

中東の乾燥地土壌中の熱・水分移動特性と蒸発・乾燥過程

—アラブ首長国連邦における気象観測および土壌熱・水分計測—

Heat and moisture transfer in soils and evaporation-drying process at arid region in Middle East

— Meteorological observation and measurement of heat and moisture in soils at U.A.E. —

高野保英*・福原輝幸**・黒川和男***

By Yasuhide TAKANO, Teruyuki FUKUHARA and Kazuo KUOKAWA

Meteorological observation and measurement of heat and moisture in soil are carried out in an experimental field at United Arab Emirates(U.A.E.). The purpose of this experiment is to make a model of heat and moisture transfer in soils for saving the irrigation water in arid region.

The movement of water vapor in soils is evaluated by the experimental technique using thermo-hygro meter, which is developed by authors. This technique is useful for the monitoring of evaporation-drying process of soil after irrigation. The characteristics of temperature, humidity and water vapor density profile in soils are similar to those observed by indoor experiments on the evaporation from sand layer under diurnal climate variation.

Keywords : heat and moisture transfer in soil, evaporation - drying process, field observation, meteorological observation

1. はじめに

筆者等は乾燥地における節水灌漑のための土壌熱・水分収支モデルの構築と保水性繊維物(MAT)による乾燥地緑化の研究のために、1996年3月よりアラブ首長国連邦(U.A.E.)において気象観測および土壌中の熱・水分計測を行っている。U.A.E.の年間平均降雨量は場所によって異なるが50～100mm程度であり、乾燥地に属する。特に、5月から9月の間は高温かつ乾燥した気象が続き、当地の気象は日本に比べて高い蒸発能を持つことが予想される。試験地の灌漑は地下水に頼っているが、近年地下水位の低下や塩分濃度の増加が認められ、当地の水管理の関係者は節水と塩害防止に苦慮している。

本研究では、乾燥地における大気と地表間の熱・水分相互作用および土壌中の熱・水分移動に関するデータ収集を当面の目的とするが、これまで行った室内実験より得られた不飽和砂層中の熱・水分移動特性との比較・検討も行う。

乾燥地での水文計測はすでに真木ら¹⁾、Tsukamotoら²⁾、近藤ら³⁾によって中国の砂漠において開始されており、乾燥地の気象特性および土壌の熱・水分移動特性が徐々に明らかにされつつある。しかし、この種の計測では一般的に水分移動に関する情報は、熱移動に関する情報に比べて貧弱のように思える。この理由の1つは、計測および計測器維持管理の容易さの程度の違いにあると推察される。そこで、本現地観測では乾燥地土壌中の水分移動、特に水蒸気移動に注目し、筆者等が開発してきた土壌温度・湿度センサーによる水蒸気移動計測

* 学生会員 福井大学大学院工学研究科博士後期課程(〒910 福井市文京 3-9-1)

** 正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科(〒910 福井市文京 3-9-1)

*** 正会員 福井県工業技術センター(〒910 福井市河合鷺塚町 61 北稲田 10)

方法が、土壌内での灌水の移動のモニタリングに有効か否かの検討もなされる。

本論文では、U.A.E.の気象および灌水後の蒸発・乾燥過程における土壌熱・水分移動特性について考察する。

2. 実験概要

試験地はU.A.E. の Ras Al Khaimah 首長国にある農漁業省の北部農業実験場（面積 50 ha）にあり、その面積は約 600 m²である。試験地では芝による緑化実験、気象観測および土壌の熱・水分計測が行われている。試験地の土壌は Sandy soil（砂砂漠を構成する土）と Sandy loam に分類され、今回は後者を対象とした計測結果を示す。

気象観測装置は Photo.1 のように、全天日射計、長波放射計、アルベド計（いずれも英弘精機製）、三杯式風速計（牧野応用測器研究所製）および気温・湿度センサー（TEST TERM製）から成る。全天日射計および長波放射計は地上 1.5 m に、アルベド計は地上 0.45 m に、風速計は地上 0.3 m と 1.5 m に、気温・湿度センサーは地上 0.02 m、0.05 m、0.1 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m にそれぞれ設置される。

