

NDVIを用いた光合成モデルによる 水稻のCO₂固定量とCH₄放出の検討

金子大二郎

正会員 工博 松江高専教授 環境・建設工学科 生産・建設システム工学専攻 (〒690-8518 松江市西生馬町14-4)

E-mail: kand@ce,matsue-ct.ac.jp

本研究は、衛星データを用いた光合成速度と穀物生産量のモデルを用いて、炭素循環とバイオマスエネルギーの視点から水稻によるCO₂の固定量とCH₄の排出を検討した。埼玉の久喜市の水田についてCO₂の固定速度を播種から収穫期まで積分した単位面積当たりの固定量を3,950gCO₂/m²/yrと推定した。次に水稻の作付面積から埼玉県の水田が持つ固定量を147万t CO₂/yrと計算した。日本全体の水田は3132万t CO₂/yrの炭酸ガスを固定していると概算した。日本全国水稻収量として収穫される部分を水稻の収穫指数から計算し、地上の水稻バイオマスによる固定量は2368万t CO₂/yr、稲ワラのバイオマスによる固定を1302万t CO₂/yrと略算し、日本エネルギー学会が稲ワラの利用可能エネルギー量として推定した115PJの結果をもとに比較検討した。

Keywords: Paddy field, CO₂, CH₄, Model, Photosynthesis

1. はじめに

日本は京都議定書の中で温室効果ガス排出量を1990年レベルから6パーセント削減すると義務づけられている。この目標に対して、排出量が増えている現実から現在の対策のままでは、排出量削減の達成が困難との見通しである¹⁾。環境管理政策として環境省が、日本国内の地球温暖化対策推進大綱を作成している。この中に示されている温室効果ガスの数ある削減方法の中で、化石燃料を使わない持続的なエネルギー供給源として新エネルギーが注目されている。その一つは、廃棄されていたバイオマスエネルギーの有効利用であり、持続的社会的構築と物質循環の視点から再生可能なエネルギーとして必要性が高い。一方、議定書の中で、排出削減ばかりでなくCO₂の吸収源を正確に推定することが求められている^{2),3)}。この吸収源は海洋と植生であるが、環境省はCO₂排出源推定値のみを公表している。水稻のCO₂固定量については、農地の1年を通して再びCO₂が大気に戻り、一般的に蓄積されないとしてその研究見当たらない。本研

究は、平地部の土地利用に占める広大な水田を、穀物生産量の視点ばかりでなく炭素循環の視点とバイオマスエネルギーの資源量として注目する。稲ワラは収穫時に刈り取られており、森林バイオマスと異なって資源利用が比較的容易である。米国では稲ワラを中心としたセルロースを希硫酸処理によって糖化した原料から、エタノールを生産している例が既にある^{4),5)}。ここで、水田にすき込まれた稲ワラは、CH₄の排出源であることに注意せねばならない。アジアを中心とした水田は、稲ワラを水田へ戻すことによってメタンガスの排出を増大させている^{6),7)}。稲ワラのバイオマス利用^{8),9)}は、地球温暖化係数GWP(Global Warming Potential)が21、すなわちCO₂の21倍の温暖化効果を持つCH₄の排出を除去する効果を持っている。従って、CO₂換算の温暖化効果ガスの削減にとってバイオマス利用が重要である。なお、サトウキビやトウモロコシからの発酵によるエタノール製造とガソリン代替エネルギー利用がブラジルや米国で進められている。そのエネルギー代替部分は、化石燃料の消費削減を意味する。しかも、バイオマスエネルギーは大気中にあった

ニュートラルCO₂であって、燃焼させてもCO₂の放出とならない長所を持っている。

著者は、アジアにおける水資源制約の視点から、光合成型の穀物生産量を予測するための穀物生産指標を開発してきた^{10), 11), 12), 13), 14)}。この際、穀物が稔実するメカニズムのモデル化の基礎として、全日射量を含む気象条件から作物の光合成速度の推定を進めてきた。この光合成速度は、1日当たりの単位面積当たりCO₂固定量によって表わされる。本研究では埼玉県の水田について、水稻が光合成することによる日々のCO₂固定量を積算し、単位面積当たり吸収量を3,950 gCO₂/m²/yrと推定した。この値と水稻の作付面積から埼玉県の炭酸ガスの固定量は147万t CO₂/yrと計算した。この吸収量と水稻の収穫指数HI (Harvest Index) から得られるバイオマス部の炭素固定量を求め、日本エネルギー学会が推定した2001年の稲ワラの利用可能エネルギー量140PJと単位換算によって比較検討した。合わせて根部のバイオマスとすきこまれた稲ワラバイオマスについて、CH₄放出源となるセルロースの供給源として考察したので報告する。

