

NOAAデータを用いた広域蒸発散量推定モデル

Estimation of Regional Evapotranspiration using NOAA Data

砂田憲吾^{*}・長谷川哲郎^{**}

By Kengo SUNADA and Tetsuro HASEGAWA

In this paper, results of the application of the new method for estimating regional evapotranspiration rate using NOAA-AVHRR data to the areas of central Japan are presented. The method has the following advantages; 1) the estimation procedure is reasonably simple - based on a pixel of an area, 2) surface soil parameters and aerodynamic parameters need not be assumed, and 3) daily averaged values of evapotranspiration can be calculated from a pair of instantaneous, remotely sensed images. The results of the application at the areas show that the method has good potential but need more precise local meteorological data.

Keywords: regional evapotranspiration, bulk coefficient, NOAA-AVHRR.

1. はじめに

広域な陸面からの蒸発散量の推定では、土地利用や地表面条件の多様性・不均一性の評価を前提とした手法が不可欠であり、これには衛星等によるリモートセンシングデータの利用が有効である。この点について、古藤田ら¹⁾はランドサットデータによる土地利用区分の分類を行った上で、Priestly-Taylor の式を基本として関東地方の日蒸発散量の推定を試みてリモートセンシングデータ利用の先駆的解析を行っている。最近では、佐渡²⁾も古藤田らと同様な手法で北海道東部の蒸発散量の推定を示している。また、金子・日野³⁾はランドサットTMデータと通常気象データとを用いて広域熱収支を調べており、さらに、多田・風間・沢本⁴⁾は、NOAA-AVHRRデータによるNDVI(植生指標)の変化をもとに蒸発散量の変化の推定を示している。これらの研究では、リモートセンシングによる土地利用情報、植生情報等をもとに、蒸発散場を分布させて設定する形で検討されてきている。ところで、蒸発散は日々の地表面・気象条件に伴って生ずる現象である。蒸発散量に関する過去の推定や将来の予測とは別に、日々の広域蒸発散量の推定モニタリングも重要である。この観点から、筆者らは太陽同期衛星による毎日定刻の地表面温度情報と地上気象資料とにより、エネルギー収支に基づくバルク拡散係数の逆推定による新たな蒸発散量算定法を検討してきている⁵⁾。この方法は、

* 正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科
(〒400 甲府市武田 4-3-11)

** 正会員 長野県土木部豊科建設事務所
(〒399-82 長野県南安曇郡堀金村烏川)

衛星データ各画素ごとの地表面粗度長や土壌物理パラメタなどの条件を設定する必要のない簡潔な方法である。手法としてはすでに試験地規模の観測データにより検証されているが、ここでは実際にNOAA-AVHRRデータを用いた広域蒸発散量推定法を琵琶湖地域、北陸地域に適用した結果を報告する。

2. 蒸発散量推定法

広域での水循環や流域規模での水収支を考え、まずは日蒸発散量の推定を目標とする。移流を無視すれば地表面でのエネルギー収支は次式(1)で示される。

$$Q^* = H + LE + G \quad (1)$$

ここに、 Q^* :正味放射量、 H :顕熱フラックス、 LE :潜熱フラックス、 G :地中熱フラックスである。中立大気の仮定のもとで、被植の気孔抵抗を無視し、蒸発効率⁸⁾をほぼ1とすれば、 H 、 LE はバルク式を用いて、式(2)、(3)のように表される。これらの仮定は湿潤地表面を前提とすれば必ずしも強い仮定とは考えられないが、種々な条件に対応すべきモニタリングに適用するためには今後検討を要する点でもある。

$$H = -\gamma C_0 U (T_a - T_s) \quad (2)$$

$$LE = -C_0 U (e_a - e_s) \quad (3)$$

ここに、 T_a :気温、 T_s :地表面温度、 U :風速、 γ :乾湿計定数、 e_a :大気中の水蒸気圧、 e_s :地表面水蒸気圧である。 C_0 はバルク拡散係数であり、地表面粗度長(z_0)、地面修正量(d)が設定できれば、式(4)で与えられる。

$$C_0 = \rho c_p \kappa^2 / \left(\gamma \ln^2 \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (4)$$

