

密閉式チャンバー法を用いた夜間の水蒸気フラックスの測定

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者名	中野, 智子 根本, 学 篠田, 雅人
発行元	養賢堂
巻/号	63巻2号
巻号補足	
掲載ページ	p. 103-107
発行年月	2007年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



密閉式チャンバー法を用いた夜間の水蒸気フラックスの測定

中野智子 *・根本 学 **・篠田雅人 ***

(* 首都大学東京都市環境学部
** 東京都立大学大学院理学研究科
*** 鳥取大学乾燥地研究センター)

Measurements of Nighttime Water Vapor Flux Using a Closed Chamber Technique

Tomoko NAKANO*, Manabu NEMOTO**, and Masato SHINODA***

(* Faculty of urban environmental sciences, Tokyo Metropolitan University
** Graduate school of Science, Tokyo Metropolitan University
*** Arid Land Research Center, Tottori University)

Abstract

Nighttime water vapor transportation from the atmosphere to the ground surface, which involves dew formation and water vapor adsorption to the soil, is very small, yet its contribution to the water budget has been recognized as important, especially in arid and semiarid regions. We applied a closed-chamber (CC) technique to measure nighttime water vapor flux between the atmosphere and a grassland ecosystem and used a microlysimeter (ML) method to validate the results of the CC measurements. The CC measurements were conducted on nine nights in May, July, and September of 2005 and June of 2006 at a Mongolian semiarid grassland. The results of our study indicate that water vapor was transported upward during five nights and downward during four nights, and the magnitude of nighttime water vapor fluxes ranged between -0.011 mm h^{-1} and 0.011 mm h^{-1} (a positive value represents upward transportation). We also found that downward vapor transportations were involved in both dew formation and direct water vapor adsorption. The results of the CC and ML methods showed good agreement, suggesting that the CC method is appropriate for measuring small water vapor fluxes.

Keywords: Dew formation, Evaporation, Nighttime water vapor flux, Semiarid region, Water vapor adsorption

キーワード：結露，蒸発，水蒸気の吸着，半乾燥地，夜間水蒸気フラックス

1. はじめに

夜間に放射冷却などで地表面が冷やされ露点以下になった場合，湿潤な大気から地表面へ水蒸気が凝結する現象が見られ，「結露」として知られている。一方，地表面の温度が露点より高い時でも，土壌粒子への物理的な「吸着」によって大気から地表面へ水蒸気が輸送されうること報告されている (Kosmas *et al.*, 2001; Agam and Berliner, 2004)。結露や吸着による水蒸気の輸送量はごくわずかであるが，降水の少ない乾燥・半乾燥地におい

ては，動植物に対する水分供給に重要な役割を果たしていることが報告され (Jacobs *et al.*, 1999)，また地表面における水・エネルギー収支に影響を与える可能性 (Agam *et al.*, 2004; Jacobs *et al.*, 2006) やリモートセンシングのパラメータに影響する可能性 (Ridley *et al.*, 1996) も指摘されている。したがって，こうした夜間の水蒸気輸送を定量的に把握することは，半乾燥地の熱・水収支や植生活動との相互作用をより正確に理解する上で重要である。

夜間の結露フラックスを測定する方法は Agam and Berliner (2006) にまとめられており，大きく二つに分け

2006年10月31日 受付，2007年1月12日 受理

られる。一つは人工的な板を地表上に設置し、その重量変化を連続的に測定することで凝結した水蒸気量を見積もる方法であり (Zangvil, 1996), もう一つは蒸発量の測定に広く用いられているマイクロライシメータ法を夜間に適用する方法である (Ninari and Berliner, 2002)。前者は凝結板の熱的性質が土壌とは異なっている点および水蒸気の吸着が測定できない点が問題として指摘されており、後者は数十 kg の重量を 0.1 g の精度で測定するため、測定の困難さが指摘されている。また近年は、渦相関法を用いて夜間結露量を測定した研究も報告されている (Jacobs *et al.*, 2000) が、広く一般的な観測地が必要であることや夜間のフラックスは微少であり誤差と同程度になってしまうことなど未だ解決すべき点は多い。そこで本研究では、主に微量ガスフラックスの測定に用いられる密閉式チャンバー法を用いて、モンゴル半乾燥地域における水蒸気フラックス観測を行い、夜間に大気と地表との間で交換される水蒸気量の測定を試みた。密閉式チャンバー法は測定が簡便である上、狭い場所でもフラックス測定ができ、野外実験や攪乱を受けた場所での測定などに有用である。密閉式チャンバー法による水蒸気フラックスの測定はいくつか報告されており (Steduto *et al.*, 2002; Heijmans *et al.*, 2004 など), ある程度確立した手法であるが、これまでは主に昼間の蒸発散に注目した研究が行われており、夜間の微少な水蒸気フラックスを観測した例がほとんど報告されていない。したがって本研究ではマイクロライシメータ法も併用し、チャンバー法の測定結果を検証した。

