熱慣性を用いた表層土壌水分量推定に関する研究

A STUDY ON ESTIMATING SUBSURFACE SOIL MOISTURE USING THERMAL INERTIA

松島 大¹・木村玲二²・篠田雅人³

Dai MATSUSHIMA, Reiji KIMURA and Masato SHINODA

¹正会員 博(理) 千葉工業大学准教授 工学部建築都市環境学科 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

²非会員 博(理) 鳥取大学准教授 乾燥地研究センター (〒680-0001 鳥取県鳥取市浜坂1390)

³非会員 理博 鳥取大学教授 乾燥地研究センター (〒680-0001 鳥取県鳥取市浜坂1390)

Thermal inertia is the square root of the product of volumetric heat capacity and thermal conductivity. Thermal inertia changes theoretically as the soil water content changes due to the large differences of the two parameters composing thermal inertia between dry soil and water. This study shows a method for retrieving thermal inertia from a heat budget model of the Earth surface incorporating radiative surface temperatures and meteorological data, and the retrieved thermal inertia correlated well with subsurface soil moisture. The analysis extended to difference of performance of the thermal inertia estimation according to the data frequency of surface temperature and meteorological data. Results show that data frequency corresponding to routine meteorological observations and the geostational satellite was enough to roughly discriminate thermal inertia estimates into a couple of ranks of soil moisture.

Key Words : *Thermal inertia, Soil moisture, Heat budget model, Thermal infrared temperature, Data frequency*

1. はじめに

熱慣性とは体積熱容量と熱伝導率の積の平方根として定義され、土壌などの物質の温度の時間的な安定性を表すパラメータである。熱慣性を用いて地表面に近い土壌の水分量を間接的に推定するための研究が、この40年ほど行われてきた。これは乾燥土壌と水を比べると、体積熱容量と熱伝導率はともに、乾燥土壌が小さく水が大きいため、その積である熱慣性も土壌水分量の関数になることが理論的に期待されるためである。Price (1977)¹⁾は人工衛星で観測される日最高及び最低地表面温度とその他の放射・気象条件を用いた、陸面の土壌熱慣性の推定式を提案した。その後、主にリモートセンシングの研究者によって、人工衛星による地表面放射温度を用いたさまざまなアルゴリズムが開発されてきた²⁾³⁾⁴⁾。なお、リモートセンシングによる土壌水分量推定法として、マイクロ波放射を用いる方法が種々研究されている⁵⁾。この方法には雲に影響されない等の利点があるが、熱慣性

を用いる方法には、空間分解能が高い、マイクロ波に比べて過去の衛星データの蓄積が多い、といった利点がある。Verstraeten et al. (2006)⁶⁾が提案したアルゴリズムによる熱慣性推定値は、種々の土地被覆において表層土壌水分量と予測に堪えられる程度の高い相関を示した。ただし、この研究における結果は10日平均値であった。

本研究では、人工衛星による地表面放射温度を用いるものの、これまでの方法とは一線を画し、日射量などの放射条件や気温などの気象条件のデータを地表面熱収支モデルに適用し、モデル・パラメータ全体を最適化することによって、その一つである熱慣性を推定するという方法を用いた。この方法は、Price(1977)¹⁾をさらに複雑に精密化したものともとらえられるが、Price(1977)¹⁾では地表面熱収支が総合的には意識されていなかったため、これまでにはほとんど試されていなかった方法と位置づけることができる。

さらに、第一著者は Matsushima (2006, 2007)⁷⁾⁸⁾において、モンゴル国の草原・森林を対象に、人工衛星データと気象データを用いて、本方法による熱慣性推定を試み

たが、必ずしも表層土壌水分観測値との高い相関を得られなかった．そこで、本研究では、データ使用頻度に応じた熱慣性値の推定精度に焦点を絞り、日単位の表層土壌水分推定を視野に入れた検証を行う．このため、本研究では時間的頻度の小さい人工衛星データに依らず、地上において1分単位で取得されたデータを種々の人工衛星の観測頻度に適合させて推定に用いることとする．