ここに ρ :空気の密度、 c_p :空気の定圧比熱、 κ :カルマン定数、 z : U 、 T_s 等の計測高である。

後述する試験地での微気象観測値の日変動を調べると式(2)は近似的に、より入手しやすい日平均值(記号<>)を用いて次のように表される。

$$\langle H \rangle \approx -\gamma C_0 \langle U \rangle (\langle T_a \rangle - \langle T_s \rangle) \quad (5)$$

式(4)で、 d 、 z_0 、 z を与えるか、もしくは何らかの方法で C_0 が得られれば、式(1)の日平均式と式(5)の顕熱フラックス< H >を用いて日平均蒸発散量< LE >が求まる。

さて、式(1)において G は1日周期の次式の正弦波形で近似できるとする。

$$G = \Delta T_s (\omega_1 C \lambda)^{1/2} \sin(\omega_1 t + \phi) \quad (6)$$

ここに、 ΔT_s :地表面温度変化の振幅、 ω_1 :角振動数($\pi/12$)、 C :地表土壌の熱容量、 λ :土壌の熱伝導率、 t :時間(hr)、 $(\omega_1 C \lambda)^{1/2}$:熱慣性であり、 ϕ は最大地表面温度の生起時刻の位相差を示す。

1日のうちで、任意の時刻とそれから n 時間後の時刻での2回のリモートセンシングデータ(地表面温度)とそれに対応する地上気象資料が得られるとする。第1,第2観測時刻を添字1,2で表せば、式(1)より、

$$Q^*_1 = H_1 + LE_1 + G_1 \quad (7)$$

$$Q^*_2 = H_2 + LE_2 + G_2 \quad (8)$$

となる。式(7)、(8)から、 $k = G_1/G_2$ とおけば、次式(9)によりバルク拡散係数 C_0 が推定できる。

$$Q^*_1 - kQ^*_2 = C_0 [\gamma \{U_1(T_{a,1} - T_{s,1}) - kU_2(T_{a,2} - T_{s,2})\} + \{U_1(e_{a,1} - e_{s,1}) - kU_2(e_{a,2} - e_{s,2})\}] \quad (9)$$

この方法を合衆国アリゾナ州フェニックス市の南にある冬小麦農場単一区画に適用した。この試験フィールド

ドでは、1983年の2月から4月までの4日間についての気温、風速等の通常の微気象観測項目とともに、地表面温度、正味放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックスおよび地中熱フラックスが得られている。図-1(a)は $n = 12$ (時間間隔) とした場合に推定されたバルク拡散係数を示している。同図中横軸は示された時刻とその12時間後の時刻での気象・地表条件のペアのデータから得られたものであり、ペアデータの採用時刻により推定されるバルク拡散係数の値が異なっている。図には、瞬間値の風速と前後1時間(5回の観測値)の平均の風速を用いて得られる2つのケースについて示されているが、全時間にわたり、2時間の平均風速による場合の方がより安定した推定値を与えている。これまでの検討⁵⁾によれば、求められた C_0 のとりうる値の範囲は、キャノピー高(小麦)さから経験的に⁷⁾推定される値とはほぼ同程度となることが得られている。他方、後述するNOAA衛星データではデータ取得間隔が8時間となる。これに対応して、 $n = 8$ (時間間隔) とする場合に推定される C_0 を示せば図-1(b)のようになる。図(a), (b) は共に良く類似しており同様な解析が可能であることを示している。

一方、上述のようにして求まるバルク拡散係数により刻々の潜熱フラックスを計算すれば図-2のようになる。図-2(a) はデータ間隔が12時間の場合を示し、(b) は8時間間隔の場合である。いずれの場合も、推定値(+)の日変化は観測値(□印)のそれを比較的良好に再現している。しかしながら、放射量や気温などが急変する日の出、日没時(6時~7時、18時~19時頃)のデータを用いた場合の推定は不適当な結果となっている。そのなかで、8時間間隔の場合(図-2(b))には位相のズレによりその不安定さが緩和されるためか、見かけ上推定値はより観測値に近い結果となっている。これまでの検討と同様に、データ取得時刻が自由に設定できるとする場合の最適な衛星観測時刻と時間間隔を議論することもできる。

