HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	大気 : 陸面相互作用における農耕地の影響とそのモデル化
Author(s)	小野, 圭介
Citation	低温科学, 77, 105-115
Issue Date	2019-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.77.105
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73998
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p105-115.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 77 （2019） 105-115
doi: 10.14943/lowtemsci. 77. 105

大気-陸面相互作用における農耕地の影響とそのモデル化

小野　圭介[1)]

2018 年 12 月 27 日受付，2019 年 1 月 17 日受理

大気―陸面相互作用を研究する上で大気―陸面結合モデルは重要なツールであり，領域気象解析，流域水文解析，気候変動予測等において欠かすことのできない存在となっている．陸面モデルは，大気―陸面結合モデルの基幹を成すモデルで，大気の境界条件に当たる地表面フラックスを算出する．陸面モデルで多様な地表面を表現するために目的と空間スケールに応じた簡略化が行われるが，農耕地に関しては実態とかけ離れた仮定や表現がなされる場合もある．そこで，大気―陸面相互作用における農耕地の扱いについて理解を深めることを目的に，農耕地で実際に起きていること，およびそれをモデル化する際の課題や注意点を考察した．

Challenges for describing agroecosystems in the land-atmosphere interaction

Keisuke Ono[1]

Land-atmosphere coupled models are widely used for investigating the land-atmosphere interaction in the studies on regional weather and hydrological analyses as well as climate projections. Land surfaces consist of many types of land cover/use and thus the exact parameterization of each type of surfaces is a key for the success of those studies. Cropland occupies substantial area in certain regions, so-called breadbasket. However, in many land surface models, croplands are expressed as a small number of virtual/actual crop species and not precisely parameterized for crop growth and crop/field management. Moreover, the spatial distributions of crop/field management as well as the characteristics of cropland are highly variable depending on farmers' circumstance and governmental policy. This paper provides a short review and future direction on those topics towards the improvement of land-atmosphere coupled models.

キーワード：陸面モデル，作物モデル，地表面パラメータ，土地利用
Land surface model, Crop model, Surface parameters, Land cover

1．はじめに

大気―陸面相互作用を研究する上で，大気と陸面のエネルギー輸送が結合し影響を及ぼし合う過程が記述された大気―陸面結合モデルは重要なツールであり，領域気象解析，流域水文解析，気候変動予測等において欠かすことのできない存在となっている（本巻の伊川浩樹氏の解説参照）．大気―陸面結合モデルは，大気中の各種現象を表す大気モデルと，大気の境界条件に当たる地表面フラックス（以下フラックス）を算出する陸面モデルから成り立っている．一般的な陸面モデルは，熱収支に基づきフラックス（本稿では，上向き長波放射，運動量，

連絡先
小野　圭介
農業・食品産業技術総合研究機構　農業環境変動研究センター
〒305-8604　茨城県つくば市観音台 3-1-3
Tel. 029-838-8239
e-mail：onok@affrc.go.jp

1）農業・食品産業技術総合研究機構　農業環境変動研究センター
Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization, Tsukuba, Japan

顕熱，潜熱の各フラックスを想定する）を求める．熱収支を解くためには，日射量，大気放射，気温，風速，水蒸気濃度，二酸化炭素（CO_2）濃度等の気象条件と，葉面積指数（LAI），群落高，粗度長，アルベド，気孔コンダクタンス等のいわゆる地表面パラメータが必要になる．陸面モデルは，これらの地表面パラメータの大小によって植生の種類や量を表現する．農耕地を対象とする場合も同様で，作物種の違い，作物の有無，作物の量や状態は地表面パラメータによって表現される．

大気―陸面結合モデルは，面的に適用することによって両モデルの結合のメリットが最大限に発揮される．ただしこれは，当然のことながら，モデル内で地表面の状態と位置関係が意図どおりに表現される場合に限る．計算対象領域に農耕地があれば，農耕地の地表面状態を模するパラメータが適切に与えられなければならない．

農耕地（agricultural land）は農業に供される土地で，自然草地と変わりのない粗放的な放牧地から温室等の施設を設置したところまで様々である（ただし，包含する土地利用は農耕地の定義によって異なる）．その中でも耕地（cropland）は，人の手によって耕され作物が栽培される土地で，バングラデシュ，ウクライナ，インド，デンマーク，ハンガリー等の農業活動の盛んな国では国土の 50% 以上を占める（Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016）．わが国は，国土全体では 11.8%（世界平均と同程度）であるが，茨城県，千葉県，埼玉県，佐賀県では 20%を超える（農林水産省大臣官房統計部，2018）．世界にも局所的に耕地面積割合が極めて高い地域（穀倉地帯とも呼ばれる）がある．このような国や地域では，耕地が地域気象に大きな影響を及ぼしていることが観測とシミュレーションの両アプローチによって示されている．例えば，アメリカの五大湖周辺は，大気―陸面結合モデルと気象記録を用いた解析から，1900 年代に入り森林が開拓され耕地となったことで最高気温が最大 1.5℃ 低下していた（Bonan, 2001）．インドシナ半島では，大気―陸面結合モデルによるシミュレーションと水の同位体比の分析から，20 世紀後半の特定の月の降水量の減少傾向が森林伐採によって生じた可能性が高いことが示唆されている（Kanae et al., 2001）．さらに，耕地の 21%（Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016）で行われている灌漑の影響も大きい．20 世紀後半に灌漑耕地が急増した中国東北部やインド北西部では，その間の気温上昇が，全球気候モデルにより推定されたものより大幅に抑制されていた（Lobell et al., 2008）．

