

GMS-5 データを用いた毎時間日射量データ 推定手法の開発

ESTIMATION OF DIURNAL VARIATION OF DOWNWARD SHORT-WAVE RADIATION USING GMS-5 DATA

甲山 治¹・田中 賢治²・池淵 周一³

Osamu KOZAN, Kenji TANAKA and Shuichi IKEBUCHI

¹学生会員 工修 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻 (〒 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)

In this study, the dataset that is homogeneous in time and space was created by using meteorological and hydrological data obtained during HUBEX-IFO (1998/5/1-8/31). The domain of this dataset is from E110 to E122, and from N31 to N36 with 5min (about 10km) resolution. This dataset was produced to be used as forcing data for Land Data Assimilation by land surface scheme (SiBUC). Although the dataset created from the surface meteorological variables has much difficulty in the description of diurnal variation of radiation, since the original data are daily accumulated values. Then GMS data and the simple physical model are introduced to improve the diurnal variation of downward short-wave radiation. Furthermore, the mesh-data of hourly short-wave radiation is made using this method.

Key Words : GMS5, short-wave radiation, simple physical model, zonde data

1. 序論

(1) 本研究の背景と目的

GEWEX(全球水・エネルギー循環観測実験)のもとで展開されている大陸スケール観測プロジェクトの1つとして、アジアモンスーン域を対象としたGAME(GEWEX Asian Monsoon Experiment)の集中観測がすでに実施された。GAMEは4つの地域プロジェクト(チベット, タイ北部, 中国淮河, シベリア)からなり, アジアモンスーンの変動とその大陸スケールエネルギー・水循環との関係を深く理解し, 各気候帯毎の地表面熱収支の観測とモデル化, 大気陸面結合モデルの開発と相互作用等を解明すること, さらに水資源の変化や自然災害の予測手法の開発を研究目標としている。

対象領域である淮河流域は, 典型的なモンスーン影響下の稲作地帯であると同時に, 梅雨前線の停滞によって洪水の被害を被ってきた地域である。また世界でも有数の穀倉地帯であることから, 対象流域における洪水被害は中国のみならず世界の食糧事情にも影響を及ぼす重要な地域であり, 被害を低減するための洪水予測手法の確立は重要である。

同時に, 日本周辺域における気象予測の側面からも, 日本の西方に位置する淮河流域での気象現象・水循環を理解することは, 予測精度向上のため重要である。またモンスーン研究の見地からも, 東アジア特有の現象

である梅雨前線の生起・持続のメカニズムに重要な影響を与えている淮河流域における水・熱フラックスの推定は, 非常に重要度の高い問題である¹⁾²⁾。

しかし対象流域における従来の研究では, 長期間の積算値による水・熱収支推定しか行われてこなかった。そこで水・熱フラックスの日内変化を表現し得る, 詳細な陸面過程モデルを適用することによって, 陸面データ同化の実行が可能となる。ここで, 陸面データ同化とは, 観測値ベースの気象強制力を陸面モデルに与えて, 熱収支・水収支を推定することである。気象モデルで雨や放射を正確に予報するのは困難であるため, 気象モデルに依存しない形でフラックスを推定することが陸面データ同化のねらいである。

また陸面モデルのみならず GAME の各地域間の比較までも視野に入れ, 現地観測データ³⁾, 客観解析値, 衛星データ等を総合的な解析をおこなう水・熱収支研究 WEBS (Water & Energy Budget Studies) にも利用されるとともに, WEBS における解析を通じて, 本データセットの検証並びにさらなる精度向上を目指す。

(2) 作成した日射量データ

本研究では, GAME-HUBEX プロジェクトの集中観測期間に取得された気象・水文観測データを用いて (図-1 参照), 陸面過程モデル (SiBUC) 実行時に大気境界条件となるメッシュデータセットを作成した⁴⁾。しかし地