2. データと方法

(1) データ取得地の説明

本研究では2カ所のサイトから取得したデータを用いた．1つは鳥取大学乾燥地研究センター圃場における砂地(北緯35.34°, 東経134.45°)で、2007年7月10日から10月18日までの101日間のデータを解析対象とした．このサイトは約7 m四方の裸地面で、周囲は草丈50 cmほどの草地に囲まれている．サイト内の草は時々手で抜いて裸地の状態を保った．サイトの中央付近のポールに4成分放射計(EKO MR-40, 測定高80 cm)、気温・相対湿度測定のための温湿度計(Vaisala HMP45D, 測定高91 cm)、風向・風速計(Young YG3002, 測定高174 cm)を設置した．ポールの西側には地温計測のためのT型熱電対(測定深2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm)、体積含水率測定のためのADR含水率計(Delta ML2x, 測定深0-5 cm)、熱流板(測定深5 cm)を埋設した．また、雨量計をサイトの東側に設置した．すべてのデータを10秒ごとに計測し、1分平均値としてデータロガー(Campbell CR23X, AT25T, AM16/32)に格納した．

もう1つはモンゴル国トブ県バヤン・ウンジュールのシルト・ロームの土壤に広がる草原(北緯47.04°, 東経105.95°)で、2008年4月27日から6月19日までの54日間のデータを解析対象とした．このデータは2008 Dust-vegetation interaction experiment (DUVEX, Shinoda et al., 2010)⁹⁾ において取得されたものである．植被率は7.2 %で降水量が少なかったためにほとんどが枯れ草だった．50 m × 35 mのフェンスで囲まれたサイト内に、風向・風速計(Young YG3102, 測定高310 cm)、超音波風速計(KAIJO SAT-550, 測定高310 cm)、温湿度計(Vaisala HMP45A, 測定高298 cm)、4成分放射計(Kipp & Zonen CNR4, 測定高150 cm)、気圧計(Vaisala PTB210, 測定高100 cm)、雨量計を設置した．また、地温測定のためのT型熱電対(測定深1 cm, 2.5 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm)、TDR含水率計(IMKO TRIME-EZ, 測定深2.5 cm)、熱流板(測定深1 cm)を埋設した．すべてのデータを5秒ごとに計測し、1分平均値としてデータロガー(Campbell CR1000)に格納した．観測の詳細については、Shinoda et al. (2010)⁹⁾やKimura and Shinoda (2010)¹⁰⁾を参照できる．

なお、土壌の含水率計は、鳥取の場合の機種は長さ5 cmの測定部位を地表面から鉛直下方に差し込むように、

バヤン・ウンジュールの場合は測定部位を水平に、それぞれ埋設した．各含水率計について、事前に絶乾及び飽和状態で定性的な器差比較を行った．含水率計の電圧出力から体積含水率への変換は製造業者による実験式を用いた．なお、本研究では厳密な含水率値は重要でなく、ある程度の誤差を持った熱慣性推定値と土壌水分量との相関を検証することが中心課題となる．

(2) 地表面熱収支モデル

地表面熱収支モデル(以下、「モデル」)はMatsushima (2007)⁷⁾で用いられているもので、植生とその下の土壌面の2層からなり、各層の表面温度を予測変数とする線型化モデルである．本モデルの原型はKondo and Watanabe (1992)¹¹⁾の2層モデルであり、線型化の方法はMatsushima and Kondo (1995)¹²⁾による．モデルの最も骨格となる方程式は式(1)の通りである．

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T'_c \\ T'_g \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} T'_c \\ T'_g \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} S^{\downarrow} \\ L^{\downarrow} \\ T'_a \\ q'_a \\ U' \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 T_c は植生表面温度(K)、 T_g は土壌面温度(K)、 S は日射量(W m^{-2})、 L は下向き長波放射量(W m^{-2})、 T_a は気温(K)、 q_a は比湿(kg kg^{-1})、 U は風速(m s^{-1})、 t は時間(s)である．上付きプライムの記号は日平均値からの差を表している．各変数の日平均値に関する式は別に存在し、本稿では省略する．係数 A 、 B は熱慣性、アルベード、パルク輸送係数、蒸発効率、放射率が含まれた係数行列である．式(1)は右辺第2項における5つの入力変数の変動によって、各層の表面温度が変化することを示している．数値積分の時間ステップは1分とした．さらに、植生層の葉面積指数、放射温度の測定角、各層の長波放射に対する放射率によって、各層の表面温度は1つの放射温度に変換される．式(1)の導出において、地中伝導熱 G_g のモデル化として強制復元法(例えば、Stull, 1988)¹³⁾を用いており、これは式(2)のようになる．

$$G_g = C_g \left(\frac{dT'_g}{dt} + \omega T'_g \right) \quad (2)$$

ここで、

$$C_g = \sqrt{\frac{c_g \rho_g \lambda_g}{2\omega}} \equiv \frac{P_g}{\sqrt{2\omega}}, \quad (3)$$

