J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 128, p.23～31 (2014)

論　文
Original Paper

タイ王国の水田における CH_4 フラックスの緩和渦集積（REA）法による測定

小宮秀治郎[1]・登尾浩助[2]・庄子侑希[3]・矢崎友嗣[4]・Toojinda Theerayut[5]

Measuring CH_4 flux in a rice paddy field in Thailand using relaxed eddy accumulation (REA) method

Shujiro KOMIYA[1], Kosuke NOBORIO[2], Yuki SHOJI[3], Tomotsugu YAZAKI[4] and Theerayut TOOJINDA[5]

Abstract: Rice paddy fields are a major anthropogenic source for methane (CH_4), one of the dominant greenhouse gases (GHGs). Recently, micrometeorological techniques for measuring GHG flux in a field scale have been developed. We evaluated a relaxed eddy accumulation (REA) method, a micrometeorological technique, to measure methane (CH_4) flux in a rice paddy field during a flowering stage in Thailand. CH_4 flux at the paddy water surface was also measured using the closed chambers installed where no rice plant was grown. The CH_4 fluxes with the REA and closed chamber methods ranged between 1.9 mg m^{-2} h^{-1} and 43.6 mg m^{-2} h^{-1}, agreed well with those previously reported in Southeast Asia. The exchange rates of CH_4 between the atmosphere and the rice canopy tended to get higher during the daytime, and seemed to be regulated by the diurnal variations of horizontal wind speed and soil temperature. In addition, temporal changes in CH_4 fluxes at the water surface might be affected by soil temperature. The CH_4 fluxes measured with the REA method were higher than those with the closed chamber method. It appears that the REA method measured CH_4 fluxes over rice plant canopy and the water surface whereas the closed chamber method did only over the water surface.

Key Words: closed chamber method, horizontal wind speed, methane (CH_4), relaxed eddy accumulation (REA) method, rice paddy field, soil temperature

1. はじめに

コメを主食とする東南アジア諸国では，水稲栽培面積が全世界の約 31 % を占めている（Redfern et al., 2012）．その中でタイ王国は，世界 5 位の水稲栽培面積を有し，世界有数のコメの輸出国となっている（Baldwin et al., 2012）．このように，水田は主要穀物のコメを生産する重要な農地である一方，温室効果ガスであるメタンの人為起源発生量の約 29 % を占めている（IPCC, 2001）．水田からの CH_4 発生量は水稲栽培期間中に多いことが報告されている（Buendia et al., 1997）．水稲栽培期間中は湛水条件になることが多いので，土壌は還元状態となりやすい．そのため，CH_4 生成菌の活動が活発となることで，CH_4 の生成・放出が促進される．土壌中で生成された CH_4 の大気中への放出は，(1) イネの通気組織を経由した経路，(2) 田面水中に溶解した CH_4 濃度と大気中の CH_4 濃度の濃度勾配による経路，(3) CH_4 を含んだ気泡の解放による経路を通して行われる（Schütz et al., 1989; 八木, 2004）．イネの通気組織を経由した経路は水田からの全 CH_4 放出量の 48 % から 85 % を占める（Wassmann and Aulakh, 2000）．また，稲わらを多く鋤き込んだ水田では気泡の解放による CH_4 放出の割合が全 CH_4 放出量の 35 % から 62 % を占めている（Wassmann et al., 1996）．そのため，気泡解放による CH_4 放出量を測定することが必要である（Green, 2013）．水田からの CH_4 放出量は，土壌の物理化学性，圃場管理方法のみならず，刻々と変化する気象条件によっても変動する（八木, 2004）．水田圃場からの CH_4 放出量の全容を把握するためには，CH_4 フラックスを連続的に測定することが必要である（Yagi et al., 1996）．

1980 年代から世界各国において水田からの CH_4 放出量を把握するために，CH_4 フラックス測定が行われてきた（Cicerone and Shetter, 1981; Seiler et al., 1984; Yagi et al., 1990, 1996; Wassmann et al., 2000; Towprayoon et al., 2005; Xie et al., 2010）．フラックス測定には一般にチャンバー法と微気象学的方法が使われるが，タイ王国を含め，世界各国の水田における CH_4 フラックス測定ではチャンバー法が多く用いられてきた（Cicerone and Shetter, 1981; Seiler et al., 1984; Yagi et al., 1990, 1996; Wassmann et al., 2000; Towprayoon et al., 2005; Xie et al.,

[1]Graduate School of Agriculture, Meiji University, Kawasaki, Kanagawa, Japan. Corresponding author: 小宮秀治郎，明治大学大学院農学研究科
[2]School of Agriculture, Meiji University, Kawasaki, Kanagawa, Japan.
[3]Formerly Graduate School of Agriculture, Meiji University, Kawasaki, Kanagawa, Japan.
[4]Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, Japan.
[5]Rice Gene Discovery Unit, National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), Kasetsart University, Kamphaengsaen, Nakhonpathom, Thailand.
2014 年 6 月 19 日受稿　2014 年 10 月 21 日受理

Table 1 実験水田の圃場管理.
Field management for the experimental rice paddy field.

