壌中での「蓄積形態」の異なる SOM は、しばしば団粒の破壊と重液処理の組合せによって分画される (物理分画)。一方、化学分画 (腐植の分画) ではアルカリ溶液で抽出され、抽出液を酸性にした際に沈殿するものをフミン酸 (腐植酸)、沈殿しないものをフルボ酸、抽出されないものをヒューミン (HU) とするが、腐植化の進行は専らフミン酸の黒色度 (腐植化度) の変化で評価され、他の画分については基準がない。また、これらは、全ての物理画分に含まれる。以前は、腐植物質は土壌中で全て安定と考えられていたが、実際には生成初期のフミン酸やフルボ酸の分解性は低くなく、腐植化が進行するためには、隔離や結合によって分解を免れる必要があると予想される。しかしながら、腐植物質の生成過程については長くブラックボックスのままであり、腐植化の進行 (化学構造の違い) と分解性との対応も十分に明らかになっていない。一方、蓄積形態によって SOM を分別しても、安定化の複雑さは残る。例えば、結合型 SOC の中でも不溶性 (正確には「抽出されない」) 腐植である HU は、より滞留時間が長く<sup>1)</sup>、量的にも重要であるが、HU の実体説明は特に遅れている。一部は鉄の還元などによって抽出可能となるため、それらの分析から「フミン酸と類似した構造をもつ」との説もある<sup>2)</sup>が検証はされていない。一方、結合型 SOC は微生物由来の有機物が多いと推察されており<sup>3)</sup>、それが事実であれば、リグニンやタンニンを起源にもつフミン酸やフルボ酸とは構造特性が異なる可能性が高くなる。結合型 HU の不溶性が構造の違いに起因しているのか、それとも鉱物表面の空きスペースや金属イオンの量など形成時の環境条件に起因しているのかは、HU という枠にとどまらず、SOM 蓄積過程全体を考える上で重要な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究は、SOM の安定化過程とその実体を、腐植物質および蓄積形態の異なる SOC の生成 (形成) 過程の解析および構造と分解性との関係の解析から追求することを目的とした。土壌中における腐植物質の分解性は、黒色度が高いものほど低いと考えられてきたが、分解性の差が黒色度と対応した化学構造の違いに起因していることを証明するために、多様な黒色度を示す腐植物質試料を用いて、微生物分解試験を行った。また、HU 特に土壌粒子への強い吸着のために抽出されない結合型 HU の実体を明らかにするために、多様な土壌から結合型 HU を調製し、構造解析を行った。さらに、実際に土壌微生物が結合型 SOC の主起源であることを確認することを目的として、土壌微生物の<sup>13</sup>C 標識培養試験を行った。SOC の蓄積形態は、土壌鉱物の量や組成、リターや堆肥など土壌有機物の給源によって異なると予想されることから、有機資材の化学構造とそれに由来する SOC の蓄積形態との関係を明らかにすることを目的として、主要粘土鉱物が異なる 2 種の有機物連用試験畑土壌について比重分画と得られた各 SOC 画分の平均構造、構造成分解析を行った。

## 3. 研究の方法

(1) 腐植物質の分解性 - 腐植化度が高いフミン酸は鉱物に結合していなくても安定か?

黒ボク土、褐色森林土、赤黄色土、低地土から NAGOYA 法または IHSS 法<sup>4)</sup>を用いて抽出、精製したフミン酸 6 点およびフルボ酸 2 点を供試した。滅菌した GC バイアルに滅菌済石英砂、土壌希釈懸濁液、5 倍無機塩培地、腐植物質溶液を添加し、気相を純空気で置換後、暗所、25°C で 210 日間緩やかに振盪した。その間、定期的に TCD-GC (Shimadzu GC-8A) を用いて気相中の CO<sub>2</sub> 濃度を測定し、適宜気相空気を更新した。腐植物質溶液は添加前に pH 6.0 に調整し、また、全有機炭素計 (Shimadzu TOC-V<sub>C<sub>PH</sub></sub>) を用いて C 濃度を確認した。腐植物質溶液の代わりに滅菌水を添加したものをコントロールとした。土壌希釈懸濁液は、腐植物質試料を調製した土壌とは異なる褐色森林土 A 層生土に 100 倍量の滅菌水を加え、30 分間振盪することで得、また、97 日目に同量を追加した。回収した試料の IR (JASCO FT/IR-4600) 分析において菌体の混入が示唆されたため、調製法に準じて精製を行った。培養試験前後の試料について黒色度<sup>5)</sup> (Shimadzu UV-2450)、拡散反射法による FT-IR スペクトル、PASS 法<sup>6)</sup>による ramp CPMAS <sup>13</sup>C NMR (以下 <sup>13</sup>C

