

クローズドチャンバー法による地面蒸発量測定手法の検討

玉井幸治・清水貴範・飯田真一（森林総研）

壁谷直記・清水 晃（森林総研九州）

KETH Nang・SATHA Saing・CHANN Sophal (Institute of Forest-Wildlife Research and Development)

要旨： H₂O フラックスである地面蒸発量の測定にクローズドチャンバー法を用いれば、特定の林床からの蒸発量を長期間にわたって観測できるため、正確な蒸発量評価やメカニズムの解明に極めて有効である。しかし土壌気相中と大気中の水蒸気濃度の差は、CO₂ ほど大きくはないため、チャンバー内の濃度上昇に伴う土壌から大気への放出抑制が容易に生じると予想される。そこで本研究では、H₂O フラックスに即したチャンバーの閉鎖時間、測定時間や、フラックスの算出手法について、森林総合研究所構内の空地における観測をもとに検討を行った。地面蒸発量の計算に用いる水蒸気濃度データを、線形回帰の場合にはチャンバーを伏せてから 4 秒間の値を、非線形回帰の場合には 0 秒、150 秒、300 秒の値を用いた場合に、蒸発量をもっとも良く算出できると判断された。その結果をカンボジア常緑林と落葉林に、雨季の期間に適用した。その結果、線形回帰による計算値は概ね蒸発量を算出したが、非線形回帰による値は過大となる傾向があった。非線形回帰の場合、計算に用いるのに適したデータの収集時間が異なるものと考えられた。

キーワード： 水蒸気濃度増加速度、線形回帰、非線形回帰、つくば、カンボジア

Abstract: The measurement the H₂O efflux from the soil surface with the closed chamber method is very useful to monitor the efflux in more accurate and understanding the transpiration mechanism. However, the diffusion of vapor from the soil to the air is thought to be suppressed by the accumulated vapor in the chamber much more easier, because the difference of vapor density is much smaller than CO₂ between in the soil porosity and the air. The adequate measuring technique, such as chamber close time length and vapor density measuring time is decided by the experiment in FFPRI site. The adequate measuring time of vapor density in the chamber is judged to be until 4 seconds in liner regression calculation and 0 second, 150 seconds and 300 seconds in nonlinear regression calculation. This judged adequate measuring time is adapted to the experiment data in dry evergreen and dry deciduous forests in Cambodia in rainy season. The linear regression calculation produce the transpiration rates agreed well with the observation rates. However, the rates calculated with nonlinear are in tend to be larger than the observation rates. The adequate measuring time is thought to be later for the measurement in Cambodia in rainy season.

Key words: Increase speed of vapor density, liner regression, non-liner regression, Tsukuba, Cambodia

I はじめに

森林土壌から大気へと放出される CH₄、N₂O や CO₂ などのフラックス観測に、クローズドチャンバー法が広く用いられている(3)。クローズドチャンバー法は、チャンバーと呼ばれる容器を地面に伏せ、チャンバー内における対象物質の濃度が増加する速度から、フラックスを算出する方法である。従来、チャンバー内大気を 3 回程度サンプリングし、その濃度変化とサンプリング時間から、フラックスを非線形回帰によって算出してきた。それに

対し近年、土壌呼吸の測定においては CO₂ センサーの小形化、省電力化によりチャンバー内の CO₂ 濃度を秒間隔で測定し、その増加速度を線形回帰することによってフラックスを算出するようになった(1, 2)。

地面蒸発は、土壌から大気へと放出される H₂O フラックスに相当し、マイクロライシメータの重量減少量を測定する秤量法によって測定されてきた(4)。しかしこの方法では、数日間使用したマイクロライシメータ内の土壌は乾燥するため、同一サンプルからの蒸発量を長期間に

Koji TAMAI, Takanori SHIMIZU, Shin'ichi IIDA (Forestry and Forest Products Research Institute, FFPRI, Ibaraki 305-8687, Japan), Naoki KABEYA, Akira SHIMIZU (Kyushu Research Center, FFPRI, 860-0862 Kumamoto, Japan), KETH Nang, SATHA Saing, CHANN Sophal (Institute of Forest-Wildlife Research and Development, Phnom Penh, Cambodia) Trial of the estimation of H₂O flux from the forest floor with the closed chamber method.

