

農地への有機物由来炭素投入量の推定と 農地土壌炭素蓄積量のモデリング

古賀伸久¹

Estimating annual plant carbon inputs to the soil and modelling future
changes in soil carbon stocks in croplands

Nobuhisa KOGA¹

1. はじめに

1.1 地球温暖化対策としての農地管理技術への期待

農業分野が貢献できる地球温暖化対策として、大気中の温室効果ガス濃度の低減につながる農地の管理技術に大きな期待が寄せられている (Smith et al., 2007). 日本においても、農地の適切な管理による大気中二酸化炭素 (CO₂) 濃度の低減は、農業分野における温室効果ガス排出削減目標において重要な位置を占める。土壌中の炭素蓄積量の減少を抑制する不耕起や省耕起などの保全型耕起法のほか、土壌中の炭素蓄積量を増加させる堆肥施用、緑肥作物や作物残さ発生量が大きな作物の輪作体系への新規導入など、これらの農地管理技術に大気中の CO₂ 濃度を低下させる効果があるとされている (古賀, 2007).

1.2 RothC モデルと入力データの課題

土壌への有機物投入量が土壌中の炭素蓄積量に及ぼす影響を予測する方法としては、土壌炭素動態モデルの一つであるローザムステッドカーボンモデル (RothC; Coleman et al., 1997; 白戸, 2007) を用いる方法などがある。しかし、RothC には、このモデルを走らせるために必要な入力値である植物由来の炭素投入量 (作物残さや緑肥作物からの炭素投入量) を計算する機能がなく、研究者自身が何らかの方法でそれを用意し、RothC に導入してやらなければならない。しかも、RothC によるシミュレーションを現実的なパラメータを用いて高解像度で実行するためには、作付される作物や品種、栽培地の土壌や気象条件、小麦の例のようにわらを刈り取る時の高さの設定など現場の状況を可能な限り正確かつ細かに反映した作物残さ由来の炭素投入量のデータを用意しなければならない。

1.3 本稿の目的

Koga et al. (2011) は、RothC を用いて、北海道・十勝地方の畑土壌中の炭素蓄積量が土壌への有機物 (作物残さや堆肥) 投入量に関するシナリオによって将来どのように変化するか予測し、その際に、モデルの入力値である作物残さ由来の炭素投入量を市町村単位で推計する方法の検討を行ったので、その手順や結果について紹介したい。

2. 市町村別炭素投入量の推定方法

十勝地方には 19 の市町村があり、全畑地面積約 14 万 3 千 ha の 96 % が、秋まき小麦、テンサイ、バレイショ、大豆、小豆、菜豆、スイートコーン、サイレージコーンの 8 作物によって占められる。本研究では、これらの 8 作物を対象とし、植物由来の炭素投入量を推計した。

農地での植物由来の炭素投入量とは、作物残さや緑肥作物由来炭素の土壌への投入量のことである。作物残さからの炭素投入量は、作物の種類のほか、品種、栽培地の土壌条件、栽培期間中の気象条件や栽培方法等によって左右される。また、小麦の例のように、収穫機械の設定によって、作物体を刈り取る高さが変わると、その結果として、土壌にすき込まれる有機物の量が変化 (本研究では、小麦体を地面から 30 cm の高さで刈り取り、30 cm 以上の位置にあるわらを搬出、それ以下の位置にある部位は刈り株として土壌にすき込むこととして計算)。

作物残さ中に存在する炭素は、純一次生産量 (NPP) の一部であるが、NPP をリモートセンシングや植生モデル等で予測できるとしても、作物残さ由来の炭素投入量を推定するには、地域固有の条件が関与する以上、そのことを十分に考慮しなければならない。そこで、より現状に即した作物残さからの炭素投入量を把握するため、アロメトリー (生体内のある部分と別の部分の間に成立する量的な関係) を利用した方法で作物残さからの炭素投入量を推計した。すなわち、収穫部位の重量、いわゆる収量に対するほかの地上部や地下部の重量の比を用いて、作物残さの発生量を把握することである。収穫部位の重量は、作物統計 (北海道十勝総合振興局、