CP/PASS NMR と記す) スペクトルの測定 (JEOL ECA-700) 熱的支援加水分解およびメチル化 (Thermally assisted hydrolysis and methylation; THM) -GC/MS<sup>7)</sup> (445°C、20 s; Shimadzu GC-2010/GCMS-QP2010; 培養前のみ) 高速サイズ排除クロマトグラフィー (High performance size-exclusion chromatography; HPSEC; Shimadzu LC-10; カラム YMC-Pack Diol-200; 溶離液 0.05 M Tris Buffer (pH 7.5)) を行った。試料間の C 無機化率の差は、一元配置分散分析によって解析し、Tukey の範囲検定法によって有意差検定を行った。

### (2) 結合型 HU の実体 - 粘土鉱物に強く結合したフミン酸か?

黒ボク土、褐色森林土、チェルノーゼム、黄色土、灰色低地土計 11 土壌を供試した。NAGOYA 法にしたがってフミン酸、フルボ酸画分を除去したのち、希酸で洗浄、凍結乾燥してヒューミン試料を得た。ついで、比重  $1.6 \text{ g cm}^{-3}$  のポリタングステン酸ナトリウム (SPT) 溶液を用いて低比重 HU (inherited HU) を除去し、さらにソクスレー抽出 (ベンゼン-エタノール 1:1) により脂質を除去することで結合型ヒューミンを得た。重量と CN 含量を測定するとともに、試料の一部を HF-HCl で処理して有機物を濃縮し、<sup>13</sup>C CP/PASS NMR および THM-GC/MS を用いて平均化学構造と成分組成を解析した。また、Abe et al.<sup>8)</sup> に準じ、<sup>13</sup>C グルコース (Glc) を基質とし、ろ過滅菌したシクロヘキサミド、またはアンピシリン、クロラムフェニコールおよびテトラサイクリンを用いて東郷黄色土 (名大附属農場畑作土化学肥料区) 中の糸状菌と細菌を分別培養した。菌体をそれぞれ回収した後、<sup>13</sup>C CP/PASS NMR スペクトルの測定および THM-GC/MS 分析に供した。さらに、スギ材をボールミルで粉碎し、脱脂後、メイセラゼ (明治製菓) による酵素分解<sup>9)</sup>、0.05 M 塩酸入りジオキサン : 水 (85:15) (v/v) 溶液による加水分解を行ってリグニンを精製し、同様の分析を行って、成分起源の考察に用いた。

