

NDVI 時系列解析による全球作物分類図の作成

Creating a global dataset of crop type through the time series analysis of NDVI

萬 和明¹・田中 賢治²・池淵 周一³

Kazuaki YOROZU, Kenji TANAKA and Shuichi IKEBUCHI

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 京都大学助手 防災研究所水資源研究センター (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

³フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所水資源研究センター (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

SiBUC (Simple Biosphere including Urban Canopy) is one of the participants of the Second Global Soil Wetness Project (GSWP2). It uses mosaic approach to incorporate all kind of land-use into LSS. As for farmland, 4 types of crops are considered; spring wheat, winter wheat, corn, and soybean. Not a small part of the world's cropland is irrigated. In order to estimate global soil moisture field as accurately as possible, it is necessary to prepare some parameters which the irrigation scheme needs. The purpose in this study are to prepare a global dataset of crop type and cropping calendar with 1-degree resolution. Through the time series analysis of NDVI, farmland is classified into 4 types and global distribution of cropping calendar (seeding, harvesting, etc.) is produced. In this study, the original index is introduced: Normalized NDVI.

Key Words : *SiBUC, GSWP2, irrigation, NDVI, global dataset of crop type*

1. 序論

近年, 土壌水分が大気・地表面間のエネルギー・水収支を通して, 気候形成やその変動に寄与することが明らかとなってきている。そこで, 効果的な気象予測のためには, 土壌水分量を継続的に把握することが求められるが, 広範囲でかつ持続的な土壌水分量の現地観測は困難である。このような背景から, 観測値を元にした気象強制力を陸面過程モデルに与え, 土壌水分量分布を算出するというプロジェクト, 全球土壌水分プロジェクト (Global Soil Wetness Project: GSWP) が実施されている。

全球土壌水分プロジェクトは現在第2期であり, 陸面過程モデルのオフライン計算によって, 地表面フラックス並びに土壌水分量を含む水文学的状态変数のグローバルデータセットを提供し, その検討・評価を行うことを目的としている¹⁾。解析対象期間は1986-1995年の10年間, 対象領域は全球1度グリッドの南極を除く陸域部分15,238グリッドである。初期条件は地表面水分ゼロ・土壌水分75%で与えられ, モデル計算の開始を1982年7月とし, 3年半のspin-up期間によって解析開始の1986年においては現実的な地表水文状態を実現しているものとする。

各陸面過程モデルが使用するデータは共通であり, ISLSCP-II (International Satellite Land-Surface Climatology Project) のデータ²⁾を元にしたデータセット

がGSWP2から提供される。その時間解像度は, 気象強制力については3時間, 植生パラメータは月別の気候値, 土壌データは解析期間中固定値でそれぞれ与えられている。

ISLSCP-IIによって提供される気象強制力は再解析データである。そこで, 様々なアルゴリズム³⁾⁴⁾を利用した補正を行い, 気象強制力に観測値を反映させたデータセットを作成し, これを用いて基礎シミュレーションを行う。また, このアルゴリズムによる補正の影響や再解析データのバイアスの影響を評価することを目的とし, 入力データの一部(あるいは全て)を他のデータに差し換えるという感度分析実験が複数用意されている。

各モデルが算定した熱・水収支に関する項目, 土壌水分量等の水文状態量は, ICC(Inter Comparison Center)において解析⁵⁾され, 特に, 土壌水分に関してはリモートセンシングによる推定値との比較が行われる。

筆者らは, 陸面過程モデルSiBUC(Simple Biosphere including Urban Canopy)を用いてGSWP2に参加しており, 現実の地表面状態に沿ったモデル計算を行うため, また, 算定された土壌水分量分布のさらなる精度向上を目的として, 灌漑を考慮に入れたシミュレーションをプロジェクトとは別途に実施しており, 灌漑が及ぼす影響評価を行っている。本論文では, 灌漑を考慮したモデル計算のために, NDVIの時系列解析を通じて全球作物分類図の作成を空間分解能1度グリッドで行い, さらに各作物の生育期間を定めた農事暦を作