2. 方 法

現地観測はモンゴル国ウランバートルの南西 130 km に位置するバヤンウングル村近郊の草原 (lat 47° 02.6' N, long 105° 57.1' E, 1200 m asl) において行った。観測地は半乾燥地域に位置し、年平均気温は 0.0℃、年降水量は 166.1 mm (いずれも 1995 ~ 2005 年の平均値) である。土壌は粗粒質であり、カスタノゼムに分類される。草原を構成する植生はイネ科草本 (*Agropyron cristatum*, *Cleistogenes squarrosa*, *Stipa krylovii*), 低灌木 (*Caragana spp.*) などであるが、植被率は夏季においても約 20% と小さく、裸地と植物がパッチ状に分布する疎らな草原である。この草原において、2005 年 5 月中旬・7 月下旬・9 月中旬および 2006 年 6 月下旬の 4 回にわたり観測を実施した。各観測期間は約 1 週間であるが、測定は各期間中 2 ~ 3 夜における現地時刻 1:00 から 3:00 の間に行った。

水蒸気フラックスの測定は、観測を行った全期間を通して密閉式チャンバー法を用いて行った。用いたチャンバー

は透明なアクリル製の一辺 40 cm の立方体であり、内部には底面から 35 cm の高さに温湿度センサー (1400-104, LI-COR Inc.), 空気を攪拌するためのファンが取り付けられている。このため、チャンバー内では風速 0.2 ~ 0.6 m s⁻¹ 相当の空気の動きが生じている。同じ地点で繰り返し測定を行うこと、また観測点の攪乱を最小限にすることを目的として、各観測期間の初日に、草本植生を含む 4 地点および裸地 2 地点の計 6 地点にステンレス製の台座を設置した。台座下部のステンレス板を深さ 4 ~ 5 cm まで地中に差し込み、期間中は据え置いたままとした。台座の上部にはゴムパッキングを敷いた溝があり、測定時にはそこにチャンバーを置くことで密閉した。チャンバー内の空気は、ポリエチレンチューブを通して約 1 dm³min⁻¹ の流量で赤外線 CO₂/H₂O 濃度分析器 (LI-7000, LI-COR Inc.) へ吸引され、連続的に濃度測定を行い、再びチャンバーへと戻されている。測定時間 (チャンバー密閉時間) は 3 分間であり、その間のチャンバー内の H₂O 濃度変化を 15 秒間隔でデータロガー (LI-1400, LI-COR Inc.) に記録した。チャンバー密閉時の H₂O 濃度変化は指数関数的であったため、濃度変化を指数関数でフィッティングし、その係数から水蒸気フラックスを算出した (Nakano *et al.*, 2004)。測定は各夜、各地点において 1 回ずつ行った。フラックスの符号は、正が地表から大気へと移動する方向を示す。なお、測定に用いたアクリルならびにポリエチレンの吸湿率はほぼゼロであり (Society of Polymer Science, Japan, 2005), チャンバーおよびチューブへの水蒸気の吸着による誤差は生じないと考えられる。

2006 年 6 月にはマイクロライシメータ法を併用して水蒸気フラックスの測定を行った。測定前日の日没時に円筒形の容器 (直径 16 cm, 深さ 6 cm) に土壌を詰めて、チャンバーによるフラックス測定地点の近傍 1 地点に置き、その重量を精密電子天びん (HG II-2000, 新光電子株式会社) を用いて日の出まで 2 ~ 3 時間間隔で測定し、重量の時間変化から水蒸気交換量を算出した。円筒容器の側部は熱の流入を防ぐために断熱材で覆った。

