

水資源制約時代における中国・インド の穀物生産量モニタリング法の提案

金子大二郎¹・大西政夫²

¹正会員 博(工) 松江工業高等専門学校教授 土木工学科
(〒690-8518 松江市西生馬町14-4)

² 博(農) 島根大学生物資源科学部
生物資源教育研究センター
(〒690-1102 松江市上本庄町2059)

本研究は、中国・インドの巨大な人口増問題と新たな水資源制約時代を背景に、現代における穀物需給の体制上の問題点と水資源不足の視点から、穀物生産量の監視について、現在の気温中心のモデルを発展させた光合成型のモニタリング法が必要であることを説いている。人口の巨大な両国における水制約の条件下では、従来からの有効積算気温や植生現存量ばかりでなく、日射と作物の水ストレスをも考慮した穀物生産指標を新たに開発することが必要である。本論文は、世界気象データと衛星による植生指標を用い、日射・有効気温・植生現存量・気孔開度を考慮した光合成型の穀物生産指標をモデル化し、水資源不足時代における穀物生産量を早期に監視する方法を提案している。小麦・米・トウモロコシ等の穀物生産量の中で水稻を研究対象として最も重視する。その理由は、水稻は食糧問題の中で単位面積当たりの収穫量が小麦より高いことから人口扶養力が大きく、また、水資源を最も多く必要とし、水配分の視点から重要な作物となっているからである。

Key Words: crop production, monitoring, Remote Sensing, World Weather Data, photosynthetic production index, water stress

1. はじめに

地球温暖化という大気環境容量問題の次に、世界の環境制約の一つとして淡水の水資源問題が顕在化してきている。水資源の視点から現われた特異な現象は、灌漑河川における流量の異常な減少であり、或いは取水による地下水位の継続する低下である。穀物生産量の面で世界の穀物需給に極めて影響の大きい中国・インド・米国について、非持続的な灌漑に対する懸念が指摘され、世界銀行¹⁾や地球白書で知られたWorldwatch Institute²⁾等の機関あるいは世界水フォーラム³⁾の会議の場で水資源利用の現状が警告されてきた。これらの問題は現代の地球環境問題の一つであり、その背景には、60億にまで急増した地球上の人口問題が根底にある。この人口の急増がもたらす灌漑水と都市用水の需要増による水資源の不足が、穀物生産の制約と需給問題の監視のための必須の要因となって来ている。

本研究の目的は、この人口増と水資源制約時代に対応し穀物生産量を予測的にモニタリングする方法の技術開発をしようとするものである。水資源不足の時代における穀物生産量と需給の問題に、作物の水ストレスの観点から穀物生産量を早期にモニタリングし、中国やインドの穀物不作が周辺アジアにもたらす穀物価格の高騰という経済的影響の視点と、穀物自給率の低い我が国の食糧安全保障の視点から、経済的・社会的混乱に対する我が国の内政・外交政策としての危機管理・混乱緩和の意義を持っている。なお、この穀物監視は、いずれ社会的要請を背景に特定組織による定常的な業務に発展させ、問題に対処するのが適切であると提案する。

2. 水資源制約からみた穀物モニタリングの 提案の背景と必要性

(1) 中国・インドの穀物生産量と世界の穀物

貿易の現状と問題点

人口と穀物需給に対する危機管理の視点から重要な中国とインドの穀物生産量を図-1に示した。中国の米穀の生産量は2000年で18,980万トン⁹⁾であり、小麦やトウモロコシに比較し約2倍の巨大な生産量を持ち、中国の人口を扶養している主たる穀物である。インドにおいても米穀が小麦の2倍弱の生産量があり、人口の増大と共に1980年の8,030万トンから2001年の13,190万トンに生産量も急増している。中国の小麦・トウモロコシは米穀のほぼ半分の生産量で推移している。近年における中国の米穀の生産量は、1980年の14,280万トンから1998年の20,270万トンまで次第に増加してきたが、近年の工業化による作付面積の減少⁹⁾と生産意欲の低下⁹⁾と共に、生産量がやや減少傾向である。このように中国・インドにおいて米穀が人口を支える卓越的な穀物となっていることを確認できる。この生産量と凶作の年に生じる緊急輸入の必要性を念頭に、米穀の供給能力と価格に注目する。世界の穀物市場の中で米穀の主たる輸出国であるタイの輸出量と、小麦とトウモロコシの大輸出国である米国の輸出量を図-2に示した。トウモロコシの輸出量が例えば2000年で4,797万トン⁹⁾と最も多く、次いで同じく2000年について小麦の2,783万トンに対し、最大の米穀の輸出国であるタイでも同じ年に614万トンと米穀の貿易量が少ない。小麦やトウモロコシと異なり、米作が自給用中心であることが良く知られている通りである。このように作物の中で水稻を最も重視する一つの理由は次の背景による。水稻の生産量が多いにも拘わらず、主として自給用であり、図-1と2から分かるように世界的水稻生産量に対して輸出入取扱量が5パーセント以下と少ない。また、小麦の取扱量の1/5の値である。そのため、水稻の凶作は、世界の穀物価格の混乱要因となる。水稻の国際価格について、最大の輸出国であるタイの価格により図-3に示した。図中に米国の小麦とトウモロコシの輸出価格を同時に示すことによって、米穀の価格が他の穀物の約2倍と高価であることが分かる。日本の不作による288万トン⁷⁾の輸入の際に、タイの米価格は1トン当たり220\$から420\$⁷⁾に半年かけて高騰し、輸入が途絶えると275\$に下がり、約1年のあいだ乱高下した。この事実は、米の貿易取扱量が小さいために供給能力が乏しい上述の特徴を示している。また、水稻は単位面積当たりの収穫量が小麦より高く、人口扶養力が大きいのであるが、水配分の面で小麦1トンに対する仮想水量1000トンに比較し約3~4倍⁸⁾の水資源需要となっている。水田は湿潤面であることからPenman蒸発位となり、水稻と共に蒸発散量が大きい。また地下への浸透により水資源制約の時代には水配分の視点から更に重要な作物となっている。

