

土壌水分鉛直移動駆動力の地域的特徴に関する 基礎的検討

PRELIMINARY STUDY ON REGIONAL CHARACTERISTICS OF DRIVING FORCES OF VERTICAL SOIL WATER MOVEMENT

仲江川 敏之¹, 保坂 征宏², 杉 正人³

Tosiyuki NAKAEGAWA, Masahiro HOSAKA, and Masato SUGI

¹正会員 博士(工学) 気象研究所 研究官 (〒305-0052 つくば市長峰 1-1)

²修士(理学) 気象研究所 研究官 (〒305-0052 つくば市長峰 1-1)

³理学修士 気象研究所 主任研究官 (〒305-0052 つくば市長峰 1-1)

This study explores preliminarily the effect of the two driving forces, gravity and matric potential, on the soil water movement and its regional characteristics. Three numerical experiments were conducted using a land surface model with the atmospheric forcing data at global scale. An experiment included both driving force, while the other included only a force out of the two. Our results show some important characteristics as follows. Global annual mean of water budget and that of heat one is almost same between the three experiments. Each driving force contributes to some percentile of total soil water storage but it has different characteristics at each region. Matric potential force has significant seasonal variation and contributes to some ten percentage of water content while gravity force has small variation and contributes to some percentage.

Key Words : soil water movement, matric potential driving force, gravity driving force, land surface model

1. はじめに

土壌水分量は降水量と蒸発量によって決定されるが、同じ年平均降水量と蒸発量を与えられてもその強度や頻度によって、土壌水分鉛直プロファイルは異なり得る。これには土壌水分がどのように鉛直移動するかが重要な要因となる。土壌水内の溶質の影響、即ち浸透圧駆動力と、水蒸気移動や表面張力の影響、即ち温度駆動力は十分に小さいとすると、主要な駆動力はマトリックポテンシャルと重力の二つである。鉛直移動に関して、この二つの駆動力の決定的な違いは、重力が鉛直下向き一方向の駆動力であるのに対して、マトリックポテンシャルは両方向の駆動力である点である。

土壌中の水移動計算ではこの二つの駆動力が通常取り扱われており、1次元浸透モデルから大気大循環モデル (AGCM) の陸面過程モデルまで幅広く利用されている。しかし、この二つの駆動力のうちどちらの駆動力が支配的か、またその駆動力の寄与に地域の特徴があるのかは殆ど明らかにされていない。こうした点が明らかになることにより、ゼロフラックス面や地下水面の形成要因が解明される他、AGCM 陸面過程モデルのように

数層程度しか土壌層を持っていない場合の適切な土壌層厚の決定やその各層の役割を駆動力の観点から意味付けするための有用な情報が得られると期待される。

そこで本研究では AGCM 用陸面過程モデルに、大気強制力として大気客観解析データを与えて数値実験を行い、両駆動力の地域的特徴とその機構について基礎的な検討を行った。

2. モデルと実験

(1) モデル概要

実験に用いた陸面過程モデルは、植生を含む地表面での熱交換過程、地中での水・熱移動過程を含んだ、気象研究所開発 3 層 SiB(以下 L3SiB) で、従来の SiB¹⁾ と比較して土壌温度を拡散方程式で解く点と土壌凍結融解過程を導入した点が改良されている²⁾。更に、本実験で用いたモデル (2000 年 9 月 20 日改訂版) では表面飽和浸透の改良が行われている³⁾。

水移動に関しては鉛直 1 次元の移動のみを扱い、マトリックポテンシャル (ψ) による勾配と重力の二つの

Gra	Gra	EN		EN	MF	EN	Wh
DB	EB	EB				GD	EB
			Wh				
Ice	Ice	Ice	Ice	Ice	Ice	Ice	Ice

図-1 8×4 全球植生分布図. 図中の記号は DB:落葉広葉樹, EB:常緑広葉樹, EN:常緑針葉樹, GD:草原と落葉広葉樹, Gra:草地, Ice:氷床, MF:落葉広葉樹と常緑針葉樹, Wh:小麦畑を表し, 白抜き部分は海洋を表している.

