

# 地中温度の研究

## A Review of Studies on Soil and Groundwater Temperatures

谷口 真人<sup>1</sup>・佐倉 保夫<sup>2</sup>

Makoto TANIGUCHI and Yasuo SAKURA

筑波大学水理実験センターの熱収支・水収支研究の成果の1つに地中温度の研究がある。地中温度は地表面付近の熱収支を考える上で重要であるばかりでなく、地中水流動の影響を受けるため、水循環・水収支を考える上でも非常に重要である。これまでに水理実験センターにおいて行われた地中温度に関する研究、およびその手法や成果を用いて他の地域で行った研究について以下に概説する。

佐倉 (1978) は、水理実験センター熱収支・水収支観測圃場内においてルーチンで測定されている地温のデータを、降水量・蒸発散量・土壌水分吸引圧の観測結果とともに詳細に検討した結果、土壌水分移動と地中温度分布の関係について興味ある結果を見出した。すなわち、地温の日変化が通常及ばない深度1 mの地温が、降雨直後急激に階段状に低下することを観測した。この事は、降雨に伴う土壌水分の移動が地中温度の形成に大きく寄与していることを示唆した。その後、この降雨後の地中温度変化が、ほぼ全層的に、しかも温度勾配を維持しながら発生することから、佐倉 (1979) は定常1次元の熱移流拡散式を用いた解析を行い、浸透過程における地中温度の変化から土壌水分フラックスを推定することに成功した。この解析方法は、表層地温に温度勾配が形成されている時のみ適用可能であるが、地下水温のみならず地温も水分フラックス量推定の指標となり得る事を明らかにした点で、地中温度研究の新しい方向性を示したと言える。

佐倉・開発 (1981) は、以上の研究をもとに、土壌水分移動を考慮した表層地温形成のメカニズムを解明し、地表面の熱収支をさらに詳細に検討するために、熱収支・水収支観測圃場脇に設置した野外観測土層において、降雨浸透時の砂層地中熱環境変化を観測した。観測の結果、毛管水帯内の地温変化の伝播速度が飽和透水係数より大きな値となり、降雨に伴う毛管水帯内の土壌水分移動機構を反映した地温変化を示すことが明らかになった。これは、後の土壌水保持形態を考慮した浸透過程の研究へと発展するが、土壌水分移動機構の研究に関するレビューは別項に譲ることとする。

佐倉 (1984a) は以上の研究成果から、土壌水の保持形態及び土壌水分移動機構と地中温度形成機構の関係について、特に降雨後の表層地中温度の変化について次のようにまとめている。地表付近の懸垂水帯での浸透水は、土粒子表面を伝わって降下する移動形態をとるため、地温変化は降雨発生により生じたぬれ前線の移動にもなって下方へ伝達される。一方、地下水面上方の毛管水帯の水は毛管力と重力の釣合で、平衡水分分布を形成する。地温勾配が形成されている状態でそこへぬれ前線が到達すると、圧力平衡の崩れによる土壌水の一斉移動に対応して、地温プロファイルは初期の温度勾配を維持しながら下方へ移動する。従って、通常地温の日変化が及ばない深度1-2 mにおいても、毛管水帯中であれば、降雨浸透による地温変化は急激でかつ大きいことが

<sup>1</sup>: 奈良教育大学 教育学部 天文・地球物理学教室

<sup>2</sup>: 千葉大学 理学部 応用地学教室

説明された。

以上のような土壌水の移動形態を考慮した地中温度形成機構に関する一連の研究をうけて、Taniguchi (1984) は、新潟県長岡平野において、積雪地域の地中温度形成機構を地中水の移動機構と関連させて、観測・解析した。谷口 (1985) は、降雨浸透で観測されたような地温の階段状の急激な一斉変化が、融雪水の浸透によっても引き起こされる事を観測した。また、積雪地域である長岡の涵養域においては、熱移流による年間の負の貯熱変化量は正の値より大きく、地中温度分布は熱伝導方程式に基づく理論解より低温方向へずれる。その主な原因は、上層ほど低温な温度環境下での浸透に起因する融雪浸透水であることが明らかになった。

