

永久凍土の融解過程に及ぼす 地形効果の観測的研究

OBSERVATIONAL STUDY ON TOPOGRAPHIC EFFECTS OF PERMAFROST MELTING PROCESSES

石平 博¹・小池俊雄^{2,3}・広瀬望⁴・

SHEN Yongping⁵・WANG Shaoling⁶・YE Bosheng⁷

Hiroshi ISHIDAIRA, Toshio KOIKE and Nozomu HIROSE

Yongping SHEN, Shaoling WANG, Bosheng YE

¹正会員 工博 山梨大学講師 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

²正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

³地球フロンティア研究システム地球変動研究所 (〒105-6791 東京都港区芝浦1-2-1シーバンスN7F)

⁴学生会員 長岡技術科学大学大学院 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

⁵Ph.D., Associate Professor, Lanzhou Inst. of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, China

⁶Senior Engineer, Lanzhou Inst. of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, China

⁷Associate Professor, Lanzhou Inst. of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, China

Spatial and temporal variability of soil moisture is considered to have significant effects on energy and water transfer between land surface and atmosphere. One of the key effects on soil moisture distribution is topographic effect, that is, wet valley and dry hill top affected by surface and sub-surface flow along slope. Then, upward and downward heat and moisture fluxes controlled by Bowen ratio and soil heat transfer parameters determined by soil moisture also vary according to topography. In the permafrost regions, the effect of topography on heat and water transfer can be observed more clearly during melting season.

The purpose of this study is to understand the topographic effect on heat and water transfer in permafrost regions. The topographic effects on permafrost hydrological conditions were examined by the pit observations which were carried out on the Tibetan Plateau as a part of the GAME-Tibet project.

Key Words : *permafrost hydrology, heat and water transfer, topographic effect*

1. はじめに

高い精度での気候変動予測や長期気象予報、さらにはそれに基づく長期的・安定的な水資源開発や洪水予測を実現するためには、大陸、地球規模での水・エネルギー循環過程を理解し、これを気候・気象モデル中に反映させる技術を開発する必要がある。しかしながら、陸域には様々な地表面状態が存在し、その地表面状態の違いによって熱・水フラックスも大きく異なることから、広域場における大気-陸域間での熱・水輸送量を正しく見積もることは非常に困難である。さらに、この不均一性は非常に細かなスケールにまで見られ、気候モデルのグ

リッドのスケール(数10~100km四方)においても地表面の状態は均質とはみなせない場合が多い。したがって、大気-陸域間での水・エネルギー循環を評価するためには、気候モデルのグリッドスケールにおける平均的な地表面水文状態の表現やその不均一性を考慮した空間平均的フラックスの算定手法を開発する必要がある。

このような地表面状態の不均一性が領域平均フラックスに与える影響を考える上で、とりわけ土壤水分の時空間分布の影響は大きいと考えられる。気候システムにおける土壤水分の重要性については、鼎ほか¹⁾にレビューされている通りであるが、気候モデルのグリッドスケールでの土壤水分分布と領域平均フラックスの関係につい

ても近年検討が成されている。仲江川ほか²⁾は、対象とする領域内における物理量の分布を考慮できる蒸発量算定式を導出し、これを用いた数値実験により表層土壌水分量と地表面温度の分布が蒸発量計算に及ぼす影響について検討した結果、表層土壌水分や地表面温度の分布の効果は平均、分散のみならずその分布形状によっても異なることを示している。また、Chen et al.³⁾は、土壌特性及び土壌水分状態が分布している場における不飽和流を表現するモデルを提案し、寺川ほか⁴⁾は、Chen et al.の手法を組み込んだメソスケール水文・気象モデルを用いて、地球温暖化に伴う日本周辺領域で気温、降水量等の変化に関するシミュレーションを行っている。

このように領域平均フラックスを評価する上で土壌水分分布は非常に重要であることが示されてきたが、その分布を作り出す要因の1つとして地形勾配に応じて発生

する斜面方向への水移動が考えられる。地形起伏の存在する領域では、斜面上部から下部へ向かって地下水の移動があるため、谷地形の部分では定常的に水分供給され湿潤化し、斜面上部では逆に乾燥しやすくなることが予想される。この地形によって作り出される土壌水分分布が潜熱・顕熱フラックスに与える影響に関する検討としては、田中ほか⁵⁾、田中ほか⁶⁾、石平ほか⁷⁾などがあるが、いずれも仮想的な条件下での数値シミュレーションによるものあり、現地観測データに基づく検証などはまだ十分には行われていない。

