

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H03097

研究課題名（和文）地形や光環境を考慮した土中水分・物質動態解析に基づく作物の成長・収量モデルの開発

研究課題名（英文）Development of crop growth model coupled with soil water and solute dynamics model accounting for topography and light environment

研究代表者

齋藤 広隆（Saito, Hirotaka）

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・教授

研究者番号：70447514

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土中の物質動態モデルHYDRUSと群落光合成モデルiRGMを結合し、気象条件、地表面条件、土・水・肥料管理を考慮可能で精緻な統合動的作物成長モデリングツールを構築することを目的とした。モデルの結合は根の吸水および窒素吸収を通して行い、可能蒸散速度はiRGMによるLAI値より求め、土壌水分状態から実蒸散速度を決定した。また、無機化を含む土中の窒素動態も同時に計算し、吸水に合わせて窒素を吸収させた。この結合モデルを用いて稲の成長過程を計算し、観測データと比較したところ、結合モデルでは土中の水分・窒素動態を精緻に計算しながら、作物の成長過程を計算でき、実測値をよく再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した統合動的作物成長モデルでは、土中の物質移動と作物の成長過程を同時にかつ精緻に計算できるモデルとなっており、たとえば乾燥地での最適な水・肥料の管理を最適化するためのサポートツールとして使えらるとともに、地球温暖化に伴う長期的な気候変動が農作物の成長に与える影響の評価に利用することができる。また本研究により開発したモデルを仮想空間上で圃場を再現し、農業の栽培支援を行う農業デジタルツイン等への応用が今後は期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to construct a sophisticated integrated dynamic crop growth modelling tool by coupling the soil water and solute transport model, HYDRUS, and the canopy photosynthesis model, iRGM, which can take into account climatic conditions, surface conditions, and soil, water, and fertilizer management. The model was coupled through root water and nitrogen uptake, and the potential transpiration rate was obtained from the LAI computed by iRGM, and the actual transpiration rate was determined from soil moisture conditions. Nitrogen dynamics in the soil, including mineralization, was also computed simultaneously, and nitrogen was uptaken in accordance with water uptake. The growth process of rice plants was calculated using this coupled model and compared with observed data. The coupled model was able to calculate the growth process of the crop while precisely calculating soil moisture and nitrogen dynamics, and reproduced the measured data well.

研究分野：地域環境工学

キーワード：土壌物質動態モデル 作物モデル 数値解析

1. 研究開始当初の背景

土壌は本来著しく複雑で、生態系サービスに代表される多様な機能を持つことが知られている。したがって、この土壌が本来もっている多様な機能を理解し発揮させるためには、土壌中の物理的・化学的・生物学的現象に基づく水を含む物質動態のモデリングが重要である。土壌物質動態のモデリングは過去数十年にわたって大きな進展があったものの、作物学や気象学のように土壌圏と接する様々なプロセスや諸現象を対象とする分野との連携は十分とはいえない。土壌の持つ生態系サービスの一つである作物生産などのバイオマス生産は土壌と作物に加えて大気環境それぞれに強く依存するが、本来多様で複雑な機能を持つはずの土壌について、単純なプロセスとして取り扱う作物モデルが多く、改善が必要である。

農業は人為的な作用が中心の極めて複雑なプロセスであり、気象条件と土・水・栄養素の管理に加えて、畑の立地、畝やマルチなど土地の形状や状態などによって作物の成長や収量、バイオマスは決まる。したがって、最適な農業基盤整備や気候変動下で適切な土・水管理のためには、土壌圏、大気圏、植物圏それぞれにおける物理的・化学的・生物学的プロセスやその相互作用、さらには地形要素や地表面の形状・状態などを取り入れた統合型モデルによる、作物成長過程の精緻なモデル化が求められている。また、近年無人飛行機 UAV に様々なセンサーを搭載させることによって、作物の面的な成長過程の定量的な情報など、これまで取得に時間と人的資源を多く投入しなければ得られなかった、面的かつ時間的にも密なデータを容易に取得できる。このような新しいタイプのデータは旧来のモデル入力値としては直接利用できないこともあり、これらを組み込んだモデル内パラメータの有力な推定技術やこれらデータを用いたモデルの検証方法の確立が求められている。