このような現象の発見や検証には，陸面モデルに耕地の特徴が適切に反映されたことが大きく影響している．五大湖周辺とインドシナ半島の事例では，耕地が森林に比べてアルベドが高く粗度長が小さいことを考慮することで現象の再現が可能となった．灌漑の事例は，陸面モデルに灌漑による表層土壌水分の増加が考慮されていないことで観測データに見られない昇温が計算されたことから逆説的に導かれたものである．しかし，一般に，陸面モデルでは，モデル全体のバランスから，耕地の特徴が大幅に簡略化される場合も多い．例えば，全球への適用を想定して開発され，その後多くの陸面モデルに影響を及ぼした SiB2（Sellers et al., 1996）では，陸域の植生を 9 種のパラメータセットで表現することとし（耕地は C3 草原と合わせて 1 つのパラメータセット），パラメータの経時変化は考慮されていない（必要に応じて人工衛星データを用いる）．他方，より小さいスケールへの適用を前提としたいわゆる領域気象モデルでは，耕地の分類はやや詳しくなる傾向がある．パッケージ化された領域気象モデルとして広く使われている WRF には，灌漑の有無や森林との混合土地利用も考慮されるオプションが用意されている（Skamarock et al., 2008）．しかし，作物種の区別はなく，SiB2 と同様に成長を踏まえたパラメータの経時変化も標準パッケージには含まれていない．

大気―陸面相互作用を研究する上で，面積や機能の観点から農耕地が重要であることは上に述べたとおりである．陸面モデルで地表面を表現するためには目的と空間スケールに応じた簡略化が必要ではあるが，農耕地に関しては実態とかけ離れた仮定や表現がなされる場合も散見される．そこで本稿では，大気―陸面相互作用における農耕地の扱いについて理解を深めることを目的に，農耕地の中でもとりわけ耕地について，そこで実際に起きていること，およびそのモデル化に際しての課題や注意点を論じる．筆者自身は大気―陸面結合モデルの開発や利用に直接携わっていないため，大気―陸面結合モデルについての理解は十分ではないが，和文で類似のものがないことから一定の役割は果たしうると考えている．なお，農業は気候のみならず文化との関わりにより非常に多様な形態をとることから，とくに栽培体系については筆者が直接知りうる国内の状況を想定する．本稿の内容は，気象分野に限らず，新品種や栽培技術の大気に対する影響の評価，衛星リモートセンシングデータの解釈，物質循環モデルの改良等にも役立つことを期待している．

2．大気から見た耕地の特徴

陸面モデルにおけるイネ等の単年作物を栽培する耕地の扱いについて，自然生態系と比較したときの特徴は次の５点に集約できる．

①地表面状態の変化が速い．
②土壌や土壌表面が攪乱を受ける．
③灌漑，施肥，収穫等にともない物質の水平移動が生じる．
④個々の圃場について①～③のタイミングや強度が異なる．
⑤空間分布が固定されない．

①は，作物の成長が速いことと収穫等の大規模な改変・攪乱が突発的に発生することによる．これは，特定条件でのモデル化やシミュレーションではその耕地を十分に代表していない可能性があることを意味する．また，年間を通じたシミュレーションを行う場合は，着目する作物の作付け期間のみならず，非作付け期間や裏作も考慮する必要がある．②は，土壌を耕したり（耕起），表層土壌を細かく粉砕する（砕土）ことにより生じる．自然生態系では，森林火災等の大規模攪乱であっても，土壌の天地返しや砕土が広範に発生することはまずない．③も自然状態では大規模には生じないもので，土壌の水収支や物質収支まで考慮したい場合には定量的に把握する必要がある．④，⑤は，陸面モデルを走らせるために，いつどこで何がどのように栽培されたか（され得るか）を把握する必要があることを意味する．基本的には生産者の意向が反映されるが，生産者の意思決定には社会の経済的・政策的状況が大きく影響する．とくに⑤は，大気―陸面相互作用を広域かつ長期的（1 年以上）に予測したい場合には注意を要する．

以下に①，②，④，⑤の要因とその実態について，従来のモデルによる扱いを含めて紹介する．③は，メタン（CH_4）や一酸化二窒素（N_2O）等の温室効果ガスの発生量や物質循環を考える上では重要であるが，それらを扱わない一般的な陸面モデルでは必ずしも考慮する必要が無いため本稿では省略する．

2.1　作物生育

作物は自然植生と比較して短期間に形態や機能が大きく変わるうえ，耕地には作物以外の植生が通常存在しない．そのため，作物の成長の速さが直接大気に影響する．また，形態や機能とその変化速度は，作物種や品種によって大きく異なる．形態の変化で特徴的なのは，葉面積と群落高である．単年作物は，数ヶ月の間に発芽から成熟に達したのち，収穫によってある日突然群落が消滅する．単年作物は最大 LAI が大きいものが多く（そのように品種改良され，品種の最大パフォーマンスが得られるように栽培されるため），単位時間当たりの変化がとくに大きい．肥料と水分が十分であれば，発芽から 3～4ヶ月程度で最大 LAI が 6～8 $m^2\,m^{-2}$ 程度に達するのが一般的である．機能面では，気孔コンダクタンスや気孔の環境応答特性が生育にともない大きく変化することが上げられる．水稲では，群落の平均的な気孔コンダクタンスは，生育初期から生育後期にかけておおよそ半減することがわかっている（Maruyama and Kuwagata, 2008; Ono et al., 2013）．また，作物の形態や機能は作物種で大きく異なる．群落高は，トウモロコシやサトウキビでは 3 m 以上に達するが，同等の最大 LAI を持つダイズは最大で 1 m 程度である．群落構造もトウモロコシとダイズでは大きく異なる．機能面でも，個葉の平均的な気孔コンダクタンスの最大値（開花前後に最大となることが多い）は作物種によって異なる．最近のメタ解析では，イネで 0.61 ± 0.24 mol $m^{-2}\,s^{-1}$，コムギで 0.36 ± 0.13 mol $m^{-2}\,s^{-1}$，トウモロコシで 0.34 ± 0.19 mol $m^{-2}\,s^{-1}$ が得られている（Hoshika et al., 2018）．さらに，作物では，形態や機能が，品種や管理によって大きく異なることも特徴的である．例えば，ソルガムの群落高は，子実型の品種では 1.5 m 程度であるのに対し，サイレージ用の品種では 3 m 近くに達する．また，気孔コンダクタンスにも品種間差があることが知られている．インド型イネ品種は平均的に日本型イネ品種よりも最大気孔コンダクタンスが大きい傾向がある（e.g., Chen et al., 2014）．さらに，灌漑や施肥の多寡によってもこれらは大きく変化する．いずれも各作物種･品種にとって最適な範囲があり，そこからの逸脱は生育不良を引き起こす．ただし，通常の商業生産では灌漑や施肥は最適化されていると見なせるため，その影響やモデル化については本稿では深く触れないが，最適と見なせない条件を対象とする場合は作物モデル等を用いて適切に評価する必要がある．