2. 従来の研究

国内の水稻のバイオマスエネルギーについては、日本エネルギー学会が新エネルギーの一つとして資源量と可能利用量を調査し、それぞれ115PJ, 14PJと推定している。バイオマスをエネルギーと見るならば単位はPJ

(10¹⁵J)となり、炭酸ガス固定の視点からはt CO₂である。また、化石燃料の削減効果に統一するならば、単位は石油換算klとなっている。本研究では、光合成モデルを用いてCO₂固定量とCH₄放出源となるバイオマスを評価するためt CO₂の表示を採用し、炭酸ガス換算吸収量の単位となっている。このためCO₂の固定量を直接的に求めることができる。また関連する例では、米国やブラジルのようにバイオエネルギーとして利用した場合に石油に換算した例や、炭素循環の視点からtCを採用する場合もある。次に、バイオマス賦存量を環境の視点から算定する方法には、以下の三つの方法が考えられる。第一は刈り取られた稲ワラの10a当たりの重量から推定する方法である。次に、水稻の単位面積収量から得られる重量から収穫指数HIを使ってバイオマスを換算する方法である。第三の方法は、本研究のように水稻の光合成速度を計算し、日々の値を積算することによってCO₂の吸収量の観点から固定量を求める方法である。

著者の開発している光合成型の穀物生産指標は、気象データと衛星データの植生指標NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)を用いて、光合成速度をモデル化することを基礎としている。この方法は、監視地点

が異なる場合に品種や作付面積比率(植被率)の影響が出ないように標準化されたモデルになっている¹⁴⁾。現在、穀物生産シミュレーションモデルの中で、EPIC (Erosion and Production Impact Calculator) モデル¹⁵⁾は水資源利用を評価することが可能なため、これまでに広く採用されてきた。本研究は、このEPICモデルに使われている地上バイオマスと収穫指数HIの考え方を水稻バイオマスの推定に用いている。

著者によるCO₂固定量の推定方法は、Rasmussen¹⁶⁾による衛星を利用した純一次生産量NPP (Net Primary Production)の推定式を拡張した光合成型モデルである。光合成速度PSN (Photosynthesis)の式形は、日射・気温、出穂期における温度障害、作物の茂りの程度を表す植生現存量、そして、水ストレスによる気孔開度等の要因を取り入れている。この光合成速度の単位は、単位面積・1日当たりのCO₂固定重量である^{10), 11), 12)}。

$$PSN = \frac{a \cdot APAR}{b + APAR} \cdot f_{syn}(T_c) \cdot \beta_s \cdot eLAI \quad (1)$$

ここに PSN : 光合成速度, APAR : 吸収光合成有効放射 (Absorbed photosynthetically active radiation),
f_{syn} : 温度影響関数, β_s : 気孔開度,
a, b : Michaelis-Menten 定数, T_c : 葉温,
eLAI : 有効葉面積指数 (effective Leaf Area Index)

従って、一シーズン当たりのCO₂固定量F_{CO₂}は、穀物への温度障害影響関数を組み入れた光合成速度を播種t_sから収穫t_hまでの期間について積分した次式により定義する。

$$F_{CO_2} = \int_{t_s}^{t_h} PSN \cdot dt \quad (2)$$

バイオマスエネルギーの視点からは、食糧としての穀物生産量を除く必要がある。著者が開発してきた積算型の光合成型穀物生産指標CPI (Crop Production Index)は、