2. 研究の目的

本申請課題の主な目的は(1)異なる環境ストレス下での作物個体レベルまた群落レベルでの作物の成長過程ならびに土壌物質動態について最新のセンサーや測定機器を用いてモニタリングし、水・栄養分の土壌中また作物体中の動態および収支を明らかにし、(2)大気モデル、土中の物質動態モデルおよび動的作物モデルを結合し、気象条件、地表面条件、土・水・肥料管理を考慮可能で精緻な統合動的作物成長モデリングツールを構築することである。

本研究では、窒素・リン・カリウムなどの栄養成分のうち、バイオマスに最も影響を与える窒素成分(おもに硝酸態窒素ならびにアンモニア態窒素)を対象として、土壌中の動態のみならず、作物体中の動態(作物体内での分配機構など)についてその詳細を、窒素成分の収支や動態を再現可能なモデルを構築する。本課題によって、土壌物理分野、作物モデル分野が独自に取り組んできたそれぞれに精緻なモデルを動的に結合することで、収量予測のみならず土壌-根-作物-大気を介した物質循環研究へのブレークスルーとなりうる。また、近年注目を浴びているスマート農業において、本課題で構築する精緻な作物成長モデルにより作物の成長・発達の将来予測を組み込むことで、より高度な水・栄養管理が可能となる。

3. 研究の方法

統合動的作物成長モデルは、統合稲成長モデル(Integrated Rice Growth Model または iRGM)と土中水分・溶質・熱移動解析モデル HYDRUS の結合により構築した。2つのモデルの結合は根の吸水・吸収を通して行った。HYDRUS では、大気条件と作物条件(主には LAI)によって可能蒸発散速度を可能蒸発速度と可能蒸散速度に分配する。群落光合成モデルでは空気の温度、葉と大気の水蒸気圧、葉面境界層と気孔の水蒸気輸送に関するコンダクタンスから可能蒸散速度を求める。また、土壌の乾燥が進み作物に水ストレスがかかる場合、作物の蒸散(気孔を閉じるなど)を抑制するストレス係数を導出し、実蒸散速度を計算する。そこで、結合モデルでは、時間ステップは時間ステップの長い iRGM に合わせて、各時間ステップで、iRGM によって得られた LAI 値と気象条件から可能蒸散速度を求め、その値を HYDRUS に渡し、HYDRUS は実蒸散速度を求め、同時に窒素の吸収速度も計算し、両者を iRGM に渡すようプログラムを修正した。HYDRUS では実蒸散速度は可能蒸散速

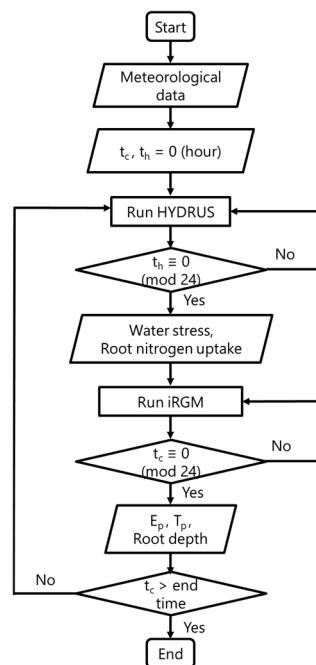


図1: 統合モデルの計算過程のフローチャート

度と土壌の乾燥度合いによって決定されるため、ストレス係数は、実蒸散速度と可能蒸散速度の比で与えることとした。図 1 に結合モデルの計算プロセスのフローチャートを示す。結合モデルでは、HYDRUS からの給水量と窒素吸収量に基づいて、iRGM で作物成長を計算し、次の時間ステップへと進む。なお、ここでは iRGM の時間ステップを一日とし、時間ステップが一日より小さい HYDRUS からの吸水・吸収量は iRGM の時間ステップである一日分を積算して iRGM に渡した。また、土中の窒素無機化過程については、HYDRUS で実装されている一次反応を仮定し、有機態窒素から無機態窒素への反応を取り入れた。