### (3) 結合型 SOC の形成 - 菌体由来の有機物が多いのは本当か?

GC バイアル中に土壌 (名大附属農場畑作土化学肥料区) <sup>13</sup>C Glc または非標識 Glc、塩安を加え、暗所、25°C、畑条件で恒温培養した。なお、Glc 添加量は土壌全 C の 1/10 量、塩安は N が Glc C の 1/10 量になるよう添加した。定期的にヘッドスペースの CO<sub>2</sub> 濃度を GC-TCD で測定し、適宜気相を更新した。また、1、3、6 ヶ月後に一部のバイアルに初回と同量の標識または非標識 Glc を添加した。1、3、6 ヶ月後に土壌を回収し、クロロホルム燻蒸抽出法による土壌バイオマスの抽出と SPT 溶液を用いた比重分画 (Sonsri et al., 2022) を行い、全土壌および各画分の CN 含量、標識 C 量 (ThermoFisher Scientific Flash2000/Delta Plus) を測定した。また、未分画土壌と結合型 SOC 画分の <sup>13</sup>C CP/PASS NMR スペクトルを測定し、標識 C 量に基づいて非標識 Glc 添加区のスเปクトルとの差を求め、各 Glc 由来官能基 C 量を求めた。比重分画では、比重  $1.6 \text{ g cm}^{-3}$  の重液に浮く画分、ガラスビーズを加えて振盪することで団粒を破壊した後に比重  $1.6 \text{ g cm}^{-3}$  の重液に浮く画分、比重  $1.6 \text{ g cm}^{-3}$  の重液に浮かず、 $2.0 \text{ g cm}^{-3}$  の重液に浮く画分、 $2.0 \text{ g cm}^{-3}$  の重液に浮かない画分の 4 画分に分け、それぞれ遊離型、団粒内隔離型、弱結合型、強結合型 SOC とした。

### (4) 有機資材からの SOC の形成 - 有機物の化学構造は蓄積形態に影響するか?

1987 年に開設された名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター東郷フィールド有機物連用試験厩肥 (多量施用、慣行量施用) コーヒー粕堆肥、バーク堆肥、汚泥コンポスト各施用区、片倉コープアグリ (茨城県つくば市) 有機物連用試験魚粉、菜種油粕施用区から採取した土壌および使用資材を供試した。SOC は (3) と同様 4 画分に分画し、未分画土壌、資材とともに CN 含量、<sup>13</sup>C CP/PASS NMR スペクトルの測定および THM-GC/MS 分析に供した。対照として化学肥料区 (化肥区) 土壌、東郷土壌においては無肥料区および開設直前の土壌についても分析を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 腐植物質の分解性

土壌微生物添加培養試験における各腐植物質試料の無機化速度は、気相の置換や新しい種菌の添加時に増大する傾向を示したもののあったが、全体的に経時的に低下し、最終的な C 無機化率にはいくつかの試料間で有意差が認められた (Fig. 1)。C 無機化率と黒色度の指標値である  $A_{600}/C$  との間には負の相関 ( $P < 0.01$ ; Fig. 2) が認められ、黒色度が高いほど分解されにくいことが確認された。最も黒色度が高かった試料の分解は C あたりで 0.9% に留まった。また、C 無機化率は <sup>13</sup>C CP/PASS NMR から求めた芳香族 C% との間にも負の相関 ( $P < 0.05$ ) を示し、一方、*O*-アルキル C (*N*-アルキル C を含む) % および THM-GC/MS で得られた直鎖飽和脂肪酸ジカルボン酸類の収量の和との間にはそれぞれ有意な正の相関 ( $P < 0.05$ ) が認められた。これらの結果より、腐植物質の化学構造の違いが微生物分解性に差をもたらしていることが推定された。

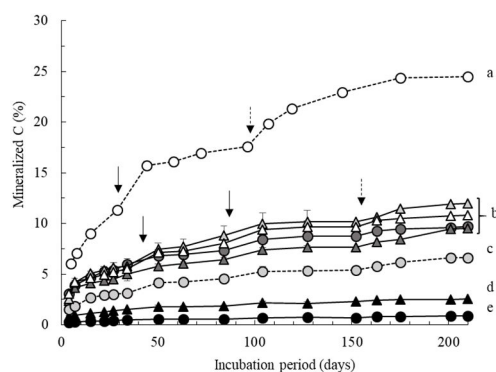


Fig. 1. Cumulative mineralization of carbon in humic acids (straight line) and fulvic acids (dotted line) during 210-day incubation.

Arrows and dotted arrows indicate replacement of gas phase by CO<sub>2</sub>-free air. Different alphabets indicate the presence of significant difference between samples.

