

# 衛星データからの時間スケールの 正味放射量推定の可能性

## Satellite Estimation of Hourly Net Radiation : How Realistic Is It?

杉田 倫明\*

Michiaki SUGITA

### I はじめに

地表面熱収支を知る上で正味放射量は欠くことの出来ない要素である。研究目的では、測定することで求めるのが普通である。ところが、広い地域を扱おうとする場合や測定器を設置するのが実質的に不可能なところの場合は、正味放射量を測ることが出来ない。そこで、なんらかの方法で推定する必要がでてくる。本稿では、衛星データを用いた正味放射推定法の開発の前段階として、推定の上でどこが問題なのか、どこに重点をおくべきかを検討した。

さて、正味放射の推定には、正味放射そのものをなんらかの方法（たとえば比較的容易に測定可能な日射量にある経験的係数を掛け合わせる）で直接推定する方法と、正味放射を構成する放射収支の要素を個別に測定または推定し、加えあわせることで正味放射を得る方法の2つが考えられる。前者は一般的に係数を求めるためのキャリブレーションが必要である。得られた係数を用いることで普通満足のいく推定値が得られるが、対象とする場所、季節などで係数の値を変える必要があり、多くの場所を対象とする場合やキャリブプレートがそもそも出来ない場合には効果的な方法ではない。一方後者は、衛星からのリモートセンシングによる放射収支項の測定技術の発展に伴い、今後の進展が期待される方法である。本稿では主にこの方法について検討する。

これまでこのような個々の放射収支項の推定は行なわれていたものの、地理的に異なる場所での研究であったり、求めた放射フラックスの空間的、時間的なスケールが異なっていたりしたため、それらをあわせて総合的に正味放射推定という観点から検討することは必ずしも容易ではなかった。幸いなことに、最近アメリカ合衆国カンザス州北東部に設けられた15×15kmの実験地域で行なわれた大型野外観測計画 FIFE (First ISLSCP Field Experiment, International Satellite Land Surface Climatology Project) から得られた様々なデータ、研究結果を参照することで、同一地域、同一の季節について同一のスケールでの議論が可能になった。

### II 放射収支項の推定

地表面の放射収支は、以下の式であらわされる。

$$R_n = R_{ld} - R_{lu} + R_{sd} - R_{su} \quad (1)$$

ここで、 $R_n$  は正味放射、 $R_l$  : 長波放射、 $R_s$  : 短波放射で添字の  $d$  および  $u$  は放射フラックスの下向きおよび上向きをそれぞれあらわす。以下各項の推定について検討してみる。

#### 1) 下向き長波放射

地表面付近の気温、水蒸気圧と雲量データから推定する方法と、大気の水蒸気圧プロファイル、雲量などの情報を入力として放射伝達モデルを用いて推

\*筑波大学地球科学系・水理実験センター

定する方法がある。

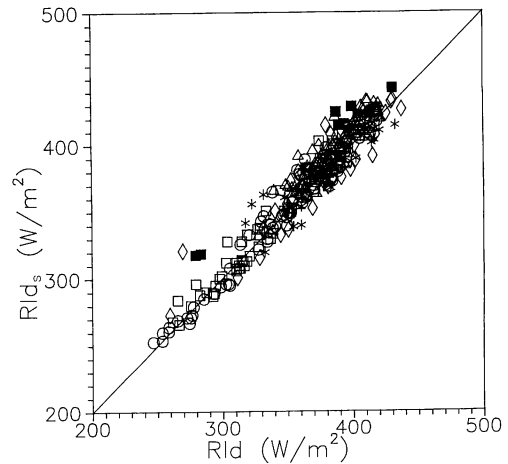
後者の方法は、Bréon *et al.* (1990) により試された。彼らは水蒸気圧プロファイル、雲量の値として、アメリカ合衆国海洋大気庁(NOAA)が気象衛星NOAAシリーズ上に搭載されたTOVS(TIROS Operational Vertical Sounder)の測定値からルーチ的に作成しているデータを用い、放射伝達モデルを通して  $Rld$  の値を求め、実測値と比較した。結果は残念ながらあまり良くなく、両者の差は  $20\text{W/m}^2$  以上であった。その原因として彼らは、TOVSデータのスケール( $250\text{km} \times 250\text{km}$ )と実測値が代表するスケールの違い、TOVSデータの雲量データの質があまり良くないことを上げています。