$$CPI = F_{Ster}(T_c) \int_{t_h}^{t_r} PSN \cdot dt \quad (3)$$

ここに、不稔関数F_{Ster}は、次式で表す。

$$F_{Ster} = \int_{t_h}^{t_r} f_{Ster}(T_c) \cdot dt \quad (4)$$

ここに、t_h : 出穂の始まる時期,

t_r : 登熟の終わる時期

不稔の温度影響関数f_{Ster}の細部については金子^{11), 13)}を参照されたい。本研究のモデルは、開花・受粉・登熟のステージにおける不稔の影響が水稻収量に与える影響を重視した改良型となっている。すなわち、式(4)のように不稔関数F_{Ster}を光合成速度の積分の前に出すことによって受粉・登熟のメカニズムの効果が強調されており、不稔の影響によって穀物生産指標CPIがゼロとなり得るように鋭敏化されている。

EPIC 穀物生産モデルでは、有効積算気温 GDD (Growing

Degree Day)を Heat Unit(HU)と表現し、この指標 HU を登熟が終わるまでの標準的な積算 Heat Unit で割ることによって 0~1 までの標準化している。この Heat Unit Index (HUI)を地上バイオマスの推定のための生育指標として用いている。

$$HU_K = \left(\frac{T_{mx,K} + T_{mn,K}}{2} \right) - T_{bj}, HU_K > 0 \quad (5)$$

$$HUI_i = \frac{\sum_{K=1}^i HU_K}{PHU_j} \quad (6)$$

この EPIC モデルは、Heat Unit を用いて作物の葉面積指数を表し、作物の現存量を推定している。地上作物バイオマス B_{AG} に、収穫指数 HI を掛けた割合が穀物生産量となるとしている。

$$YLD_j = (HI_j) \cdot (B_{AG}) \quad (7)$$

なお水稻の収穫指数 HI は、平年作の気象条件では品種により 0.4 から多収量品種の 0.5 に分布し、平均的には 0.45 の値を持っている。

本研究では、最初にバイオマスのための葉面積指数 LAI を推定するのではなく、光合成速度から CO_2 の固定量と穀物生産量を直接に推定する。光合成に有効な葉面積 (eLAI) は、近似的に衛星からの植生指標 NDVI によって表わすことができる。しかも NDVI は広域的に得られることから、 CO_2 固定の評価に適している。その際に、対象地点が異なると、同じ平年作であっても植生指標 NDVI が地点により相違する問題に対応するため、EPIC モデルと同様に、下記の標準化された植生指標 Unit (NDVI_U) を定義した。

$$NDVI_{U,i} = \frac{NDVI_i}{iNDVI_{H100}} \quad (8)$$

ここに、NDVI_{U,i} : I 日目の植生指標 Unit,

NDVI_i : I 日目の植生指標,

iNDVI_{H100} : 作況が 100 である年の収穫時点における積算植生指標 (integrated NDVI)

NDVI_U は 1 を越えれば生育が平年以上であって豊作につながり、1 を下回れば不作となり易い生育量であることを意味する。現実には作況が 100 となる平年的な気象条件は存在せず、いずれの年も特徴的な変動を持った気象傾向を示した。その結果、植生指標 NDVI も作況 100 となる平均的な NDVI_{H100} は存在しない。結果的に平年作にはなるが、同じ平年作であっても平均気温的に季節変化することは無いし、同じ平年作であっても植生指標の季節変化はさまざまである。従って、1 月 1 日からの各日における NDVI を全対象年について平均し、その値をもって

NDVI_{H100} とした。この NDVI_{H100} は、年数が多ければ平年作となる平均的な植生指標値を意味し、作況指数と同様の定義となつて作況 100 の近似値となっている。同様に標準化された光合成速度 PSN₀ や穀物生産指標 CPI₀ を定義することができる。すると水田による炭酸ガス固定量は、 CO_2 の単位面積当たり吸収フラックスに作付面積を掛けることによって求めることができ、次式で表わした。