培養試験前後の腐植物質試料の分析結果の比較は、多くの試料で試験中に黒色度 ( $A_{600}/C$  または  $\log(A_{400}/A_{600})$ ) が増大したこと、HPSEC に基づく平均分子量が低下した(排除画分が減少し、溶出ピークも低分子サイズ側へシフトした)こと、FT-IR スペクトルにおける 2 級アルコール C-O ( $1080\text{ cm}^{-1}$ )、脂肪族 C-H ( $1420\text{ cm}^{-1}$ )、アミド N-H ( $1560\text{ cm}^{-1}$ ; もともと検出されていた試料のみ)の相対強度が低下した (Fig. 3) ことを示した。また、 $^{13}\text{C}$  CP/PASS NMR の分析結果はこれを支持した。よって、主に腐植物質中の分子サイズの大きい脂肪族成分が分解され、一部は低分子化して残存したと考えられた。以上より、物理的および化学的保護のない条件下では、黒色度の高いフミン酸ほど高い微生物分解耐性を持っており、難分解性は主に芳香族構造によってもたらされると結論された。ただし、培養試験後の THM-GC/MS が未測定であり、芳香族成分間の分解性の違いについては今後の課題である。

## (2) 結合型 HU の実体

結合型 HU C の全 C、HU C ( $n = 5$ ) に占める割合は、それぞれ 22~49%、48~82% であり、全 C 含量が大きい土壌ほど結合型 HU C の割合が低くなる ( $P < 0.05$ ) ことが示唆された。結合型 HU の C/N は 6.3~22 であり、森林・草地土壌で水田・畑土壌より高い傾向を示した。 $^{13}\text{C}$  CP/PASS NMR スペクトル (Fig. 4) では、アルキル C (30 ppm 付近)、2 級アルコール (71~73 ppm)、芳香族 C (127~130 ppm) のシグナル強度が土壌間で大きく異なり、その差は土壌分類や土地利用とは対応しなかった。厩肥施用下の黄色土を除き、フェノール C、メトキシ C のシグナルは弱く、芳香族性はフミン酸 > HU > 結合型 HU の順に高く、*o*-アルキル C、カルボキシ C の含有率は逆の傾向を示した。THM-GC/MS 分析 (Fig. 5 に TIC の例を示す) では直鎖飽和脂肪酸 (C8~C33)、直鎖飽和ジカルボン酸 (C4~C27)、リグニンフェノール類その他フェノール、ポリフェノール、ベンゼンジカルボン酸、含 N 化合物 9 種、フラン類を含む糖関連化合物 10 種が検出され、収量の合計は 24~86  $\text{mg g}^{-1}\text{C}$  であった。C25 以上の直鎖飽和脂肪酸、C4、C9 以外の直鎖飽和脂肪族ジカルボン酸は菌体の分析では検出されず、植物由来と推察され、いずれも森林土壌の結合型 HU 中に多く認められた。一方、1,2,3,4-テトラメチルマンノースや含 N 化合物の多くは、糸状菌、細菌由来である可能性が推察され、それらの中にはフミン酸から検出されなかった化合物も含まれていたことから、微量ではあるが構成成分もフミン酸と同じではないことが示唆された。リグニンフェノール類の収量は総じてフミン酸より低く、 $^{13}\text{C}$  CP/PASS NMR の結果を支持した。なお、各種化合物群の収量はすべての土壌において全 HU よりも小さく、その差はリグニンフェノール類等で大きかったことから、inherited HU よりも微生物由来有機物の寄与が大きい一方、同定できない成分も多いと推察された。以上より、結合型 HU は、フミン酸と同じ構成成分を含んではいないものの、鉱物への強い吸着によって抽出されないフミン酸あるいはフルボ酸ではないと結論した。