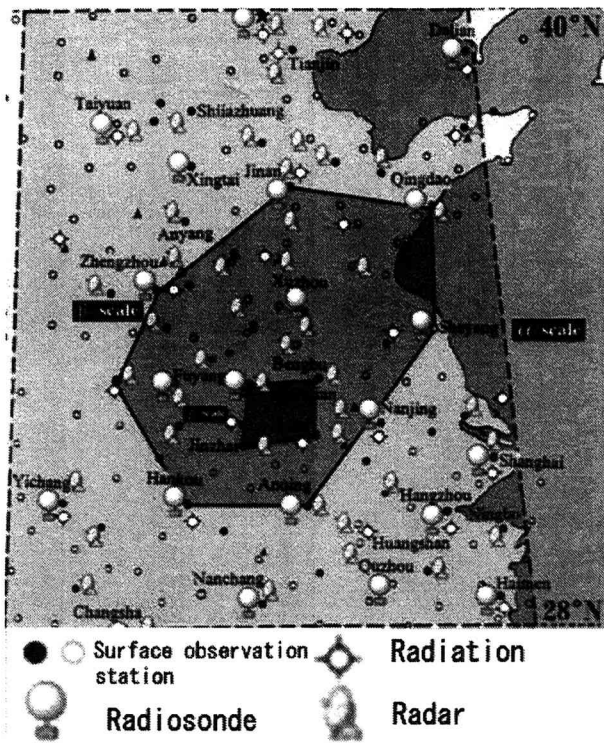


図-1 GAME-HUBEX の観測領域

上観測データのみを用いたため、元データが日積算である日射量では日内の微妙な変化を表現できていないなどの問題点があった^{5) 6)}。日射量データは水・熱収支推定において最も基本となる気象強制力であり、その精度は解析結果に大きな影響を及ぼす。そこで本研究では、物理モデルと衛星画像 GMS-5 データを用いて日射量メッシュデータの改善を試みた。

2. 適用したモデル

本研究で適用したモデルは Gautier らによって開発された物理モデルを用いた⁷⁾。このモデルの特徴を以下に記す。

- (a) 可視画像 (VIS) と地表面の露点温度のみを用いる
- (b) 地表面や雲のアルベドは逆算により求める
- (c) 雲を考慮しないモデル (晴天モデル, 図-2 参照) と雲を考慮したモデル (曇天モデル) を使い分けている

(1) 地表面アルベドの推定

地表面アルベドは適用期間内では不変であると仮定する。したがって、同一時刻 (天頂角の影響をうけなくするため) での雲や大気による影響が無いときの地表面のアルベドを晴天モデルを用いて推定する。

- (a) 露点温度から可降水量を求める⁸⁾
- (b) 可降水量から大気中の水蒸気による入射光, 反射光それぞれの吸収係数 ($a(u_1), a(u_2)$) を求める⁹⁾
- (c) 天頂角 (θ) から大気による入射光, 反射光それぞれの散乱係数 (α_1, α) を求める¹⁰⁾

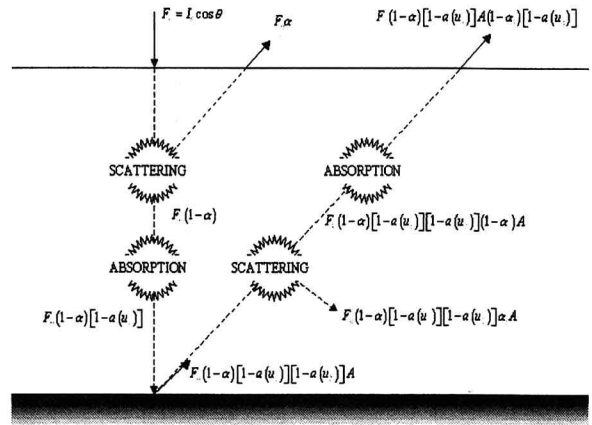


図-2 晴天モデルの概念図

- (d) 可視画像 (VIS) の輝度 (%) を晴天モデルの式 ((3) 式) に適用し、地表面のアルベド (A) を逆算する
- (e) d. で得られたアルベドのうち同位置で最も低い値を、実際の (雲の無いときの) 地表面アルベドとして決定する