水蒸気フラックス測定と併せて、微気象要素の観測を行った。測定項目は地上高 1.5 m の気温・相対湿度 (HMP45A, Vaisala), 風速 (010C, Met One Instruments Inc.), 降水量 (52203, Young Co.), 上下方向の短波・長波放射量 (CNR1, Kipp & Zonen), 気圧 (PTB210, Vaisala) である。これらの要素は 1 秒ごとに測定を行い、30 分平均値をデータロガー (CR23X, Campbell Scientific Inc.) に記録した。気温・相対湿度・気圧の計測値から水蒸気圧と露点温度を、また上向き長波放射量から地表面温度を算出した。また誘電性土壌水分センサー (EC-10 (2005 年), EC-5 (2006 年), Decagon Devices Inc.) を用いて、

深さ3 cmの体積含水率を5分間隔でデータロガー(Em5, Decagon Devices Inc.)に記録した。

3. 結 果

3.1. 密閉式チャンバー法による測定結果

密閉式チャンバー法による水蒸気フラックスの測定は前述の4期間において合計9夜に実施した。植生を含む4地点及び裸地2地点のそれぞれの平均水蒸気フラックスをFig. 1に示す。正の値が上向き輸送(蒸発)を、負の値が下向き輸送(結露・吸着)を示している。測定を行った中では、2005年5月10日、7月28日、7月31日、ならびに2006年6月27日の4夜に水蒸気の下向き輸送が観測され、残りの5夜については上向き輸送が観測された。フラックスの大きさは、上向き輸送が0.00092 mm h⁻¹から0.011 mm h⁻¹、下向き輸送が-0.00064 mm h⁻¹から-0.011 mm h⁻¹の範囲を変動した。植生を含む地点と裸地地点とを比べてみると、同じ夜間には同じ

水蒸気輸送の方向を示し、フラックスの大きさには有意な差が見られなかった。

また水蒸気の下向き輸送が結露であるのかどうかを検討するために、Fig. 1に気象データから算出した地表面温度と露点温度との差(地表面温度-露点温度)を併せて示した。下向き輸送が生じた4夜のうち、1夜(2005年7月31日)のみは地表面温度がほぼ露点温度まで低下しており結露であったと考えられるが、残りの3夜は地表面温度が露点温度よりも高く、土壌粒子への吸着が起こっていたと推察される。

水蒸気フラックス測定を行った際の気象条件をTable 1に示す。測定時の気温は-4.4℃から18.9℃、相対湿度の値は28.4%から91.2%の範囲であった。2005年5月10日、7月28日の風速が5 m s⁻¹以上の大きな値となっているが、その他の夜間は1 m s⁻¹程度であった。また2006年6月30日は測定前の29日22:00~23:30に1.6 mmの降雨があったが、他の観測日については測定前24時間は無降水であった。3 cm深の土壌水分量は非常に低く、降雨のない期間は2%程度、降雨の直後(2006年6月30日)でも4.4%であった。

3.2. マイクロライシメータ法による測定結果

2006年6月にはマイクロライシメータ法も併用して、水蒸気フラックスの測定を行った。この時期の日没は凡そ22:00、日の出は6:00である。チャンバー法による観測を行った6月27日、30日ともに前日の日没時(22:00)にマイクロライシメータを設置した。26-27日はこの時間を0として、また29-30日は設置後に降雨があったため降雨後の0:00を0として、ライシメータの重量の時間変化を水蒸気輸送量の変化に換算して図示した(Fig. 2, 正が上向き輸送を表す)。26-27日は夜間を通して水蒸気の下向き輸送が、29-30日の夜間は降雨後の0:00以降、水蒸気の上向き輸送が観測された。また、チャンバー法によるフラックス測定を行った1:30~3:00の輸送速度は27日が-0.0035 mm h⁻¹、30日が0.0061 mm h⁻¹であっ

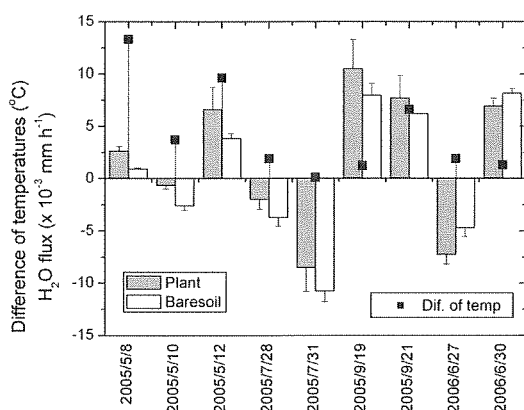


Fig. 1. Nighttime water vapor fluxes (bars) and the differences between ground surface temperature and dew point temperature (solid squares). Error bars indicate standard deviations.