表-1 作物の生育段階 (単位は%) とその最低水量 (米は水深で与えられており単位は mm, 他は根層の土壌水分量)

作物	段階	1	2	3	4	5
春小麦	期間	23	14	14	14	35
	水量	70	60	80	80	55
冬小麦	期間	26	20	22	13	19
	水量	70	70	80	80	55
トウモロコシ	期間	8	48	6	14	24
	水量	75	65	70	75	65
米	期間	25	13	33	13	16
	水深 (mm)	20 -50	不要	20 -60	湿潤 灌漑	干干 湿湿
夏大豆	期間	4	25	16	28	27
	水量	75	65	65	70	65

成する。

2. 陸面過程モデル SiBUC

本研究において使用する陸面過程モデル SiBUC が他の陸面過程モデルと異なる大きな点は、生物圏だけでなく都市・水体をも表現可能な点である⁶⁾。全球規模で考えれば、陸域の地表面に占める都市や水体の割合は小さいため、従来の陸面過程モデルでは省略されてきたが、これらの水・熱収支特性は植生地のそれとは全く異なるので、その影響が小さいとは言いきれない。そこで、陸面過程モデルの精度を向上することを目的に、従来まで考えられてきた植生モデルに都市・水体の効果を加えたモザイクモデルとして開発されたのが SiBUC である。

SiBUC では、植生区分の一つとして水田を扱うことを可能にする灌漑スキームが導入されている⁷⁾。この灌漑スキームは、土壌表層上部に温度を持った 1 層の水体を追加することによって水田をモデル化したものであり、複雑な人為的水操作を再現しうる。また、水田以外で実施される人為的な水量操作については、既存の植生モデルの改良により、モデルでの再現計算が可能となっている。本研究では、表-1 に示すとおり、作物毎に各生育期間とそこで維持すべき最低水量が得られている⁸⁾。そこで、全球規模で灌漑を考慮したモデル計算を行うためには、全球での作物分類を行い、さらに各作物の生育期間を定める必要がある。しかしながら、作物分類を示した大まかな図は存在する⁹⁾ものの、メッシュデータとしては作物分類図は存在しない。そこで、本研究において NDVI の時系列解析からメッシュデータとしての全球作物分類図を作成するものである。

3. 正規化 NDVI

全球の作物分類図及び作物の生育期間を定める農事暦作成の指標として、正規化植生指標 NDVI を用いる

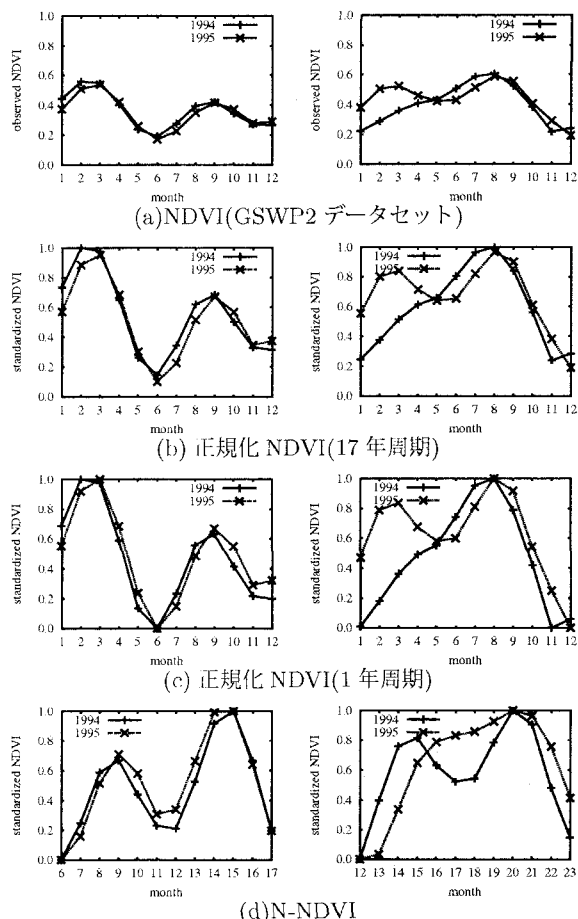


図-1 N-NDVI を作成する流れ (実線は 1994 年, 点線は 1995 年, 左: 73E, 31N, 右: 116E, 33N)