土壌の熱・水分計測には、土壌温度・湿度センサー（VISALA製、温度精度± 0.2 °C、相対湿度精度± 2 % RH）、ヒートプローブ式水分計（ノースハイテック製、精度± 1 %）およびテンショメータ（大起理化製）が使用される。土壌温度・湿度センサーは、抵抗型温度計と容量型湿度計を組み合わせたものであり、土壌浸透水の付着と応答性の低下を防ぐように改良される。土壌温度・湿度センサーは地表面下 0.02 m、0.05 m、0.1 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m に、水分計は地表面下 0.02 m、0.05 m、0.1 m、0.15 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.6 m にそれぞれ設置される。データはいずれも 30 分間隔でサンプリングされ（風速は 30 分平均値）、データロガー（ログ電子製）に記録される。テンショメータは計測が長期間に渡るとポーラスカップから水が抜け出るために、2 ～ 3 日間にわたる灌水の浸透実験に使用される。なお、容量型湿度計の原理については参考文献 4) を、ヒートプローブ式水分計の原理については参考文献 5) をそれぞれ参照されたい。

土壌灌水－蒸発・乾燥実験では、1 m²当たり5 ℓ、10 ℓ、20 ℓの地下水が気象観測区域（直径 4mの円）および土壌の熱・水分計測区域（直径 2.8 mの円）に灌水される。その際、水温と灌水時間が測定される。

以上の観測は、上述したように乾期が始まる 1996 年 3 月から開始され、灌水実験は随時行われる。

ここでは紙面の都合上、4 月のデータを示す。ただし、水分計の較正がまだ完了していないために、土壌水分量のデータの紹介は今後に行うこととする。

3. 実験結果

3.1 土壌および地下水の諸特性

Fig.1 は、今回対象とする試験区域の土壌である Sandy loam の粒径加積曲線であり、平均粒径は 0.08 mmである。ロームは、新三紀の堆積岩の第四紀風化物と思われる^{6) ~8)}。空隙率は0.41、飽和透水係数は 8.11×10^{-4} cm/sである。色は乾燥時には白っ