¹ Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Corresponding author: 古賀伸久, ¹ 農林水産省農林水産技術会議事務局
2013 年 1 月 7 日受稿, 2013 年 2 月 4 日受理
土壌の物理性 123 号, 89-92 (2013)

2011) など市町村単位で公表される統計値を用い、さらに乾物重ベースに換算したものを計算に用いた。作物ごとの収量に対する地上部や地下部バイオマスの乾物重量比は、あらかじめ栽培試験や文献調査によって求めた。収量と乾物重量の比のほか、各部位の乾物率と炭素含有率を用いて、市町村単位で作物別に作物残さ由来の炭素投入量を計算した。収穫部位と作物残さとなる部位の乾物重量の比、各部位の乾物率と炭素含有率は、北海道農業研究センター・芽室研究拠点で実施された長期連用試験の結果や一部の作物については文献調査の結果をもとに求めた。以上のパラメータを用いて、市町村単位で作物ごとに作物残さ由来の炭素投入量を算出した。

3. 有機物投入シナリオ

3.1 市町村単位での有機物投入量の計算

すべての農地について、一筆にどの作物が栽培されているか特定することは容易ではない。そこで、8作物の作物残さ由来の炭素投入量と栽培面積から、8作物について平均した作物残さ由来の炭素投入量を市町村単位で計算した。この投入量は、その市町村の収量水準や作物の栽培面積を反映した作物残さ由来の炭素投入量となる。

3.2 3つの有機物投入シナリオ

この投入量を用いて、作物残さや堆肥の有機物管理に関する3つのシナリオについて、2011年にこれらのシナリオに基づく農地管理を開始した場合、2050年までの土壌炭素蓄積量(0-30 cm)がどのように変化するかRothCによる予測を行った。その3つのシナリオとは、1) 現状の作物残さ、緑肥作物や堆肥からの炭素投入が持続するシナリオ(現状シナリオ)、2) 堆肥をすべての畑地に年間20 t/ha投入するシナリオ(堆肥シナリオ)、3) すべての作物について、地上部の作物残さ

をすべて持ち出し、緑肥栽培や堆肥施用がないシナリオ(最小投入シナリオ)である。

3.3 有機物投入に関する前提条件

十勝地方の農業の現状では、堆肥としては、主に麦わら牛糞堆肥が用いられ、作物の種類によって、施用面積の割合や施用量が異なる(十勝管内土壌診断事業推進協議会, 2002)。また、緑肥は主に秋まき小麦収穫後の休閑期間に作付される。秋まき小麦収穫後の75%が休閑、その休閑地の80%に後作緑肥としてえん麦が栽培される(十勝管内土壌診断事業推進協議会, 2002)、すなわち秋まき小麦収穫後の農地の60%で緑肥用えん麦が栽培されるとした。また、堆肥および最小投入シナリオでは、堆肥の連用および作物残さの持ち出しによって、それぞれ作物の収量が増加および減少すると仮定している。

4. 土壌への炭素投入量の推定結果

アロメトリーと各部位の乾物率や炭素含有率を用いる方法の利点は、1) 統計収量値は市町村単位で公表されるので、ある程度の空間的解像度をもつこと、2) アロメトリーと各部位の乾物率と炭素含有率のデータさえあれば、どんな作物にも応用できること、3) 現地で用いられる品種や栽培方法の影響が反映されること、4) NPPや作物残さ由来の炭素投入量を比較的容易に計算できることなどである。

1 haあたりのNPPと作物残さ由来の炭素投入量をFig. 1に示した。NPPは、サイレージコーン、テンサイ、秋まき小麦で大きく、マメ科の作物で小さかった。また、作物残さ由来の炭素投入量はサイレージコーン、テンサイ、秋まき小麦で大きく、パレイシヨで小さいことがわかった。Fig. 1の不確実性の範囲は標準偏差を示している。これは、1995年から2006年までの各市町村の収量の年次変動と収量に対する地上部や地下部バイオマスの

