

愛知県の畑土壌における土壌全炭素含量と土壌全窒素含量または 土壌可給態窒素含量の関係解明

中村嘉孝¹⁾・山本 拓²⁾・久野智香子³⁾・大橋祥範³⁾・安藤 薫³⁾・大竹敏也³⁾

摘要:有機質資材の施用による土壌窒素肥沃度管理技術の確立に向けて、愛知県で実施された有機質資材の施用試験及び土壌調査のデータを用いて、愛知県の畑土壌における土壌全炭素含量(TC量)と土壌全窒素含量(TN量)または土壌可給態窒素含量(AvN量)の関係を明らかにした。TC量とTN量は有意な正の高い相関関係を示した。このことから、有機質資材の種類、施用の有無だけでなく、地域や栽培品目等の条件が異なっても、有機質資材の施用に伴うTC量の変化が明らかになればTN量を予測できることが示された。一方、TC量とAvN量も有意な正の相関関係が認められ、TC量の変化からAvN量の増減傾向を予測できることが示された。しかし、TC量とAvN量の関係はTC量とTN量の関係よりもばらつきが大きく、AvN量の予測精度向上に向けた手法の改善が必要である。

キーワード:有機質資材、畑土壌、土壌全炭素含量、土壌全窒素含量、土壌可給態窒素含量

緒言

窒素は作物の生育、収量に大きく影響することから、土壌からの作物への窒素供給量を把握することは土地生産性の向上において重要である。土壌中の窒素の形態はそのほとんどが有機態であり、土壌全窒素含量(TN量)が指標とされる。しかし、有機質資材の施用に伴うTN量の変化を予測できる手法は実用化されていない。

また、土壌からの作物への窒素供給量の指標には、30°C4週間の培養期間に無機化される易分解性の有機態窒素含量である土壌可給態窒素含量(AvN量)が用いられている。愛知県の畑土壌におけるAvN量を調査した報告^{1,2)}において、地力増進基本指針³⁾の普通畑における改善目標値(50 mg kg⁻¹)以下であった調査ほ場の割合は7割以上と多かった。同様に、地力増進基本指針の普通畑における土壌有機物含量が改善目標値(30 g kg⁻¹(未熟低地土は20 g kg⁻¹))以下であった調査ほ場の割合は5割以上と多かった¹⁾。このため、愛知県の畑土壌における有機物の施用は、土壌の有機物含量を増加させるとともに窒素供給量を増やし、土地生産性を高める上で極めて重要な土壌管理である。

一方で、作物への過剰な窒素の供給は作物を軟弱にさせて病害虫や風水害等の影響を受けやすくし、収量の低下につながる。また、作物に吸収、利用されなかった窒素が湖沼や海へ流出すると富栄養化につながり環境負荷となる。したがって、AvN量を把握し、その供給量に応じた施肥を行うことが持続的な農業生産を行うために重要である。

これまでに愛知県では、窒素の適正施肥の実現に向けて、秋冬キャベツ栽培及びスイートコーン栽培におけるAvN量に基づく施肥窒素指針が作成されている⁴⁾。AvN量が少ないほ場では有機質資材を施用し、土壌有機物含量の増加を通じてAvN量を増加させることが有効である。しかし、有機質資材の施用に伴う土壌有機物含量の変化は緩やかで、その効果は施用後の1作の栽培期間だけでなく、その後も長期間に及ぶ。このため、有機質資材の多量施用や連用による過剰な窒素供給を抑制するためには、有機質資材の施用に伴うAvN量の変化を予測したうえで、化学肥料や有機質資材自体の施用量を決定する必要がある。しかし、有機質資材の施用に伴うAvN量の変化を予測できる手法は実用化されていない。

土壌有機物含量の指標とされるTC量とTN量またはAvN量は有意な正の相関関係が認められている^{1,5,6)}。しかし、これらの報告にあるTC量とTN量またはTC量とAvN量の関係は同一試験内での解析に留まり、有機質資材の種類、地域、土壌の種類等の違いを踏まえた定量的な関係は明らかにされていない。TC量とTN量またはTC量とAvN量の関係を定量的に明らかにすることができれば、TC量の変化の予測から土壌の窒素肥沃度に関する土壌特性値の変化を予測できると考えられる。