であり、 P_g が熱慣性である．また、 c_g は土壌の比熱、 ρ_g は土壌の密度、 λ_g は土壌の熱伝導率、 ω は1日の角周波数($= 7.272 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)である．式(2)の各パラメータは理論的に地表面に接する表層を代表とするものとなるが、実際、鳥取の場合について、深さ0-5 cmにおける土壌水分量測定値が深さ10, 20, 50 cmよりも熱慣性推定値と高い

相関を示していた¹⁴⁾。なお、顕熱・潜熱の定式化にはバルク法を用いており、各層の表面温度が計算されると、顕熱・潜熱等の各フラックスも計算されることになる。

パラメータの最適化は、入力変数の日変化が与えられた際の地表面放射温度の変化に対し、観測された地表面放射温度との差が最も小さくなるように行った。最適化されるべきパラメータは各層のバルク輸送係数・蒸発効率、それに土壌の熱慣性であり、これらは日変化しないものとした。なお、バルク輸送係数は風速の1次関数としたため、2つのパラメータによってバルク輸送係数が決まることになる。最適化アルゴリズムには、シンプレックス法を用いた。これは非線形関数の最適化等にも用いられている逐次近似法である（詳しくは、例えばPress et al., 1986¹⁵⁾を参照できる）。逐次計算の回数は上限を180回に設定した。これはたいていの場合、最適化におけるパラメータ値の収束が完全ではなくとも100～150回程度で収まることによる。最適化対象以外のパラメータについては、アルベードは観測値に基づいた日ごとの値、放射率・葉面積指数・放射温度測定角については解析全体に渡った定数をそれぞれ与えた。モデルの詳細については、Matsushima (2007)⁷⁾を参照できる。

(3) データ

モデルを動かすためには入力変数となる日射量、下向き長波放射量、気温、風速、比湿が必要で、これらには測定値をそのまま用いた。風速については、風向・風速計の値を主に用いているが、バヤン・ウンジュールについては風向・風速計の測定値が安定しなかったため、補助的に超音波風速計の値を用いた。比湿については、気温・相対湿度・気圧の測定値から算出した。鳥取については、気圧の測定値がなかったため、鳥取地方気象台のデータを高度補正して用いた。地表面放射温度については、上向き長波放射量をステファン・ボルツマンの法則によって変換して用いた。地中伝導熱の日平均値については、鳥取については熱流板による観測値を用いた。バヤン・ウンジュールについては、熱流板の観測値では計算結果が不安定になったため、Matsushima (2007)⁷⁾でモンゴルの草原を対象に定式化した観測値に基づく地中伝導熱日平均値の経験式を用いた。土壌の体積含水率については日中(9-17時)平均値とした。

本研究は、人工衛星と定常地上気象観測によるデータを用いることを想定して、入力変数となるデータとモデル最適化のための地表面放射温度のデータ頻度による熱慣性推定値の相違に主眼を置いている。本研究における各RUNのデータ頻度は表-1のように設定した。そこで、モデル入力値のデータセットを以下のように設定した。モデルの時間積分ステップは1分で、1分おきに入力変数を与える必要があるため、RUN1ではそのまま測定データを用いた。一方、これ以外については10分平均値を各RUNのデータ頻度に応じた時刻に当てはめ、各データ間

表-1 各RUNに対する日射量、その他の気象データ、地表面放射温度のデータ頻度。分単位の値はデータ間隔で、時単位の値は時刻。カッコ内の時刻範囲はデータを適用した時間を示す。

RUN	日射量	気象データ	地表面放射温度
1	1分	1分	30分 (3時～21時)
2	60分	180分	60分 (3時～21時)
3	60分	180分	10時
4	60分	180分	13時
5	60分	180分	15時
6	60分	180分	10時, 13時
7	60分	180分	10時, 15時
8	60分	180分	13時, 15時
9	60分	180分	10時, 22時
10	60分	180分	13時, 22時
11	60分	180分	03時, 15時
12	60分	180分	10時, 13時, 15時
13	60分	180分	10時, 13時, 22時