以上のようにして対象地域の地表面アルベドを求める。使用する式と記号を以下に記す。

SW ↑ ; 上向き短波放射フラックス (Wm^{-2})
 SW ↓ ; 下向き短波放射フラックス (Wm^{-2})
 F_0 ; 大気上端から入射する短波放射フラックス

$$VIS = SW \uparrow / F_0 \times 100 \quad (1)$$

$$SW \uparrow = F_0 \alpha + F_0 (1 - \alpha) [1 - a(u_1)] \quad (2)$$

$$\times [1 - a(u_2)] (1 - \alpha_1) \cdot A$$

$$A = \frac{SW \uparrow - F_0 \alpha}{F_0 (1 - \alpha) [1 - a(u_1)] \cdot [1 - a(u_2)] (1 - \alpha_1)} \quad (3)$$

(2) 曇アルベドの推定

- (a) また雲よりも上部に存在する水蒸気量は全体の 30%, 下部の水蒸気量は全体の 70% と仮定し、入射光, 反射光の上部, 下部それぞれの吸収係数 ($a(u_1)_t, a(u_1)_b, a(u_2)_t, a(u_2)_b$) を求める
- (b) VIS が基準値未満のときは雲が無いとして晴天モデルを適用し、式 (5) より日射量を推定する
- (c) VIS が基準値以上のときは曇天モデルを適用する。可視画像 (VIS) の輝度 (%) を曇天モデルの式 (式 (4)) に適用し、雲上端のアルベド (A_c) を逆算する
- (d) 雲上端の反射率 (A_c) に係数をかけて、雲の吸収率 (a_c) を決定する
- (e) 4. で得られた雲アルベドを曇天モデルに適用し、式 (6) より日射量を推定する

$$SW \uparrow = F_0 \alpha + F_0 (1 - \alpha) [1 - a(u_1)_t] (1 - \alpha_1) A_c \quad (4)$$

$$\times [1 - a(u_2)_t] + F_0 (1 - \alpha) [1 - a(u_1)_t] (1 - A_c - a_c)^2$$

$$\times [1 - a(u_1)_b] A (1 - \alpha_1) [1 - a(u_2)_t] [1 - a(u_2)_b]$$

(3) 日射量推定の式

- 晴天モデルの式

$$SW \downarrow = F_0 (1 - \alpha) [1 - a(u_1)] (1 + A \alpha_1) \quad (5)$$

- 曇天モデルの式

$$SW \downarrow = F_0 (1 - \alpha) [1 - a(u_1)_t] (1 - A_c - a_c) [1 - a(u_1)_b] \quad (6)$$

(4) モデルの検証

GAME-HUBEX 全体に適用する前に、用いたモデルの検証を行った。解析対象地域と解析に使用したデータは以下のとおりである。

- 適用地域 : 中国安徽省寿県 (Shouxian)
- 緯度経度 : E116.77, N32.58
- 解析対象期間 : 6/3 (Day of Year=154) ~ 6/29 (Day of Year=173)
- 入力データ : GMS5 の可視画像 (VIS ; 解像度約 10km), 寿県気象台で観測された露点温度
- 検証データ : 入力値と同時刻の前後 30 分に対応する 1 時間積算の日射量

適用結果のうち、解析対象期間内の全ての解析値を縦軸に、観測値を横軸に取ったプロットと、観測値との標準誤差 (RMSE) を図-8 中図に示す。全体として午前中は大きく午後は小さく推定され、日積算の値も若干大きな値をとる傾向が見られた。期間を通しての RMSE は $91.8(\text{Wm}^{-2})$ 程度であった。

3. 可降水量データの検証

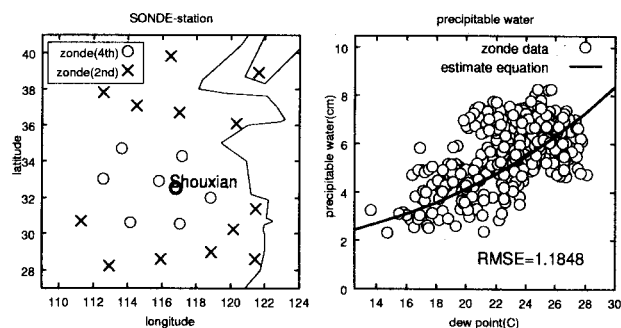
(1) ソンデデータの利用

上記のモデルでは、地表面の水蒸気圧から関係式を用いて可降水量を計算し⁸⁾、大気中の水蒸気による日射量の減衰を決定した。一方、対象領域においてはゾンデのデータが利用できることから、関係式の妥当性を調べた。ゾンデの観測期間は 1998/6/1~7/31 の 2 ヶ月間で、観測回数は 1 日 2 回 (0,12 時)、観測地点は 20 地点 (図-3 左図中の×印)。ただし IOP 期間の 6/11~7/22 には 7 つの観測所で 1 日 4 回 (0,6,12,18 時) の観測が行われた (図-3 左図中の○印)。

