

モンゴル半乾燥地域における陸面モデルの検証

福 井 秀 典

200721389

平成 21 年 1 月

筑波大学大学院

生命環境科学研究科環境科学専攻

平成 20 年度 修士（環境科学）学位論文

要旨

乾燥・半乾燥域は陸地面積の 3 分の 1 を占め、植物生産性が低く、外部条件に対して脆弱な地域である。IPCC (2007) の気候変動によれば、亜熱帯地域を中心にさらに乾燥していく傾向があると言われている。しかし、現状では地域ごとの温暖化予測精度は未だに低く、精度向上が今後の課題となっている。しかしながら、乾燥・半乾燥地域では地上観測データが少なくモデルの検証は不十分である。よって温暖化予測に用いられる GCM (大気大循環モデル) の陸面水文過程の再現精度の向上が必要である。そこで本研究では、半乾燥地域への陸面モデルの適用に向け、モンゴル半乾燥地域における陸面モデルを使った熱・水収支の検証と感度分析を行うことで、土壌特性、植生の変化が地表面熱収支にどれだけの影響を受けるかを明らかにする。

地上観測データには、半乾燥草原地帯であるモンゴル国ヘンティ県ヘルレンバイヤンウラン(以下 KBU)の地表面熱・水収支の観測データを使用する。対象期間は 2003 年とする。使用する陸面モデルは米国 NCAR が開発した Community Land Model 3.0 (CLM)である。

初めに、NCEP-NCAR 再解析データに様々なデータセットを組み合わせた Qian et al (2006) のフォーシングデータ、陸面特性データには衛星データを中心とした植生、土壌データを用いたモデル計算を行い、観測データと比較した。これは GCM 内の陸面モデルによる陸面水文過程の再現性について問題の所在を明らかにすることを目的とする。ここでは顕熱フラックスの季節変化の再現性はよくないが、潜熱フラックスは比較的によく再現できることが分かった。しかし、季節内変動ではフォーシングの降雨データの問題から再現性は悪かった。また、降雨直後に潜熱フラックスが集中する傾向にあり、降雨の他に土壌・植生パラメータに問題があると推測される。

次にフォーシングデータ、陸面特性データにそれぞれ地上観測データを用いたモデル計算を行い、観測データと比較した。初めの検証と同様、潜熱フラックスが降雨直後に集中し、その後土壌が乾燥して潜熱フラックスが適度に減少する傾向があり、植生・土壌パラメータに問題があると推測される。

植生・土壌特性を表す適切なモデルパラメータを見いだすため、土壌特性、LAI、植生の集中度に対する感度分析を行った。これによれば、土壌の粒径構成比を変化させても、潜熱フラックスは大きく変化はなかった。LAI に対する感度分析では、降雨後の乾燥段階において LAI が高い方が潜熱は高くなる傾向があり、一般的な知見と一致した。また、草原と裸地が混在するグリッド内の草原の LAI と裸地面との面積比を変えることによって、植生の集中度に対する感度分析を行った。この結果、潜熱フラックスの変化はあまり見られなかった。これらの感度分析から、全体の傾向として、土壌特性よりも LAI が熱収支に影響を与えていることがわかった。

今回の検証から、乾燥・半乾燥地域における陸面モデル計算の精度向上には、降水量のフォーシングと植生のパラメータを適切に与えることが重要であることが明らかになった。また、感度分析から潜熱フラックスの植生パラメータに対する感度が高いことが明らかとなり、半乾燥地域で LAI が 1 以下のまばらな草原においても、地表面熱収支において植生が重要な

役割を果たしていることが考えられた。

Keyword：陸面モデル、乾燥・半乾燥地域、熱・水収支、モンゴル

目次

| | |
|------------------------------------|-----|
| 目次..... | i |
| 表目次..... | iii |
| 図目次..... | iv |
| | |
| 1. 本研究の背景・目的..... | 1 |
| | |
| 2. 対象地域..... | 2 |
| | |
| 3. モデルの概要..... | 3 |
| 3.1 陸面モデル..... | 3 |
| 3.2 Community Land Model..... | 3 |
| 3.3 モデルの構造..... | 4 |
| 3.4 CLM のプロセス..... | 4 |
| 3.4.1 放射収支..... | 4 |
| 3.4.2 顕熱フラックス..... | 5 |
| 3.4.3 潜熱フラックス..... | 5 |
| 3.4.4 土壌（土壌水分、透水係数）..... | 6 |
| 3.4.5 アルベド..... | 6 |
| | |
| 4. グローバルデータセットを用いた検証..... | 8 |
| 4.1 概要..... | 8 |
| 4.2 検証方法..... | 8 |
| 4.3 使用データ..... | 8 |
| 4.3.1 フォーシングデータ..... | 8 |
| ・ 気温..... | 8 |
| ・ 降水..... | 9 |
| ・ 日射..... | 9 |
| ・ 気圧・風速・比湿..... | 9 |
| 4.3.2 陸面特性データ..... | 10 |
| ・ 土壌..... | 10 |
| ・ 植生..... | 10 |
| 4.4 結果・考察..... | 10 |
| 4.4.1 スピンアップの有無の比較..... | 10 |
| 4.4.2 顕熱・潜熱フラックスの CLM と観測値の比較..... | 10 |
| 4.4.3 放射収支、アルベドの検証..... | 11 |
| 4.4.4 降水量、顕熱・潜熱フラックス、土壌水分量の関係..... | 11 |

| | |
|----------------------------|----|
| 5. 地上観測データを用いた検証..... | 12 |
| 5.1 概要..... | 12 |
| 5.2 検証方法..... | 12 |
| 5.3 使用データ..... | 12 |
| 5.3.1 フォーシングデータ..... | 12 |
| 5.3.2 陸面特性データ..... | 13 |
| ・ 植生..... | 13 |
| ・ 土壌..... | 13 |
| ・ 土壌の水文特性..... | 14 |
| 5.4 結果・考察..... | 14 |
| 5.4.1 CLM と観測値の比較..... | 14 |
| 5.4.2 日平均値の比較 (季節内変化)..... | 15 |
| 5.4.3 時間平均値の比較..... | 15 |
| 6. 感度分析..... | 16 |
| 6.1 概要..... | 16 |
| 6.2 土壌特性に対する感度分析..... | 16 |
| 6.3 LAI に対する感度分析..... | 16 |
| 6.4 植生の集中度に対する感度分析..... | 17 |
| 7. 結論..... | 18 |
| 表..... | 19 |
| 図..... | 28 |
| 謝辞..... | 68 |
| 引用文献..... | 69 |

表目次

| | | |
|-------|--|----|
| 表 4-1 | CLM の大気フォーシングデータの一覧..... | 19 |
| 表 4-2 | グローバルデータセットを用いた検証における陸面特性の入力データの一覧..... | 20 |
| 表 4-3 | 乾燥、湿潤時のアルベドに対する土壌色..... | 21 |
| 表 4-4 | 植生パラメータ(グローバルデータセット)..... | 22 |
| 表 4-5 | グローバルデータセットを用いた検証における検証対象グリッド内の PFT の割合..... | 23 |
| 表 5-1 | 入力に必要な陸面特性データの一覧..... | 24 |
| 表 5-2 | 地上観測データの一覧..... | 25 |
| 表 5-3 | 地上観測で補足として使用した植生パラメータの一覧..... | 26 |
| 表 5-4 | 土壌の粒径構成比の観測値..... | 27 |

図目次

| | | |
|--------|---|----|
| 図 2-1 | KBU における降水量と蒸発量の季節変化..... | 28 |
| 図 2-2 | 地上観測地域..... | 29 |
| 図 3-1 | 生物地球物理学的プロセスの概念図..... | 30 |
| 図 3-2 | 水文学的プロセスの概念図..... | 30 |
| 図 4-1 | フォーシングデータ（気温、比湿、風速）の季節変化..... | 31 |
| 図 4-2 | KBU が含まれるグリッド内の土壌特性..... | 32 |
| 図 4-3 | KBU が含まれるグリッド内の LAI,SAI の季節変化..... | 33 |
| 図 4-4 | KBU が含まれるグリッド内の植生の高さの季節変化..... | 34 |
| 図 4-5 | スピニアップによる効果 (2003) | 35 |
| 図 4-6 | 顕熱・潜熱フラックスの季節変化..... | 36 |
| 図 4-7 | 地中熱フラックスの季節変化..... | 37 |
| 図 4-8 | 放射 4 成分の比較..... | 38 |
| 図 4-9 | 放射収支の季節変化..... | 39 |
| 図 4-10 | アルベドの季節変化..... | 40 |
| 図 4-11 | 熱・水収支の季節変化..... | 41 |
| 図 5-1 | 地上観測より作成したフォーシングデータ | 42 |
| 図 5-2 | LAI と SAI の入力データ | 43 |
| 図 5-3 | キャノピーの高さ top と bottom (m) の入力値..... | 44 |
| 図 5-4 | 月平均運動量粗度 Z_0 の算定値..... | 45 |
| 図 5-5 | ゼロ面変位の算定値..... | 46 |
| 図 5-6 | 土壌の粒径構成比..... | 47 |
| 図 5-7 | バンド別に示した裸地面のアルベドの観測値..... | 48 |
| 図 5-8 | 水分特性曲線の CLM 内での推定と Hoshino (unpublished)による観測値..... | 49 |
| 図 5-9 | 不飽和透水係数と体積含水率の関係..... | 50 |
| 図 5-10 | 顕熱・潜熱フラックスの月平均..... | 51 |
| 図 5-11 | 放射収支、アルベドの月平均値..... | 52 |
| 図 5-12 | 地中熱フラックスの月平均..... | 53 |
| 図 5-13 | 降水量、潜熱・顕熱フラックス、土壌水分量の関係..... | 54 |
| 図 5-14 | 時間変化による潜熱、顕熱、降水量の関係 (2003 年 6 月 19 日～28 日) | 55 |
| 図 6-1 | 土壌特性の感度分析..... | 56 |
| 図 6-2 | CLM 内で土壌の粒径構成比を変えた水分特性曲線..... | 57 |
| 図 6-3 | CLM 内で土壌の粒径構成比を変えた不飽和透水係数と体積含水率の関係..... | 58 |
| 図 6-4 | 不飽和透水係数と時間の関係..... | 59 |
| 図 6-5 | LAI に対する感度分析..... | 60 |
| 図 6-6 | LAI に対する感度分析 (6 月 19 日～29 日) | 61 |
| 図 6-7 | LAI 別に示した蒸散、遮断蒸発、蒸発量..... | 62 |

| | | |
|--------|--|----|
| 図 6-8 | 植生の集中度に対する感度分析の概念図..... | 63 |
| 図 6-9 | 植生の集中度に対する感度分析..... | 64 |
| 図 6-10 | 植生の集中度に対する感度分析 (6 月 19 日～29 日) | 65 |
| 図 A-1 | 熱収支項目の季節変化 (2003 年 4 月～2004 年 1 月) | 66 |
| 図 A-2 | 地表面温度の日平均値 (2003 年 4 月～7 月) | 67 |

1. 背景・目的

乾燥・半乾燥域は陸地面積の 3 分の 1 を占め、植物生産性が低く、気候変動や人間活動などの外部条件に対して脆弱な地域である。そのため近年では、気候変動や人為的影響によって、陸域環境に変化が生じている。また、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第 4 次評価報告書（IPCC,2007）によると、今後、亜熱帯地域を中心にさらに乾燥していく傾向があると言われている。

しかし、現状では地域ごとの温暖化予測精度は未だに低い。特に乾燥・半乾燥地域では地上観測データが少なく、モデルの検証は不十分である。そのため陸面プロセスの表現も不十分であり、精度向上が今後の課題となっている。また、一般にこのような地域において植生は熱・水収支に依存し降雨によって変化する特異性があり、植生と土壌水分が熱・水収支をコントロールしている。そのため植生の生理現象を正確に再現する必要があると言われている。

温暖化予測に用いられる GCM (General Circulation Model、大気大循環モデル) では、地表面熱・水収支の計算に陸面モデルを使用している。そのため、温暖化の予測向上には GCM の陸面水文過程の再現精度の向上が必要である。

Qian et al (2006)では、NCEP-NCAR の再解析データからフォーシングデータを作成し、陸面モデルを用いて北米、南米、ロシア、南アフリカ、中国などを対象にモデルを約 50 年間走らせ、流出量、土壌水分量のモデル計算を行った。その結果から、モデルの性能について評価し、フォーシングデータの降雨データに問題があることを明らかにしている。また、小島 (2004) では、モンゴル半乾燥地域で植生に注目し、それらが蒸発散量に対してどの程度の影響を与えているかを考察した。

しかし、半乾燥地域を対象としたモデル検証は少なく、モデルの適用における問題点は明らかになっていない。気候変動を予測するには、季節変化、年変動で再現できればよいが、ある半乾燥地域で数十年後の蒸発量を求める場合には、季節内変動までを再現させる必要がある。また、一般的にまばらな草原地帯では蒸発量が少なく、植生よりも土壌特性が地表面熱収支に対して感度が高いことが予測されており、実際どちらの方が影響を与えるかは明らかになっていない。よって、地上観測データが揃っているモンゴル半乾燥地域で、陸面モデルの検証を行い、問題点を明らかにする意義はあると言える。

そこで本研究では、半乾燥地域への陸面モデルの適用に向け、モンゴル半乾燥地域における陸面モデルによる熱・水収支の再現性の観測データによる検証と感度分析を行うことで、土壌特性、植生の変化が地表面熱収支にどれだけの影響を受けるかを解明することを目的とする。

2. 対象地域

乾燥・半乾燥地域における観測値を利用した検証の対象地域として、本研究では、モンゴル国ヘルレンバイヤンウラン (Kherlenbayan-Ulaan、以下 KBU とする) を対象地域とする。KBU は東経 108°44′、北緯 47°12′ に位置する。モンゴルは気温や降水量が南北で大きく異なり、ゴビ地域では 50mm/年であるが、北部地域では 350mm/年と南北差が激しい(後藤、2008)。この中で KBU の年平均降水量は 200mm 程度で、その約 88% が雨季にあたる 6 月～9 月に集中している (Kato, 2007)。乾燥・半乾燥地域の特徴として蒸発散量はほぼ降水にコントロールされており、降水として降った雨の 70～90% は蒸発してしまうとされている (Davaa et al. 2006; 杉田 2003)。参考に図 2-1 に 2003 年の降雨量と蒸発量の観測値を示す。

一般的にモンゴル草原地の植生は 4 月末から 5 月初旬に成長を始め、降水量の多い 6 月から 7 月に急成長し、10 月以降は枯れてしまう (中村、2007)。また、この地域は家畜の放牧によって草が食べられるため、植物が大きく成長することはない。KBU における優占種は C3 植物の *Stipa krylovii*、*Carex duriuscula*、*Artemisia adamisii*、*Artemisia frigida*、*Chenopodium aristatum* および C4 植物の *Cleistogenes squarosa*、*Salsola collina* である (Mariko et al, 2007)。ほとんど C3 植物が優先し、C4 植物が占める地上部のバイオマスの割合は全体の約 20% となっている (中村、2007)。

KBU では北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明を目的とした RAISE (Rangelands Atmosphere–hydrosphere–biosphere Interaction Study Experiment in northeastern Asia) プロジェクトが実施された。2002 年から観測ステーションが設置され、気象・地表面のフラックス観測が行われた。図 2-2 に観測ステーションの様子を示すように、辺り一面はステップ帯である。KBU では気象観測ステーションを 2 つ設けており、ひとつは 200m の四方フェンスで囲い家畜等が進入できないようにした保護区内と、もう一方には自然状態の非保護区がある。本研究では非保護区のデータを使用する。

3. モデルの概要

3.1 陸面モデル

陸面モデル (LSM、Land Surface Model) とは、GCM の陸面における熱収支、水収支、炭素収支などの陸面過程を計算するサブモデルである。地表面での水・熱フラックスの推定の精度が気象予測シミュレーションに大きな影響を与えることが指摘されるようになり、GCM やメソ気象モデルの最下層を受け持つモデルとして陸面モデルが盛んに研究されるようになってきた (池淵ほか 2006)。近年では GCM と切り離して単体で用いられる off line モードで用いて、陸面の再現計算を行うことも盛んになっている (浅沼 2008)。

初期の陸面モデルは、第 1 世代モデルとして 1960 年代に開発された Bucket モデル (Manabe, 1969) である。このモデルでは、地表近くの土壌層は、降水や融雪で水量が増し、蒸発や流出で水量が減少するバケツとしてモデル化されている。植生は明示的に扱われておらず、土壌からの流出過程も非常に単純化されている (伊藤ほか 2004)。第 2 世代にあたる SiB (Sellers et al. 1986) や BATS (Dickinson et al. 1993) は、樹木に覆われた樹木層と草地あるいは裸地で構成される地表層の植生 2 層で表現しており、気孔抵抗による蒸発の制御や遮断蒸発が計算されるようになった。第 3 世代では、大きな発展として、キャノピーコンダクタンスがモデル化され、炭素循環過程が再現されるようになったことである (Pitman, 2003)。これにより、蒸散だけでなく光合成速度も計算することが出来るようになった。代表的なモデルには SiB2 や米国 NCAR (National Center for Atmospheric Research) で開発されたモデル (Bonan, 1996) などが挙げられる。

3.2 Community Land Model

本研究では、米国 NCAR が開発した Community Land Model version3 (以下 CLM と表記する) を使用する。CLM は、米国 NCAR (National Center for Atmospheric Research) が CCSM (Community Climate System Model、コミュニティー気候システムモデル) に組み込まれた陸面モデルであり、従来の陸面モデルに炭素循環や植生動態を加え改良したモデルである。また、CLM はソースコードが公開されているなど今後、標準化されていく方向性のあるモデルでもある。

Dai et al(2003) によると、これまで発展してきたそれぞれの陸面モデルに、同じ大気フォーシングデータと地表面パラメータを与えても、PILPS (The Project for Intercomparison of Land Surface Parameterization Schemes) ではモデルの構造が部分的に異なるため、地表面フラックスと土壌水分量はそれぞれ異なる結果になった (Henderson-Sellers et al. 1995)。そこで、CLM はこれまでの陸面モデルを統一させようと、従来の陸面モデルの特徴を取り入れることで改善されていった。また、広域の観測データが使用され、複数の機関で陸面データ同化システム (LDAS) によりテストされた。さらに、NCAR の CCSM と連結した。これらの結果、CLM が地表面温度、年間流出の循環、および積雪をシミュレートした結果、従来のモデルより優れていることが示された (Qian et al. 2006)。

3.3 モデルの構造

CLM は、グリッドセル、土地タイプ、PFT (Plant Function Type、植生機能タイプ)、カラムから成り立っている。それぞれのグリッドセルは異なる土地タイプを持ち、それぞれの土地タイプは PFT を持つ。PFT の下には土壌、雪を表すカラムが存在する。これらの構造から、様々な種類の土地タイプを表現できることが可能である。

- 土地タイプ

CLM の土地タイプは、氷河地、湖、湿地、植生、都市が存在する。各土地タイプは土壌の粒径構成比、色、深度、熱伝導度などの土壌特性を決める。そのため、土地タイプによって土壌特性は異なる。

- カラム

各土地タイプの下にはカラムが存在する。カラムは土壌と雪の状態変数で重力、毛管などのポテンシャル変動を捉える目的がある。土壌のカラムは 10 層で表され、雪は積雪の深度により 5 層以下で表される。

- PFT

PFT は機能に応じて 16 種類に分類され、その中には裸地も含まれる。例えば、針葉常緑樹、常葉広緑樹、草地、小麦などが挙げられる。

各 PFT の特徴は、次のような生理学的あるいは形態学的特徴を表すパラメータで表される。放射に対する透過率、吸収、反射の計算に必要とされる葉や茎の特性 に関するパラメータ、気孔抵抗、蒸散、光合成の計算に必要とされる光合成に関するパラメータ、熱・水、運動輸送に対する抵抗の計算に必要とされる空気力学的パラメータである。

3.4 CLM のプロセス

CLM は生物地球物理学のプロセス、水文学のプロセス、生物地球科学のプロセス、植生ダイナミックスの 4 つのプロセスから成る。生物地球物理学のプロセスでは、熱収支、水収支、放射収支などを扱い、水文学のプロセスでは土壌水分、蒸発、流出などを扱う。生物地球化学のプロセスは炭素収支、植生ダイナミックスは植生遷移、植生動態を扱う。後者の 2 つ、生物地球化学のプロセスと植生ダイナミックスに関しては本研究では扱わない。図 3-1、3-2 に生物地球物理学のプロセスと水文学のプロセスの概念図をそれぞれ示す。

3.4.1 放射収支

地表面放射収支は次式のような長波放射と短波放射の地表面に対する入出力により構成される。

$$Rn = (S_v + S_g) - (L_v + L_g) \quad (1)$$

ここで、 Rn は正味放射量、 S_v は植生、 S_g は地表面からの正味短波放射、 L は植生、地表面からの正味長波放射である。

3.4.2 顕熱フラックス

顕熱フラックス (H) は植生、地表面からの顕熱の合計で表される。

$$H = H_v + H_g \quad (2)$$

$$H = -\rho_{atm} C_p \frac{(\theta_{atm} - T_s)}{r_{ah}} \quad (3)$$

$$H_v = -\rho_{atm} C_p (T_s - T_v) \frac{(L + S)}{r_b} \quad (4)$$

$$H_g = -\rho_{atm} C_p \frac{T_s - T_g}{r'_{ah}} \quad (5)$$

ここで、 ρ_{atm} は大気密度 (kg/m^3)、 C_p は空気の定圧比熱 (J/kg/K)、 θ_{atm} は大気のポテンシャル温度 (K)、 r_{ah} は空気力学的抵抗 (s/m)、 T_s は高さ $z_{0h}+d$ における地表面温度、 T_v はキャノピー表面温度、 L は葉面積指数、 S は茎表面積指数、 r_b は葉の境界層間の抵抗 (s/m)、 r'_{ah} は r_{ah} 地表面の高さ z_{0h} とキャノピーの高さ $z_{0h}+d$ 間における熱伝導の空気抵抗 (s/m) である。

3.4.3 潜熱フラックス

潜熱フラックスは顕熱フラックスと同様に植生、地表面からの潜熱 (E_v , E_g) の合計で表される。

$$\lambda E = \lambda_{vap} E_v + \lambda E_g \quad (6)$$

$$\lambda E = -\rho_{atm} \frac{(q_{atm} - q_s)}{r_{ah}} \lambda \quad (7)$$

$$\lambda_{vap} E_v = -\rho_{atm} \frac{(q_s - q_{sat}^{T_v})}{r_{total}} \lambda_{vap} \quad (8)$$

$$\lambda E_g = -\rho_{atm} \frac{(q_s - q_g)}{r_{ah}} \lambda \quad (9)$$

ここで、 q_{atm} は比湿 (kg/kg)、 r_{aw} は水蒸気輸送の空気力学的抵抗 (s/m)、 $q_{sat}^{T_v}$ はキャノピー温度の飽和比湿、 q_g は地表面の比湿、 r_{aw} は地表面の高さ z_{0w} とキャノピーの高さ $z_{0w}+d$ 間における水蒸気輸送の空気力学的抵抗 (s/m)、 r_{total} はキャノピーから出る水蒸気輸送の全抵抗、 λ は気化潜熱または昇華潜熱、 λ_{vap} は気化潜熱である。

3.4.4 土壌（土壌水分、透水係数）

土壌水分は 10 層で表現され、その移動は次式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + 1 \right] \quad (10)$$