わたって観測することができない欠点がある。それに対してクローズドチャンバー法においては、温湿度センサーの小型化、ロガーの小型化、省力化によりチャンバー内の水蒸気濃度測定も容易に行われるようになっている。そのため本研究では、クローズドチャンバー法による地面蒸発量の測定手法を検討する。クローズドチャンバー法を用いれば、特定の林床からの蒸発量を長期間にわたって観測できるため、正確な蒸発量評価やメカニズムの解明に極めて有効である。しかしチャンバーの閉鎖時間や測定時間などは、物質によって様ではなく、H₂Oフラックスに即したチャンバーの閉鎖時間や測定時間を検討する必要がある。特に土壤気相中と大気中の水蒸気濃度の差は、CO₂ほど大きくはないため、チャンバー内の濃度上昇に伴う土壤から大気への放出抑制が容易に生じると予想される。そこで、H₂Oフラックスに即したチャンバーの閉鎖時間、測定時間や、フラックスの算出手法について検討した。

II 観測と計算方法

1. 地面蒸発量の観測方法

直径10cm、深さ10cmのマイクロライシメータを作成し、観測を行う林床に設置する。この重量減少量を電子天秤で測定する秤量法によって、地面蒸発量観測値(F_{obs})を得る。ここで、電子天秤の分解能は0.01gである。このマイクロライシメータに高さ13.5cmのチャンバーを装着することにより、地面蒸発量計算値(F_{cal})を得るための水蒸気濃度(gH₂O m³)変化を測定する。チャンバーは透明アクリル製で、チャンバー内に温湿度センサー(9680-50、ウイジン社製)を装備している。

測定は、毎時0分、25分、35分にマイクロライシメータの秤量を行い、0~25分と35~0分間の F_{obs} を測定した。また、25~35分のうちの5分間にチャンバーを装着し、チャンバー内の気温、相対湿度の変動を測定し、水蒸気濃度の変動を算出した。測定間隔は、2秒であった。この一連の観測によって得られる2つの F_{obs} 値のうち、大きな値を F_{obs_L} 、小さな値を F_{obs_S} とする。

2. 地面蒸発量の計算方法

チャンバー内の水蒸気濃度(c : gH₂O m³)データから F_{cal} を計算する方法に、(1)式による線形回帰と(2)式による非線形回帰の2つの方法を検討する。

$$F_{cal} = \rho \frac{V \Delta c}{A \Delta t} \frac{273}{273 + T_a} \quad (1)$$

ここで、 V : チャンバーの容積 (m³)、 A : チャンバー

の断面積 (m²)、 $\frac{\Delta c}{\Delta t}$: 水蒸気濃度変化 (gH₂O m³s⁻¹)、 T_a : 気温 (°C)

$$F_{cal} = \frac{V}{A} \frac{(C_1 - C_0)^2}{t_2(2C_1 - C_2 - C_0)} \ln \left(\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} \right) \frac{273}{273 + T_a} \quad (2)$$

ここで t_2 : 濃度データサンプリング間隔(s)、 C_0 、 C_1 、 C_2 : それぞれチャンバーを伏せてから、0秒後、 t_2 秒後、 $2 \times t_2$ 秒後にサンプリングした水蒸気濃度のデータ値 (gH₂O m³)。

(1)式は、(3)式のように変形できる。

$$\rho \frac{V}{A} \frac{273}{273 + T_a} \Delta c = F_{cal} \Delta t \quad (3)$$

ここで、チャンバーを伏せてからの測定時間を(1)式について t_1 、(2)式について t_2 と表記する。

(3)式において、チャンバーを伏せてからの左辺の値の経過をプロットすると、プロットの直線回帰式の傾きを F_{cal} とみなせる。チャンバー内の水蒸気濃度の増加量を測定する場合、比較的短時間のうちに増加は非線形になると考えられるので、 t_1 が長くなり、線形回帰に用いるデータ数が多くなるにつれて F_{cal} も変化すると予測される。したがって F_{cal} の値と秤量法による F_{obs_L} 、 F_{obs_S} の値を比較し、適切な t_1 について検討する。