ことを考える。この基本的考えは、等しい作物であれば NDVI の時系列変動は等しく、解析対象期間での各グリッドの作付け作物は一定である、というものである。

(1) 正規化植生指標 NDVI

植物の緑素は太陽光のうち青領域と赤領域の波長の波を吸収し、緑領域の波長の波を反射し、また、近赤外線領域の波長の波を強く反射する。このような植生の特徴を生かして衛星リモートセンシングデータを使い算出される正規化植生指数が NDVI (Normalized Difference Vegetative Index) である。以下にその算出式を示す。

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (1)$$

IR: 近赤外線領域の反射率, R: 可視の赤領域の反射率
ところで、可視・赤外センサは雲の影響を強く受けるため、観測される NDVI が低値になることがある。そこで、雲の影響を除去するために用いられる手法が bise 法¹⁰⁾である。bise 法を用いることにより、修正対象時刻の NDVI 値がその前後の時刻の値と比較して不自然に低い値を示している場合、線形内挿による修正が行われる。

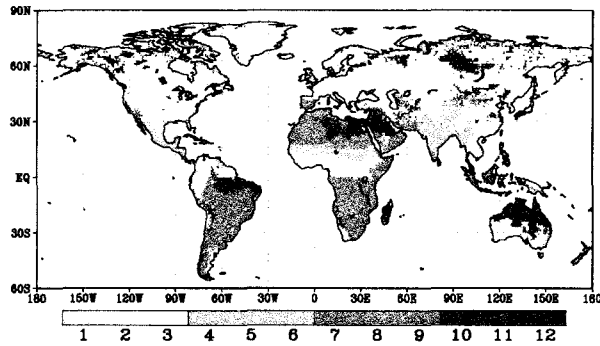


図-2 NDVI 値が最小となる月の分布図

(2) NDVI の正規化

NDVIを活用した指標のひとつに、植生条件指標 (Vegetation Condition Index: VCI) がある¹¹⁾。VCIを用いることで気候変動が植生に与える影響を調べることができる¹²⁾が、本研究では年による気象条件の違いを反映しない植生指標を作成し作物分類を行う必要がある。

また、本研究で用いる NDVI は ISLSCP-II のデータ²⁾であり、1度グリッド毎に月別の気候値が与えられており、この NDVI をそのまま用いると、耕作面積率に応じて NDVI 値の変動範囲が異なり、特に耕作面積率の小さいグリッドでは作物の成長と NDVI 値の変動との対応関係が弱くなることが予想される。そこで NDVI をさらに正規化することを考える。本研究では以下の式を用いて NDVI の正規化を行う。

$$n_NDVI(i) = \frac{NDVI(i) - \min}{\max - \min} \quad (2)$$

$n_NDVI(i)$: 時刻 i の正規化 NDVI, $NDVI(i)$: 時刻 i の NDVI 値, $\min$: 対象期間の NDVI 最小値, $\max$: 対象期間の NDVI 最大値

NDVI を正規化することにより、NDVI の月変動をより明確な形で表すことが可能となる。NDVI は 1982-1998 年の 17 年分のデータが与えられており、17 年を 1 周期と捉え NDVI を正規化することを試みた (図-1(b)) が、特に最大値前後の月で NDVI 値の年変動が顕著に現れることになり、作物分類を行う指標としては扱いにくい。そこで、NDVI を各年で正規化することにする。これにより、NDVI 値の月変動をより明確な形で表すとともに、年変動の影響を受けない指標が得られることとなる (図-1(c))。