$$S_{CO_2} = F_{CO_2} \cdot A_{paddy} \quad (9)$$

ここに、 S_{CO_2} : 光合成による炭酸ガス固定,

F_{CO_2} : CO_2 の単位面積当たり固定フラックス,

A_{paddy} : 水稻の作付面積

3. 使用データ

光合成速度の計算に使用した気象データは、AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) による気温と気象台・測候所による全天日射量である。衛星データは、NOAA の AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) による 10 日間の植生指標 NDVI について、Tateishi¹⁷⁾ が MVC (Max Value Composite) 化法によって雲の影響を除いて作成したデータである。図-1 に 2000 年 7 月 31~8 月 9 日の期間における日本の植生指標 NDVI (MVC) の平面分布を示した。穀物生産指標のモデリングを検証する地点は、利根川中流域の久喜と北上川下流の仙台平野にある古川地点、および低温不稔の限界条件を探るための函館地点である。これらはいずれも AMeDAS 測定地点である。水稻の作況データは、1993 年の凶作を含む 2000 年までの 8 年間について、農林水産省農林統計情報部から提供を受けた。

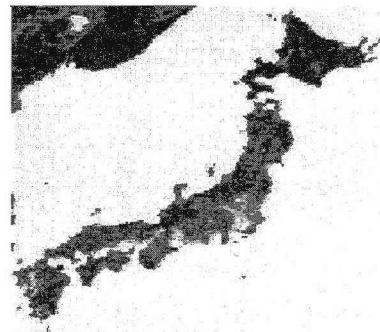


図-1 2000 年 7 月 31~8 月 9 日の期間における日本の植生指標 NDVI (MVC) 分布

4. 標準化された植生指標 $NDVI_U$ の特性

植生の生育量を表す植生指標 $NDVI$ はセルロースの形となって CO_2 固定量の指標でもありと考えられる。この植生指標は、地点が異なると同じ水田という土地被覆であっても図-2 に示されるように各年の $NDVI$ の値に季節的な相違が認められる。衛星の可視・赤外センサーである AVHRR の測定画素内に水田が占める作付面積率（植被率）や生育量・品種が関係していると考えられる。このため、作況が平年作である基準の植生指標値として全対象年数の平均値を求めた。植生指標 $NDVI$ をこの平均収穫時積算植生指標 $NDVI_{H100}$ で割った植生指標 Unit ($NDVI/NDVI_{H100}$) を用いて地点毎の相違に対する標準化を施した。標準化された $NDVI$ Unit について季節変化を図-3 に示した。月ごとの気象を反映して CO_2 固定量やバイオマスを表す指標としての $NDVI$ Unit が変動している。標準化によって、地点ごとの相対的な平均植生指標値の相違が穀物生産指標に及ぼす影響を除くことができ、光合成に有効な植生量を表す指標としての $NDVI$ を標準化することが可能となり、モデルの適用は任意の地点で可能となる。

5. 積算 CO_2 固定速度

CO_2 固定速度である光合成速度 PSN の影響要因は、日射・気温・植生現存量（植生指標に比例すると近似）・水ストレスである。光合成速度に及ぼす日射と気温の影響については多くの研究があり、他の要因に比べて精度よく影響を関数化することができる。図-4 に各年の単位面積当たりの積算光合成速度 $iPSN$ すなわち積算 CO_2 固定量の季節変化を示した。埼玉県久喜地点において低温と日照不足によって著しい不作為となった 1993 年には、 CO_2 固定量である積算光合成速度が低下し、不作為の傾向と一致している。また、大豊作であった 1994 年については、積算 CO_2 固定速度が大きく、豊作の傾向を良く表している。積算 CO_2 固定量の年ごとの変動は、年平均値である $3950 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$ に対し、凶作であった 1993 年の $3208 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$ から 1997 年の $4613 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$ と、 -18% から $+17\%$ の変動をしていることがわかる。バイオマスエネルギーを検討する場合には、積算 CO_2 固定量から穀物生産量を差し引かなければならない。しかし、水田が持つ CO_2 固定源としての機能を評価する目的や、バイオマスエネルギーの視点のためには、穀物の豊作・凶作はそれほど重要ではない。従って、平年の気象条件の年を採用し、水田の持つ CO_2 固定の機能は、平均値として単位面積当