また、(2)式についても、 t_2 の値に応じて F_{cal} 値も変化すると予測される。したがって(3)式と同様に F_{cal} 値と秤量法による F_{obs_L} 、 F_{obs_S} の値を比較し、適切な t_2 値について検討する。

3. 観測の概要

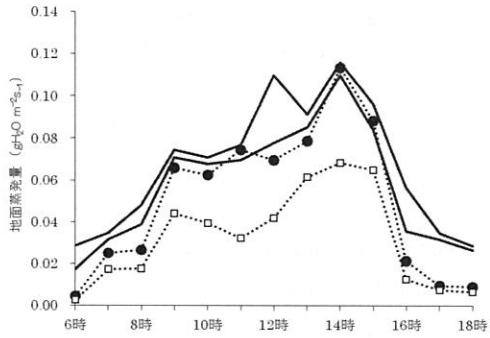
本研究では、茨城県つくば市にある森林総合研究所構内(36°0'N, 140°8'E)の空地における2010年8月16日6~18時の観測で適切な t_1 、 t_2 値の判定を行い、カンボジア国において適用観測を行った。適用観測は、雨季であるカンボジア国コンポントム州における常緑林(12°44'N, 105°28'E)で2012年6月11日、クラチエ州における落葉林(12°44'N, 106°11'E)で2012年6月12日にそれぞれ行った。ここで常緑林のLAIは約4.1、上層木の平均樹高は27.2mであり、落葉林の着葉期におけるLAIは約0.9、上層木の平均樹高は約11.3mである。

III 結果と考察

1. 森林総合研究所構内における観測

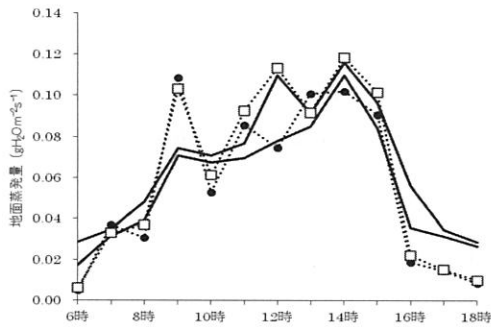
図1(a)、(b)のそれぞれに2本ずつ示された太線は同じ

もので、秤量法による F_{obs_L} と F_{obs_S} (それぞれ上下の太線) の変化である。両者の差は、12時と16時こそそれぞれ約 $0.03 \text{ g H}_2\text{O m}^{-3}\text{s}^{-1}$ 、約 $0.02 \text{ g H}_2\text{O m}^{-3}\text{s}^{-1}$ と大きかったが、それ以外では約 $0.01 \text{ g H}_2\text{O m}^{-3}\text{s}^{-1}$ 程度かそれ以下であった。



(a) Liner calculation

● : $t_1=4\text{seconds}$ 、□ : $t_1=30\text{seconds}$



(b) Nonlinear calculation

□ : $t_2=100\text{seconds}$ 、● : $t_2=150\text{seconds}$

図1 地面蒸発量実測値の F_{obs_L} (太線上)、 F_{obs_S} (太線下) と計算値

Fig. 1 Observed (F_{obs_L} ; upper thick line, F_{obs_S} ; lower thick line) and calculated transpiration rates from the soil surface.

計算に用いた測定時間 t_1 と F_{cal} の関係を、14時を例に図2に示す。図中に示した2本の太線は、14時の観測における F_{obs_L} 、 F_{obs_S} の値を示す。この2本の線の間プロットされた点を算出した t_1 、 t_2 の値が、14時の観測において適した値と判断される。直線回帰の場合、 $t_1=4$ 秒で計算された F_{cal} 値は、 F_{obs_L} と F_{obs_S} の間にあった。しかし t_1 が増加するに従って F_{cal} 値は減少していった。このことはチャンパーを伏せてから6秒後には早くも、土壌からの H_2O 放出に抑制が働き、チャンパー内における水蒸気濃度の増加が鈍化したことを示している。