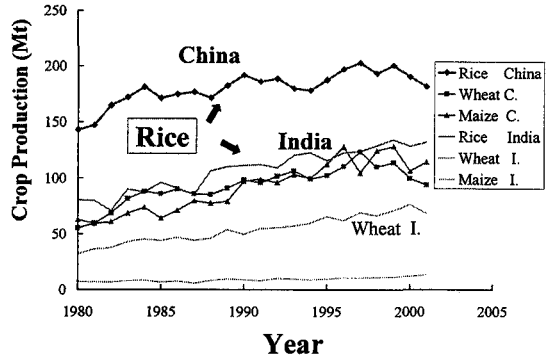


図-1 中国・インドの水稻と穀物生産量の比較

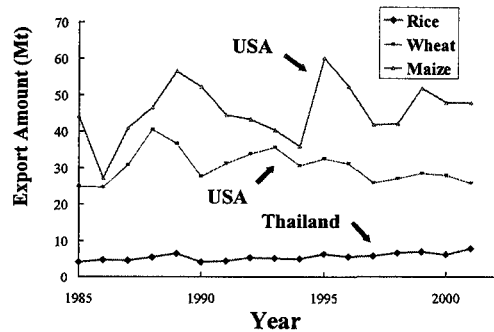


図-2 主要生産国の穀物貿易量

(2) 気象年々変動と我が国の穀物需給の問題点

1) 凶作と気象変動発生メカニズム

凶作災害を引き起こす毎年の気象変動は、モンスーンの南北位置の変化や降雨の開始時期の変動によるメカニズムによって確率的に起こり得る。このため、生産量は年々変動し数年から10数年程度には大きな不作となる確率的性質を持っている。現在、穀物は世界平均的に豊作であり、価格が下がっている。

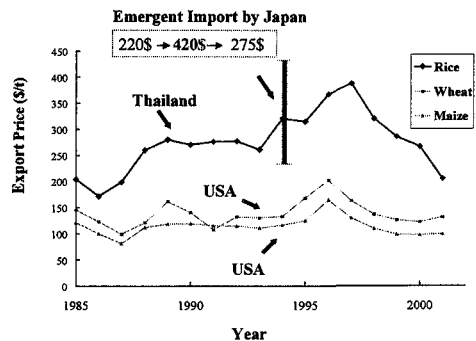


図-3 主要国の穀物貿易価格

しかし、この状況も気候が良好である確率の要因を含んでいる。

2) 我が国の穀物需給の問題点

日本の平成12年度における食料自給率は、熱量総合食料自給率で40%⁹⁾、重量ベースによる主食用穀物自給率で60%、飼料を含む穀物全体の重量ベースの穀物自給率で28パーセントと、先進諸国の中で最低となっており、食糧安全保障が議論されている。穀物自給率が低く穀物価格高騰の影響を受けやすい我が国にとって、中国・インドにおける穀物生産量に対する早期監視は、穀物確保の観点から重要となっている。

(3) 水資源と危機管理上の社会的問題点

1) 人口増加と水資源需要

穀物需給に懸念を生じる背景には、世界人口の急増による淡水容量という水資源の新たな制約があり、水資源需要の中で灌漑が最大の利用分野である事情がある。また、研究対象とする米・小麦・トウモロコシの穀物の中で水稻を特に重視する理由は、水稻の水需要が多いこと、および人口扶養力が大きく多くの人々が依存している作物であるためである。

2) 近年の気候変動の傾向

近年、我国においても年降水量の低下傾向が明白であり、西暦2000年までの100年間に約80mm低下¹⁾してきている。また、温暖化の進行と共に多雨と少雨の変動幅が増大し、豪雨災害や早魃が生じやすい気候型となっている。

3) 灌漑の拡大と利水安全度

灌漑の進展は穀物生産量の増加をもたらし、軽易な水不足に対処することができる。しかし、計画規模を上回る異常気象時には、渇水被害が拡大するという水資源工学上の利水安全度の問題がある。長江からの導水と灌漑は大いに有効であるが、この利水安全度により、いったん早魃被害を出すと大災害となる性質を持っている。

以上の社会的問題と必要性から、国連のFood and Agriculture Organization (FAO)¹⁰⁾や同じく国連UNEPのDEWA Earthwatch¹¹⁾による早期警戒システムがある。しかし、気温・降雨を中心とした気象条件による記述であって、本論文で記述するようなモデリングによる定量的な現況追跡となっていない。

(4) 穀物需給の危機管理と社会的問題点

1) 凶作への備蓄対応が困難

穀物備蓄は倉庫費用ばかりでなく品質の劣化により食味が劣り、古米となって価格低下することから、民間による穀物備蓄が困難である。また、人間にとって一定量の穀物が常に必須であり、短期的な大量摂取や継続不摂取による忍耐は本来的に困難な性質を持っている。

2) 価格の高騰と社会的混乱

上記の背景から、豊作時の価格暴落、凶作による

価格高騰の傾向を持つ。凶作時には富裕者の生存のために際限なく高騰する傾向を持ち、貧しい者・弱者に被害が拡大する。ある限界を超える凶作年には、穀物需給の問題から経済原理を越えた飢餓となり、無法・暴動等の法秩序を越えた社会的混乱となり、人道の問題となる。一旦大規模な飢饉が発生すると有効な対策が無く、国力や体制によっては大勢の餓死を生じ、赤十字や国際人道援助には費用・輸送等に限界があつて、深刻な事態となる。

3) 国家の穀物取引と補償・救済体制の問題点

1972年のソ連の小麦凶作や1984年の中国によるトウモロコシの輸入例のように、通常、凶作国は不作情報が漏れることによって国際穀物価格が高騰するのを恐れ、極秘による国家的な大量の穀物取引を分散注文し、突然に輸入する。その結果、購入後に注文国と凶作の事実が知られ国際穀物価格が高騰する。穀物価格の高騰と品不足は、周辺国に経済的・社会的被害が及ぶ性質を持っている。しかし、それによって生じた被害を償う保険体制が無い。また、災害発生国は通常、他国への影響や損害補償を考える政策的経済的な余裕が無く、補償することは無い。従って、周辺国が因果関係を放置すると一方的な被害を蒙り、国家的人災の傾向が生じる。