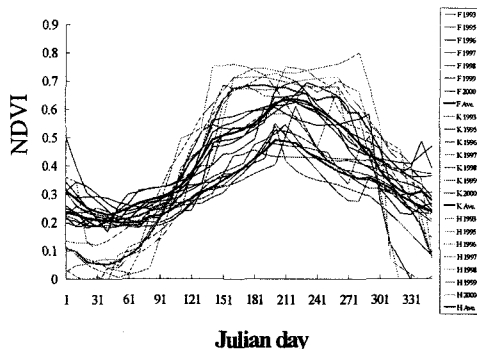


図-2 植生指標 $NDVI$ の季節変化・地域変化・年々変化の特性

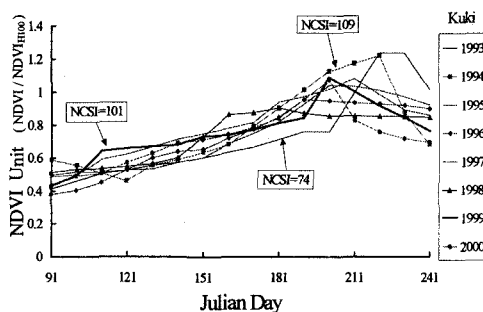


図-3 標準化された植生指標 $NDVI_U$ の季節変化

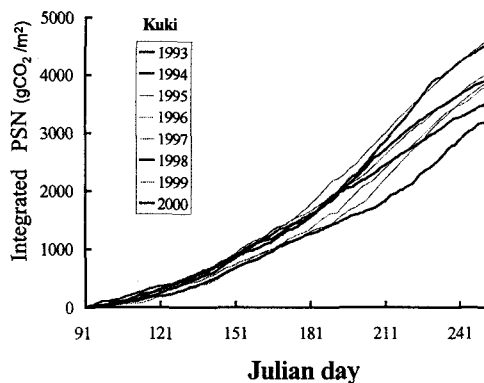


図-4 単位面積当たりの炭酸ガス固定量 (CO_2 換算光合成量) の季節積算値

表-1 埼玉県と日本のバイオマスとCO₂固定量

Unit: Mt= 10⁶t

Unit	Present research							Japan Energy Society	
	Photosyn. Velocity g CO ₂ /m ²	Photosyn. Fixation Mt CO ₂	Harvest Index -	Paddy Fixation Mt C	Ubove ground Biomass Mt CO ₂	Paddy straw Biomass Mt CO ₂	Root Biomass Mt CO ₂	Biomass energy 10 ¹⁰ J	Paddy Fixation Mt CO ₂
Saitama	3950	1.47	0.45	0.401	1.11	0.611	0.359	-	-
Japan	3950	31.32	0.45	3.55	23.68	13.02	7.64	147	38.7

たり 3950 gCO₂/m²/yr と見積もった。

6. 水田のCO₂固定量

埼玉県久喜における AMeDAS データを用いた光合成速度の積算値は、一毛作の水田による単位面積当たりのCO₂固定量である。この光合成速度は、呼吸によるCO₂の放出を内含した純光合成速度である。この一毛作の期間についての光合成量であるCO₂固定量は、穀物の炭水化物と地上のバイオマスとしてのセルロースのほか、根系にも有機物として蓄積されている。従って、稲の地上部のバイオマスと米としての収量。そして根部のバイオマスの三要素をCO₂の固定量として検討する必要がある。本研究では、関東の久喜地点の水田について光合成速度を収穫期間まで積算した単位面積当たりの固定量 3,950gCO₂/m²/yr と、水稻の作付面積である 37,300ha から、埼玉県の炭酸ガスの全固定量は 147 万 t CO₂/yr と推定した。水稻収量として収穫されるバイオマスの部分は、水稻の収穫指数 (Harvest Index, HI) によって表される。平均的に HI_{ave}=0.45 であることから¹⁸⁾、水稻収量を除いたバイオマスとしてのCO₂固定量は 81 万 t CO₂/yr と計算された。このバイオマスの中で炭素物質循環の視点からは、稲ワラと根部に分子量の構成比に相当する 40.1 万 t C/yr の炭素がバイオマスとして残り、或いはメタン醗酵の微生物群による CH₄ の排出の源となる。稲ワラは、牛舎や屋根等の他用途に利用される部分が多かったが、近年は裁断して水田にすき込まれる部分が多い。国内の水稻のバイオマスエネルギーについて、日本エネルギー学会が新エネルギーの賦存量の一つとして稲ワラのバイオマスエネルギー資源量と可能利用量を調査し、それぞれ 115PJ, 14PJ と推定している⁴⁾。取り扱う問題の視点により、バイオマスをエネルギーと見るならば単位は PJ (10¹⁵J) となり、炭酸ガス固定源と見れば t CO₂ となり、化石燃料の削減効果に統一するならば石油換算 kl となっている。本研究は、光合成モデルを用いて穀物生産量とCO₂固定量を推定することが目的である。従って、t CO₂ の炭酸ガス換算吸収量の単位を採用し、CO₂ の固定効果を直接的に求めている。