ここで、 θ は体積含水率、 t は時間、 z は土壌カラムの高さ、 k は透水係数、 ψ は毛管ポテンシャルを表す。透水係数 k は体積含水率、土壌中の粘土、砂の割合で決定する。2 層間の透水係数 $k[z_{h,i}]$ は以下の式で表される。

$$k[z_{h,i}] = \begin{cases} k_{sat} [z_{h,i}] \left[\frac{0.5(\theta_{liq,i} + \theta_{liq,i+1})}{0.5(\theta_{sat,i} + \theta_{sat,i+1})} \right]^{2B_i+3} & 1 \leq i \leq 9 \\ k_{sat} [z_{h,i}] \left[\frac{\theta_{liq,i}}{\theta_{sat,i}} \right]^{2B_i+3} & i = 10 \end{cases} \quad (11)$$

飽和透水係数（ $k_{sat}[z_{h,i}]$ ）は以下の式（Beven and Kirkby,1979）より表される。

$$k_{sat}[z_{h,i}] = 0.0070556 \times 10^{-0.884+0.0153(\%sand)} \left[\exp \left(-\frac{z_{h,i}}{z_*} \right) \right] \quad (12)$$

$$\theta_{sat,i} = 0.489 - 0.00126(\%sand)_i \quad (13)$$

$$B_i = 2.91 + 0.1592(\%clay)_i \quad (14)$$

ここで、 $k_{sat}[z_{h,i}]$ は飽和透水係数（mm/s）、 z_* は飽和透水係数の減少スケール（0.5m） $\theta_{sat,i}$ は飽和体積含水率、 B は定数（Clapp and Hornberger. 1978）、 $\%sand$ 、 $\%clay$ は土壌の粒径構成比である。圧力水頭（ ψ ）は以下の式から表される。

$$\psi_i = \psi_{sat,i} \left(\frac{\theta_{liq,i}}{\theta_{sat,i}} \right)^{-B} \geq -1 \times 10^8 \quad 0.01 \leq \frac{\theta_{liq,i}}{\theta_{sat,i}} \leq 1 \quad (15)$$

$$\psi_{sat,i} = -10.0 \times 10^{1.88-0.0131(\%sand)_i} \quad (16)$$

ここで、 $\psi_{sat,i}$ は飽和時の圧力水頭である。

3.4.5 アルベド

植生アルベドは、直達光と散乱光の 2 つの放射輸送モデルの特徴を捉えることで求められる。主に厚く、あるいは薄く覆われたキャノピーの境界を減らし、適度な LAI の中間値を与えることで土壌と植生アルベドを結合させている。CLM の土壌と雪のアルベドの計算は BATS から直接使用しており、土壌アルベドは表層の土壌の色と土壌水分の関数である。ま

た、土壌は直接光によるアルベドと散乱光によるアルベドは同じである。雪のアルベドは、Warren と Wisvombe (1980)、雪のモデルと Anderson のデータ (1976)の計算により推定され、それらは雪の年代、粒子、大きさ、光の天頂角、汚れ具合、新雪の積雪量の関数である。以下に地面、雪のアルベドの式を表す。

$$\alpha_{soi,A}^u = \alpha_{soi,A} = (\alpha_{soi,A} + \Delta) \leq \alpha_{dry,A} \quad (17)$$

$$\Delta = 0.11 - 0.40\theta_1 \quad (18)$$

ここで、 $\alpha_{soi,A}^u$ は直接光による土壌のアルベド、 $\alpha_{soi,A}$ は散乱光による土壌のアルベド、 Δ は表層の土壌水分量により変動する変数、 θ は土壌層の第1層（表層）

$$\alpha_{sno,A}^u = \alpha_{sno,A} + 0.4f(u)[1 - \alpha_{sno,A}] \quad (19)$$

$$\alpha_{sno,A} = [1 - C_A F_{age}] \alpha_{sno,A,0} \quad (20)$$

ここで、 $\alpha_{sno,A}^u$ は直達光による雪のアルベド、 $\alpha_{sno,A}$ は散乱光による雪のアルベド、 $f(u)$ は天頂角 60° を超えたことによる雪のアルベドの増加を 0~1 で表す因数

4. グローバルデータセットを用いた検証

4.1 概要

グローバルデータセットを用いた検証では、NCEP-NCAR の再解析データをフォーシングデータとし、陸面特性データには衛星データを中心とした植生、土壌データを用いてモデル計算をする。この検証では GCM 内の陸面モデルによる陸面水文過程の再現性について問題の所在を明らかにすることを目的とする。

4.2 検証方法

検証期間は 2003 年 4 月から 2004 年 1 月とする。出力は全球で計算後、KBU の地点が含まれるグリッド（中心点は東経 109°69′、北緯 46°04′）を取り、PFT 毎の計算値またはグリッド平均値を出力し検証に用いた。グリッド平均は、PFT の重み付き平均値である。また、グリッドの解像度は T42 (約 2.5°) である。

出力結果と観測値を比較して検証を行う。計算間隔は 30 分で季節内変化を出力後、季節変化を算出した。

・スピニアップ

モデル計算を行う前にスピニアップを行った。スピニアップとは、土壌水分、地温などの初期化を行う作業をいう。CLM では他にもキャノピー温度、キャノピーの遮断貯留量、積雪の層が初期化を必要とする。本研究では 2003 年 4 月から翌年の 3 月のフォーシングデータを 3 年間走らせることでスピニアップを行った。

4.3 使用データ

フォーシングデータ（時系列の気象観測データ）と陸面特性データ（土壌、植生）は以下のものを使用する。

4.3.1 フォーシングデータ

本研究では、NCEP-NCAR の再解析データに様々なデータセットを取り入れて作成したフォーシングデータ（Qian et al. 2006）を使用した。フォーシングデータには気温、風速、比湿、気圧、降水、日射が含まれる。気温、風速、比湿については図 4-1 に示す。期間は 2003 年の 3 時間データを使用し、解像度は T62 (約 1.8°) である。以下にそれぞれのデータセットの作成について述べる。本研究で利用したものについての項目、単位の一覧を表 4-1 に示す。

・気温

気温は 6 時間データ、地表面から 2m の地点で観測されており、式 (24) によって調節する。

$$T_{r,obj} = (T_{obs,m} / T_{r,m}) T_r \quad (21)$$

ここで、 $T_{r,adj}$ は気温で合わせられ、 $T_{obs,m}$ と $T_{r,m}$ はそれぞれ観測、再解析による気温デー

タである。すべての気温はケルビンで表される。Qian et al(2006)では CRU (Climate Research Unit)のデータセットを使用し、上記の式で調節後 3 時間毎のデータに変換した。

・ 降水

NCEP-NCAR の 6 時間おき平均降雨量は、以下の式 (22) のように、観測値の月平均降雨を用いて調節された。

$$P_{r,adj} = (P_{obs,m} / P_{r,m})P_r \quad (22)$$

ここで、 $P_{r,adj}$ は日降水量 (mm/day)、 P_{obs} と $P_{r,m}$ はそれぞれ観測値、再解析の月平均降水量 (mm/month)である。Qian et al (2006)では、この NCEP-NCAR の再解析データに Chen et al. (2002) と 1997 年から 2004 年の GPCPv2 の降雨のデータセットを組み合わせ、式 (23) によって調整した。

$$P_{obs,m} = (P_{c,clim} + 0.01) / (P_{g,clim} + 0.01)(P_{g,m}) \quad (23)$$

ここで、 $P_{obs,m}$ は 1997-2004 に観測された月の降雨、 $P_{c,clim}$ 、 $P_{g,clim}$ は Chen 等と GPCPv2 の降雨データによる月ごとの気候特性をそれぞれ表している。0.01 mm/day の降水率は、分母がゼロになることを避けるために付け加えられる。

再解析の降雨データは 6 時間平均されたものである。Qian et al(2006)では 6 時間平均を 2 つの 3 時間間隔と考え 3 時間平均値として使用している。これは、6 時間データを直接入力するよりも観測データに近くなることが多いとされている (Dai, 2001b)。本研究ではこのデータセットの 2003 年の降雨を使用する。

・ 日射

Qian et al (2006)では、下向き放射とグリッド内の再解析雲量データをそれぞれのグリッドで線形回帰分析を行い、放射と雲量の関係と観測データから得た雲量から、月ごとの日射を算出した。6 時間おきの下向き短波放射 (S_r) はそれぞれのグリッド内で式 (24) から調節された。

$$S_{r,obj} = (S_{obs,m} / S_{r,m})S_r \quad (24)$$

ここで、 S_{obs} は再解析の日射と雲量の関係と雲量の観測データから得た日射 (月平均)、 $S_{r,m}$ は再解析の日射 (月平均) を表している。また、他のフォーシングデータと同様に 6 時間データを 2 つの 3 時間間隔と 3 時間データとして使用している。

・ 気圧・風速・比湿

再解析の比湿 q は気温、再解析データの相対湿度から求めたものである。風速、気圧は再解析で観測値と調節した。これら 6 時間データは直接挿入され 3 時間データに変換される。風速は再解析の風速 10m から直接得られる。

4.3.2 陸面特性データ

モデル計算に必要な入力データとしてフォーシングデータの他に陸面特性データが存在する。主に LAI (Leaf Area Index、葉面積指数)、SAI (Stem Area Index、幹面積指数)、土壌の色、土壌の粒径構成比などの植生・土壌データと、ゼロ面変位、粗度、反射率などの植生の生理・形態パラメータがある。これらのデータの詳細については、陸面特性データの一覧の表 4-2 に示す。

・ 土壌

土壌に関するデータは主に土壌の色、粒径構成比（砂と粘土の割合）である。また KBU が含まれるグリッド内の粒径構成比を図 4-2 に示す。土壌特性は、IGBP (The International Geosphere-Biosphere Programme) の土壌のマップから使用しており、それぞれの層毎に数値を入れている (Bonan et al. 2002b)。土壌の色に関しては、土壌の色の明るさに応じて 1 から 8 段階あり、裸地面の乾燥時と湿潤時のアルベドから決定されている。KBU が含まれるグリッドは 6 番と設定されている。土壌色とアルベドの関係を表 4-3 に示す。

・ 植生

植生に関するパラメータは表 4-4 に示す。その他に LAI、SAI、植生の高さについてはそれぞれ図 4-3、4-4 に示す。表 4-4 の植生の生理・形態パラメータは、Bonan et al. (2002a)、根の分布を決めるパラメータは Zeng (2001) のデータを使用している。LAI、SAI は解像度 1km の AVNRR の近赤外センサーから得られたデータであり、米国の EROS (Earth Resources Observations System) DAAC (Distributed Active Archive Center) のデータセンターから提供されたものを月平均値で与えている。キャノピーの高さ (top, bottom) は月平均値を与えている (図 4-4)。また、グリッドには 4 つの PFT (C3-草地、低木、コーン、裸地) が存在し、それぞれ 68%、27%、4%、1%となっている (表 4-5 参照)。

4.4 結果・考察

4.4.1 スピニアップの有無の比較

ここではスピニアップを行う場合とそうでない場合を比較し、スピニアップの効果を示す。スピニアップを行わない場合は、初期条件として気温 283K、体積含水率が全層 $0.3\text{mm}^3/\text{mm}^3$ 、積雪がない状態で初期設定される。結果を図 4-5 に表す。土壌水分では初期は高く、徐々に下がっていき、3~4 ヶ月でスピニアップした結果と同程度の値になっていくことが分かった。

4.4.2 顕熱・潜熱フラックスの CLM と観測値の比較

KBU における 2003 年 4 月から 2004 年 1 月の顕熱、潜熱の季節変化と観測値との比較を図 4-6 に示す。顕熱ではグリッド平均、草地ともに夏季の 7 月から 10 月に観測値と比べ過小評価している。11 月には過大評価となり観測値と異なり、全体的に再現性はよくないと言える。

一方で、潜熱では同様に夏季に過小評価になっているが、季節変化で見ると比較的に上手く再現できることが分かった。また、図 4-7 の地中熱フラックスでは、夏季は観測値とほとんど違いがないことから、顕熱、潜熱の誤差は放射収支、或いはアルベドに問題があると考えられ、これらの違いを調べていくため、放射各成分及びアルベドの検証を行う。

4.4.3 放射収支、アルベドの検証

顕熱・潜熱両方とも夏季に観測値と異なることを考慮し放射収支を見ていく。まず、入力 of フォーシングデータの日射は観測値とほぼ一致していることが分かった (図 4-8-a)。図 4-9 の放射収支では夏季に過大評価になっていること、また、上向き短波放射が全体的に過大であることからモデルのアルベドが高くなっていると推測される (図 4-8-b)。

そこでアルベドの検証を行い、C3 草地、裸地、グリッド平均と観測値の比較を試みた。アルベドの季節変化、季節内変化を図 4-10 に示す。上向き、下向き短波放射の比で表されるアルベドは地表面の物性や表層水分の違いにより決定される。検証結果を見ると C3 草地は観測値と大きく異なることが分かり、モデルの推定値の方が高い値であることがわかった。また、どちらかと言えば観測値はモデルの裸地に近い値となった。

これらの結果から土壌特性に問題があることが推測され、日変化で詳しく調べていく必要がある。

4.4.4 降水量、顕熱・潜熱フラックス、土壌水分量の関係

KBU における降水量、顕熱フラックス、潜熱フラックス、土壌水分の季節内変化の検証を行った。検証結果を図 4-11 に示す。フォーシングデータの降水は観測値と挙動が異なり、降雨のタイミングにも違いが見られる。そのため、その影響が土壌水分、潜熱、顕熱に現れ、観測値と時間変化が異なる結果となった。また、顕熱の季節変動はおおまかに捉えられていると言える。5、6、10 月の観測値と大きく異なる原因として降雨、潜熱の影響であると考えられる。潜熱に関しては、モデルが降雨直後に潜熱フラックスが集中することが分かった。土壌水分ではモデルの方が全体的に過大評価してしまい、観測値と挙動が異なることが分かった。

以上のことから、熱収支、土壌水分の観測値との違いの原因として考えられることは、フォーシングデータの降水量の違いをはじめ、土壌、植生の特性に問題があると推測される。また、降水量に違いがあるが、観測値に類似した値でも、モデルの潜熱フラックスの挙動が異なることから陸面の植生、土壌特性に問題があると推測される。よって、次の検証である地上観測データを用いた検証で、土壌・植生の特性を中心に検証する必要があると考えられる。

5. 地上観測データを用いた検証

5.1 概要

地上観測データを用いた検証では、フォーシングデータ、陸面特性データにそれぞれ KBU の地上観測データを使用してモデル計算を行う。この検証はモデルそのものを評価することを目的とする。熱・水収支を季節変化、季節内変化、時間単位で出力し、観測値との比較を行う。

5.2 検証方法

検証期間は 2003 年 4 月から 2004 年 3 月とする。入力にはフォーシングデータに KBU の気象観測の 30 分平均値を使用する。降雨データに関しては、10 月以降は降水量が過小に観測されているため、モンゴル国気象・水文研究所 (IMH, Institute of Meteorology and Hydrology of Mongolia) のルーチン観測のデータを使用した。陸面特性データには KBU で測定された植生・土壌の特性データを使用する。計算間隔は 30 分。日平均で出力後、月平均を算出する。また、モデル計算は、KBU が含まれる地点（東経 109°69′、北緯 46°04′）を指定し 1 地点で行う。グローバルデータセットを用いた検証と同様に、スピニアップは 2003 年を 3 回繰り返す。PFT は C3 草地とした。

5.3 使用データ

地上観測データセットを用いた検証では、入力に主に KBU の地上観測データを用いた。以下に使用したフォーシングデータ、陸面特性データ（植生、土壌）について述べる。陸面特性データに関しては、入力に使用するデータセット一覧を表 5-1 に示す。

5.3.1 フォーシングデータ

フォーシングには、観測データを用いた。観測ステーションで観測されているもののうち、本研究で使用したものについて、項目、観測機器、単位の一覧を表 5-2 に示す。また観測値の観測方法、補正などについては Li et al (2005) を参照にしてもらいたい。本研究では 2003 年 4 月 1 日から 2004 年 3 月 24 日はルーチン観測が補正されたデータを使用し、2004 年 3 月 25 日～31 日は補正なしのルーチン観測データを使用した。

地上観測データの検証においてフォーシングデータとして使用したデータは気温 (K)、風速 (m/s)、降雨 (mm/s)、気圧 (Pa)、下向き短波放射 (W/m²)、比湿 (kg/kg) の 30 分平均値である。比湿 (q) は近藤 (2008) より以下の過程から求めた。

$$e_{SAT} = 6.11 \times 10^{7.5T / (T + 237.3)} \quad (25)$$

$$e = e_{SAT} \times RH \quad (26)$$

$$q = \frac{0.622e}{p - 0.378e} \quad (27)$$

ここで、 e_{sat} は飽和水蒸気圧、 T は気温 (°C)、 e は水蒸気圧、 RH は相対湿度、 p は気圧 (hpa) である。

また、KBU の地上観測データには多くの欠損値が存在する。本研究では欠損値の間隔が 3 時間未満なら前後の平均値、3 時間以上なら 1 日平均値、1 日以上はその月の平均値を与えることで補正を行った。

CLM では、時間がすべて UTC (協定世界時)に設定されているため、地上観測のフォーシングデータを作成する際には UTC に変換する必要がある。本研究では KBU の観測機器は JST (日本標準時)で測られているため、9 時間ずらすことで修正を行った。フォーシングデータ(気温、比湿、風速)の観測値を図 5-1 に示す。

5.3.2 陸面特性データ

・植生

LAI、SAI、植生の高さ、運動量粗度、ゼロ面変位の植生データは、KBU における観測値を与えた。それ以外のモデル計算に必要な植生データは、観測値が対象地域にはないので、グローバルデータセットを用いた検証で使った植生パラメータ (Bonan et al,2002a) をそのまま使用することとした。入力として使用したデータを表 5-3 に示す。

LAI、SAI は、6 月から 10 月までの 5 ヶ月分の観測値 (小島 2004) を使用した。LAI は 9 月の観測値がないため、8 月と 10 月の平均値とした。SAI は枝と幹の合計面積の葉面積に対する割合が 5~20% であること (近藤、2000)、また KBU の草原地の植生はイネ科が多く幹の面積が低いことから LAI の 5% とした。KBU における LAI と SAI の入力値を図 5-2 に示す。

キャノピーの高さは 6 月から 9 月の観測値 (Sugita, 2008) を使用した。同様に 10 月の観測値がないため、9 月の値を用いることとする。入力値を図 5-3 に示す。

運動量粗度は、後藤 (2008) の観測値 (図 5-4) を利用した。運動量粗度は通年で一定値を与えるため、モデルの入力に年平均値 $0.21 (\times 10^{-2} \text{m})$ を使用した。

小島 (2004) では、ゼロ面変位 (d_0) を、草丈 h から $d_0 = 2/3 \times h$ によって求めた。これは全観測サイトで風速は高度 2m で計測されていないことから、摩擦速度を用いて高度 2m で測られた値に変換するためである。本研究でも同様の手法で d_0 を求めた。尚、 d_0 も通年で一定値を与えるため、入力値に年平均値 0.02 (m) を使用した。図 5-5 に d_0 の月平均を示す。

・土壌

土壌の粒径構成比は Hoshino (2006) の観測値 (表 5-4) をもとにデータを作成した。Hoshino (2006) では fine sand と coarse sand に区別されているがこれを 1 つにまとめて sand として使用した。CLM では土壌が 10 層になっているため、観測値を CLM の土壌層の深度に合わせて配置した。観測値と深度別に合わせた入力値を図 5-6 に示す。

土壌の色の選別には、裸地面のアルベドが必要とされる。KBU の 4 成分放射計のアルベドでは、裸地面と草地の混合と考えられるため、松浦 (2005) による裸地面のアルベドを使用した。これは KBU のデータではなく KBU の南に位置するダルハン (東経 $109^{\circ}24'$ 、北緯 $46^{\circ}37'$) のデータで観測日は 2003 年 8 月 29 日である。近赤外から可視光まで 6 つの波長帯で測定されており、近赤外の 3 つの波長帯でのアルベドの平均値 0.05 と、可視光の 3 つの波

長帯でのアルベドの平均値が 0.14 となったので、表 4 を用いて、土壌の色を 6 番とした。図 5-7 に松浦（2005）をもとに作成したバンド別の裸地面のアルベドを示す。

・土壌の水利特性

式 (12)、(13)、(14) が示すように CLM では、砂と粘土の比率から飽和透水係数、飽和体積含水率、水分特性曲線を推定し、モデルの中で使用している。そのため、これらの土壌特性値の推定値と観測値を比較して確認を行った。データは Hoshino (unpublished) による不飽和透水係数、飽和透水係数、圧力水頭の観測値を使用した。観測値とモデルとの比較を行った結果を図 5-8、5-9 に示す。

図 5-8 は水分特性曲線を表している。Site1～4 は観測値であり、Site1 は禁牧区、Site2 は放牧区、Site3 は荒地、Site4 は耕作地である。観測値と CLM の比較から観測値に大きなばらつきがあり、モデルは観測値のばらつきの中に入っていることが言える。このことから、観測値とモデル内の水分特性曲線は大きく違いがないと考えられる。

次に、不飽和透水係数と体積含水率の関係を図 5-9 に示す。放牧区の site2 と比較すると、モデルはそれほど観測値と違いがないように思われる。観測値のデータ数も少なく、ばらつきも多いが、CLM 内の推定値と観測値はそれほど違いがないと考えられる。

以上の結果から、モデル内の土壌の水利特性は、CLM 内で粒径構成比からの推定されたものをそのまま使用することとした。

5.4 結果・考察

5.4.1 CLM と観測値の比較

KBU における 2003 年 4 月から 2004 年 3 月の顕熱・潜熱フラックスの月平均を求め、観測値との比較を図 5-10 に示す。顕熱フラックスでは、10 月までは季節変化がおおまかに再現できているが、冬季から観測値と挙動が大きく異なる。潜熱フラックスでは、9 月に観測値と異なる結果になっている。また、冬季はほぼゼロに近く、1 年を通して観測値より過大であることが分かる。

このような観測値との差を調べていくために、まず放射収支を調べていくこととする。

放射収支では、冬季に一定の違いが見られ、アルベドが原因だと考えられた (図 5-11)。そこでアルベドの冬季を調べると、観測値と大きな違いがみられた。これは積雪が上手く捉えられていないことが分かる。モデルの中では、少量の雪では降っても積雪することができず、すぐに融雪してしまうと推測され、顕熱フラックスの冬季が異なる原因としてアルベドであると考えられた。潜熱フラックスは、放射収支と比較すると、観測値とモデルの大小関係が異なるため、放射収支が原因ではないことが分かる。また、夏季にアルベドの影響をそれほど受けなため、アルベドが原因ではないと推測される。図 5-12 の地中熱フラックスを調べても、暖候期 (4 月・9 月) には観測値と大きな違いが見られないことから、植生、土壌特性の可能性が考えられた。このことから、日平均でさらに詳しく調べることにした。

5.4.2 日平均値の比較（季節内変化）

熱・水収支の検証結果を図 5-13 に示す。顕熱フラックスは大まかに再現できているが、特に冬季の再現性が悪いことが分かった。これは、前節で述べた冬季のアルベドの再現が上手く出来ていないことが原因と言える。

潜熱フラックスでは、観測値と挙動が異なる結果となった。第 4 章のグローバルデータセットを用いた検証と同様、降雨直後に潜熱フラックスが集中し、その後土壌が乾燥して潜熱フラックスが減少する傾向が見られた。

