

土壌の窒素見える化ツールの開発と適切な窒素施肥に向けた活用

農研機構 農業環境研究部門 朝田 景

1. はじめに

豊富で不活性な大気中の窒素を反応性窒素（Nr: Reactive Nitrogen, 窒素ガス以外の窒素の総称）に変換する人工固定化技術は食料の生産性を飛躍的に向上させた。一方、このわずか1世紀の間で急速に拡大したNrの循環量は既に地球が持続可能である限界を超えたとみられている（Campbell et al., 2017）。Nrは形態を変化させながら大気・陸域・水域で複雑にカスケードするが、現在のNr循環量の地理的な偏りや環境中への漏出は大きく、各領域で深刻な環境汚染を引き起こしている（UNEP, 2019）。持続可能な農業には、窒素利用効率（e.g., Congreves et al., 2021）の向上や化石燃料由来の窒素肥料の削減等、Nr循環管理の適正化を図り（Zhang et al., 2015; Anas et al., 2020）、「農業の生産性と環境の持続性のトレードオフ」を解決することが不可欠である。

2. 汎用性のあるモデルの改良・検証

持続可能な農業では、収量の維持・増加のための土壌、作物、施肥、灌水量等、生産環境の制約条件を最適化し、作物の窒素利用効率の最大化による環境へのNr負荷の最小化を図りたい。そのためには農地への肥料・堆肥投入から流出に至るNr動態をコンピューター上に再現し、投入の量・方法・時期の試行による作物の窒素吸収量や環境へのNr負荷の変化をダイナミックに予測できるモデル（ここでは、物質の物理化学プロセスを考慮したプロセスモデル）によるアプローチが有効である。しかし、日本の畑土壌として重要である黒ボク土は世界的には約1%を占めるにすぎず、モデル開発が遅れていた。そこで土壌の種類によらず広くモデルを使用するため、既存の水・炭素・窒素動態予測モデルLEACHM（Hutson, 2003）の改良・検証を実施している（Asada et al., 2013, 2015, 2018, 八木ら, 2022）。

モデル改良と共に取り組んでいるのは、各種データベースの作成である。これは、すべてのモデル入力項目と各種データベースを紐づけておき、広域でNr動態をモデル予測する際の負担を減らすためである。例えば、私たちは「日本の農地土壌の物理的性質データベース SolphyJ」を作成した。これは、日本の農地約2万地点を対象に実施された土壌環境基礎調査事業による定点調査データについて、5つの地目別、225の土壌統群別、最大で第6層までの層位別に集計し、土壌の基本的な物理的性質を中心に合計22の調査・分析項目の基本統計量を収納したデータベースである。また、茨城県を中心とした地域で栽培されている66種の野菜、果樹、飼料作物別にこれらの生長や栽培管理に関するモデル入力項目をデータベース化した。

さらに、日本の畑土壌に対してモデルが実用可能なレベルにあることを全国スケールで検証するため、様々な地域で実施された有機質資材や化学肥料の長期連用畑圃場（野菜畑、

果樹園，飼料畑)における水・炭素・窒素動態の観測値（土壌の全炭素・全窒素含量や窒素溶脱等）とモデル予測値を統計的に解析し，不確実性を評価している．これまでの適用事例では，地点ごとのキャリブレーションなしにモデルの実用可能性は良好である．さらに異なる気象・土壌・作物条件でのモデルの改良・検証を行うため，新たに窒素溶脱等の観測が各地で進められている．