Management practice	Date
Plowing	June 26
Applying rice straws	June 26
Transplanting	July 1
Flooding	July 5
First top dressing	July 20
Second top dressing	August 19
Flowering	September 9
Drainage	September 26
Harvest	October 20

Table 2 1 回目と 2 回目の追肥の施与量.
The amount of topdressing fertilizer application in the study field.

Fertilizer	Application rate (kg ha^{-1})	
	First	Second
N	9.2	10
P_2O_5	0	7.5
K_2O	0	5

2010)．しかし，チャンバー法は測定範囲がチャンバーの底面に限定されるため，空間代表性が乏しい（Simpson et al., 1995; Miyata et al., 2000)．また，チャンバーで地表面を覆うことでチャンバー内の大気の流れや気圧を乱し，気温・日射量・ガス濃度を変化させるので，フラックス測定値が影響を受ける懸念が報告されている（Simpson et al., 1995; 平野, 2001)．

一方，微気象学的方法（傾度法，渦相関法，緩和渦集積法など）を使ったフラックス測定は，連続的な測定が出来る上に，測定対象面の環境をほとんど乱さない．さらに，得られるフラックス測定値は風上側の比較的広い面積における平均値であるので，微気象学的手法は対象地の代表値を得るのに適している（平野, 2001)．これらのことから，近年，微気象学的方法を用いて広域の水田における CH_4 フラックスを評価する研究が多くなっている（Kanemasu et al., 1995; Miyata et al., 2000; Werle and Kormann, 2001; Kim et al., 2005; 滝本ら, 2010)．

微気象学的方法を用いた CH_4 フラックス観測に関する既往の研究では，多点の高度における風速とガス濃度の測定が必要な傾度法が用いられてきた（Denmead, 1991; Miyata et al., 2000; 滝本ら, 2010)．1 つの高度での風速とガス濃度の測定のみを必要とする渦相関法は，大気中の乱流によるガス輸送量を直接測定するので，最も信頼性の高い微気象学的フラックス測定法とされている（原薗ら, 1996)．しかし，風速とガス濃度を 10 Hz 以上の高速度で測定する必要があり，応答速度の速い CH_4 濃度分析計は極めて高価であるので，渦相関法による CH_4 フラックス測定は広く普及していない（宮田・原薗, 2001)．

Businger and Oncley（1990）は，渦相関法と同様に 1 高度で測定した風速とガス濃度を使うが，高速なガス濃度分析を必要としない緩和渦集積（Relaxed Eddy Accumulation, 以下 REA と記す）法を開発した．REA 法は，鉛直風速（w）が正の時（上向きの風）と負の時（下向きの風）に応じて別々に大気を採取して一定時間貯留し，それぞれの貯留した大気試料中のガス濃度の差からフラックスを測定する方法である．Beverland et al.（1996）は，REA 法と渦相関法によって測定した湿原における CH_4 フラックスが良好に一致したと報告している．

本研究では，REA 法を用いて水稲栽培期における水田全体の CH_4 フラックスと，イネのない場所に設置したチャンバーを用いて，水面から放出される CH_4 フラックスとを測定した．イネの通気組織と水面を経由した CH_4 フラックスと環境条件の関連について考察した．

2. 実験方法

2.1 調査地と圃場管理

実験はタイ王国ナコンパトム県カンペンセン郡に位置するカセサート大学カンペンセン校キャンパス内の実験水田（14° 02’ 14” N，99° 58’ 05” E）において行なった．調査対象地は中部地帯に位置し，タイ王国の主要な稲作地帯の 1 つで（FAO, 2002)，ケッペン気候区分の熱帯サバナ気候帯に属している．実験地の南 2,900 m にある気象台における 2009 年の年平均気温，年間降雨量は，それぞれ 27.6°C，1.184 m であった（TMD, 2009)．実験地は平坦で，水田土壌の土性は埴壌土（砂: 43 %, シルト: 41 %, 粘土: 16 %）であった．