土壌水分量は、比較的良く再現できている。しかし、グローバルデータセットを用いた検証と同様に、ある一定値から乾燥しないという特徴が見られ、乾燥時は観測値と挙動が異なる結果となった。この原因として、土壌の粒径構成比が観測値と異なる可能性がある。

以上の結果から、観測値との挙動が異なる原因として、植生・土壌特性のパラメータに改善の余地があると推測し、感度分析によりさらに詳しく調べていく必要があると考えられた。

5.4.3 時間平均値の関係

顕熱・潜熱フラックスの挙動をさらに詳細に調べるため、時間単位での検証を行った。これらの検証結果を図 5-14 に示す。潜熱では、特に降雨後の乾燥時は比較的によく再現できていることが分かる。しかし、降雨時に潜熱フラックスが集中する傾向が見られ、季節内変化と同様、降雨時の再現性が悪いことが分かった。顕熱では、潜熱が過大でありすぎることから観測値よりも過小に評価していると言える。この検証からもモデルと観測値の違いの原因として植生・土壌の特性に問題があると推測される。

6. 感度分析

6.1 概要

地上観測データセットを用いた検証で潜熱が必ずしも良く再現できなかった。1つの原因として、植生・土壌特性に問題があると考えられたことから、ここでは、土壌特性、LAI、植生の集中度に対する感度分析を行った。

6.2 土壌特性に対する感度分析

土壌水分の挙動が観測値と異なること、第5章の土壌の水理特性において、観測値に大きなばらつきがあり、検証が不完全であることから、土壌特性に対する感度分析を行う。ここでは、土壌の特性の違いが潜熱に与える影響を調べる。方法として、表層における土壌の粒径構成比の砂の比率を観測値の74%から60、40、20%と変えてモデル計算し、それぞれの表層にあたる土壌水分量と潜熱フラックスを求めた。土壌水分量は表層部とする。

分析結果を図6-1に示す。特に降雨直後に大きな違いが見られ、砂の割合が低い方が土壌水分量は高くなることが分かる。図6-2、6-3に示すとおり、砂の割合が低いほど、飽和透水係数も低いことから(式(12)参照)、土壌中深くに浸透せず、表層部の土壌水分量が高くなるということに一致する。しかし、乾燥時はそれほど砂の割合に土壌水分量が依存していないことが分かる。一方潜熱フラックスでは、土壌の粒径構成比に関係なく違いがそれほどないことが分かった。乾燥時でも同様に変化が見られず、砂の割合が変化しても年間通してほぼ同程度の値になる結果となった。これは、透水係数が低いことから、土壌の粒径構成比が変化してもそれほど影響を与えないと推測される。これを表す図を6-4に示す。ここでは、それぞれの砂の割合を変えて計算した不飽和透水係数の日変化を表しており、砂の割合がどの場合にも、透水係数が非常に低いことが分かる。よって、砂の割合が変化しても潜熱フラックスに影響を与えないことが考えられる。

以上の結果から、土壌の粒径構成比を変化させても土壌水分量は変化するが、潜熱フラックスにはそれほど影響を与えないことから、それほど土壌特性に強く依存しないと推測される。

6.3 LAIに対する感度分析

LAIの潜熱フラックス、土壌水分量への影響を調べるために感度分析を行う。方法として、観測値のLAIを観測値の0.25倍、2倍、4倍と変えていき、土壌水分量、潜熱フラックスを求めLAIに対する感度分析を行う。土壌水分量は深度5cmの地点とする。

季節内変化、時間変化での分析結果を図6-5、6-6に示す。潜熱フラックスでは、降雨時はそれほど違いが見られないが、降雨後の乾燥段階においてLAIが高い方が潜熱は高くなることが分かった。また、LAIが高い方が降雨後の土壌水分量は低くなる結果となった。これは植生が多いと土壌内の根による水分吸収量が多くなり地上に放出するという点で、LAIの高い方が降雨後の土壌水分量は下がり、潜熱フラックスは高くなるという一般的な知見が推測される。そこでLAI別に計算した蒸散、遮断蒸発、地面からの蒸発を図6-7に示す。まず蒸散と遮断蒸発はLAIに比例しており、LAIが高い方が、降雨後にそれぞれ蒸発量が高くなっ

ていることが分かる。地面からの蒸発量は、LAI が高い方が低くなる傾向が見られる。これは蒸散が進んでいるために、LAI の高い方が土壌内の根によって大気中に多くの水分を排出するため、その分地面が乾燥してしまうためだと考えられる。よって、総合的に降雨直後の潜熱は変わらないが、その後の乾燥段階において蒸散による差が出てくるため、植生に対して感度が出てくると推測される。

6.4 植生の集中度に対する感度分析

植生の集中度の潜熱フラックス、土壌水分量への影響を調べるため、植生の集中度に対する感度分析を行う。方法として、草原と裸地が混在するグリッド内において、草原の LAI と、草原と裸地面の面積の割合を変えることによって行った。まず、ケース 0 では C3 草地を 100% とし、観測値の LAI を通常通りにする。次に、ケース 1 では C3 草地、裸地面の割合をそれぞれ 50% とし、LAI を通常の 2 倍にする。ケース 2 では、C3 草地、裸地面の割合をそれぞれ 25%、75% とし、LAI を通常の 4 倍にする。どのケースも平均的な LAI はすべて同じであり、ケース 2 の方が、植生の集中度が高いことになる。図 6-8 に分析方法を簡潔に示した。

分析結果を季節内変化と時間変化で図 6-9、6-10 に示す。土壌水分量では、どのケースでも土壌水分量の挙動は違いがないことが分かった。これは、PFT 別（ケース 1、2）に分けて LAI の量を変えても、モデルの中では同じ 1 つの土壌を共有しているため変化がないと推測される。次に潜熱フラックスを PFT 別で見た場合、植生が集中している方が裸地の潜熱フラックスは低くなる傾向が見られた。しかし、ケース 0 のグリッド平均で比較した結果からは、必ずしも植生が集中している方が潜熱は高くなるとは限らず、どのケースもそれほど潜熱フラックスの変化はないことが分かった。図 6-10 の時間変化でも同様に、PFT 別では植生が集中している方が潜熱は高くなっている。しかし、グリッド平均と比較した場合、6 月 23 日、25 日あたりはグリッド平均の方が潜熱は高くなっている時があり、必ずしも植生の集中度が高いと潜熱フラックスが大きくなっているとは言えない。

これらの結果から、植生の集中度に対して地表面熱収支に感度があることは考えにくい結果となった。

7. 結論

陸面モデルをモンゴル半乾燥地に適用し、陸面水文過程を再現し、地上観測データによる検証と感度分析を行うことによって、陸面水文過程の再現性を検討し、陸面モデルの適用における問題点を明らかにした。本研究で明らかになったことを以下に示す。

熱・水収支に関する検証では、GCM 内の陸面モデルの挙動を再現した。月平均では、季節変化が比較的良く再現できていたが、日平均では再現性はよくなかった。これはフォーシングの降水の精度を反映している。半乾燥地域では、降水が熱・水収支を支配しているので、陸面モデルでも降水が重要であることが分かった。

地上観測データをフォーシング、入力パラメータにした熱・水収支の検証では、降雨直後の潜熱フラックスが上手く再現できないこと、土壌水分量の挙動が観測値と大きく異なることから、土壌と植生のパラメータに問題があると推測された。そこで植生と土壌のどのパラメータが重要であるかを見いだすために、土壌特性と LAI に対する感度分析を行った。その結果、潜熱フラックスは土壌特性よりも LAI に対する感度が高いことが示された。すなわち、半乾燥地域で LAI が 1 以下のまばらな草原においても、地表面熱収支において植生が重要な役割を果たしていることが考えられた。実際の現象でも同じことが考えられ、一般的な予想とは異なる。よって、半乾燥地域でも植生パラメータを適切に与えることが重要であると考えられた。

表 4-1 CLM の大気フォーシングデータの一覧

| 要素 | 単位 |
|---------------------------------------|----------------|
| 風速 (z_{atm}) ¹⁾ | m/s |
| 比湿 (z_{atm}) | kg/kg |
| 気圧 (z_{atm}) | Pa |
| 気温 (z_{atm}) | K |
| 降水 | mm/s |
| 下向き短波放射 | W/m^2 |

¹⁾ z_{atm} : 基準高度 (m)

表 4-2 グローバルデータセットを用いた検証における陸面特性の入力データの一覧

| 陸面特性データ | 解像度 | モデルへの入力方法 | 参考文献 |
|------------------------|-------------|-----------------------------|---|
| Landmask | – | 1-陸, 0-他 | – |
| 陸の割合 | – | – | – |
| 土壌の色 | 約2.8° (T42) | それぞれの地域ごとに土壌の色を決定 | Zeng et al. (2002) Dickinson et al. (1993) |
| 砂, 粘土の比率 | 5分 | 土壌マップからそれぞれの地域の 粒径構成比を決定 | Bonan et al. (2002b) |
| PFTs (植生の割合) | 0.5° | その範囲の平均値 | Bonan et al. (2002b) |
| LAIの月平均値 | 0.5° | その範囲の平均値 | Bonan et al. (2002b) |
| SAIの月平均値 | 0.5° | その範囲の平均値 | Bonan (1996) |
| キャノピーの高さ (top, bottom) | 0.5° | その範囲の平均値 | Bonan (1996) |

表 4-3 乾燥、湿潤時のアルベドに対する土壌色。(Keith et al,2004)より抜粋（グローバルデータセット） vis は可視光、nir は近赤外を表す。

| 色の分類 | 乾燥 | | 湿潤 | |
|-------|------|------|------|------|
| | vis | nir | vis | nir |
| 1=明るい | 0.24 | 0.48 | 0.12 | 0.24 |
| 2 | 0.22 | 0.44 | 0.11 | 0.22 |
| 3 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 |
| 4 | 0.18 | 0.36 | 0.09 | 0.18 |
| 5 | 0.16 | 0.32 | 0.08 | 0.16 |
| 6 | 0.14 | 0.28 | 0.07 | 0.14 |
| 7 | 0.12 | 0.24 | 0.06 | 0.12 |
| 8=暗い | 0.1 | 0.2 | 0.05 | 0.1 |

表 4-4 植生パラメータ（グローバルデータセット）。4),5)の根の分布は、
2つのパラメータ a,b を持つ。

| Plant Function Type | Rz0m ¹⁾ | Rd ²⁾ | dleaf ³⁾ | ra ⁴⁾ | rb ⁵⁾ | Vmax25 ⁶⁾ | α ⁷⁾ | m ⁸⁾ | α leaf vis ⁹⁾ | α leaf nir ¹⁰⁾ | α stem vis ¹¹⁾ | α stem nir ¹²⁾ | τ leaf vis ¹³⁾ | τ leaf nir ¹⁴⁾ | τ stem vis ¹⁵⁾ | τ stem nir ¹⁶⁾ | XL ¹⁷⁾ |
|---------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|----------------------|------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 低木地 | 0.12 | 0.68 | 0.04 | 7 | 1.5 | 33 | 0.06 | 9 | 0.1 | 0.45 | 0.16 | 0.39 | 0.05 | 0.25 | 0.001 | 0.001 | 0.25 |
| C3 草地 | 0.12 | 0.68 | 0.04 | 11 | 2 | 43 | 0.06 | 9 | 0.11 | 0.58 | 0.36 | 0.58 | 0.07 | 0.25 | 0.22 | 0.38 | -0.3 |
| 穀物(もろこし) | 0.12 | 0.68 | 0.04 | 6 | 3 | 50 | 0.06 | 9 | 0.11 | 0.58 | 0.36 | 0.58 | 0.07 | 0.25 | 0.22 | 0.38 | -0.3 |

- 1)運動量粗度
2) ゼロ面変位
3) 葉の大きさ (m)
4), 5) 根の分布
6) 25℃におけるカルボキシル化の最大値
7) 量子効率
8)コンダクタンス-光合成の勾配
9) 葉の反射率 (可視光)
10) 葉の反射率 (近赤外)
11) 茎の反射率 (可視光)
12) 茎の反射率 (近赤外)
13) 葉の透過率 (可視光)
14) 葉の透過率 (近赤外)
15) 茎の透過率 (可視光)
16) 茎の透過率 (近赤外)
17) 葉の角度

表 4-5 グローバルデータセットを用いた検証における検証対象グリッド内の PFT の割合

| PFTの種類 | C3 草地 | 低木 | 穀物(もろこし) | 裸地 |
|--------|-------|----|----------|----|
| 割合 (%) | 68 | 27 | 4 | 1 |

表 5-1 入力に必要な陸面特性データの一覧

| 種類 | パラメータ | 数値 |
|---------|------------------------|----------------------------------|
| 陸面特性データ | 陸の割合 | — |
| | 土壌の色 | 6 |
| | 月平均のLAI,SAI | 図5-2を参照 |
| | キャノピーの高さ (top, bottom) | 図5-3を参照 |
| | 土壌の粒径構成比 | 図5-6を参照 |
| 植生パラメータ | 運動量粗度 | $0.21 (\times 10^{-2} \text{m})$ |
| | ゼロ面変位 | 0.02 (m) |
| | 葉の大きさ (m) | 0.04 (m) |
| | 根の分布 | a=11, b=2 |
| | 25°Cにおけるカルボキシル化の最大値 | 43 |
| | 量子効率 | 0.06 |
| | コンダクタンス-光合成の勾配 | 9 |
| | 葉の反射率 (可視光) | 0.11 |
| | 葉の反射率 (近赤外) | 0.58 |
| | 茎の反射率 (可視光) | 0.36 |
| | 茎の反射率 (近赤外) | 0.58 |
| | 葉の透過率 (可視光) | 0.07 |
| | 葉の透過率 (近赤外) | 0.25 |
| | 茎の透過率 (可視光) | 0.22 |
| | 茎の透過率 (近赤外) | 0.38 |
| | 葉の角度 | -0.3 |

表 5・2 地上観測データの一覧

| 要素 | 測定機器 | サンプリング間隔 | 記録間隔 | 設置高度(m) | 単位 |
|---------|---|----------|--------|---------|------------------|
| 下向き短波放射 | 放射収支計 (CNR1, Kipp&Zone B.V., The Netherlands) | 5s | 30min. | 2.5 | W/m ² |
| 下向き長波放射 | 同上 | 5s | 30min. | 2.5 | W/m ² |
| 上向き短波放射 | 同上 | 5s | 30min. | 2.5 | W/m ² |
| 上向き長波放射 | 同上 | 5s | 30min. | 2.5 | W/m ² |
| 顕熱フラックス | 超音波風速計 (SAT550, Kaijo Corporation, Japan) | 10Hz | 30min. | 2.5 | W/m ² |
| 潜熱フラックス | 超音波風速計 (SAT550, Kaijo Corporation, Japan), CO ₂ /H ₂ O 赤外線ガス分析計 (LI-7500, Li-cor, Inc., USA) | 10Hz | 30min | 2.5 | W/m ² |
| 風速 | 超音波風速計 (SAT550, Kaijo Corporation, Japan) | 10Hz | 30min. | 2.5 | m/s |
| 気圧 | (Campbell PTB210, Vaisala, Oyj, Finland) | 10Hz | 30min. | 1.5 | hpa |
| 気温 | 通風管付き温湿度計 (HMD45A, Vaisala, Oyj, Finland) | 5s | 30min. | 2.5 | °C |
| 相対湿度 | 同上 | 5s | 30min. | 2.5 | % |
| 体積含水率 | TDRセンサー (Trime-IT, IMKO, Micromodultechnik GmbH, Germany) | 30min. | 30min. | -0.05 | % |
| 降水量 | 転倒マス式雨量計 (52202, R.M. Young Company, USA) | 30min. | 30min. | - | mm |

表 5-3 地上観測で捕足として使用した植生パラメータの一覧 (Bonan et al,2002a)
 2),3)の根の分布は、2 つのパラメータ a,b を持つ。

| Plant Function Type | leaf ¹⁾ | ra ²⁾ | rb ³⁾ | Vmax ^{25 4)} | α ⁵⁾ | m ⁶⁾ | α leaf vis ⁷⁾ | α leaf nir ⁸⁾ | α stem vis ⁹⁾ | α stem nir ¹⁰⁾ | τ leaf vis ¹¹⁾ | τ leaf nir ¹²⁾ | τ stem vis ¹³⁾ | τ stem nir ¹⁴⁾ | XL ¹⁵⁾ |
|---------------------|--------------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| C3 草地 | 0.04 | 11 | 2 | 43 | 0.06 | 9 | 0.11 | 0.58 | 0.36 | 0.58 | 0.07 | 0.25 | 0.22 | 0.38 | -0.3 |

- 1) 葉の大きさ (m)
- 2), 3) 根の分布
- 4) 25℃におけるカルボキシル化の最大値
- 5) 量子効率
- 6) コンダクタンス-光合成の勾配
- 7) 葉の反射率 (可視光)
- 8) 葉の反射率 (近赤外)
- 9) 茎の反射率 (可視光)
- 10) 茎の反射率 (近赤外)
- 11) 葉の透過率 (可視光)
- 12) 葉の透過率 (近赤外)
- 13) 茎の透過率 (可視光)
- 14) 茎の透過率 (近赤外)
- 15) 葉の角度

表 5-4 土壤の粒径構成比の観測値
(Hoshino ,2006)

| layer (cm) | clay (%) | silt (%) | fine sand (%) | coarse sand (%) |
|------------|----------|----------|---------------|-----------------|
| 0-5 | 11 | 14 | 63 | 11 |
| 15-20 | 12 | 20 | 57 | 12 |
| 35-40 | 10 | 13 | 72 | 5 |
| 60-65 | 3 | 3 | 91 | 3 |
| 80-85 | 3 | 5 | 87 | 6 |

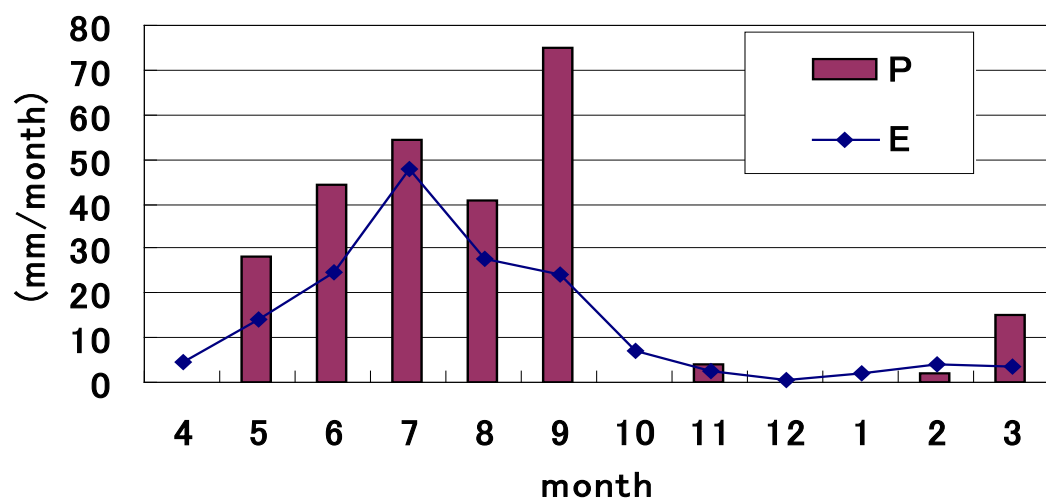


図 2-1 KBU における月降水量と月蒸発量の観測値 (2003 年 4 月～2004 年 3 月)。図中の P は降水量、E は蒸発散量を表す。

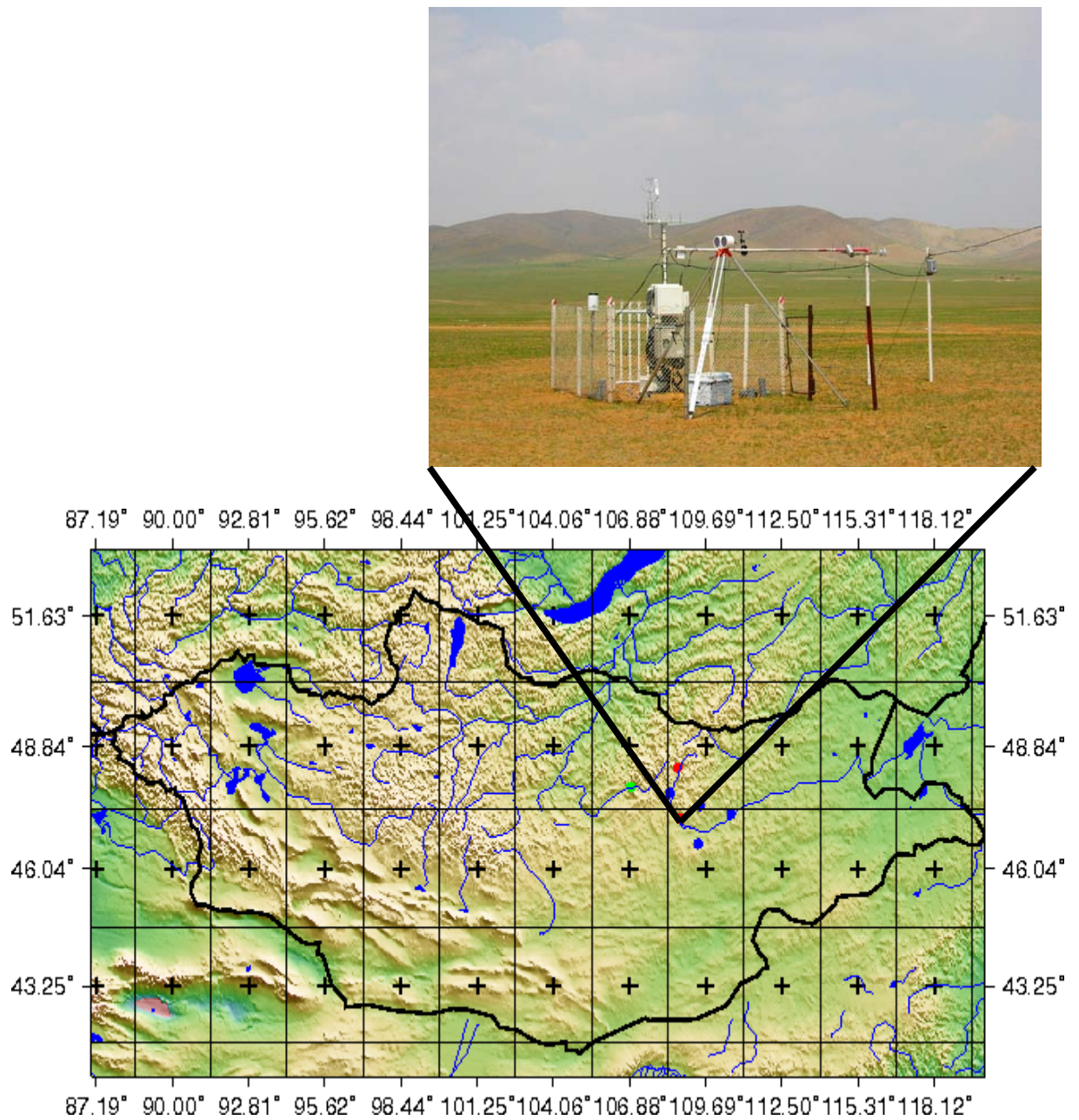


図 2-2 地上観測地域。KBU はモンゴル国ヘンティ県ヘルレンバイヤンウランを表す。写真は自動観測ステーションである。

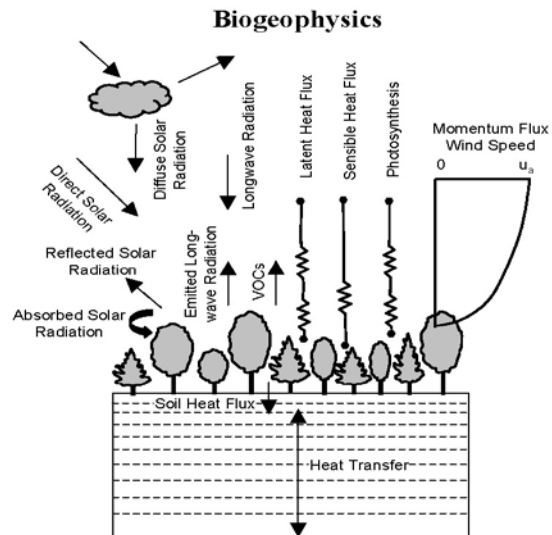


図 3-1 生物地球物理学的プロセスの概念図 (Bonan et al (2002)より抜粋) VOCs (volatile organic compounds)は揮発性有機化合物を表す。