初期の陸面モデルでは，このような作物の特徴が考慮されることはまれで，耕地については仮想的な作物の有無のみが考慮されるのが一般的であった．2000 年以降，作物の成長過程を予測できる作物モデルと陸面モデルの結合が様々なレベルで行われ，複数の作物に対応する汎用作物モデルを結合した陸面モデルも開発されている（Gervois et al., 2004）．しかし，これらは欧米で開発されたこともあり，水稲や田面水の扱いについては不十分な

ところが多い．一方，国内で開発された陸面モデルMATSIRO（Takata et al., 2003）にはすでに精緻な水田・水稲モデルが開発されているが（Masutomi et al., 2016），国内のその他の主要作物については水稲と同様の精度での扱いに至っていない．

作物の成長過程を扱える陸面モデルを大気―陸面結合モデルに導入し，領域気象解析まで行った事例をいくつか紹介する．アメリカ中西部のコーンベルトを対象に大気―陸面結合モデルで気象再現を試みた研究では，作物のLAIを播種日や環境から予測できるモデルを組み込むことによってより実測値に近い降水量の出力を得ることができた（Levis et al., 2012）．国内の水稲については，大気―陸面結合モデルを用いて水稲栽培面積と領域気象の関係，およびその関係が水稲収量に及ぼす影響を解析した研究がある（Yoshida et al., 2012）．ただし，この研究では，水稲生育を予測する作物モデル（PRYSBI）がメソスケールモデル（JMA-NHM）に影響を及ぼさない構造となっており，大気―陸面相互作用という観点では完全ではない．他方，生育期間の一時期を対象にしたものであるが，気孔コンダクタンスの異なる2つの水稲品種の栽培と大気境界層内の気温や水蒸気圧の相互作用について，陸面モデルと大気境界層モデルを結合して評価した研究が最近発表されている（Ikawa et al., 2018）．

2.2　非作付け期間，多毛作

陸面モデルで耕地を表現する際，忘れられやすいのが非作付け期間や裏作の存在である．これらは一般的な土地利用分類には現れないが，年間を通じたシミュレーションでは考慮する必要がある．例えば，関東地方では水稲作付け期間は長くて6ヶ月程度であり，残りの6ヶ月間は休耕として裸地の状態で放置されるか裏作として麦類が栽培される．関東平野内に位置する熊谷市とつくば市の近郊水田の気象環境を比較すると，冬季の気温低下に顕著な違いがあり，その原因の一つとして熊谷市近郊では裏作としてコムギが栽培されていることが影響したと推察する報告もある（Kuwagata et al., 2014, 2018）．さらにこの研究では，水稲苗の移植の10日ほど前から開始される湛水が最低気温に顕著に影響することも併せて報告されている．また，同じつくば市近郊の単作田では，非作付け期間の降水量が土壌水分を介して土壌有機物の分解速度に影響を与えていることがわかっている（Ono et al., 2015）．これは，年間を通じてCO_2フラックスやCH_4フラックスを推定する際には非作付け期間の熱収支・水収支の挙動が重要であることを意味している．

国内では「水田フル活用」と呼ばれる施策のもと，水田で麦類，ダイズ，飼料作物を作付けすることが推奨されている．とくにダイズは転換畑として夏季に水田を畑として利用するため，地表面は明らかに水田と異なる特徴を持つ．ところが，国内で多用される国土数値情報の土地利用細分メッシュデータはあくまで土地利用図であり，どのような作物が栽培されていても水田は「田」として分類される．水田で水稲以外を栽培する事例は比較的大規模な経営体においてブロックローテーションの一環として実施されることが多く，今後農地の集約化や大規模化でブロック面積が拡大したり，空間解像の高いシミュレーションを行うことがあれば考慮する必要が出てくる可能性もある．

国内に限らず積雪地域では，非作付け期間の多くが雪面となる．このような地域でシミュレーションを行う際，積雪や融雪のタイミングが他の土地利用と異なる場合は積雪を明示的に扱う必要がある．とくに畑地では，積雪期間の長さが夏季の地温や土壌水分に大きく影響するため，作付け期間のみを対象とする場合であっても冬季の積雪状況に関する前歴が重要である．また，気候変動にともないわが国でも積雪の量や期間が今後変化することが予想されており（Kawase et al., 2013），将来気候でのシミュレーションでは耕地でもこのことを考慮する必要があるかもしれない．

2.3　土壌の攪乱，土壌表面の改変

一般的な作物栽培では，作付け準備として，非作付け期間に耕起（土壌を掘り起こすこと）や砕土（表層土壌を細かく粉砕すること）が行われる．また，ダイズや一部の野菜では，作付け期間中にも除草等の目的で中耕と呼ばれる耕耘（耕起と砕土を行い土壌を栽培に適した状態に整える）が行われることもある．国内では，耕起と砕土を同時に行うロータリー耕耘（図1）が広く行われているが，ロータリー耕耘の耕深は通常15 cm程度であるため，土壌の特性や栽培する作物によってはより深くまで耕すためにプラウ（図2）による耕起が行われる．

耕起や砕土は，大気側へは表層土壌水分や粗度長の急激な変化となって現れる．一般的なロータリー耕耘は，土壌表面が乾燥した状態で行われ，表面から15 cmまでの土壌が粉砕，均一化される．これにより，表層土壌水分が一時的に増加し，土壌表面の凹凸が小さくなる（図1）．表層土壌水分の増加はアルベドの低下をともなう場合が多い（Cresswell et al., 1993）．土壌面の凹凸の変化は粗度長の変化をともなう．ロータリー耕耘は地表面の凹凸を解消する方向に働くが，プラウによる深耕は凹凸を増大させる（図1，2を比較するとよくわかる）．ただ



図 1：ロータリー耕耘の様子．
トラクターに標準的なロータリー耕耘部を取り付け，圃場内をゆっくり走行することで耕起と砕土を同時に行う．耕深（耕す深さ）はロータリー爪の回転半径によって異なるが通常は 15 cm 程度である．耕耘された土壌の表面は，耕耘されていない土壌の表面より起伏が細かく（幾何学的粗度が小さい），直後は相対的に高い土壌水分によって色も濃く見える（アルベドが小さい）．