実験水田は稚苗移植の 5 日前に耕起され，耕起の際に稲わらが鋤き込まれた．湛水処理は稚苗移植後 4 日目に行われ，最終落水日まで水田の湛水深は 0.05 m から 0.1 m の範囲で維持された．実験水田の圃場管理を Table 1 に示す．水稲栽培期間中は雨季であり，実験水田にはカセサート大学イネ研究所の開発したインディカ種である Sinlek を栽培した．2009 年 7 月 2 日に 1 株あたり 1 本を 0.25 m × 0.25 m の間隔で移植した．基肥は施用せず，追肥を移植 19 日後（1 回目）と移植 49 日後（2 回目）に施用した．それぞれの追肥の内訳を Table 2 に示す．2009 年 10 月 6 日に稲刈りを行い，籾の収量は 1,565 kg ha^{-1} であった．これはタイ王国ナコンパトム県カンペンセン郡で栽培される代表的な品種である Pathum Thani 1 の平均収量 3,938 kg ha^{-1}（Siangliw, 私信）に比べて半分以下であった．これは，栽培した Sinlek 種が収量目的ではなく，高機能性米として改良された品種であるためである．

水田における CH_4 フラックスと環境条件の測定は，2009 年 9 月 5 日から 9 月 12 日にかけて行った．この期間はイネの出穂開花期にあたっており，稲丈は約 1.2 m 程度であった．

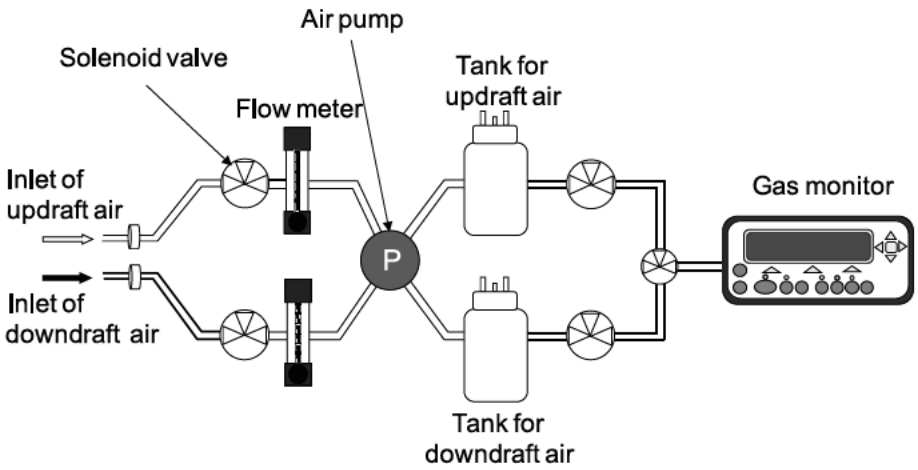


Fig. 1　REA 法による測定システムの模式図（庄子, 2009 改変図）.
Schematic diagram of an REA system (Shoji, 2009 diagram modified).

2.2 CH_4 フラックス

2.2.1 REA 法

イネの通気組織経由と田面経由を含んだ，圃場からの平均的な CH_4 フラックスを測定するために，REA 法を使用した．Fig. 1 は REA 法による測定システムの模式図である．3 成分超音波風速計（SAT540, KAIJO 社）とデータロガー（CR1000, Campbell Scientific 社）を用いて，地上 2 m の高さにおける鉛直風速 w（$m\ s^{-1}$）を 10 Hz で測定し，w の値が正の時は上向きの風に，w の値が負の時は下向きの風に分類した．w の正負に応じてデータロガー（CR1000）により電磁弁の切り替えを制御して，上向き風を検知した時には上向き風用の空気を 2 L 空気タンクに，下向き風を検知した時には下向き風用の 2 L 空気タンクに空気を貯留した．それぞれの空気タンク内に貯留した空気の CH_4 濃度は光音響ガスモニタ（1412, INNOVA 社）を用いて 20 分毎に測定して，1 時間平均値を求めた．本光音響ガスモニタの制御とデータ保存は CR1000 で行った．REA 法による CH_4 フラックス J_{REA} ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) は（1）式で算出した（McInnes and Heilman, 2005）.