## (3) 結合型 SOC の形成

土壌に添加した  $^{13}\text{C}$  Glc 由来 C の残存率は、培養 1 ヶ月目の 29% から 6 ヶ月目には 17% まで低下しており、3 ヶ月目以降は  $\text{CO}_2$  発生量にもとづく見かけの残存率 (30% から 7% へ減少) を上回ったものの、同化後も無機化が継続していたことを示した。残存した  $^{13}\text{C}$  Glc 由来 C は比重分離後、その 93~96% が結合型 SOC から検出されたが、遊離型 SOC、隔離型 SOC もわずかながら増大する傾向を示した。微生物バイオマス中の  $^{13}\text{C}$  Glc 由来 C は 6 ヶ月後には遊離型および隔離型 SOC 中の  $^{13}\text{C}$  Glc 由来 C の和を下回った。 $^{13}\text{C}$  CP/PASS NMR から推定された結合型 SOC 中の  $^{13}\text{C}$  Glc 由来 C の組成は、1、3 ヶ月目にはアルキル C が 41~42%、*o*-アルキル C が 29~35% を占めた。菌体の分析結果では、細菌 C はアルキル C が

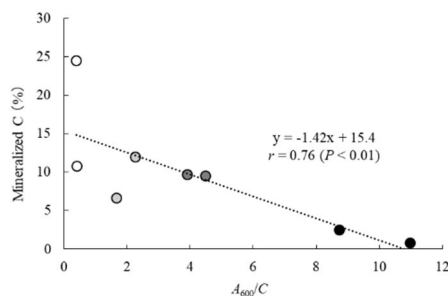


Fig. 2. Relationship between mineralized C % and  $A_{600}/C$ . Closed circles, humic acids; open circles, fulvic acids.

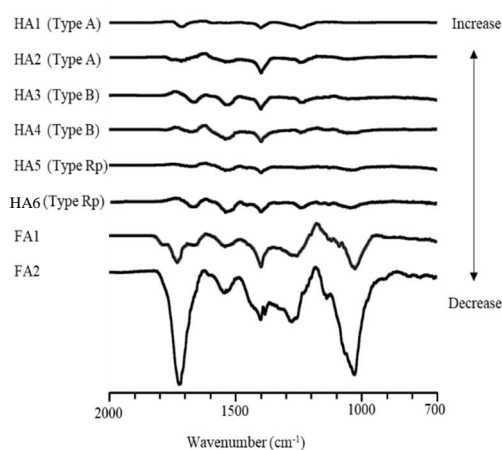


Fig. 3. Difference FT-IR spectra of humic acids (HA) and fulvic acids (FA) before and after incubation.

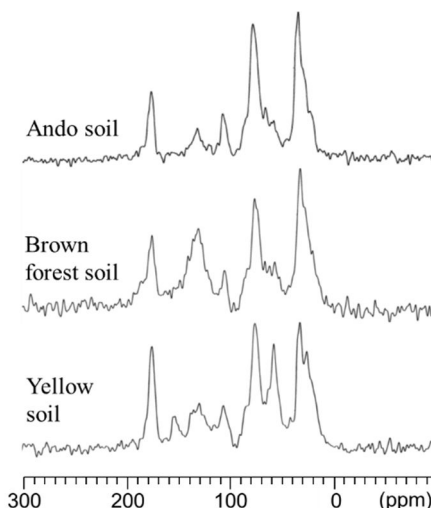


Fig. 4. Representative  $^{13}\text{C}$  CP/PASS NMR spectra of bound-type humin.

39%と糸状菌の約2倍高く、一方、細胞壁にムコ多糖を含む糸状菌のCはO-アルキルCが65%と卓越していたため、生成した結合型SOCには細菌の寄与が大きいと推察された。しかしながら、3ヶ月から6ヶ月目にかけてアルキルCは相対的にも絶対的にも減少したため、当初蓄積したアルキルCは分解から保護されなかったと考えられた。また、その間にO-アルキルCの蓄積が進んだことから、アルキルCの分解には糸状菌の寄与が大きかった可能性が推察された。なお、O-アルキルCに区分されているCのうち、メキシCとN-アルキルCの和は常に全Cの11~12%であり、O-アルキルCの蓄積は主として炭水化物Cによるものであることが示唆された。これらの結果は、結合型HUがフミン酸およびinherited HUよりも多くのO-アルキルCを含んでいたことと一致しており、微生物由来の糖類が鉱物あるいは既存の結合型SOCとの相互作用によって新たな結合型SOCを形成していくと結論した。ただし、Glc由来Cの減少が止まったわけではないため、形成された結合型SOCの長期安定性についてはなお検証が必要である。