そこで本研究では、チベット高原の永久凍土帯に位置する斜面での地温、土壌水分の観測結果を用いて、斜面方向への水分移動がその場における熱・水循環に与える影響について検討する。ここで、チベット高原の永久凍土帯を対象領域として選んだのは以下の理由からである。まず、第一に森林のような植生が存在しないためその影響を考慮する必要が無く、地表面での熱・水輸送過程をより単純化して考えることができること、第二に平坦な平原の中に小高い丘が点在しており、観測に適したスケールの独立した斜面を選定できること、第三に、永久凍土層の季節的な融解及び凍結は、土壌水分の供給とともに凍土融解深変化による土壌保水容量の季節的变化を生み出すなど、土壌中の熱・水輸送の関係がより顕著にあらわれると考えられることなどが挙げられる。これに加え、チベット高原やシベリアに広がる永久凍土層は、土壌水分の季節変動の支配要因、あるいは年々変動を駆動するメモリーとしての機能の面から、アジアモンスーン変動へ大きな影響を与えられていると考えられており、アジア域における気候システムを考える上でも重要な地域であることも、チベット高原を対象領域とした理由の1つに挙げられる。

特に本研究では、土壌水分、地温の鉛直プロファイルおよび凍土融解深に着目し、それらの斜面方向の分布状態とその季節変化から永久凍土帯における熱・水輸送における斜面流の効果について検討した。

2. 対象領域および観測概要

図-1はGAME-Tibet Projectにおける観測対象領域の概要を表しており、今回の斜面水文観測はチベット高原中央部(N31° 49', E91° 44' 近辺)に位置する両道河(Ryandaho, 図中☆)地点において行われた。この地点における水準測量により得られた斜面の縦断形状を図-2示す。全長約700m、高低差約80mの南西向き斜面であり、斜面下端から距離約500mまでは平均斜度3~4°の緩やかな勾配が続き、斜度が12~13°の比較的急勾配斜面がこれに続く。この斜面において、斜面下部(No.1), 斜面途中(No.2), 地形変曲点(No.3), 斜面上部(No.4)の4カ所に観測用縦穴を掘り、TDR土壌水分計による土壌水分観

