PGLIERC (Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center):その概要について

樋口篤志*・西田顕郎*²・飯田真一*³・新村典子*⁴・近藤昭彦*⁵

Preliminary Global Imager Experiment at Environmental Research Center, University of Tsukuba (PGLIERC): Its Overview

Atsushi HIGUCHI*, Kenro NISHIDA*², Shin-ichi IIDA*³,
Noriko NIIMURA*⁴, and Akihiko KONDOH*⁵

Abstract

Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center (PGLIERC) was carried out as a preliminary ground-based experiment of Global Imager (GLI) boarded on Advanced Earth Observation Satellite-II (ADEOS-II) which will be launched in 2000. PGLIERC has four main objectives: 1) validation of the estimation of physical properties on the ground using multi-spectral satellite data, 2) reconsideration to relationship between satellite data and ground-based data (in particular in the hydrological aspect), 3) monitoring of the temporal variations in the combinations of Vegetation Indices (VIs) and surface temperature (Ts) at "real scale", and 4) monitoring and modeling of Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF). Study field is grassland, located in the Environmental Research Center, University of Tsukuba. This field has a meteorological tower of 30 m height. Some preliminary findings in PGLIERC are summerized as follows.

1) Seasonal changes in spectral reflectances in visible and near infrared were quite different from each other. 2) Vegetation indices derived from in-situ observation represented phenology of the grassland. 3) Vegetation index derived from a spectrometer by the tower observation was similar to that from the in-situ observation. 4) The inclination of VI/Ts relationship, estimated from grid measurements, steepened with the drying of the soil. 5) A hot spot effect was confirmed from the BRDF measurement.

Key words : PGLIERC, Remote Sensing, Phenology, Grassland,
Vegetation Indices

キーワード : PGLIERC, リモートセンシング, フェノロジー, 草地, 植生指標

I. はじめに

リモートセンシング技術の水文学への応用
(例えば, Choudhury, 1991; Sellers *et al.*,

1996) は, これまで多く行われてきている。また,
ここ1年の間に日本からADEOS-II/GLI (<http://www.eorc.nasda.go.jp/ADEOS-II/GLI/index.html>) (略語は全て本稿末に記載されて

* 千葉大学環境リモートセンシング研究センター (Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University)
現在, 名古屋大学大気水圏科学研究所 (Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University)
*² 筑波大学農林工学系 (Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba)
*³ 筑波大学大学院博士課程地球科学研究科 (Doctoral Program in Geoscience, University of Tsukuba)
*⁴ 筑波大学陸域環境研究センター (Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba)
*⁵ 千葉大学環境リモートセンシング研究センター (Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University)

いる補足を参照のこと。また、本稿で記載されているURLは1999年10月現在)、アメリカではTerra (EOS-AM1)/MODIS (<http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/MODIS/MODIS.html>) が打ち上げられ、現在運用されているNOAA/AVHRR, Landsat/TM, SPOT/HRV等と併せて、まさに現在は“宇宙からの地球観測時代”といえる。これらの衛星群から得られるデータを、水文学分野で活用するためには、アルゴリズム開発が急務である。

GLIやMODISに代表される、新規搭載センサーの特徴として、より多くのバンド(チャンネル)を持ちつつ、高い観測頻度を保つ点が挙げられる(Table 1)。これらのチャンネル情報の組み合わせから、新たな指標を導き出せる可能性がある(例えば, Hayashi *et al.*, 1998)。そこで重要となるのは、地上検証 (Ground Truth) である。

従来の地上検証では、数回の衛星通過時のみ地上観測を行い、衛星データとの比較を行う例が非常に多かった。しかし、最近植物季節(フェノロジー)あるいは季節変化に基づいた長期(数ヶ月~数年)観測が非常に有効、かつ必要であることが分かってきた(樋口ほか, 2000)。PGLIERC (Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center) はそのような視点に基づき、GLIやMODISを意識した水文・リモートセンシング観測として計画された。

PGLIERCの目的は以下の4点に要約される:

- 1) GLI, MODISのような多バンド衛星で、どのような地上物理量を推定できるか検証する。
- 2) これまでの衛星データから得られた水文学的知見の妥当性を、特にフェノロジーに着目し、再検討する。
- 3) 植生指標と地表面温度の組み合わせが、植物の成長、土壌水分の変化に伴いどのような変動を示し、水文学、特に大気-陸面相互作用にどのように応用できるか検討する。
- 4) 植生の成長に伴う、BRDFモニタリングおよびそのモデリング。

本稿では、PGLIERCの観測概要、観測結果の

一部、及び今後本観測で得られる知見について速報的に報告する。

Table 1 A comparison of the specifications of GLI with those of MODIS.

