生物と気象（*Climate in Biosphere*）25：85−86, 2025

草地管理が牧草地の生態系炭素収支に及ぼす影響 —11 年間の渦相関データに基づく解析

松浦　庄司

（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構　農業環境研究部門）

1. はじめに

このたびは，Shoji Matsuura, Akinori Mori, Akira Miyata and Ryusuke Hatano, 2023: Effects of farmyard manure application and grassland renovation on net ecosystem carbon balance in a temperate grassland: analysis of 11-year eddy covariance data. *Journal of Agricultural Meteorology* **79(1)**, 2–17 に対して，伝統ある日本農業気象学会論文賞を賜りましたこと，大変光栄に存じます。本稿では，論文の概要や補足事項等につきまして，若干の紹介をさせていただきます。

2. 論文概要

2.1 草地管理が生態系炭素収支に及ぼす影響を明らかにした

この研究では，堆肥連用や草地更新といった草地管理が牧草地（採草地）の生態系炭素収支に及ぼす影響を，11 年に及ぶ渦相関法による CO_2 フラックス観測やバイオマス調査等に基づいて定量的に明らかにしました。

2.2 研究の背景

草地にはあまり馴染みがない方も多いと思いますが，草地は放牧や飼料作物栽培を通じて家畜飼養のために広く利用されており，食料生産を考える上で重要な生態系です。また，草地はこの他にも，生物多様性保全や土壌保全等の多くの機能を有しており，それらの機能の一つとして土壌有機炭素（soil organic carbon, SOC）の貯留が挙げられます。草地では地下部バイオマスが大きく土壌への有機物供給量が大きいこと，耕起頻度が低く土壌有機物の分解速度が小さいことがその主な理由であり，一般に草地は他の生態系と比べて SOC 量が多いと考えられています。しかしながら，草地の SOC 量は，その管理方法によって増える方向にも減る方向にも影響されることが様々な研究で指摘されています（Conant *et al*., 2017）。そのため，草地管理が SOC 変化や生態系炭素収支に及ぼす影響，これらと環境要因との関係を把握することは，現在，そして将来の気候変動下における草地の炭素動態への理解を深める上でとても重要です。

日本では，集約的な管理草地である牧草地は，耕地面積（田畑計）の 13.7%，畑面積の 30.0%と，決して少なくない面積を占めています（農林水産省大臣官房統計部，2025）。しかしながら，牧草地の SOC 量や生態系炭素収支，草地管理がこれらに及ぼす影響について，これまで定量的な把握が十分に行われておらず，耕地の他の地目と比べて情報が不足していました。

この研究では，日本における草地管理の中で特に重要な堆肥施用と草地更新に着目し，これらの管理が牧草地の生態系炭素収支に及ぼす影響を，渦相関法による CO_2 フラックス観測やバイオマス調査等によって定量的に明らかにすることを目的としました。日本において堆肥施用が重要な草地管理と位置付けられるのは，輸入飼料に大きく依存した畜産業を営む日本では輸入飼料から家畜排泄物に移行した養分を飼料生産に利用することが大切であるためです。

2.3 草地管理と生態系炭素収支

研究は農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）那須塩原研究拠点内の牧草地（採草地）で実施しました。堆肥施用の影響を調べるため，隣接する 2 区画の草地の一方に化学肥料のみを施用する処理区（CF 区，2.3 ha），もう一方に，牛糞堆肥を毎年施用（初年目は 15 Mg ha^{-1} yr^{-1}，それ以降は 30 Mg ha^{-1} yr^{-1}）し補足的に化学肥料を施用する処理区（CM 区，2.4 ha）を配置し，各区の中央付近に渦相関法（オープンパス法）の測器と微気象関連の測器を設置しました。2004 年～2015 年の 11 年間，渦相関法による CO_2 フラックスの観測を実施し，毎年の生態系光合成量，生態系呼吸量，純生態系生産量の評価を行いました。これに加えて，年 3～4 回の牧草の収穫によって系外に持ち出された炭素量や堆肥施用によって系内に投入された炭素量を評価することで，生態系炭素収支に関する詳細な解析を行いました。また，草地更新の影響を調べるため，研究期間中 2 回の完全更新法による草地更新（反転・耕起と再播種）を行いました。

CF 区では，牧草の収穫によって処理区外に持ち出される炭素量は常に純生態系生産量よりも多く，純生態系炭素収支（net ecosystem carbon balance, NECB）の研究期間中の値は−1.32 ± 0.82 Mg C ha^{-1} yr^{-1}（平均値±標準偏差）となって，毎年炭素の放出源となっていることが分かりました。CM 区においても収穫により処理区外に持ち出される炭素量は常に純生態系生産量を上回りましたが，堆肥施用による炭素投入（平均 4.04 Mg C ha^{-1} yr^{-1}）によって，NECB の値は 1.79 ± 1.59 Mg C ha^{-1} yr^{-1} となり炭素の吸収源として機能していることが明らかになりました。

10 年以上にわたる観測データを解析することで，以下のように堆肥連用のやや長期的な効果を示すことができました。CM 区に施用された堆肥の一部は分解されて CO_2 として大気に放出されますが，両処理区の生態系呼吸量の比較から，堆肥を

https://agrmet.jp/wp-content/uploads/2025-H-6.pdf
2025 年 9 月 24 日　受付
Copyright 2025, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