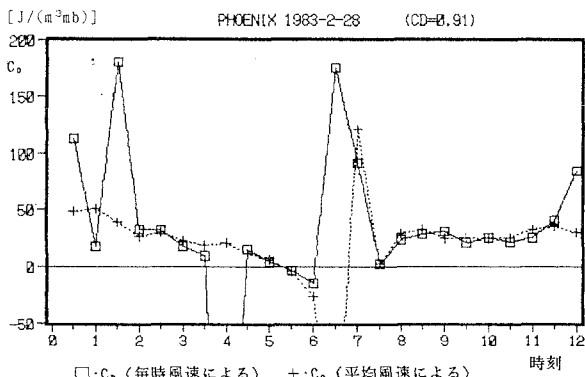


図-1(a) バルク拡散係数の推定(12時間 Δ データ)

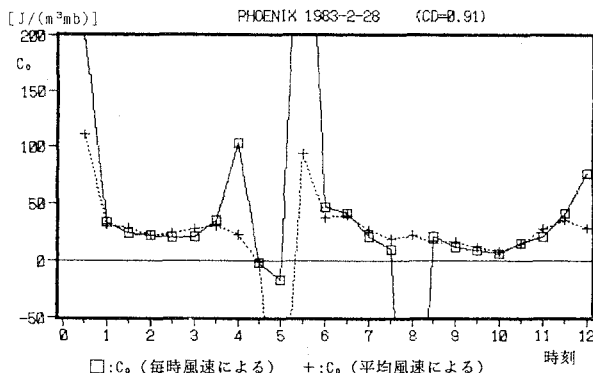


図-1(b) バルク拡散係数の推定(8時間 Δ データ)

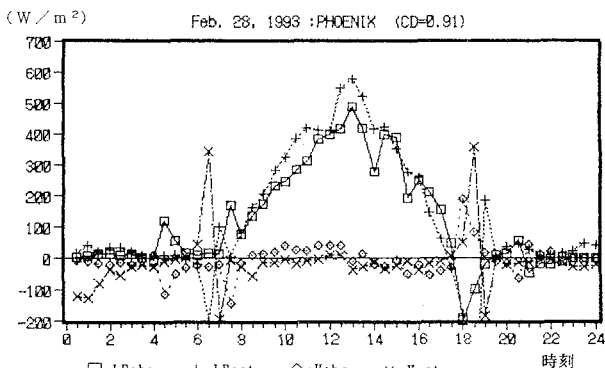


図-2(a) 顕熱・潜熱フラックスの推定(12時間 Δ データ)

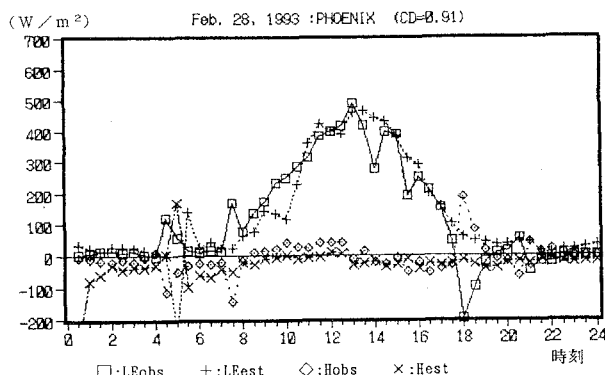


図-2(b) 顕熱・潜熱フラックスの推定(8時間 Δ データ)

3. 広域蒸発散量の推定結果

3.1 NOAA-AVHRRデータについて

NOAA-AVHRRデータは東北大学理学部「地球観測衛星データ受信解析室」で受信されたものを用いた。受信されたデータはオリジナル東北画像データベース“O-TIDAS”に収められている。同解析室と大型計算機センターは、同センター内に画像データベース“TIDAS”を構築しており、希望画像データの検索と抽出ができる。TIDAS画像は東北地方を中心とした約1000km×1000kmの範囲をおおい、画像の1ピクセルは地上1.1km四方の分解能をもつ。解析では同計算センターの“TIDAS”と同解析室の“O-TIDAS”から必要なデータを抽出して用いた。データ輝度値から変換される地表面温度の分解能は0.1～0.2°Cである。

