

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 22日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：21580319

研究課題名（和文） 光合成モデルによるアジアの穀物収量と砂漠化および
炭素吸収の支援システムの開発研究課題名（英文） System development for grain yields and desertification
along with carbon sequestration in Asia using photosynthesis model

研究代表者

熊倉 俊郎（ KUMAKURA TOSHIRO ）

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：00272865

研究成果の概要（和文）：

近年に穀物需給の重要性が増し、穀物生産を監視するシステムを構築した。衛星によるアジアの植生指標を使用し、EUの気象予報センター、後に米国NCEPのデータを併用して、植生による光合成速度と収量のモデルを開発した。計算した光合成速度と、他のデータである穀物中の炭素含有量およびMODISデータ或いは熱収支観測網（Fluxnet）の地上観測塔測定値とを比較し、モデルを検証した。更に拡張し、草原の砂漠化対策や植林CDMに応用した。

研究成果の概要（英文）：

The recent concern about food scarcity motivates the development of the present system entitled “Remote Sensing Environmental Monitor (RSEM)”. The system is designed for treating carbon sequestration by vegetation, grain production, desertification of Eurasian grassland, and CDM afforestation/ reforestation to a background of climate change and economic growth in rising Asian nations. The system includes a photosynthetic sterility crop yield model based on precise land use and cover (LULC) classification of crop field in two eastern Asian countries. This system also provides daily distributions of the PSN, which is the CO₂ fixation in Asian areas combined with the land-cover distribution classified from MODIS data, NDVI from SPOT VEGETATION, and meteorological re-analysis data by NCEP, U.S.A. The validation concept is based on the fact that the carbon hydrate in grains has the same chemical formula as cellulose in grain vegetation. The both photosynthesis and sterility models are calibrated by Carbon Partitioning Validation (CPV) method associated with particular rice species in Japan and China. However, more crop yield data are needed for validation of winter wheat and maize models. The mean CO₂ and carbon fixation rates in paddy areas were 25.92 (t CO₂/ha) and 5.28 (t C/ha) in Japan, respectively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学、農業情報工学

キーワード： 穀物生産・砂漠化・CDM・光合成モデル・モニタリング・炭素・二酸化炭素・水稲

1. 研究開始当初の背景

(1) 植物の光合成に関連した地球温暖化問題の分野に、「気候変動に関する政府間パネル IPCC 報告」が、脆弱性の部門として穀物生産を挙げている。2007 年から 2008 年 6 月にかけて、トウモロコシの価格が前年の 2 倍、小麦や大豆が 2~3 倍に値上がりし、価格が過去最高の水準に高騰した。食糧不足を見込んだ投資資金の大量流入による高騰も原因となっている。天候による穀物収量の変動は、衛星リモートセンシング (RS) による光合成モデルによって、監視が可能である。

(2) 砂漠化条約を背景に、中国の北西部の乾燥化と人口圧による草原の後退および砂漠化が問題となっている。RS を使い、草原の後退と砂漠化の対策として、全域的な地域計画を立案することが可能である。

(3) 中国は、日本からの借款を使い、乾燥域の植林と再草原化を進めてきた。これらの対策の一つとして植林 CDM の方法を活用する。CO₂ 削減対策であるクリーン開発メカニズム CDM は、我が国の主要な政策である。この背景の下に、アジア各地における再生森林・植林 CDM プロジェクトを支援する。本命とも言える削減影響力を持つ植林 CDM プロジェクトは、単に CO₂ の削減や資金の回収ばかりが目的ではない。その優れた特質である複数の便益、すなわち木材資源、治水・水資源涵養、土砂流出防止、砂漠化抑制、生物多様性、生活環境・景観の改善等の効果を重視した。