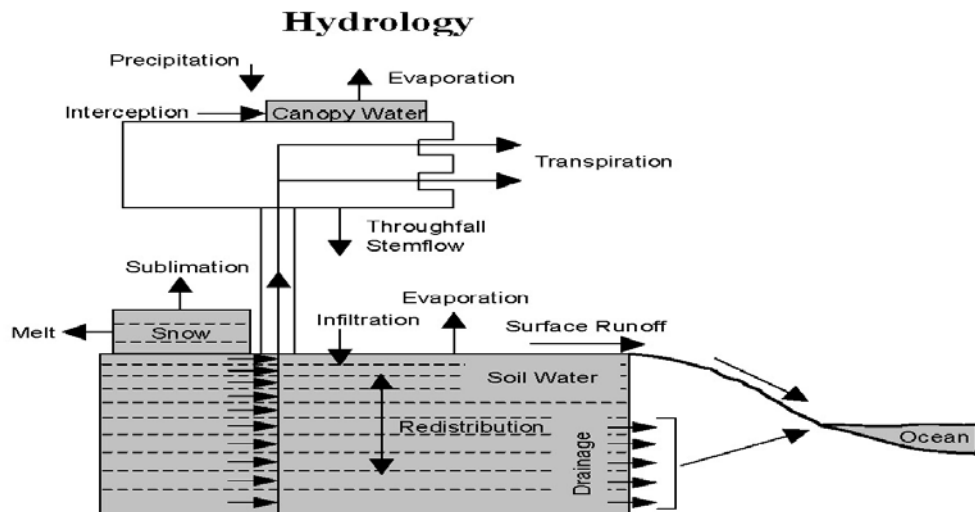


図 3-2 水文学的プロセスの概念図 (Bonan et al (2002)より抜粋)

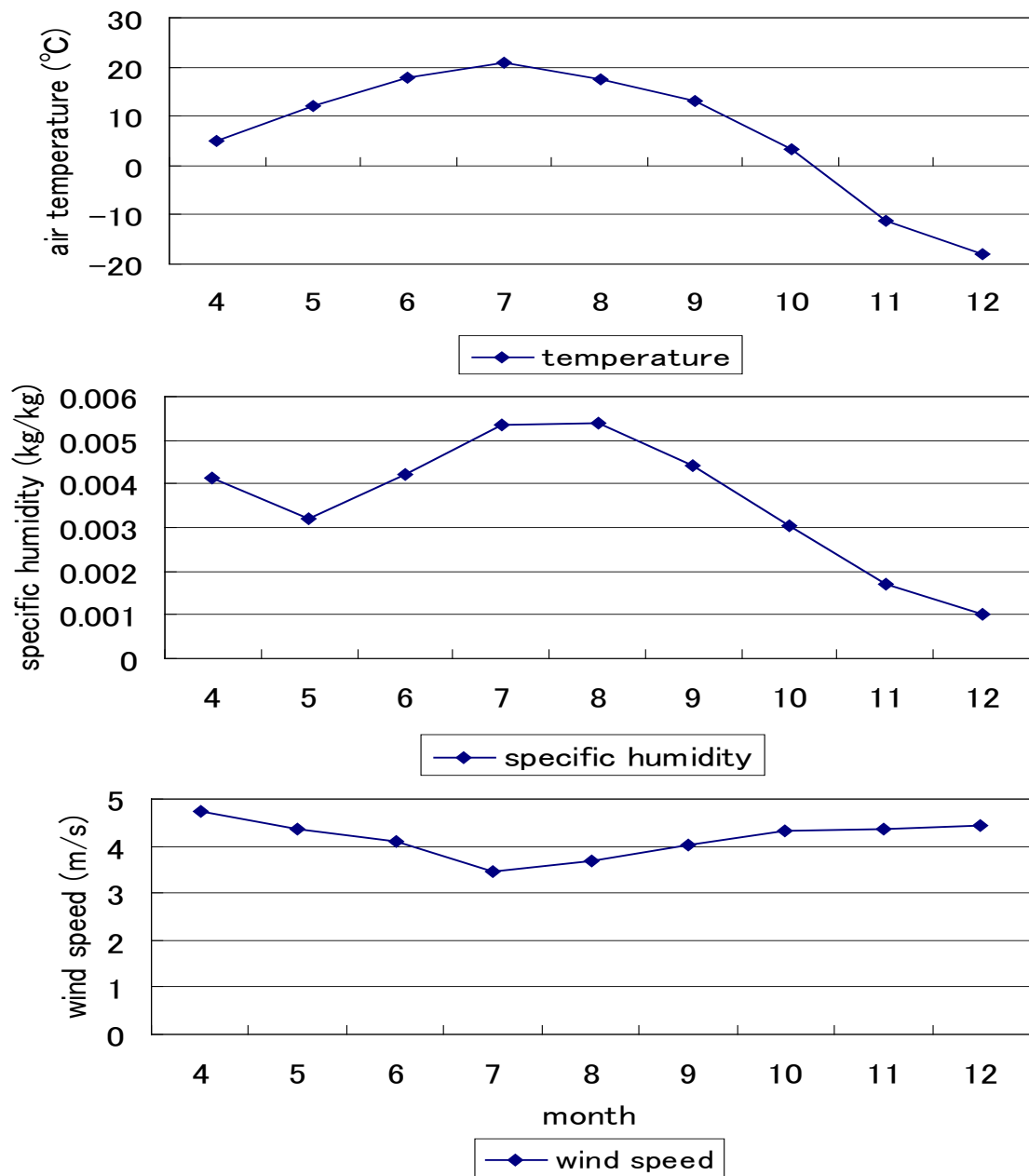


図 4-1 グローバルデータセットを用いた検証で用いたフォーシングデータ(Qian et al,2006) (気温、比湿、風速) の月平均値 (2003 年 4 月～12 月)。上は気温、中は比湿、下は風速を表す。

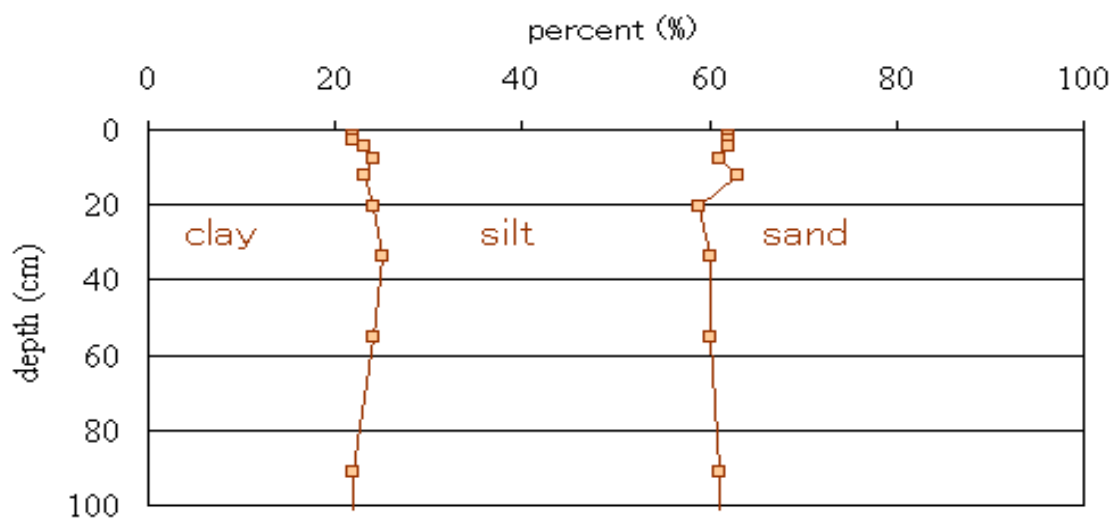


図 4-2 グローバルデータセットを用いた検証で用いた土壌の粒径構成比。図はグローバルデータセットの入力値である。

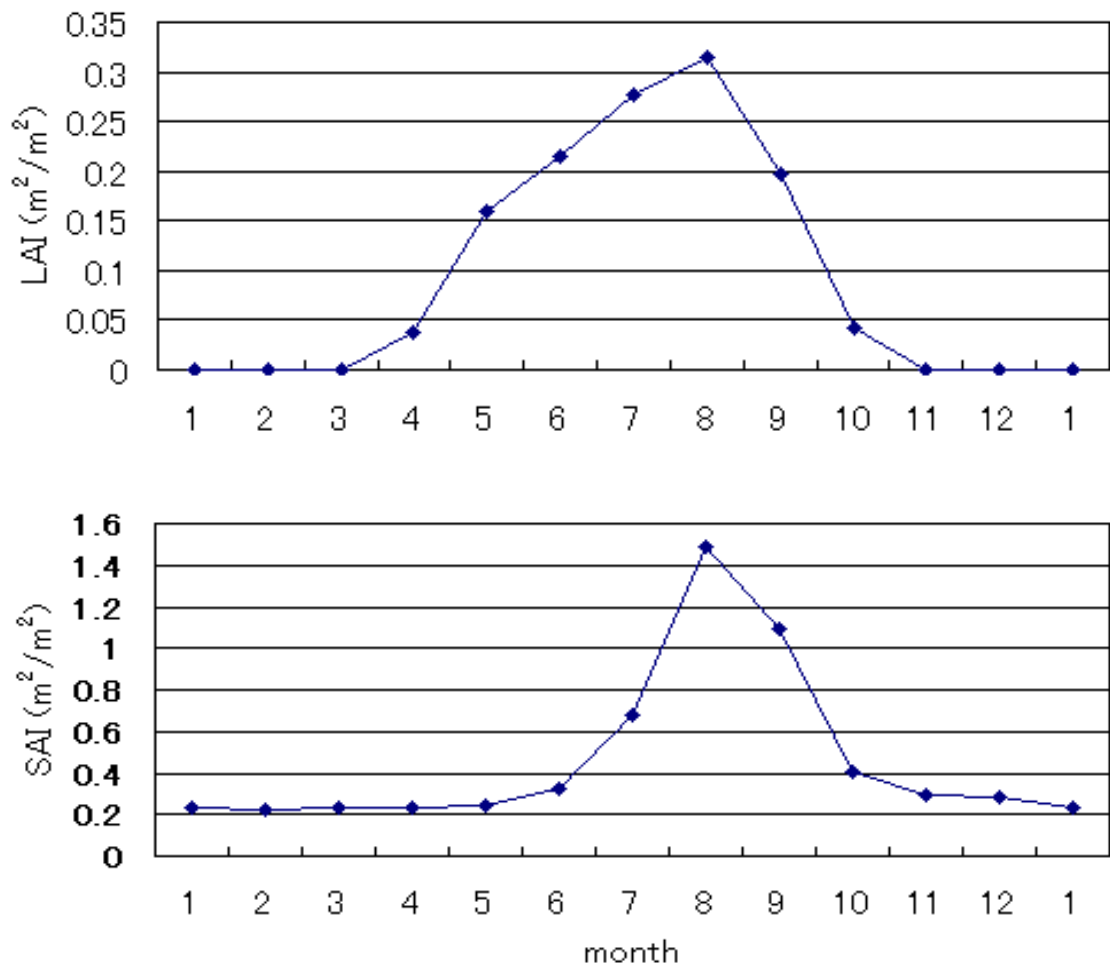


図 4-3 図 4-2 に同じ。ただし C3 草地の LAI と SAI の月別値 (Bonan et al,1996, 2002b)。

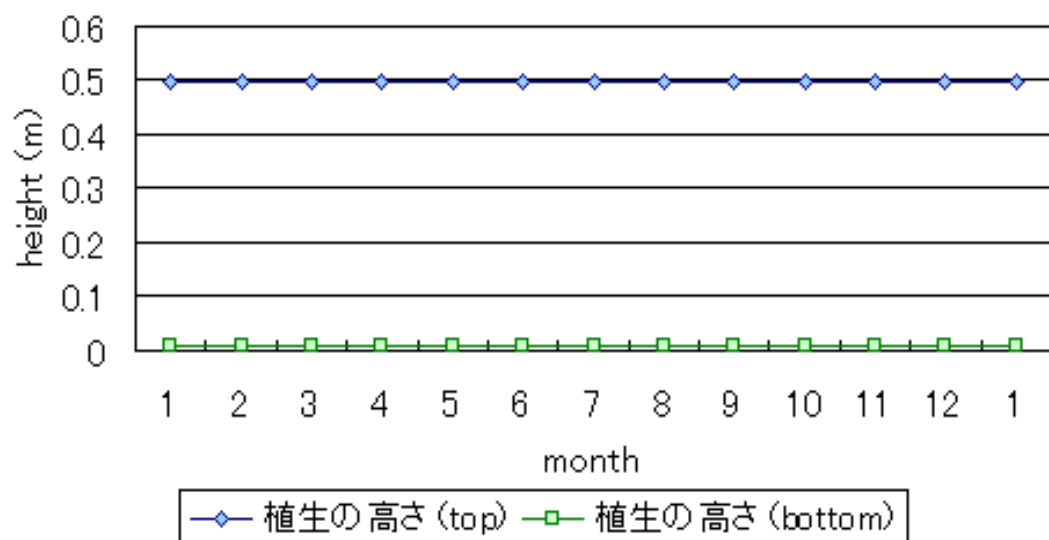


図 4-4 図 4-3 に同じ。ただし、植生の高さについて。青は頂上部 (top) の C3 草地の高さを表し、緑は底部 (bottom) の C3 草地の底部の高さを表す。

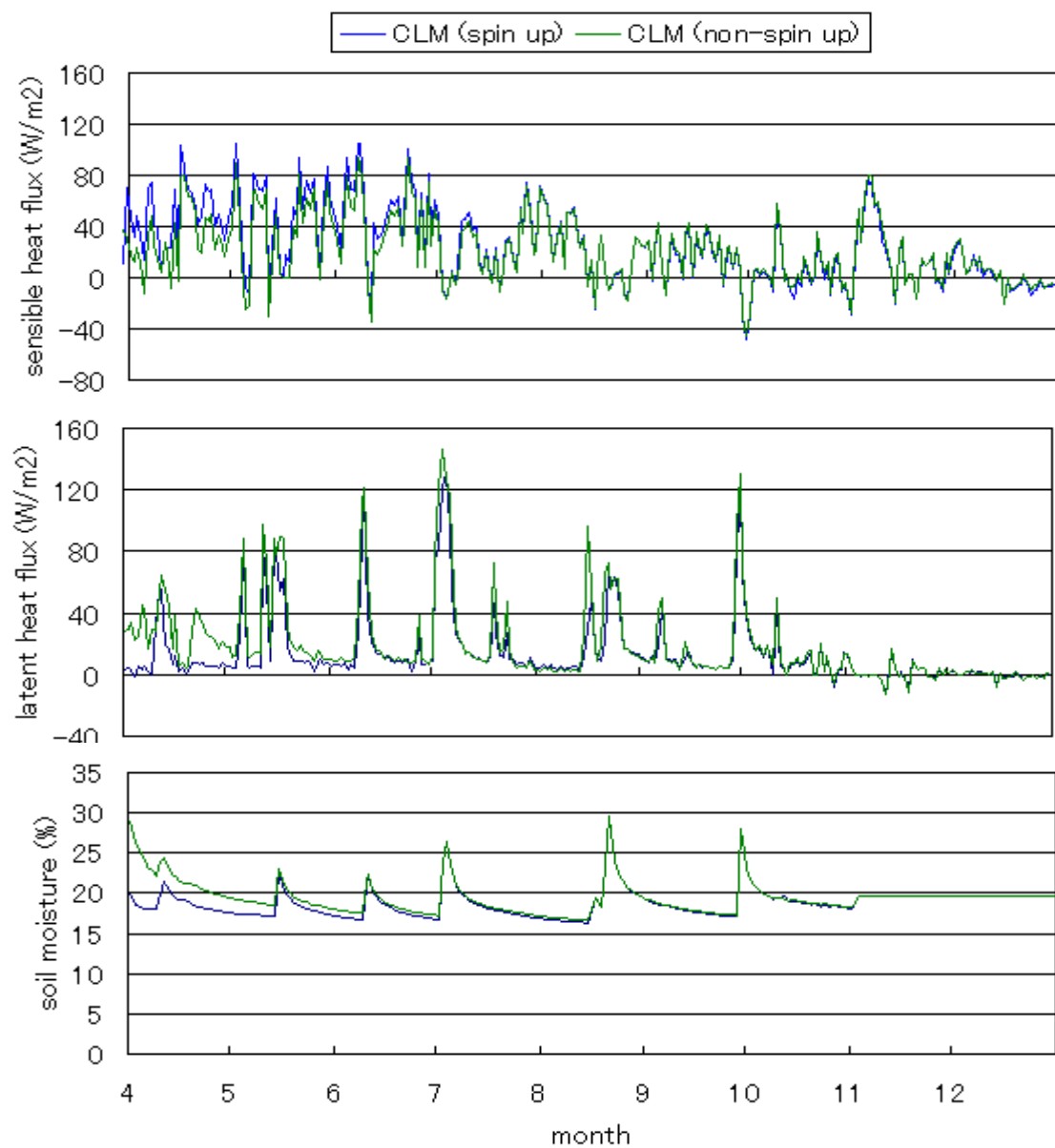


図 4-5 スピニアップの有無の比較 (2003)。上は顕熱フラックス、中は潜熱フラックス、下は土壌水分量 (深さ 0~6cm) である。

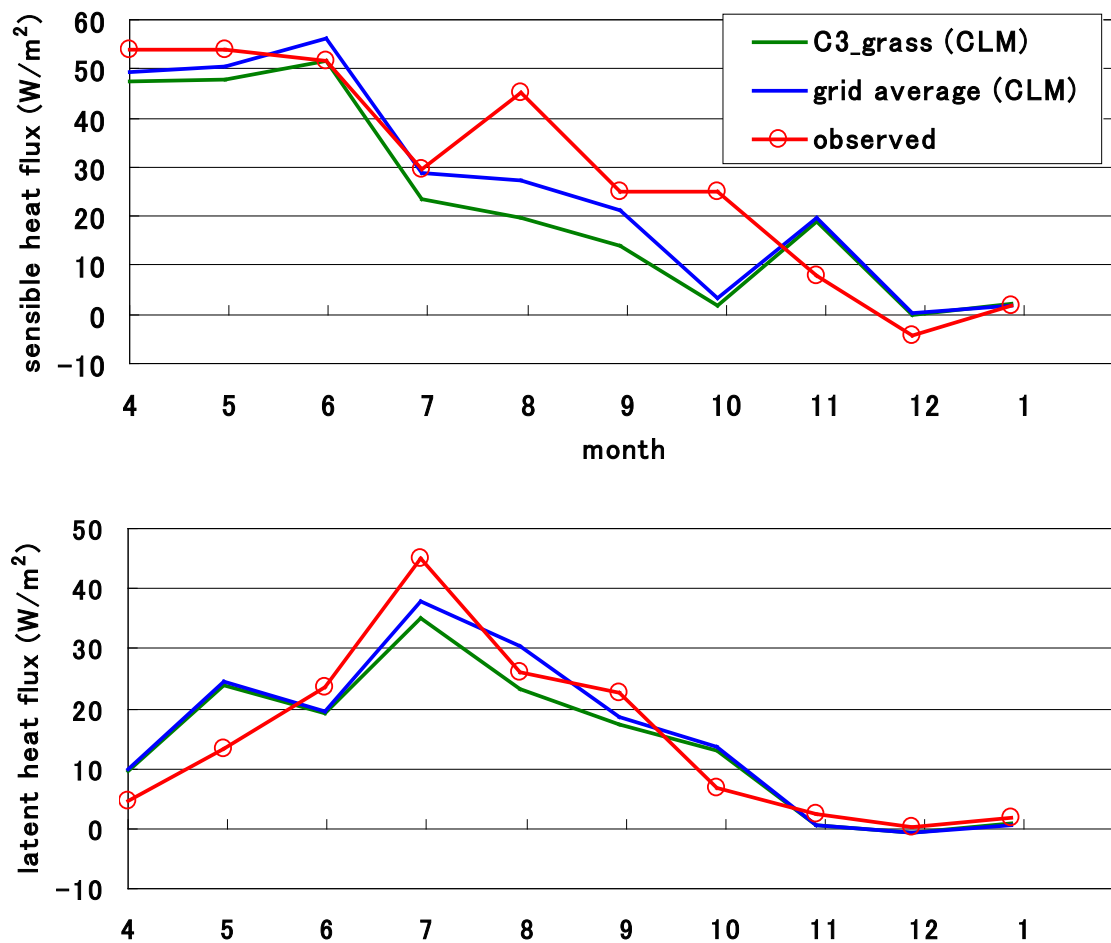


図 4-6 月平均の顕熱・潜熱フラックス (2003 年 4 月～2004 年 1 月)。上は顕熱フラックス、下は潜熱フラックスである。グローバルデータセットを用いた検証より。