4) 早期監視の必要性

これらの性質から、周囲の国々の穀物事情と自国の穀物需給を考慮し、食糧政策・社会政策に関わる早期監視の対策が必要であり、混乱緩和のための危機管理の対策が重要である。

3. 穀物生産のモニタリング方法

(1) 従来の穀物生産の監視方法

穀物生産に関する従来の研究は、近代の社会的要請を背景に既に多くの歴史的とも言える研究がある。穀物生産のモニタリングに関する論文は、米国を中心にAgronomy Journalに代表される作物学や農業気象・計測の分野で夥しいほど発表されて来た^{12), 13), 14)}。しかし、研究の対象は大生産国である米国であるか小麦とトウモロコシであつて^{12), 15)}、世界の人口問題上で重要な中国やインドの広域的な穀物生産のモニタリングの研究は、中国のGao et al.¹⁶⁾のみである。また、インドについては水稻や小麦の生産量と衛星データとの相関による生産量推定である^{17), 18)}。

なお、早期監視の研究方法には穀物生産力というポテンシャルを取り扱う静的取り組み^{19), 20)}と、本研究の様に日々の気象変化に対する生育と穀物生産量の動的追跡¹⁰⁾をする方法との二種類がある。穀物生産量の監視のためには、単位面積当たり生産量(Yield)のほかに作付面積を考慮した穀物生産量(Production)が必要なため、作物の作付面積の経年変化を追跡することも早期監視の重要な研究対象

となっている^{5), 21), 22), 23)}。或いは、穀物需給のために、人口や所得水準による穀物需要の変化の視点も必要となる²⁴⁾。

前述の衛星データを用いたモニタリングでは、可視・赤外リモートセンシングによる種々の植生指標が表している物理量は、作物の現存量に係わる量であって穀物生産量ではない。水資源制約から水ストレスを受ける場合には、リモートセンシングにより穀物量自体を直接に計測する事は、スペクトルの考えを取り入れたとしても植生指標のみでは穀物生産量を表しがたい。

従来の作物学の分野における多くの研究は、気温による成長指標GDD^{12), 25)}

$$GDD = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} - T_b \quad (1)$$

ここに、 $T_{\max}$: 日最高気温、 $T_{\min}$: 日最低気温
 T_b : 下限有効気温

または、水ストレス指標 (SDD, CWSI) と穀物生産量との関係を求めてきた^{12), 14)}。

$$CWSI = 1 - \frac{E_{ac}}{E_p} \quad (2)$$

ここに、 E_{ac} : 実蒸発散量、
 E_p : 可能 (Potential) 蒸発散量

$$SDD = T_c - T_a \quad (3)$$

ここに、 T_c : 作物の葉温、 T_a : 気温、

次に、リモートセンシングによる従来の研究では、作物の現存量に係わる植生指標NDVI^{13), 26), 27), 28)}か、或いは植生指標と光合成有効放射PARとの関数によって穀物生産量を推定してきた²⁹⁾。

これらの要因の中で植生現存量 (NDVIにより表示) に表れにくく日々変動する要因は、日射と気孔開度である。作物学の分野では日射の代わりに気温を用い、そして水ストレス (蒸散抑制) という二つの要因を考慮している場合が多い。最近のリモートセンシングを用いた穀物生産予知の研究では、光合成有効放射PARと植生現存量 (NDVI) が日々の積算値として考慮されている。Rasmussen²⁹⁾は積算NDVIとしてiNDVIを定義し、穀物生産量と関係づけた。

$$Yield = a \cdot \int_{t_1}^{t_2} NDVI(t) dt + b \quad (4)$$

ここに、 a , b : 回帰係数、

t_1 , t_2 : 積算開始日、終了日

更にRasmussen³⁰⁾による衛星を利用した純一次生産量NPPの推定式は次式で表される。このNPPは光合成型である。

$$NPP = \varepsilon \int (aNDVI + b) \cdot PAR \cdot dt \quad (5)$$

ここに、 ε : 効率係数、 t : 時間、

PAR: 光合成有効放射

ただし、この式形では気温による作物の不稔と気孔開度が考慮されていない。

本研究の場合には更にモデル化を進め、日射・気温・気孔開度・植生現存量を考慮した光合成型の穀物生産指標の開発となっている。これまでに世界最大の穀物輸出国である米国において、穀物需給の要請に応えた種々の穀物生産量推定の研究が進められて来た。特に小麦とトウモロコシについて、作物学の分野とリモートセンシングの分野に多数の研究がある。しかし、いずれも水ストレスのみか植生指標中心のモデルである。より正確な穀物生産量の推定のためには、作物の成長と穀物の登熟を表す光合成速度についてモデル化した形式の穀物生産指標によって生産量との関係を表すべきである。

(2) 新しい光合成型穀物生産指標

1) モデルの考え方

本研究の目指す最終目的は前述のように水資源不足時代における中国・インドの穀物生産量の問題に対し、作物の水ストレスの視点から必要となってきた光合成型の穀物生産指標によって、両国の穀物生産量を早期監視することである。作物が不作となる原因には様々な要因がある。一般に、穀物生産量の変動は、病虫害の場合を除き、基本的に日射不足 (従来の多くの研究の視場、日射量の観測が簡単ではないこと、および日射不足は気温を低下させることから日射量を気温によって代用させてきた^{12), 20), 26)})、または、降雨不足・灌漑不足による水ストレス、そして肥料不足が主たる原因と考えられる。言い換えれば、作物の成長と穀物生産の源となる光合成を推定するためには、日射の他に作物の気孔からの蒸散を適切に考慮する必要がある。次に、穀物生産量の推定は基本的に光合成速度の積分値に依存し、その光合成は日射と作物現存量の他に気孔開度に依存すると考える。なお、作物が生育したとしても不稔温度と高温障害という植物生理学的要素があるため、穀物生産指標の中に光合成の他に収穫・登熟のための気温障害の要因も取り入れねばならない。