2. 研究の目的

(1) 研究の意義

本研究による穀物生産モニタリング法や、光合成による CO₂ 固定量の広域的推定は、現代における不安定な食糧生産の監視による Asia の国際的社会的混乱の回避、或いは砂漠化・黄砂の緑化対策の基本計画立案、そして我が国のクリーン開発メカニズム CDM のプロジェクト設計書 PPD を介して気候変動枠組条約の締約国会合の CDM 理事会による排出権認定に役立てることができる。

(2) 衛星を利用した光合成速度の推定方法に別法として光効率モデルがある。しかし、湿潤な場合に考案されたモデルであって、乾燥による気孔のメカニズムを収穫指数の中に入れる無理がある。また、本方法と異なり、穀物収量に関わる受粉・登熟のメカニズムが無い。次に、クリーン開発メカニズム CDM の分野では、衛星リモートセンシング (RS) が土地被覆分類に使われているのみである。樹

高や幹径のサンプリングのほかに光合成モデルによる固定の方法を設計書 PDD に取り入れねば広域化に対応することができない。第三に、中国の内モン自治区・黄土高原の砂漠化の進行と黄砂対策は、衛星 RS による植生の分布と光合成量によって、草原への播種・緑化工法対策が可能である。中国北西部の全域を含む、緑化対策の全体計画が中国に無い。

3. 研究の方法

(1) 穀物収量モデルによる土地被覆代表地点における推定された光合成速度と、MODIS による光合成速度 PSN とを穀物熱帯林、草原について比較検証した。

(2) 穀物収量モデルの光合成速度に夜間の呼吸を取り込んで汎用モデルとし、正味の生産量である純生産 NPP の推定値を得られるようにする。単位は、CO₂ や炭素の吸収量とした。

(3) 熱収支観測網 (Fluxnet) の地点において、土地被覆の分類結果の水稲、草原、熱帯林における観測塔で測定された CO₂ フラックスの実測値と比較検証した。

(4) Terra 衛星の MODIS による大略の土地利用分類データをもとに、独自の分類法によって、Asia の 2005 年と 2008 年の土地被覆を分類した。この結果と衛星による植生指標 NDVI から Asia 全域の草原の後退による砂漠化進行域を抽出した。

(5) アジアの地域への日本による植林域を対象に、CDM 条件に適切な適地選定と、CDM 設計書用のベースラインやモニタリング方法のための追跡支援システムを開発した。

(6) 国内外における位置づけとインパクトは次の通りである。

① 従来のような限られた分野でなく、林学、作物学・リモートセンシング・水資源学・気象学、CO₂ 地球科学分野となっている。既にこれらの分野で内外の研究発表をして来たので、海外発表を重視した。本研究は、従来の農学の精密農業の SERES モデルと異なり、気象分野の SiB の広域モデルに近く、穀物収量に関しては類似の予測モデルは全く無い。

② 衛星による Asia スケールの光合成速度の推定であって、植生に関する全体計画を立案する際に絶大な効果を発揮する。

③ 温暖化への応用を考慮し、単位は CO₂ 固定速度の gCO₂/m²/day である。従来の、乾重や mol、或いは光吸収エネルギーではない特色を持つ。

④ 穀物収量の検証は、固定され収穫された作物バイオマス (化学式(C₆H₁₀O₅)_n) の炭素 C

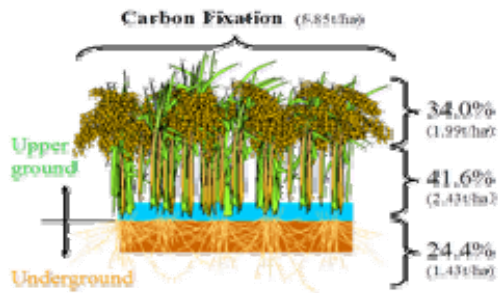


図1 水稲各部の炭素配分 (炭素配分検証法)