図 2：プラウを行った直後の土壌表面．
プラウ（犂）をトラクターで曳くことによりロータリー耕耘より深くまで掘り起こすことができる．砕土効果は小さいため，大きな土塊が表面に露出し，幾何学的粗度が大きくなる．

し，ロータリー耕耘でも，実施時の土壌水分によっては土塊が形成され，凹凸が耕耘前より大きくなる場合もある．また，耕起にともなって土壌中に蓄積されていた CO_2 が放出されることもある（Reicosky et al., 1997）．さらに，大気側からは直接見えないが，耕起により地温や土壌水分のプロファイルが一旦リセットされるほか，砕土により間隙率が変化する．これは，その後の地温や土壌水分の推移に影響を及ぼす．通気性の向上により土壌有機物分解が促進されることもある（Dao, 1998）．耕起や砕土がアルベド，土壌水分，ガス交換等に及ぼす影響は個別には比較的よく調べられているが，総合的に評価された研究はほとんどない．耕起や砕土の影響は，実



図 3：マルチ資材で覆われた土壌表面．
マルチと呼ばれる主にポリエチレン製のフィルムで土壌面を覆うこと（マルチング）で，地温，土壌水分，雑草・病虫害発生，土壌飛散等を制御する．目的に応じて異なる色のフィルムを用いる．この写真のマルチ（透明ポリエチレンフィルム）は，土壌消毒のための燻蒸を促す目的で施用されたものである．

施するタイミングや作業機械の特性に依存するため，土壌物理分野や物質循環分野においても一般化やモデル化は遅れている．陸面モデルへの導入はこれらの開発を待ってからになると思われる．

マルチによる被覆も土壌表面の特性を大きく変化させる．マルチは土壌表面を覆う被覆資材で，多くはポリエチレン製のフィルム状のものである（図 3）．マルチで作物苗以外の土壌表面を覆うことで，雑草の成長，蒸発による乾燥，雨の侵入による過度な湿潤化，熱の移動を制限し，作物の成長を補助する．したがって，マルチは本来的に地表面熱収支を改変することが目的であり，その影響は陸面モデルでも考慮されなければならない．しかし，マルチは野菜等の園芸作物に用いられることが多く，栽培規模の観点からイネ等の土地利用作物と比べて，大気―陸面結合モデルで考慮する重要性は現時点では極端に大きいとは言えない．他方，土地利用作物では，収穫時にわらが圃場に散布されることにより土壌表面が一時的にマルチ状態になることがある（わらマルチと呼ばれる）（図 4 の左側）．わらマルチは収穫後最初の耕耘により土壌中にすき込まれるが（図 4 の右側），それが遅れると数ヶ月にわたって地表面に存在する．その間，物理的・生物的な分解によってわらマルチの特性（反射率，粗度長，熱伝導，通気性）は日々変化する．このような期間をシミュレーションの対象とする場合はわらマルチの特性を考慮する必要があるが，経時変化まで含めたわらマルチの効果を総合的に扱えるモデルはまだ開発されていない．

耕起やマルチの他に土壌表面や土壌表層の特性を改変



図 4：収穫時に散布された稲わらで覆われた地表面（左）とそれをロータリー耕耘によりすき込んだ後の地表面（右）．
一般に，わらで覆われた地表面は，土壌面に比べ，アルベドが高く，蒸発効率（蒸発のしやすさ）が低い．

するものとして，堆肥や炭（バイオ炭）の施用，客土（土壌改善等の目的で土を追加したり入れ替えたりすること）などが挙げられる．客土は，量によっては作土の特性が完全に入れ替わることもある．堆肥は土壌特性を変化させるほか，黄色土のように色の薄い土壌に投入した場合はアルベドを低下させる効果がある．炭も同様にアルベドを低下させる効果があり（Genesio et al., 2012），国内では従前から融雪促進や土壌改良に用いられているほか，近年海外では炭素隔離の目的で大規模に施用される事例が見られる．しかし，わらマルチと同様にその効果は耕起や分解の影響を受けるほか，すき込みによって土壌の理化学性を変化させる効果もある．わらマルチと同様に，これらを総合的に評価できるモデルの開発，およびそれらの陸面モデルへの組み込みは今後の課題である．

2.4　作目や管理の空間分布

大気―陸面結合モデルを面的に適用するためには，地表面状態の空間分布についての情報が必要となる．地表面状態の空間分布については，リモートセンシングデータがよく用いられる．2000 年代中盤以降は，2 機体制となった MODIS（NASA が開発した中解像度分光センサー）により全球で 1 日 2 回の観測が可能となり，それらのデータを活用したシミュレーションも多く見られる．しかし，MODIS の標準的なプロダクト（MOD12）では，従来型の土地被覆カテゴリーが踏襲されており，耕地は「croplands」または「cropland/natural vegetation mosaic」のみとなっている．水田と畑は区別されず，同じ畑でトウモロコシとダイズが輪作されていても区別はない．国内では，耕地一区画の面積が小さいため，MOD12（解像度は 500 m）より国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ（解像度は 100 m）が用いられることが多い．しかし，前述のように，土地利用細分メッシュデータにおいても，耕地は「田」と「その他の農用地」が区別されているのみで，作目（作物種）や管理の情報は含まれていない．

ある大気状態を大気―陸面結合モデルで再現したい場合に必要となるのは，本質的には土地の利用形態を表す土地利用ではなく，実際その土地が何に覆われているのかを表す土地被覆の情報（マップ）である．しかし，土地被覆マップは，耕地の分類が土地利用マップと同じかむしろ粗いものが多く，現時点で耕地に関しては土地被覆マップの優位性は低い．国内では JAXA が，陸域観測技術衛星 2 号（ALOS2）の可視近赤外域センサー（AVNIR-2）のデータに基づいて国内の 2006～2011 年の平均的な土地被覆を解像度 30 m（内部的には 10 m）で推定したマップ（「高解像度土地利用土地被覆図」）を提供しており（橋本ほか, 2014），分類は土地利用細分メッシュと同等のものとなっている．作目や管理の情報は，各国政府が提供している統計データが最も信頼性が高い．国内の CH_4 発生量を推計した研究では，気象庁の地域区分と土壌マップを基礎として，作付けや圃場整備状況等に関する統計データを国内 136 ゾーンに按分したマップを構築し，そこに物質循環モデルの一つである DNDC-Rice を適用することで信頼性の高い値を得た（Hayano et al., 2013; Katayanagi et al., 2016）．現時点では主な統計データの取りまとめ単位が市町村レベルの行政区分であるため，大気―陸面結合モデルへ適用するには空間分解能が問題となるが，耕地特性の面的な把握という観点では考慮に値する手法である．