地球温暖化を背景に、穀物生産量におよぼすCO₂濃度の影響も光合成関連で作物学の分野に多くの研究例がある^{31), 32)}。しかし、穀物生産の現況追跡の場合には、その監視の前後には大気中に供給量が十分あるとして不変とし、CO₂濃度の影響は穀物生産指標中に考慮しない。また、肥料の効果は植生現存量を表す植生指標NDVIに反映されるとする。同様に、病虫害はNDVIに現われるとして無視する。その結果、穀物生産に係わる光合成速度は、日射と水ストレスと植生現存量そして低温不稔・高温障害を表す温度障害項とによって表わすことができるとし、モデル化した。

2) 光合成型穀物生産指標による穀物生産のモニタリング方法

光合成速度は、基本的に上述の日射と気孔開度そして植生現存量に依存する。従って、作物がどれほど茂っているかを植生指標によって表わす一方、気象分野のSiBモデル³³⁾のように土壌水分と気象条件に対して気孔開度 β_s をモデル化する必要がある。しかし、土壌水分の推定は長年にわたり研究されて来ているが、植生のある地表面についての合理的な推定は容易でない。

そこで、気孔開度を以下の二つの方法により計測する。気孔が閉じて蒸散が抑制されると潜熱が減少することから、植生の気孔開度は通常、水ストレスを受けていない湿潤な場合の葉温に対する葉の温度上昇によって計測されてきた³⁴⁾。

蒸散は、気孔の内側の葉温における飽和比湿と気孔の外側の大気比湿との差である葉温飽差に比例するからである。水ストレスが加わると、葉の組織中に存在する水分の減少によって、葉面の持つ分光反射率特性が変化する³⁵⁾。強度にストレスが作用し続ければ近赤外の植生指標NDVIの減少となって、水ストレスの影響が現われる。しかし、背景条件である土壌が分光反射率特性におよぼす影響の方が水ストレスよりも大きい。そこで、水による吸収効果の影響が分光反射率特性に現われやすい赤外の波長の中で、熱赤外ではなく、もう一つの短波長赤外に注目する。短波長赤外には、大気中の水蒸気による顕著な吸収帯が $1.4\mu\text{m}$ と $2.9\mu\text{m}$ 付近の2ヶ所にある。この隣接域である $1.6\mu\text{m}$ と $2.2\mu\text{m}$ 付近に存在する分光透過率の高い大気の窓では、水分によって反射率が相当に変化する性質を水ストレスの指標として利用する。水田の稲に短波長赤外リモートセンシングを適用した場合にも、稲と土壌の近赤外帯における反射率の相違によって、水ストレスの影響よりも土壌の影響が顕著となるため、水田が水面であるか、次に土壌水分がどの程度ふくまれているかを計測する。その際、水田の植生指標も同時に計測することにより、植生指標が大きい場合には土壌の影響が減少し、水ストレスによる葉面からの反射率が増大することを実験的に確認し、水ストレス指標を開発する。更に水ストレスが進行すると短波長赤外ばかりでなく、葉が黄ばむことにより植生指標が減少しはじめる。本研究では葉温のための熱赤外と、短波長赤外の分光反射率特性および植生指標の三要因によって水ストレスを計測しようとしている。この波長はMODISの波長帯に対応しており、衛星を用いた気孔開度の遠隔計測を目指している。

農学の作物学分野において水ストレスを表す方法は、一般に降水量の多寡を追跡すること、そして定量的には穀物水ストレス指標 ($\text{CWSI}=1-E_{ac}/E_p$) を定義する方式である。この方法により水ストレスと

Distribution of Observation Sites
for World Weather

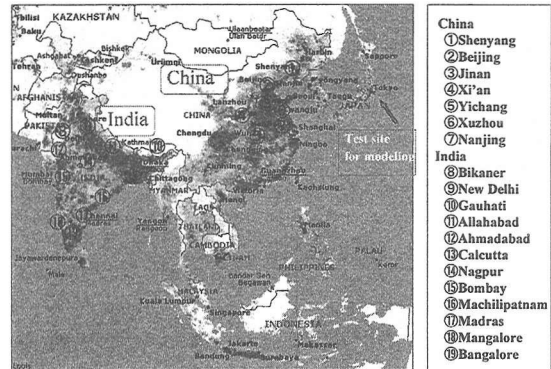


図-4 世界気象観測点による監視地点分布

穀物生産量との関係を求めている^{12), 14), 15), 36)}。しかし、水ストレスを定義するための実蒸発散量の推定が簡単ではない。そこで、本研究では水ストレスを計測し、光合成の推定法へ改良したモニタリング法の開発を目指している^{37), 38), 39)}。最終的に日射・気温・気孔開度・植生現存量を考慮した光合成の式形は、Rasmussenによる式(5)のモデリングを進展させ、式(6)によって光合成速度を定義する。

$$PSN = \frac{a \cdot APAR}{b + APAR} \cdot f_{ster}(T_c) \cdot \beta_s \cdot eLAI \quad (6)$$

ここに PSN : 光合成速度
 $APAR$: 吸収光合成有効放射
 β_s : 気孔開度,
 a, b : Michaelis-Menten 定数
 T_c : 葉温
 $eLAI$: 有効葉面積指数
 f_{ster} : 不稔の温度応答関数⁴⁰⁾

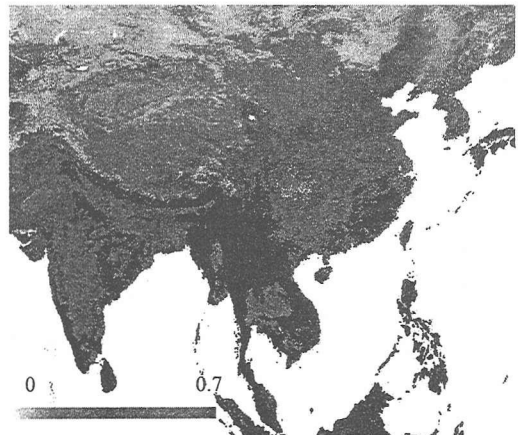
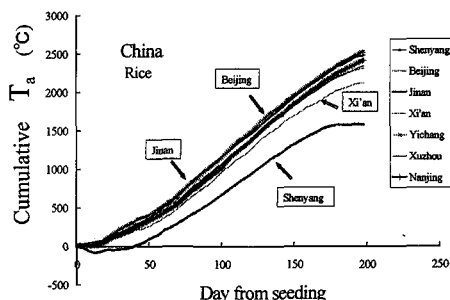
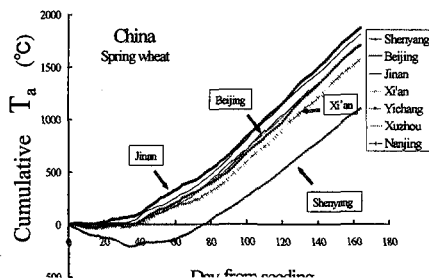