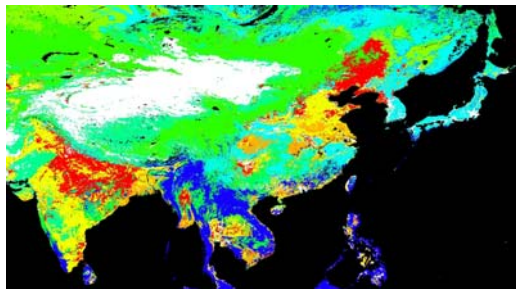


図2 アジア土地被覆細分類図の作成

を用いた炭素配分追跡(CPV、図1)法によって、衛星に対応した地上観測をする検証方法ではない。

⑤ 本モデルによる収量監視は、作況指数と単位面積収量について、日々の予測が可能である。従来の方法である唯一の衛星画像や、統計的収量推定、或いは積算気温による監視方法ではない。

4. 研究成果

(1) 水ストレス (気孔開度) の推定

植生の土壤水分不足による水ストレスは、土壤水分のマイクロ波による直接測定や近赤外光による水分指標が植生中の水分と分離できず定式化が困難であった。本研究は、米国の気象予報センターNCEPの気象再解析データと、同じくEUの気象予報センターECMWFの再解析データを使用し、Penman蒸発位 E_p と実蒸発散 E_{ac} から水ストレスによる気孔開度 $\beta = E_p / E_{ac}$ を定義した。この気孔開度を組み入れた本光合成モデルにより、光合成速度分布を推定した。これらの積分値が穀物生産と CO_2 固定量となる。炭素配分検証法により、収量中の炭素と比較した。なお、気孔開度 β は、乾燥域において過大であった。この対策として補完法の適用を試みた。

(2) アジア土地被覆の細分類

MODISによる概略土地利用分類をもとに、エキスパート型ディシジョントウリー法を

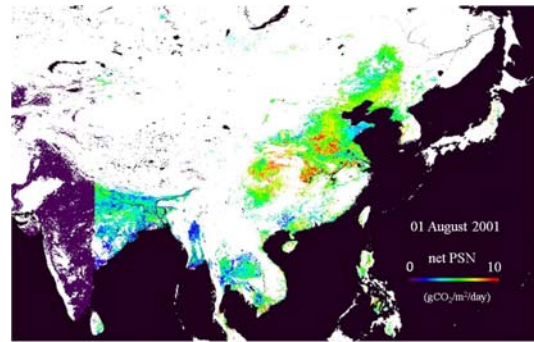


図3 計算された水田の純日光合成量

表1 水稲炭素配分検証結果

Table 1. Validation of the improved validation scheme model by scalar water inclusion in the model.

Region	Year	Model		Observed		Validation
		Mean	SD	Mean	SD	
Asia	2001	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2002	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2003	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
Australia	2001	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2002	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2003	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
USA	2001	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2002	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2003	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
Brazil	2001	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2002	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2003	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
Ukraine	2001	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2002	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98
	2003	1.12	0.15	1.12	0.15	0.98

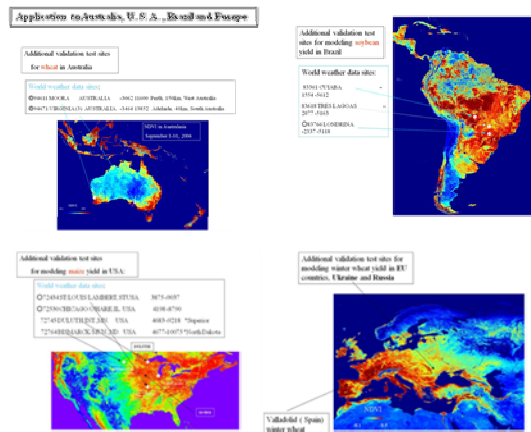


図4 モデル検証用にオーストラリア、米国、ブラジル、ウクライナ域の拡大

採用し、穀物作付を細分類する独自の方法によった。アジア全域スケールで土地被覆を細分類し、水田域の抽出や砂漠化対策、および植林 CDM のためのアジア土地被覆細分類図 (図2) を作成した。