3．耕地を表現する地表面パラメータの特徴

陸面モデルでは，LAI，群落高，粗度長，アルベド，気孔コンダクタンス等のいわゆる地表面パラメータの大小によって植生の種類や量を表現する．耕地を対象とする場合も同様で，作物種の違い，作物の有無，作物の量や状態は地表面パラメータによって表現される．

陸面モデルは，地表面パラメータの種類や数にその特徴が現れる．植生地の陸面モデルは，植物群落を表現する層数によって，単層モデル，2 層モデル，多層モデルに大別される．それぞれでエネルギーやガスの交換が行われる層の数が異なり，単層モデルでは土壌と合わせて 1 層，2 層モデルでは群落と土壌の 2 層，多層モデルでは群落内に複数の層を想定する．単層モデルはビッグリーフモデルとも呼ばれ，群落が土壌面を十分に覆っている

条件では現実的な精度でフラックスを予測することができる．群落が未発達の段階を含める場合は2層モデルが適している．多層モデルは複雑な群落構造を表現できるが，その分パラメータを揃える必要がある．大気―陸面結合モデルでは，計算負荷を抑えるため，単層モデルか2層モデルが用いられることが多い．以下ではこの2つのモデルを想定して，前節で述べた耕地の特徴を地表面パラメータで表現する際に考慮すべき点や課題を概説する．なお，2層モデルについては本巻の桑形恒男氏の解説も参照されたい．

3.1 放射に関するパラメータ

一般的な陸面モデルにおいて，作物群落の日射吸収と大気放射吸収に関する主たるパラメータは，LAIと吸光係数である．いずれも成長にともない変化する（Maruyama et al., 2007）．成長の推定は従来の作物モデルが得意とするところであり，作物モデルとの結合が精度向上の最短ルートと考えられる．ただし，一般的な作物モデルで計算されるのはLAIのみで，吸光係数は定数とするか別途与えられる場合が多い．生育期間後半の老化にともなう群落構造の変化についてはモデル化に至るための実測例が圧倒的に不足している．

3.1.1 葉面積指数（LAI）

LAIは，陸面モデルで植生を扱う上で最も重要なパラメータである．吸収日射量や粗度長は基本的にLAIの関数で表される．LAIは，播種時には0 $m^2\,m^{-2}$で，通常の作物は開花頃に最大となる．最大になるまでの期間は夏作物では2〜3ヶ月であるが，秋まきコムギは5ヶ月程度要する．最大LAIは，作物種，環境，施肥によって大きく変わるが，吸収日射量や粗度長に対する感度はLAIに対して対数的に増加するため，陸面モデルでは最大LAIよりも生育初期のLAI増加速度が重要となる．開花以降は，葉は群落下部から徐々に枯死する．枯死した葉は生理的な機能を失うが，運動量吸収や日射吸収には寄与する．そのため，この時期は，活性が失われていない緑色葉のみをカウントしたGreen LAI（GLAI）を区別して用いることがある．イネ科作物では子実部（穂）が群落の上部に位置するものが多く，それらも少なからず運動量や日射の吸収に寄与する．しかし，子実部がどの程度のLAIに相当するのかは十分に調べられておらず，一般化したモデルやデータセットの構築は今後の課題である．

3.1.2 吸光係数

LAIと日射吸収割合を関係づけるパラメータが吸光係数である．吸光係数は群落内の葉の傾きと分布，ならびに個葉の波長特性に関係している．イネとダイズは対照的で，イネは吸光係数が比較的小さく，群落の下部まで日射が透過する性質がある．一方ダイズは，葉が水平に近い角度で隙間なく分布することから吸光係数が大きく，ほとんどの日射が群落上部で吸収される．なお，ダイズを含めたマメ科作物は向日運動（太陽の位置によって葉の向き・角度が変化する）を行うため，太陽位置と吸光係数の関係を定式化する際は注意が必要である．吸光係数も成長にともなって変化（増加）することが知られており，それを適切に再現することが重要である．しかし，LAIと同様に，老化にともなう個葉形態や日射吸収特性の変化は肥料条件や生育環境に依存する部分が大きいため，モデル化が遅れている．

3.1.3 土壌面のアルベド

土壌面のアルベドは，非作付け期間と，作付け期間中の群落が閉じるまでの期間は熱収支に大きく影響する．土壌表面のアルベドには，表面のテクスチャや微起伏および表層土壌水分が影響する．国内の代表的な土壌におけるアルベドと表層土壌水分の関係は，陸面モデルで利用しやすい形で定式化されている（福本・小川，1996）．一方，耕起とアルベドを関連づけた研究は数が少ない．海外では数例見られるが（e.g., Matthias et al., 2000），国内ではまだ行われていないものと思われる．土壌や耕起方法は国や地域で異なるため，国内でも同様の研究が行われることを期待したい．定性的には，アルベドは，耕起で生成される起伏により低下し，砕土による均平化で上昇するが，その程度は太陽高度にも依存する．土壌の表面形状と反射特性の関係はある程度の定式化が可能であるため（Irons et al., 1992），耕起と土壌表面形状との関係が明らかになれば，耕起とアルベドのより頑健な定式化が可能になるものと思われる．

3.2 乱流輸送に関するパラメータ

単層モデルと2層モデルで多く採用されるバルク式型のモデルでは，接地境界層内の輸送速度（空気力学的コンダクタンスとも呼ばれる）を支配するパラメータとして粗度長と地面修正量（ゼロ面変位とも呼ばれる）が重要である．これらもやはり成長にともなって大きく変化する．