駆動力を含んだ, いわゆる Richards 式である.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (1)$$

ここで θ は土壤水分量, K は不飽和透水係数である. 凍結過程では, 凍結水には両駆動力は働かず, 移動しないものとして扱われ, 更に凍結による土壤乾燥化と飽和透水係数の減少が考慮されている.

土壤層厚は第 1 層が 2cm で, 第 2 層, 第 3 層は植生毎に異なるが, 代表的な値としてはそれぞれ 47cm, 200cm である. また, この種のモデルで得られる結果に付いては全球土壤水分プロジェクト⁴⁾などで, 地表面水・熱フラックス共に他の推定値がなされ, その妥当性に示されている.

(2) 実験概要

実験は重力とマトリックポテンシャル両方の駆動力を含んだ標準実験 (実験 CTL), 重力の駆動力だけ扱う実験 (実験 G), マトリックポテンシャルの駆動力だけ扱う実験 (実験 M) の 3 種類である. 但し実験 M においても重力を駆動力とする表面飽和浸透は含まれている. また底面境界条件は熱は断熱, 水は重力排水である.

計算領域は, 全球を 8×4 に分割したうちの陸域を対象とし, 各要素の中心にあたる 1°×1° の格子データで各グリッド植生を代表させた (図-1). 各植生に対応するパラメータは気象庁全球モデルで用いている値をそのまま用いた. 論文中, 左下端のグリッドを緯度 1, 経度 1 として (1,1) と表し, 右上端のグリッドを緯度 4, 経度 8 として (4,8) 表すものとする. 緯度 1~4 はそれぞれ, 90°S, 45°S, 0°, 45°N に相当し, 経度 1~8 は 0°E から反時計回りに 45° ずつの経度に相当する.

大気強制力は International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) の陸面-大気モデル全球データセット⁵⁾を用いた. このデータセットは大気客観解析値を基に作られ, 陸面過程モデルの強制力として必要な要素が, データ期間 1987~1988 年, 1°×1° の空間解像度, 6 時間の時間解像度で収録されている. 実験では, 植生の場合と同様に各要素の中心に当たる地点の

データを強制力として用いた.

各実験とも飽和度 50%の状態から, 1987 年のデータのみを繰り返し与えて, 100 年間の積分を行った. 90 年目以降, 土壤水分量を始め, 諸量が一定の季節変化をすることが確認されたので, 以下の議論では最後の 1 年の結果を用いる.

3. 結果と議論

(1) 駆動力の寄与

本論文では, 二つの駆動力の寄与を各実験における陸面土壤水分貯留量あるいは体積含水率を用いて,

マトリックポテンシャル駆動力の寄与

$$= \text{実験 CTL} - \text{実験 G}$$

$$\text{重力駆動力の寄与} = \text{実験 CTL} - \text{実験 M}$$

から両寄与を決定する. 従って, 寄与が正の場合, その駆動力により土壤水分が増加したことを示す.

(2) 全球年平均地表面水・熱収支

まず, 3 つの実験における地表面熱収支の違いを調べる. 表-1 に 3 つの実験の全球平均した地表面水収支と熱収支の年平均値が示されている. 実験 G と実験 M については実験 CTL からの差で示されている. また平均に当たっては, 土壤水分移動の無い氷床を除いてある. 基本的に地表面水・熱フラックス共に 3 つの実験間での違いはおおよそ 3% と小さく, 土壤水分移動の駆動力が二つであっても, 二つのうちのどちらか一つだけであっても, 大気強制力が同一の場合には地表面水, 熱収支の全球年平均値を大きく変えることは無いと言える.

全球陸域平均では両駆動力とも実験 CTL に比べ土壤水分貯留量を減少させる方向に働いている. つまり, 片方の駆動力だけでは土壤水分を減少させていたのに対して, 両駆動力の相互作用が土壤水分を増加させていることが分かる.