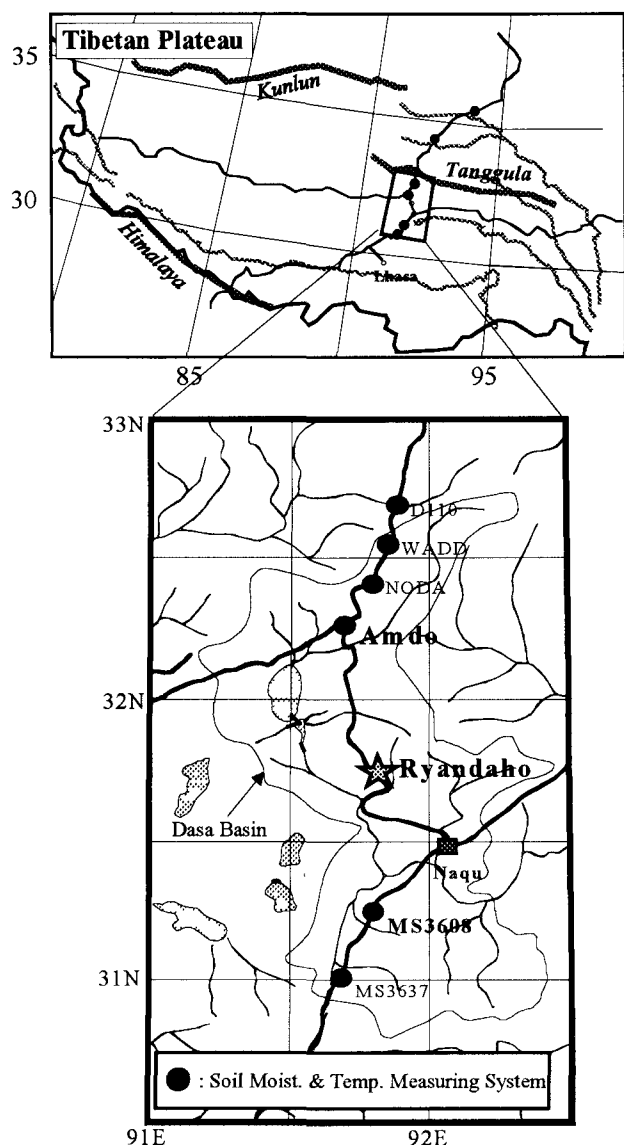


図-1 観測対象領域の概要

表-1 凍土帯斜面水文観測の概要

観測日時	土壌水分観測	地温観測	コメント
98/05/08	No.1,2,4	No.1,2,4	地点(No.1,2,4)とも凍結土壤に到達
98/06/13	No.1,2,4	No.1,2,4	No.4地点では凍結土壤に到達せず(礫層のため掘削できず)
98/07/04	No.1,2,4	No.1,2,4	No.2地点で地下水面を確認
98/07/29	No.1,2,3	No.1,2,3,4	No.1,No.2地点で地下水面を確認, No.3地点を新たに掘削
98/08/24	No.1,2,3	No.1,2,3	No.1,No.2地点で地下水面を確認, 斜面下部はほぼ全層飽和
97/09/04	No.1,2,4	No.1,2,4	斜面及び観測地点(No.1,2,4)の選点及び予備観測

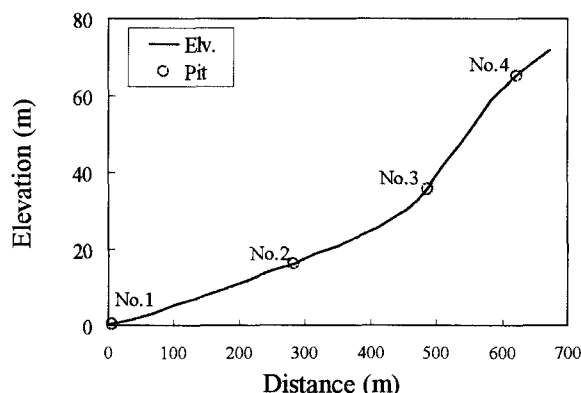


図-2 観測対象斜面縦断面図

測及び温度センサによる地温の測定を、表層から約10cm間隔で行った。なお、観測用の縦穴の深さは、礫層など人力による掘削が困難な層に当たらない限り、土壤凍結面に到達する深さとした。さらに、このような土壌水分、地温プロファイルの観測を1997年9月～1998年8月までの期間中に計6回(表-1参照)行うことにより、斜面における土壌水分、地温分布の季節的な変化に関するデータを収集した。また、8月24日の観測においては、これら縦穴での土壌水分観測に加え、斜面上数地点において表層8cmの土壌水分観測も行った。

さらに、この斜面観測と同時期に、チベット高原を南北に縦断するラインで土壌水分、地温の自動計測システムによる観測も行われた(図-1●で示す地点)。このシステムにより、高原上8カ所における土壌水分、地温プロファイルが1997年7月以降1時間間隔で得られている。この観測システムは比較的平坦な地形条件の場所に設置されていることから、本検討では、先に述べた斜面観測により得られる土壌水分、温度のプロファイルとの比較対象としてこのデータを使用する。

3. 解析結果および考察

(1) 斜面上部、下部での土壌水分、地温状態の違い

図-3は、表-1に示した観測日におけるNo.1～No.4地点での土壌水分、地温プロファイルである。

表-2 土壌水分、地温自動観測システムの概要

センサ	センサ数	センサ深度
土壌水分(TDR)	6深度	4cm, 20cm, 40cm, 60cm, 100cm, 160cm, Bottom*
地温(Pts)	10深度	4cm, 20cm, 40cm, 60cm, 80cm, 100cm, 130cm, 200cm, Bottom*

*: 各地点によって異なる(約180～250cm)