融雪浸透水による地温の一斉変化は、土粒子と水との温度非平衡を考慮した熱輸送モデルを用いて解析が行われた (Taniguchi and Kayane, 1986)。ここでは、土壌水を可動水と非可動水に分離し、土粒子と非可動水は熱伝導のみにより熱輸送が起こり、可動水は熱伝導と熱移流により熱輸送が起こると仮定した。さらに両者の間に熱交換が存在すると仮定して、数値解析を行った。その結果、融雪期の日中における、毛管水帯内の地中温度の急激な一斉低下は、下向き正の急な温度勾配下での可動水の一斉移動による事、また、その後の地温の一斉回復は、可動水の移動終了後の、非可動水+土粒子と可動水との間の熱交換が原因で起こることが明らかになった。

地中水の流動を考慮した地中温度形成機構に関する研究は、上述の不飽和帯ばかりでなく、飽和帯においても行われた (Kayane et al., 1985, 谷口, 1987)。谷口 (1987) は、新潟県長岡平野において測定した地下水温度鉛直分布の季節変化が、同地域の地下水流動を反映していることを明らかにした。ここでは、地下水温度鉛直分布の季節変化が、恒温層深度が深く相対的に低温なタイプ、恒温層深度が浅く相対的に高温なタイプ、地下水温度が鉛直温度勾配を持たずに季節変化するタイプ、春の深度10—13m 付近に高温層が形成されるタイプの4つに分類され、その分布域も、それぞれ涵養域、流出域、河川近傍、市街地と地域的な特徴を持つことが明らかになった。

また熱移流拡散による数値解析により、これらの地下水温度分布の地域的差異が、地下水の涵養、流出、河川からの移流、消雪用揚水によって生じたものであることが明らかになった (Taniguchi, 1987)。

上述の長岡における地中温度の鉛直分布は、地中水の流動機構を明らかにする目的で主に用いられたが、これとは別に、熱収支の観点から地温の垂直温度勾配を議論した研究も行われている。山下 (1985) は、水理実験センターの観測圃場で測定された地温の垂直温度勾配を月毎に3年間分計算し、浅層地温の温度勾配形成について議論している。解析の結果、0.1—1.0m の垂直温度勾配は、昇温期では5月、7月、8月、降温期では12月に大きいこと、深度0.5m の地温の1月当りの変化量は、垂直温度勾配の大きさをほぼ説明できることが明らかになった。

さらに、山下 (1986) は日本全国における浅層地温の垂直温度勾配を計算し、垂直温度勾配の地域的差異について議論している。それによると、3月の深度10—50cm の温度勾配は、西南日本では下向きの熱の流れであるのに対し、北陸から東北日本では上向きの熱の流れになっていること、また、11月には東北北部は西日本西部に比べて2倍以上の温度勾配が存在することが示された。

地表面被覆の違いによる地中温度の変化に関しては、山下 (1984) が、菅平高原に於て積雪の有無や植生の違いによる地温分布の相違について調べている。ここでは、融雪や降雨が、地温の年変化上にみられる周期が短く振幅の小さな変化に大きく関与していること、また深度50cm の地温は、5月から11月までは植生分布に支配され、12月から4月までは積雪の影響を受けることが示された。また谷口 (1990a) は、水理実験センター観測圃場に隣接する松林に於て地温を1年間測定して、牧草地である圃場においてルーチンで測定されている地温と比較するとともに、両地域を横断する測線に沿って地温を測定し、植生の違いによる地中温度形成の違いについて観測・解析している。その結果、地温の振幅の深さ方向への減衰率は松林で大きく牧草地で小さいことが明らかになった。熱移流を考慮した定常熱輸送解析によると、下向きフラックスが大きいほど地温変動幅の

深さ方向への減衰率は小さくなる。一方、物質収支から求めた地下水涵養量は、松林で少なく牧草地で多いことが明らかになっており、地温の変動幅から推定される地下水涵養量の違いと対応する事が示された。