3.2.1　地面修正量，群落高

バルク式を採用する大気―陸面結合モデルにおいては，地面修正量は，大気最下層の代表高さから群落までの距離を定めるためのパラメータとなる．地面修正量は群落高との比で表したときの特徴が古くから調べられており，多くの陸面モデルでその比が使われている．地面修正量と群落高の比は，定数とする場合は0.6～0.7が用いられ，より詳細なモデル（Sellers et al., 1996; Watanabe, 1994）では個葉の抵抗係数とLAIの積で表される．土壌面では通常，地面修正量，群落高ともに0であるが，非作付け期間でも収穫後の刈り株が大きい場合には考慮する必要がある．なお，作物は森林に比べ群落の形状が変化しやすいため，高風速時に群落高が減少し，それにともなって地面修正量も減少する（真木ほか, 1968）．また，地面修正量と群落高の比自体も風速によって変化（減少）することがある（Legg et al., 1981）．これらは，1グリッド内の地表面がすべて作物群落で覆われるような場合や強風条件下では大気―陸面結合モデルでも考慮する必要があるかもしれない．

群落高は，2.1で述べたように，作物の成長にともなって変化し作物種によっても大きく異なるため，LAIと同様に作物モデルを利用した推定が第一候補となる．しかし，すべての作物モデルで群落高が出力されるわけではない．例えば，CERESを結合した大気―陸面結合モデルによる領域気象解析の研究では，群落高は別のモデルを用いて推定されている（Tsvetsinskaya et al., 2001）．国内で広く普及している水稲生育モデルSIMRIW（Horie et al., 1995）やその派生モデルでは，群落高は内部的にも計算されない構造となっている．これは，LAIがほとんどの作物モデルで予測されることと対照的である．LAIが群落光合成量に直接影響するのに対し，群落高は生育予測そのものに直接影響を及ぼさないことから，作物モデルで積極的に考慮されてこなかったものと思われる．また，群落高が考慮されているモデルでも，その検証はLAIに比べると軽んじられる傾向がある．しかし，近年は倒伏や洪水影響の観点で群落高のモデル化が見直される動きもあり（Confalonieri et al., 2011; Liu et al., 2018），今後の進展が期待される．なお，前述のMasutomi et al. (2016)では，群落高はLAIの関数で表すこととし，出穂前後でその関係が変わることを考慮することにより移植から成熟までの植生高の連続的な算出を可能とした．

3.2.2　粗度長

粗度長は，バルク輸送係数を求める際の地表面側の境界に当たり，地表面付近の複雑な輸送過程が押し込められたパラメータである．基本的には，地表面の凹凸（幾何学的粗度）と対応する．単層モデルや2層モデルの群落層については，地面修正量と同様に群落高とLAIの関数で表されることが多い．ただし，この関数の適用に当たっては，栽植密度を含めたバルクな群落構造が，その関数の適用条件と大きく外れていないことが前提となる．また，地面修正量にも当てはまることであるが，とくに生育の後半は，今後老化による群落構造変化に関する知見が蓄積されることで，異なる関係式，モデルが提示される余地がある．加えて，粗度長は地面修正量と同様に高風速時に減少する傾向がある．

非作付け期間や作付け期間中の土壌面の粗度長は，従来一定値が与えられることが多かったが，例えば水田においては，本巻の石田祐宣氏，丸山篤志氏の解説で示されているように耕起や田面水位の上下によって変化する．このことは，陸面モデル内の地温や水温の予測にはもちろん大きな影響を及ぼすが，大気―陸面結合モデルの中では他の誤差に埋もれる可能性もあるため，考慮するか否かは目的に応じて判断する必要がある．

以上は主に運動量輸送の粗度長（z_0）を念頭に置いたものであるが，粗度長は顕熱輸送（z_T）や潜熱輸送（z_q）についても個別に定義されるものであり，これらは通常z_0と一致しない．z_Tとz_qは，群落層については，z_0の場合と同様に，個葉の交換係数とLAIから推定する方法が利用されることが多い．他方，土壌面については，半理論的に決められた粗度長の対数比（$kB^{-1} = \ln(z_0/z_T)$）を使って求める方法があるが，耕起後の凹凸の大きい土壌面にどの程度適用できるのかはわかっていない．z_Tとz_qは，原理的に交換面のeffectiveな温度と水蒸気圧が必要となることから，z_0に比べて実測から求めることが格段に難しい．そのため，難易度の高い（不確実性が高い）測定に依存しない推定法や新たなモデルフレームワークの開発が待たれる．

3.3　作物生理に関するパラメータ

陸面モデルの作物生理に関わるパラメータは，通常のエネルギー輸送を考える上では群落の蒸発（蒸散）のしやすさに関するパラメータのみとなる．このパラメータの表現方法は陸面モデルによって様々であるが，最終的には作物の気孔開度（気孔コンダクタンス）と関連づけられているものがほとんどである．気孔コンダクタンスのモデル化にも長い歴史があるが，決定版といえるものはなく，用途に応じて使い分けられている（Damour et al., 2010）．気孔コンダクタンスの日変化を表したい場合

は，作物内部の状態よりも日射や飽差等の外部環境に関係づけられることが多い．他方，季節変化を表したい場合は，必然的に作物の成長と関係づけられる必要がある．陸面モデルではこれまで主に前者の関係が用いられてきたが，長期的な予測においては後者も考慮されるようになりつつある（Levis et al., 2012）．ただし，作物の老化にともなう種々の変化とそのモデル化については，形態面のみならず機能面でも研究が遅れているところであり，気孔コンダクタンスも例外ではない．現時点では，葉の窒素量の低下に応じて気孔コンダクタンスを低下させるモデルが最もメカニスティックと考えられるが，老化により群落内の窒素量分布も変化するため，従来の単層モデルや2層モデルでは扱いづらい．また，生育後半の群落の窒素動態については不明なところも多い．老化はそれまでの成長過程の蓄積であるため，同一品種であっても環境や管理の微妙な違いが反映されやすい．まずは，これら老化の扱い方の差異がどの程度大気に影響を及ぼすのかを仮想実験（計算）により明らかにすることが必要と思われる．