まず、斜面方向の土壌水分の分布パターンについて見ると、全般的に斜面下部(No.1)では湿潤状態となる一方、斜面上部(No.3,4)では逆に乾燥化する傾向が見られる。今回観測を行った斜面のスケールでは、降水量の空間分布は無視できると考えられることから、このような斜面方向の土壌水分分布を作り出す要因として、先に述べた斜面方向への地下水の移動が挙げられる。つまり、降雨浸透や凍土融解により土層中に貯留された水分が、地形勾配によって斜面の上部から下部へと流下するため、上流から水分供給を受ける斜面下部は湿潤化し、斜面上部では下流へ水分が移動した分だけ乾燥化することとなる。

一方、地温について同様にしてみると、斜面上部では地温が高く、斜面下部では低温となる傾向が確認される。このような地温分布を作り出す要因としては、先ほど述べた斜面上部と下部での土壌水分量の違いが挙げられる。具体的には、土壌水分状態に応じて、地表面熱収支や土壤の熱特性が変化することによるものと考えられる。土壌水分が高く、蒸発可能な水分が十分にある場合には、地表面熱収支における潜熱の割合が増えることから、地中へ輸送される熱量は減少する一方、乾燥した土壤面においては、蒸発抑制により潜熱の割合が減少し、結果として地中への熱輸送が増えると考えられる。図-4は、98年8月24日の観測において測定された、表層土壌水分(地表面から深さ8cmまでの平均土壌水分)の斜面方向分布を表しているが、この図からも斜面上部と下部では表層土壌水分に明瞭な差があることが確認できる。さらに、表層土壌水分の多寡により蒸発効率は大きく変化することから(近藤⁹⁾、斜面の上部、下部での地表面熱収支特