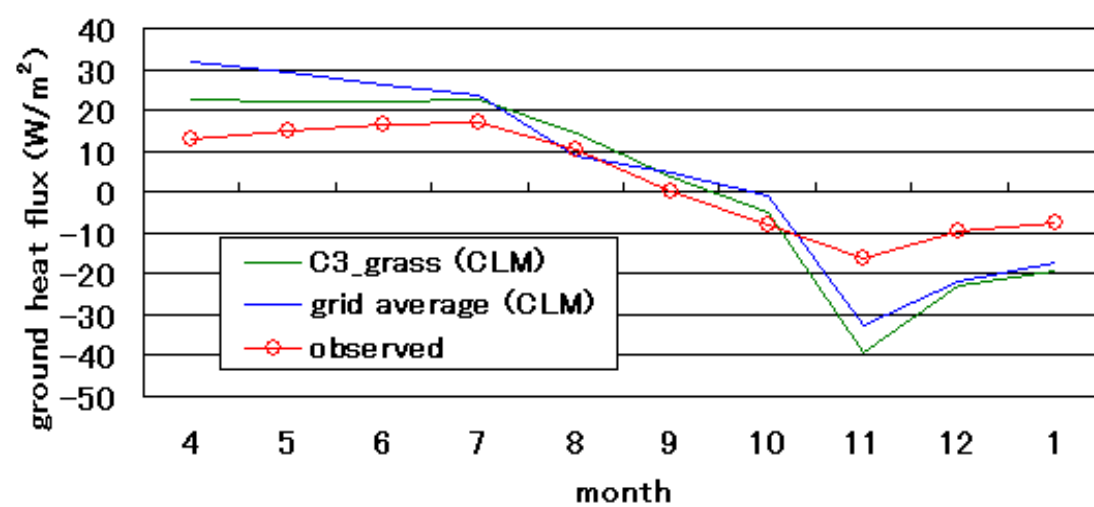


図 4-7 図 4-6 に同じ。ただし地中熱フラックスの季節変化。

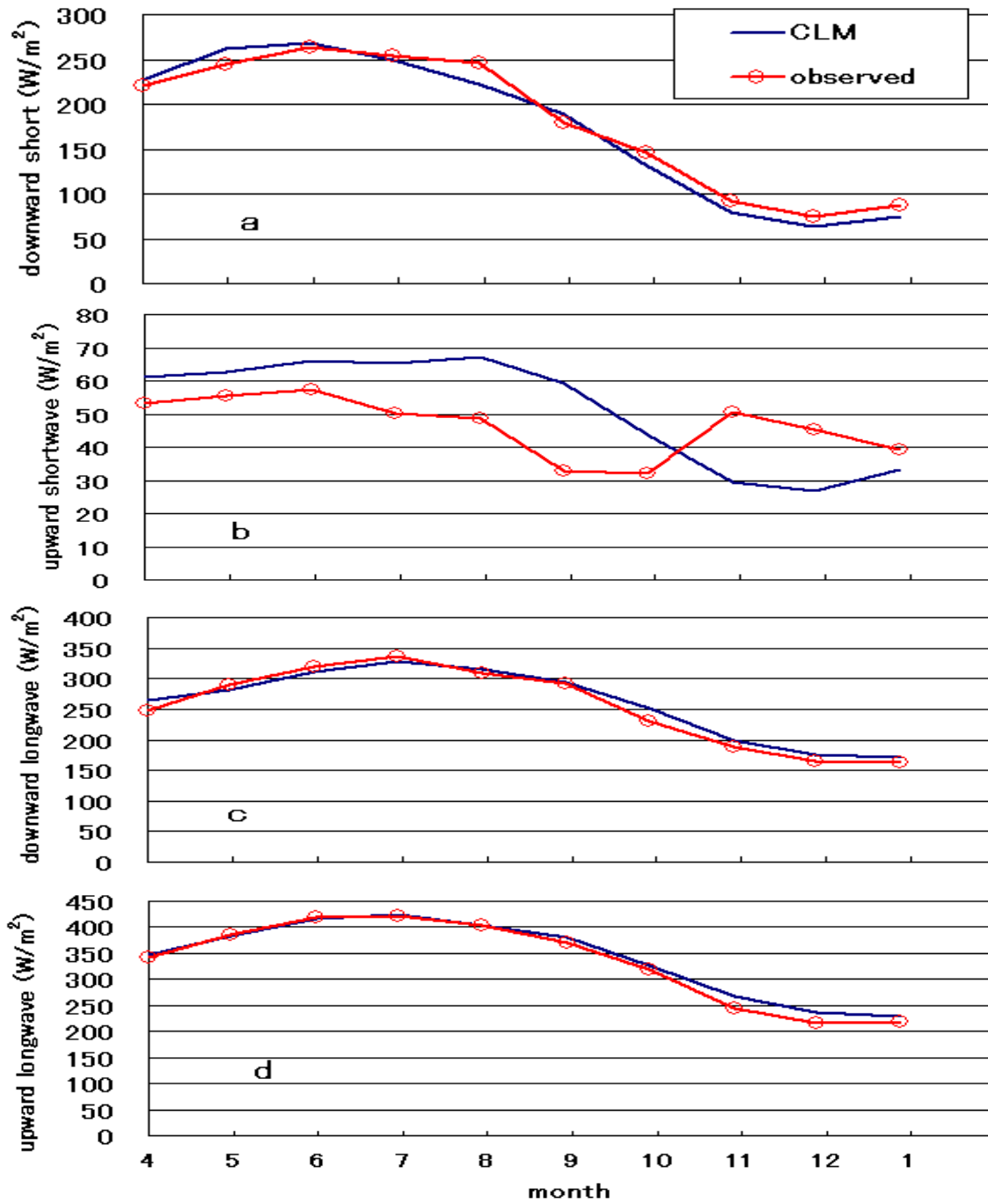


図 4-8 図 4-6 に同じ。ただし、放射 4 成分について。a は下向き短波放射、b は上向き短波放射、c は下向き長波放射、d は上向き長波放射である。

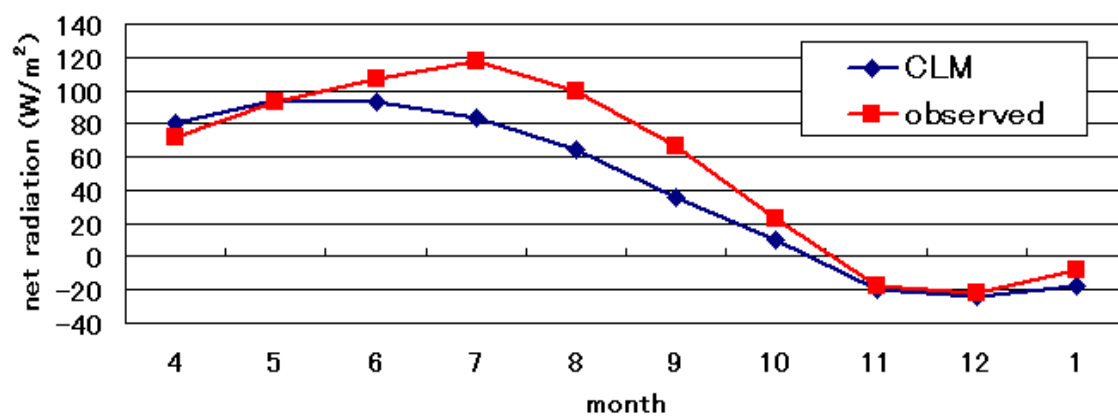


図 4-9 図 4-6 に同じ。ただし、放射収支の季節変化について。

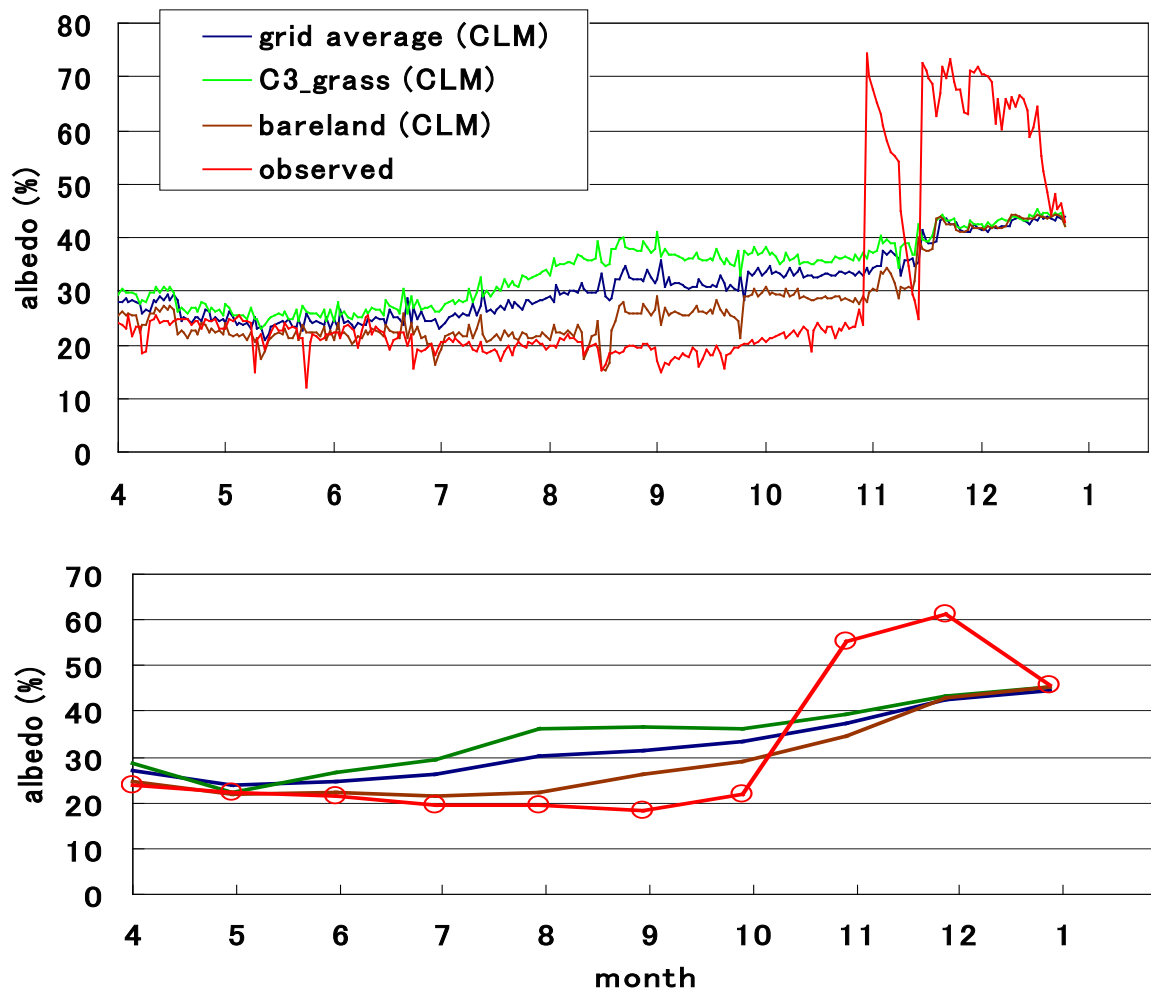


図 4-10 図 4-6 に同じ。ただしアルベドの季節変化について。上は日平均、下は月平均である。

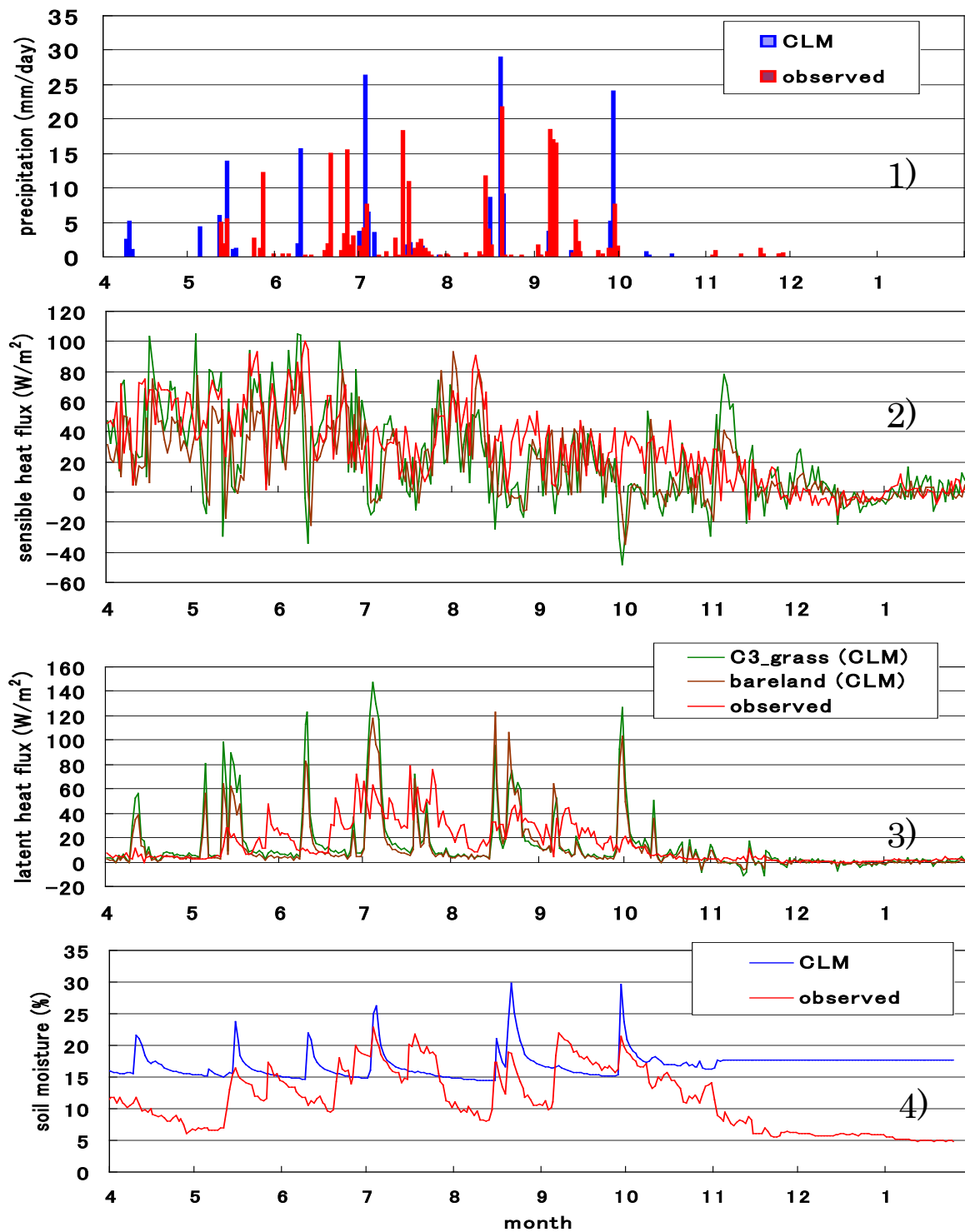


図 4-11 図 4-6 に同じ。ただし熱・水収支の日平均値の季節変化について。1) は降水量、2) は顕熱、3) は潜熱、4) は土壌水分量である。

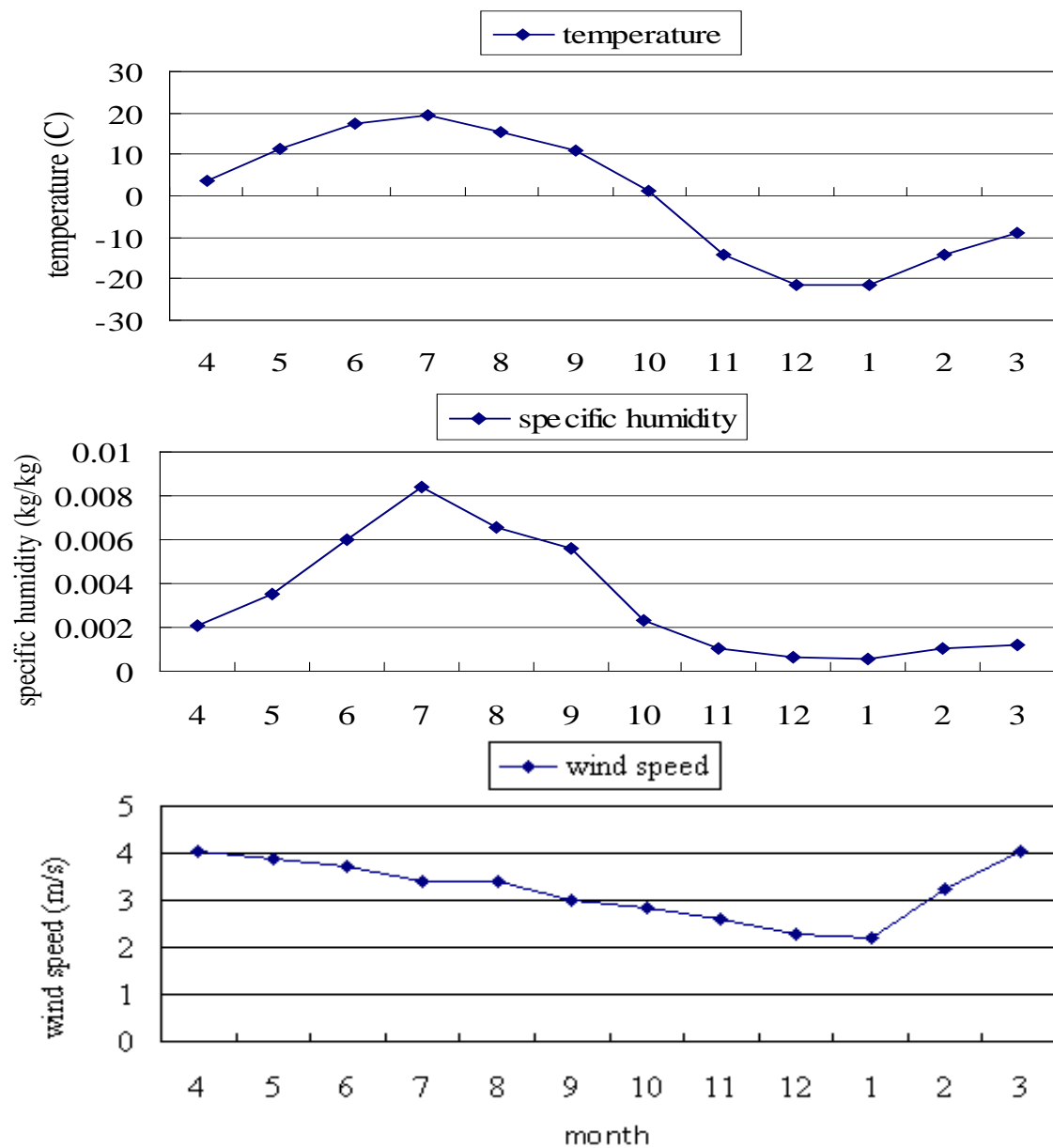


図 5-1 地上観測より作成したフォーシングデータ（気温、比湿、風速）の月平均値（2003 年 4 月～2004 年 3 月）。上は気温（°C）、中は比湿（kg/kg）、下は風速（m/s）である。

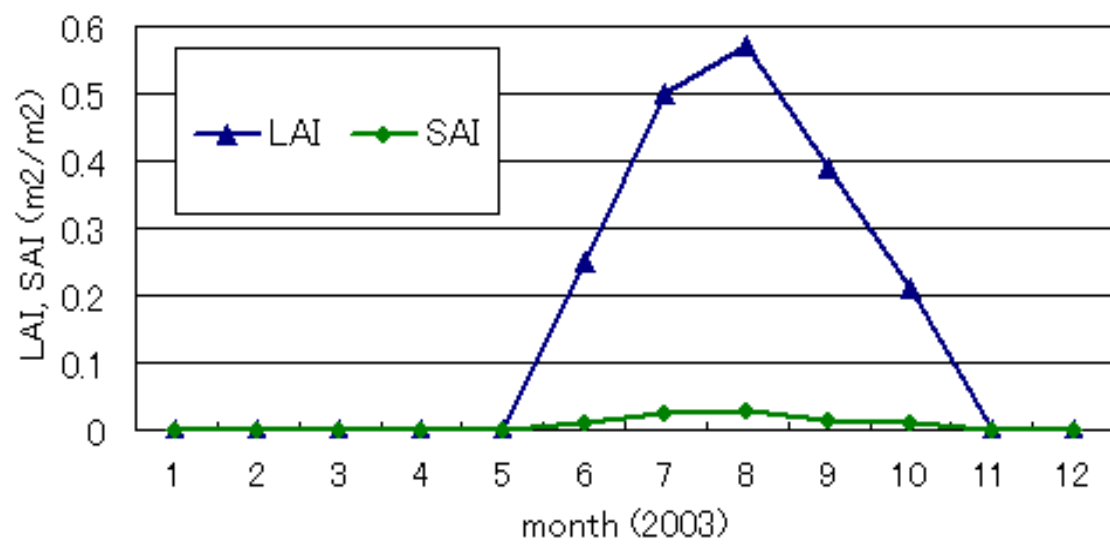


図 5-2 LAI と SAI の入力データ。小島 (2004)による地上観測をもとに作成。

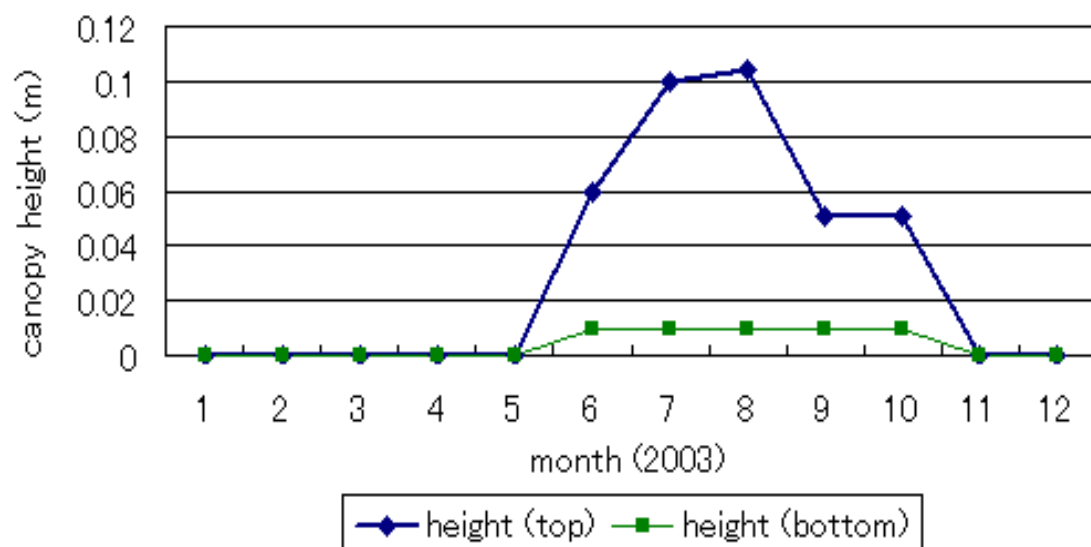


図 5-3 図 5-2 に同じ。ただし、キャノピーの高さ top と bottom (m) の入力値について。植生の高さ (top) は観測値を元に作成した。植生の高さ (bottom) は地上観測には Bonan et al (2002a)をそのまま使用した。

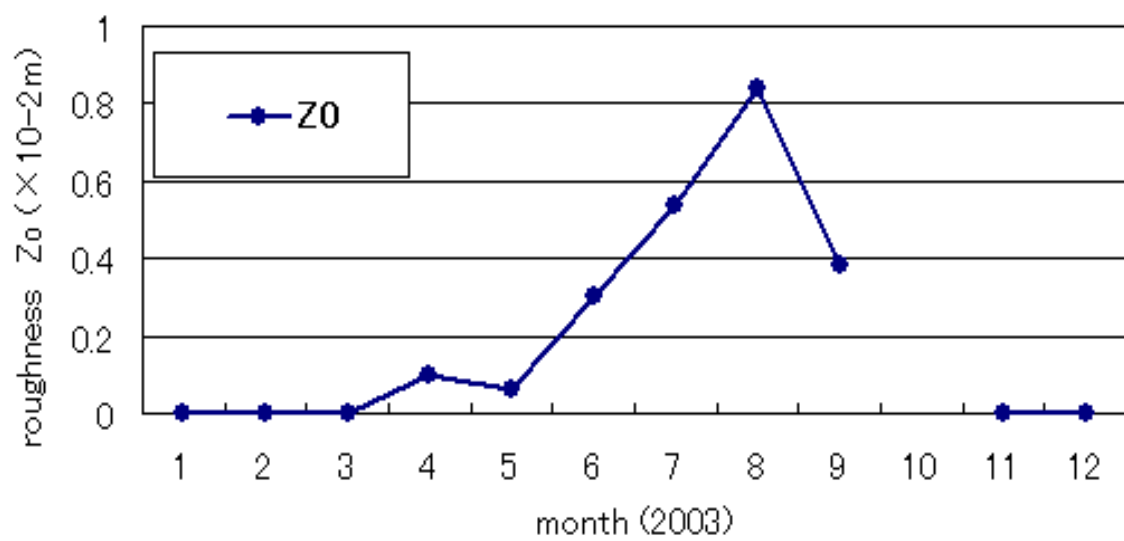


図 5-4 月平均運動量粗度 Z_0 の算定値 (後藤 2008)