Table 1. Specifications of the meteorological and soil conditions at the time of the flux measurements.

	2005							2006	
	05/08	05/10	05/12	07/28	07/31	09/19	09/21	06/27	06/30
Air temperature (°C)	−2.7	5.3	10.3	18.9	14.3	−4.4	3.9	18.6	17.8
Relative humidity (%)	28.4	75.2	33.3	48.6	91.2	89.4	46.1	57.0	76.7
Wind speed (m s ^{−1})	2.2	5.0	1.6	6.0	1.1	0.9	1.1	1.0	0.9
Lu (W m ^{−2}) ¹⁾	293.4	338.1	355.3	405.2	385.8	290.9	314.5	397.3	394.6
Soil moisture (%) ²⁾	ND ³⁾	ND ³⁾	ND ³⁾	2.3	2.4	3.8	3.6	2.4	4.4

1) Upward longwave radiation.

2) Volumetric water content at a depth of 3 cm.

3) Not determined.

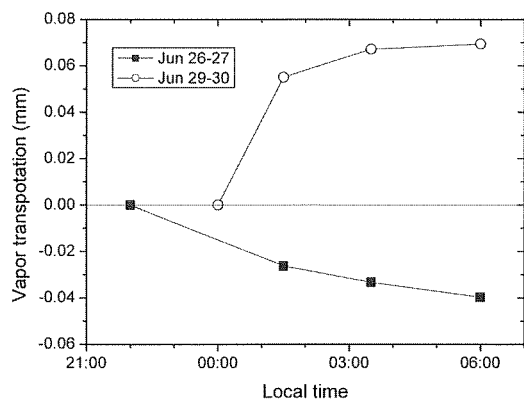


Fig. 2. Cumulative change in nighttime water vapor transportation calculated by the change in weight of microlysimeter. Positive values represent the transportation from the surface to the atmosphere.

た。この時の裸地地点におけるチャンバー法での測定結果は、 $-0.0047 \text{ mm h}^{-1}$ (27 日), 0.0081 mm h^{-1} (30 日) である。測定の時間スケールが違うこと、また空間的なばらつきがあると考えられることから厳密な比較を行うことはできないが、両者の輸送方向、およびフラックス値のオーダーが一致していることが確認できた。

4. 考察とまとめ

密閉式チャンバー法による水蒸気フラックス測定の結果、研究対象としたモンゴルの半乾燥草原では、夜間においては地表から大気へと向かう上向き水蒸気輸送とともに地表へ向かう下向きの輸送が生じており、また下向き輸送には結露と吸着の両方のプロセスが存在していることが示唆された。Agam and Berliner (2004) はイスラエルのネゲブ砂漠において土壌水分の日変化の観測を行い、下向き水蒸気輸送の大部分は吸着によってもたらされており結露の寄与は小さいと報告し、平均的な吸着フラックスの大きさとして 0.017 mm h^{-1} という結果を示している。また Kalthoff *et al.* (2006) はチリのアタカマ砂漠において2カ年にわたるボーエン比法を用いた水蒸気フラックス測定を行い、夜間の下向きフラックスを $0.01 \sim 0.1 \text{ mm d}^{-1}$ (夜間の長さを10時間と仮定すると $0.001 \sim 0.01 \text{ mm h}^{-1}$) と見積もった。本研究で得られた下向き水蒸気輸送の大きさはこれらの研究の結果と同程度であった。

密閉式チャンバーによる測定の結果は、本研究で併用したマイクロライシメータ法による結果および既存研究で報告されている結果と整合しており、密閉式チャンバー法が妥当な測定手法であることを示している。しかしながら、本研究でマイクロライシメータ法との整合性が確認できた

のは、吸着と蒸発の事例に関してであり、結露の事例は含まれていない。今後、結露に関しても同様に一致した結果が得られるかどうか検討する必要がある。密閉式チャンパー法に関しては、内部の環境が周囲の環境と異なってしまうという問題点が指摘されているが (Hutchinson and Livingston, 1993), 本研究ではチャンパー内の気温をモニタリングしており、夜間においては周囲の値とほとんど差がないことを確認した。しかし内部の放射環境および風速は明らかに周囲とは異なっていると考えられる。結露量の大きさは風速に依存することが報告されており (Kondo, 1996), チャンパー内の風速が周囲と異なることで生じる誤差や補正の方法についてさらに検討する必要がある。