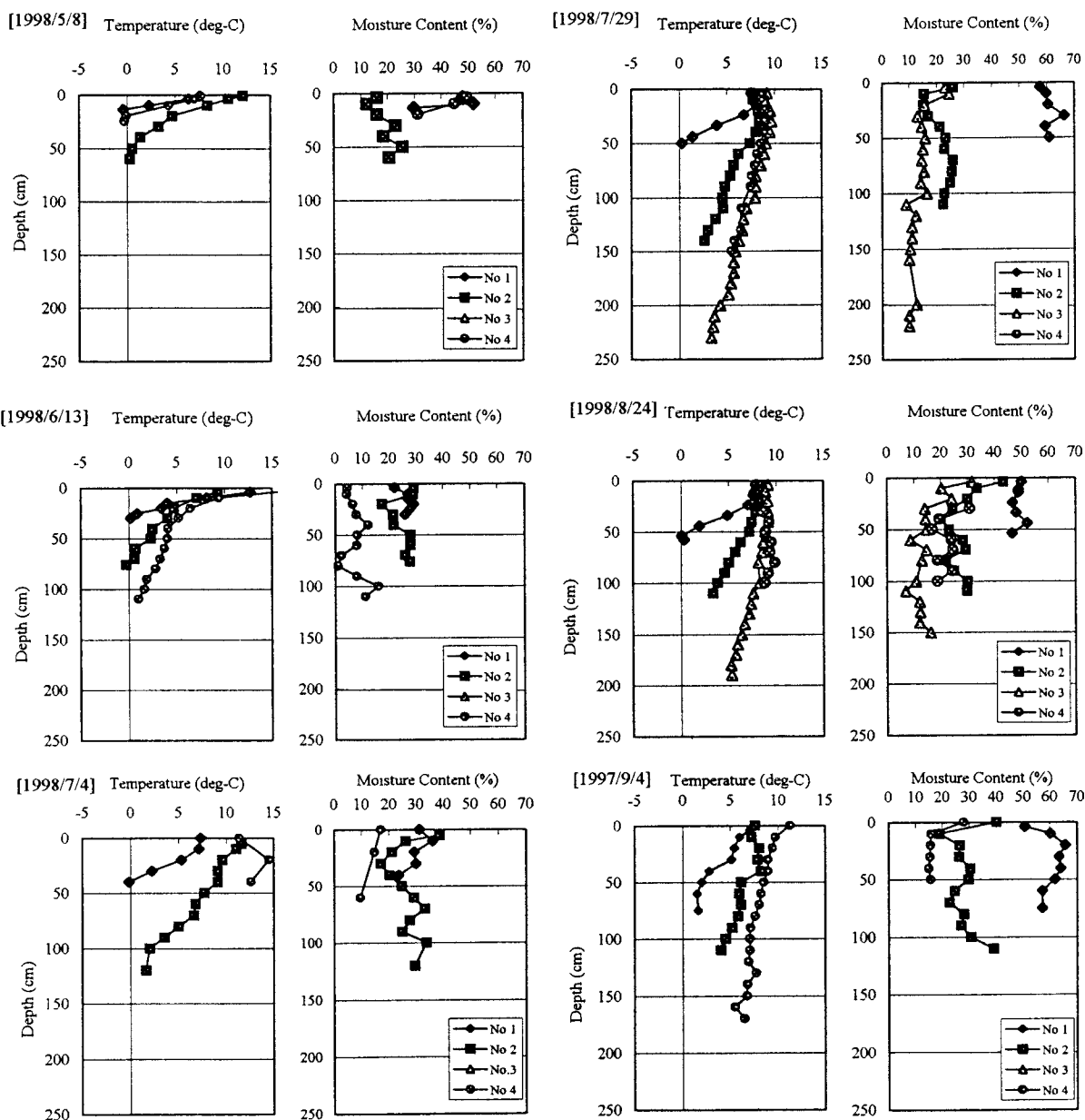


図-3 斜面における地温、土壌水分プロファイルの季節変化

性は大きく異なり、その違いが温度の差となって現れたと考えられる。さらに、このような地表面熱収支だけでなく、土壌の含水状態の違いは、地中での熱伝導特性にも影響を与える。土壌の熱容量は、一般に土粒子と土壌水それぞれの熱容量を体積割合に応じて平均することにより求められるが、土壌水分が増大すると、熱容量が相対的に大きい水の割合が増えるため、土壌の熱容量も大きくなる。つまり、土壌水分の増加とともに土層は暖まりにくくなるといえる。これによって、土壌水分が高い斜面下部での地温が低く保たれ、乾燥した斜面上部では、相対的に暖まりやすくなったとも考えられる。ただし、

土壌水分の増加とともに、空隙が水で満たされるため熱伝導率は高くなることから、土壌水分の増加が熱伝導率に与える影響は、熱容量のそれと全く逆の傾向を示す。したがって、土壌水分状態の違いが土層全体の温度に対して与える影響については、数値モデルによるシミュレーションなどを通じさらに検討する必要がある。

以上のように、斜面上部からの土壌水の流下で斜面上部を乾燥・高温化し、斜面下部を湿潤・低温化する傾向が確認された。

(2) 斜面における土壌水分、地温分布の季節的な変化

斜面上部と下部では、土壌水分、地温の状態が異なる

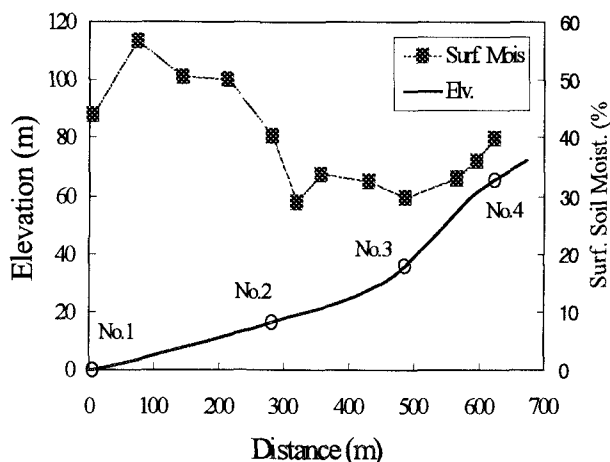


図-4 斜面における表層土壌水分分布 (1998/8/24)