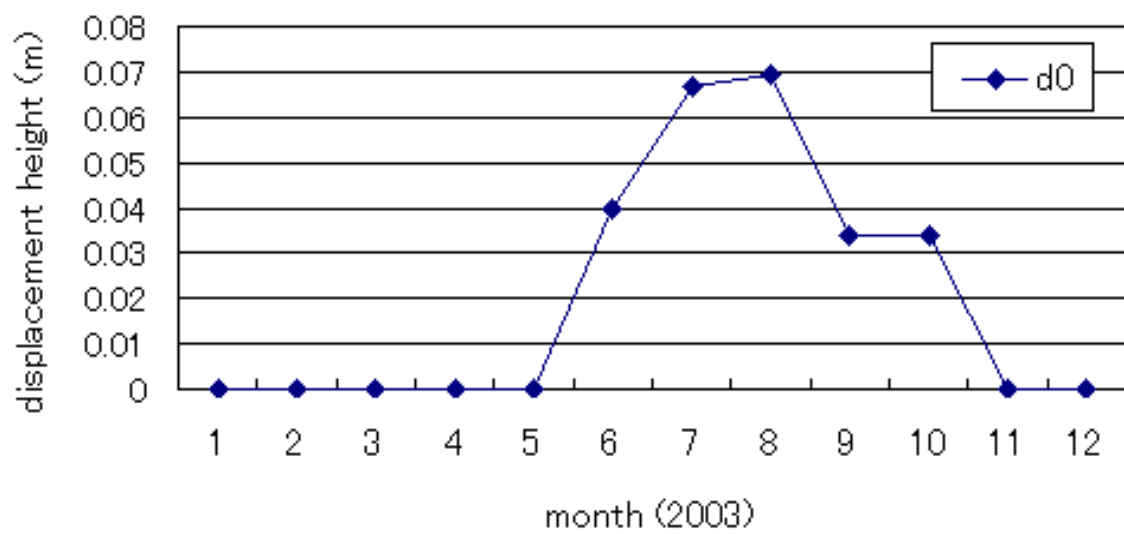


図 5-5 図 5-4 に同じ。ただし、小島（2004）によるゼロ面変位の算定値。10 月は欠損値であるため 9 月の値を使用した。

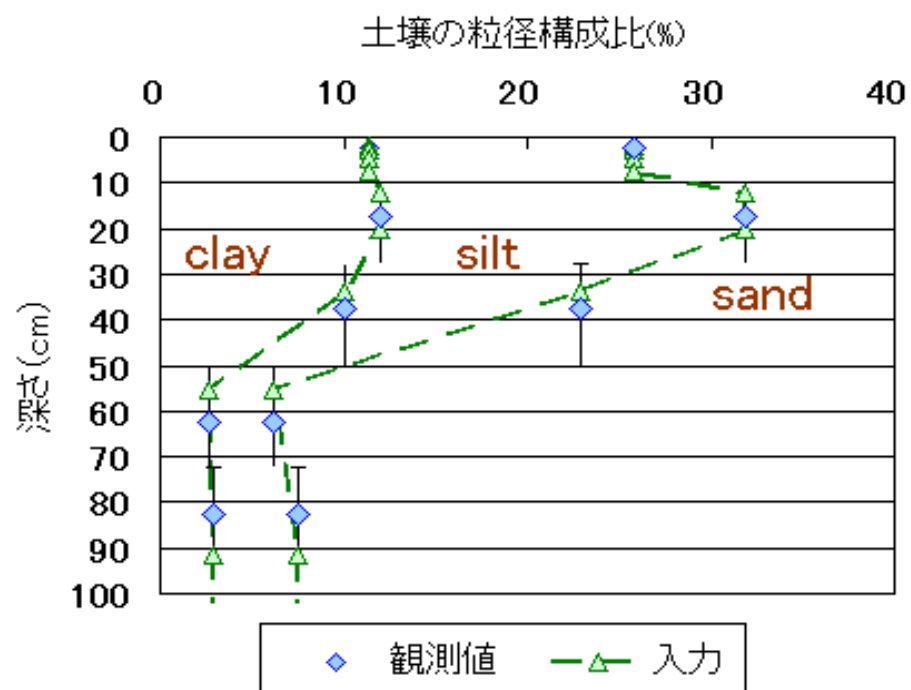


図 5-6 土壌の粒径構成比。青は Hoshino(2006)の観測値、緑は観測値を CLM の土壌カラムの各層の深度に合わせて作成した入力値である。

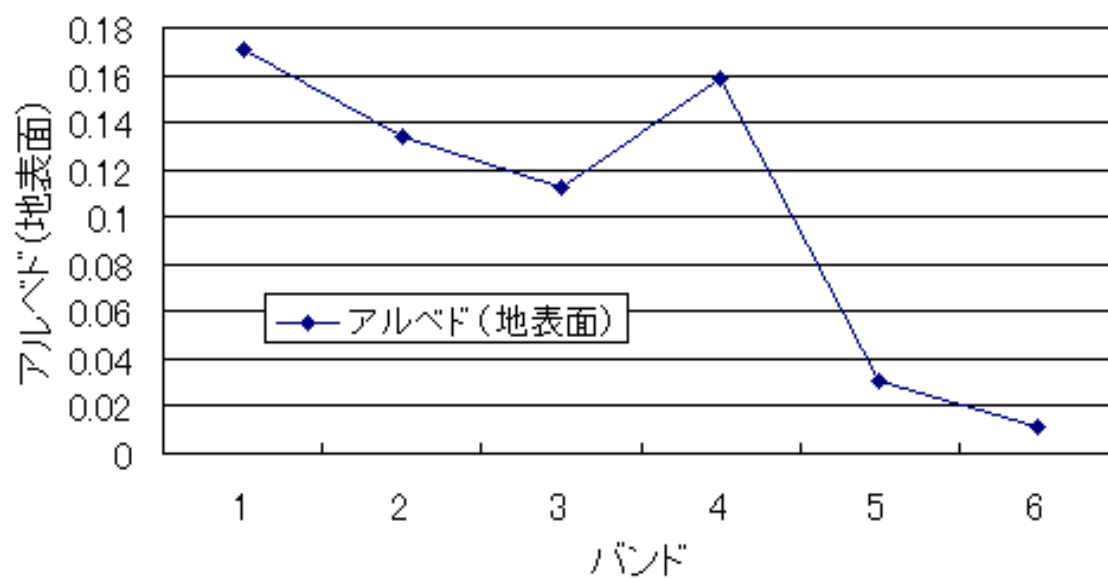


図 5-7 バンド別に示した裸地面のアルベドの観測値。観測日は 2003 年 8 月 29 日。松浦（2005）の測定値から、各バンドの平均値を求めたもの。波長帯については、バンド 1（620～670nm）、バンド 2（841～876nm）、バンド 3（459～479nm）、バンド 4（545～565nm）、バンド 5（1628～1652nm）、バンド 6（2105～2155nm）である。

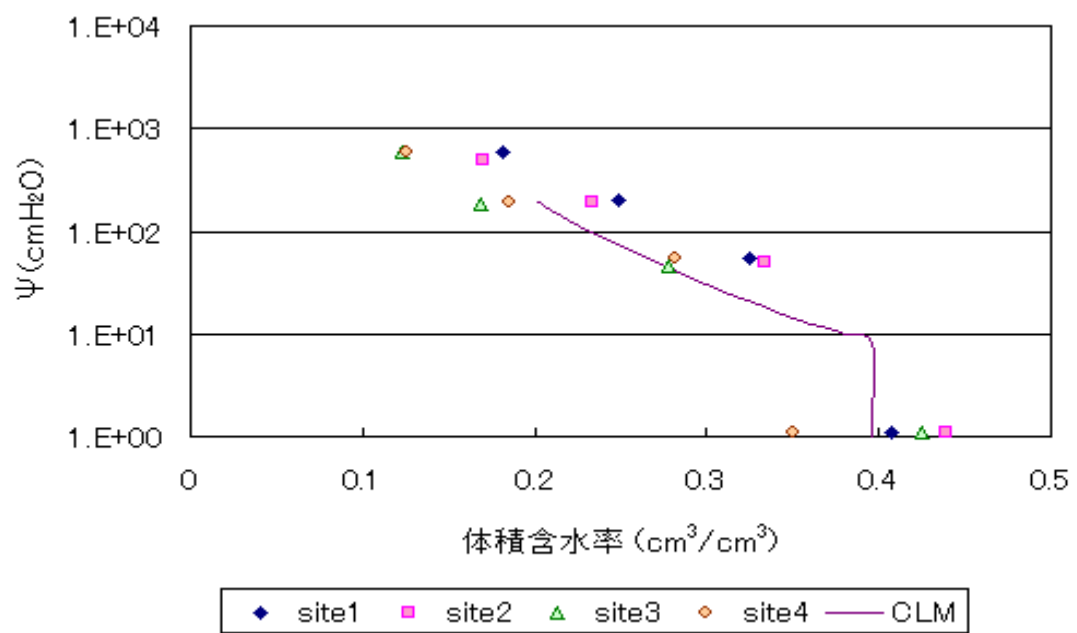


図 5-8 水分特性曲線の CLM 内での推定と Hoshino (unpublished)による観測値。site1 は禁牧区、site2 は放牧区、site3 は荒地、site4 は耕作地である。

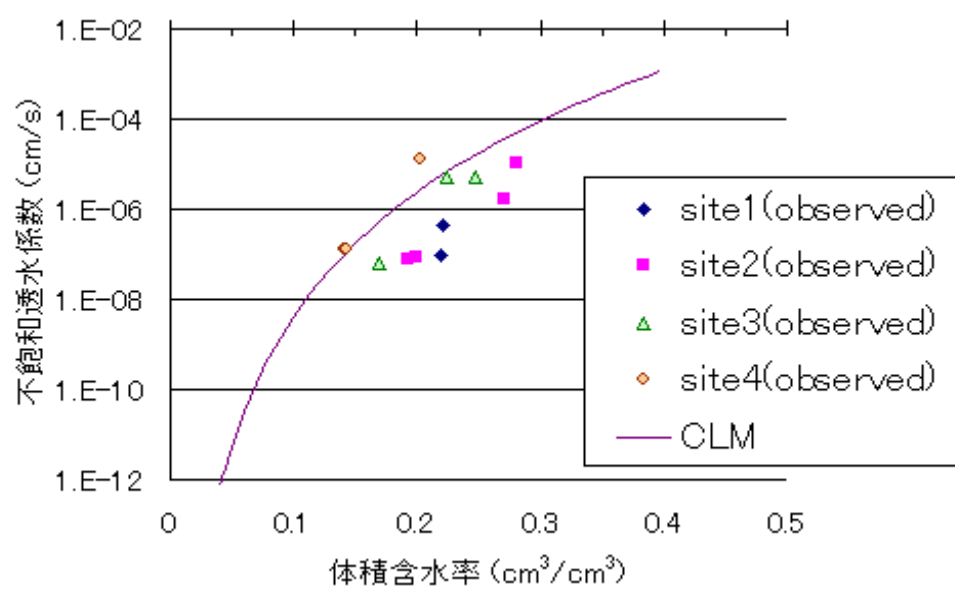


図 5-9 図 5-8 に同じ。ただし不飽和透水係数と体積含水率の関係

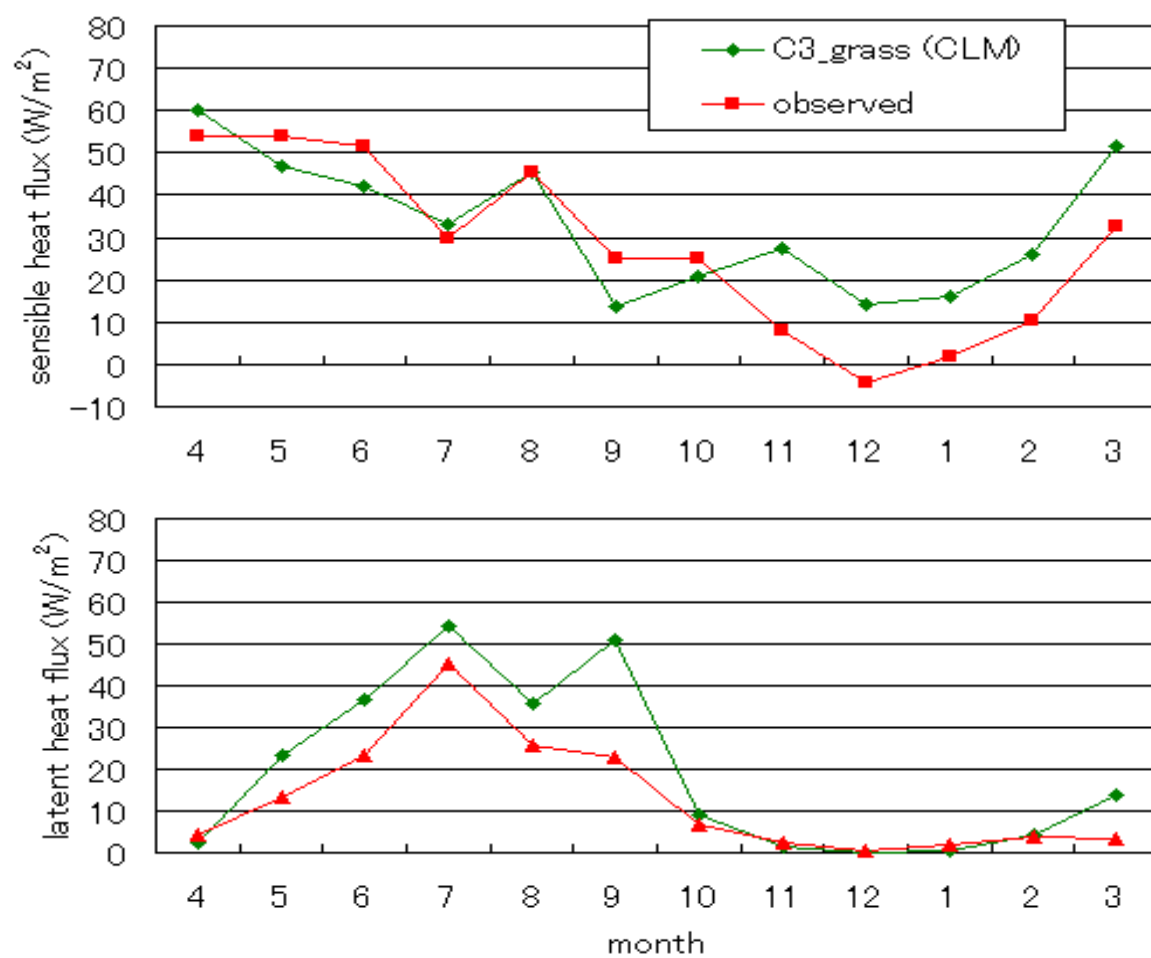


図 5-10 顕熱・潜熱フラックスの月平均（2003 年 4 月～2004 年 3 月）。上は顕熱フラックス (W/m^2)、下は潜熱フラックス (W/m^2) である。地上観測データを用いた検証より。

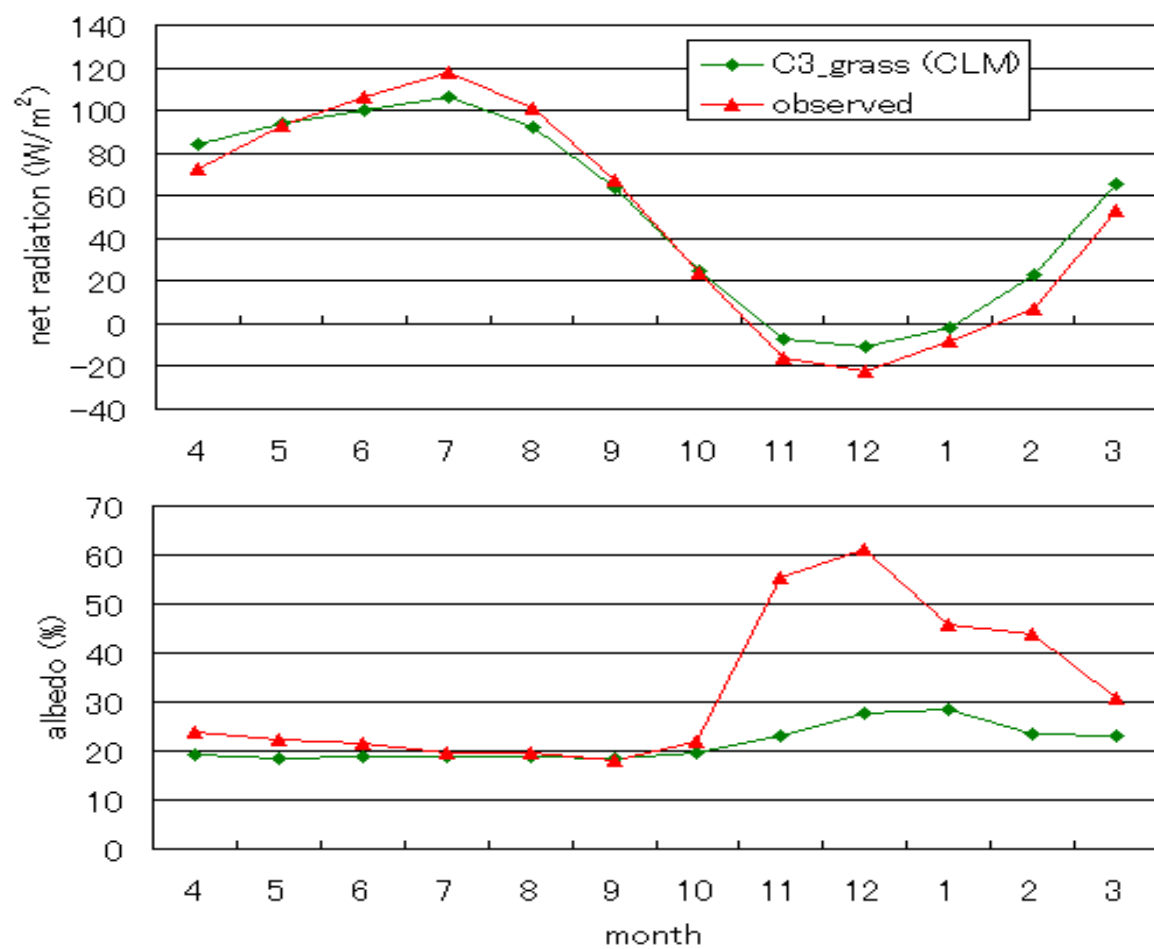


図 5-11 図 5-10 に同じ。ただし放射収支、アルベドの月平均について。上は放射収支 (W/m^2)、下はアルベド (%) を表す。

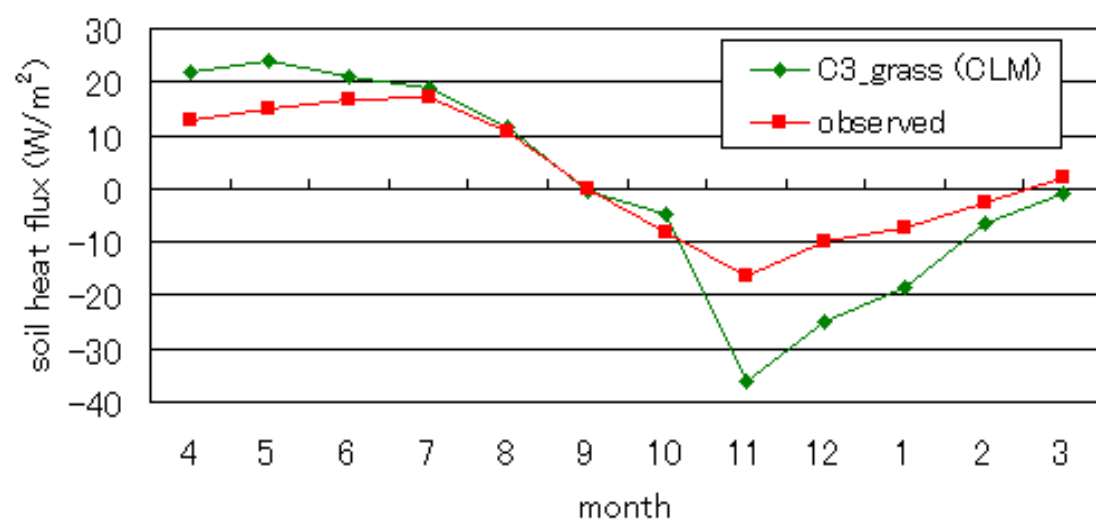


図 5-12 図 5-10 に同じ。ただし地中熱フラックスの月平均について。

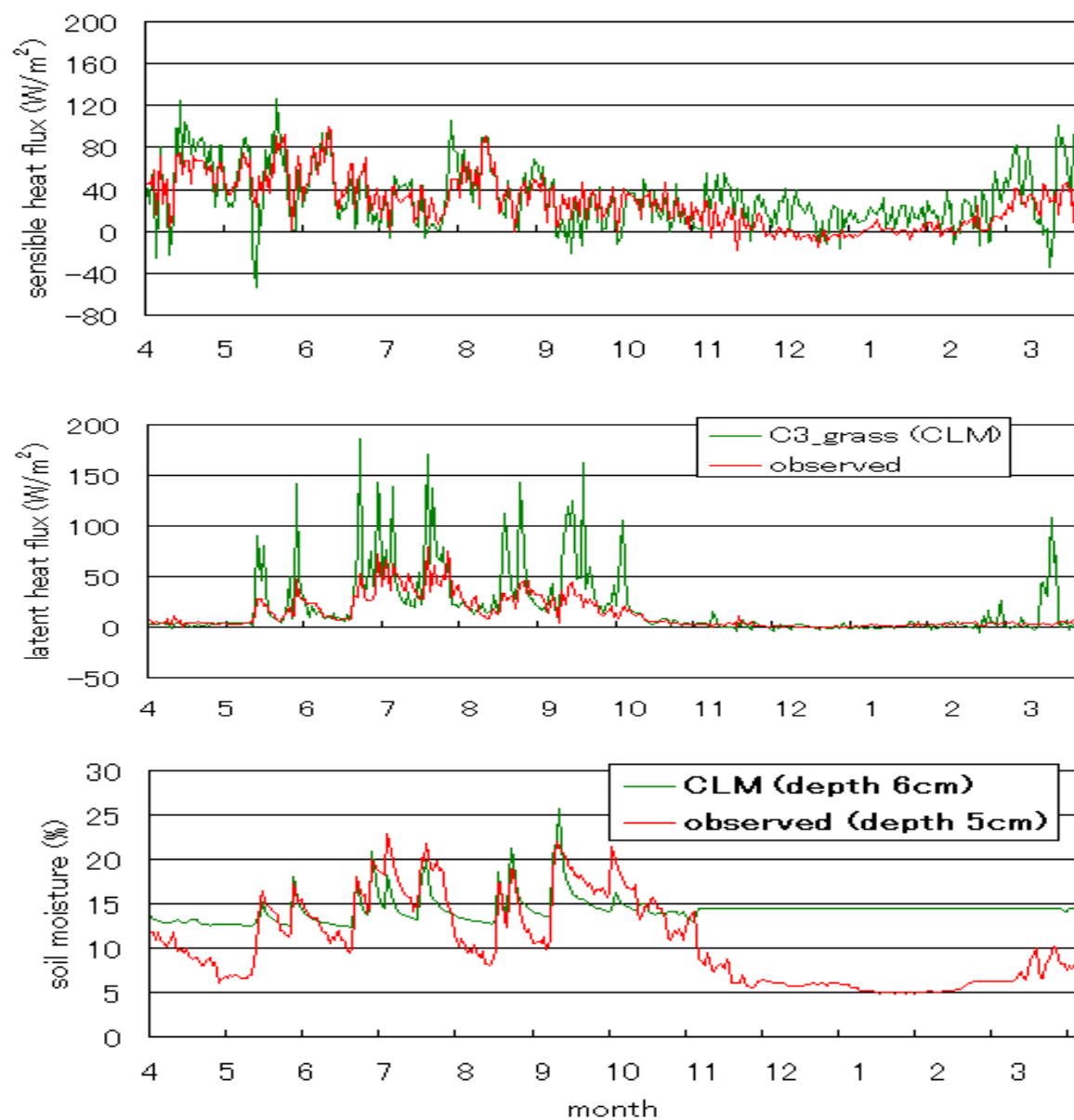


図 5-13 図 5-10 に同じ。ただし降水量、潜熱・顕熱フラックス、土壌水分量の関係について。上は顕熱フラックス (W/m^2)、中は潜熱フラックス (W/m^2)、下は土壌水分量 (%) である。