ところで、NDVI 値が最小となる月はグリッドにより様々である (図-2)。そこで、本研究では NDVI 値が最小となる月をグリッド毎に求め、その月から 12 ヶ月の NDVI 値を正規化したものを指標として新たに定義する (図-1(d))。すなわち、グリッドにより開始月が異なるというわけである。本研究ではこのようにして定義された指標を N-NDVI と呼ぶことにする。N-NDVI の利点は次の通りである。

- 耕作面積率が小さく、NDVI 値あるいはその変動が小さい地点でも耕作面積率が大きいグリッドと類似した挙動を示しうる。

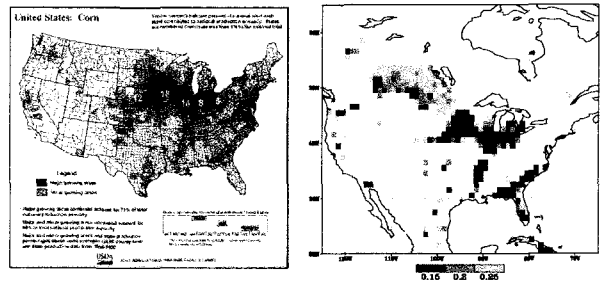


図-3 トウモロコシの作付け分 図-4 最大月の4ヶ月後の N-NDVI 値

- 毎年正規化することにより豊作・不作といった年変動に対応できる。
- 正規化開始月がグリッド毎に異なることにより、作物生育の地域差に対応できる。
- 1年のうち1度は1または0をとる月があり、作物分類の指標として扱いやすい。

NDVI は 1982-1998 年のデータが存在するので N-NDVI は 1982-1997 年までの計 16 年分作成した。

4. 全球作物分類図の作成

(1) 作物分類基準

本研究では、各グリッドにおける作付け作物を小麦 (春小麦・冬小麦)、トウモロコシ、米の3種類に分類する。まず、耕作面積率が90%以上の代表グリッドをいくつか設定し、そこでの作付け作物を Major World Crop Areas and Climatic Profiles⁹⁾から類推する (例 図-3)。次に、あるグリッドにおいて、正規化 NDVI 値の変動がある代表グリッドと類似している時、作付け作物はその代表グリッドと等しいものとする。本研究では、作物分類図が Major World Crop Areas and Climatic Profiles と等しくなるよう作物判定を行った。例えばトウモロコシであれば、図-3 から北部にはあまり分布していないので、最大月の4ヶ月後の値に着目すれば (図-4)、0.20 を上回ることはないと判断する。このようにして、以下のグリッドをトウモロコシと判定した。

- 最大月の4ヶ月前に 0.36 を上回らない。
- 最大月の4ヵ月後に 0.19 を上回らない。
- 最大月の3ヵ月前が最大月の3ヵ月後を上回る。
- 0.22 を下回る月が6ヶ月以下である。