3.2 対象地域と推定結果

土木学会水理委員会では、89年以来「陸域－大気系の水循環過程解明研究班」を組織し、その活動の中心として、水循環過程に関する衛星－（航空機）－地上同期共同観測・解析（琵琶湖プロジェクト）を実施してきた。琵琶湖の湖北地域の比較的土地利用の様な水田地帯が集中観測区域として対象とされてきている。当初の計画では、地上での熱収支観測・渦相関法等による蒸発散量を観測値として、ここでの推定モデルの結果の一部を検証が考えられた。しかしながら、結果的には、観測時期の93年10月末～11月初旬には天候の関係から衛星データ（可視・赤外）が利用できるようになったのは地上観測の終了時であった。以上の経過で、上記の推定法は結局、琵琶湖北東部地域55km四方および琵琶湖地域に比較的近く、広い晴天域になっていた高岡市を中心とする石川県－富山県の南北44km、東西77kmの地域、に適用した。

地表面土壌水分量については将来SARデータ等を利用することを考えるが、現段階では e_s については最大地表面温度差から求めるSchumuggeらが示す方法⁸⁾を援用して以下のように求めた。すなわち、土壌水分（体積含水率） θ と地表面温度の日変化の振幅（ ΔT_s ）との関係に関するIdosoら⁹⁾の結果

$$\Delta T_s = 42.7 - 83.7\theta \quad (10)$$

を近似的に用いて、 ΔT_s から土壌の水分ポテンシャル ϕ を次式により求める。

$$\phi = \phi_s (\theta / \theta_s)^{-m} \quad (11)$$

ここに、 θ_s 、 ϕ_s はそれぞれ飽和時の体積含水率および水分ポテンシャルである。

ϕ を用いて、土壌表面の相対湿度 h は熱力学平衡の式から以下のように表される。

$$h = \exp [(\phi g) / (RT_s)] \quad (12)$$

ここに、 g は重力加速度、 R は水蒸気の気体定数である。

結局、地表面水蒸気圧 e_s は地表面温度 T_s に対する飽和蒸気圧 $e_{s,s}$ を用いて次式で与えられる。

$$e_s = h \cdot e_{s,s} \quad (13)$$

ここで用いられた e_s の推定法は、経験的な関係式も含めて必ずしも十分妥当なものとはいえない。衛星SARデータの利用も含めた広域土壌水分の適切な評価方法の確立が必要とされる。

一方、それぞれの地域でNOAA-AVHRRによる7時、15時の地表面温度および、敦賀、彦根、虎姫、今津、南小松の5カ所、金沢、伏木、富山の3カ所の気象観測所における風速、気温、湿度等の観測値を用いて、距離の2乗の逆数の重みで気象値を内外挿し、気温は高度補正を行いデータを調整した。

まず、琵琶湖地域、石川－富山地域にける1993年11月3日のバルク拡散係数の推定値を示せば、それぞれ図－3(a)、(b)のようになる。琵琶湖地域の山岳部、石川－富山地域の沿岸部で極端な値を示し、一部不安定

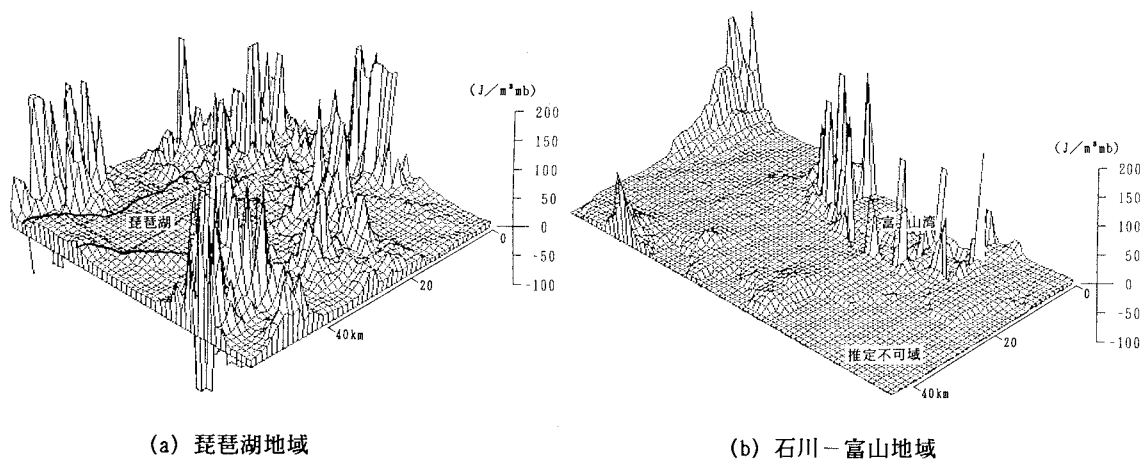


図-3 バルク拡散係数の推定値 (1993年11月3日)