Shouxian と最も近い 3 点である Fuyang, Anqing, Xuzhou の各地点において、可降水量の推定値 (図-3 右図中の曲線) を、観測されたゾンデデータ (図-3 右図中の○印) と比較したところ、RMSE で $1.1848(\text{cm})$ 程度の精度を示した。

(2) ソンデデータのモデルへの適用

寿県から近い 3 つのステーションから重みが距離に反比例するようにゾンデデータを空間内挿し、観測されていない時間は線形になるように時間内挿して、可



ゾンデ観測地点

可降水量の検証

図-3 ソンデデータの解析

降水量のデータを作成した。モデルに適用する前に、ゾンデデータを内挿した値 (図-4 上図実線) と推定式を用いた値 (図-4 上図点線) を比較したところ、推定式が常に過大もしくは過小評価しているという傾向は見られず、全体としても妥当な値をとっていることが分かる。また大きな差異が見られる時期は日射量が少ない、すなわち上空に雲が存在する時期と一致する (図-4 下図)。したがって、曇天時には地表面の露点温度から可降水量を求めることは難しいといえる。

作成した可降水量データをモデルに適用したところ、日射量推定の精度は RMSE で 91.8 から $90.6(\text{Wm}^{-2})$ と、 $1.2(\text{Wm}^{-2})$ 改善された。上記の結果から本研究で用いたモデルは非常に簡略化しているモデルではあるが、今後ゾンデデータや GPS 可降水量データなど、観測された物理的要素をモデルに組み込むことによって、さらに精度を向上させることが出来る可能性がある。

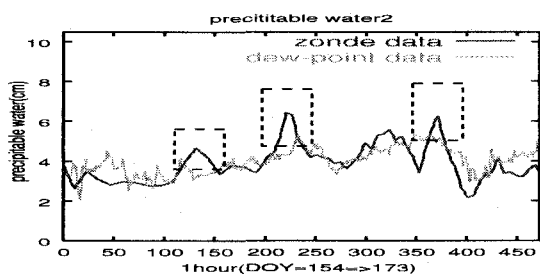
一方、精度の向上が約 $1(\text{Wm}^{-2})$ に留まったことから、地表面の水蒸気圧と推定式を用いた場合でも可降水量の精度は十分であることが分かった。現在入手しているゾンデのデータは 6,7 月にのみであり、そのうえ観測点の数が少ないことから、すべての地点においてゾンデ観測地点が取り囲むように周辺に存在する寿県と、同様の精度を期待することはできない。

以上のことから、本研究では対象領域全体において得ることの出来る精度を議論するために、以後はゾンデデータを使用しない場合の精度に関しての解析を進めることにする。

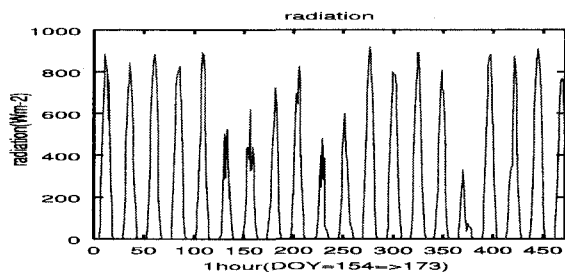
4. モデルの改良

(1) 現地経度データを用いた補正

現在のモデルでは大気上端から入射する太陽放射を日時、緯度、時刻 (Beijing Standard Time) から決めていたが、対象ピクセルごとの経度のデータを用いて、現地の時刻 (Local Standard Time) における太陽高度に則した補正を行った。これにより午前中は解析値より観測値が大きく、午後は小さくなるのが改善され、RMSE で $12.8(\text{Wm}^{-2})$ 程度、精度が向上した。



ゾンデデータの内挿値と推定値の比較 (6/1-7/31)