	GLI	MODIS
No. of Bands	36	36
Swath Width	1600 km	55-2330 km
Resolution	250m, 1km	250m to 1 km
Altitude	803 km	705 km
Data Rate	4.1 Mbps	6.1 Mbps (avg.)
Recurrent Period	4 Days	1-2 Days

Fig. 1 Map of the study site.

II. 観測概要

1. 観測サイト

観測サイトは筑波大学水理実験センター(現. 筑波大学陸域環境研究センター)熱収支・水収支実験圃場(北緯36.1度, 東経140.1度, 標高27.0m)である。この実験圃場は(Fig. 1), セイタカア

Fig. 2 Overview of PGLIERC.

C*... continuous experiment, T*... temporal measurement.

ワダチソウ、ヨモギ等のC 3植物、メリケンカルカヤ、チガヤ等のC 4植物が混在する(戸田, 1997; 田中・及川, 1998)直径160mの円形の草地である。表層25cmまでは明褐色の粘質土壌であり、間隙率は約70%である(濱田ほか, 1998)。圃場中央には30mの気象観測タワーが設置されており、乱流観測を含む30項目にわたる気象・水文要素が定常的に計測されている(詳しくは鳥谷ほか, 1989; 新村・杉田, 1998を参照)。

PGLIERCの水文・リモートセンシング観測では、定常的な熱収支・水収支観測に加え、タワー頂部からの衛星の代替センサー(リモートセンサー)による地表面情報取得が必要不可欠である。本研究では気象・水文要素が定常的に計測され、観測タワーが設置されている水理実験センター圃場を観測サイトとした。

2. PGLIERCによる測定項目

PGLIERCは、大きく分けて以下の6つの観測要素からなる(Fig. 2)。

- 1) 気象・水文要素定常観測(前述)
- 2) 定点定常観測
- 3) 移動観測(グリッド観測)
- 4) バイオマス計測
- 5) タワー観測(リモートセンサーによる観測)
- 6) BRDF観測

それぞれの観測項目について、以下に説明する。

2.1 定点定常観測

定点定常観測は、草地内の1地点において行われている。観測項目は以下の通りである(カッコ内は観測測器を示す)：

- ・上向き・下向き短波放射(EKO, MK-22)
- ・上向き・下向きPAR(PREDE, PAR-01; Fig. 3)

Fig. 3 PAR radiometer.

- ・放射温度 (Everest, 4000A)
- ・体積含水率 (Campbell Sci., Inc., CS 615)

これらは平均化時間15分でデータロガーに取得される。取得データは集中観測システム (樋口・杉田, 1998; 樋口ほか, 1999) を用いて, 以下のURLに準リアルタイムで公開している:

<ftp://www2.suiri.tsukuba.ac.jp/Datalogger/>

この他に以下の項目が計測されている:

- ・散乱日射
- ・体積含水率 (9 地点; 埋設位置に関してはFig. 4 を参照)

2.2 移動観測 (グリッド観測)

実験圃場南東部に縦 (中心から周縁) 方向に40 m, 横方向に20 mの範囲に, 縦8 m, 横5 mの長方形のグリッドを計30個設置した (Fig. 4)。各グリッド毎に50 cm角の囲い (コドラート) を施し, 以下の項目を1~2週に1度計測した:

- ・可視~近赤外分光反射スペクトル (Spectron Engineering, Inc., SE590; 測定波長: 396~1073 nm, 測定波長間隔: 約2 nm)
- ・放射温度 (ミノルタ, 505; 測定波長: 8~14 μ m, 射出率: 0.98で固定)
- ・体積含水率 (IMKO Inc., TRIME-FM)

2.3 バイオマス計測

以下の物理量を1~2週に1度計測した。

- ・草丈: 前述した各コドラートに対し, 草種,

Fig. 4 Schematic diagram of the grid measurements.