連用すると，それにより投入された炭素の 45%が草地に蓄積されることが示唆されました。また，堆肥施用により 3.67 Mg C ha^{-1} yr^{-1} 以上の炭素を毎年投入することで，この生態系を炭素の吸収源にすることができると推定されました。

草地更新が生態系炭素収支に及ぼす影響については，解析が難しく，また，結果はやや複雑なものとなりました。しかしながら，その影響は概して小さいことが分かりました。すなわち，一般的な完全更新法による草地更新を行うと，両処理区でその年の NECB が負の値（すなわち炭素の放出源）になるものの，次年以降の NECB への影響はあまり見られないことが明らかになりました。また，草地更新を簡素化して植生や土壌の攪乱を小さくした場合には，年間の炭素収支に及ぼす影響が小さくなることも示されました。

2.4 フラックス観測に基づく生態系炭素収支と土壌試料採取に基づく土壌有機炭素変化との整合性について

研究を進める中で，CO_2 フラックス観測に基づく生態系炭素収支の推定値と土壌試料採取に基づく SOC 変化の実測値との整合性について，共著者を含むこの研究の関係者や同僚の間で時折議論になりました。

この研究では，研究期間の後半（2010～2015 年）に各区で複数回土壌試料を採取し，30 cm 深までの面積あたり SOC 量の推移についても調査を行いました。その結果，生態系炭素収支の解析結果とは異なり，いずれの区においても SOC 量の有意な増減は認められませんでした。

このような結果の違いが生じた要因は，フラックスの観測と SOC の実測の両方にあると考えられます。前者側の要因としては，渦相関法によるフラックス観測やデータ処理過程で生じる誤差，この研究では考慮されていない溶存有機炭素の系外への溶脱，等が考えられます。一方，後者側の要因としては，SOC の存在量に比べて変化量はごく僅かであるため，短期間（数年程度）の調査では SOC の変化量が実測値の誤差に埋もれてしまうこと，他の農耕地と比べて耕起頻度が低く礫含量が多い草地では面積あたり SOC 量の空間変動が大きく，それが大きな誤差要因になること，等が考えられます。

また，SOC 量を評価する際には，地表の有機物は採取せず鉱質土壌のみを対象とし，採取試料のうち 2 mm より大きい画分に含まれる粗大有機物は土壌と見なさずに取り除いてしまいます。この研究では，地表に残った未分解の牧草残渣や堆肥，土壌試料に含まれる堆肥由来の粗大有機物（副資材等）について，その炭素量の把握が不十分でした。草地における地表の未分解有機物や土壌試料中の粗大有機物の炭素量は，その空間変動の大きさから，適切に評価するには大きな労力を要し非常に難しかったためです。このように，フラックス観測に基づく生態系炭素収支の推定と土壌試料採取に基づく SOC 変化の実測で評価対象としているものに乖離があったことも，両者が整合しなかった要因の一つと考えられます。

一方で，筆者が 2010 年より取り組んでいる全国 9 地点（北海道～九州）の採草地における SOC モニタリング試験の結果から，半数程度の地点では堆肥施用を行わなければ SOC が減少する一方，毎年 30 Mg ha^{-1} yr^{-1} の家畜糞堆肥の施用を行うと全地点で SOC が増加することが示され（Matsuura *et al*., 2021），この研究と同傾向の結果が得られています。

3. 今後の展望

今後は，牧草地におけるフラックス観測と SOC 実測で得られた結果の整合性に関してさらに検討を進めていくとともに，草地管理がより長期的な炭素動態や SOC 変化に及ぼす影響について，土壌炭素動態モデル等も活用しながら明らかにしていくことが課題です。そのためには，地表付近の物質動態が牧草地と類似していると考えられる樹園地・森林・不耕起栽培の耕地，あるいは，土壌中における有機物の詳細な動態（鉱物との相互作用による安定化等），といった周辺の生態系や学問分野の研究者と協力しながら研究を進めていくことが必要と考えています。

また，国内では草地の炭素動態に関する研究者が少ない，ということもありますので，筆者が現在取り組んでいる採草地の SOC モニタリング研究も含め，これまでの草地の炭素動態研究で得た知見・知識・技術等を若手の研究者に積極的に共有していきたいと考えています。このような活動も通じ，微力ながら農耕地の炭素動態研究の深化・発展に貢献できればと思っています。

4. 謝辞

この場をお借りして，共著者の森昭憲博士（農研機構畜産研究部門），宮田明博士（元農研機構農業環境研究部門），波多野隆介先生（北海道大学名誉教授），そして，論文賞にご推薦くださった先生方，学会賞審査委員会の皆様に心より感謝申し上げます。この研究の遂行にあたっては，試験圃場の管理，微気象観測や各種調査の補助，データ解析や論文執筆に関する助言等，本当に多くの方々に多大なご協力をいただきました。この研究に関わってくださった全ての皆さまに深く感謝申し上げます。

引用文献

Conant RT, Cerri CEP, Osborne BB *et al*., 2017: Grassland management impacts on soil carbon stocks: A new synthesis. *Ecological Applications* **27**, 662-668. https://doi.org//10.1002/eap.1473

Matsuura S, Kazama R, Hibino H *et al*., 2021: Manure application in managed grasslands can contribute to soil organic carbon sequestration: Evidence from field experiments across Japan. *Regional Environmental Change* **21**, 76.

農林水産省大臣官房統計部，2025：令和 6 年度耕地及び作付面積統計. https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html#r（アクセス日：2025/9/21）.