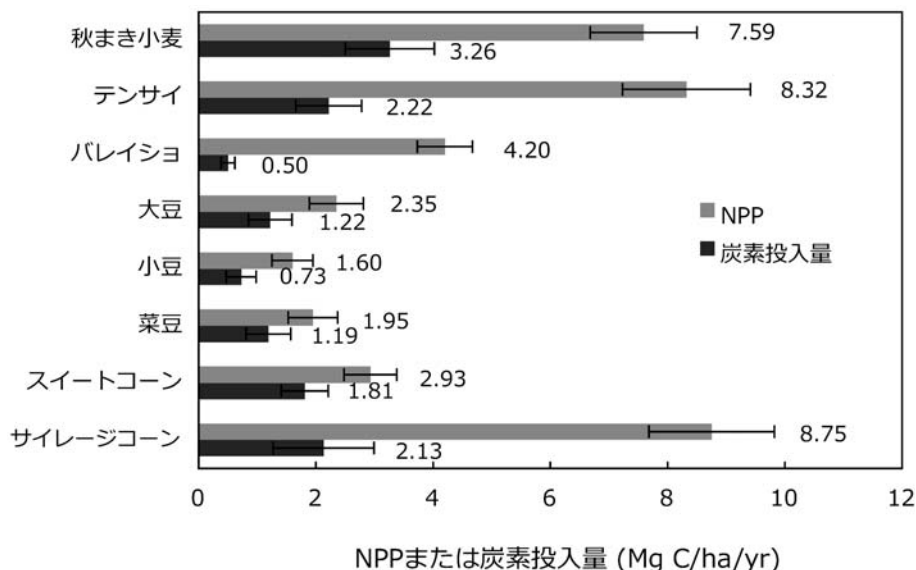


Fig. 1 NPP または植物(作物残さ、緑肥作物)および牛糞堆肥由来の土壌への炭素投入量。Crop NPP and annual C inputs from plants (crop residues and green manure) and composted cattle manure to the soil. (Koga et al., 2011)

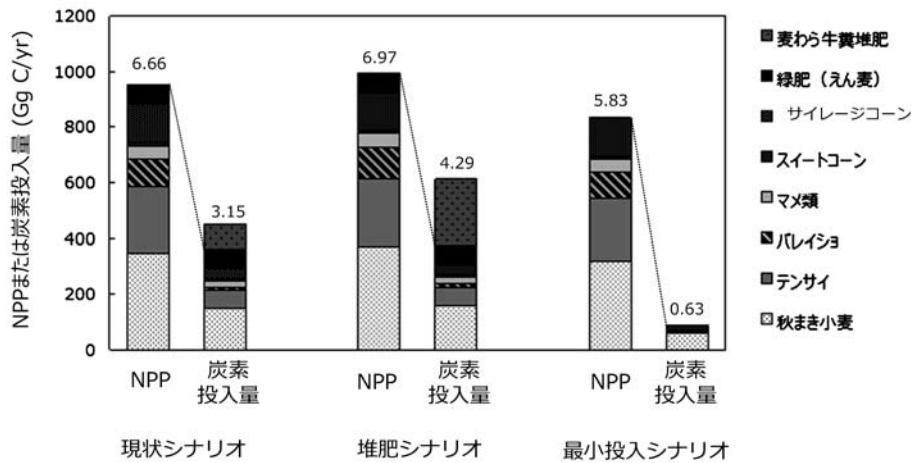


Fig. 2 十勝地方の畑地における NPP および作物残さ、緑肥、牛糞堆肥からの炭素投入量。バー上の数値は、1 ha あたりの炭素投入量を示す。

Regional cropland NPP and annual C inputs from crop residues, green manure and composted cattle manure under different management scenarios. The number on each bar indicates area-based NPP and C input ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). (Koga et al., 2011)