は秋間法(Akima, 1970)¹⁶⁾によって1分おきに内挿した。地表面放射温度については、10分平均値を各RUNのデータ頻度に応じた時刻に当てはめた。なおデータ頻度については次のような現実のデータ取得頻度と対応させている。つまり、日射量は静止衛星(毎時)、気象データはモンゴルにおける定常気象観測(3時間毎)、地表面放射温度については、RUN2は静止衛星(毎時)、RUN3-5は極軌道衛星を1日1回、RUN6-11は極軌道衛星を1日2回、RUN12と13は極軌道衛星を1日3回、それぞれ用いることと対応させている。極軌道衛星データを用いる時刻についてはNOAA-AVHRRまたはMODISが日本またはモンゴル上空を通過する時刻を想定している。なお、日射量については、静止衛星データからKawamura et al. (1998)¹⁷⁾のアルゴリズムにより日射量に変換することを想定している。

(4) 統計値

本研究では、各RUNに対する結果を評価する統計値として、相関係数と平均二乗誤差(RMSE)を採用した。最適化された熱慣性推定値は、場合によって物理的に現実性の乏しい値になることがある。例えば $100(\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1})$ 程度の値なら熱伝導率が $10^{-4}(\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1})$ 程度であることを示唆し、逆に $4000(\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1})$ 程度の値なら水体よりも大きな熱慣性値となる。そこで、鳥取・モンゴルにおけるそれぞれの土壌物理定数の観測値を参考に(神近, 1988¹⁸⁾; Sugita et al., 2007¹⁹⁾), 統計値の算出に採用する熱慣性推定値の範囲(以下、統計値算出範囲)を鳥取については500から3000、バヤン・ウンジュールについては600から2000(いずれも単位は $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$)とした。

3. 結果と考察

13のRUNのうち最もデータ頻度の高いRUN1が最も精

図-1 RUN1に対する熱慣性推定値，表層土壌水分量観測値(VSWC)，降水量観測値の日々の時系列．(a)は鳥取，(b)はパヤン・ウンジュールの結果．

度の高い結果が得られた．図-1はRUN1における日々の熱慣性推定値，表層土壌の体積含水率観測値，降水量の時系列を示している．図-2は図-1における熱慣性と土壌体積含水率を散布図に表したものである．鳥取については，統計値の算出対象となった93日分のデータについて，相関係数は0.86だった．パヤン・ウンジュールについては，統計値の算出対象となった53日分のデータについて，相関係数は0.80だった．一方，図-3に示されるように，RUN2については，鳥取とパヤン・ウンジュールともにRUN1に比べて分散が大きくなっているが，相関係数は鳥取とパヤン・ウンジュールについてそれぞれ0.76, 0.72と高い値を保っていた．RMSEの算出にあたって，誤差に相当する部分は次のように定義した．つまり，図-2の統計値算出範囲において，熱慣性と体積含水率の関係に線型性を仮定して近似し，各サンプルの熱慣性値について，同じ体積含水率における回帰直線の熱慣性値との差を誤差とした．回帰直線の式は次のようになった．

$$\text{鳥取} \quad P = 210\theta + 413 \quad (4a)$$

$$\text{パヤン・ウンジュール} \quad P = 51\theta + 788 \quad (4b)$$

ここで P は熱慣性($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$)， θ は体積含水率(%)である．本研究ではこの近似直線における熱慣性値を真値と見なす．なお，土壌が凍結すると式(4a), (4b)の関係は

図-2 RUN1に対する熱慣性推定値，表層土壌水分量観測値の散布図．(a)は鳥取，(b)はパヤン・ウンジュールの結果．RUN番号の'A', 'B'はそれぞれ鳥取，パヤン・ウンジュールを示す．

変化すると想定される．本研究においては，パヤン・ウンジュールの場合に，日によって深夜や明け方に地表面温度が0 以下になり，一時的に凍結したと想定されるが，その時間は短く，また熱慣性推定値は日射量のある日中のデータに大きく影響されると見なせる．このため，本研究で凍土に関する考慮は行わなかった．

図-4にはすべてのRUNについて，このようにして計算されたRMSEと相関係数を示す．相関係数の差の検定により，鳥取及びパヤン・ウンジュールに共通してRUN1の結果と有意差が無いのは，RUN2とRUN13のみだった．RUN2は静止衛星による地表面放射温度データ取得(6分おき)を想定し，RUN13は複数の極軌道衛星による1日3回の地表面放射温度データ取得を想定した場合である．特にRUN2については，鳥取及びパヤン・ウンジュールいずれについても有意水準1 %でも有意差が無かった．他のRUNについては，鳥取がパヤン・ウンジュールの一方しか有意差が無いが，RUN1の結果と大きく離れている．同じ1日3回の地表面放射温度データ取得であっても，日中のデータのみを用いたRUN12では必ずしもよい相関とはならず，これはRMSEについても同様だった．これは，日中と夜間の地表面放射温度の差が一日スケールの日射量等の変化をほぼ反映しているのに対し，日中のみのデータでは，雲による日射量の短時間スケ