本数, 草丈を全て実測した。

- ・植被率: 各コドラートに対し, 真上よりデジタルカメラで撮影し, 教師付き分類法で計算した。
- ・LAI: 各草種に対し, 刈り取りを毎回5本程度行い, それぞれの草丈と葉面積を測定し, 成長曲線 (草丈-葉面積の関係) を求めた。草丈データにこの成長曲線を当てはめ, LAIを推定した。
- ・バイオマス: LAIとバイオマスとの関係 (例えば, 田中・及川, 1998) より推定した。
- ・クロロフィル量: SPADメーターを用いて, 各草種約5株, 各株約5葉について計測した。一方, 実験室でアセトンによる抽出を行い (Lichtenthaler, 1987), 実際のクロロフィル量を計測して較正曲線を作成し, 先に計測したSPAD値を, クロロフィル量に換算した。

Fig.5 An example of the BRDF measurement by spectrometer.

2.4 タワー観測 (リモートセンサー)

圃場中央の30mタワー頂部より、以下の4項目を測定した:

- ・可視・近赤外画像 (SILVACAM: 樋口・近藤, 1998)
- ・熱映像 (JEOL/日本電子, JTG-6300)
- ・可視～近赤外分光反射スペクトル (2.2に同じ)
- ・可視画像 (Fuji Film Inc., FinePix 500)

全ての観測は定点観測地点を中心として行った。

2.5 BRDF観測

地表面の反射特性は光源 (太陽) 方向と観測方向の両方に依存する (例えば, Asrar, 1989)。BRDFはその様子を表すものであり, BRDF観測から地表面の構造, 特にLAIや葉の角度分布などが推定できる可能性が指摘されている (例えば, Knyazikhin *et al.*, 1998)。

ここでは, 草の成長に伴うBRDFの変化を調べるため, 1m四方のコドラートを設け, 不定期に観測を行った。長さ3mの可動式アームの先端に分光放射計を取り付け, 太陽方位を含む鉛直面内 (*principal plane*) と, それに直交する鉛直面内の両面で, 鉛直下向きを0度とし, ± 60 度の範囲を10度間隔で観測した (Fig. 5)。

III. 観測結果

本章では観測結果の一部を示す。なお, 今回提示するデータの取得期間は, 1999年4月9日から10月1日までである。

1 定点観測によるフェノロジー (植物季節) モニタリング

植物季節 (フェノロジー) は生態学のみでなく, 光合成活動に伴う蒸散速度の変動という点からみても, 水文学においても非常に重要な観点である。本節では, PGLIERCの定点観測データより, 草地のフェノロジーを検証してみることにする。

定点観測より, PAR領域, および近赤外域の分光反射率が計算できる:

$$\rho_{\text{PAR}} = \text{PAR} \uparrow / \text{PAR} \downarrow \quad (1)$$

$$\text{NIR} \downarrow \approx \text{Rs} \downarrow - \text{PAR} \downarrow \quad (2)$$

$$\text{NIR} \uparrow \approx \text{Rs} \uparrow - \text{PAR} \uparrow \quad (3)$$

$$\rho_{\text{NIR}} = \text{NIR} \uparrow / \text{NIR} \downarrow \quad (4)$$

ここで, ρ は各波長域での反射率, Rs は全短波放射 ($\downarrow, \uparrow$ はそれぞれ下向き, 上向きを示す), PAR は可視光, NIR は近赤外光を示す。

短波放射 ($0.15 \sim 3 \mu\text{m}$) は, 紫外線 ($0.15 \sim 0.4 \mu\text{m}$), 可視 ($0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$), 近赤外 ($0.7 \sim 1.5 \mu\text{m}$), および中間赤外 ($1.5 \sim 3 \mu\text{m}$) の各波長領域までわたるが, このうち紫外線はオゾン層で吸収され, 中間赤外はエネルギー的に少ない上, 水蒸気の吸収帯が多い。近似的に(2)式, (3)式では短波放射量と可視光の差分は近赤外光に等しいとみなした。

Fig. 6に (a) 全短波放射での反射率 (アルベド), (b) PAR領域の分光反射率, (c) 近赤外の分光反射率の季節変化を示す。

アルベドは, 樋口ほか (2000) に示したものと同様, 4月は減少, 5月から6月中旬まで増加し

Fig. 6 Seasonal changes in (a) the surface albedo, in (b) spectral reflectance in PAR wavelength, and in (c) that in NIR wavelength.