(3) 炭素追跡法によるモデルの検証

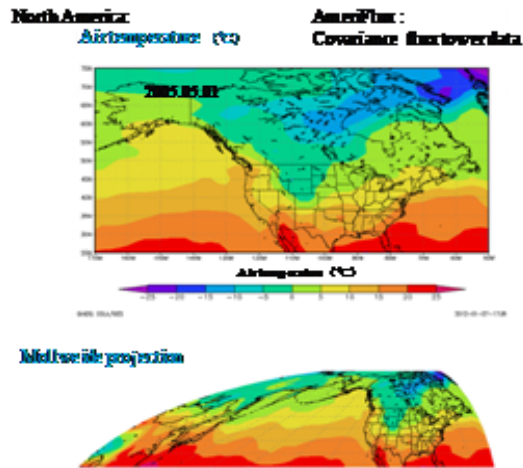


図5 モデル検証用のデータが豊富な北米域

水稻の光合成モデルを汎用モデルとするため、係数を調整して冬小麦、春小麦、トウモロコシ、そして森林・草原に応用した。前述したCPVの炭素追跡法により、穀物中の炭素を推定し、光合成による炭素固定量と比較検証した。この方法により、穀物（水稻、冬小麦、春小麦、トウモロコシ）のパラメータを適正化した。複数の年度についての比較検討によって推定精度を向上させた。現在、水稻について、キャリブレーションが完了した（表1）。しかし、冬小麦とトウモロコシについては、誤差が大きかった。炭素配分検証（CPV）法に使用するため、これらの収量データの信頼性の高いデータのあるオーストラリアや米国に研究対象域を拡大する必要が生じた。

(4) 対象域の拡大

モデルの検証のために対象域を拡大した（図4）。MODISによる土地利用分類を基に、冬小麦とCDM用のオーストラリア、さらにトウモロコシ用の米国（図5）、および、砂漠用のユーラシア中緯度帯について、土地被覆分類図を作成した。同時に、植林CDMのために、植生指標NDVIの平面分布図とユーカリ森の季節変化を求めた。光合成モデルのための気象データ、および穀物収量データの収集し、モデルの検証サイトの適性と選定の検討を繰り返した。

(5) MODIS衛星との比較検証

CPV法と同時に、米国陸衛星TerraのMODISセンサーによる観測値の解析結果である光合成速度データPSNと比較し、季節的な変動特性からモデルの相違による計算結果の妥当性を検討した（図6）。土地被覆の代表地点は、水稻の南京、冬小麦の石家庄、トウモロコシの瀋陽である。草原については、Ulaanbaator近くのAsiaFlux、冬小麦については、米国の値と比較した。森林については、国内と比較したが、樹種により大きな差があ

Computed seasonal variation of photosynthesis rate PSN in China (Spring wheat, winter wheat, maize, and paddy)