非線形回帰の場合、 $t_2=20$ 秒で F_{cal} は最大となった。

F_{obs_L} と F_{obs_S} に最も近い F_{cal} は $t_2=100\sim 120$ 秒において算出された。

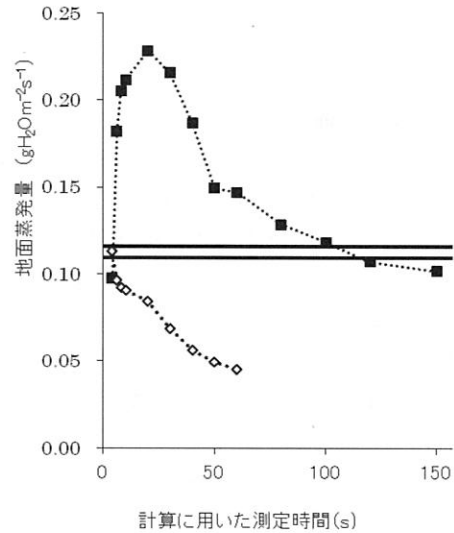


図2 計算に用いた測定時間 t_1 、 t_2 による計算値の変動 (14時の場合)

Fig.2 The fluctuation of calculated rates with t_1 and t_2 (In case of 14:00)

◇ : linear calculation、■ : nonlinear calculation

2. 適切な t_1 、 t_2 の判定

次式によって、 F_{cal} の誤差 (Error) を評価する。

$$\text{Error} = \begin{cases} F_{cal} - F_{obs_L} & (F_{obs_L} < F_{cal}) \\ 0 & (F_{obs_S} \leq F_{cal} \leq F_{obs_L}) \\ F_{cal} - F_{obs_S} & (F_{cal} < F_{obs_S}) \end{cases}$$

6~18時の13例について平均した Error の値の、 t_1 値、 t_2 値による変化を図3に示す。

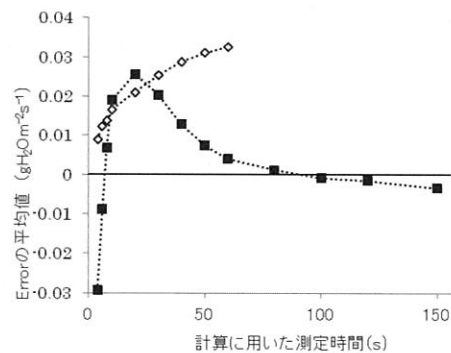


図3 計算に用いた測定時間 t_1 、 t_2 による平均誤差の変化

Fig. 3 The fluctuation of the averaged error with t_1 and t_2

◇ : Linea calculation、■ : Nonlinear calculation

直線回帰の場合、 $t_1=4$ 秒で平均 Error は最小を示し、 t_1 値の増加に伴って平均 Error は増加した。非線形回帰の場合、 $t_2=30$ 秒で平均 Error は最大となった。 $t_2=100$ 秒の範囲において、平均 Error はほぼ $0 \text{ g H}_2\text{O m}^{-3}\text{s}^{-1}$ の値を示した。

図 1(a)には、 F_{obs_L} 、 F_{obs_S} の値に合わせて、線形回帰において $t_1=4$ 秒 (●)、30 秒 (□) の時の F_{cal} を示す。平均 Error の値が最小であり、 F_{cal} が最大を示す $t_1=4$ 秒であっても、 F_{obs} の小さな 6~8 時と 16~18 時においては、 F_{cal} は大きく下回った。それ以外の 9~15 時では、 F_{cal} と F_{obs_S} はほぼ等しかった。このことから、線形回帰手法では $t_1=4$ 秒が最適と判断した。

図 1(b)には、 F_{obs_L} 、 F_{obs_S} の値に合わせて、非線形回帰において $t_2=100$ 秒 (□)、150 秒 (●) の時の F_{cal} を示す。図 3 において $t_2=100$ 秒において平均 Error 値はほぼ $0 \text{ g H}_2\text{O m}^{-3}\text{s}^{-1}$ となった。しかし図 1 (b)によると、これは 6 時と 16~18 時で、 F_{cal} が大きく F_{obs_S} を下回っているためである。それ以外の時間帯ではわずかながら F_{obs_L} を上回っていることが多い。