4. 耕地を対象とした陸面モデルの方向性

これまで述べたように，大気―陸面結合モデルで耕地を扱うためには，作物の急速な成長や耕起等にともなう地表面パラメータの経時変化をどのようにモデル化するかが重要であり，さらにこれを面的に適用することを想定した場合には複数の作目（作物種）を同じフレームワークで取り扱えることやその基盤となる土地被覆や管理のマップの精度が鍵となることを述べた．以下にこれらの課題に対する将来展望を記して本稿の結びとしたい．

作物成長過程を扱うモデルとしては，いわゆる作物モデルがあり，2000年以降，作物モデルと陸面モデルの結合が様々なレベルで行われていることは先述の通りである．今後は，個別に結合モデルを構築することよりも，すでに汎用作物モデルが結合された陸面モデルをプラットフォームとして未考慮の作物を加えていくことが効率的と思われる．これらは欧米で開発されたこともあり，水田や水稲の成長過程については対応が不十分なところが多く，国内の研究者の貢献が期待されるところである．また，並行して，生育後半の群落形状や生理パラメータのモデル化研究は計測を含めて進める必要がある．作物モデル側においても，作物の温度環境や水利用の再現において陸面モデルとの結合はメリットが大きいため，結合モデルを相互に利用できる環境が整えられれば効果的にモデルの高度化や精緻化が図れる可能性がある．

一方で，作物モデルと陸面モデルの結合は，作付け期間のシミュレーションには有効であるが，非作付け期間の課題解決には直接つながらない．作物モデルの主眼は作付け期間である．非作付け期間を精緻に扱うためには，2.3で述べたように，耕起やわらマルチが地表面パラメータに及ぼす影響の評価とモデル化が急務である．土壌プロセスを主な対象とする物質循環モデルは，通年の適用を前提としており，耕起を考慮できるものもある（Li, 2000）．しかし，物質循環モデルでは粗度長やアルベドといった陸面モデルに必須のパラメータは内部的にも考慮されていないため，モデルの単純な結合は難しいと思われる．物質循環モデルに陸面モデルの要素を取り入れることから開始し，そのエッセンスを陸面モデルにフィードバックするという方向性をここでは提案しておきたい．物質循環モデルと陸面モデルの結合は，作物モデルの場合と同様に双方に大きなメリットがある．物質循環モデルでは，モデル内の様々な生物・化学反応速度に用いられる地温がより精緻に推定できることになる．陸面モデルでは，肥料成分の動態，N_2O や CH_4 等の温室効果ガスも予測できることになり，適用環境や用途の幅が広がる．

作付けや施肥量等の管理の面的な情報（マップ）は，大気―陸面相互作用研究のみならず，収量推定，温室効果ガス排出量推定のほか，社会科学分野も含めて様々な分野で高いニーズがある．しかし，日本国内でさえもこのようなマップは未だ作成されていない．大気―陸面相互作用研究の関心の中心は，やはり，異なる特性を持った地表面の空間配置が大気に及ぼす影響である．土地被覆の把握にはリモートセンシングデータの活用が最も直接的である．地表面パラメータをリモートセンシングから直接得ることができれば，土地被覆推定のステップを省くことができる．しかし，それでもなお，何がどのように栽培されている中でのその地表面パラメータの値なのかを知ることは将来予測の観点で重要である．例えば，前述したJAXAが提供する高解像度土地利用土地被覆図がより高頻度に作成されれば，その動態と統計データとを組み合わせた機械学習的アプローチにより，予測につながる土地被覆動態モデルを作成することも可能かもしれない．他方，1グリッド内に複数の土地被覆が存在した場合の扱いについても研究を深める必要がある．現在は，各土地被覆のフラックスを面積で按分する方法，あるいは構成する土地被覆をコンポジットした地表面パラメータからフラックスを算出する方法が用いられることが多いが，どちらも直接的な検証が難しいことから甲乙つけがたい．いずれにしても，この問題は，地

表面パラメータをどこまで精緻化すべきかという問いと併せて考えていくべきものである．耕地の特徴を地表面パラメータに反映させるための研究を進める上では，目的に応じた時空間解像度の土地被覆や栽培管理情報が得られるのか，得られた場合のモデルの精度は十分か，という基本的な問いを忘れずにバランスよく突き詰めていくことが重要と思われる．

参考文献

Bonan, G. B. (2001) Observational evidence for reduction of daily maximum temperature by croplands in the Midwest United States. *J. Clim.*, **14**, 2430–2442.

Chen, C. P., H. Sakai, T. Tokida, Y. Usui, H. Nakamura and T. Hasegawa (2014) Do the rich always become richer? Characterizing the leaf physiological response of the high-yielding rice cultivar Takanari to free-air CO_2 enrichment. *Plant Cell Physiol.*, **55**, 381–91.

Confalonieri, R., S. Bregaglio, A. S. Rosenmund, M. Acutis and I. Savin (2011) A model for simulating the height of rice plants. *Eur. J. Agron.*, **34**, 20–25.

Cresswell, H. P., D. J. Painter and K. C. Cameron (1993) Tillage and water content effects on surface soil hydraulic properties and shortwave albedo. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 816–824.

Damour, G., T. Simonneau, H. Cochard and L. Urban (2010) An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant. Cell Environ.*, **33**, 1419–1438.

Dao, T. H. (1998) Tillage and crop residue effects on carbon dioxide evolution and carbon storage in a Paleustoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62**, 250–256.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) FAOSTAT statistics database.

福本昌人，小川茂男（1996）各種の裸地土壌におけるアルベドと分光反射率の土壌水分依存性．水文・水資源学会誌，**9**，92–95.

Genesio, L., F. Miglietta, E. Lugato, S. Baronti, M. Pieri and F. P. Vaccari (2012) Surface albedo following biochar application in durum wheat. *Environ. Res. Lett.*, **7**, 014025 (8pp).

Gervois, S., N. de Noblet-Ducoudré, N. Viovy and P. Ciais (2004) Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interact.*, **16**, 1–25.

橋本秀太郎，田殿武雄，小野里雅彦，堀雅裕，塩見慶（2014）多時期光学観測データを用いた高精度土地被覆分類手法の開発．日本リモートセンシング学会誌，**34**，102–112.

Hayano, M., T. Fumoto, K. Yagi and Y. Shirato (2013) National-scale estimation of methane emission from paddy fields in Japan: Database construction and upscaling using a process-based biogeochemistry model. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **59**, 812–823.