観測された日射量 (6/1-7/31)

図-4 ゾンデデータのモデルへの適用

(2) パラメータを用いたキャリブレーション

次にモデル内で用いている5つのパラメータと、本来はモデル内で逆算されるはずの地表面アルベドをパラメータとして設定しキャリブレーションを行った。目的としてはモデルの推定精度を高めるだけでなく、各要素の物理的な整合性を検討することである。

決定する順番は、他のパラメータに及ぼす影響が大きいと思われるものから順に (a) から (f) まで行い、他のパラメータを固定した状態で1つのパラメーターのみを変化させて日射量を推定し、推定値と観測値の RMSE が小さくなるように決定した。

(a) 晴天モデルと曇天モデルの閾値:1.1

解析対象期間内で最も晴れた日 (VIS の値が小さいとき) の VIS (正午時で 12.314 %) を 1.1 倍した値を時間ごとに計算し、VIS の値がそれ以下ならば晴天モデルを、それより大きいときは曇天モデルを用いる。これにより全体の約 19 % が晴天モデル、81 % が曇天モデルにより計算される。

(b) 大気による日射減衰の増加率:1.925

日射量減衰の要因としては、水蒸気のほかにチリや砂埃などといったエアロゾルが考えられる。現在モデル内では、エアロゾルによる減衰の効果は考慮していないことから、水蒸気による減衰の効果を増加させることで効果を表現している。雲の効果も考慮しなくても良いよう、晴天モデルの条件に適合するケースのみを用いて増加率を算出したところ、1.925 倍のときが最適であった。

(c) 雲の上下に存在する可降水量:0.025 % (上部)/99.975 % (下部)

GMS5 の IR1,2 から雲頂温度を計算した。雲頂温度 (縦軸) と VIS (×; 横軸下), ゾンデを解析して得られた雲の下部に存在する可降水量の割合 (※; 横軸上) と雲頂温度のプロットを図-5 に示す。雲

頂温度が -20°C 以下のときは多くのケースにおいて、全体の水蒸気量の 99 % 以上が雲の下部に存在していることがわかる。

ただし雲の吸収率でもいえることだが、VIS, IR1,2 のデータの解像度は約 10km メッシュであるため、メッシュのすべての領域に雲が存在しているわけではないので、これ以上の解析は困難である。VIS に関してはオリジナルデータのピクセルが約 1.25km であるので、それを併用することで、1つのピクセル内で晴天モデルと曇天モデルを用いることが可能になるとと思われる。

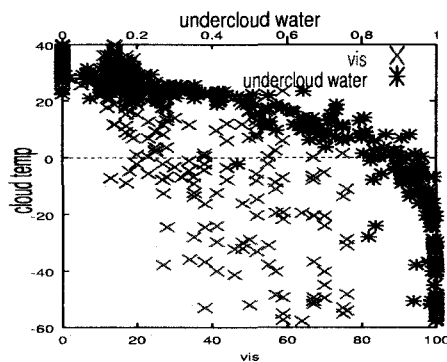


図-5 雲頂温度と可降水量, VIS の関係

(d) 雲自身の吸収率:1 %

雲自身の吸収率を、モデル内で計算された雲上端の反射率 (0.0~1.0) に比例させた。過去の研究では 7 % であったが、本研究では 1 % のときが最適であった。要因としてはモデル内で逆算している反射率の値が、実際より過大評価であることが考えられる。

(e) 地表面アルベド:0.19

正午付近 (11~13 時) の最も晴れた状態において、晴天モデルを用いて算出したアルベドは 0.1293 であったが、キャリブレーションの結果では 0.19 が最も精度が良かった。したがって実際のアルベドは、算出したアルベドより大きい可能性がある。

(f) 雲の反射率の上限:87.5 %

モデル内では雲の反射率を逆算により求めているため、VIS の値が大きいときには雲の反射率が 100 % になり、雲よりも下部には日射量が到達しない。したがって VIS が大きいときにも、日射が地表面に到達するように上限を設定した。