図1 土壌の窒素見える化ツールの仕組み

3. 適切な反応性窒素の循環管理に向けたモデル活用

改良したモデル LEACHM は，異なる環境影響のトレードオフや相乗効果を定量的・総合的に評価できるため，営農から環境に至る Nr 循環管理の改善を図り，適切な窒素施肥を考える上で役立つツールとして利用できると考えられた．しかしながら，LEACHM の入力ファイルの作成や計算結果の可視化にはユーザビリティ上の大きな課題があった．そこで，私たちは「土壌の窒素見える化ツール（簡易版・プロ版）」を開発した（図1）．土壌の窒素見える化ツール「簡易版」は，作物の種類，施肥条件，緑肥作物の有無等の条件による計算結果を予め用意しておき，利用者による選択条件に応じて，浸透水中の窒素濃度，作土の全窒素含量等の結果をグラフ表示する．「簡易版」では，作物の栽培管理条件が計算結果に与える影響を視覚的に理解することができる．他方，土壌の窒素見える化ツール「プロ版」は，入力ファイル作成から計算実行，結果の可視化までをウェブ上で実行できる．「プロ版」は，「土壌の CO₂ 吸収「見える化」サイト（日本国内の農地の温室効果ガス排出量を簡単に計算し，温室効果ガスを削減するための参考にできるウェブサイト）（<https://soilco2.rad.naro.go.jp/>）」と連携しており，このサイト上で地点を選択すると，計算対象となる土壌種と気象情報が自動的に取得される．これに続けて作物とその栽培管理条件等を設定し，計算を実行すると，土壌の水・炭素・窒素動態に関する計算結果から栽培期間の経時変化または深度分布が可視化され，また，計算結果ファイルのダウンロードも可能である（図2）．本ツールの普及に向けて，ワークショップやハンズオン形式のオ