そこで、本研究では愛知県内の畑土壌における有機質資材の施用による土壌窒素肥沃度管理技術の確立に向けて、過去に実施された有機質資材の施用試験や土壌調査のデータを用いて、TC量とTN量及びTC量とAvN量の関係を明らかにすることを目的とした。

¹⁾環境基盤研究部(現普及戦略部) ²⁾東三河農業研究所 ³⁾環境基盤研究部

材料及び方法

1 土壌全炭素含量と土壌全窒素含量の関係解明

解析には、愛知県農業総合試験場(長久手市、豊橋市及び安城市)で実施した有機質資材の連用試験(表1、以下、連用試験)⁵⁻¹⁵⁾及び愛知県内の野菜畑で実施した土壌調査(以下、野菜畑調査)¹⁶⁾における報告値または試験や調査の継続により得られた値を用いた。TC量及びTN量は乾式燃焼法で測定した。TC量を説明変数、TN量を目的変数として単回帰分析を行った。

2 土壌全炭素含量と土壌可給態窒素含量の関係解明

解析には、1で用いた連用試験を用いたが、AvN量のデータが欠損していた試験4、試験5、試験9、試験11及び試験13は除いた(表1)。さらに、愛知県の畑土壌におけるTCとAvNの関係解析については、野菜畑調査^{2,16)}に加えて、愛知県内のアブラナ科野菜栽培ほ場の調査(以下、アブラナ科畑調査)¹⁾における報告値または試験や調査の継続により得られた調査値を用いた。なお、堆肥の多量施用によるデータが全体の傾向に大きな影響を与えるとした既報¹⁾に準じて、野菜畑調査及びアブラナ科畑調査においてAvN量が50 mg kg⁻¹より多いデータは解析から除いた。

連用試験のAvN量は30°C4週間の保温静置法¹⁷⁾で測定した。野菜畑調査及びアブラナ科畑調査のAvN量は、上菌¹⁸⁾の方法に準じて、30°C4週間の保温静置法の簡易評価法(80°C16時間水抽出で抽出した有機態炭素量からAvN量を推定)で測定した²⁾。TC量を説明変数、AvN量を目的変数として単回帰分析を行った。

結果及び考察

1 土壌全炭素含量と土壌全窒素含量の関係

連用試験で供試された有機質資材は、牛ふん堆肥や豚ふん堆肥、緑肥、下水汚泥肥料等と様々であったが、これらの試験土壌におけるTC量とTN量は有意な正の相関関係を示した(図1)。これまで、TC量とTN量の関係は同一ほ場において実施された有機質資材の施用試験で相関関係が報告されているが⁹⁾、本研究の結果から有機質資材の種類が異なってもTC量とTN量の相関関係は強いと考えられる。また、連用試験は同一ほ場における複数年に及ぶ試験結果であることから、有機質資材の施用の有無や連用、残効といった経年的な変化においてもTC量とTN量の相関関係は強いと考えられる。野菜畑調査でも各ほ場の有機質資材施用歴の違いだけでなく、地域や栽培品目、土壌の種類が異なっていたが、TC量とTN量は有意な正の相関関係を示した。