土壤水分貯留量を減少させる効果は重力駆動力の方が 6 倍ほど大きい, 土壤水分貯留量の 1% 程度であり, 貯留量そのものへの影響は小さい. 同じ降水量と下向き放射量が全ての実験に大気強制力として与えられるため実験間で土壤に与えられる正味の水分フラックス (下向き正) の差は小さく, また全ての実験に重力を駆動力とする表面飽和浸透が含まれているため表面流出量の差も小さい. この二つが実験間で差が小さい原因と言える. 以上のように, 全球年平均で見た場合, 地表面水・熱収支にも土壤水分量にも駆動力が 1 つだけの場合と, 両方の場合とで大きな差は認められなかった.

表-1 全球平均地表面水・熱収支. 実験 CTL は年平均値, 実験 G と実験 M は実験 CTL からの年平均偏差で表している. 但し, 南極域は除いてある.

実験名	土壌水分量	蒸発量	表面流出	地下流出	降水量	顕熱 潜熱	
	貯留 mm					W/m ²	
CTL	424.0	2.13	0.15	1.65	3.93	42.8	64.4
G	-6.3	-0.07	0.06	0.01	0.00	1.5	-1.6
M	-1.1	0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.3	0.3

Matric Potential Contribution (CTL-G)(mm)

-0.4	-31.3	4.7		-1.2	16.4	11.5	4.7
-2.9	4.1	-6.1				-7.4	-5.7
			4.3				
-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0

(1) マトリックポテンシャル駆動力 (実験 CTL-実験 G)

Gravity Contribution (CTL-M) (mm)

0.2	0.1	-5.4		-10.6	-4.7	-4.9	-8.4
0.4	-15.4	-4.8				-7.6	-8.5
			-9.7				
-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0

(2) 重力駆動力 (実験 CTL-実験 M)

Water Vapor Convergence (mm/day)

0.0	0.0	0.4		4.1	0.1	1.8	2.0
0.0	5.1	0.5				2.8	1.7
			2.7				
0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2

(3) 水蒸気収束量 (降水量-蒸発量)

Storage in Experiment CTL (mm)

331.9	270.2	464.4		465.7	415.6	452.4	492.5
302.0	516.7	419.2				452.2	427.9
			500.6				
340.9	340.9	340.9	340.9	340.9	340.9	340.9	340.9

(4) 土壌水分貯留量

図-2 マトリックポテンシャルと重力の駆動力が土壌水分量プロファイル形成に寄与する割合.

(3) 年平均値の全球分布

図-2はマトリックポテンシャルと重力の駆動力が土壌水分貯留量へ寄与する割合を全球分布で示したものである.

全球平均ではいずれの駆動力も負であったが、地域によっては正になるところが図-2(1), 図-2(2) 共に見られる. 特に図-2(1) では南極域を除いた半数の地域で正となっており、更に値も -30~+16 までとマトリックポテンシャル駆動力の寄与に大きな違いが見られる. とりわけ緯度 4(45°N) の地域は各経度毎に全く異なった寄与を示している.

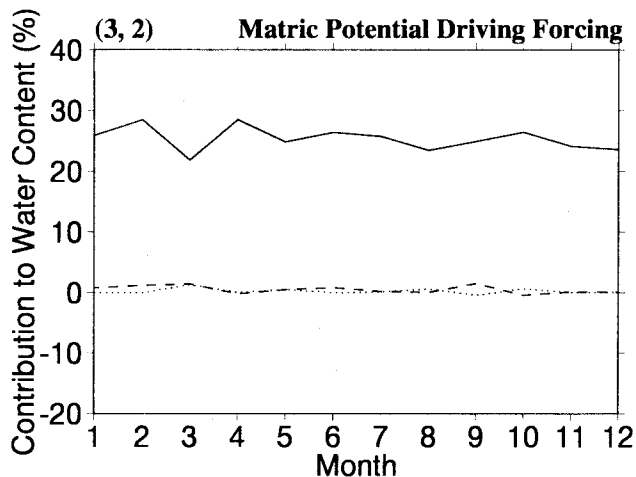
重力駆動力の寄与が正の地域 ((3,1), (4,1), (4,2)) は降水量から蒸発量を引いて得られる水蒸気収束量がほぼ 0 の地域と一致している. 水蒸気収束量がほぼ 0 の地域では表面と地下流出が無く、降った雨が全て蒸発してしまい、実際土壌水分貯留量も少なく 350mm 以下の領域に対応している. 逆に土壌水分貯留量が 500mm 以