一方、前者の例として Sugita and Brutsaert (1993a) は以下の実験式をテストした。

$$Rld = Rldc(1 + u mc^v) \quad (2)$$

$$Rldc = a(e/Ta)^b \sigma Ta^4 \quad (3)$$

ここで、 $Rldc$  は晴天時の下向き長波放射量、 $mc$  : 雲量、 $e$ ,  $Ta$  : それぞれ地表面付近の水蒸気圧(hPa)と気温(K)、 $\sigma$  : ステファンボルツマンの定数、 $u$ ,  $v$ ,  $a$ ,  $b$  : キャリブレーションにより決まる定数である。 $a$ ,  $b$  の値として FIFE の実験地域に対してそれぞれ0.980, 0.0687が得られ、(3)により快晴時の  $Rldc$  の瞬間値を  $8\text{W/m}^2$  程度の標準誤差で推定できることが示された。また、キャリブレーション無しで中緯度標準大気を仮定して理論的に求めた値、 $a = 1.24$ ,  $b = 1/7$  (Brutsaert, 1975)をそのまま用いた場合でも標準誤差は  $13\text{W/m}^2$  程度であった。そして、このようにして得られた  $Rldc$  を(2)に代入し、キャリブレーションによって  $u = 0.0496$ ,  $v = 2.45$  と定めてやることで、雲の有無、多少にかかわらず  $Rld$  を  $15 - 17\text{W/m}^2$  の標準誤差で推定することが出来た。さらに、 $u$ ,  $v$  を雲の種類ごとに決めてやることで標準誤差を  $12\text{W/m}^2$  まで減らせることが示された。第1図にこの場合の推定値と実測値の比較を示す。一方、雲量データとして TOVS のものを用いると、(2)の  $u$ ,  $v$  の値をどのように決めてやっても雲量データがない場合に比較した推定値の精度の向上を図ることは出来ず、Bréon *et al.* (1990) の結論と同じく TOVS 雲



第1図 (2)式に雲の種類ごとに定めた係数を用いて得た下向き長波放射量の推定値  $Rld_s$  と実測値

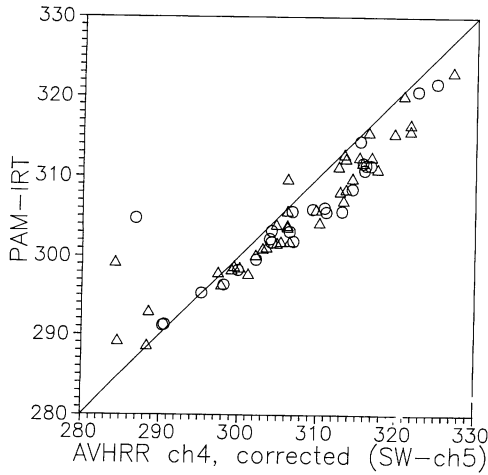
$Rlds$  の比較。白丸：快晴、白四角：巻雲、三角：積雲、菱形：高積雲、星印：巻層雲、黒四角：層積雲、黒丸：巻積雲がそれぞれあった場合である。