埼玉県と日本全体について、水稻による年平均 CO₂ 固

定量を表-1 に整理して示した。水稻の単位面積当たり年平均 CO₂ 固定量は、3950 gCO₂/m²/yr であるから、この固定量と水稻作付面積 37,300ha より埼玉県の平成 12 年の CO₂ 固定量は、147 万 t CO₂/yr と推定された。この推定精度を検討するために、日本エネルギー学会によるバイオマスエネルギーの推定値と比較検討した。本研究による単位面積あたり CO₂ 固定量に水稻の全国作付面積 1.763×10¹⁰m² をかけることにより、日本全国的水稻による CO₂ 固定量は 3132 万 t CO₂/yr と略算することができる。日本エネルギー学会では、2001 年の稲ワラの利用可能エネルギー量を 140PJ と推定している。なお、日本エネルギー学会による稲ワラのバイオマスエネルギーは、他の用途への利用部分を除くとして有効利用率を 25 パーセントと推定している。また環境省の地球温暖化対策推進要綱は、エネルギー起源の CO₂ 排出量が全体の 9 割を占めるとしている。従って、2001 年の CO₂ 排出量が 12 億 1370 万 t であるから、エネルギー消費量 15,801PJ から換算し、稲ワラによるバイオマスエネルギー利用可能資源量からの排出量は 968 万 t CO₂/yr と推定した。稲ワラの利用率からこの排出量の 4 倍が、稲ワラのバイオマス量であるから、3870 万 t CO₂/yr と計算された。Huang¹⁹⁾ によれば平均的な稲の地上・地下バイオマスは、70 日目の条件について 1591g/m² と 514g/m² である。従って、生育ステージによる変動を無視して近似すれば、地上バイオマスは全体の 75.6 パーセント、地下部は 24.4 パーセントである。本研究の CO₂ 固定量 3132 万 t の 75.6 パーセントから得られる地上の水稻バイオマスによる固定量は、2368 万 t CO₂/yr となる。また、平均的な収穫指数 HI は 0.45 であるから、稲ワラは、1302 万 t CO₂/yr と概算される。その結果、本研究による水田の CO₂ 固定量の推定値は、上記の推定手順の仮定によれば、日本エネルギー学会によるバイオマス資源量の推定値に対して、33.6 パーセントの推定値となっていることがわかる。この差については、更に今後の検討が必要である。

一方で、概算によって日本全体の水田は 3132 万 t CO₂ の炭酸ガスを固定していることが分かる。また、根として残された 764 万 t CO₂ の地下バイオマスは、CH₄ の排出源となる。また、水田に稲ワラをすきこむことによって最大 1302 万 t CO₂ の炭酸ガスすなわち 355.4 万 t C の炭素が地中に残り、CH₄ の排出源に加わることになる。メタ

ンの排出量は, Liou et. al.²⁰⁾ や Oyediran et. al.²¹⁾ が測定している. Liou et. al.によれば $75.1 \text{ gCH}_4/\text{m}^2/\text{yr}$ であるから, 地球温暖化係数 (GWP) により 21 倍の単位面積当たり $1577 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$ の換算排出量と計算された. Kimura²²⁾ は CH_4 排出源の研究から, 稲ワラを加えた場合の CH_4 の増加量は, 総 CH_4 排出量の 44~50%と測定している. 残りは主として地下バイオマスが放出源と考えられる. 参考値として, Kern et. al.²³⁾ は, 二毛作も考慮して中国の CH_4 放出量を $9.9 \text{ Mt}/\text{yr}$ と推定している.