ていた。これは、PAR領域、近赤外波長で分離すると、4月の減少はPAR領域の減少に伴う現象で、5月以降は近赤外の増加に伴うものであることがわかる。近赤外の反射率増加がPAR領域の減少よりも遅れるのは、それぞれの波長域に対する植物群落の応答性の違いによるものである。

PAR領域では、LAI値が小さくても草が出芽すれば、可視域の分光反射率は急激に減少する。

樋口ほか(2000)では、同観測地点のアルベドの季節変化特性から、以下の推測を立てている(以下引用)“近赤外域の反射率は植物体に依存するが、個葉では約40%~60%であり、残りの大部分は透過して地面に吸収される。ところが植生がある程度成長し、葉が重なりキャノピー内での多重散乱がおこるようになると、地面に到達し、吸収される近赤外光は減り、近赤外光の反射が多くなると考えられる”。Fig. 6での近赤外の反射率の変化特性は上記の推測を指示する結果となり

Fig. 7 Seasonal changes in (a) SR and (b) NDVI.

うと考えられる。

PAR領域と近赤外の反射率から、リモートセンシング分野でよく用いられる植生指標(VIs)が算出できる。今回はその中で最もよく用いられるSRおよびNDVIを算出した。算出式は次式である：

$$SR = \rho_{NIR} / \rho_{PAR} \quad (5)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{PAR}}{\rho_{NIR} + \rho_{PAR}} \quad (6)$$

Fig. 7にSR、NDVIの季節変化を示す。どちらもフェノロジーをよく表現している。ただし、極大値(6月下旬)を迎えた後の応答性がSRとNDVIには違いが見られる。SRは極大値を迎えた後、7月下旬まで減少し、その後ほぼ一定であった。一方、NDVIは極大値を迎えた後、SRよりもその幅は少ないが、わずかながら減少し、その後ほぼ一定であった。

今後はどの植生指標が地上物理量の推定に適しているかを、実測データに基づき、検証する必要がある。

2. タワー観測による分光反射特性の季節変化

GLIの多バンド情報から得られるものを把握するために、30 mタワー頂上よりスペクトロメー

Fig. 8 Examples of the hyper-spectral reflectance derived from a spectrometer, observed on the top of 30m me-

Fig. 9 Seasonal change in the ratio of vegetation cover. Solid line shows the growing stage of grassland. Dotted line shows after growing stage.

ターによる観測を行った。Fig. 8 に観測例を示す。

4月27日はFig. 6よりPAR領域の反射率が減少していた時期にあたり、スペクトロメーターからも、Fig. 6と矛盾しない結果が得られた。

5月14日は、近赤外の反射率はほとんど変化していない。一方、PAR領域の反射率、特に赤(0.6~0.7 μm)に明確な減少が認められた。

6月7日には、近赤外波長の反射率増加が顕著に見られたが、PAR領域の反射率では、緑の増加を除き5月14日とほとんど変わらなかった。

Fig. 9に植被率の季節変化を示す。植被率は5月初頭から6月にかけて直線的に増加し、6月中

旬には80%に達した。この結果からも、植被率の増加が、近赤外の反射率増加の原因であると考えられる。

以上の結果より、タワー観測データは定点観測の結果によく対応している。これは、2つの手法が時間分解能と波長分解能を補いあう好例であろう。今後は、定点観測で時間的に補完しつつ、GLIチャンネルをこのデータより発生させることで、GLIで得られるものは何かを模索する必要がある。