上の地域 ((2,4), (3,2)) は負の寄与が大きい地域に含まれている.

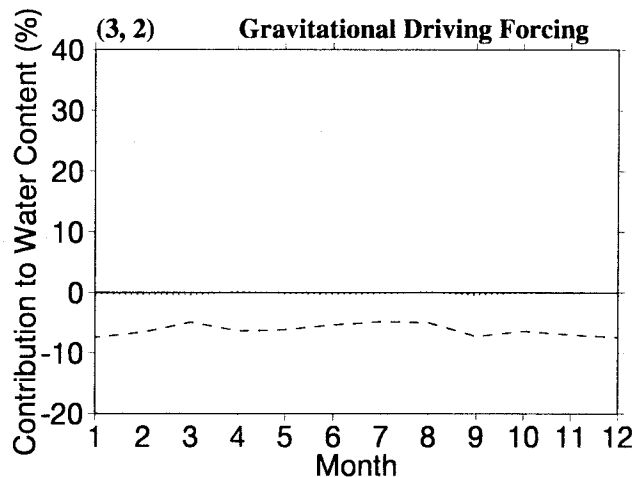
マトリックポテンシャル駆動力の寄与については重力駆動力ほど、土壌水分貯留量と水蒸気収束量に明瞭な関係を見出すことができない. 上で述べたように、緯度 4 の地域での寄与は各グリッド毎に大きく異なる. 原因として、土壌水の凍結融解過程の影響が挙げられる. 緯度 2 と緯度 3 だけに着目すると、マトリックポテンシャル駆動力の寄与が正の地域 ((2,4), (3,2)) は土壌水分貯留量が 500mm を越えている所に対応しており、水蒸気収束量とは直接的な関係を見出せない.

以上のことは、1) 土壌水分貯留量が大きいところでは重力駆動力の寄与が負で、マトリックポテンシャル駆動力の寄与が正である、2) 土壌水分貯留量が小さいところでは重力駆動力の寄与が正である、とまとめられる.

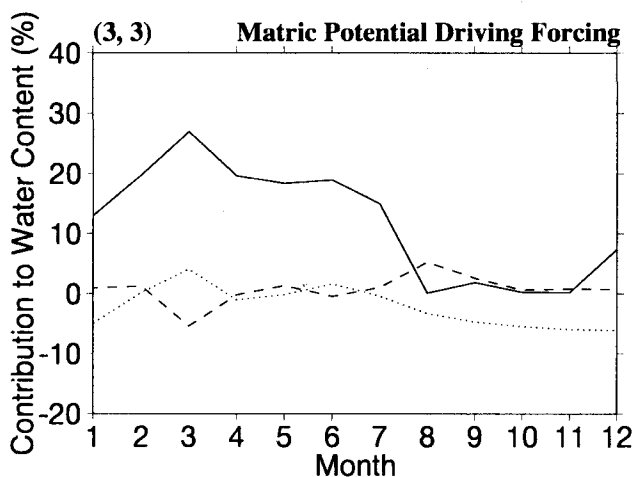
今、地表面での下向き正味水フラックス (土壌への正味の浸透量) が一定として与えられ、それに対応する