稲ワラのバイオマスエネルギーについて実現性を以下に考察した. 「新エネルギー等の利用に関する特別措置法」によって新エネルギーの発電量は, 2000 年実績でバイオマス発電が石油換算で 7.2 万kl である. 太陽光発電 5.1kl ・風力発電 6.1kl の実績と合わせても, 日本全体の 2000 年原油換算エネルギー実績 409 百万 t に対し現在は微々たる量であるが, 2010 年までに新エネルギー発電量を日本全体の発電電力量 $9,000 \text{ 億kWh}$ の 1.35%に引き上げる目標になっている. しかし, ノルウェーやデンマークの現在における新エネルギー割合よりもはるかに低い. また, 米国のトウモロコシやブラジルのサトウキビの例のように, メタノールを醸成することによって化石燃料の使用が削減されている. 稲ワラのセルロースについても同様に, 希硫酸方式によるエタノール化が米国において実用化されている. なお, このバイオマス利用は輸送コストに問題があることから, 近隣からの間伐材利用・木材工場と稲ワラバイオマス利用施設の併設による集積メリットが, 実用化のために検討される必要があると考えられる.

7. おわりに

著者は, 衛星データを用いた光合成速度と穀物生産量の推定についてモデル化を進めてきた. この方法の基本式の一つは, 衛星による植生指標 NDVI と気象データを用いた光合成速度であり, その単位は CO_2 の固定速度である. 本研究は炭素循環とバイオマスエネルギーの観点から, 埼玉県久喜市の水田について CO_2 の固定速度を播種から収穫期まで積分し, 単位面積当たりの固定量を $3,950 \text{ gCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$ と評価した. 次に水稻の作付面積から埼玉県の水田が持つ炭酸ガスの固定機能を $147 \text{ 万t CO}_2/\text{yr}$ と推定した. 更に日本全体の水田は $3132 \text{ 万t CO}_2/\text{yr}$ の炭酸ガスを固定していると概算した. 日本全国的水稻収量としてバイオマスから除かれる部分を水稻の収穫指数から略算した. 地上の水稻バイオマスによる固定量は 2368 万t CO_2 , 稲ワラのバイオマスによる固定を $1302 \text{ 万t CO}_2/\text{yr}$ と推定した. また, 根として残された 764 万t CO_2 の地下バイオマスは CH_4 の放出源となる. さらに水田に

稲ワラをすきこむと最大 $1302 \text{ 万t CO}_2/\text{yr}$ の炭酸ガスすなわち $355.4 \text{ 万t C}/\text{yr}$ の炭素が地中に残り, CH_4 の排出源に加わることになる. これらの推定値の検証については, 更に今後の検討を要すると考えている.

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) の関連研究であり, 補助を受けている. 記して謝意を表わします.

参考文献

- 1) 環境省: <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/gaiyo.html>, 2004
- 2) 京都議定 http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/kpeng_j.pdf
- 3) 中根英昭・相沢智之: 地球環境研究センター温室効果ガスインベントリーオフィス (CGER/GIO) の解説, 地球環境研究センターニュース, 13(4), 2-4, 2002.
- 4) 日本エネルギー学会編, バイオマスハンドブック, オーム社, 54-58, 422pp, 2002.
- 5) BC International Corporation: <http://www.bcentlcorp.com/>, 2004.
- 6) Huang, Y., Sass, R. L., and Fisher, F. M.: Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH_4 emission, *Global Change Biology*, 3, 491-500, 1997.
- 7) Liou, R., Juang, S., Lin, C., and Chen S.: Methane emission from fields with three various rice straw treatments in Taiwan paddy soils, *Journal of Environmental Science and Healthy, Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, B38, 511-527, 2003.
- 8) Mori, Y.: Progress in biomass energy studies in the Ministry of Agriculture, Forestry, and fisheries of Japan, *Rice Science: Innovations and impact for livelihood*, Edited from Proceedings of the International Rice Research Conference, 16-19 September 2002, Beijing, China, pp. 751-759, 2004.
- 9) Nakagawa, H.: Producing biomethanol and reducing CO_2 emissions from straw and husk by -products of rice, *Rice Science: Innovations and impact for livelihood*, Edited from Proceedings of the International Rice Research Conference, 16-19 September 2002, Beijing, China, pp. 759-767, 2004.
- 10) 金子大二郎・大西政夫: 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の提案, 土木学会環境システム論文集, Vol.31, 235-244, 2003.
- 11) 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.
- 12) Kaneko, D., Ohnishi, M., Ishiyama T., and Tateishi, R.: Proposal