以上のキャリブレーションの結果、全体の RMSE は $3.9(\text{Wm}^{-2})$ 程度改善された。

(3) 改良したモデルの検証

改良したモデルとパラメーターを適用した結果を図-7 に示す。実線が観測値、破線がモデルの解析値 (GMS), 点線が日照時間データを用いた解析値 (surf) を表している。晴れの日 (DOY=156) は正確に推定できた一方、全体的に曇りの日 (DOY=169) や、曇りと晴れが混在する日 (DOY=171) は正確にあらわすことはできなかった。

次に、解析期間全体における各手法の推定精度の比

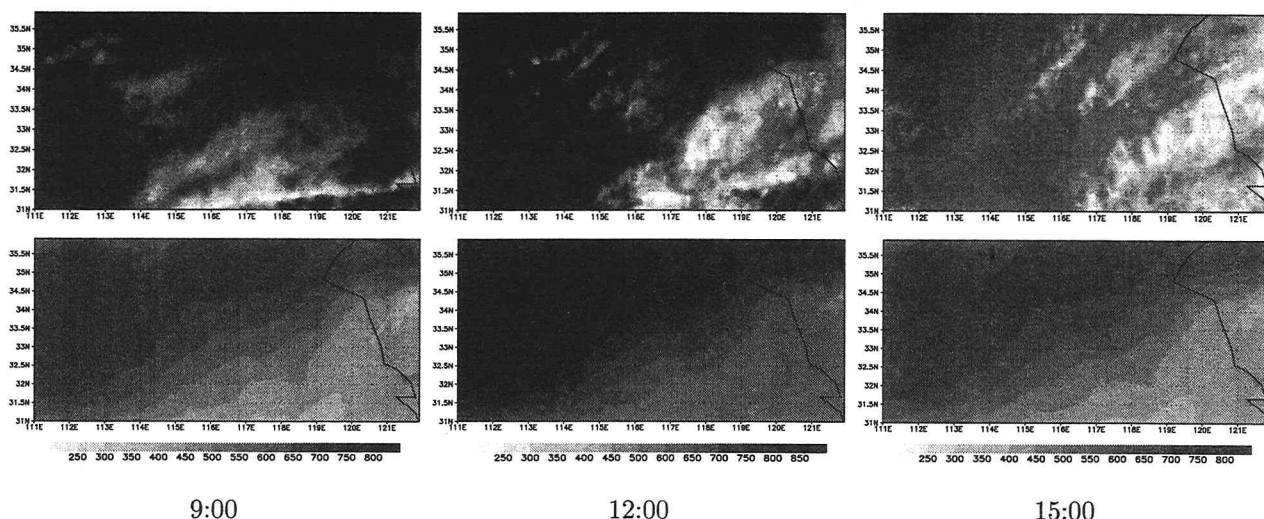


図-6 HUBEX 領域の日射量メッシュデータ (6/20 ; DOY=171)

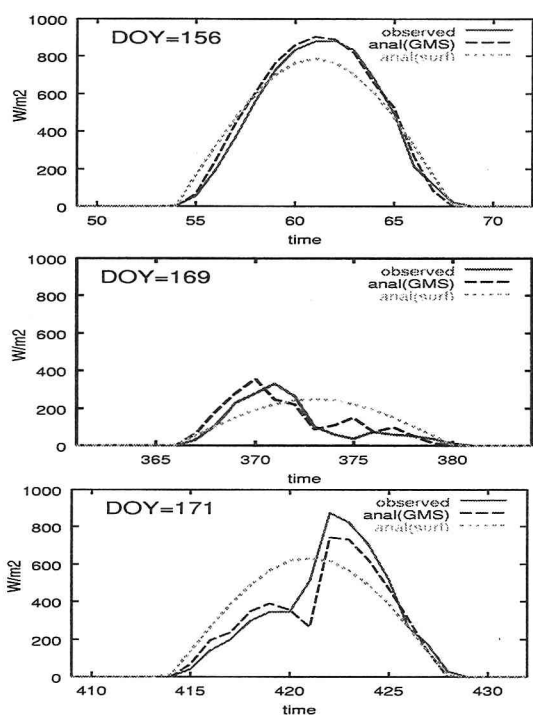
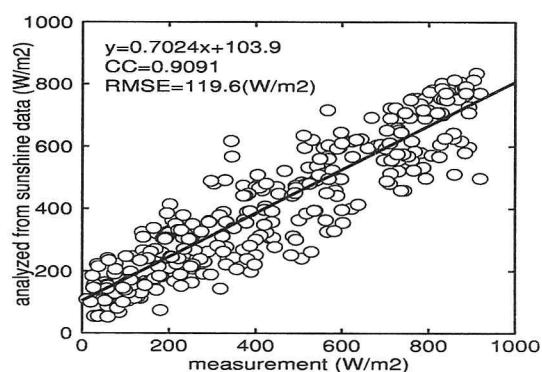