図-3 RUN2に対する熱慣性推定値，表層土壌水分量観測値の散布図．(a)は鳥取，(b)はバヤン・ウンジュールの結果．RUN番号の'A'，'B'はそれぞれ鳥取，バヤン・ウンジュールを示す．

ールの変化が地表面放射温度の変化に影響しやすいためである．地表面放射温度が1日1回または2回のRUNについても短時間スケールの変化が誤差のさらなる増大に影響していると考えられる．また，鳥取の場合では特に相関係数が小さいRUNにおいて，統計値算出範囲に含まれるサンプル数が少なくなっている，熱慣性値推定があまり成功していない．式(2)とは逆に，RUN1, 2, 13について，熱慣性を説明変数，体積含水率を目的変数として線型回帰すると表-2のようになった．ここで，鳥取については，熱慣性値の大きい方で傾きの傾向が異なることが

表-2 鳥取，バヤン・ウンジュール(BU)それぞれのRUN1, 2, 13に関する近似直線の傾き，切片，及び標準誤差．

	傾き	切片	標準誤差(%)
鳥取 RUN1	0.0039	- 0.54	0.98
鳥取 RUN2	0.0032	1.23	1.30
鳥取 RUN13	0.0033	0.50	1.37
BU RUN1	0.0101	- 6.32	1.55
BU RUN2	0.0082	- 4.76	1.76
BU RUN13	0.0059	- 2.31	1.84

図-4 13のRUNに対する，(a)熱慣性推定値と表層土壌水分量観測値の相関係数，及び(b)平均二乗誤差(RMSE)．(a)において，**と*は，それぞれRUN1の相関係数と有意水準1%，5%で有意差が無いことを示す．図下部にある2段の数値は上段から鳥取，バヤン・ウンジュールの各RUNに対するサンプル数である．

ら，線形回帰の範囲は $500 - 2500 (\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1})$ とした．標準誤差の値から，熱慣性推定値による体積含水率実現値の95%信頼区間は，鳥取について $\pm 2 - 3\%$ ，バヤン・ウンジュールについて $\pm 3 - 4\%$ となった．これは熱慣性推定値により，土壌水分量を大・中・小のようないくつかのカテゴリーに判別できることを示している．

以上のことから，データ頻度による熱慣性値推定の精度に関して，次のようにまとめられる．最も詳細なデータを適用したRUN1が最も精度が良く，次に静止衛星によるデータ取得に見立てたRUN2が続き，1日3回の極軌道衛星によるデータ取得に見立てたRUN13となった．他のデータ取得頻度については，RUN1による推定精度とは大きく離れ，実用に供するには厳しい結果となった．

4．結論

線型化二層地表面熱収支モデルに，鳥取及びバヤン・

ウンジュールで観測された放射及び気象データを適用して推定された土壌熱慣性値に対し、表層土壌体積含水率の観測値を比較し、熱慣性値による土壌水分量推定精度を検証した。本研究では、人工衛星による地表面放射温度と定常気象観測データを上記の方法に適用することを念頭に置き、各種衛星によるデータ取得頻度についての推定精度を比較した。その結果、静止衛星による日射量データ、3時間おきの地上気象観測データ、静止衛星による地表面放射温度データを用いた熱慣性推定値は、地上における詳細な観測データによるものと有意水準1%で有意差が無いことが確認された。さらに、地表面放射温度については日中・夜間を含めた1日3回のデータによっても、有意水準5%で有意差が無いことが確認された。地表面放射温度データの頻度が1日2回以下の場合、熱慣性推定値の精度は不安定であった。以上より、本研究で採用した方法によって表層土壌水分量の広域分布を推定するには、静止衛星を用いることが最適であることが示された。しかし、静止衛星（例えば、GMS5やMTSAT-1）による地表面放射温度の精度は4 Kを越えることもあって（例えば、Hong et al., 2009）²⁰⁾、極軌道衛星に比べて必ずしも優れないため、高頻度のデータでありながら熱慣性推定精度の向上が期待しにくい。今後は数ある極軌道衛星のデータを効率よく利用する方法を追求するとともに、実際の衛星データを用いた広域における表層土壌水分量の時空間分布について、特に乾燥地域を対象に明らかにすることを課題としたい。