(Sugita and Brutsaert, 1993a より抜粋)。

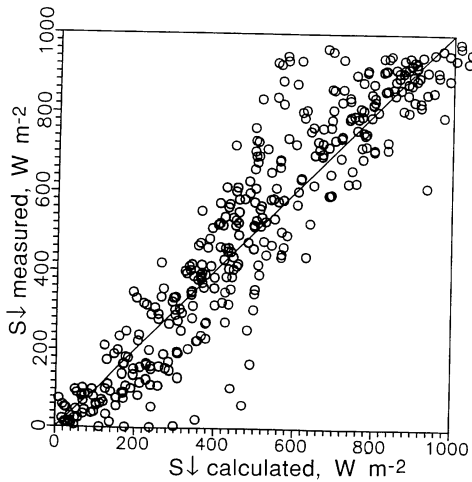
量データの質に問題があるように思われた。

## 2) 上向き長波放射量

Sugita and Brutsaert (1993b) は、様々な気象衛星の様々なセンサー(Landsat/TM, NOAA/AVHRR, NOAA/TOVS, GOES/VISSR)から得られた赤外領域の放射データにいくつかの大気補正法を適用し地表面温度の算出を行なった。得られた値は、 $15 \times 15\text{km}$  の FIFE 実験地域内の地表面直上に設置された12個の赤外放射温度計で計られた地表面温度と比較された。第2図は、NOAA-9号のAVHRRのチャンネル4と5のデータに、スプリットウィンドウ法(Price, 1984)を用いて大気補正することで得られた地表面温度と放射温度計のそれを比較したものである。他の衛星、センサーのデータを用いた場合もおおむね同じ様な結果が得られている。標準誤差としてあらわすと、NOAAとLANDSATのデータを用いると完全曇天時をのぞき  $1 - 3\text{K}$  程度、GOESのデータを用いると雲のあるときは結果は非常に悪く  $4\text{K}$  程度、快晴のときだけに限れば  $1 -$



第2図 NOAA 9号 AVHRR の4および5チャンネルのデータをスプリットウィンドウ法 (Price, 1984) により大気補正することで得た地表温度 (横軸) と12個の放射温度計のメディアンとして得られた地表温度 (縦軸) の比較。両者とも温位に換算してある。丸は晴天時 (雲量 $<3/8$ )、三角はくもり (雲量 $\geq 3/8$ ) の場合のデータである。(Sugita and Brustaert, 1993b より抜粋)。



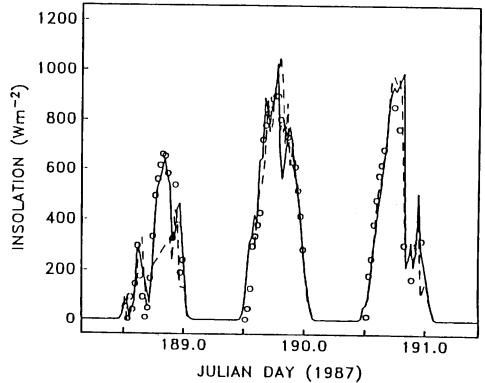
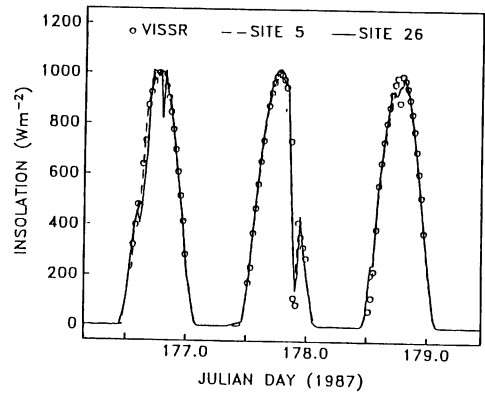
第3図 実測の短波放射量 (縦軸) と(4)式によって推定した放射量 (横軸) の比較。(Brutsaert and Sugita, 1992より抜粋)。

2 K 程度であった。

さて、地表温度が分かるとステファンボルツマンの法則より、上向きの長波放射を求めることが出来る。そのようにして、 $R_{lu}$  を求めた場合の標準誤差は、300K 付近のデータを扱うとして、NOAA と Landsat 6— $19\text{W}/\text{m}^2$  であり、GOES の快晴時に限った場合で  $6\text{--}12\text{W}/\text{m}^2$  程度となる。ただし注意しなければならないのはいずれの衛星でも、完全曇天時にはデータが得られないことである。

### 3) 下向き短波放射量

Brutsaert and Sugita (1992) は、大気外日射量  $R_{sdx}$  に地表面で得られた雲量データ  $mc$  を用いる



第4図 FIFE 観測地域内2地点における実測の短波放射量 (SITE 5 と SITE 26) と GOES のデータから推定した放射量 (VISSR) の時間変化の比較。

(Frouin and Gautier, 1990より抜粋)。

$$Rsd = Rsdex(c + d \cdot mc) \quad (4)$$

の利用を試みた。ここで、 $c$ および $d$ は実験的に決る係数である。FIFE 実験地域で得られた  $mc$  および  $Rsd$  データを用いキャリブレーションした結果、 $c = 0.8060$ 、 $d = -0.4261$ が求まり、さらにそれらを使って  $Rsd$  を推定したところ、標準誤差は $113\text{W/m}^2$ であった(第3図)。