$$J_{REA} = B\sigma_w(\overline{C_u} - \overline{C_d}) \times 3600 \qquad (1)$$

ここで，J_{REA} はガスフラックス（$mg\ m^{-2}\ h^{-1}$），B は実験値（$= 0.4 \sim 0.7$）（Ammann and Meixner, 2002），σ_w は鉛直方向風速の標準偏差（$m\ s^{-1}$），$\overline{C_u}$ と $\overline{C_d}$ はそれぞれ上向きと下向きのタンク内の CH_4 濃度の 1 時間の平均値（$mg\ m^{-3}$）である．

B の値は通常，渦相関法と REA 法による顕熱フラックスを比較して決定される（鰹谷ら, 2001）．既往の研究により，B は 0.56 を中心に $0.4 \sim 0.7$ の範囲で変動することが報告されている（Ammann and Meixner, 2002; McInnes and Heilman, 2005）．さらに，水田や湿地において，B の中央値は $0.55 \sim 0.57$ の範囲で変動するとされている（Tsai et al., 2012）．そのため，本研究では $B = 0.56$ とした．

実験期間中の卓越風向は西南西で，3 次元超音波風速計の測定点と空気取り込み口の西南西側の圃場はイネが栽培されており，圃場の大きさは 50 m × 50 m であった（Fig. 2）．Harazono et al.（1998）は，水田におけるフットプリント解析により，ゼロ面変位から測定高度の距離が 1.7 m，大気の安定度が中立の条件では，風上側 50 m 以内の範囲が全フラックスの 64 % に寄与していると報告した．本実験では，群落高の 0.64 倍（Campbell, 1986）と仮定したゼロ面変位（0.7 m）から測定高度（1.9 m）の距離が 1.2 m であったので，風上側約 50 m 以内の範囲が全フラックスに大きく寄与していると考えた．また，風速測定位置から北側へ 2 m 離れた位置にある測定システムの収納小屋（縦 2 m × 横 2 m × 高さ 2 m）の影響を避けるために，主風向が北北東から北北西の時は，CH_4 フラックスの算出は行わなかった．さらに，降雨中のデータも使用しなかった．

本実験で使用した光音響ガスモニタは，CH_4 濃度出力値が水蒸気濃度に依存するので，CH_4 濃度，即ち，CH_4 フラックスを精度良く測定できないことが報告されている（庄子, 2009）．そこで，水田において空気タンクに貯留した空気の CH_4 濃度を FID 付ガスクロマトグラフ（6890N, アジレント社製）と光音響ガスモニタの両方で測定を行い，重回帰分析により光音響ガスモニタの較正を行った．

$$C_{cali} = 4.2 \times 10^{-2} \times C_{INNOVA} - 10^{-2} \times e_{sat} - 10^{-5} \times WV_{INNOVA} + 1.7 \qquad (2)$$

ここで，C_{cali} は較正式から得られた CH_4 濃度（$mg\ m^{-3}$），C_{INNOVA} はガスモニタが測定した CH_4 濃度（$mg\ m^{-3}$），e_{sat} は大気の飽和水蒸気圧（hPa），WV_{INNOVA} はガスモニタが測定した水蒸気濃度（$mg\ m^{-3}$）である．ガスクロマトグラフで測定した CH_4 濃度と較正式から得られた CH_4 濃度（C_{cali}）との関係を Fig. 3 に示す．サンプル数は $n = 147$，C_{cali} の 2 乗平均平方根誤差（RMSE）は 0.04 $mg\ m^{-3}$ であった．従って，(2) 式の適用範囲は 1.1 $\sim$ 1.5 $mg\ m^{-3}$ 程度が妥当である．