同様に、以下の基準に従うグリッドを米と判定した。

- 最大月の4ヶ月前に 0.36 を上回る。
- 0.73 を上回る月が6ヶ月以上ある。
- 10月において 0.7 を上回る。

最後にトウモロコシとも米とも判定されなかったグリッドについては、基本的には春小麦であると考え、以下のような分類を行った。

- 春小麦である。
- 4月において 0.5 を上回れば冬小麦である。
- 4月において 0.5 を上回らず、10月において 0.7 を上回れば米である。

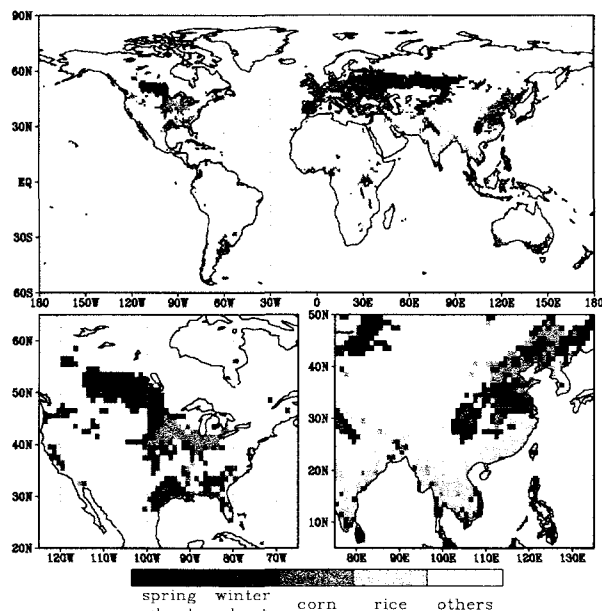


図-5 耕作面積率 10%以上のグリッドでの作付け作物(上: 全球, 左下: 北アメリカ, 右下: 東アジア)

N-NDVI は 16 年分作成しているのので, 以上のような判定を 16 回行い, もっとも判定回数の多かった作物がそのグリッドにおける作物であると判断する。

(2) 水田面積率の考慮

GSWP2 データセットの土地利用区分には水田の項目が存在しなかったため, 本研究では Olson global ecosystem¹³⁾による水田面積率を導入した(図-9(a)). そこで, 上述の作物分類を行った後, 米と分類されるグリッドが水田面積率の高いグリッドと対応するよう補正を行う。すなわち, 水田面積率が畑地面積率よりも高いグリッドを対象とし, 非対象グリッドでは米と判定した場合はその他の作物に置き換えるものとする。

本研究では, 以上のように水田面積率による補正を行った後, 16 回行った判定でもっとも判定回数の多かった作物をそのグリッドにおける作物であると判断する。判定回数が等しい場合は, GSWP2 の計算期間である 1983-1995 年の判定回数が多い作物が優位であるとした。さらに判定回数が同数のグリッドについては, 解析対象期間の 1986-1995 年の判定回数で判断し, さらに同数のグリッドについては 1986-1989 年の判定回数で判断した。なお, この 4 度の判定によって判定回数が同数のグリッドは存在しなくなった。

(3) 全球作物分類図

以上のようにして作成された全球作物分類図を図-5 に示す。ただし, 小麦, トウモロコシ, 米のいずれにも判定されなかったグリッドでは, それ以外の作物が作付けされていると判断している。同図では, 耕作面積率が 10%以上のグリッドに関して色分けを行っている。

5. 農事暦の作成

各グリッドにおいて作物の生育期間を推定する。まず月単位での生育期間を以下のような考えに基づき推定する。

- N-NDVI 値が 0.3 以上になれば生育期間が始まったとみなす。
- N-NDVI 値が 0.65 を下回れば生育期間の終了とする。
- ただし, N-NDVI 値が 1ヶ月だけ 0.65 を下回り, 翌月には 0.65 以上の値となるとときには生育期間が続行している。すなわち単なる変動であると判断する。
- また, N-NDVI 値が 1度 0.65 を下回り, 2ヶ月以上の期間を経て 0.3 を下回ることなく再び 0.65 以上の値をとるときは, 生育期間の始まりとみなす。

NDVI は各月の中間値が与えられているので, N-NDVI を線形内挿することにより日単位のデータとし, 生育期間の開始日と終了日を定めた。すなわち, 月単位データを用いて大まかに生育期間を定め, それに基づいて日単位データを活用して生育期間(生育日数)を定めるものである。

推定された生育期間と表-1 を用いることにより, 各作物の生育段階及びその生育期間の日付を定めることができ, ここに農事暦が作成された。

6. 結果と考察

(1) 作物分類の精度検証

本研究において作成した作物分類図の精度検証のため, (式 5) から各グリッドの面積を求め, 各作物の耕作面積を算出し, FAOSTAT の統計データ(1986-1995 年の平均)と比較した(表-2)。小麦は大幅に過大評価であるが, これは作物分類の際に, トウモロコシと米以外は基本的に春小麦であると考えたためにライ麦や大麦等も小麦として判定したことが原因と考えられる。トウモロコシと米に関しては, やや過小評価気味ではあるが概ね統計データと一致する。

$$x(i) = \frac{2\pi \times 6378.140}{360} \cos(\text{lat}(i)) \quad (3)$$

$$y(i) = \frac{2\pi \times 6356.755}{360} \quad (4)$$

$$A(i) = x(i)y(i) \quad (5)$$

$\text{lat}(i)$: グリッド i における緯度, $x(i)$: グリッド i における平均東西距離, $y(i)$: 各グリッドにおける平均南北距離, $A(i)$: グリッド i の面積