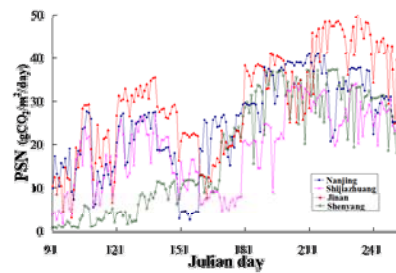


図6 米国MODIS光合成速度と計算値の比較

RSEM System for crop monitoring

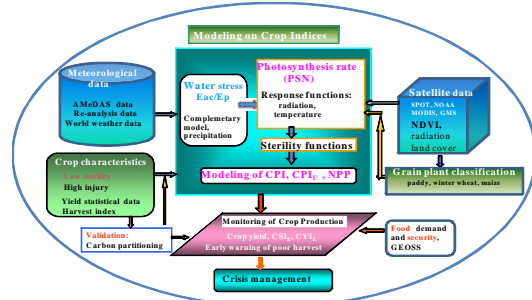


図7 開発した穀物生産RSEMシステム

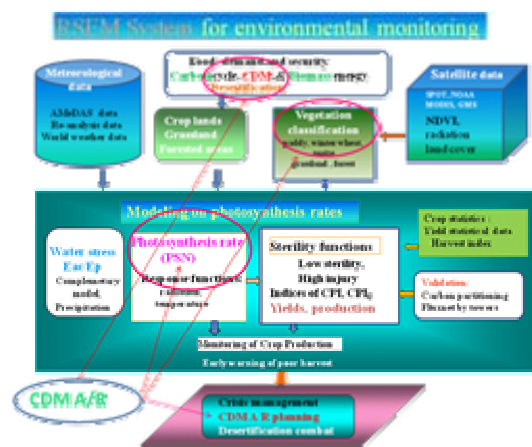


図8 穀物・砂漠化・CDMの全RSEMシステム

った。このため、植林CDMについては、ユーカリ、アカシア、地域固有の早成樹種の単一種に設定した。これら植生毎の代表地点における比較により、光合成モデルの信頼性を検討した。

(6) 地上観測塔Fluxnetとの比較

水稻（国内）、小麦（米国）、草地（モンゴル）、森林（国内）について、本研究のモデルから計算された光合成速度を比較検討した。各国の地上観測塔（Fluxnet）のデータから日最大光合成速度を抽出し、光合成速度の計算結果の精度の検討を進めた。地上観測の誤差問題が在るため、概略の一致に留めた。