図-5 アジアの植生指標分布



a) 水稻



b) 春小麦

図-6 中国における積算有効気温

積算型の光合成型穀物生産指標CPIは播種 t_s から収穫 t_h までの期間について次式により定義する。

$$CPI = \int_{t_s}^{t_h} PSN \cdot dt \quad (7)$$

作物の生長を含む従来からの穀物シミュレーションについては数多くの研究例^{(41), (42)}があり、かつリモートセンシングを取り入れた研究が発表されている^{(43), (44)}。しかし、モデルの複雑化による透明性が問題となりメカニズムを表す簡明さが求められている^{(45), (46)}。このシミュレーションに代わって穀物植生の成長をリモートセンシングによって測定することにより、生育量は既知として光合成量を推定し、穀物生産量の現況追跡をする。その結果、穀物生産量の推定を容易にし、データの不十分な海外の地域でも適用可能な衛星による監視法の技術開発をする。現在、日射・気温・植生現存量の要因までをモデリングした。提案した方法は、従来の有効気温による方法と比較し、穀物生産量の作況を分離・識別する能力が高まっている。作物の光合成に関わる天候上の基本要因を考慮しているためである。なお、作況ばかりでなく生産量の監視のためには土地利用と作付面積の判別が別途に必要となる。また、温度影響の関数形については、別途に参考文献⁽⁴⁰⁾に詳しく示している。

4. 使用データ

(1) 世界気象データの特徴と雲量

穀物需給の動向である穀物輸送・消費に重要な中国・インドの人口密度分布をMicrosoftのENCARTAによって背景に示しながら、世界気象データの観測地点の分布を図-4に示した。枠に囲まれた地名が、本研究において穀物生産指標に気象データを用いた地点である。穀物生産指標に世

界気象データを用いるのは下記の理由による。光合成速度を推定するためには、日々の変動する日射量と気温のデータを必要とする。従って、使用するデータは世界のルーチン観測の気象データである必要がある。そのため世界の天気予報にリアルタイムで定常的に観測されている世界気象データが最も適切となる。対象とした監視点は、中国が7地点、インドは13地点である。これらの地点について穀物生産のための気温と日射の推定に必要な雲量、および検証用の全日射量を収集した。

(2) 衛星データによる植生指標

使用した衛星データは、建石によるNOAA AVHRRから得られた植生指標データセット⁽⁴⁷⁾であり、アジア地域について図-5に植生指標NDVIの分布を示した。世界の天気予報のために情報交換されている世界気象データの中で、中国・インドの観測地点における植生指標を、また日本国内においては気象台またはAMeDAS地点における植生指標を抽出し、穀物生産指標CPIの計算に用いた。植生指標を求める位置の抽出は、緯度・経度とピクセル数から計算している。

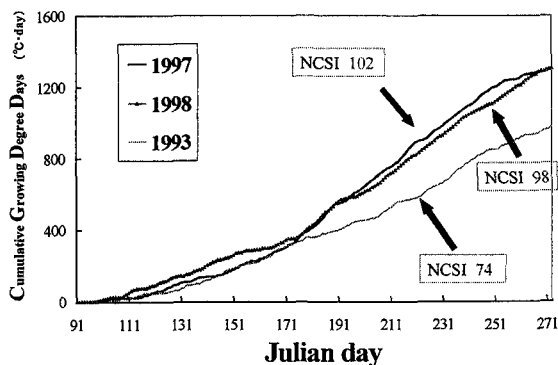


図-7 日本国内（久喜）における生育指標GDDと作況指数

(3) 作物統計値

中国・インドの穀物生産量については世界食糧機構FAO⁴⁾のデータを用いた。また、国内の穀物貿易と穀物生産量については、農林水産省の農業統計情報データによった。FAOの作物統計値は、図-1の穀物生産量や図-2の主要国における穀物貿易量の年変化についての図の作成に用いた。

(4) 中国・インドの土地被覆データ

作況ばかりでなく、穀物生産量の推定のためには作付面積が必要である。建石らによるアジア30秒土地利用データセット⁴⁸⁾による中国・インドの土地利用図を用いているが、土地利用データの更新と作物分類のために、数値情報や現地踏査を検討している。この土地利用・土地被覆から作物の作付面積が得られ、穀物の平年作に対する作況指数ばかりでなく、穀物生産指標と作付面積との積から、絶対量としての重量単位で表された穀物生産量が得られる。

5. 生育指標と穀物生産指標の結果

これまでに得られた穀物生産指標について、利根川中流域の久喜市周辺の広大な水田を対象として作況指数と共に検討した結果は以下の通りである。

(1) 生育指標GDD

生育指標GDDとしての有効積算気温は、光合成型穀物生産指標の場合にも生育・出穂・登熟のモデリングのために必要である。中国の水稻と春小麦について、各作付期間をもとに図-4で示した世界気象観測地点の監視地点を対象として、生育指標GDDの積算気温とその季節変化を図-6に示した。このGDD指標と穀物生産量との関係を知り、穀物生産指標としての有効性を検討するために、日本国内の検証地点である久喜についてGDDと水稻の作況指数NCIとの関係を図-7に示した。生育指標GDDは1993年の冷害による水稻の凶作(NCSI 74)を表わし得たが、1998年の高温であるけれども日射不足の気象条件による不作(NCSI 98)を表し得ず、やや豊作な1997(NCSI 102)との差を分離し得ていない。生育指標ではあるが穀物生産の指標となっていないことを確認している³⁷⁾。なお、農学の分野では、NDVIの成育軌跡による穀物生産量の追跡法⁴⁹⁾もある。しかし、生育軌跡は積算植生指標iNDVIと同様に生育指標であって、穀物生産指標ではない。