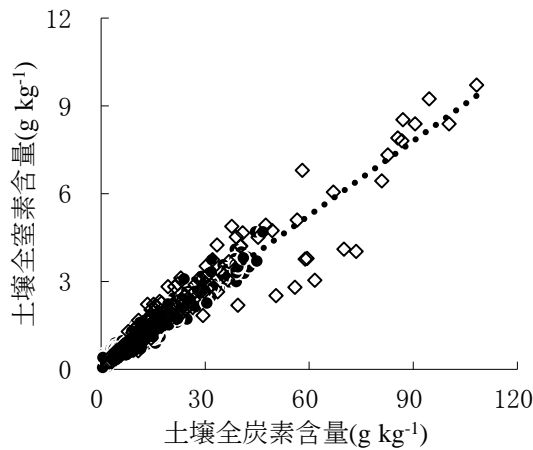
表1 試験ほ場の概要

試験番号	試験地	土壌分類	解析期間(年)	施用有機質資材 ¹⁾
試験1 (文献6)	長久手市	黄色土	2002-2020	牛ふん堆肥(15 t ha ⁻¹ y ⁻¹) 豚ふん堆肥(10 t ha ⁻¹ y ⁻¹)
試験2 (文献7)	長久手市	黄色土	2013-2020	豚ふん堆肥(10 t ha ⁻¹ y ⁻¹)
試験3 (文献8)	長久手市	黄色土	2016-2021	豚ふん堆肥(10 t ha ⁻¹ y ⁻¹)と緑肥(ソルガム) 豚ふん堆肥(10 t ha ⁻¹ y ⁻¹)
試験4 (文献9)	長久手市	褐色森林土	1981-1997	家畜ふん堆肥(30、60 t ha ⁻¹ y ⁻¹)* 稲わら堆肥(30、15 t ha ⁻¹ y ⁻¹)*
試験5 (文献10)	長久手市	褐色森林土	1974-1976	おがくず混合豚ふん堆肥(20、40、80 t ha ⁻¹ y ⁻¹)* おがくず混合豚ふん堆肥(20、40、80 t ha ⁻¹ y ⁻¹ 、初作のみ)*
試験6 (文献11、12)	豊橋市	黄色土	2005-2019	牛ふん堆肥(7.5、15、22.5 t ha ⁻¹ y ⁻¹)(45 t ha ⁻¹ 3 y ⁻¹) 豚ふん堆肥(5、10、15 t ha ⁻¹ y ⁻¹)
試験7 (文献5)	豊橋市	黄色土	1981-1994	稲わら堆肥(20、40、60、80 t ha ⁻¹ y ⁻¹)
試験8 (文献13)	豊橋市	黄色土	1981-1984	下水汚泥肥料(20 t ha ⁻¹ y ⁻¹)(20、40 t ha ⁻¹ y ⁻¹ 、初作のみ) 稲わら堆肥(20 t ha ⁻¹ y ⁻¹)
試験9 (文献14)	豊橋市	黄色土	1988-1995	汚泥発酵肥料(20 t ha ⁻¹ y ⁻¹)(60 t ha ⁻¹ y ⁻¹ 、初作のみ) 豚ふん堆肥(20 t ha ⁻¹ y ⁻¹)またはバーク堆肥(10 t ha ⁻¹ y ⁻¹)
試験10	豊橋市	黄色土	2013-2016	豚ふん堆肥(20 t ha ⁻¹ y ⁻¹) 豚ふん堆肥(20 t ha ⁻¹ y ⁻¹ 、2014年から施用を中断)
試験11 (文献15)	豊橋市	黄色土	2005-2011	緑肥(ソルガム) 緑肥(クロタリリア)
試験12	豊橋市	黄色土	2012-2017	緑肥(ソルガム)
試験13 (文献9)	安城市	黄色土	1975-1981	稲わら堆肥(15 t ha ⁻¹ y ⁻¹)* 家畜ふん堆肥(30 t ha ⁻¹ y ⁻¹)*

いずれの試験も有機質資材を無施用とした処理区を含む

試験10及び試験12は文献なし

1) 印(*)がある場合は現物重、印(*)がない場合は乾物重を表す



連用試験(●): $y = 0.085x + 0.177$
 (n = 967, $R^2 = 0.946$ ($P < 0.01$))
 野菜畑調査(◇): $y = 0.084x + 0.207$
 (n = 299, $R^2 = 0.917$ ($P < 0.01$))
 連用試験+野菜畑調査(●と◇): $y = 0.085x + 0.185$
 (n = 1266, $R^2 = 0.931$ ($P < 0.01$))
 図中の点線は連用試験と野菜畑調査をあわせた回帰直線を示す

図1 連用試験及び愛知県内の畑土壌における
 土壌全炭素含量と土壌全窒素含量の関係

このことから、栽培品目、土壌の種類や地理的な変化があってもTC量とTN量の相関関係は強いと考えられる。

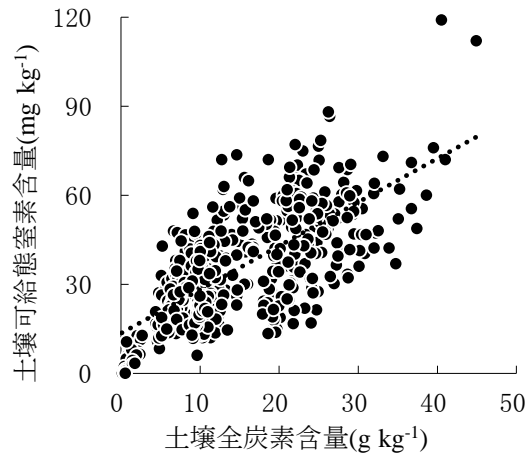
連用試験及び野菜畑調査を合わせた結果を用いたTC量とTN量は、 $y = 0.085x + 0.185$ (y: 土壌全窒素含量, x: 土壌全炭素含量, 単位はいずれも g kg^{-1}) の同一直線に回帰した(図1)。この回帰式の傾きはTC量の変化に伴うTN量の変化を表していることから、TC量で 1.000 g kg^{-1} の増加(あるいは減少)は、TN量を 0.085 g kg^{-1} 増加(あるいは減少)させると予測できることが示された。