4. 研究成果

iRGM と HYDRUS の結合動的作物成長モデルを用いて、稲の成長過程の数値解析を行った。解析の検証には 2017 年 5 月から 9 月にかけて東京農工大学 FS センター本町水田によって栽培された「あきたこまち」の成長データを用いた。解析に必要な気象データはアメダス(府中市)の時間データとし、HYDRUS に必要な土の不飽和水分移動パラメータ(水分保持曲線関数および不飽和透水係数関数)については、以前同じ水田で採取した試料に基づいて求めたパラメータ値を用いた。計算には水田の土層構造を模し、作土層と透水性の悪い耕盤層からなる土層を想定した。窒素は、実験条件に合わせて有機態・無機態を初期に土層上層部に与え、無機態窒素の追肥を栽培期間に 2 回行った。図 2(a)に結合モデルによる、土中窒素濃度プロファイルを示す。実線が追肥有、破線が追肥無しの結果を示す。追肥無しの条件では、与えた総窒素量が実験と同じとなるように、初期の窒素量を調整した。なお iRGM では、土中の移動や成層構造は考慮できず、土はバケツとして扱い、収支のみを計算するため、土中窒素濃度や水分分布を求めることはできない。一方で、植物根は任意の関数に基づいて成長する。結合モデルでは iRGM に実装されている成長モデルに基づき計算された根の分布を、時間ステップ毎に HYDRUS に渡し、根の吸水・吸収の解析を行った。図 2(b)には、結合モデルと iRGM による栽培期間の窒素収支の計算結果を示す。結合動的作物成長モデルを用いることで、土中の窒素移動を計算しながら、作物モデルへの吸収を計算することができ、作物単体では播種後 50 日目から急激に吸収量が増加するのとは比べて、結合モデルでは 20 日過ぎから徐々に吸収量が増加し、吸収のタイミングに違いが明らかになった。結合モデルでは、成長初期から徐々に窒素吸収が進んでおり、自然な吸収過程を再現できたといえる。

図 3(a)に結合モデルと iRGM 単体による作物乾燥重量時間変化の計算結果を示す。いずれも、播種後 45 日目くらいから成長に伴って急激に乾燥重量増加し、最終的には約 1000 g/m² となった。両モデルによる乾燥重量の増加の仕方に大きな違いはなく、窒素吸収や光合成による乾燥重量の増減もほぼ同じ傾向となった。図 3(b)に各器官の乾燥重量計算結果を示す。葉や茎は 45 日目以降急激に成長するが、播種後約 100 日経過すると穂の重量が増加し、葉や茎の成長や抑制され、いずれも実測データをよく再現した。結合モデルを用いることで、土中の窒素移動を考慮しながら、地上部の作物生長過程も計算できた。また、極端に施肥量や灌漑量を抑えた条件での計算を行ったところ、iRGM では計算できないような条件であっても、本結合モデルでは成長の抑制まで計算ができ、乾燥地や気候変動下での灌水・施肥の最適化に応用することができることが示された。今後は熱移動を含め、土中・地上部の熱環境の解析と、結合モデルの二次元・三次元の拡張が必要である。