乾物重量比、各部位の乾物率と炭素含有の不確実性由来する。先述したように、アロメトリーや各部位の乾物率と炭素含有率に関するほとんどのデータは、北海道農業研究センター・芽室研究拠点での耕起法や堆肥施用に関する長期連用試験に由来する。したがって、年次による気象条件や栽培方法の違いに起因する不確実性はアロメトリーや各部位の炭素含有率に反映される一方、これらの長期連用試験では品種は統一され、また同一地点(同じ土壌)でのデータであるため、品種や土壌条件の違いに起因する不確実性は反映されていない。

Fig. 2は、十勝地方の畑地における NPP と作物残さ(緑肥を含む) および麦わら牛糞堆肥由来の炭素投入量をシナリオ別にまとめたものである。現状では、 952 Gg C yr^{-1} ($6.66 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) の NPP の 38% ($2.52 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) が作物残さとして土壌にすき込まれていることになる。堆肥由来の炭素投入量は、年間 $0.63 \text{ Mg C ha}^{-1}$ であり、作物残さと堆肥に由来する全炭素投入量 ($3.15 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) の 20% に相当する。堆肥シナリオでは、すべての作物への堆肥の施用とそれによる増収効果で、現状シナリオと比べ、炭素投入量は 36% 増加する。その一方、最小投入シナリオでは、土壌へすき込まれる有機物は、根などの地下部バイオマスだけとなり、残さ持ち出しによる減収効果もあって、炭素投入量は 80% 減少する。

5. 土壌特性・気象に関する入力項目とその空間スケール

RothC による土壌炭素蓄積量のシミュレーションには、作物残さや堆肥由来の炭素投入量のほか、シミュレーションの起点となる最初期の土壌炭素蓄積量、粘土含有率等の土壌特性値、月平均気温等の気象データが必要である。最初期の土壌炭素蓄積量や土壌特性値は、十勝地方にある 368 の土壌区 (1 市町村あたり約 20 の土壌区があり、1 土壌区の平均面積は、約 400 ha である) に

ついて、1960年代を中心に実施された地力保全基本調査(北海道立中央農業試験場,1993)から引用した。また、気象データは、士幌町と清水町を除き、市町村の一つあるアメダス観測点の1995年から2006年の平均値を用いた。したがって、RothCによるシミュレーションは、土壌区単位で行い、炭素投入量と気象データは、その土壌区が属する市町村のデータを用いることになる。

6. 土壌炭素蓄積量の将来予測

Fig. 3は、3つのシナリオについて、土壌炭素蓄積量のシミュレーションを行った結果である。現状シナリオでは、土壌炭素蓄積量は徐々に減少し、2050年の土壌炭素蓄積量は2011年のそれと比べて、3%減少となる。堆肥シナリオでは、2050年の土壌炭素蓄積量は、2011年比で7%増加となる。一方、最小投入シナリオの場合、

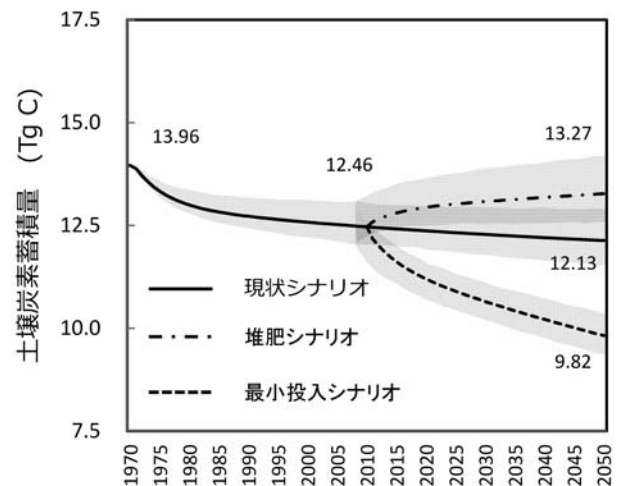


Fig. 3 十勝地方の畑地における土壌炭素蓄積量の将来予測。Projected changes in soil C stock (0–30 cm horizon) under different management scenarios. (Koga et al., 2011)