(2) 積算植生指標iNDVI

気象データの測定の難しい地域については衛星データが有効である。前述の積算植生指標iNDVIを中国の監視地点について計算し図-8に示した。水ストレスや出穂期の低温障

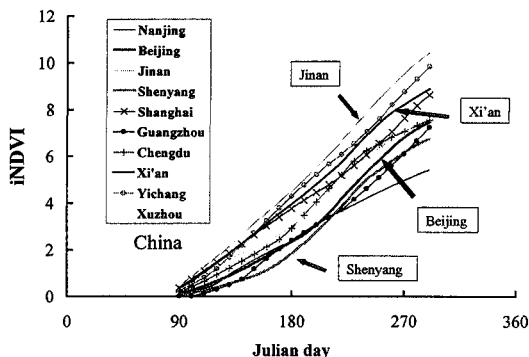


図-8 中国の積算植生指標iNDVI

害等が無ければ、積算植生指標が大きい地域の作物ほど穀物生産量が大きくなる。従って、図-8中の積算植生指標が大きいJinan(済南)やYichang(宜昌)で豊作となる。このiNDVIは光合成型穀物生産指標CPIの中にも組み込まれている植生現存量の積分値である。iNDVIが大きいほど作物が茂っていることを意味することから穀物生産量のモニタリング法として考えられた。しかし、iNDVIは生育指標であって、例えば、出穂期の低温障害や登熟期の日照不足による影響を表し得ず、或いは土壌水分不足によって気孔が閉じて光合成が抑制されていなくとも青々として植生指標に現われない。このためRasmussen^{29), 30)}は、iNDVIに加えて光合成有効日射の要因を取り込む式(5)の光合成型への改良を進めてきた。しかし、温度障害による不稔や水ストレスが考慮されていないなど、主たる要因を考慮した光合成型指標となっていない弱点がある。

(3) 積算光合成型指標SCD

生育指標である生育指標GDDの弱点を補うためには、日射を穀物生産指標の中に取り込まねばならない。生育に必要な有効気温と日射量の積の式形を積

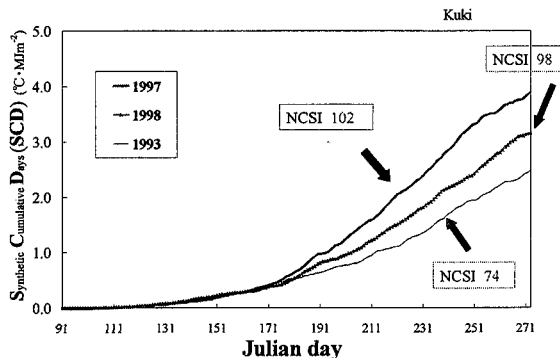


図-9 日本国内(久喜)における積算光合成型指標SCDと作況指数

分する光合成型の積算指標SCDを次式で定義した。

$$SCD = \int_{x_s}^x GDD \cdot R_s \cdot dt \quad (8)$$

ここに、 R_s ： 全日日射量

SCDは植生現存量や光合成への温度影響要因がCPIと異なって簡素化されている。この光合成型積算指標SCDの季節変化を図-9に示した。この指標SCDは、1993年の低温による不作と1998年の日照不足による作況指数の減少をいずれも表現しており、日射を含む光合成型の穀物指標となることを確認した。豊作と不作との収量差を穀物生産指標の数値によって明確に分離し、収量差が指標の数値に拡大されて表示されるほど、鋭敏な優れた穀物生産指標となる。なお、作況指数NCSIと穀物生産指標SCDの値が比例していない原因は次のように考えられている。水稻は、出穂期を中心に18.5℃を下限値とする低温不稔障害があり、ある程度の気温と日射があっても作況指数が急激にゼロに近づく。従って、作況指数は生育指標GDDの積算値である積算有効気温に比例するのではなく、特定の下限値を境にゼロに近づくためである。現在、出穂期の低温障害について、温度影響関数形を改良している⁴⁰⁾。

(4) 光合成型穀物生産指標CPI

日射と気温および植生現存量としての植生指標NDVIを考慮した光合成型の穀物生産指標CPI³⁸⁾の有効性について、埼玉県久喜市における指標を作況指数NCSIと共に図-10に示した。CPIは、気温と日射データの項を含む光合成型の積算指標SCDよりも植生現存量の増大による光合成速度の増加を更に考慮しており、1993年の低温による不作と1998年の日照不足による作況指数NCSIの減少をいずれも表わすばかりでなく、CPIによる豊作と凶作との数値差が拡大され、豊作・凶作の識別性能がSCD指標よりも高く、より良い光合成型の穀物指標となることがわかる。但し、現時点では18.5℃の不稔⁵⁰⁾や約40℃の高温不稔限界⁵¹⁾の温度応答関数と水ストレスが未だ考慮されていない。

(5) 水稻の水ストレス分光測定実験

温度傾斜型制御温室TGC内における水稻生育実験を進めており、赤外・可視分光放射計を用いた分光データが得られている。水ストレス実験をすることにより、短波長赤外の反射率スペクトルから、水面・土壌を考慮しながら水ストレス指標を定義しようとしている。この水ストレス指標によって気孔開度を考慮し、衛星による水資源制約時代の現況診断・収量判定の基礎とする。現時点の研究段階では水ストレスが無いと設定して気孔開度を1としている。