(2) インプットデータセットの精度検証

二期作であることが明らかである中国淮河流域のグリッド¹⁴⁾において, 二期作と判定されることがなかったため, 次に, GSWP データセットの NDVI 値の精度検証を試みた。そこで, NOAA の 1998 年の NDVI 時

表-2 作付け面積の比較 (単位: 10⁶ ha)

作物	本研究の分類	FAOSTAT
小麦	840.1	222.4
トウモロコシ	96.0	133.2
米	116.0	146.3
穀物総計	1052.1	702.6
農地総計	1480.0	1504.4

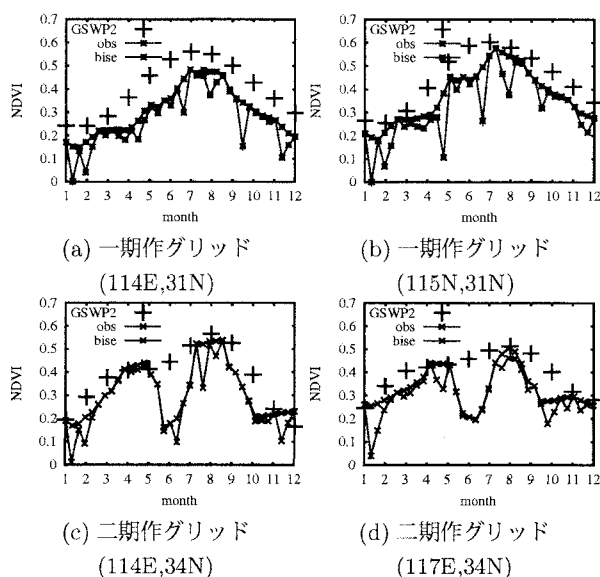


図-6 GSWP2 データセットと NOAA の NDVI 比較 (+印: GSWP2, 実線: NOAA, 点線: NOAA に bise 法を施した値)

系列データと、GSWP2 データセットの NDVI との比較を行った。NOAA のデータは 30 秒メッシュ、すなわち約 1km メッシュで与えられていたため、平均を取って 1 度グリッドのデータとし GSWP2 のデータと比較した。図-6 において、+印が GSWP2 データセットの 1998 年における NDVI 値、実線が NOAA による観測値、点線が bise 法による補正をした値をそれぞれ示している。同図において、(a), (b) は一期作グリッド、(c), (d) は二期作グリッドである。同図 (a), (b) によると、GSWP2 データセットが若干高い値を示しうることが見てとれるがその月変動のトレンドには類似性が見受けられる。ところが、同図 (c), (d) の観測値及び bise 補正値において 6 月頃に見られるような顕著な値の落ち込みは、GSWP2 データセットでは確認できない。このことから両者には明瞭な差異が認められるということがわかる。このような違いが確認される原因としては以下の事由が考えられる。

- ・ 転作期が 1ヶ月程度、あるいはそれ以下であった場合、GSWP2 データセットは月別の気候値であるので NDVI の落ち込みを捉えることは困難であるが、NOAA は 10 日毎のデータであるので転作期の NDVI の落ち込みをより確実に捕らえること