土壌炭素蓄積量は急激に減少し、2050年の土壌炭素蓄積量は、2011年のそれと比べて21%減少となる。最小投入シナリオを想定すると、現状シナリオとの差は、40年間で2.31 Tg Cとなり、これは年間0.445 M g C ha⁻¹ (=1.63 Mg CO₂ ha⁻¹) の速度で大気中にCO₂を放出することになる。Fig. 3には、作物残さ堆肥からの炭素投入量、気象データ等の入力値のばらつきが正規分布に従うと仮定して、モンテカルロシミュレーションを行った結果も示されている。図中の網掛け部分は、不確実性(標準偏差)の範囲を示す。現状シナリオと最小投入シナリオの間に不確実性の範囲に重なりがないことから、最小投入シナリオに示した農地管理を行うことで、土壌炭素蓄積量は高い確率で減少することが推定される。

7. おわりに

作物残さの土壌へのすき込み、緑肥の導入や堆肥の施用は、農地の炭素循環を特徴付けるといっても過言ではないほど、重要な位置づけにある。著者は、作物のアロメトリーや市町村単位で公表される収量統計値を用いて、作物残さに由来する炭素投入量の推計を試みたが、その解像度という点では今後も改善の余地があると考えている。GIS技術の進展により、農協や普及センターの取り組みとして、栽培した作物の種類や品種、施肥管理等の農地管理履歴、収量や土壌診断結果等のほ場特性値ほか、様々な情報がほ場単位で記録されるようになってきた。今回の特集のテーマは広域評価であるが、このようなほ場単位での詳細な情報は、炭素のみならず、窒素

など他の物質についても、農地での動態の把握や予測を行う上で今後大きく活用されるのではないかと考えている。

引用文献

- Coleman, K., Jenkinson, D. S., Crocker, G. J., Grace, P. R., Klir, J., Körschens, M., Poulton, P. R. and Richter, D. D. (1997): Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma*, 81: 29-44.
- 北海道十勝総合振興局 (2011): 2011十勝の農業. http://www.tokachi.pref.hokkaido.lg.jp/ss/num/2011_tokachi_no_nougyou.htm (2013.1.27)
- 北海道立中央農業試験場 (1993): 地力保全基本調査による北海道の耕地土壌図. http://www.agri.hro.or.jp/chuo/kankyou/soilmap/html/map_index.htm (2013.1.27)
- 古賀伸久 (2007): 農地管理法の違いと土壌炭素. *土壌の物理性*, 105: 5-14.
- Koga, N., Smith, P., Yeluripati, J. B., Shirato, Y., Kimura, S. D and Nemoto, M. (2011): Estimating net primary production and annual plant carbon inputs, and modelling future changes in soil carbon stocks in arable farmlands of northern Japan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144: 51-60.
- 白戸康人 (2007): 土壌有機物動態モデルの日本の農耕地土壌への適用と改良. *土壌の物理性*, 105: 15-22.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., 2007. *Agriculture*. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 497-540.
- 十勝管内土壌診断事業推進協議会 (2002): 十勝畑作地帯における施肥の実態. 十勝管内土壌診断事業推進協議会, 帯広, 北海道

要 旨

モデルによる農地の土壌炭素蓄積量の広域評価には、作物の種類や品種、栽培時の土壌や気象などの環境条件、小麦の例のようにわらを刈り取る高さなどの現場の状況を反映させた作物残さ由来の炭素投入量のデータが必要である。今のところ高解像度とはいかないが、植物のアロメトリーの関係を用いて、作物残由来の残さ投入量を市町村単位で求めることができた。今後は、農協や普及センターが管理するほ場単位での情報などより空間解像度の高い情報を活用すれば、ほ場単位での作物残さ由来炭素投入量の推定や土壌炭素蓄積量の予測が可能になるだろう。また、土壌炭素蓄積量の増減に対しては、作物残さの持ち出しによる影響が大きいことを明らかにした。

キーワード: アロメトリー, 土壌炭素蓄積量, 炭素投入量, RothC, モデリング