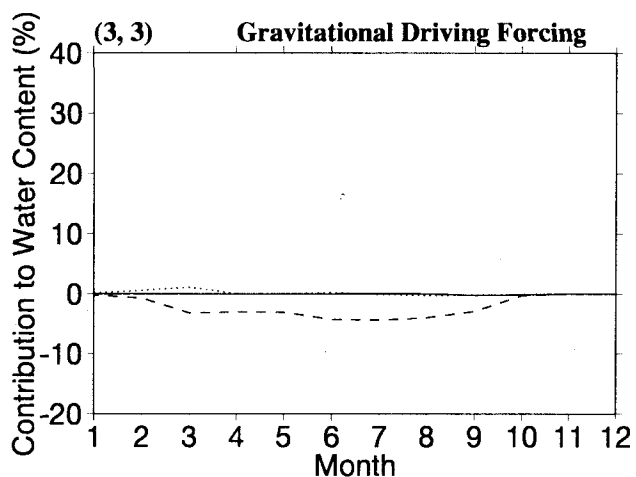
(1-a) マトリックポテンシャル駆動力 (3,2)



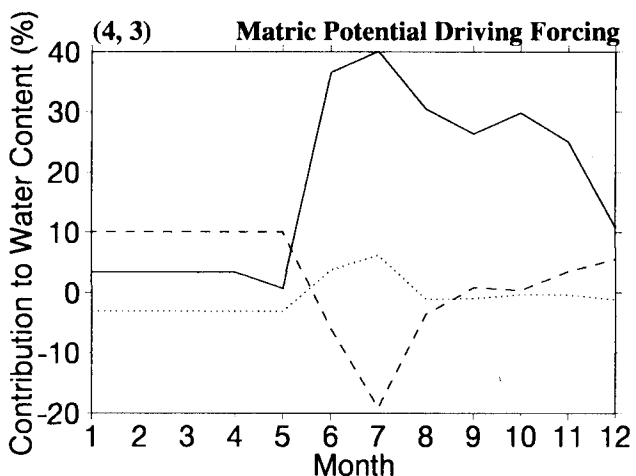
(1-b) 重力駆動力 (3,2)



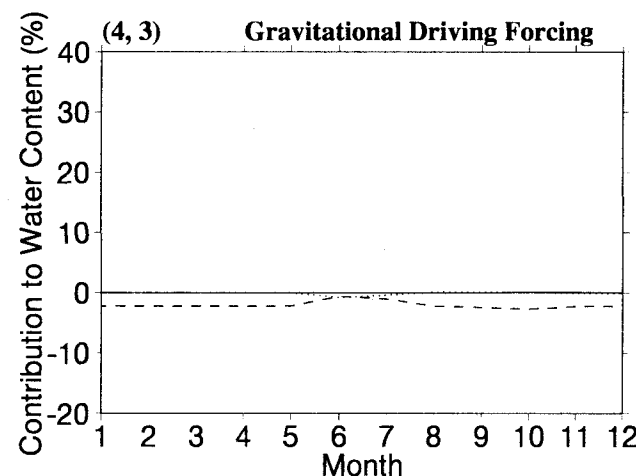
(2-a) マトリックポテンシャル駆動力 (3,3)



(2-b) 重力駆動力 (3,3)



(3-a) マトリックポテンシャル駆動力 (4,3)

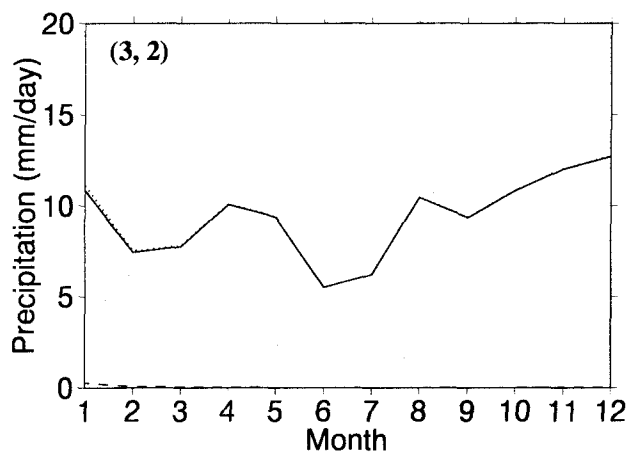


(3-b) 重力駆動力 (4,3)