謝辞：本研究は平成19, 20, 21年度鳥取大学乾燥地研究センター共同利用研究費、及び平成19年度千葉工業大学総合研究所研究助成の援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- Price, J. C.: Thermal inertia mapping: a new view of the earth, *J. Geophys. Res.*, Vol.82, pp.2582-2590, 1977.
- Xue, Y. and Cracknell, A. P.: Advanced thermal inertia modelling, *Int. J. Remote Sens.*, Vol.16, pp.431-446, 1995.
- Price, J. C.: On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia, *Remote. Sens. Env.*, Vol.18, pp.59-73, 1985.
- Sobrino, J. A. and Kharraz, M. H. El.: Combining afternoon and morning NOAA satellites for thermal inertia estimation 1. Algorithm and its testing with Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment-Sahel data, *J. Geophys. Res.*, Vol.104, pp.9445-9453, 1999.
- Kaihotsu, I., Koike, T., Yamanaka, T., Fujii, H., Ohta, T., Tamagawa, K., Oyumbaatar, D. and Akiyama, R.: Validation of soil moisture estimation by AMSR-E in the Mongolian Plateau, *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, Vol.29, pp.271-281, 2009.
- Verstraeten, W. W., Veroustraete, F., van der Sande, C. J., Grootaers, I. and Feyen, J.: Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests, *Remote Sens. Env.*, Vol.101, pp.299-314, 2006.
- Matsushima, D.: Retrieval of the surface bulk parameters over Mongolian steppe and forest using a heat budget model incorporating remote sensing data, "*Proceedings of the 2006 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia*", Tokyo, pp.72-73, 2006.
- Matsushima, D.: Estimating regional distribution of surface heat fluxes by combining satellite data and a heat budget model over the Kherlen River Basin, Mongolia, *J. Hydro.*, Vol.333, pp.86-99, 2007.
- Shinoda, M., Kimura, R., Mikami, M., Tsubo, M., Nishihara, E., Ishizuka, M., Yamada, Y., Munkhtsetseg, E., Jugder, D. and Kurosaki, Y.: Characteristics of dust emission in the Mongolian Steppe during the 2008 DUVEX intensive observational period, *SOLA*, Vol.6, pp.9-12, 2010.
- Kimura, R. and Shinoda, M.: Spatial distribution of threshold wind speeds for dust outbreaks in northeast Asia, *Geomorph.*, Vol.114, pp.319-325, 2010.
- Kondo, J. and Watanabe, T.: Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model, *J. Atmos. Sci.*, Vol.49, pp.2183-2199, 1992.
- Matsushima, D. and Kondo, J.: An estimation of the bulk transfer coefficients for a bare soil surface using a linear model, *J. Appl. Meteorol.*, Vol.34, pp.927-940, 1995.
- Stull, R. B.: An introduction to boundary-layer meteorology, *Academic Press*, pp.615, 1988.
- 松島 大・橋本 昂・木村玲二: 放射温度と熱収支モデルを併用した表層土壌水分量推定法の開発, 平成19年度鳥取大学乾燥地研究センター共同研究発表会講演要旨集, pp.23-26, 2007.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P.: Numerical Recipes in FORTRAN, *Cambridge University Press*, 1986.
- Akima, H.: A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol.17, pp.589 - 602, 1970.
- Kawamura, H., Takahashi, S., Takahashi, T., Estimation of insolation over the Pacific Ocean off the Sariku Coast, *J. Oceanography*, Vol.54, pp.457-464, 1998.
- 神近牧男編著: 砂丘地の土壌環境とマルチによる地温制御に関する研究, pp.82, 1988.
- Sugita, M., Asanuma, J., Tsujimura, M., Mariko, S., Lu, M., Kimura, F., Azzaya, D. and Adyasuren, Ts.: Rangelands atmosphere-hydrosphere-biosphere interaction study experiment in Northeastern Asia (RAISE) database, Terrestrial Environmental Research Center, University of Tsukuba, 2007.
- Hong, K., Suh, M., Kang, J.: Development of a land surface temperature-retrieval algorithm from MTSAT-1R data, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, Vol.45, pp.411-421, 2009.

(2010.9.30受付)