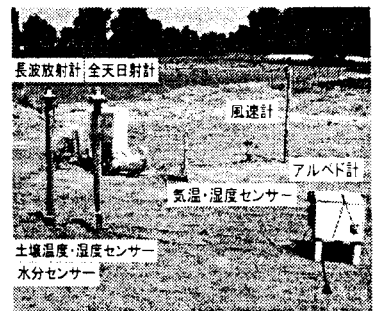


Photo.1 気象観測の様子

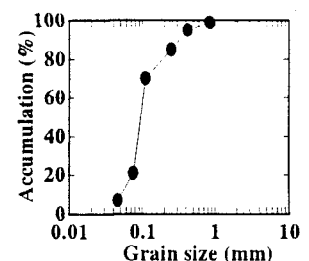


Fig.1 粒径加積曲線

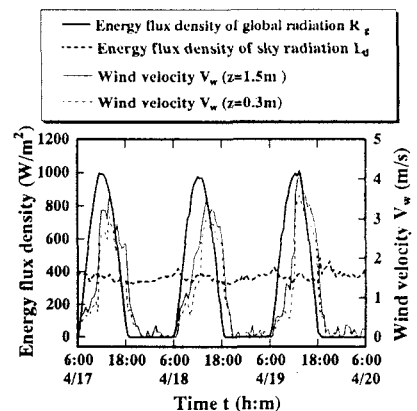


Fig.2 気象条件

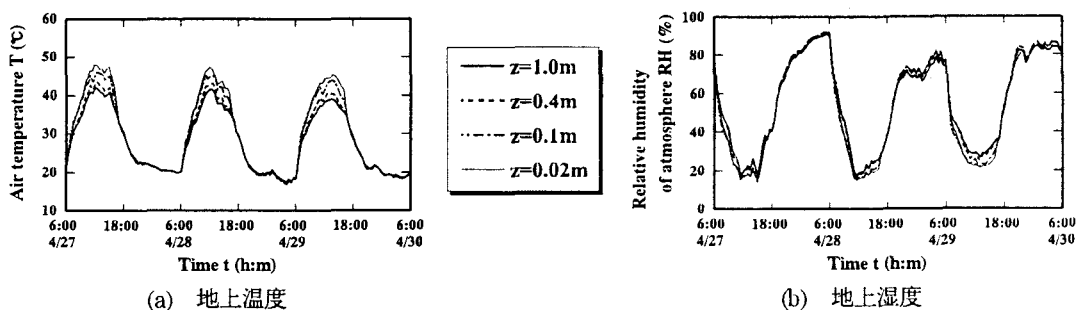


Fig.3 地上温度および湿度の経時変化 (4月27日～4月30日)

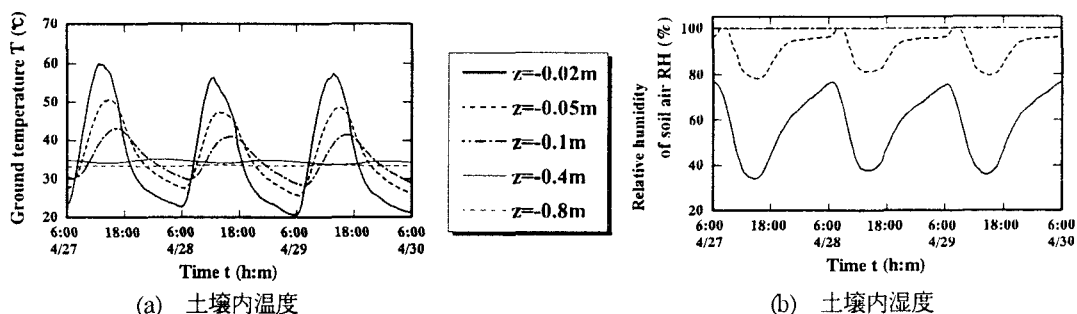


Fig.4 土壌内温度および湿度の経時変化 (4月27日～4月30日)

ばいが、含水時には濃い茶色に変化する。観測より得られたアルベドは、乾燥時で 0.23、湿潤時で 0.14 である。試験地はローム成分の含有率に若干の違いはあるものの、地下 1 m の層までは Sandy loam である。また、試験地付近の地下水位は地下 90 m ～ 150 m 程度であり、ここでも近年、地下水位の低下および塩分濃度の上昇が懸念されている。

3.2 気象条件

Fig.2 に試験地における 4 月の代表的な全天日射量 R_g の経時変化 $R_g(t)$ 、天空長波放射量 L_d の経時変化 $L_d(t)$ および風速 V_w の経時変化 $V_w(t)$ を 4 月 17 日から 4 月 20 日の間で示す。

$R_g(t)$ の波形は正弦曲線的で変動が小さく、気候は安定していることが判る。 $R_g(t)$ の最大値 R_{gmax} は 4 月でも約 1000 W/m^2 もあり、同月の福井の晴天時の R_{gmax} 約 700 W/m^2 と比べると 23 % 大きく、U.A.E. の日射はかなり強烈である。 $L_d(t)$ は 400 W/m^2 前後で変動は小さい。風速 V_w の日変化は概ね決まっており、風は午前 6 時頃まではほとんど吹かないが、それ以降になると吹き始め、午後 8 時頃に収まる。ただし、この 3 日間の風速は地上 1.5 m の高さでは約 4 m/s まで上昇しており、比較的強い風が吹いている。試験地における日中の風向は北から南が一般的である。なお 3 月 26 日以降、当地での 1 mm 以上の降雨は無い。