図-7 1 日毎の解析値と観測値の比較

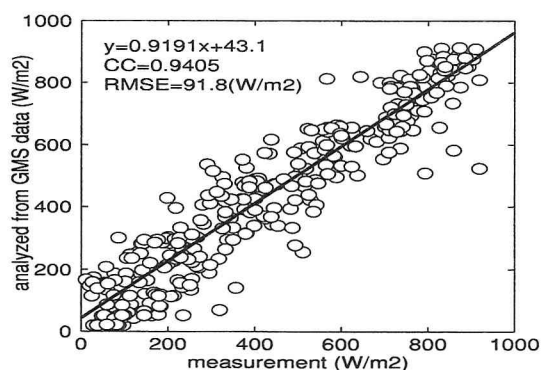
較を図-8 に示す。各散布図のプロットは y 軸が解析値、x 軸が観測値を示しており、図中の式は上から順に回帰直線、回帰直線との相関係数、期間を通した RMSE を表している。

ここで日照時間を用いた手法とは、対象ピクセルの緯度・日付から求めた日照時間と、気象観測所で得られた日積算の日照時間データを用いて推定した⁶⁾日積算日射量を、各時刻の天頂角に応じて配分したものであり、毎時間日射量の RMSE は $119.6(\text{Wm}^{-2})$ 程度であった(図-8 上図参照)。一方、改良したモデルを用いた手法では $75.1(\text{Wm}^{-2})$ となり、2 つの手法を比較すると、 $45(\text{Wm}^{-2})$ 程度の改善がなされたことがわかる。

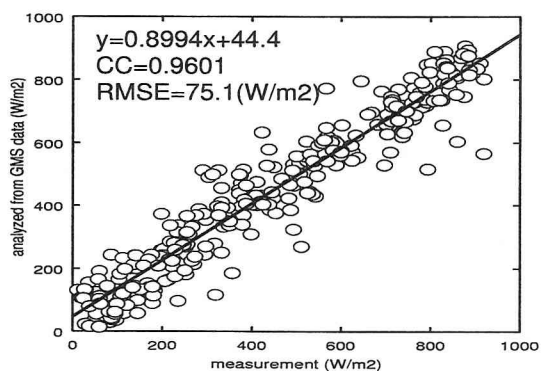
本研究ではインプットデータとして解像度約 10km のデータを用いたことから、1 つのピクセルを均質に扱



日照時間データを用いた手法



オリジナルモデル



改良したモデル

図-8 解析値と観測値の比較 (6/3~29, 寿県)

わざるをえなかった。今後解像度の細かい VIS データを併用することで、さらに精度が向上することが考えられる。

5. 日射量メッシュデータの作成

改良したモデルの精度が確認できたことから、上記の手法で期間内(5/1~8/31)の毎時間日射量メッシュデータの作成をおこなった。解析対象範囲は N31-36, E111-122 で、解像度は 5 分メッシュ(約 10km)である。露点温度のデータは、以前に作成した水蒸気圧メッシュデータを用いて計算した⁴⁾。用いたメッシュデータは解析対象領域に存在する観測点(150 地点)のデータを用い空間的に内挿して作成したもので、解析期間を通しての精度は RMSE で 1.980(hpa) 程度であった。

メッシュデータ作成期間では 1ヶ月ごとに各メッシュごとの地表面アルベドを推定し、曇天モデルに使用した。オリジナルの手法では、期間内の最も雲の影響のない条件から地表面アルベドを求めていたが(2.(1)参照)、メッシュデータを作成する地点や期間によっては求めた地表面アルベドの値が異常な値とることがあった。したがって晴天モデルに適用されるケースで求めた地表面アルベドの平均値を、期間内の曇天モデルに与えられる地表面アルベドに設定した。さらに閾値を設け、アルベドの値を下限値を 0.02 に上限値を 0.4 に制限した。