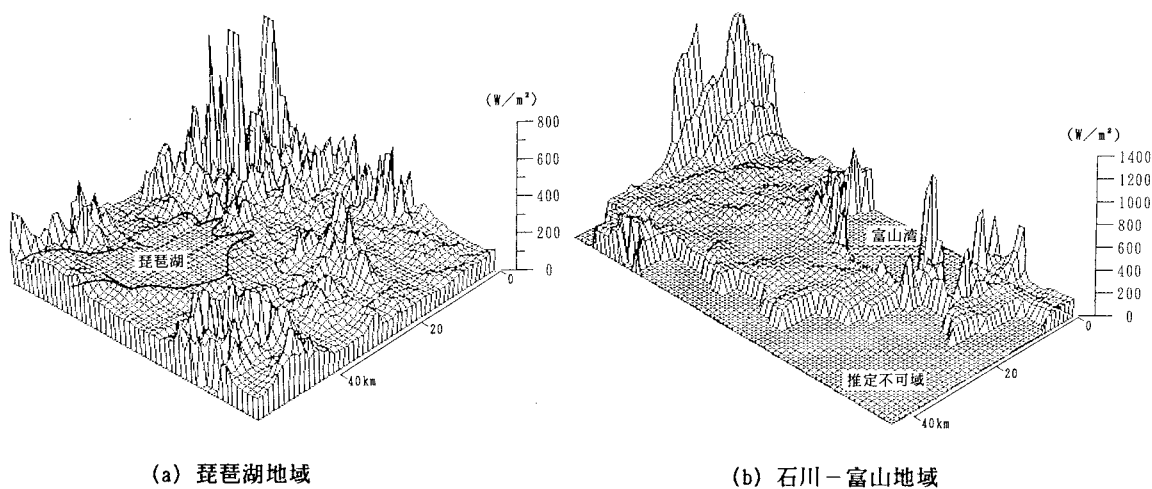


図-4 潜熱フラックスの推定値 (1994年11月3日: 15時瞬間値)

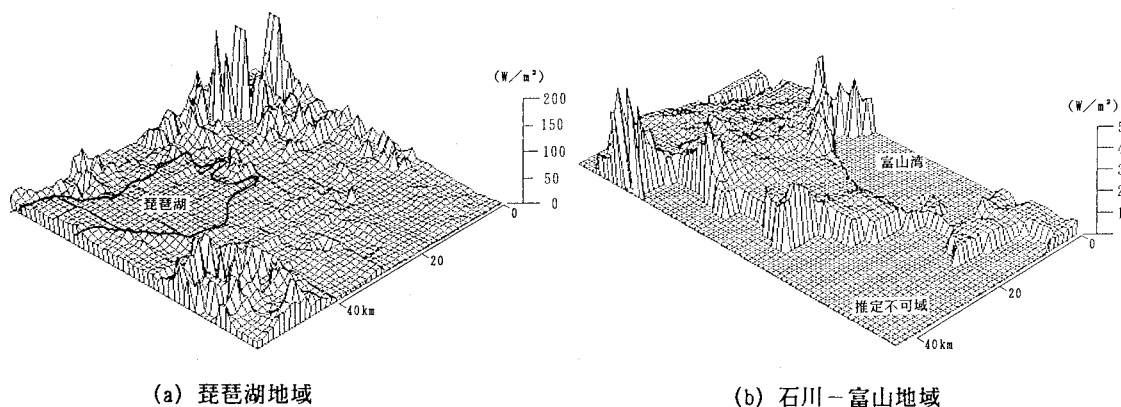


図-5 潜熱フラックスの推定値 (1993年11月3日: 日平均値)