筑波大学水理実験センターの熱収支・水収支観測圃場では、1978年8月以降、深度2, 10, 50, 100 cmにおいて、地温をルーチンで測定している。これまでに、筑波大学水理実験センター(1980)、谷口ほか(1989)、川村ほか(1989, 1990)にデータが公表されており、今後も毎年発行される水理実験センター報告に、他の熱収支・水収支観測項目と共に掲載される予定である。地温の連続観測は各地の気象官署において1970年まで行われていたが、その後廃止されており、地温の連続データが得にくくなっている。当水理実験センターの地温の連続データが、今後さらに重要性を増すと考えられる。

なお、上述した研究成果を含めて、地中水流動と地中温度形成機構に関して、谷口ほか(1984)、佐倉(1984b)、谷口(1990b)が、地下水調査における地下水温の重要性や温度による地下水調査法、温度による地中水流動量の推定法などをレビューしている。本レビューと併せて参照されたい。

## 文 献

川村隆一・谷口真人・鳥谷 均・嶋田 純(1989)：熱収支・水収支観測資料—1988年—。筑波大学水理実験センター報告, 13, 159—176。  
川村隆一・谷口真人・嶋田 純(1990)：熱収支・水収支観測資料—1989年—。筑波大学水理実験センター報告, 14, 131—161。  
佐倉保夫(1978)：土壌水分移動と地中温度分布の関係(予報)。筑波大学水理実験センター報告, 2, 37—45。  
佐倉保夫(1979)：浸透過程の地中温度変化から推察される土壌水分移動について。筑波大学水理実験センター報告, 3, 33—38。  
佐倉保夫・開発一郎(1981)：野外実験土層における観測結果(1980年4—7月)一降雨浸透時の砂層地中環境変化—。筑波大学水理実験センター報告, 5, 11—18。

佐倉保夫(1984a)：豪雨時の表層土壌中の熱環境変化。地理学評論, 57, 628—638。  
佐倉保夫(1984b)：温度による地下水調査法。日本地下水学会会誌, 26, 193—197。  
谷口真人・三条和博・樫根 勇(1984)：地下水調査における地下水温の重要性。 hidrologia, 14, 50—60。  
谷口真人(1985)：長岡市周辺における地中温度形成に及ぼす積雪および融雪浸透水の影響。地理学評論, 58, 370—384。  
谷口真人(1987)：長岡平野における地下水温の形成機構。地理学評論, 60, 725—738。  
谷口真人・川村隆一・嶋田 純(1989)：熱収支・水収支観測資料(3)一水収支編一(1981年8月—1987年12月)。筑波大学水理実験センター報告, 13号別冊, 80p。  
谷口真人(1990a)：牧草地およびアカマツ林における地下水涵養量と地温分布。筑波大学水理実験センター報告, 14, 69—74。  
谷口真人(1990b)：温度による地中水流動量の推定。京都大学防災研究所水資源センター報告, 10, 17—27。  
筑波大学水理実験センター(1980)：熱収支・水収支観測資料(1)—1977. 8—1979. 3—。52p。  
山下孔二(1984)：菅平における地温分布の年変化と地表面被覆。新地理, 31, 1—8。  
山下孔二(1985)：水理実験センター圃場における浅層地温の垂直温度勾配。筑波大学水理実験センター報告, 9, 109—114。  
山下孔二(1986)：日本における浅層地温の垂直温度勾配。筑波大学水理実験センター報告, 10, 140。  
Kayane, I., Taniguchi, M. and Sanjo, K. (1985) : Alteration of groundwater thermal regime caused by advection. *Hydrological Sciences Journal*, 30, 343—360。  
Taniguchi, M. (1984) : *Effects of Infiltrated Meltwater on Soil and Groundwater Temperatures*. M. Sc. Thesis, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, 72p。  
Taniguchi, M. (1987) : *Hydrological Study on Sub-surface Temperature in Nagaoka Plain*. D. Sc. Thesis, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, 106p。  
Taniguchi, M. and Kayane, I. (1986) : Changes in soil

temperature caused by infiltration of snowmelt water. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, **155**, 93—101.