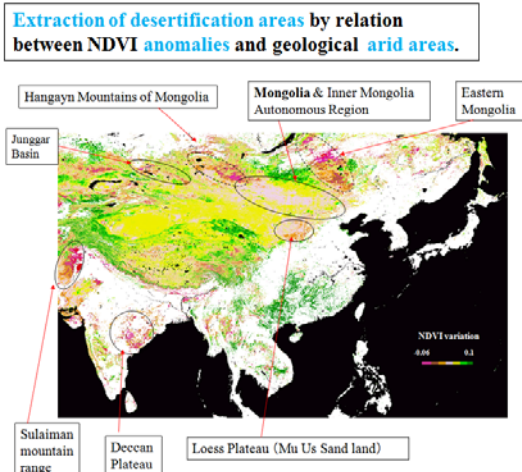


図9 草原劣化による砂漠化進行域の抽出

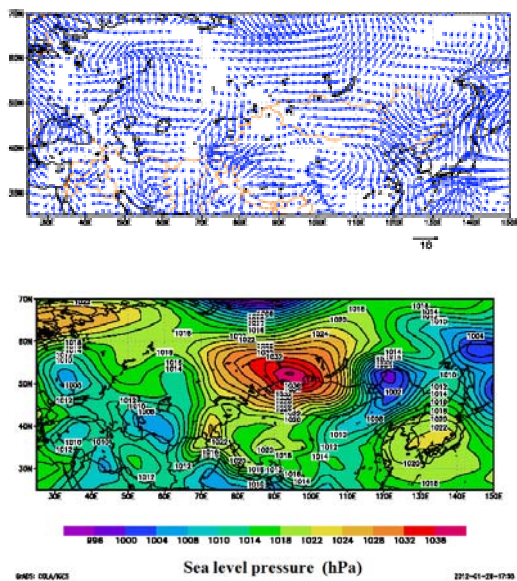


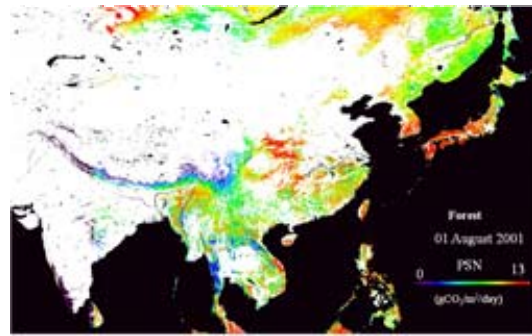
図10 NCEP データを使った北方ユーラシアにおける砂塵嵐時の風速と気圧分布

(7) 収量と CO₂ 固定量追跡システムの構築

光合成モデルによる穀物収量の推定値が、水稻の現況追跡に使える水準になった。開発したシステム(図7)により、順次にHPで公開する。このRSEMシステムは、アジア全域の穀物生産、植林 CDM、草原の砂漠化を対象とした複合目的のオペレーショナルなシステムとなるよう設計した(図8)。

(8) 砂漠化と砂塵嵐対策

中国北西部の砂漠化について、NDVIによる砂漠化進行域の抽出(図9)と共に、砂塵嵐の発生週(図10)の風速分布により発生源域の特定と、少雨による前年の植生指標の減少が原因であるかを調べた。次に砂塵嵐の顕著な2000年と2003年の風速分布から、モンゴルの戈壁砂漠における強大な低気圧の発達、北京を襲った砂塵嵐の原因と分かった(図10)。



Distribution of PSN in forested areas in Asia

図11 アジア森林域の光合成速度分布

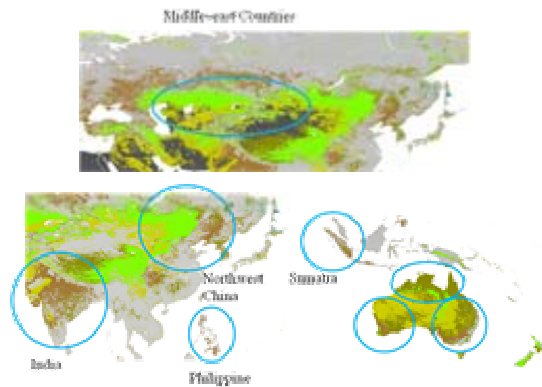


図12 CDM 条件に適合する候補地域の抽出

(9) 植林 CDM プロジェクト支援

CDMの対象地域が初期条件として1989年以前から森林でなく、放置され荒廃した地域である必要がある。植林 CDM プロジェクト設計書用のモニタリング方法を念頭に、光合成モデルとした(図11)。植林・再生林(A/R)による CDM プロジェクトに要求されたベースラインの条件を満たす地域を抽出した。米国USGS-GLCC 世界土地被覆データを使い、植林 CDM 適地選定図を作成した(図12)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

①Daijiro Kaneko, Peng Yang and Toshiro Kumakura, Validation of a Crop Yield and CO₂ Fixation Model over Southeast Asia by Carbon Partitioning in Grain Plants, Journal of the Indian Society of Remote Sensing "Special Issue on Earth Observation for Climate Change studies", Vol. 39, (3), 2011, 297-306.

DOI: 10.1007/s12524-011-0096-0.

②Daijiro Kaneko, Peng Yang, Yeh, P. J.-F, Toshiro Kumakura, Developing a photosynthetic sterility model to estimate CO₂ fixation through the crop yield in Asia with the aid of MODIS data Ecological Informatics, 5, 1010, 390-399.

③Kaneko, D., T. Kumakura, P. Yang, Data assimilation for crop yield and CO₂ fixation monitoring in Asia by a photosynthetic-sterility model using satellites and meteorological data, International Journal of Global Warming, 1(2), 2009, 179-200.

〔学会発表〕(計 11 件)

①Daijiro Kaneko, Peng Yang, Toshiro Kumakura, DEVELOPMENT OF RICE PHOTOSYNTHESIS MODEL FOR MONITORING YIELDS AND CARBON SEQUESTRATION USING MULTI-SATELLITE DATA, 2011, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) Proceedings, 2011 IEEE International, 2011, 3334- 3337. Vancouver, Canada. DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049998.