今後、半乾燥地の水循環における夜間の水蒸気輸送の役割を明らかにするために、観測を継続し夜間において蒸発・吸着・結露がそれぞれどの程度の割合で、またどのような条件下で起こっているのか把握するほか、理論的な検討も併せて行っていく予定である。

謝 辞

現地調査にあたっては、モンゴル水文気象研究所の D. Erdenetsetseg 博士ならびに T. Bat-Oyun さんにご協力を頂きました。ここに記して感謝いたします。なお、本研究は文部科学省科学研究費補助金 (課題番号 16405002) の一部として行いました。

References

- Agam, N., and Berliner, P. R., 2004: Diurnal water content changes in the bare soil of a coastal desert. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 922–933.
- Agam, N., and Berliner, P. R., 2006: Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments- A review. *J. Arid Environ.*, **65**, 572–590.
- Agam, N., Berliner, P. R., Zangvil, A., and Bendor, E., 2004: Soil water evaporation during the dry season in an arid zone. *J. Geophys. Res.*, **109**, D16103, doi: 10.1029/2004JD004802.
- Heijmans, M. M. P. D., Arp, W. J., and Chapin III, F. S., 2004: Carbon dioxide and water vapour exchange from understory species in boreal forest. *Agric. For. Meteorol.*, **123**, 135–147.
- Jacobs, A. F. G., Heusinkveld, B. G., and Berkowicz, S. M., 1999: Dew deposition and drying in a desert system: a simple simulation model. *J. Arid Environ.*, **42**, 211–222.

- Jacobs, A. F. G., Heusinkveld, B. G., and Berkowicz, S. M., 2000: Dew measurements along a longitudinal sand dune transect, Negev Desert, Israel. *Int. J. Biometeor.*, **43**, 184–190.
- Jacobs, A. F. G., Heusinkveld, B. G., Wichink Kruit, R. J., and Berkowicz, S. M., 2006: Contribution of dew to the water budget of a grassland area in the Netherlands. *Water Resour. Res.*, **42**, W03415, doi:10.1029/2005WR004055.
- Kalthoff, N., Fiebig-Wittmaack, M., Meißner, C., Kohler, M., Uriarte, M., Bischoff-Gauß, I., and Gonzales, E., 2006: The energy balance, evapo-transpiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. *J. Arid Environ.*, **65**, 420–443.
- Kondo, J., 1996: Heat budget estimation of the amount of nocturnal dew. *J. Agric. Meteorol.*, **52**, 29–32. (In Japanese)
- Kosmas, C., Marathianou, M., Gerontidis, St., Detsis, V., Tsara, M., and Poesen, J., 2001: Parameters affecting water vapor adsorption by the soil under semi-arid climatic conditions. *Agric. Water Manage.*, **48**, 61–78.
- Hutchinson, G. L., and Livingston, G. P., 1993: Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. In *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change* (ed. by Harper, L. A., Mosier, A. R., Duxbury, J. M., and Rolston, D. E.). ASA Special Publication, **55**, 63–78.
- Nakano, T., Sawamoto, T., Morishita, T., Inoue, G., and Hatano, R., 2004: A comparison of regression methods for estimating soil-atmosphere diffusion gas fluxes by a closed-chamber technique. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**, 107–113.
- Ninari, N., and Berliner, P. R., 2002: The role of dew in the water and heat balance of bare loess soil in the Negev Desert: quantifying the actual dew deposition on the soil surface. *Atmos. Res.*, **64**, 323–334.
- Ridley, J., Strawbridge, F., Card, R., and Phillips, H., 1996: Radar backscatter characteristics of a desert surface. *Remote Sens. Environ.*, **57**, 63–78.
- Society of Polymer Science, Japan (ed.), 2005: *Dictionary of Polymer Science*, 3rd edition. Asakura Shoten, Tokyo, 830 pp. (高分子学会編, 2005: 高分子辞典. 朝倉書店, 東京, 830 pp.).
- Steduto, P., Çetinköku, Ö., Albrizio, R., and Kanber, R., 2002: Automated closed-system canopy chamber for continuous field-crop monitoring of CO₂ and H₂O fluxes. *Agric. For. Meteorol.*, **111**, 171–186.
- Zangvil, A., 1996: Six years of dew observations in the Negev Desert, Israel. *J. Arid Environ.*, **32**, 361–371.