なお、水田土壌ではもみがらを多量に連用した場合 ($20 \text{ t ha}^{-1} \text{ 年}^{-1}$) のTC量は顕著に増加したが、TN量の増加はわずかであったことが報告されている¹⁹⁾。愛知県の有機質資材施用基準²⁰⁾の露地野菜におけるもみがらの基準量は1年当たり 5 t ha^{-1} であるため、このように多量に施用されることはないものの、もみがらのように窒素をほとんど含まず、炭素含有率が多い有機質資材を畑土壌に施用する場合における本回帰式の適応性については検証が必要である。

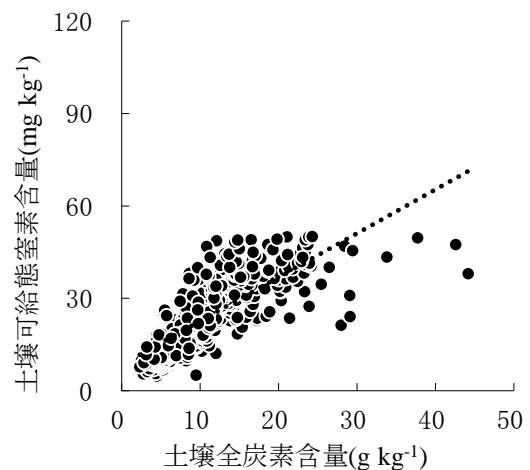
2 土壌全炭素含量と土壌可給態窒素含量の関係

有機質資材の種類や施用法が異なる連用試験において、TC量とAvN量は有意な正の相関関係を示した(図2)。また、野菜畑調査及びアブラナ科畑調査においても、TC量とAvN量は有意な正の相関関係を示した(図3)。

有機質資材の種類や施用法が異なっている条件での解析においてもTC量とAvN量が正の相関関係を示したことは、従来から言われているとおり、有機質資材の施用はTC量の増加、すなわち土壌有機物を増加させることでAvN量の増加に寄与することを示している。しかし、TC量とAvN量の解析点数がTC量とTN量の連用試験及び野菜畑調査の



$y = 1.47x + 13.45$ (n = 540, $R^2 = 0.497$ ($P < 0.01$))
 図2 連用試験における土壌全炭素含量と土壌可給態窒素含量の関係



$y = 1.42x + 8.42$ (n = 493, $R^2 = 0.614$ ($P < 0.01$))
 土壌可給態窒素含量が 50 mg kg^{-1} より多いデータは解析から除いた

図3 愛知県内の畑土壌における土壌全炭素含量と
 土壌可給態窒素含量の関係

解析点数よりも少なかったにも関わらず、TC量とAvN量の決定係数はTC量とTN量の決定係数よりも低く、TC量とTN量の関係よりもばらつきが大きかった。AvN量のばらつきが大きかった要因として、土壌または有機質資材中の易分解性有機物含量やその無機化に関わる土壌微生物の存在量とその活性が影響したと考えられる。

連用試験と、野菜畑調査とアブラナ科畑調査におけるTC量とAvN量の回帰式の傾きはそれぞれ1.47、1.42で同程度であり、その平均値は1.45であった。TC量とAvN量の関係はTC量とTN量の関係よりもばらつきがあるものの、この回帰式の傾きはTC量の変化に伴うAvN量の変化を表していることから、TC量で 1.00 g kg^{-1} の増加(あるいは減少)は、AvN量を 1.45 mg kg^{-1} 増加(あるいは減少)させると推定できる。

3 土壌全炭素含量からの土壌全窒素含量または土壌可給態窒素含量の予測と課題

TC量は、TC量または腐植含量として土壌診断の項目に採用されているが、TN量やAvN量は分析操作が煩雑で長時間を要する等の理由により、土壌診断の項目に採用されていない。本研究の結果から、栽培品目、有機質資材の種類、地域、土壌の種類等の違いがあっても、TC量の測定値が明らかになれば、TC量を測定した時点のTN量やAvN量といった土壌窒素肥沃度を推定できることが明らかとなった。