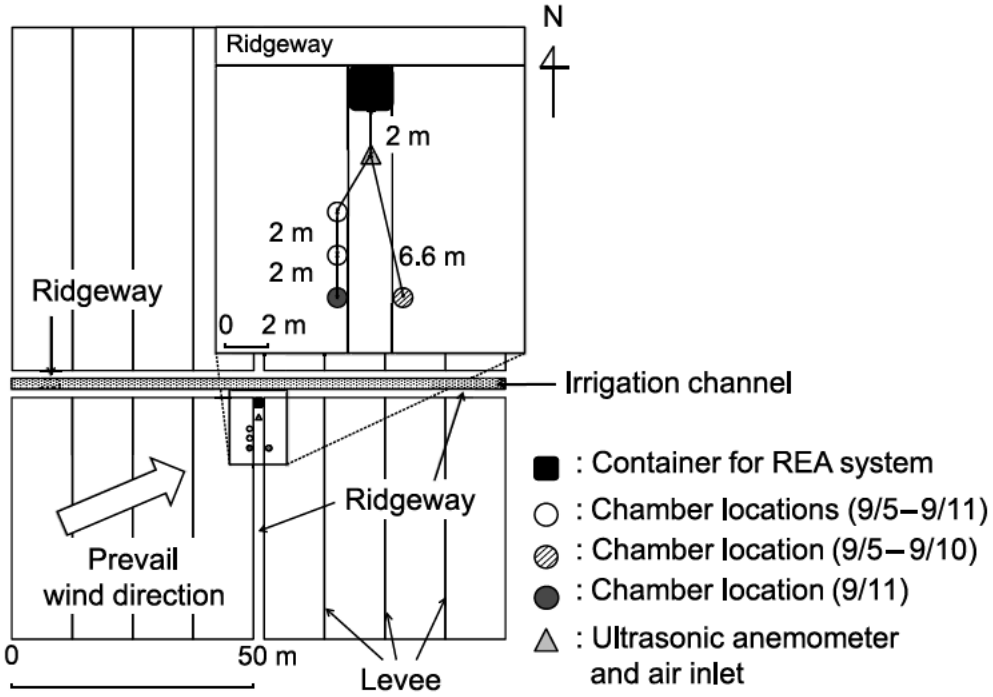


Fig. 2 観測サイト及び REA システムの収納小屋・チャンバーの配置図と卓越風向.
Site diagram of the study field, showing locations of the container for REA system, chambers, ultrasonic anemometer, air inlet and prevail wind direction.

2.2.2 チャンバー法

密閉式チャンバー法を用いて，大気と水面間の濃度勾配と気泡の解放による水面経由の CH_4 フラックスを測定した．無底のブリキ製円筒（直径 28.8 cm，高さ 23.5 cm）を使って密閉式チャンバーを自作した．円筒の上蓋を貫通させて，採気口と温度計を取り付けた．また，上蓋内側には，調圧袋とチャンバー内空気を撹拌するための電動ファンを取り付けた．

2009 年 9 月 5 日に，REA 法測定位置に対し西側の水田のイネと畦の間にチャンバーを 2 個，東側の水田のイネと畦の間にチャンバーを 1 個設置した．チャンバーの下端を 3.5 cm 地中に挿入し，ガスサンプリング毎に水面から上蓋までの高さを 4 点測定し，内容積を求めた．また，2009 年 9 月 11 日に，東側の水田の水位が上昇したため，東側水田のチャンバーを西側の水田に移設した．チャンバーの設置位置の詳細を Fig. 2 に示す．上蓋をかぶせてチャンバーを密封した直後を 0 分として，0，10，20，30 分後にチャンバー内の気体をシリンジでそれぞれ 40 ml 採取した．採取した気体は真空にした 20 ml のバイアル瓶に封入した．気体を封入したバイアル瓶は保冷剤を入れたクーラーボックスに保管して，採気終了後に実験室に運んで FID 付ガスクロマトグラフを用いて分析した．2009 年 9 月 12 日まで約 7 時間ごとに採気した．

チャンバー法によるガスフラックスは次式で求めた (de Mello and Hines, 1994).

$$J_{ch} = \frac{V}{A}\left[\frac{dC(t)}{dt}\right] \quad (3)$$

ここで，J_{ch} はガスフラックス（mg m^{-2} h^{-1}），V はチャンバー容積（m^3），A はチャンバー断面積（m^2），t は経過時間（h），$C(t)$ は時間 t におけるガス濃度（mg m^{-3}）である．この際，人為的な撹乱による影響を受けたと考えられるガスフラックスについては，除外した．

チャンバー内のガス濃度の時間変化は次式に従うと仮定した（de Mello and Hines, 1994）.

$$\left[\frac{dC(t)}{dt}\right] = k(C_{max} - C(t)) \quad (4)$$

ここで，C_{max} は最大ガス濃度（mg m^{-3}），k は実験定数である．初期ガス濃度を C_0 とすると，(4) 式の解析解は次式で与えられる（de Mello and Hines, 1994）.