#### (4) 有機資材連用による結合型SOCの形成

東郷土壌に施用されている汚泥コンポストはアルキルC(46%)、他の資材はO-アルキルC(57~63%)が最も多く、パーク堆肥と厩肥は芳香族Cが他より高いことで特徴付けられた。THM-GC/MSにおける分解生成物の収量はこれらを支持した。比重分画における強結合型SOCが全Cに占める割合は無肥料区、化学肥料区の70%以上から30%未満へと減少しており、主に弱結合型か遊離型の割合が増大した。強結合型SOCの<sup>13</sup>C CP/PASS NMRスペクトル(Fig. 6)は処理区間で類似し、アルキルCを多く含んでいたため、多くが有機物分解者(微生物)に由来すると推察された。ただし、元からアルキルCを多く含んでいた汚泥コンポスト区では分子レベルの解析から、資材由来有機物の蓄積が示唆された。同様にリグニンフェノールは全ての画分で2つの厩肥区から多く検出され、結合型としても蓄積していると推定された。遊離型SOC含量は厩肥慣行施用区とパーク堆肥区で高く、C/N比が高いことと相対的に多く含まれる芳香族成分の分解速度が遅いことがその要因と考えられた。つくば土壌では、施用量が低かったこともあり、菜種油粕区の遊離型SOC以外は有意な増大を示さなかった。THM-GC/MSで有機資材から特徴的に検出された化合物(魚粉粕の11-エイコセン酸、菜種油粕の3,4-ジメトキシルエン等)も遊離型SOCを中心に収量が増大していた。以上より、有機物連用により、資材由来、微生物由来いずれの結合型SOCの生成も進むが、いずれが多く蓄積するかは資材の化学構造に依存し、また、施用量が少ない場合には、強結合型SOCの形成は困難であると結論した。

謝辞 リグニンの調製をご教授下さいました名古屋大学(現東京農工大)松下泰幸博士、土壌試料を提供いただきました片倉コープアグリ株式会社に御礼申し上げます。

<引用文献> <sup>1)</sup> Nakahara, S. et al., 2016. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 121, 67-77. <sup>2)</sup> 筒木 潔, 2005. 土壌サイエンス入門(文永堂), p. 114. <sup>3)</sup> Courtier-Murias, D. et al., 2013. *Agr. Ecosys. Environ.* 171, 9-18. <sup>4)</sup> 渡辺 彰, 2008. 環境中の腐植物質(三共出版), p. 74-81. <sup>5)</sup> 渡辺 彰, 2019. 腐植物質分析ハンドブック(第2版), p. 86-91. <sup>6)</sup> Ikeya, M. and Watanabe, A. 2016. *Anal. Bioanal. Chem.*, 408, 651-655. <sup>7)</sup> Ikeya, Y. et al., 2004. *Org. Geochem.*, 35, 583-594. <sup>8)</sup> Abe, T. et al., 2007. *Biol. Fertil. Soils*, 43, 427-435; <sup>9)</sup> Argyropoulos, D.S. et al., 2002. *J. Pulp Paper Sci.* 28, 50-54.