一方、Frouin and Gautier (1990) は、静止衛星 GOES の可視データを雲の影響を考慮した放射伝達モデルに入れてやることで30分平均の  $Rsd$  を標準誤差 $87\text{W/m}^2$ で求めることに成功した(第4図)。

#### 4) 上向き短波放射量

しばしば  $Rsu$  の値は、 $Rsd$  にアルベドを掛け合わせることで推定される。アルベド20%とし、アルベドそのものの誤差がないとすると、 $Rsu$  推定値の標準誤差は、(4)を用いて  $Rsd$  を推定した場合 $23\text{W/m}^2$ 程度、Frouin and Gautier (1990) の方法を利用した場合 $17\text{W/m}^2$ 程度となる。

#### 5) 正味放射量

正味放射量を(1)より求める場合の誤差を考えてみる。もし4つの放射収支項の誤差が独立であるとすると、それぞれの推定値の標準誤差を加えあわせた値が  $Rn$  の標準誤差となる。この値は、これまで見てきた方法のうち(下向き長波放射を衛星から求める方法を除いて)、長波放射を(2)と(3)に雲の種類ごとに決めたパラメーターを用いて求め、上向きを NOAA/AVHRR のデータから、短波放射を GOES データより求めるとすると $122\text{W/m}^2$ 程度となる。また、短波放射を(4)の実験式から求め、他は同じ様にして求めるとすると、標準誤差は $165\text{W/m}^2$ 程度となる。誤差のうちでは、下向き短波放射のそれが大きく全体のほぼ70%を占めている。したがって、もし、 $Rsd$  の推定の精度を向上させるか、あるいは  $Rsd$  は実測値を使うことで  $Rn$  の推定誤差を大幅に小さくすることが可能となるはずである。

### III おわりに

単一の地域について適用された様々な放射収支項の推定法を検討することで放射収支式(1)式から正味

放射量を推定する可能性について考察した。結果として、現段階では精度の点で全ての項目を衛星データから推定することは問題があることが分かった。特に、下向き長波放射は地表面付近の気象データを用いる単純な推定式を用いた方がはるかに良い結果が得られる。そのように下向き長波放射を求め、他の項を衛星データから求めるとすると、各項の誤差が独立と仮定して正味放射の推定値の標準誤差が $120\text{W/m}^2$ 程度となることが示された。この誤差の70%は下向き短波放射の誤差であり、もしこれを向上させられれば正味放射量の推定精度を大きく上げることが出来る。ただ長波放射の場合と異なり、衛星データを使うことをやめ単純な推定式を用いても精度の向上は図れなかった。したがって(衛星データの質の向上がなされるまで)現状では、短波放射の実測値を利用できるよう測定の面的密度、時間的頻度を上げるのが得策となろう。幸いなことに放射項の中では短波放射は比較的測定の容易なものである。

### 文 献

- Bréon, F.-M., Frouin, R., and Gautier, C. (1990) : Satellite estimate of downwelling longwave irradiance at the surface during FIFE. *Proc. of Amer. Met. Soc. Symp. on FIFE*, 92-97.
- Brustaert, W. (1975) : On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies, *Wat. Resour. Res.*, **11**, 742-744.
- Brutsaert, W. and Sugita, M. (1992) : Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation. *J. Geophys. Res.*, **97**, 18377-18382.
- Frouin, R. and Gautier, C. (1990) : Variability of photosynthetically available and total solar irradiance at the surface during FIFE : a satellite description. *Proc. of Amer. Met. Soc. Symp. on FIFE*, 98-104.
- Price, J. C. (1984) : Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *J. Geophys. Res.*, **89**, 7231-7237.
- Sugita, M. and Brutsaert, W. (1993a) : Cloud effect in the estimation of instantaneous downward lon-

gwave radiation. *Water Resour. Res.* (印刷中)  
Sugita, M. and W. Brutsaert (1993b) : Comparison of  
surface temperatures derived from satellite obser-

vations with ground truth during FIFE. *Inter. J.*  
*Rem. Sens.*, (印刷中)