さらに、有機質資材の施用に伴って変化するTC量の将来の変化が予測できれば、本帰式を用いてTN量やAvN量の将来の変化も予測できると考えられる。実際、愛知県の畑土壌におけるTC量の変化の予測について、土壌炭素動態モデルであるRothamsted Carbon Modelの適合性は高いことが報告されており²¹⁾、家畜ふん堆肥を連用した愛知県の砂質露地畑において、TC量の変化の予測からAvN量の変化を予測できる可能性が報告されている⁹⁾。今後、土壌炭素動態モデルと本帰式を用いてTN量やAvN量の変化量を予測した場合の予測精度の検証が必要である。

一方で、TC量とAvN量の関係はTC量とTN量の関係に比べてばらつきが大きかった。このため、実際に窒素の施肥量をどれくらい増肥、または減肥させるかは、TC量からのAvN量の予測値ではなく、作付け前の土壌分析によるAvNの実測値から診断を行うべきである。本研究で明らかとなったTC量からのAvN量の予測は簡便な手法であるものの、さらなる予測精度向上に向けた手法の開発が必要である。

引用文献

1. 日置雅之, 都築宏明, 瀧勝俊. 愛知県内アブラナ科野菜栽培ほ場における土壌窒素肥沃度の実態. 愛知農総試研報. 52, 117-120(2020)
2. 中村嘉孝, 久野智香子, 大橋祥範, 安藤薫, 大竹敏也. 愛知県の非黒ボク土露地畑における80°C16時間水抽出液の吸光度測定による可給態窒素含量の簡易迅速評価. 日本土壌肥料学雑誌. 93, 29-33(2022)
3. 農林水産省. 地力増進基本指針. (2008)
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/pdf/chi4.pdf (2020.2.4参照)
4. 日置雅之, 中村嘉孝, 山本拓, 大橋祥範, 糟谷真宏, 瀧勝俊. 土壌、堆肥、化学肥料由来別窒素利用率と可給態窒素に基づいた秋冬キャベツおよびスイートコーンの施肥指針. 愛知農総試研報. 52, 17-22(2020)
5. 今川正弘, 河合伸二, 木下忠孝, 真弓洋一, 大嶋秀雄. 鈣質畑土壌における炭素の蓄積とその効果. 愛知農総試研報. 21, 281-288(1989)
6. 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. 愛知農総試研報. 52, 23-30(2020)
7. 山本岳, 安井俊樹, 鈴木玉与, 菅野淳夫, 瀧勝俊. 畑地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. 愛知農総試研報. 53, 57-66(2021)
8. 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. 愛知農総試研報. 53, 37-48(2021)
9. 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.1-184(1983)
10. 沢田守男, 岩田久史, 森健治郎, 加藤虎治. おがくず混合家畜ふん堆肥の飼料作利用. 愛知農総試研報A(作物). 10, 127-136(1978)
11. 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. 愛知農総試研報. 43, 137-149(2011)
12. 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. 愛知農総試研報. 48, 91-99(2016)
13. 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). 愛知農総試研報. 18, 158-167(1986)
14. 豊橋農業技術センター. 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)
15. 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. 愛知農総試研報. 42, 141-146(2010)
16. 牧田尚之, 久野智香子, 武井真理, 池田彰弘, 吉川那々子. 愛知県の野菜主要産地における施肥量, 生産量, 養分吸収量及び土壌の化学性. 愛知農総試研報. 45, 11-19(2013)
17. 土壌環境分析法編集委員会編. 土壌環境分析法. 博友社. 東京. p.257-259(1997)
18. 上菌一郎, 加藤直人, 森泉美穂子. 80°C16時間水抽出液のCOD簡易測定による畑土壌可給態窒素含量の迅速評価. 日本土壌肥料学雑誌. 81, 252-255(2010)
19. 岩田久史, 森健治郎, 澤田守男, 今川正弘, 加藤裕司, 加藤虎治. もみがらの多量連用施用が水稻生育に及ぼす影響. 愛知農総試研報. 14, 40-45(1982)
20. 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)
21. 中村嘉孝, 山本拓, 久野智香子, 大橋祥範, 山本岳, 安藤薫, 瀧勝俊, 大竹敏也. 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. 愛知農総試研報. 53, 25-36(2021)