- of a photosynthesis type of crop yield index for monitoring crop production in China and India in the era of water resource restriction, 4th International Crop Science Congress, 4p, Brisbane, Australia, 2004.
- 13) Kaneko, D., Ohnishi, M., Ishiyama T., and Tateishi, R. : Modeling of a photosynthetic crop production index for early warning using NDVI and Meteorological data, 11th SPIE International Symposium on Remote Sensing, 10p, Gran Canaria, Spain, 2004.
- 14) 金子大二郎 : 穀物生産指標のための水稻生育量の標準化と EPIC モデルの検討, システム農学会 2004 年度春季シンポジウム・一般研究発表会要旨集, 89-90, 2004.
- 15) Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., and Spaul, D. A.: The EPIC Crop Growth Model, TRANSACTION of ASAE, Vol.32 (2), 497-511, 1989.
- 16) 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, Vol.19 (1), 119-137, 1998.
- 17) Tateishi, R., : Twenty-year global 4-minute AVHRR NDVI dataset, CERES, Chiba University, CD-ROM, 2001
- 18) 崔 楠谷他 : 水稻における収穫指数の品種間差に関する研究- 乾物生産特性との関係-, 日本作物学会紀事, Vol.69, No.3, pp.351-358, 2000.
- 19) Huang, Y., Sass, R. L., and Fisher, F. M. : Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH₄ emission, Global Change Biology, 3, 491-500, 1997
- 20) Liou, R., Juang, S., Lin, C., and Chen S.: Methane emission from fields with three various rice straw treatments in Taiwan paddy soils, Journal of Environmental Science and Health, Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, B38, 511-527, 2003.
- 21) Oyediran, G., Adachi, K., and Senboku, T. : Effect of application of rice straw and cellulose on methane emission and biological nitrogen fixation in a subtropical paddy field, I. Methane emission, soil -APA, and rice plant growth, Soil Science and Plant nutrient, 42(4), 701-711, 1996.
- 22) Kimura, M. : Sources of methane emitted from paddy fields, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 49, 153-161, 1997.
- 23) Kern, J. S., Ziton, G., Ganlin, Z., Hizhen, Z., and Guobao, L. : Spatial analysis of methane emissions from paddy soils in China and the potential for emissions reduction, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 49, 181-195, 1997.

Evaluation of CO₂ fixation and CH₄ emission in paddy fields by a photosynthesis model using NDVI

Daijiro Kaneko

The Kyoto Protocol aims for a 6% of reduction in CO₂ emission, requiring clean and biomass energy technology instead of fossil fuels. The large paddy fields found in the plains of Japan act as a CO₂ fixation and a biomass energy source as well as producing a valuable crop. These paddy fields are also sources of CH₄, which has 21 times the greenhouse effect of CO₂. The author has developed a monitoring method based on a photosynthesis type of grain production model using meteorological data and the Normalized Difference Vegetation Index NDVI derived from satellite imaging. The present research estimates the amount of fixation, i.e. CO₂ absorption, by paddy fields in Saitama Prefecture. A value of 1,470,000 CO₂t /yr was calculated, based on the planted areas of paddy rice along with the accumulated seasonal absorption of 3,950 gCO₂/m²/yr in the paddy fields. The effective amounts of biomass energy resource and CH₄ were evaluated from the average harvest index HI=0.45 for paddy rice. The values for CO₂ fixation and CH₄ emission sources are compared with a value given by the Japanese Society of Energy, that the amount of biomass energy in Japan of rice is 115 PJ.