地表面アルベドの推定手法を変更した上で、再び寿县においてキャリブレーションを行った結果、晴天モデルと曇天モデルの閾値が 1.25、大気による日射減衰の増加率が 1.90、地表面アルベド以外のその他のパラメータは 4.(2)と同じ値のときに精度がよく、算出した日射量と観測値の RMSE は $76.6(\text{Wm}^{-2})$ (6/3~29)であった。また地表面アルベドの値は 0.1574 であった。これらの結果を踏まえ、以上の手法・条件のもとで全域のメッシュデータを作成した。

6/20(DOY=171)の各 9:00, 12:00, 15:00 における、モデルを用いて推定したメッシュデータを図-6 の上部に、日積算の日照時間データを用いて推定したものを下部に示す。両者を比較すると、モデルから得られた推定値は HUBEX 領域全体における日射量の細かい時・空間分布を表していることが分かる。

6. 結論

本研究では毎時間日射量メッシュデータ作成のため、GMS5 データと露点温度のみを用いる簡潔な物理モデルを適用した。またオリジナルのモデルをそのまま用いるのではなく、いくつかの点を改良した。以下に本研究で行った改良点を挙げる。

- ゾンデデータから求めた可降水量データの導入
- 現地経度にもとづく補正
- モデル内 6 パラメーターの設定と検証

このうち可降水量データに関しては、より信頼できるデータを用いることで改善の余地があること、また現地経度から大気上端からの日射量を補正することで、大きく精度が改善することを示した。パラメーターの設定では、それらの持つ物理的意味を確認しながら、全体の日射量推定精度が向上するように設定した。以上の結果 RMSE で $75.1(\text{Wm}^{-2})$ 程度の精度を得ることが出来た。この精度は実用衛星を用いた研究の中ではまずまずの結果であることがわかる¹¹⁾。この他にエアロゾルデータの導入や、1 グリッド内にサブピクセルを導入することで多少の精度向上が期待出来る。新たなデータを入手し次第、今後さらなる改良に取り組む。

最後に、対象領域において毎時間メッシュデータを作成したが、地点によってはモデル内で算出したアルベドが、現実にはありえない数値を取ることがあった。現在アルベドはモデル内で逆算して求めているが、今後 GMS5 以外のリモートセンシング情報からアルベドを求めることで、更なるモデルの物理的意義の検証と踏み込んだ議論が可能である。

参考文献

- 1) 武田喬男・坪木和久：モンスーンアジア地域のエネルギー・水循環のプロセス解明-亜熱帯・温帯モンスーン地域観測研究計画(中国淮河流域観測計画), GAME Publication No.1., 1996.
- 2) Takeda, T.: Preliminary Research Report on Japanese GAME/HUBEX, GAME Publication No.9., 1998.
- 3) 田中賢治・椎葉充晴・池淵周一：GAME/HUBEX-IOP の水・熱フラックス観測の速報, 京都大学防災研究所年報, 第 42 号 B-2, pp.121-140., 1999.
- 4) 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, 京都大学修士論文, 2001.
- 5) 近藤純正：水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-
- 6) 近藤純正・中村亘・山崎剛：日射量および下向き大気放射量の推定, 天気, No.38, pp.41-48., 1991.
- 7) Gautier, C., Diak, G. and Masse, S.: A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data, J.Appl.Meteor., 19, 1005-1012., 1980.
- 8) Smith, William L.: Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point, J.Appl.Meteor., 5, 726-727, 1966.
- 9) Paltridge, G.W.: Direct measurement of water vapor absorption of solar radiation in the free atmosphere, J.Atmos.Sci., 19, 1005-1012, 1973.
- 10) Coulson, K.L.: Characteristics of the radiation emerging from the top of a Rayleigh atmosphere, 1 and 2. Planet. Space Sci., 1, 256-284., 1959.
- 11) 木津昭一：実用衛星計測に基づく海面日射量の推定, 海の研究 VOL.8, No.1, pp. 1 to 24, 1999.

(2002. 9. 30 受付)