7~15 時に限定すれば、 $t_2=150$ 秒の時の値の方が F_{obs} を上回ったり、下回ったりしており、 $t_2=100$ 秒の時の値よりも F_{obs} の再現性は高い。 $t_2=120$ 秒とした場合も、 $t_2=100$ 秒とほぼ同様であった。一方で、 F_{cal} が大きく F_{obs_S} を下回っている 6 時と 16~18 時については、 $t_2=100$ 秒の時の値と $t_2=150$ 秒の時の値は、同程度である。そのため非線形回帰手法では、 $t_2=150$ 秒が最適であると判断した。

3. カンボジア常緑林、落葉林への適用

図 4 に、カンボジア常緑林と落葉林での観測における F_{obs_L} と F_{obs_S} (太線)、 $t_1=4$ 秒の線形回帰による F_{cal} (●)、 $t_2=150$ 秒の非線形回帰による F_{cal} (□) を示す。 $t_1=4$ 秒の線形回帰による F_{cal} は、 F_{obs} を比較的良好に再現している。それに対し $t_2=150$ 秒の非線形回帰による F_{cal} は、全体に F_{obs} を大きく上回ることが多かった。 $t_2=20$ 秒以上の範囲では t_2 が大きくなるにつれ、 F_{cal} が小さくなる傾向が認められる (図 2)。森林総合研究所構内での観測では、 $t_2=150$ 秒が最適と判断したが、雨季のカンボジアでは最適な t_2 値はもっと大きいのかも知れない。この点も含め、さらに日本国内の林床やカンボジア乾季など、観測事例を増やす必要がある。

IV まとめ

クローズドチャンバー法による地面蒸発量の測定手法について、森林総合研究所構内の空地における観測を

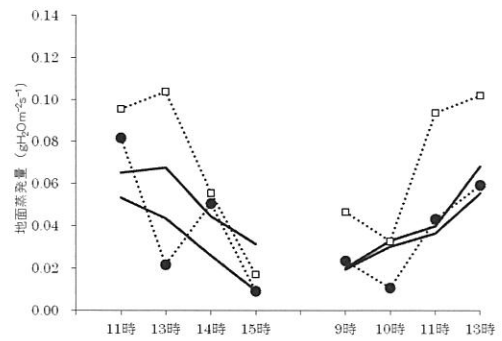


図 4 カンボジア常緑林 (左: 11~15 時) と落葉林 (右: 9~13 時) における地面蒸発の観測値と計算値

Fig. 4 The observed and calculated rates of the transpiration rate from the soil surface in the dry evergreen (left: 11:00-15:00) and dry deciduous forests (right: 9:00-13:00)
Solid line : Observed F_{obs_L} (upper) and F_{obs_S} (lower)
● : Linear calculation ($t_1=4$ seconds)
□ : Nonlinear calculation ($t_2=150$ seconds)

もとに検討を行った。この方法では、チャンバーを伏せた直後からのチャンバー内水蒸気濃度の増加速度から、蒸発量を計算する。計算に用いる水蒸気濃度データを、線形回帰の場合にはチャンバーを伏せてから 4 秒間の値を、非線形回帰の場合にはチャンバーを伏せてから 0 秒後、150 秒後 (t_2)、300 秒後 ($2 \times t_2$) の測定値をそれぞれ C_0 、 C_1 、 C_2 として (2) 式に代入した場合に、蒸発量をもっとも良く算出できると判断された。その結果をカンボジア常緑林と落葉林に、雨季の期間に適用した。その結果、線形回帰による計算値は概ね蒸発量を算出したが、非線形回帰による値は過大となる傾向があった。非線形回帰の場合、計算に用いるのに適したデータの収集時間が異なるものと考えられた。

引用文献

- (1) 中野智子・亀井千絵 (2001) 土造成地における土壌から CO_2 フラックスの日変化. 農業気象 57: 155-159.
- (2) Nobuhiro, T., Tamai, K., Kominami, Y., Miyama, T., Goto, Y. and Kanazawa, Y. (2003) Development of IRGA enclosed-chamber system for CO_2 efflux measurement and its application to a spatial variation measurement. J. For. Res. 8:297-301.
- (3) 阪田匡司 (1999) 地表面のガスフラックス. (森林立地調査法編集委員会編, 森林立地調査法 改訂版. 博友社, 東京) .209-211.
- (4) 玉井幸治 (1999) 地面蒸発. (森林立地調査法編集委員会編, 森林立地調査法 改訂版. 博友社, 東京) . 172-173.