な結果になっている。これは、前述したように、やむなく日の出近くの地表面データが用いられていること、山岳域等の気象データ設定が不十分であったことなどによるものと考えられる。しかしながら、琵琶湖、石川－富山両地域とも平地部で安定的に得られたバルク拡散係数の範囲は、 $10 \sim 30 \text{ J/m}^2\text{mb}$ 程度であり、 β 法バルク輸送係数に換算して $0.0054 \sim 0.016$ となる。これは近藤¹⁰⁾による水田観測値の係数の範囲とほぼ同じ範囲を示す妥当な結果となり、推定法としての基本的な枠組みが得られたと考えている。

以上のバルク拡散係数の推定値を用いて、両地域における15時の瞬間気象値による場合および日平均値による場合について計算される潜熱フラックスの推定結果はそれぞれ図－4(a)、(b)、図－5(a)、(b)のようになる。両地域とも当然のことながら15時の瞬間潜熱フラックスは平均値より大きく、変動も激しい。特に、琵琶湖地域山岳部ではバルク係数の変動に呼応して、日平均値でも極端な推定値が得られている。この点の改善には地上気象データのより高精度な情報が必要で、整備されつつあるGPV (Grid Point Value) 気象情報の配信システムに期待したい。石川－富山地域南部で'0'で示される地点は雲域および周辺2画素以内の領域であり、これらの点でも推定は行えない。しかしながら、高岡市付近での日蒸発散量は $1.39(\text{mm/day})$ 程度を示し、経験的な値(Hamon式による 1.28mm/day)と比較してほぼ同様な結果となっている。一方、同日曇天がちな琵琶湖地域中心では $0.25(\text{mm/day})$ であった。

4. おわりに

数10km平方程度の地域を対象として、NOAA-AVHRRデータを用いた蒸発散量の推定を試みた結果、手法の基本的な可能性を得ると共に問題点も明らかになった。琵琶湖プロジェクト共同観測期間中には天候が不順なため衛星による明確な地表面温度データが得られず、当初目的とした蒸発散量に関する地上観測値と比較検証することができなかった。一部に妥当と思われる推定値が得られたものの、バルク拡散係数の大きな変動はまだ不十分な結果でありその主な原因としては、広範な地上気象データの精度が問題と考えられる。今後は植生条件や・地形の効果の考慮とともにより詳細な地上気象情報の獲得・設定が必要と考えられる。

[謝辞] NOAA-AVHRRデータの利用についてご指導頂いた東北大学澤本正樹教授、同大学院の風間聡氏、さらに、気象資料を提供頂いた金沢、富山地方気象台および気象協会関西本部の奥田昌弘氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 古藤田一雄・甲斐憲次・中川慎治・吉野正敏・星 仰・武田 要・関 利孝：ランドサットデータによる土地利用区分と広域蒸発散量推定手法の開発に関する研究、筑波大学水理実験センター報告、No. 8, pp. 57-66, 1984.
- 2) 佐渡公明：ランドサットTMデータを用いた広域蒸発量の推定、京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告、No. 13, pp. 51-61, 1993.
- 3) 金子大二郎・日野幹雄：TM植生指標と気象台ルーチンデータを用いた広域森林における熱収支の算定法の提案と検討、水文・水資源学会誌、Vol. 7, No. 1, 1994.
- 4) 多田 毅・風間 聡・沢本正樹：NDVIを用いた広葉樹林体の蒸発散分布推定、水文・水資源学会誌、Vol. 7, No. 2, 1994.
- 5) Sunada, K., S. Sorooshian and L. W. Gay: A basic study on estimation of regional evapotranspiration using remotely sensed data, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 27-38, 1990.
- 6) たとえば、近藤純正：乾燥域における地表面熱収支の研究指針(1)、水文・水資源学会誌、Vol. 6, No. 3, pp. 223-229, 1993.
- 7) Reginato, R.J., R.D. Jackson and P.J. Pinter, Jr.: Evapotranspiration calculated from remote multispectral and ground station meteorological data, Remote Sens. Environ., No. 18, pp. 75-89, 1985.
- 8) Schmugge, T.J., T.J. Jackson and H.L. McKim: Survey of methods for soil moisture determination, Water Resour. Res., Vol. 16, No. 6, pp. 961-975, 1980.
- 9) Idoso, S.B., R.D. Jackson and R.G. Reginato: Detection of soil moisture by remote surveillance, Amer. Sci., No. 63, pp. 549-557, 1975.
- 10) 近藤純正：水環境の気象学、朝倉書店、pp. 208-239, 1994.