ことについて述べてきたが、次にこのような土壌水分や地温の斜面方向分布の季節変化について述べる。図-3に示した土壌水分、地温プロファイルを、時間経過に沿って見てみると、季節の進行とともに斜面上部と下部での土壌水分、地温の差異が大きくなる傾向が見られる。たとえば、98年5月8日の地温プロファイルを見ると、No.1,2,4の各地点間の温度差はさほど大きくなく、プロファイルの形状にもさほど大きな違いは見られない。しかしながら、季節の進行とともにその差は大きくなり、8月24日の土壌水分、地温については、No.1~3の各地点での値に明瞭な差異が認められる。また、同日の地温プロファイルについては、各地点ごとにその形状(温度の変化率)も大きく異なっている。

このような季節変化については、凍土融解に伴う斜面方向への水分移動量の変化が関与していると考えられる。まず、凍土融解の初期段階(4~5月)においては、融解深は浅く、土壤中における移動可能な液相水がまだ十分に蓄積されていないため、斜面方向への水分移動量はさほど多くない。これに対し、凍土融解が進行した7~8月においては、凍土融解や降雨浸透により土壌層の貯水量が増加することに加え、凍土層が止水面として機能するために、その土壌水が凍土層上に飽和水帯を形成し、斜面方向への飽和側方流が発生する。これにより、多量の水分が斜面上部から下部へと輸送されることとなり、その結果、斜面上部と下部とで水分、温度状態が大きく変化すると考えられる。今回の観測においても、No.2地点において、5月の段階では見られなかった地下水面が7月以降3回の観測ではいずれも確認されるなど、凍土融解の進行にともなう飽和水帯の形成を裏付ける観測結果が得られている。

(3) 凍土融解深に与える斜面流の影響

永久凍土帯における熱・水輸送過程を考えるうえで、凍土融解深は重要な要素の1つである。これは、永久凍

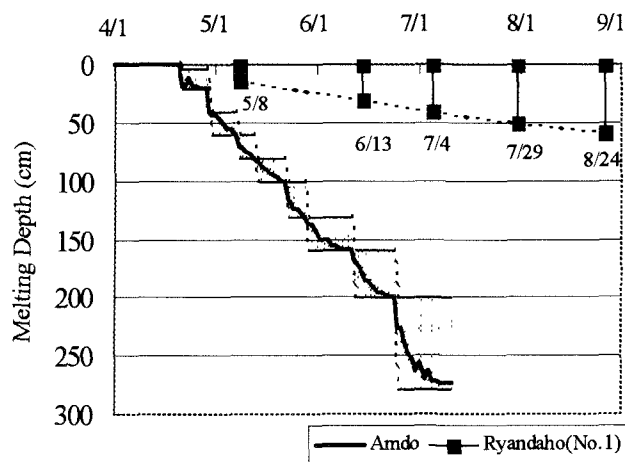


図-5 斜面及び平坦地における凍土融解深の変化

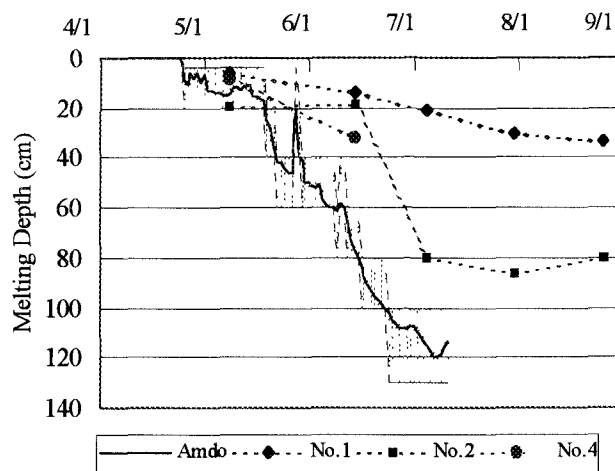


図-6 斜面及び平坦地における等温面(5°C)深さの変化

土層の融解深の変化は、土壌水分の供給とともに凍土融解深変化による土壌保水容量の季節的变化を生み出すなどの働きを持つためである。ここでは、斜面が存在することにより、この融解深の季節変化がどのように影響を受けるのかについて検討した。図-5は、斜面下部に位置するNo.1地点で観測された凍土融解深と、土壌水分、地温の自動観測システム設置地点の1つであるAmdo地点における地温測定結果から推定した凍土融解深とを比較したものである。なお、Amdo地点における凍土融解深の推定については、観測により得られた地温プロファイルから地温が0°Cとなる深度が存在する層(図中ハッチの部分)を特定し、これを融解深とした。またハッチの中の実線は、地温プロファイルの線形補間により地温が0°Cとなる位置を求めたものである。斜面観測を実施した両道河とAmdoとでは、気象条件も異なると考えられることから、Amdoにおける融解深と斜面のNo.1地点におけるそれとを単純に比較することはできないが、融解のスピードという点について見た場合、平坦地であるAmdoと比較