3. 移動観測 (グリッド観測) によるNDVIと地表面温度の関係

NDVIと地表面温度 (T_s) の関係 (以下、VI- T_s 関係) は、地表面の土壤水分状態や群落コンダクタンスを反映する (例えば、Nemani and Running, 1989)。すなわち、横軸にNDVI、縦軸に地表面温度をとったグラフ上でVI- T_s 関係は負の傾きを持つ直線状に分布するが、乾燥状態ではその傾きが急になり、湿潤状態では緩やかになると言われる。しかし、それを土壤水分の実測に基づいて検証した例はほとんどない。

ここでは短期間に水分状態が大きく変動した観測例を示す (Fig. 10)。土壤の乾燥化に伴って、VI- T_s 関係の傾きが急になり、同時にばらつきが広がっていく様子が確認できた (西田ほか, 2000)。

4. BRDF

BRDF観測結果の例をFig. 11に示す。これは太陽方位が1つのみの観測結果であり、厳密にはBRDFの「双方向性」を満たすものではないが、BRDFの特徴的な様子がよく見られる。

例えば、*principal plane*における+10度の反射 (後方散乱) では、ちょうど観測方位と太陽方位が一致して、影の無い強い反射が表れるために (いわゆるHot Spot効果)、可視光・近赤外光ともに大きな反射が見られた。その効果の程度は可視光と近赤外光で若干違うため、NDVI値はこの方位付近で低い値をとっている。また、*principal plane*に直交する鉛直面で観測される分光反射率は、ほとんど変わらなかった。

Fig.10 Time series of (a) amount of rainfall, (b) those of volumetric water contents at 5 cm depth, and (c) scatter diagram of NDVI with brightness temperature (after Nishida et al., 2000, after modified).

Ⅳ. 議論と結論

PGLIERCのこれまでの観測結果・解析結果より以下のことが明らかになった：

1. 定点観測から、可視域（PAR領域）の反射率と近赤外域の反射率の季節変化特性は異なっていたことが分かった。前者は草の出芽に伴う急激な減少によって特徴づけられ、後者は植生の増加（植被率の増加）による多重散乱の結果として、徐々に増加していた。
2. 定点観測より計算された植生指標（NDVI, SR）はどちらも草地のフェノロジーをよく反映していた。
3. タワー頂部からのスペクトロメーター観測か

Fig.11 Data obtained from an example of BRDF measurement. (a) spectral reflectance in red wavelength, (b) that in NIR, and (c) NDVI.

* Degree indicates that positive values represent the back and right angles, and negative denotes the opposites.

ら、定点観測結果と矛盾しない結果が得られた。これは2つの観測手法が時間分解能と波長分解能を補う好例である。

4. 移動観測（グリッド観測）より、短期間に土壌の乾燥化に従ってNDVIと地表面温度の散布図の傾きが急になり、同時にばらつきが広がっていく様子が確認できた。
5. BRDF観測より、後方散乱では、観測方位と太陽方位が一致した際に起こる大きな反射（Hot Spot効果）が見られた。

また、PGLIERCから今後以下の知見が得られると考えられる：

1. 植生指標から群落抵抗の推定(Verma *et al.*, 1993)のさらなる検証。PGLIERCでは時間分解能、空間分解能、波長分解能の高いデータを手に入れることができる。推定の可能性、および限界点の提示が可能である)
2. 植生指標と地表面温度の組み合わせの地上検証、及びその妥当性(西田ほか, 2000)のさらなる検証。地上観測による検証はこれまで全く行われていない。衛星で見られる現象が地上観測レベルで見られるか、検証する)
3. 複数の測定手法によるフェノロジーモニタリング、およびフェノロジーと蒸発散量との関連(樋口・近藤, 2000, のさらなる検証。近年“フェノロジー”がリモートセンシング研究のキーワードである。全ての分解能が高いデータセットでどのように“フェノロジー”がモニターされるか検証する)
4. GLIデータを用いた新しい指標、アルゴリズムの構築(GLI/MODISは高波長分解能が最大の特徴である。地上で同時に計測した物理量との関連性を考察し、アルゴリズム構築を行う)
PGLIERCの観測結果は全て、インターネット及びCD-ROMでの公開を目指している。参加者以外の研究者がPGLIERCのデータセットを用いて、新たな知見を導き出すことを期待する。