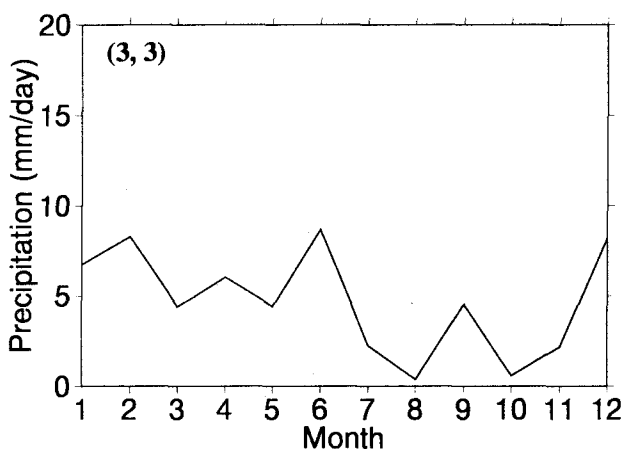
図-3 マトリックポテンシャルと重力の駆動力が土壌水分量プロファイル形成に寄与する割合。図番号の数字は地域を表し、(1)(3,2), (2)(3,2), (3)(4,3), ローマ字は駆動力を表し (a) マトリックポテンシャル駆動力の寄与, (b) 重力駆動力の寄与を表している。図中の実線、破線、点線の順には第1層、第2層、第3層を示している。

全ポテンシャル鉛直分布が形成されている、定常な状態を考える。実験間で地表面正味水フラックスに差が無いとすると、両駆動力を考慮した場合 (実験 CTL) と、マ

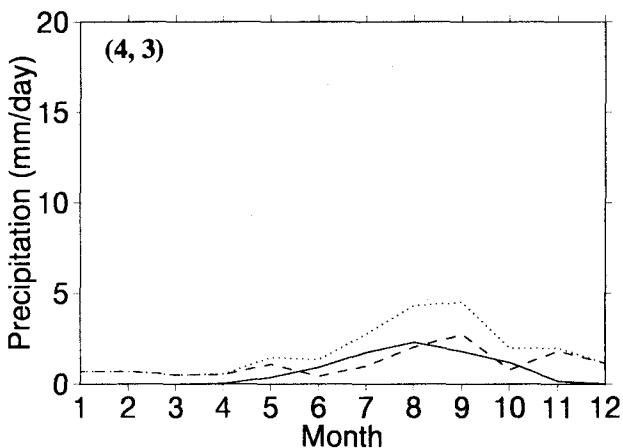
トリックポテンシャル駆動力だけを考慮した場合 (実験 M) とでは、土壌が乾燥した状態になるのは前者である。これは重力駆動力の寄与は負になると言い換えられ、上



(1) 地域 (3,2)



(2) 地域 (3,3)



(3) 地域 (4,3)

図-4 フォーシングとして与えられた降水量。図中の実線は大規模凝結による降水、破線は対流性降水、点線は全降水量を表している。

で述べた土壌水分貯留量が大きいところの結果と一致する。このような湿潤地域では実蒸発量と可能蒸発量はほぼ等しく、地表面での正味水フラックスは実験間で

殆ど変わらないので、土壌水分貯留量が大きい地域は重力駆動力の寄与が負であると言える。このことから重力駆動力の寄与が正ということはフラックスの差が実験間になければならないことが分かる。定常状態で、重力駆動力の寄与が正であるためには地表面へ与えられる正味水フラックスが増加しなければならない。土壌水分貯留量が小さい地域は可能蒸発量よりも実蒸発量が小さく、蒸発抑制が働く傾向にある。重力駆動力は下向きフラックスを増加させ、蒸発抑制をより強化し、地面への浸透を増加させる。従って、土壌水分貯留量が小さい地域では重力駆動力の寄与が正となる。