Horie, T., H. Nakagawa, H. G. Centeno and M. J. Kropff (1995) The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. In: Matthews, R. B., M. J. Kropff and D. Bachelet (eds) *Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia*, 51–66. CAB International, Oxon.

Hoshika, Y., Y. Osada, A. de Marco, J. Peñuelas and E. Paoletti (2018) Global diurnal and nocturnal parameters of stomatal conductance in woody plants and major crops. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, **27**, 257–275.

Ikawa, H., C. P. Chen, M. Sikma, M. Yoshimoto, H. Sakai, T. Tokida, Y. Usui, H. Nakamura, K. Ono, A. Maruyama, T. Watanabe, T. Kuwagata and T. Hasegawa (2018) Increasing canopy photosynthesis in rice can be achieved without a large increase in water use -A model based on free-air CO_2 enrichment. *Glob. Chang. Biol.*, **24**, 1321–1341.

Irons, J. R., G. S. Campbell, J. M. Norman, D. W. Graham and W. M. Kovalick (1992) Prediction and measurement of soil bidirectional reflectance. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **30**, 249–260.

Kanae, S., T. Oki, K. Musiake, S. Kanae, T. Oki and K. Musiake (2001) Impact of deforestation on regional precipitation over the Indochina Peninsula. *J. Hydrometeorol.*, **2**, 51–70.

Katayanagi, N., T. Fumoto, M. Hayano, Y. Takata, T. Kuwagata, Y. Shirato, S. Sawano, M. Kajiura, S. Sudo, Y. Ishigooka and K. Yagi (2016) Development of a method for estimating total CH_4 emission from rice paddies in Japan using the DNDC-Rice model. *Sci. Total Environ.*, **547**, 429–440.

Kawase, H., M. Hara, T. Yoshikane, N. N. Ishizaki, F. Uno, H. Hatsushika and F. Kimura (2013) Altitude dependency of future snow cover changes over Central Japan evaluated by a regional climate model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 12444–12457.

Kuwagata, T., S. Haginoya, K. Ono, Y. Ishigooka and A. Miyata (2018) Influence of local land cover on meteorological conditions in farmland: Case study of a rice paddy field near Tsukuba city, Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **74**, 140–153.

Kuwagata, T., Y. Ishigooka, M. Fukuoka, M. Yoshimoto, T. Hasegawa, Y. Usui and T. Sekiguchi (2014) Temperature difference between meteorological station and nearby farmland -Case study for Kumagaya city in Japan-. *SOLA*, **10**, 45–49.

Legg, B. J., I. F. Long and P. J. Zemroch (1981) Aerodynamic properties of field bean and potato crops. *Agric. Meteorol.*, **23**, 21–43.

Levis, S., B. B. Gordon, Erik Kluzek, P. E. Thornton, A. Jones, W. J. Sacks and C. J. Kucharik (2012) Interactive crop management in the Community Earth System Model (CESM1): Seasonal influences on land-atmosphere fluxes. *J. Clim.*, **25**, 4839–4859.

Li, C. S. (2000) Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutr. Cycl. Agroecosystems*, **58**, 259–276.

Liu, F., P. Wang, X. Zhang, X. Li, X. Yan, D. Fu and G. Wu

(2018) The genetic and molecular basis of crop height based on a rice model. *Planta*, **247**, 1–26.

Lobell, D. B., C. Bonfils and J. M. Faurès (2008) The role of irrigation expansion in past and future temperature trends. *Earth Interact.*, **12**, 1–11.

真木太一，高見晋一，新庄彬（1968）ソルゴー植被上に於ける風速分布式中の地面修正量と粗度長について．農業気象，**24**，127–132.

Maruyama, A. and T. Kuwagata (2008) Diurnal and seasonal variation in bulk stomatal conductance of the rice canopy and its dependence on developmental stage. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 1161–1173.

Maruyama, A., T. Kuwagata, K. Ohba and T. Maki (2007) Dependence of solar radiation transport in rice canopies on developmental stage. *Japan Agric. Res. Q.*, **41**, 39–45.

Masutomi, Y., K. Ono, M. Mano, A. Maruyama and A. Miyata (2016) A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice v. 1) - Part 1: Model description. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 4133–4154.

Matthias, A. D., A. Fimbres, E. E. Sano, D. F. Post, L. Accioly, A. K. Batchily and L. G. Ferreira (2000) Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64**, 1035.

農林水産省大臣官房統計部（2018）面積調査　平成 30 年耕地面積（7 月 15 日現在）．作物統計.

Ono, K., M. Mano, G. H. Han, H. Nagai, T. Yamada, Y. Kobayashi, A. Miyata, Y. Inoue and R. Lal (2015) Environmental controls on fallow carbon dioxide flux in a single-crop rice paddy, Japan. *L. Degrad. Dev.*, **26**, 331–339.

Ono, K., A. Maruyama, T. Kuwagata, M. Mano, T. Takimoto, K. Hayashi, T. Hasegawa and A. Miyata (2013) Canopy-scale relationships between stomatal conductance and photosynthesis in irrigated rice. *Glob. Chang. Biol.*, **19**, 2209–2220.

Reicosky, D. C., W. A. Dugas and H. A. Torbert (1997) Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil Tillage Res.*, **41**, 105–118.

Sellers, P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C. Zhang, G. D. Collelo and L. Bounoua (1996) A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *J. Clim.*, **9**, 676–705.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers (2008) A description of the advanced research WRF Version 3, NCAR technical note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division. *Natl. Cent. Atmos. Res. Boulder, Color. USA*.

Takata, K., S. Emori and T. Watanabe (2003) Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Glob. Planet. Change*, **38**, 209–222.

Tsvetsinskaya, E. A., L. O. Mearns and W. E. Easterling (2001) Investigating the effect of seasonal plant growth and development in three-dimensional atmospheric simulations. Part I: Simulation of surface fluxes over the growing season. *J. Clim.*, **14**, 692–709.

Watanabe, T. (1994) Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Boundary-Layer Meteorol.*, **70**, 13–35.

Yoshida, R., T. Iizumi, M. Nishimori and M. Yokozawa (2012) Impacts of land-use changes on surface warming rates and rice yield in Shikoku, western Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, 1–5.