3.3 地上および土壌内の温度・湿度の経時変化

Fig.3 は高さ毎 ($z = 0.02 \text{ m}$, 0.1 m , 0.4 m , 1.0 m) の地上温度および湿度の時系列を、Fig.4 は深さ毎 ($z = -0.02 \text{ m}$, -0.05 m , -0.1 m , -0.4 m , -0.8 m) の土壌内の温度および湿度の時系列を、4 月 27 日から 4 月 30 日についてそれぞれ示したものである。

Fig.3 より、地上の温度および湿度とも高さの違いによる位相の差違がほとんど観られない。ただし、日中は地面からの輻射の影響により、地表に近くなるほど気温が高くなる傾向が観られる。地表付近 ($z = 0.02 \text{ m}$) の最高気温は正午頃に現れ、 45°C 以上に達する。最低気温はどの高さでも午前 6 時頃に現れ、 20°C 前後になる。一方、湿度はどの高さでも正午頃に最低となり、その値はおおよそ 20 % である。また、最高湿度は高さに関係なく午前 6 時頃に現れ、90 % 前後に達する。

次に、土壌内の温度と湿度に注目する。Fig.4 (a) を見ると土壌内温度も気温と同様に日周期的に変化するが、深さに比例して位相遅れが生じ、地表面下 0.4 m ($z = -0.4$ m) 以深では時間的にほとんど変化しなくなる。地表付近 ($z = -0.02$ m) の温度は午後1時頃に最大となり、約 60 °C にもなる。また、Fig.4 (b) から地表面下 0.05 m 以浅の土壌内湿度は土壌内温度とは逆位相的に変化し、最大湿度についても深さ方向に位相遅れが観られる。しかし、地表面下 0.1 m 以深の湿度は常に 100 % である。

Fig.5 および Fig.6 に、4 月 28 日の地上 1 m から地下 1 m にわたる温度および湿度鉛直分布の経時変化をそれぞれ示す。地上の温度および湿度は共に $z = 0.05$ m 以上では常に鉛直方向にほぼ一定であり、境界層は極めて薄いと思われる。土壌内の温度分布の経時変化に注目すると、温度の鉛直勾配の絶対値は常に、地表面下 0.1 m 付近を境としてその上下で大きく変化する。一方、土壌内湿度は上述したように地表面下 0.1 m 以深では常に 100 % であり、0.05 m 以浅では地表に向かうにつれて大気湿度に漸近するような分布を示す。これらの経時変化特性は、筆者らが行った日周期的な気象変化を受ける砂層の蒸発実験^{9), 10)} より得られたそれと類似しており、室内実験の結果⁹⁾ を考慮すると、試験地土壌の界面(乾燥層と不飽和層の境界)は地表面下 0.1 m 付近に位置すると考えられる。このことは、同時に行った土壌断面の目視観測により得られた界面の位置と一致する。

3.4 水蒸気密度分布

Fig.7 に、4 月 28 日の地上 1 m から地下 1 m にわたる水蒸気密度 ρ_v の鉛直分布の経時変化を示す。地上の ρ_v は高さに関係なく常にほぼ一定であり、温度および湿度と同様に境界層は極めて薄いと思われる。一日で観ると ρ_v は午前 6 時頃から午後 6 時頃にかけて減少し、午後 6 時頃から午前 6 時頃にかけて増大する。

次に、土壌内の ρ_v に注目する。正午から午後 6 時まで、界面 ($z = -0.1$ m) 付近の ρ_v が最大になるような分布が生じる。このような ρ_v の変化特性も、上述の室内実験で得られた結果と類似する。また、界面付近より上方では ρ_v 勾配は常に負であり、その絶対値は夜間に比べて日中の方が大きく、午後 3 時頃に最大となる。このことより、土壌からの蒸発は夜間においても生じていること、および蒸発量は午後 3 時頃に最大になることが推察される。