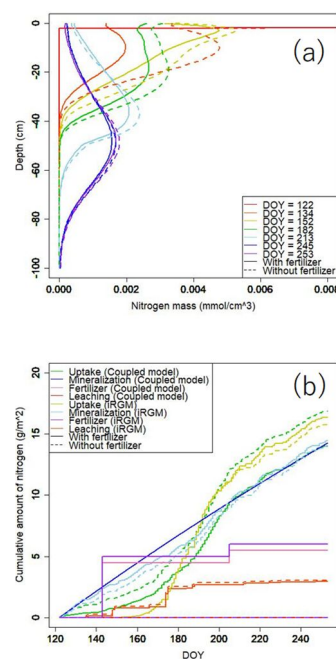


図 2 : (a) 結合モデルによる土中無機態窒素濃度プロファイルの計算結果、および (b) 結合モデルおよび iRGM 単体での窒素収支を示す。

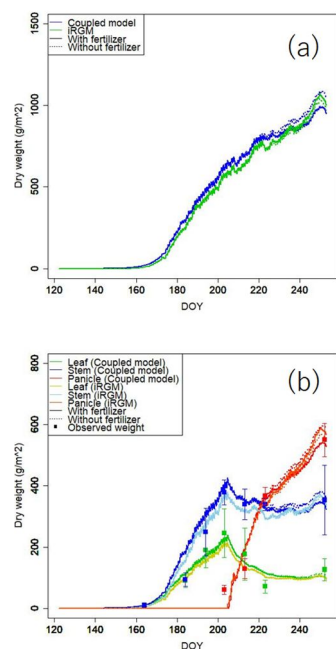


図 3 : 結合モデルと iRGM 単体による稲の (a) 全乾燥重量および (b) 各器官の乾燥重量の計算値。シンボルは各機関実測の平均乾燥重量を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Nishioka, M., Yamashita, M., and Saito, H.	4. 巻 in press
2. 論文標題 Influence of Radiative Components and Meteorological Conditions on Simulation of Slope-Specific Heat Balance	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Environmental and Engineering Geophysics	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32389/JEEG22-011	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 -
1. 著者名 Peprah, C.O., Yamashita, M., Yamaguchi, T., Sekino, R., Takano, K., Katsura, K.	4. 巻 13
2. 論文標題 Spatio-Temporal Estimation of Biomass Growth in Rice Using Canopy Surface Model from Unmanned Aerial Vehicle Images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2388
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs13122388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi, T., Tanaka, Y., Imachi, Y., Yamashita, M., Katsura, K.	4. 巻 13
2. 論文標題 Feasibility of Combining Deep Learning and RGB Images Obtained by Unmanned Aerial Vehicle for Leaf Area Index Estimation in Rice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs13010084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Bwire, D., Saito, H., Mugisha, M., Nabunya, V.	4. 巻 14
2. 論文標題 Water Productivity and Harvest Index Response of Paddy Rice with Alternate Wetting and Drying Practice for Adaptation to Climate Change	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 3368
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/w14213368	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Bwire, D., Saito, H., Okiria, E.,	4. 巻 32
2. 論文標題 Analysis of the Impacts of Irrigation Practices and Climate Change on Water Availability for Rice Production. A Case in Uganda	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Arid Land Studies	6. 最初と最後の頁 123-127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14976/jals.32.S_13	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 該当する

1. 著者名 Kojima Yuki, Kawashima Tomoyuki, Noborio Kosuke, Kamiya Kohji, Horton Robert	4. 巻 188
2. 論文標題 A dual-probe heat pulse-based sensor that simultaneously determines soil thermal properties, soil water content and soil water matric potential	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 106331 ~ 106331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compag.2021.106331	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 該当する