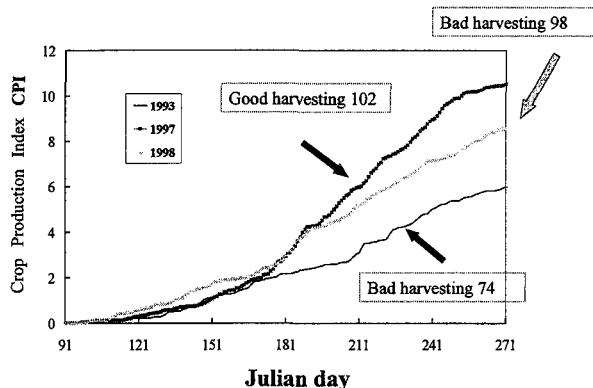


図-10 日本国内（久喜）における穀物生産指標CPIと作況指数

6. おわりに

本研究は世界の人口増加と水資源制約時代を背景に、中国・インドにおける穀物生産量のモニタリングを目的として、作物の水ストレスの視点から必要となってきた光合成型の穀物生産指標を開発し、両国の穀物生産量を下記の方式によって早期監視することを提案した

- 1) 提案の背景となる水資源制約時代における中国・インドの穀物生産について、我が国を巡る社会的問題点から監視の必要性を示し、日々の気象条件の変動を考慮した動的な監視の必要性を指摘した後、対策としての監視モデルを示した。
- 2) 中国・インドを対象として日々の実測されたリアルタイムの気象データである世界気象データを使用すること。
- 3) 作物の生育をモデリングすることなく、作物現存量は衛星によって実測し既知とする。
- 4) 従来からの有効気温を用いた生育指標GDDによる生産量監視では精度が不十分であった。3か年の作況指数をもとに、光合成のメカニズムを表現するためには日射を考慮する必要があること。
- 5) 植生現存量を表すために、衛星からの植生指標NDVIを取り入れること。
- 6) 蒸散が反映される葉温と水分に対して鋭敏な短波長赤外の反射率スペクトルを、水ストレス指標として穀物生産指標に導入すること。
- 7) これらを総合し、衛星データと世界気象データを用いた日射・気温・植生現存量・気孔開度を考慮した光合成型の広域モニタリング法を提案した。
- 8) この穀物監視は、いずれ社会的要請を背景に特定組織による定常的な業務に発展させ、問題に対処するのが適切であると提案した。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(1)(課題番号14390055, 研究代表者 金子大二郎)の補助を受けている。記して謝意を表わします。

参考文献

- 1) 国土交通省土地・水資源局水資源部, 平成 13 年版日本の水資源, 財務省印刷局, 328pp.
- 2) サンドラ・ポステル: 水資源が世界を脅かす, ワールドウォッチ 21 世紀環境シリーズ, 福岡克也監訳, 地球環境財団協力, 家の光協会出版, pp279.
- 3) Mahamoud Abu-Zeid : Providing practical solution to water problems, - Following the 3rd World Water Forum, 河川, (財)河川協会, 59, 5, 3-5, 2003.
- 4) Food and Agriculture Organization of the United Nations: FAO FAOSTAT Database, <http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl?subset=agriculture>
- 5) Otsubo, K., Regional differences in future food supply in China - viewed from the land-use grid data -, Proceedings of 1999 NIES Workshop on Information Bases and Modeling for Land-use and Land-cover Changes Studies in East Asia, Center for Global Environmental Research, ISSN 1341-4356, 172-177, 1999.
- 6) 胡 柏: 中国の食料供給力の現状と展開方向, 日本作物学会紀事, 63(3), 348-356, 1999.
- 7) 食糧庁: 米麦データブック -平成 14 年版-, 20002, 479pp.
- 8) 仮想水を含んだ日本の水資源評価, 丹治 肇, 第6回水資源に関するシンポジウム, 水資源シンポジウム委員会, 25-29, 2002.
- 9) 農林水産省総合食料局食料政策課: 我が国の食料自給率-平成 12 年度食料自給率レポート・食料需給表-の概要, 7p, 2001.
- 10) UN FAO: Global Information and Early Warning System, <http://www.fao.org/WAICENT/faoinfo/economic/giews/english/giewse.htm>
- 11) United Nations Environmental Programme (UNEP): Division of Early Warning and Assessment (DEWA), <http://earthwatch.unep.ch/about/docs/Pdepeia.htm>
- 12) Idso, S. B., Pinter, Jr. P. J., Hatfield, J. L., Jackson, R. D., and Reginato, R. J.: A remote sensing model for the prediction of wheat yields prior to harvest, Journal of Theoretical Biology, 77, 1979, 217-228, 1979.
- 13) Aase, J. K., and Siddoway, F. H.: Spring wheat yield estimates from spectral reflectance measurements, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-19(2), 78-84, 1981.
- 14) Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Pinter Jr, P. J.: Canopy temperature as a crop water stress indicator, Water Resources Research, 17(4), 1133- 1138, 1981.
- 15) Diaz, R. A., Matthias, A. D., and Hanks, R. J.: Evapotranspiration and yield estimation of spring wheat from canopy temperature, Agronomy Journal 75(9-10), 805-810, 1983.
- 16) Gao, Y., Jin, G., and Chen, H.: Simulating the optimal growing season of rice in the Yangtze River Valley and its adjacent area, China, Agricultural and Forest Meteorology, 91,251-262, 1998.
- 17) Murthy, C. S., Thiruvengadachari, S., Raju, P. V., and Jonna, S.: Improved ground sampling and crop yield estimation using satellite data, International Journal of Remote Sensing, 17(5), 945-956, 1996.
- 18) Manjunath, K. R., and Purohit, N. L.: Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data, International Journal of Remote Sensing, 23(15), 3023-3038, 2002.
- 19) Priya, S., and Shibasaki, R.: National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model, Ecological Modelling, 135, 113-129, 2001.
- 20) Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., and Spaul, D. A.: The EPIC crop growth model, Transactions of the ASAE, 32(2), 497-511, 1989.
- 21) 松村寛一郎, 中村泰人: アジア各国土地利用モデルの構築, 環境科学会誌, 12(1), 27-36, 1999.
- 22) Wang, Q.-X., Otsubo, K., and Ichinose, T.: Estimation of Potential and Convertible Arable Land in China, Journal of Global Environment Engineering, 8, 67-78, 2002
- 23) Kawashima, H., and Okamoto, K.: Global distribution of arable land, cereal yield and nitrogenous fertilizer use, システム農学, 15(1), 73-76, 1999.
- 24) 松村寛一郎: アジア各国食料需給モデルの構築, 環境科学会誌, 環境科学会, 11(1), 49-63, 1998.
- 25) Bollero, G. A., Bullock, D. G., and Hollinger, S. E.: Soil temperature and planting date effects on corn yield, leaf area, and plant development, Agronomy Journal, 88, 385-390, 1996.
- 26) Groten, S. M. E.: NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso, International Journal of Remote Sensing, 14(8), 1495-1515, 1992.
- 27) Quarmby, N. A., Milnes, M., Hindle, T. L., and Silleos, N.: The use of multi- temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction, International Journal of Remote Sensing, 14(2), 199-210, 1993.
- 28) Hayes, M. J., and Decker, W. L.: Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt, International Journal of Remote Sensing, 17(16), 3189-3200,1996.
- 29) Rasmussen, M. S.: Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR, International Journal of Remote Sensing, 13(18), 3431-3442,1992.
- 30) Rasmussen, M. S.: Developing simple, operational, consistent NDVI-vegetation models by applying environmental and climatic information: Part II. Crop yield assessment, International Journal of Remote Sensing, 19(1), 119-137, 1998.
- 31) 本間香貴, 中川博規, 堀江武, 大西宏明, 金漢龍, 大西政夫: 群落表面温度の隔測に基づく高温・CO₂濃度環境下の水稻の蒸散・熱収支特性の解析, 日本作物学会紀事, 68(1), 137-145, 1999.
- 32) 小林和彦: FACE (開放系大気 CO₂増加) 実験, 日本作物学会紀事, 70(1), 1-16, 2001.
- 33) Sellers, P. J., Shuttleworth, W. J., and Dorman, J. L.:

- Calibrating the simple biosphere model for Amazonian tropical forest using field and remote sensing data. Part I : Average calibration with field data, *Journal of Applied Meteorology*, 28, 727-759, 1989.
- 34) Kramer, P. J.: 水環境と植物, 田崎忠良監修, 養賢堂, 1986, 506pp.
- 35) Tian, Q., Tong, Q., Pu, R., Guo, X., and Zhao, C.: Spectroscopic determination of wheat water status using 1650-1850 nm spectral absorption features, *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(12), 2329-2338.
- 36) Abdul-Jabbar, A. S., Lugg, D. G., Sammis, T. W., and Gay, L. W.: Relationships between crop water stress index and alfalfa yield and evapo- transpiration, *Transactions of the ASAE*, 28[2], 454-461, 1985.
- 37) 金子大二郎: 水稻収量と穀物生産指標との関係の検討, 水文・水資源学会 2001 年研究発表要旨集, 70-71, 2001.
- 38) 金子大二郎: 世界気象データによる全天日射量の推定-衛星を用いた穀物生産量のモニタリング-, 第6回水資源に関するシンポジウム, 水資源シンポジウム委員会, 677-682, 2002.
- 39) 金子大二郎, 大西政夫: 植生指標NDVIを考慮した光合成型穀物生産指標によるモニタリング法, - 衛星と世界気象データを用いた中国・インドの穀物生産量の早期監視法, システム農学会2002年度秋季シンポジウム・研究発表会要旨集, 71-72, 2002.
- 40) 金子大二郎: 水資源制約時代における光合成型穀物生産指標と低温不稔・高温障害に関するモデル化, 水文・水資源学会 2003 年研究発表会要旨集, 82-83, 2003.
- 41) Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., and Spaul, D. A.: The EPIC crop growth model, *Transactions of the ASAE*, 32(2), 497-511, 1989.
- 42) Perez, P., Ardlie, N., Kunepong, P., Dietrich, C., and Merritt, W. S.: CATCHCROP: modeling crop yield and water demand for integrated catchment assessment in northern Thailand, *Environmental Modeling & Software*, 17, 251-259, 2002.
- 43) Maas, S. J.: Using satellite data to improve model estimates of crop yield, *Agronomy Journal*, 80, 655-662, 1988.
- 44) Wiegand, C. L., Richardson, A. J., Richardson, A. J., Jackson, R. D., Pinter, Jr. P. J., Aase J. K., Smika, D., Lautenschlager, L. F., and McMurtry, J. E.: Development of Agrometeorological crop model inputs from Remotely sensed information, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(1), 90-98, 1986.
- 45) Monteith, J. L.: The quest for balance in crop modeling, *Agronomy Journal*, 88, 695-697, 1996.
- 46) Sinclair, T. R., and Seligman N. G.: Crop modeling: from infancy to maturity, *Agronomy Journal*, 88, 698-704, 1996.
- 47) Tateishi, R.: Twenty-year global 4-minute AVHRR NDVI dataset, CERES, Chiba University, 2001.
- 48) 岡本勝男, 山川修治, 横沢正幸, 川島博之: 衛星リモートセンシングデータを用いた穀物生産量推定のための新手法, システム農学会, 14(1), 1998.
- 49) Tateishi, R.: AARS Asia 30-second Land Cover Data Set, CERES, Chiba University, 1999.
- 50) 中園江, 井上君夫: 積算気温を用いた水稻の幼穂長および冷害危険期の推定, 日本作物学会紀事, 70(2), 247-254, 2001.
- 51) Matsui, T., Namuco, O. S., Ziska, L. H., and Horie, T.: Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice, *Field Crops Research*, 51, 2-3-219, 1997.

Proposal of early monitoring method for crop production in China and India in the recent era of water resources restriction

Daijiro KANEKO and Masao OHNISHI

This paper presented a regional monitoring method for crop production in China and India in the recent era of water shortages in both countries. The research objective is to develop photosynthetic crop production index by utilizing world weather and satellite data to confront the crop production demands due to the population growth in China and India. Methods for monitoring cereal production have so far incorporated indices of accumulating atmospheric air temperature or vegetation Index NDVI in addition to precipitation data. However, the new era of water restriction caused by rapid population increase needs for photosynthetic model considering the effects of solar radiation and water stress effects in the regional crop production model. The proposed model aims to confront those social demands in Asia including Japan. Special emphasis was placed on rice production because of the demand for abundant irrigation in paddy fields.