3.5 灌水-蒸発-乾燥実験結果

4月18日午前10時50分から 2 分 50 秒間の地下水灌水(灌水量 5.7 l/m²、水温 28 °C)を行なった。ここでは、灌水後の土壌水分の蒸

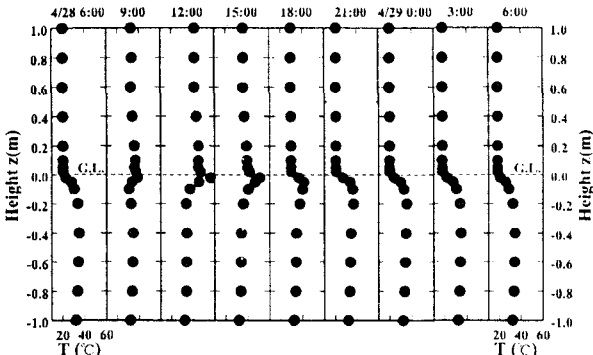


Fig.5 地上および土壌内温度の鉛直分布経時変化

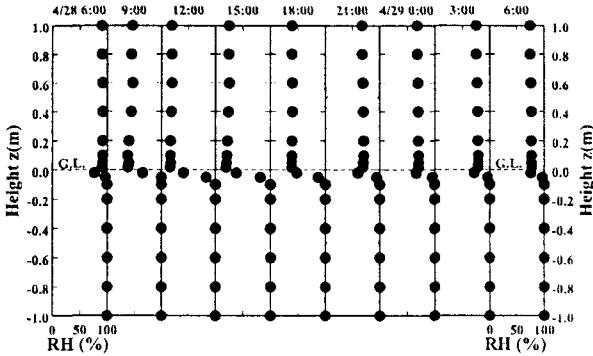


Fig.6 地上および土壌内湿度の鉛直分布経時変化

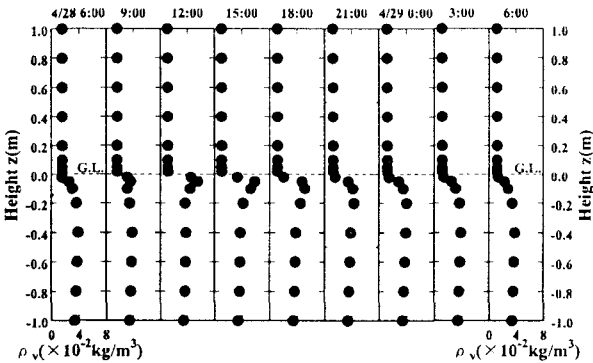


Fig.7 地上および土壌内水蒸気密度の鉛直分布経時変化

発・乾燥および浸透過程について報告する。その結果を Fig.8 ～ Fig.10 に示す。

Fig.8 は土壌内温度の経時変化である。地表付近 ($z = -0.02 \text{ m}$) の温度に注目すると、同日以外の地表付近温度の変化との比較から明かなように、通常は上昇を続けるはずの温度が、灌水後の午前 11 時 30 分に灌水の顕熱効果により約 38°C に低下している (前日、同時刻の温度は約 50°C)。その後、地表付近温度は午後 12 時 30 分には再び上昇に転ずるものの最高値は約 46°C に留まり、前日 (4 月 17 日) と比べて最高値は約 7°C 低いことが知れる。ただし、翌日になると温度の挙動は通常の状態に戻る。

一方、Fig.9 の地表付近 ($z = -0.02 \text{ m}$) の土壌内の湿度を観ると、通常午前中において低下を続けるはずの地表付近湿度は、灌水前の約 61 % から灌水後の午前 11 時 30 分には約 86 % に上昇することが判る。その後、湿度は温度の上昇とともにわずかに低下するが (午後 2 時頃)、温度の低下とともに再び上昇する (午後 5 時頃)。翌日 (19 日) の地表付近湿度は前日の灌水の残留のために最高値が 100 % となり (午前 6 時頃)、日中の最低値は灌水直後とほぼ同じ約 57 % になる。4 月 20 日に至って、地表付近湿度の最低値は 16 日 (灌水前) のそれとほぼ同じになることから、土壌内温度に比べて土壌内湿度は灌水の影響を長時間受けることが判る。ただし、この後も地表付近湿度が 4 月 24 日まで全体的に低下を続けるのは、土壌内温度が気温上昇によって Fig.8 のように 24 日まで漸次上昇し、それに伴って土壌内の湿度が低下したためである。