V. 終わりに

現在、研究分野の細分化への反省から研究領域の総合化が図られつつある。PGLIERCの出発点は、ベースを異にする著者らの(樋口：理学、西田：農学)率直な意見交換にある。今後このような観測をきっかけとし、広い領域を網羅した共同研究、しかもそれぞれが対等な立場での研究が多く行われることを期待したい。

謝 辞

本観測の主旨を理解し、協力してくださった筑波大学水理実験センターの皆様に対し、感謝の意を表します。Fig. 1は筑波大学地球科学系・濱田洋平博士より提供していただいた。また、匿名の査読者の皆様にも感謝いたします。なお、本観測は千葉大学環境リモートセンシング研究センターの支援を受け、概要は1999年水文・水資源学会研究発表会にて発表した。

補足(略語解説)

ADEOS-II: Advanced Earth Observation Satellite-II (日本が主導する国際共同衛星。2000年にNASDAにより打ち上げ予定)

APAR: Absorbed PAR (植物によって吸収される光合成有効放射量。正規化するため、fraction APAR (fAPAR)で扱うことが多い。本研究ではfAPARは次式で求める：

$$fAPAR = 1 - PAR_{\uparrow} / PAR_{\downarrow}$$

ここで注意すべきは、Intercepted PAR [植生によって遮断されたPAR]とは若干異なる点である。両者の違いについてはJoel *et al.*, 1997, また、その基礎はRussell *et al.*, 1989が詳しい)

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA衛星に搭載されているセンサー、可視から熱赤外まで他波長チャンネルでカバー)

BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function (双方向反射分布関数)

EOS: Earth Observing System (アメリカの国際共同次世代衛星プラットフォームで、AMシリーズとPMシリーズがそれぞれ打ち上げ予定)

GLI: GLobal Imager (ADEOS-IIに搭載される広域センサー。多チャンネル観測が特徴)

HRV: High Resolution Visible (SPOT衛星

に搭載された可視・近赤外センサー)

LAI : Leaf Area Index (葉面積指数. LAIは次式で定義される :

$$LAI \equiv \int_0^h a(z) dz$$

ここで, h は最長草丈, $a(z)$ は葉面積密度で, 各高度 z における単位体積空間に存在する葉の片面の面積である [渡辺, 1994]。実際には刈り取り後, 面積計で葉面積を計測する, あるいは草丈-葉面積の成長曲線より算出することが多い)

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (EOSに搭載されるセンサー。GLIと似た特徴を持つ)

NASDA : National Space Development Agency of Japan (宇宙開発事業団)

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (正規化植生指標. 定義式は本文に示している。様々な地上物理量 [LAI, バイオマス, クロロフィル量等] および各種フラックス [光合成速度, 蒸発散速度等] と関連があると報告されている。詳しくは西田ほか, 2000, Asrar, 1989等を参照)

NIR : Near-InfraRed (近赤外波長)

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA Satellites (米国海洋大気庁, NOAA衛星)

PAR : Photosynthesis Active Radiation (0.4 ~ 0.7 μm) (光合成有効放射, 植物体の光合成のエネルギー源として, そのほとんどが吸収される)

SPOT : Systeme Probatoire d'Observation de la Terre (フランスSPOT Image社の商用衛星)

SR : Simple Ratio (植生指標の1つ. 算出式は本文に示している。NDVIよりもSRの方がLAI推定に向いているという研究例も見られる)

TM : Thematic Mapper (Landsat-5号搭載センサー。可視~熱赤外まで7バンドでカバー)

VIs : Vegetation Indices (植生指標の総称.

基本的には植物体の可視・近赤外波長の分光反射特性の違い [可視光はよく吸収, 近赤外光は多くを反射] を利用したもので, 現在様々な植生指標が考案されている。各植生指標の出力特性を示す研究例として, Rondeaux *et al.*, 1996が挙げられる)

文 献

田中克季・及川武久 (1998) : 水理実験センター内円形圃場草原におけるC3・C4植物のLAIの季節変化(1996, 1997). 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 87-90.