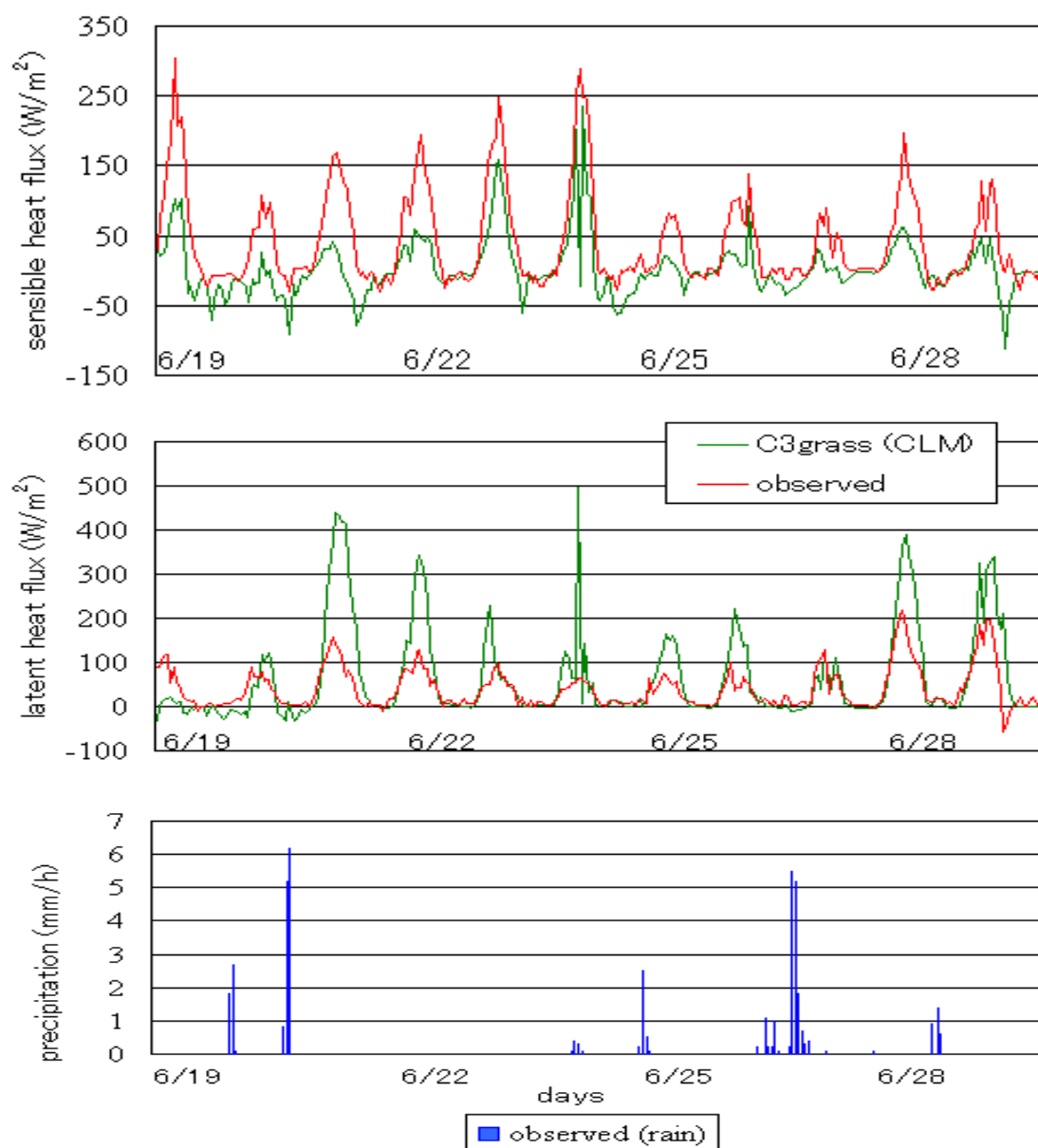


図 5-14 図 5-10 に同じ。ただし時間変化による潜熱、顕熱、降水量の関係について(2003 年 6 月 19 日～28 日)。上は潜熱フラックス (W/m^2)、中は顕熱フラックス (W/m^2)、下は降水量 (mm/h) である。

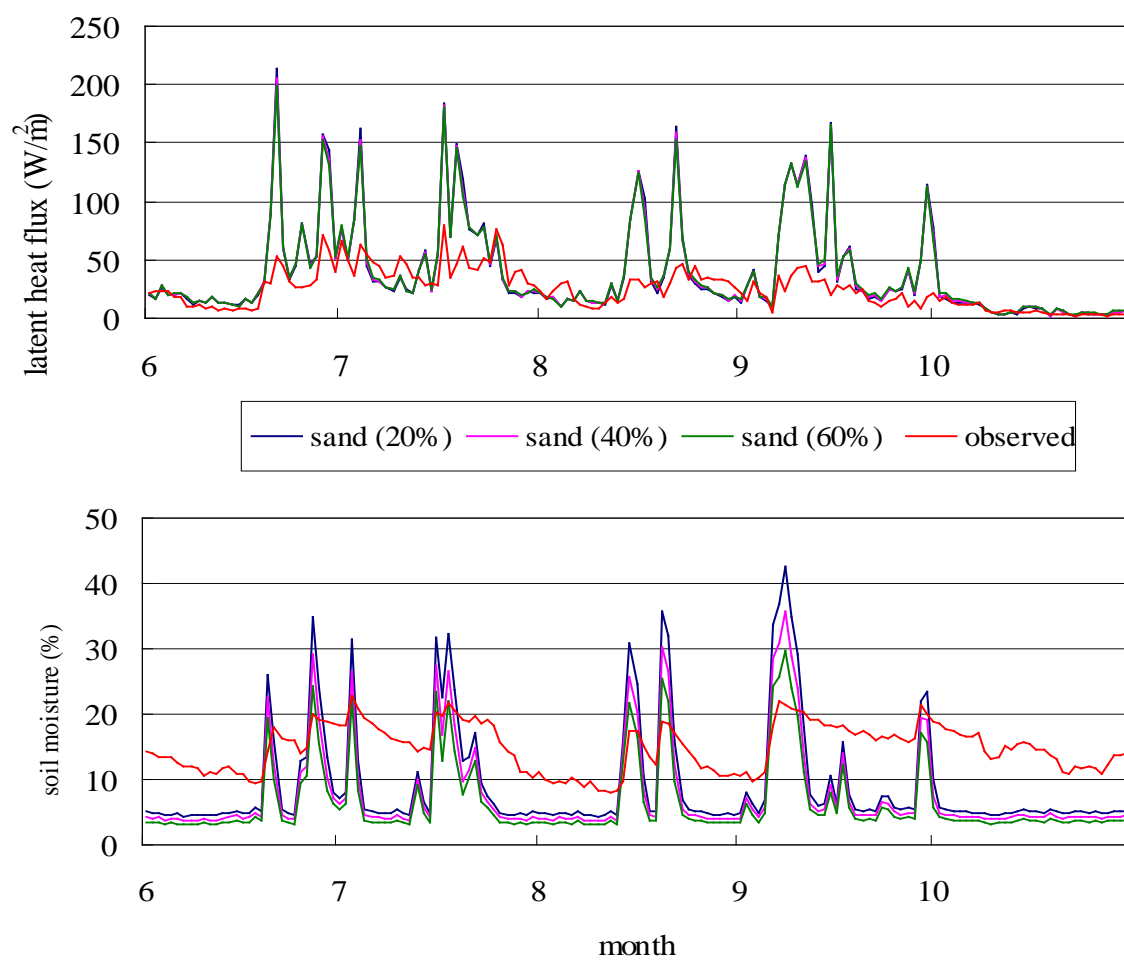


図 6-1 土壌特性の感度分析。上は潜熱フラックス(W/m^2)、下は表層部の土壌水分量 (%) である。

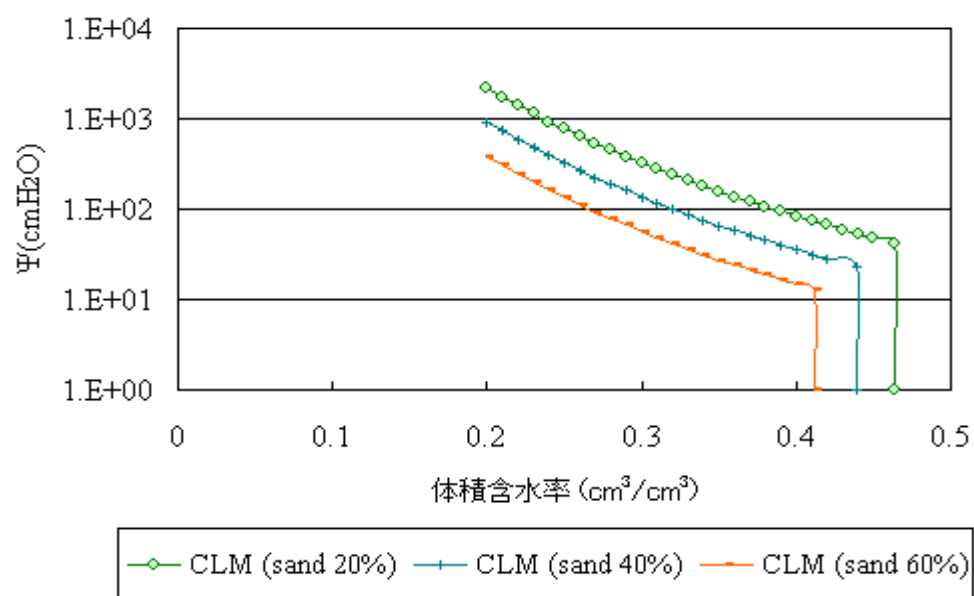


図 6-2 CLM 内で土壌の粒径構成比を変えた水分特性曲線

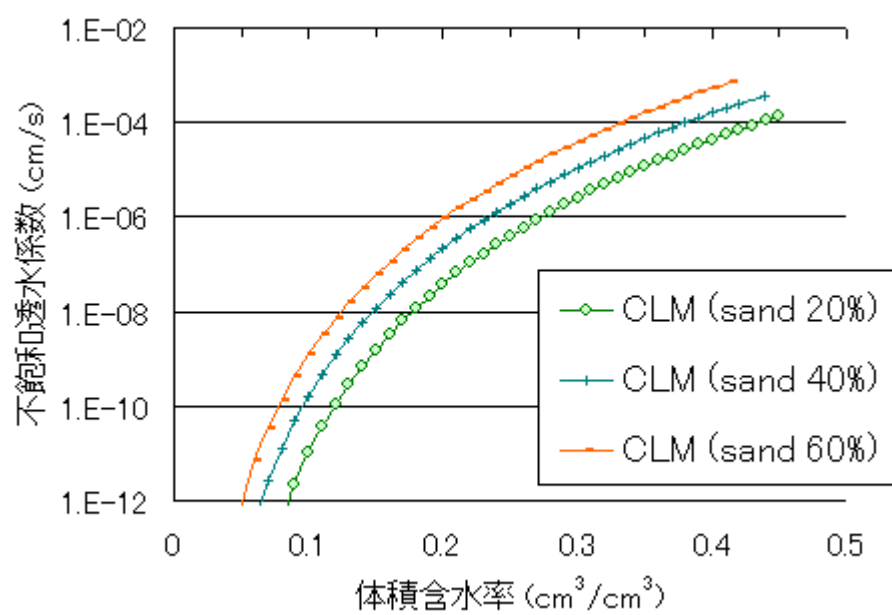


図 6-3 図 6-2 に同じ。ただし、不飽和透水係数と体積含水率の関係。

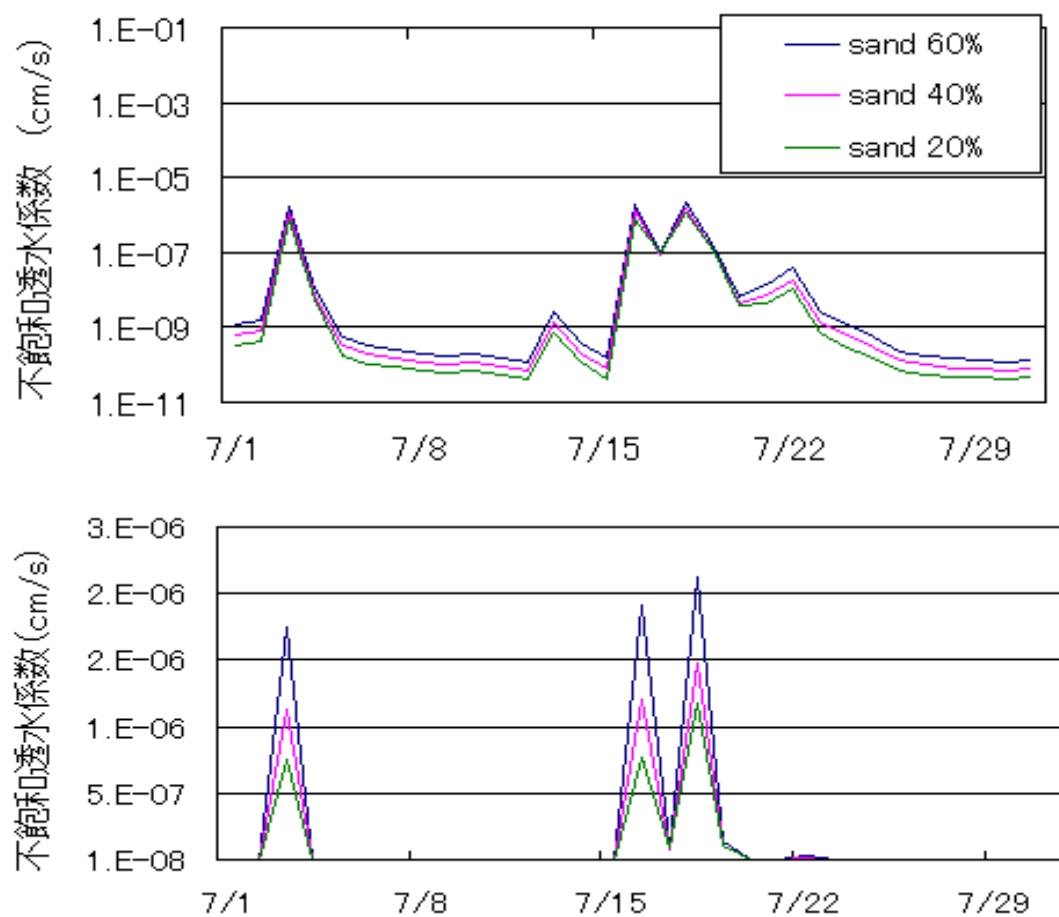


図 6-4 図 6-2 に同じ。ただし、不飽和透水係数の時間の関係。上は対数スケールで表したものの。下はリニアスケールで表したものである。

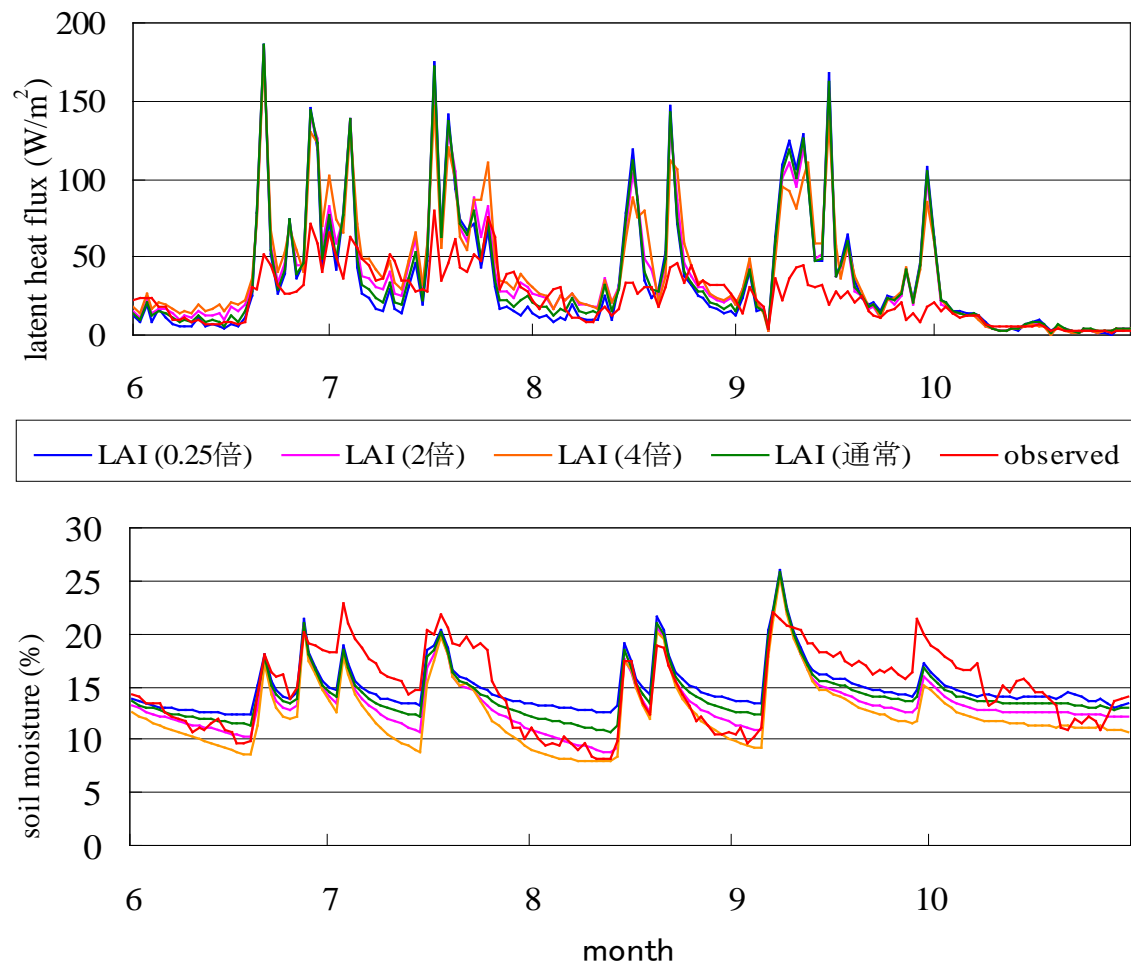


図 6-5 図 6-1 に同じ。ただし、潜熱フラックスの LAI に対する感度分析（日変化）について。また、土壌水分の深度は約 5cm の地点である。

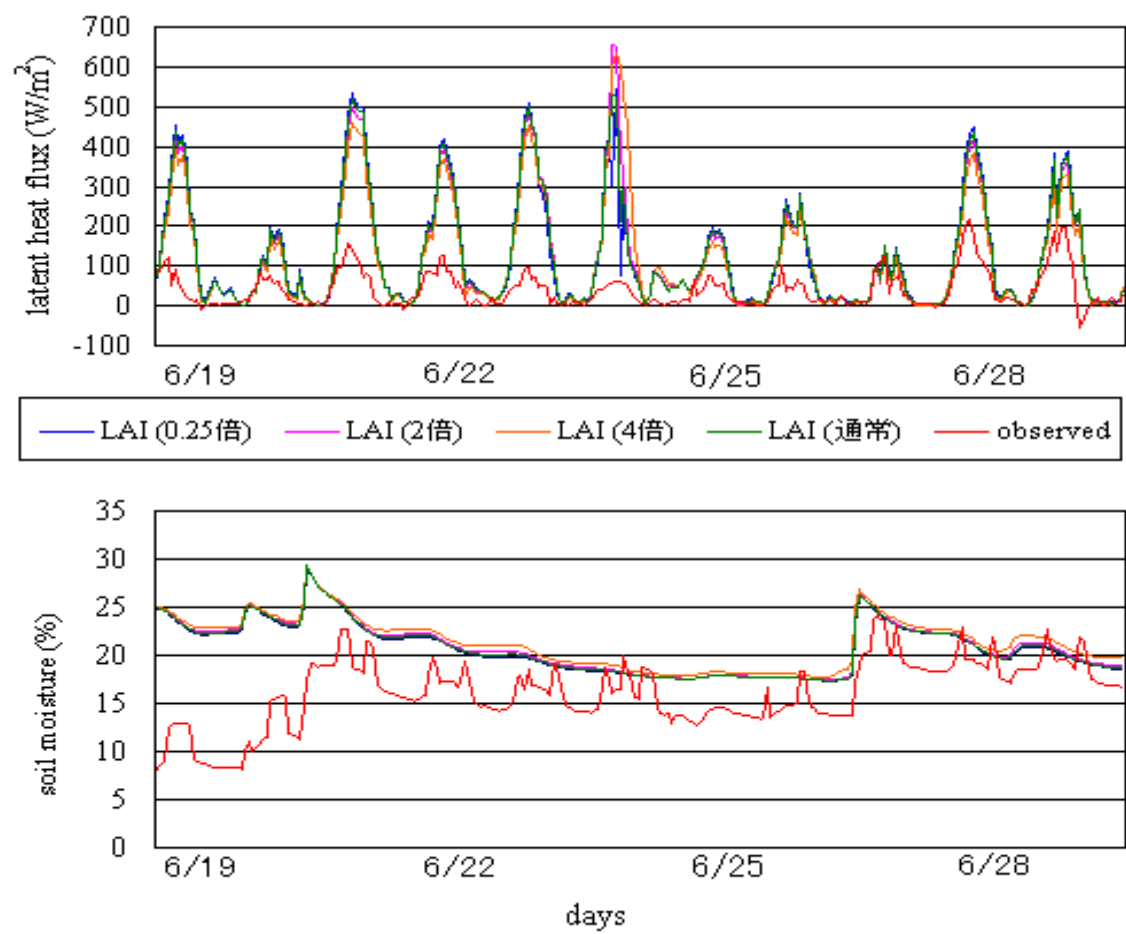


図 6-6 図 6-1 に同じ。ただし時間平均値（2003 年 6 月 19 から 29 日）について。また、土壌水分の深度は約 5cm である。

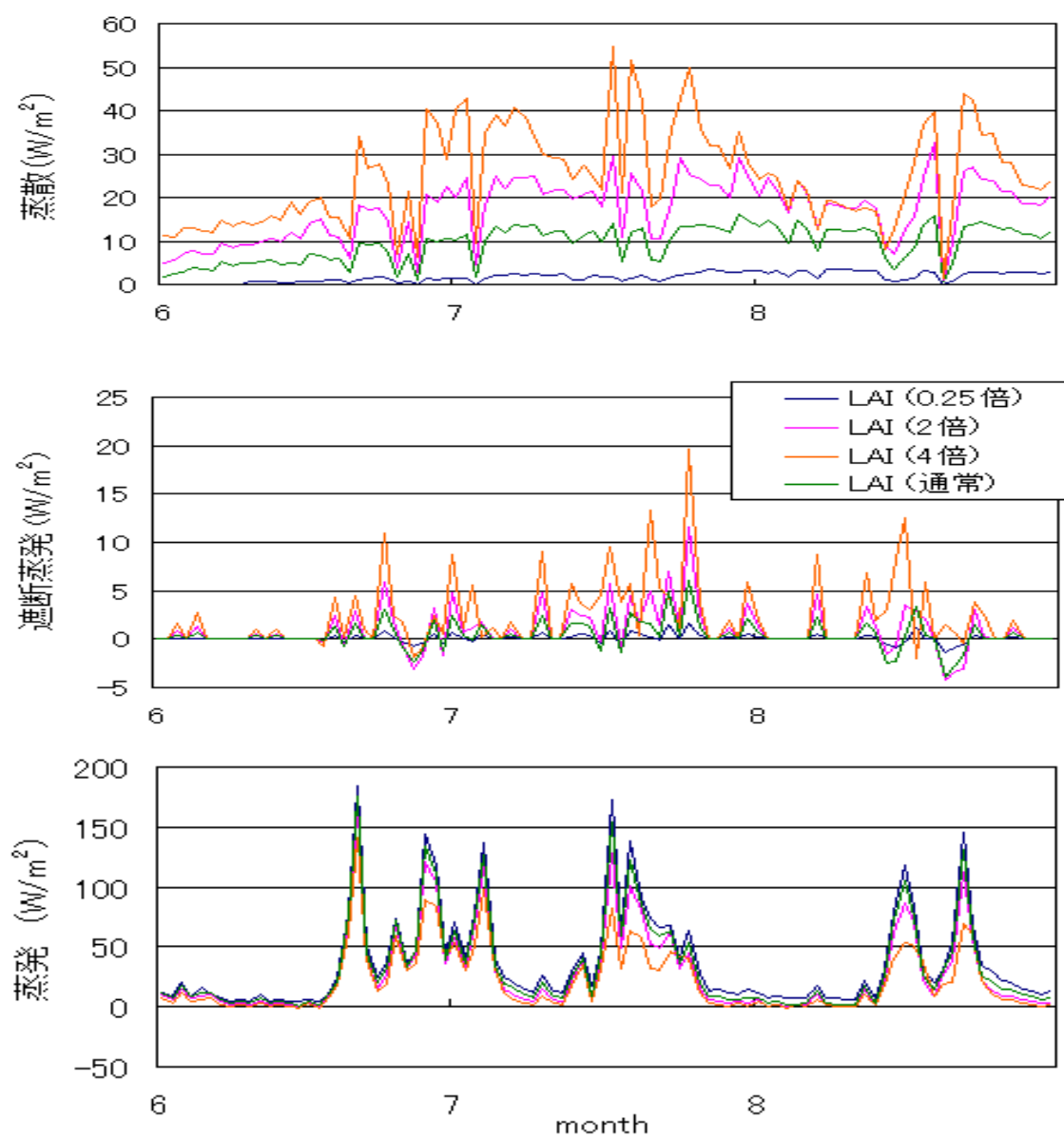


図 6-7 図 6-1 に同じ。ただし、LAI 別に示した蒸散、遮断蒸発、蒸発量。上は蒸散、中は遮断蒸発、下は地面からの蒸発量について。

| |
|------------------------------|
| <p>草地 100%</p> <p>LAI 1倍</p> |
|------------------------------|