Fig.10 に土壌内の水蒸気密度 ρ_v の経時変化を示す。灌水後の地表付近 ($z = -0.02 \text{ m}$) の ρ_v の最高値は前日のそれと比べて大きくなる。この現象は 4 月 19 日にも生じるが、20 日には灌水前のそれに戻る。しかし、最低値だけを観ると灌水の前後で大きな差はない。また灌水による地表付近の ρ_v 最高値の増大は、 $z = -0.05 \text{ m}$ までは明確であるが、 $z = -0.1 \text{ m}$ になると不明瞭となる。灌水後の $z = -0.05 \text{ m}$ の ρ_v 最高値は 4 月 21 日まで増大し、その後一定となる。さらに、 $z = -0.1 \text{ m}$ の ρ_v 最高値はそれよりも 3 日遅れの 4 月 24 日まで増大し、その後一定となる。以上より、灌水後の地表付近の土壌は、水分の蒸発あるいは下方移動により約 2 日後に元の気乾状態に戻ること、および灌水後の土壌水分の下方移動はゆっくりとした速度で進行することが知れる。

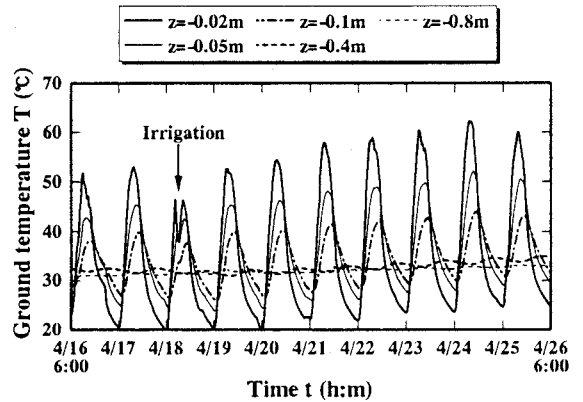


Fig.8 土壌内温度の経時変化

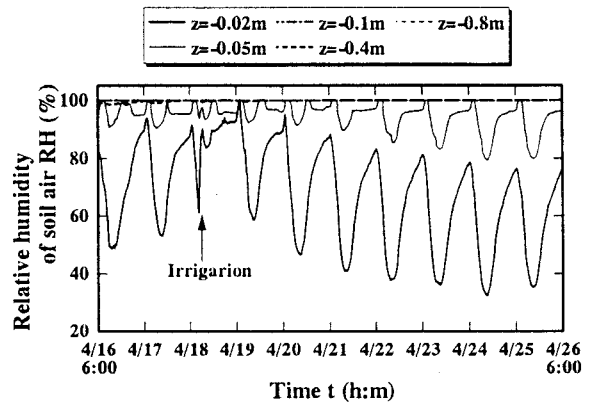


Fig.9 土壌内湿度の経時変化

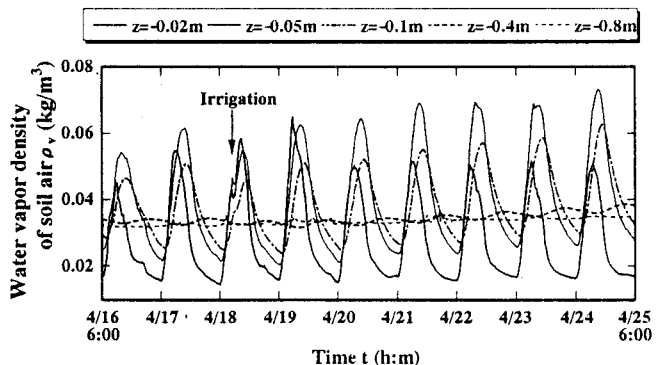


Fig.10 土壌内水蒸気密度の経時変化

4. おわりに

本論文は、乾燥地における節水灌漑のための土壌熱・水分収支モデルの構築と乾燥地緑化を目的として、アラブ首長国連邦 (U.A.E.) 農漁業省北部農業実験場にて行っている気象観測および土壌中の熱・水分計測結果の一部を紹介し、結果について考察を加えた。以下に、結論を列挙する。