②Daijiro Kaneko, Peng Yang, N. B. Chang, Toshiro Kumakura, Improvements of rice and wheat production models by carbon partitioning with multi-satellite imageries and meteorological reanalysis data, Proceedings of 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, isrse-34, 2011, 1-4. Sydney, Australia.

③金子大二郎, 楊 鵬, 熊倉俊郎, 炭素配分法による衛星利用型水稻光合成モデルの検証、システム農学会 2010 年度秋季大会 シンポジウム・一般研究発表会要旨集、26 巻別号 2、39-40。2010 年 11 月 7 日、兵庫県西宮市、関西学院大学上ヶ原キャンパス。

④Daijiro Kaneko, Peng Yang, Toshiro Kumakura, Carbon partitioning as validation methods for crop yields and CO₂ sequestration monitoring in Asia using a photosynthetic-sterility model, Proceeding of SPIE Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, 7824, 2010, 0A-1-10. Toulouse, France, Centre de Congres Pierre Baudis.

⑤D. Kaneko, P. Yang, N. B. Chang, T. Kumakura, DEVELOPING A DESERTIFICATION ASSESSMENT SYSTEM USING A PHOTOSYNTHESIS MODEL WITH ASIMILLATED MULTI SATELLITE DATA, ISPRS Technical Commission VIII Symposium, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII, Part 8, 2010, WGVIII/6-W06E03-1-6. Kyoto, Japan.

⑥Daijiro Kaneko, Peng Yang, Toshiro Kumakura, System development for crop production monitoring in Asia using photosynthesis models with environmental applications of carbon sequestration, Proceedings of 16th Asian Agricultural

Symposium and 1st International Symposium on Agricultural Technology: Sufficiency Agriculture, 16, 2010, 76-79.

Sufficiency Agriculture, August 25-27, 2010. King Mongkut' s Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

⑦金子大二郎, 楊 鵬, 熊倉俊郎、SPOT NDVI を用いた光合成モデルによるアジア草原域の光合成速度分布と沙漠化進行域との関係、日本沙漠学会第 21 回学術大会講演要旨集 第 21 集, pp. OS3-4-1~2. 2010 年 5 月 30 日東京、いであ (株) GEカレッジホール。

⑧Kaneko, D., P. Yang, T. Kumakura, Validation of a crop yield and CO₂ fixation model over Asia by carbon partitioning in grain plants, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Archives, XXXVIII-8/W3, Workshop Proceedings: Impact of Climate Change on Agriculture, 256-261. 17-18, December 2009, Ahmedabad, India.

⑨Kaneko, D., P. Yang, T. Kumakura, Crop yield and CO₂ fixation monitoring over Asia by a photosynthetic-sterility model comparing with MODIS and carbon amounts in grain yields, Proc. SPIE, Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability IV, San Diego, U. S. A., 7454, 2009, 74540L, 1-12.

⑩Kaneko, D., P. Yang, T. Kumakura, Crop yield and CO₂ fixation monitoring over Asia by a photosynthetic-sterility model comparing with MODIS and carbon amounts in grain yields, 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Agricultural Monitoring, Stresa, Italy, TS-2-2, 2009, 1-4.

⑪金子大二郎、楊 鵬、熊倉俊郎、炭素配分法による光合成収量モデルの検証と問題点の検討、システム農学会、J. JASS, 25(Special Issue 2), 53-54, 12-13, November 2009、Tsukuba.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rsemonitor.jp> に準備中。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊倉 俊郎 (KUMAKURA TOSHIRO)
長岡技術科学大学・工学部 准教授
研究者番号 : 00272865

(2) 研究協力者 :

金子 大二郎 (KANEKO DAIJIRO)
松江工業高等専門学校 名誉教授、
(株) 遥感環境モニター 代表取締役。

楊 鵬 (YAN PENG)
中国農業科学院 資源区画研究所
(中国名 : 農業資源与農業区画所)