マトリックポテンシャル駆動力の寄与が正である地域は湿潤な地域に属しているので、上の議論から地表面正味水フラックスの差が実験間で殆ど無いと言える。両駆動力が働く場合、定常状態では両駆動力が釣り合い、全ポテンシャル勾配として1以下になるので、重力駆動力のみが働く場合に比べより湿潤な状態でないと同じフラックスは流せなくなる。従って、土壌水分貯留量の大きい地域(3,3)、(3,7)ではマトリックポテンシャル駆動力の寄与が正となる。

(4) 季節変化

前節では土壌全層の水分貯留量の年平均値について見てきたが、この節では各層毎の土壌水分の季節変動を調べる。各層の厚さは大きく異なるので、以下では体積含水率を用いて議論する。図-3に(3,2)、(3,3)、(4,3)でのマトリックポテンシャルと重力の駆動力が土壌水分量プロファイル形成に寄与する割合が示されている。(3,2)と(3,3)は同じ土地被覆で異なる気候地域の比較として、(4,3)は凍結融解過程を含んだ地域として選んだ。

(3,2)ではマトリックポテンシャル駆動力が第1層の土壌水分増加に年間を通して体積含水率で20%以上も寄与している。これは重力により一旦下層に移動した水を、マトリックポテンシャル駆動力が第1層へ汲み上げているためである。一方、第2、第3層への寄与は第1層目にくらべて極めて小さい。重力は第1層目、第3層目には殆ど寄与していないが、第2層目には-5%~-8%程度、季節変化無く寄与している。これは重力による第3層への水移動が1年を通して行われているためで、このことが第2層を乾燥化させている。

(3,3)ではマトリックポテンシャル駆動力の寄与は全層に達しており、季節変化を示している。第1層は(3,2)と同様に第2層からの汲み上げにより土壌を湿潤化させている。第3層は3月を除き乾燥化を示している。これは第2層のみならず第3層からも汲み上げが行われていることを示すもので、第3層中にまでゼロフラックス面が侵入していることを示すものである。重力駆動力は(3,2)と同様に第2層で3%ほど土壌水分の

乾燥に寄与しているだけで、第1, 3層には殆ど寄与が無い。

(4,3)でもマトリックポテンシャル駆動力の寄与は全層に達している。冬季には全層で凍結が生じるため水分移動が生じず、一定の値を保持している。第2層は夏季の間、マトリックポテンシャル駆動力により乾燥化され、秋季に湿潤化される。第3層については6月と7月にマトリックポテンシャル駆動力により土壌水分が増加しているが、それ以外の季節は第2層へ水の汲み上げが行われているため、土壌水分が減少している。重力駆動力は第2層目だけに寄与し、ほぼ通年で-3%ほどであるが、季節変化は殆ど見られない。

(3,2)と(3,3)は同じ緯度帯で隣接し合っており、土壌・植生種類も同一である。大気側強制力を比較すると、(3,2)の降水量は最小降水月でも5mm/day以上の降水がある多雨地域であり、一方の(3,3)は明瞭な乾季がある点が大きく異なっている(図-4(1),(2))。その結果、両駆動力の寄与に(3,2)では季節変化が無いのに対して、(3,3)では明瞭に現れている。ここでは(3,3)での両駆動力の季節変化について考える。

第1層でのマトリックポテンシャル駆動力の寄与は、降水とよく似た季節変化を示す。これは重力駆動力により第2層に浸透してしまった水分を1ヵ月の時間スケールで時間遅れなく、マトリックポテンシャル駆動力が汲み上げていることを表している。第2層から十分に水分供給のある雨季には、第3層は0近傍を変動するだけであるが、乾季になると乾燥が進行する第2層へと水分が汲み上げられて行く。重力駆動力の寄与は第2層にだけ顕著に見られ、乾燥化させている。この寄与は雨季から位相が2ヵ月遅れた期間に限定されている。これは湿った分だけ、透水係数が大きくなり第3層へのフラックスが増加したためと言える。このように、同じ土壌・植生タイプであっても大気側強制力の違いにより各層での駆動力の寄与の仕方や、その季節変化が全く異なっていることが分かる。