ケース 0

| | |
|-----------------------------|---------------|
| <p>草地 50%</p> <p>LAI 2倍</p> | <p>裸地 50%</p> |
|-----------------------------|---------------|

ケース 1

| | |
|-----------------------------|---------------|
| <p>草地 25%</p> <p>LAI 4倍</p> | <p>裸地 75%</p> |
|-----------------------------|---------------|

ケース 2

図 6-8 植生の集中度に対する感度分析の概念図。ここでは感度分析を行う際に設定する LAI と裸地面との面積比について述べる。ケース 1 では、LAI を観測値の 2 倍とし、C3 草地を 50%、裸地の割合を 50%として計算を行った。ケース 2 では、LAI を観測値の 4 倍とし、C3 草地を 25%、裸地の割合を 75%として計算を行った。ケース 0 は、LAI と裸地面との面積比は通常の状態である。ケース 2 の方が植生の集中度は高い。また、どのケースとも平均的な LAI は同じである。

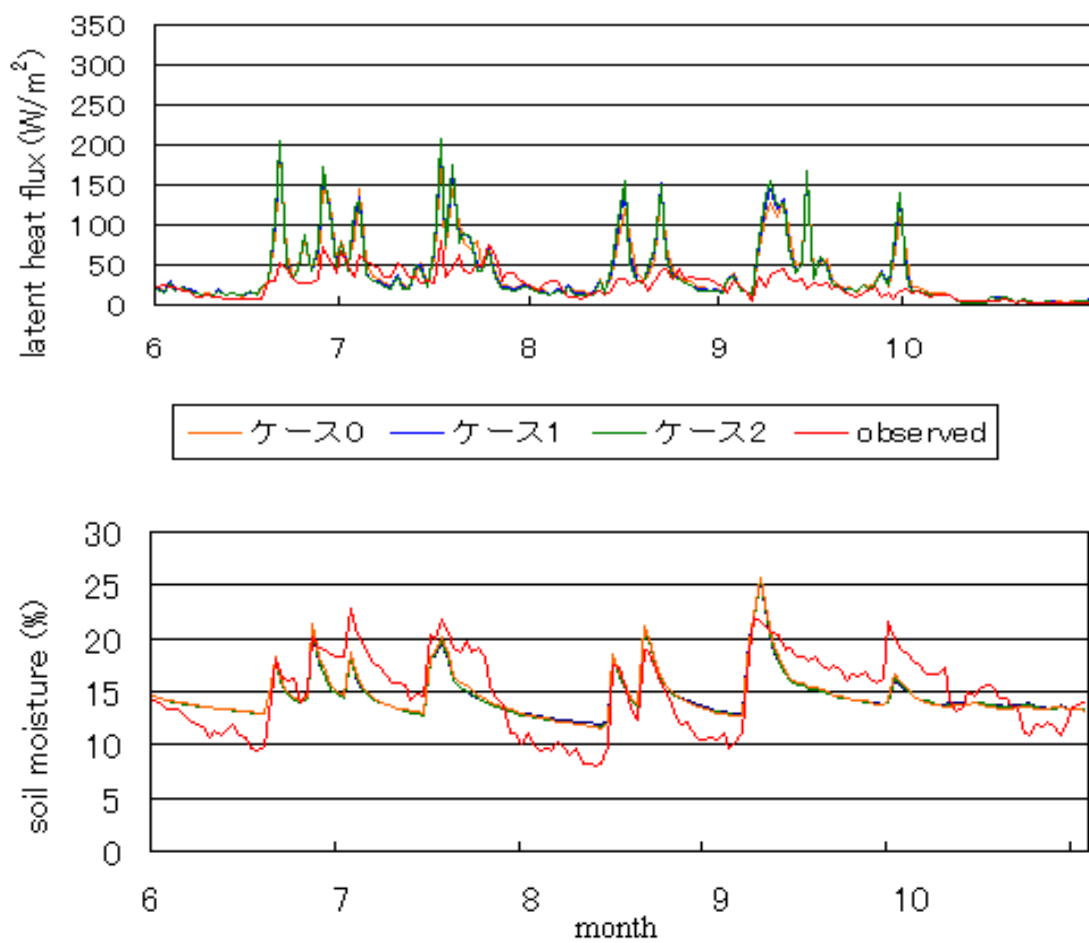


図 6-9 植生の集中度に対する感度分析（月変化）。1) は潜熱フラックス（グリッド平均）、2) は潜熱フラックス（LAI は観測値の 2 倍）、3) は潜熱フラックス（LAI は観測値の 4 倍）4) は深度 5cm の土壌水分量 (%) である。

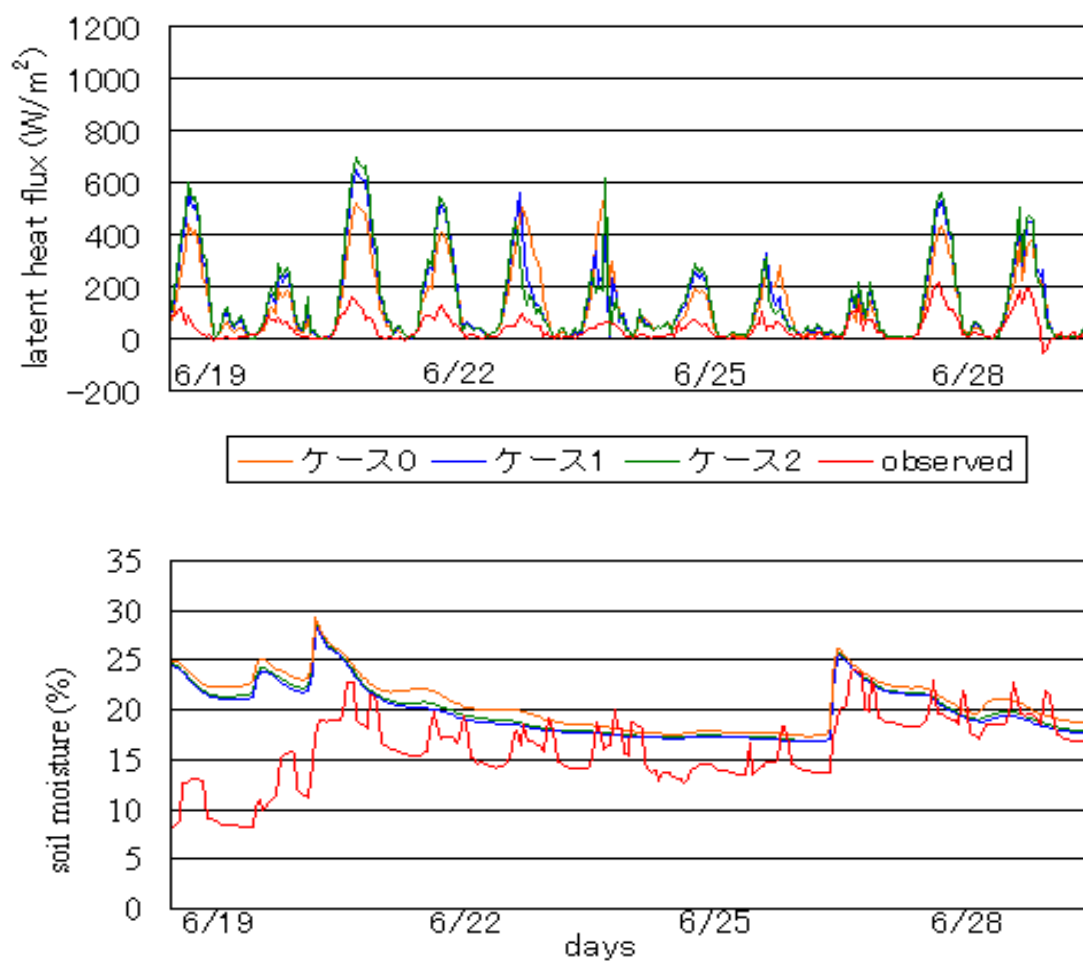


図 6-10 図 6-9 に同じ。ただし時間変化 (2003 年 6 月 19 日～29 日)

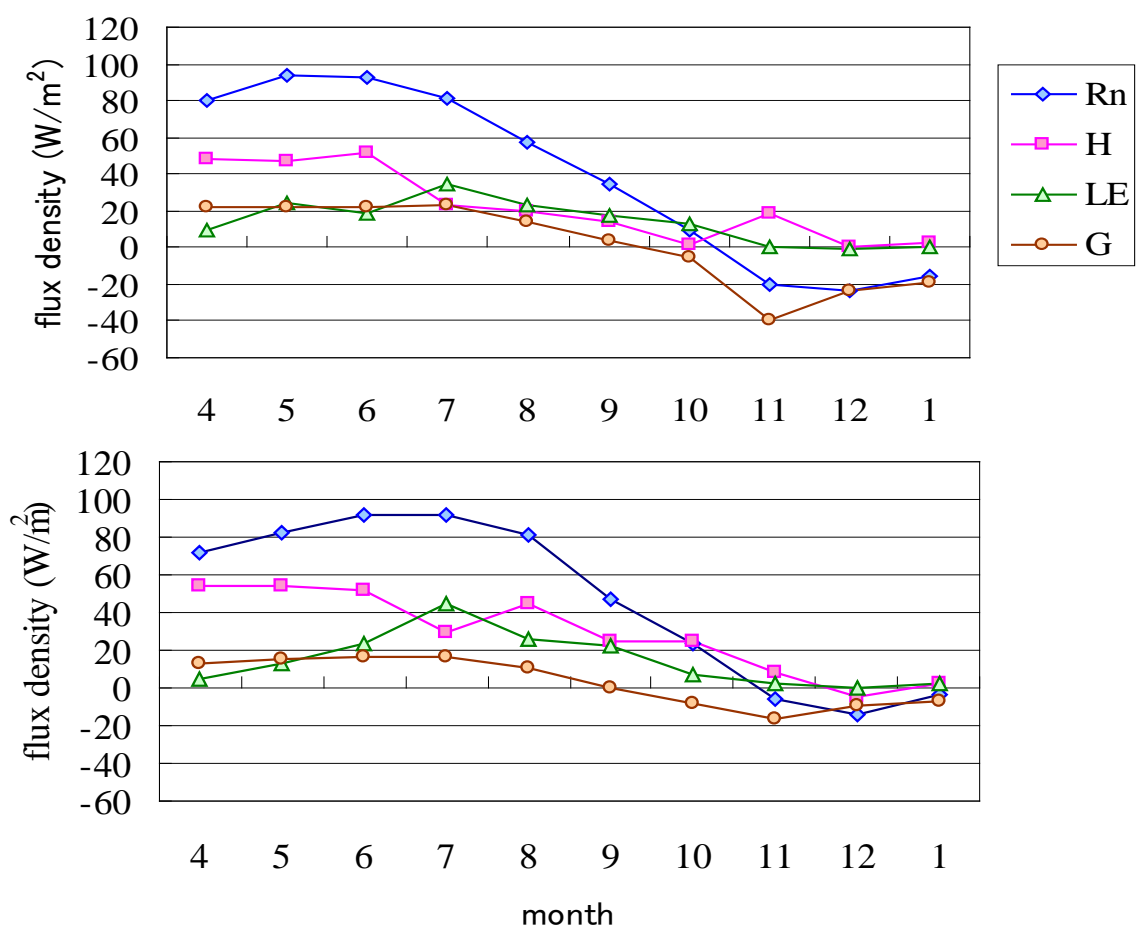


図 A-1 熱収支項目の月変化（2003 年 4 月～2004 年 1 月）上はグローバルデータ 下は地上観測

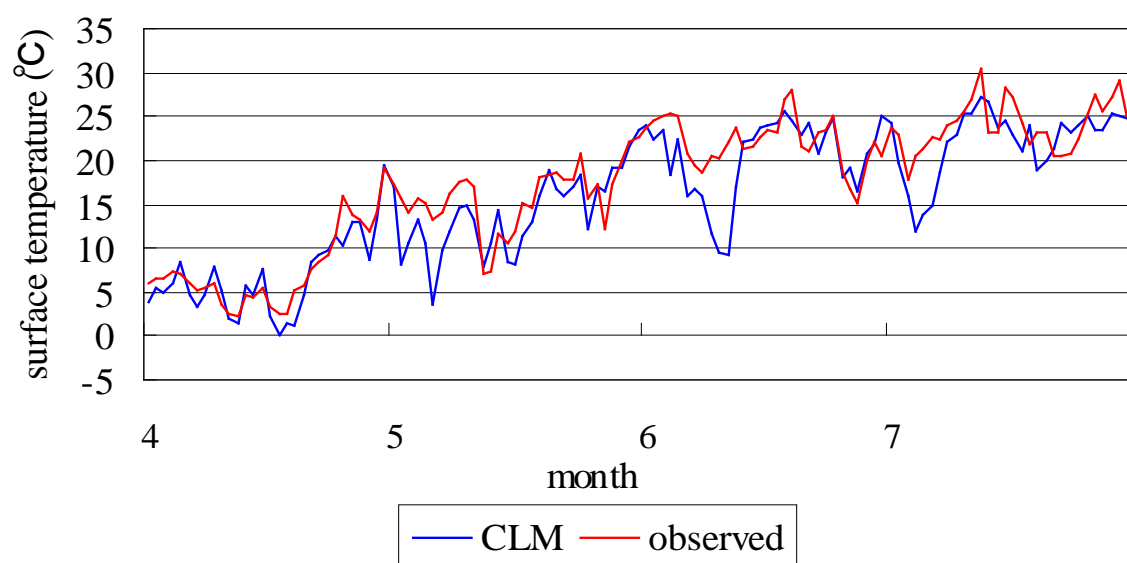


図 A-2 地表面温度の日変化 (2003 年 4 月～7 月)。グローバルデータセットを用いた検証より。

謝辞

本論文の作成にあたり、筑波大学院生命環境科学研究科の浅沼順准教授には熱心に分かりやすくかつ丁寧な御指導をして頂きました。心から深く感謝いたします。また、田瀬則雄教授、杉田倫明教授、辻村真貴准教授にはゼミを通して貴重な御意見と御指導を頂き大変感謝致します。

東京大学農学生命科学研究科の星野亜季氏には、モンゴルの KBU において不飽和透水係数、圧力水頭の未だ公開されていないデータセットを提供して頂きました。心から感謝致します。

筑波大学陸域環境研究センター準研究員の大庭雅道氏にはプログラミングを基礎から指導して頂き、大変お世話になりました。感謝の意を表します。また、現在アラスカ大学で在学中の岩田拓記氏にはプログラムのことや研究の中で多くの助言をいただきました。心から感謝いたします。

筑波大学院環境科学研究科の流域研究室の大原諒子さん、笹子千穂さん、服部雄太君にはゼミを通してお互い励まし合い、同じ水文分野として大きな存在でした。また同じ浅沼研究室の山浦大和君には分からないときには教えてもらい、大変なときにお互い励まし合い、研究を進めるに当たって大きな支えとなりました。2 年間迷惑ばかりおかけしましたが大変お世話になりました。心から感謝いたします。

最後に 2 年間大学に通わせて頂いた両親には大変お世話になりました。心から感謝します。

引用文献

- Anderson, E. A., (1976): A point energy and mass balance model of a snow cover. NOAA Tech. Rep. NWS 19, Office of Hydrology, National Weather Service, Silver Spring, MD, 150pp.
- 浅沼順 (2008): 地球温暖化の地表面・流域水収支への影響に関する観測・モデル研究からのアプローチ, 筑波大学・信州大学合同ワークショップ, 6-7
- Berg, A. A., J. S. Famiglietti, J. P. Walker, and P. R. Houser, (2003): Impact of bias correction to reanalysis products on simulation of North American soil moisture and hydrological fluxes. *J. Geophys. Res.*, 108, 4490, doi: 10.1029/2002JD003334.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1979): A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24: 43-69.
- Bonan, G.B., Oleson, K.W., Vertenstein, M., Levis, S., Zeng, X., Dai, Y., Dickinson, R.E., and Yang, Z.-L. (2002a): The Land Surface Climatology of the Community Land Model coupled to the NCAR Community Climate Model. *J. Climate* 15: 3123-3149.
- Bonan, G. B., (1996): A land surface model for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide, NCAR, TN-417+STR.
- Chen, M., P. Xie, J. E. Janowiak, and P. A. Arkin, (2002): Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *J. Hydrometeor.*, 3, 249-266
- Clapp, R.B., and Hornberger, G.M. (1978): Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 14:601-604.
- Dai, (2001b): Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part II: Diurnal variations. *J. Climate*, 14, 1112-1128.
- Davaa, G., D. Oyunbaatar, M. Sugita (2006): Surface Water of Mongolia. 小長谷有紀(編) モンゴル環境保全ハンドブック, 見聞社, 東京, 55 - 68.
- Dickinson, R.E., A. Henderson-Sellers and P.J. Kennedy (1993): Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled with the NCAR Community Land Model, NCAR, Technical Note TN383+STR, 72 pp.
- Dirmeyer, P. A., A.J. Dolman, and N. Sato, (1999): The Global Soil Wetness validation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 851-878.
- Henderson-Sellers, A., A. J. Pitman, P. K. Love, P. Irannejad, and T. Chen, (1995): The Project for Intercomparison of Land Surface Parameterization Schemes (PILPS) Phases 2 and 3. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 76, 489-503.
- Hoshino, A. (2006): Physico-chemical Properties and Micromorphological Characteristics of the Soils under Grazing and Cultivated Fields in the Kherlen River Basin, Mongolia. MS Thesis, University of Tsukuba
- IPCC (2007): IPCC WGI Fourth Assessment Report: Summary for policymakers. IPCC Secretariat, Switzerland.

- 伊藤昭彦・市井和仁・田中克典・佐藤永・江守正多・及川武久 (2004): 地球システムモデルで用いられる陸域モデル：研究の現状と課題, 天気, 51, N0.4, 3-14
- Keith, W. Oleson., Yongjiu, Dai (2004): Technical Description of the Community Land Model (CLM), NCAR, 186p
- 小島 透 (2004): モンゴル・ヘルレン川流域における蒸発散を支配する要因の解明, 筑波大学院, 生命環境科学研究科修士論文, 1-16
- 後藤 優 (2008): 東アジア広領域における陸域蒸発量の経年変化とその環境要因の解明, 筑波大学院, 生命環境科学研究科修士論文, 130p
- 近藤純正 (2000): 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, 東京, 201p
- Li S-G, Asanuma J, Eugster W, Kotani A, Liu J-J, Urano T, Oikawa T, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M, (2005a): Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, 11, doi:10.1111/j.1365-2486.2005.01047.x
- Manabe, S., (1969): Climate and the ocean circulation the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface, Mon. Wea. Rev., 97, 739-774
- 松浦陽介 (2005): 衛星データを用いたモンゴル半乾燥域における土地被覆と蒸発散量の推定, 118p, 東北大学理学研究科 平成16年度修士論文
- Mariko, S., Urano, T., Asanuma, J., (2007): Effects of irrigation on CO₂ and CH₄ fluxes Mongolian steppe soil, *Journal of Hydrology*, 333: 118-123, 2007.
- Pitman (2003): The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, 23:479-510, 2003.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y.G. Sub and A. Dalcher (1986): A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, 43, 505-531.
- Sugita, M., Asanuma, J., Tsujimura, M., Mariko, S., Lu, M., Kimura, F., Sato, T., Kotani, A., Azzaya, D., and Adyasuren, Ts. (2008): The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia (RAISE) project data set, RAISE DVD-ROM Ver.1, Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan.
- 中村徹 (2007): 草原の科学への招待, 筑波大学出版会, 124p
- Qian, T., Dai, A., Trenberth, K., and Oleson, K (2006): Simulation of Global Land Surface Conditions from 1948 to 2004. Part 1: Forcing Data and Evaluations. *J. Hydrometeor.*, 7, 953-973
- Warren, S. G., and W.J. Wiscombe, (1980): A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2734-2745.
- Dai, Y., Zeng, X., Dickson, R., Baker, L., Bonan, G., Bosilovich, M., Denning, A., Dirmeyer, P., Houser, P., Niu, G., Oleson, K., Schlosser, C., and Yong, Z (2003): THE COMMON LAND MODEL. *American Meteorological Society, BAMS*, 1013-1023.