1. 著者名 Sao Davy, Saito Hirotaka, Kato Tasuku, Simunek Jirka	4. 巻 13
2. 論文標題 Numerical Analysis of Soil Water Dynamics during Spinach Cultivation in a Soil Column with an Artificial Capillary Barrier under Different Irrigation Managements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 2176 ~ 2176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w13162176	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Noguchi Koichi, Saito Hirotaka, Saefuddin Reskiana, Simunek Jirka	4. 巻 13
2. 論文標題 Evaluation of Subsurface Drip Irrigation Designs in a Soil Profile with a Capillary Barrier	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 1300 ~ 1300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w13091300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mitsuhiro Inoue, Hirotaka Saito, Haruyuki Fujimaki, Kosuke Noborio, Koji Inosako, Jiri Simunek	4. 巻 435
2. 論文標題 Repeated falling-head method for in situ measurements of saturated hydraulic conductivity using a single cylinder	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geoderma	6. 最初と最後の頁 116511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geoderma.2023.116511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Asano, J, Y. Kojima, C. Kato, and K. Kamiya.	4. 巻 1165
2. 論文標題 Climate change impacts on soil moisture and temperature in the plain and mountainous regions of Gifu Prefecture, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	6. 最初と最後の頁 12045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/1165/1/012045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kassaye, K.T., Boulange, J., Hoang, T.L., Saito, H., Watanabe, H.	4. 巻 384
2. 論文標題 Soil water content and soil temperature modeling in a vadose zone of Andosol under temperate monsoon climate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geoderma	6. 最初と最後の頁 114797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geoderma.2020.114797	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 山下 患
2. 発表標題 イネの三次元モデルを用いた群落光環境と葉面積指数の 時系列面的推定
3. 学会等名 第79 回農業食料工学会年次大会
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Asano, J, Y. Kojima, C. Kato, K. Kamiya.
2 . 発表標題 Predicting climate change impacts on soil environment in plain and mountainous areas of Gifu
3 . 学会等名 JPGU 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Bwire, D., H. Saito
2 . 発表標題 Numerical Modelling of Water Flow in Paddy Soil with Alternate Wetting and Drying Water Management Practice Using HYDRUS-2D
3 . 学会等名 AGU 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Rahman, S.A.T.M., Hamamoto, S., Saito, H., Tatsumi, K., Miyoshi, T., Nihei, N., Ichihashi, Y.
2 . 発表標題 Coupling of Data Assimilation and Hydrus for Modeling Soil-Water and Heat Transport of Rain-Fed Soybean Field throughout Japan
3 . 学会等名 ASA, CSSA, SSSA International Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Bwire, D., Saito, H., Tatsumi, K.
2 . 発表標題 Improving Water Productivity and Harvest Index of Paddy Rice with Alternate Wetting & Drying Irrigation Practice for Adaptation to Climate Change
3 . 学会等名 ASA, CSSA, SSSA International Annual Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Bwire, D., Saito, H., Tatsumi, K.
2. 発表標題 Climate Smart Water and Soil Management Strategies for Achieving Food Security in Africa
3. 学会等名 Kirkham Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Bwire, D., Saito, H.
2. 発表標題 Performance of Hydrus -1D Model for Simulating Water Movement in Paddy Field Under Alternate Wetting & Drying Irrigation Technique
3. 学会等名 JPGU 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川井千晃, 宇田航希, 山下恵.
2. 発表標題 衛星観測に基づく全天・散乱日射量の高時間分解能広域推定
3. 学会等名 令和4年度日本写真測量学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mito Nishioka, Chiaki Kawai, Hiroataka Saito and Megumi Yamashita
2. 発表標題 Estimation of heat balance with considering ground surface conditions in the crop field based on radiation balance and meteorological condition
3. 学会等名 Applications of Proximal and Remote Sensing Technologies for Soil Investigations (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西岡 美都、斎藤 広隆、山下 恵
2. 発表標題 表面凹凸を考慮した圃場スケールでの斜面別熱収支の推定の試み
3. 学会等名 第72回農業農村工学会関東支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小田 奈苗, 小島 悠揮, 神谷 浩二
2. 発表標題 植物根が土壌の電気特性および熱特性に与える影響の解明
3. 学会等名 2021年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oda, N, Y. Kojima, K. Kamiya
2. 発表標題 Evaluating effects of plant roots on soil thermal properties with a thermo-TDR sensor
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masumoto, K., Kubota, S., Saito, H.
2. 発表標題 Seasonal Variation of the Effect of Ridge Orientation on Water and Temperature Distribution Inside Ridges
3. 学会等名 JPGU2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Bwire, D., Saito, H., Emmanuel, O.
2. 発表標題 Analysis of the Impacts of Irrigation Practices and Climate Change on Water Availability for Rice Production. A Case in Uganda
3. 学会等名 ICAL/DT 14: International Conference of Desert Technology (国際学会)
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
研究分担者	辰巳 賢一 (Tatsumi Kenichi) (40505781)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授 (12605)	
研究分担者	山下 恵 (Yamashita Megumi) (70523596)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授 (12605)	
研究分担者	小島 悠揮 (Kojima Yuki) (70767475)	岐阜大学・工学部・准教授 (13701)	

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
---------	---------