- (1) 現地気象観測により、U.A.E. の春季の気象の概要が明らかとなった。4 月においても当地では日本に比べて日射が強く、日中はかなり高温かつ乾燥した気象である。
- (2) 土壌内温度の鉛直分布の経時変化より、温度の鉛直勾配の絶対値は常に、界面付近を境としてその上下で大きく変化する。
- (3) 土壌内の湿度は常に、界面より下方では 100 % で一定であり、界面より上方では地表に向かうにつれて地上の湿度に近づくような分布を示す。
- (4) 土壌内の水蒸気密度の鉛直分布は日中、界面付近の水蒸気密度が最大になるような分布を示す。また界面より上方の水蒸気密度勾配は常に負となり、その絶対値は夜間に比べて日中の方が大きくなる。
- (5) (2) ~ (4) の結果は、日周期的に気象条件を変化させた筆者らの室内蒸発実験の結果と類似する。このことより、乾燥地土壌中の熱・水分移動特性は、室内実験より得られた砂層中の熱・水分移動特性と類似する部分が多いと思われる。
- (6) 土壌温度・湿度センサーは、乾燥地における灌水後の水分移動および乾燥過程のモニタリングに利用できると考えられる。

今後、灌水に伴う土壌の温度・湿度の深さ方向変化を詳細に検討し、土壌水分データとともに後日報告する。

最後に、本研究の遂行に終始ご尽力を頂いているアラブ首長国連邦農漁業省次官補のムタワ氏、農漁業省北部地域総括責任者のアブドラ・ファルファーン氏、北部農業試験場長のマンスール氏および (株) アサヒテクノス、ウラセ (株)、酒清織物 (株) の各社に謝意を表する。また、現地観測について鳥取大学乾燥地研究センターの飯山太一氏のご協力を得た。記して謝意を表します。また、本研究は (財) 住友財団の補助を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 真木太一・杜明遠・潘伯榮・上村賢治：中国北西部の乾燥地トルファンにおける砂漠・オアシス気候と蒸発散特性、農業気象、50, 3・4, 185-195, 1994.
- 2) Tsukamoto, O., Sahashi, K. and Wang, J.: Heat budget and evapotranspiration at an oasis surface surrounded by desert, J. Met. Soc. Japan, 73, 5, 925-935, 1995.
- 3) 近藤純正・徐健青：中国の乾燥・半乾燥域の裸地面熱収支の計算 (1) 気候と土壌パラメータと計算方法、水文・水資源学会誌、9, 2, 162-174, 1996.
- 4) 森征洋・光田寧：容量型湿度計の特性について、京都大学防災研究所年報、31, B-1, 183-191, 1988.
- 5) 嶋田純・川村隆一・谷口真人・辻村真貴：ヒートプローブ式土壌水分計による圃場内土壌水分変化の計測、筑波大学水理実験センター報告、16, 45-53, 1992.
- 6) USSR Science Academy and Geodetic & Topographic-Map Agency of USSR: Physic-Geographic Atlas Map, 122-123, 1964 (in Russia).
- 7) Gass, I. G.: オフィオライト、別冊サイエンス、No.60, 80-91, 1983.
- 8) 都城秋穂 編：世界の地質、地球科学、No. 16, 80-83, 1979, 岩波書店.
- 9) 福原輝幸・高野保英・佐藤邦明：日周期的な気温変化に伴う砂層カラムからの蒸発特性、水工学論文集、38, 119-124, 1994.
- 10) 高野保英、福原輝幸：日周期的な放射変化過程における砂層と大気間の水蒸気移動、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集、II-37, 74-75, 1995.