して、No.1地点における融解の進行は緩やかである。これは、先ほど述べたように斜面方向への流れが斜面下部を湿潤、低温化するためである。また同様に、斜面及びAmdo地点における地温プロファイルから地温が $+5^{\circ}\text{C}$ となる深さを求めプロットしたものが、図-6であるが、やはり斜面上部よりも斜面下部での温度変化が緩やかであることが分かる。また、これらの結果より、斜面の上部ではこれと逆のメカニズムにより、平坦地よりも融解深が深くなることが予想される。

以上のように、斜面方向への土壤水の移動は、凍土融解深の分布をも作り出すことが示されたが、このようにして形成される融解深分布は、先に述べた土壤水分や土壤保水容量などの不均一性を生み出すことを通じ、広域場におけるフラックスに影響を与えることも考えられる。

4. まとめ

チベット高原の永久凍土帯における斜面水分観測(土壤分、地温観測)データをもとに、斜面方向への地下水の輸送が熱・水輸送過程に与える影響(地形効果)について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 斜面上部からの土壤水の供給により、斜面上部は乾燥・高温化し、斜面下部は湿潤・低温化する傾向が見られる。
- (2) 斜面方向の土壤水分、地温分布の季節変化にも、斜面方向への地下水移動が関与していることが考えられる。具体的には、凍土融解にともなう飽和水帯の形成ならびに斜面側方流の発生がこの季節変化に影響を与えていることが予想される。
- (3) 地形勾配による斜面方向への水分移動は、凍土融解深の分布にも影響を与えている可能性がある。

本検討により得られた知見をもとに、今後は斜面による水分輸送過程を考慮した熱・水輸送モデルの開発ならび

に、今回述べたような地形効果が領域平均フラックスに与える影響についても検討を行う予定である。

謝辞： 本研究は文部省国際共同研究等経費「アジアモンスーンエネルギー・水循環観測研究計画(GAME)」，科学研究費補助金(国際学術共同研究)「チベット高原におけるエネルギー・水循環過程の研究」、地球フロンティア研究システム(陸域寒冷圏)の研究成果の一部である。本研究では、GAME-Tibetプロジェクトを通して得られたデータを使用している。

参考文献

- 1) 鼎信次郎，沖大幹，虫明功臣：気候システムにおける土壤水分，水文・水資源学会誌，Vol.11 No.5，pp.508-514. 1998.
- 2) 仲江川敏之，沖大幹，虫明功臣：サブグリッドスケールの分布を考慮した蒸発量の算定について，水工学論文集，第38巻，pp.167-172, 1994
- 3) Chen, Z. Q., Govindaraju, R. S. and Kavvas M. L. Spatial averaging of unsaturated flow equation under infiltration condition over areally heterogeneous field 1. Development of models, Water Resources Research, vol. 30 No.2, pp.523-533. 1994.
- 4) 寺川陽，吉谷純一，渡辺明英，藤兼雅和，松浦達郎：地球温暖化が日本域における水文循環に及ぼす影響の予測に関する研究報告書，土木研究所資料，第3432号，1996.
- 5) 田中賢治，前田敏彦，池淵周一：地表面起伏形状と水・熱フラックス分布の関係，水文・水資源学会1995年研究発表会要旨集，pp.54-55, 1995
- 6) 田中賢治，前田敏彦，高棹琢馬，池淵周一：陸面モデルのための2次元地中モデルの開発，水工学論文集，第41巻，pp.93-98, 1997.
- 7) 石平博，小池俊雄，陸旻皎，広瀬望：永久凍土帯の熱・水移動特性に関する2次元地中流モデルの開発，水工学論文集，第42巻，pp.133-138, 1998.
- 8) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，1994.

(1998. 9. 30受付)