戸田求 (1997) : 草原群落・大気間のCO₂/H₂O交換過程の季節変化に関する実験的研究. 筑波大学大学院修士課程環境科学研究科修士論文, 89 pp.

鳥谷均・川村隆一・嶋田純・谷口真人・西本貴久 (1989) : 気象日報作成装置新システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 13号, 147-158.

濱田洋平・A. R. インドラ F.・田中正 (1998) : 筑波大学水理実験センター内アカマツ林および熱収支・水収支観測圃場における土壌の物理特性. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 1-10.

樋口篤志・近藤昭彦 (1998) : 可視-近赤外ビデオカメラによる琵琶湖プロジェクト'96での水田観測. 水文・水資源学会誌, 11, 382-386.

樋口篤志・杉田倫明 (1998) : 筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場における特別観測用データ収録システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 91-94.

樋口篤志・杉田倫明・飯田真一 (1999) : 筑波大学水理実験センター水収支・熱収支観測圃場における, 新・特別観測用データ収録システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 24号, 135-141.

樋口篤志・近藤昭彦・池田正一・黒子裕史 (2000) : 草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛

- 星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性および植生指標との関係, I. 各土地被覆での地表面フラックスの季節変化. 水文・水資源学会誌, 13, 124-136.
- 樋口篤志・近藤昭彦 (2000): 草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性および植生指標との関係, II. 衛星から得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性と地表面フラックスの関係. 水文・水資源学会誌, 13, 137-147.
- 新村典子・杉田倫明 (1998): 熱収支・水収支観測資料, -1997年-. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 103-136.
- 西田顕郎・樋口篤志・松田咲子・近藤昭彦 (2000): VI-Ts法: 分光植生指標と表面温度に基づく, 地表面過程のリモートセンシング. 水文・水資源学会誌. (投稿中)
- 渡辺 力 (1994): 植物と大気. 近藤純正編, 水環境の気象学 -地表面の水収支・熱収支-, 朝倉書店, 208-239.
- Asrar, G., Ed. (1989): *Theory and application of optical remote sensing*. Wiley, New York, NY, 734 pp.
- Choudhury, B. J. (1991): Multispectral satellite data in the context of land surface heat balance. *Rev. Geophys.*, 29, 217-236.
- Hayashi, A., K. Muramatsu, S. Furumi, Y. Shiono, N. Fujiwara, and M. Daigo (1998): A n algorithm and a new vegetation index for ADEOS-II/GLI data analysis. *J. Remote Sens. Soc. Japan*, 18, 28-50.
- Joel, G., J. A. Gamon, and C. B. Field (1997): Production efficiency in sunflower: the role of water and nitrogen stress. *Remote Sens. Environ.*, 62, 176-188.
- Knyazikhin, Y. V., J. V. Martonchik, R. B. Myneni, D. J. Diner, and S. W. Running (1998): Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *J. Geophys. Res.*, 103 (D24), 257-275.
- Lichtenthaler, H. K., (1987): Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382.
- Nemani, R. R., and S. Running (1989): Estimation of surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *J. Appl. Meteorol.*, 28, 276-284.
- Rondeaux, G., M. Steven, and F. Baret (1996): Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 55, 95-107.
- Russell, G., P. G. Jarvis, and J. L. Monteith (1989): 2. Absorption of radiation by canopies and stand growth. Russell, G., B. Marshall, and P.G. Jarvis, Ed., *Plant canopies: their growth, form and function*. Cambridge University Press, New York, NY, 21-39.
- Sellers P. J., S. O. Los, C. J. Tucker, C. O. Justice, D. A. Dazlich, G. J. Collatz, and D. A. Randall (1996): A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *J. Climate*, 9, 706-737.
- Verma, S. B., P. J. Sellers, C. L. Walthall, F. G. Hall, J. Kim, and S. J. Goetz (1993): Photosynthesis and stomatal conductance related to reflectance on the canopy scale. *Remote Sens. Environ.*, 44, 103-116.

(受付 1999年10月26日)

(受注 2000年2月21日)

この論文に対する「討論」を2000年11月30日まで受け付けます。