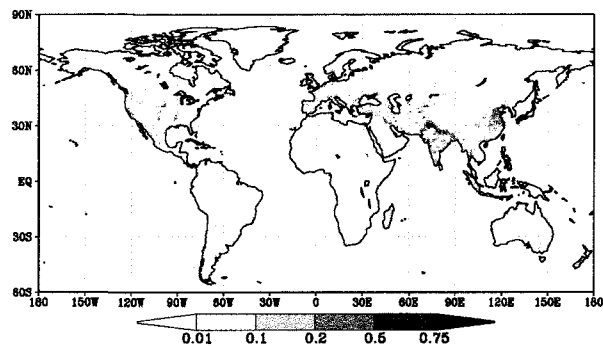


図-7 灌漑面積率

ができる。

- ・ GSWP2 データセットは 1 度グリッド (約 120km) のデータであり解像度が低い、NOAA のデータセットは約 1km メッシュであり高解像度である。
- ・ GSWP2 データセットは様々なアルゴリズム³⁾⁴⁾を利用した補正を行っており、その結果転作期による NDVI の落ち込みに対して補正がなされた。
- ・ NDVI は衛星データから得られる指標であるので、雲による影響を考慮した補正を行う。このとき、転作期による NDVI の落ち込みを雲による影響と判断し補正が行われた。

すなわち、GSWP2 データセットは 1 度グリッドで月別データであるので、その期間が短い転作期を明瞭に NDVI 時系列に反映させることは困難であったと判断する。今後、より詳細な時空間分解能を保持したデータが得られれば、本研究における作物分類の更なる精度向上が期待される。

7. 全球モデル計算に向けて

本研究において作成した作物分類図並びに農事暦は、灌漑を考慮に入れたモデル計算を実施するために独自に推定したものである。各グリッドにおける農地面積率は GSWP2 データセットにより既知であるが、各グリッドにおける灌漑実施面積率は求められていない。そこで、本研究では Doll ら¹⁵⁾により推定された灌漑面積率を参考に、Doll らにより推定された灌漑地の面積率は 10km メッシュで求められているため、1 度グリッドに平均化して用いる。図-7 に 1 度グリッドに均した灌漑地の面積率を示す。本研究における灌漑実施面積率は以下の式に従って求められる。

$$P_t = P_i + P_n \quad (6)$$

$$F_t = F_i + F_n \quad (7)$$

$$irr \geq P_i + F_i \quad (8)$$

P : 水田の面積率, F : 畑地の面積率, irr : 灌漑実施面積率

ただし、 i, n, t はそれぞれ灌漑実施、非灌漑実施、これらの和を意味する。ここで、(式 8) の P_i, F_i を算出するにあたり、水田の灌漑実施面積率のほうが畑地の灌