(3,3)と(4,3)は同じ経度帯であるが、緯度が異なるので気候は大きく違う。また両方とも森林ではあるものの土壌・植生種類も異なるがこの違いの影響は小さいものと仮定して議論を進める。(4,3)は冬季の降水が積雪であることを考慮すると、(3,3)と同様に液体水としての雨季と乾季が明瞭にある地域と言える(図-4(3))。第一の違いは(4,3)では冬季に土壌が凍結するため、土壌中の水は移動できなくなり、両駆動力の寄与は凍結前の状態を保持し続ける点である。6月に第1層のマトリックポテンシャル駆動力の寄与が大きな最大値を取るの、土壌融解により融雪水が第2層へ浸透して液体水が増加し、その水分が汲み上げられていることを示している。融解期では第2層のマトリックポテンシャル駆

動力の寄与は大きく負に振れ、それと同時に第3層での寄与は正となる。上で述べたように、第2層のマトリックポテンシャル駆動力の寄与が負の場合、第1層への汲み上げがまず考えられるが、6月から7月の第1層におけるマトリックポテンシャル駆動力の寄与の変化が小さいことと第1層の厚さを考えると第2層での変動は大きすぎる。これには第2層が融解していてもまだ第3層が凍結しているため、湿潤な第2層から凍結乾燥している第3層へ水の移動が生じているためである。先に述べたように(3,3)でも第2層のマトリックポテンシャル駆動力は降水量と密接な関係があったが、(4,3)では降水量ピークとは関係なく、凍結過程と密接に関係していると言える。

4. まとめ

本研究では陸面過程数値モデルに、ISLSCP大気強制力データを与えて土壌水分移動を駆動する重力とマトリックポテンシャル勾配の役割を全球スケールで明らかにするための基礎的な検討を行った。その結果は次のようにまとめることができる。

- 両駆動力を考慮した実験、片方だけを考慮した実験の3者間には全球平均地表水・熱収支の年平均値には大きな差は見られなかった。
- 全土壌水分貯留量に対する各駆動力の寄与は数%程度で小さいが、各駆動力とも各地点毎に寄与の大きさが異なる。
- 体積含水率で見た駆動力の寄与の季節変化は、両駆動力、地点毎に大きく異なる。マトリックポテンシャル駆動力の寄与は数10%で、明瞭な季節変化を示すが、重力駆動力の寄与は数%で季節変化をあまり示さない。

今後は全球 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ で計算を実施し、両駆動力の寄与を示す全球分布図を作成して地域特性を整理し、研究を更に進めたい。

参考文献

- 1) 佐藤信夫: 生物圏と大気圏の相互作用。Technical report, 気象庁予報部, 1998.
- 2) 大泉三津夫: GSMに組み込んだSiB土壌3層地温モデルのパフォーマンス。Technical report, 気象研究所, 1998.
- 3) 仲江川敏之: AGCM陸面土壌水分移動スキームがモデル気候値に与える影響。水文・水資源学会2000年研究発表会要旨集, pp. 8-9, 琵琶湖博物館, 京都大学大学院農学研究科, 2000.
- 4) T. Koike: Preface, global soil wetness project. *J. Meteorol. Soc. Japan*, Vol. 77, No. 1B, pp. i-ii, 1999.
- 5) B. W. Meeson, F. E. Corprew, J. M. P. McManus, D. M. Myers, J. W. Closs, K.-J. Sun, D. J. Sunday, and P. J. Sellers: ISLSCP initiative I-global data set for land-atmosphere models, 1987-1988, 1995.

(2000. 10. 2 受付)