オンライン講習会を開催し、適正な窒素施肥管理への理解に役立てて頂くと共に、参加者から寄せられた感想や意見、要望をツールのさらなる改良に生かしている。

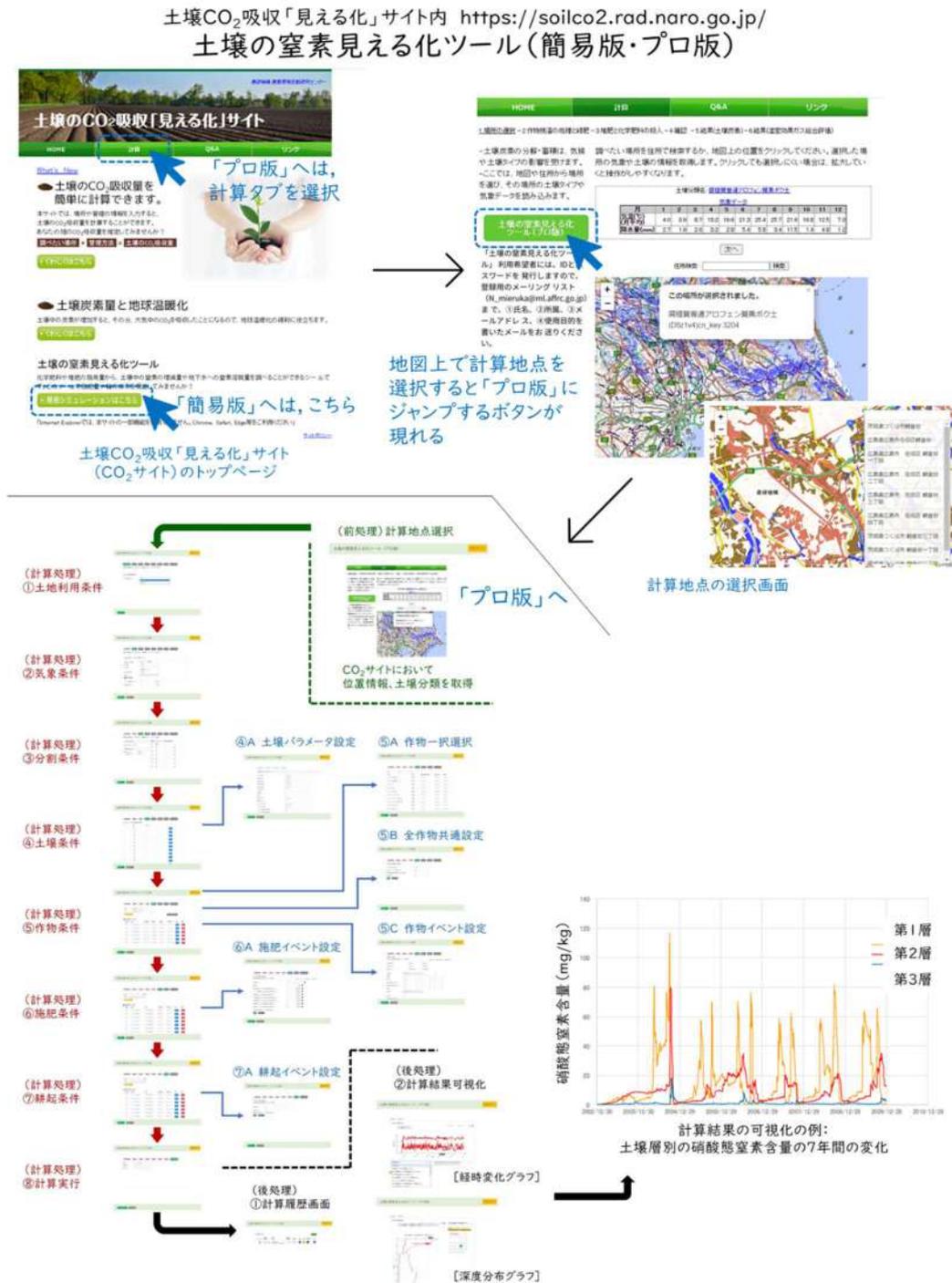


図2 土壌の窒素見える化ツール(簡易版・プロ版)の画面遷移

プロ版では、CO₂サイトから引き継ぐ前処理(緑色)、LEACHMによる計算処理(赤色)、計算結果の入手や可視化等の後処理(黒色)を1つのシステムとしている。

農林水産省の「みどりの食料システム戦略」では、化学肥料の使用量を大幅に削減し、有機質資材を積極的に利用することが強く求められている。これは土壌の地力窒素の回復につながる取り組みであるが、投入する有機質資材の種類や量、期間によっては、窒素溶脱等の環境負荷を増大させる可能性もある。そこで、開発したツールを利用し、堆肥の連用効果による窒素無機化量を考慮してさらなる化学肥料窒素の減肥が可能であるか、また、地域における適切な堆肥の還元量はどれ程であるか等を、農業の生産性と環境の持続性のトレードオフの観点から検討した。さらに、圃場から農業集水域へとスケールを広げ、茨城県のある集約的農畜産業地帯の45集落について、現況(県の耕種基準準拠)及び堆肥代替シナリオ(耕種基準から化学肥料窒素を半減し、その分を堆肥で代替)に基づき、地下水汚染リスク低減効果をマッピングした。シナリオでは、地下水に到達する浸透水中の窒素濃度が全集落で10 mg/L(環境基準)以下、平均値は1/3に低下した。このような空間情報は、農業由来環境負荷に対して脆弱な地域を特定し、優先順位をつけた対策を実行するための重要な情報となる。

4. おわりに

長期連用畑圃場における水・炭素・窒素動態の観測値を基にして検証・改良を積み重ねたツールは、複数年にわたる圃場試験の一部を代替し、モデルベースの試験やシナリオ分析の実施に役立つ可能性がある。様々な栽培環境条件におけるNr循環管理の適正化に向けた取り組みに対し、科学的知見に基づく情報を提供できるよう、今後も土壌の窒素見える化ツールの改良・普及に努めていきたい。

引用文献

- Anas et al. (2020) *Biol. Res.*, 53, 47.
- Asada et al. (2013) *Plant Soil*, 373, 609-625.
- Asada et al. (2015) *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 102, 209-225.
- Asada et al. (2018) *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 110, 307-326.
- Campbell et al. (2017) *Ecol. Soc.*, 22, 8.
- Congreves et al. (2021) *Front. Plant Sci.*, 12, 637108.
- Hutson (2003) *LEACHM Model Description and User's Guide*. 124pp.
- Sutton et al. (2013) *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution*. 114pp.
- UNEP (2019) *Frontiers 2018/2019. The Nitrogen Fix: From Nitrogen Cycle Pollution to Nitrogen Circular Economy*.16pp. (日本語訳あり) .
- 八木ら(2022) *日土肥誌*, 93, 266-280.
- Zhang et al. (2015) *Nature*, 528, 51-59.