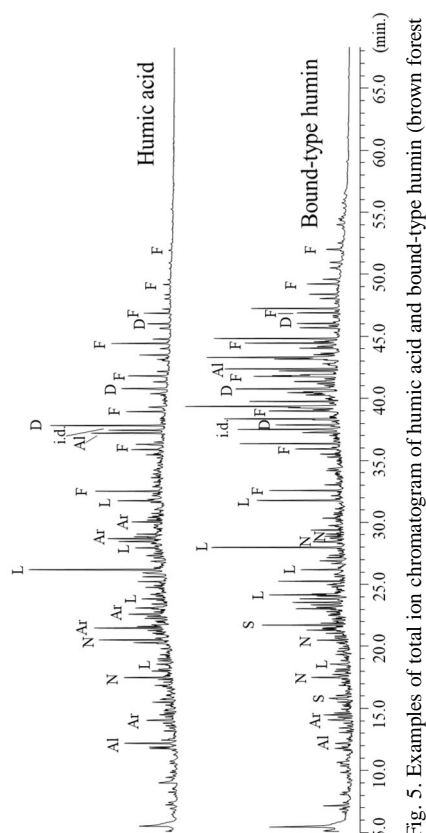


Fig. 5. Examples of total ion chromatogram of humic acid and bound-type humin (brown forest soil) upon THM-GC/MS.  
F, saturated fatty acids; D, dicarboxylic acids; Ar, other aliphatic compounds; L, lignin phenols; Ar, other aromatic compounds; N, N-containing compounds; S, saccharide-related compounds.

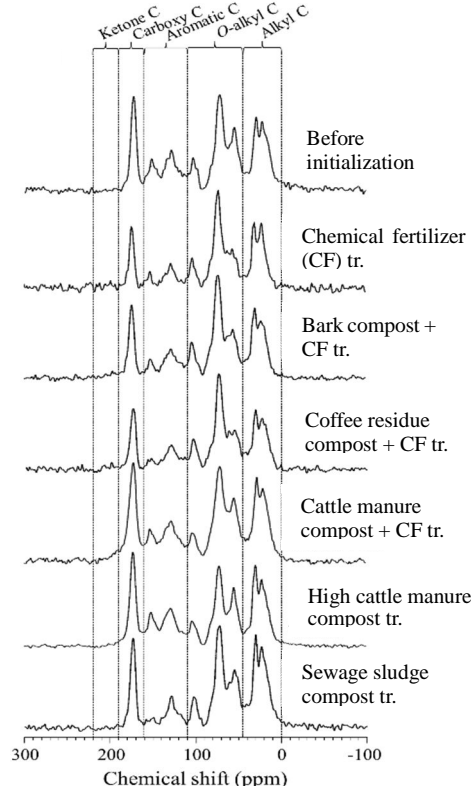


Fig. 6. <sup>13</sup>C CP/PASS NMR spectra of strongly bound-type SOC in Togo soil with long time application of various organic amendments.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sisok, S., Naruse, H., and Watanabe, A.	4. 巻 825
2. 論文標題 Mechanisms controlling the stabilization of soil organic matter in agricultural soils as amended with contrasting organic amendments: Insight from physical fractionation coupled with <sup>13</sup> C NMR spectroscopy.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 153853
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2021.1972753	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡邊 彰・今飯田枝理・池谷康祐
2. 発表標題 各種土壌フルボ酸およびヒューミンの熱的支援加水分解およびメチル化GC/MS分析による成分組成解析
3. 学会等名 日本腐植物質学会第35回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本真子・池谷康祐・渡邊 彰
2. 発表標題 鉱物結合型ヒューミンの化学構造特性
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2021年度東京大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiattisak Sonsri, Haruka Naruse, Akira Watanabe
2. 発表標題 Linking organic amendments chemistry with soil organic matter stability under the long-term fertilization: Evidence from <sup>13</sup> C NMR spectroscopy
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2021年度東京大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井朱瑞・渡邊 彰
2. 発表標題 腐植物質の無機化速度と黒色度の関係および生物分解による構造変化
3. 学会等名 日本腐植物質学会第37回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本真子・渡邊 彰
2. 発表標題 13Cグルコースを用いた菌体由来結合型土壌有機物の解析
3. 学会等名 日本土壌肥料学会中部支部第101回例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiattisak Sonsri, Masahiro Mitsuboshi, Akira Watanabe
2. 発表標題 Assessment of mechanisms governing soil organic matter stabilization under the long-term fertilization in Andosols using 13C NMR and thermochemolysis techniques
3. 学会等名 日本土壌肥料学会中部支部第101回例会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------