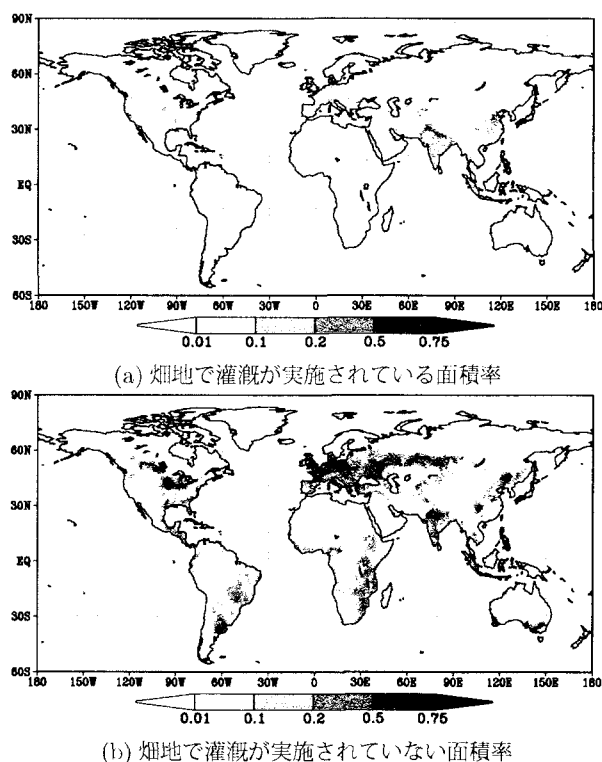


図-8 畑地での灌漑の有無

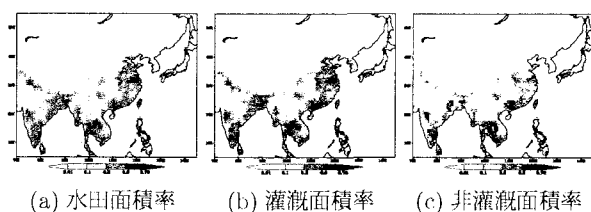


図-9 水田での灌漑の有無

漑実施面積率よりも優先的であるとした。また、非灌漑水田においては10cmまでの貯水のみを考慮に入れてモデル計算を行うものとする。このようにして算定された水田、畑地の灌漑、非灌漑の面積率をそれぞれ図-8に示す。

この結果、全球1度グリッドの灌漑が実施されている面積率、作付け作物、生育期間と生育段階、そして各生育段階で作物が維持すべき最低水量が得られた。このことから、陸面過程モデルSiBUCによる灌漑を考慮した全球モデル計算が可能となり、算定される土壌水分量の精度向上が望まれる。

謝辞：本研究は科学研究費基盤(B)「十年にわたる全球陸面エネルギー水収支データセットの構築とその検証解析」(代表 沖大幹)の補助を得ました。この場を借りまして感謝致します。

参考文献

- 1) P.Dirmeyer, X.Gao, T.Oki: The second global soil wetness project (GSWP-2) science and implementa-

tion plan, IGPO Publication Series No.37, 2002.

- 2) Hall, F.G., B.Meeson, S.Los, L.Steyaert, E.Brown de Colstoun, D.Landis, eds.ISLSCP Initiative II. NASA. DVD/CD-ROM.NASA, 2004.
- 3) P.Dirmeyer, L.Tan: A Multi-Decadal Global Land-Surface Data Set of State Variables and Fluxes, COLA Technical Report 102, 2001.
- 4) M.Zhao, P.Dirmeyer: Production and Analysis of GSWP-2 Near-Surface Meteorology Data Sets, COLA Technical Report 159, pp.38, 2003.
- 5) 花崎直太, 沖大幹, 喜連川優, 生駒栄司, 鼎信次郎: GSWP2 データを利用した全球陸域水収支の推定(速報), 水文・水資源学会 2004 年研究発表会要旨集, pp.66-67, 2004.
- 6) 田中賢治, 池淵周一: 都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, 京都大学防災研究所年報, 第 37 号 B-2, pp.299-313, 1994.
- 7) 林祐樹, 田中賢治, 椎葉充晴: 陸面過程モデル SiB2 をベースとした水田モデルの構築, 土木学会関西支部年次学術講演会, II-24, 2000.
- 8) 除玉民, 郭国双: 中国主要作物需水量与灌溉, 水利電力出版社, 1995.
- 9) Major World Crop Areas and Climatic Profiles, Joint Agricultural Weather Facility, World Agricultural Outlook Board, U.S. Department of Agriculture Agricultural Handbook, No.664, 1994.
- 10) N.Viovy, O.Arino: The best index slope extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time series, Int.J.Remote Sensing, Vol.13, No.8, pp.1585-1590, 1992.
- 11) L.S.Unganai, F.N.Kogan:Drought Monitoring and corn yield estimation in southern africa from AVHRR data, Remote Sensing of Environment, 63, 219-232, 1998.
- 12) A.Wannebo, C.Rosenzweig, Remote sensing of US cornbelt areas sensitive to the El Nino-Southern Oscillation, INT.J.Remote sensing, vol.24, No.10, 2055-2067, 2003.
- 13) Olson.J.S.: Global ecosystem framework-definitions: USGS EROS Data Center Internal Report, Sioux Falls, SD, 37p, 1994.
- 14) 甲山治・田中賢治・池淵周一: 多様な農耕地の影響を考慮した中国淮河流域における水・熱収支推定に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号 B, pp.745-764, 2002.
- 15) S.Siebert, P.Doll, J.Hoogeveen: Global map of irrigated areas version 2.1, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany / Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2002.

(2004.9.30 受付)