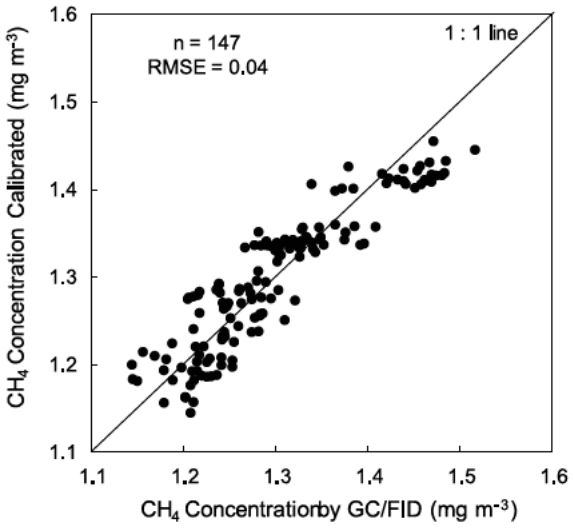


Fig. 3 較正式から得られた CH_4 濃度と GC/FID で測定した CH_4 濃度（mg m^{-3}）の関係.
Relationship between CH_4 concentration calibrated and CH_4 concentration by GC/FID.

Table 3　東南アジア各国の出穂開花期の水田で測定された CH_4 フラックスと本研究結果との比較.
Comparison of CH_4 fluxes in rice paddy fields in Southeast Asia during heading and flowering stages.

Location	CH_4 flux (mg CH_4 m^{-2} h^{-1})	Season	Irrigation condition	Application of organic matter	Measuring method	References
Indonesia	19.5 – 44.8	Dry and Rainy	Flooded	Rice straw	Chamber	Nugroho et al. (1996)
Philippines	9.7 – 37.4	Dry	Flooded and drainage	Organic matter	Micrometeorology	Simpson et al. (1995)
Thailand	6.7 – 23.4	Rainy	Flooded	Rice straw or rice straw compost	Chamber	Jermsawatdipong et al. (1994)
Thailand	3.4 – 55.6	Rainy	Flooded	No data	Chamber	Towprayoon et al. (2005)
This study	1.9 – 43.6	Rainy	Flooded	Rice straw	Micrometeorology	This study

$$C(t) = C_{\max} - (C_{\max} - C_0)\exp(-kt) \qquad (5)$$

測定したガス濃度に対して解析解をマイクロソフトエクセルのソルバー機能を用いて適合し，k と $C_{\max}$ の値を決定した.

2.3 環境条件

通風した温湿度センサー（HMP45A, Vaisala）で地上高 2 m の気温・相対湿度を，T 型熱電対で深度 0.05 m の土壌温度を 10 秒間隔で測定した．測定したデータはデータロガー（CR23X, Campbell Scientific 社）を用いて 5 分毎に平均値を記録した．大気圧は気圧計（RS-12P, ESPEC 社）を用いて 30 分間隔で測定して記録した.

3. 結果および考察

出穂開花期の本実験水田において，REA 法とチャンバー法で測定した CH_4 フラックスは 1.9 mg m^{-2} h^{-1} から 43.6 mg m^{-2} h^{-1} の範囲で変動した（Fig. 4a）．この変動は，他の研究者によって東南アジア各国の出穂開花期の水田で測定された 3.4 mg m^{-2} h^{-1} から 55.6 mg m^{-2} h^{-1} と同程度であった（Table 3）.

測定期間中，水平風速は 6 時頃から増加し，12 時頃から 16 時頃にかけて極大となり，その後，夜間にかけて減少した（Fig. 4b）．REA 法による CH_4 フラックスは 6 時頃から 12 時頃にかけて上昇し，12 時頃から 16 時頃にかけて極大となった（Fig. 4a）．そのため，水平風速の日周変動は REA 法による CH_4 フラックスの日周変動に寄与したと推察される（Fig. 4a, b）．水稲群落内の CH_4 濃度は大気中に比べて通常高いので（Miyata et al., 2000），水平風速の大きい時間帯では，水稲群落内へ侵入する風により，水稲群落と大気間の CH_4 交換が促進されると考えられている（原薗ら, 1996）．また，水平風速が大きくなるとより多くの乱流渦が形成されるので，鉛直方向風速の標準偏差 σ_w が大きくなり，(1) 式からも分かるように夜間に比べて日中にフラックスが大きくなった一因と考えられる.

また，土壌の温度が高いときも CH_4 フラックスが増加した（Fig. 4a, c）．土壌温度の上昇に伴って土壌中の CH_4 生成菌による CH_4 生成速度が上がるので（Westermann, 1993），夜間に比べて地温が上昇する日中に CH_4 フラックスが大きくなったと考えられる（Wang et al., 1997）．田面水を経由して大気中へ放出される CH_4 は，主に気泡による放出であると報告されている（Wassmann et al., 1993, 1996）．本実験水田における気泡中の CH_4 濃度は，Uzaki et al.（1991）の報告値（1 – 59 %）と同様に 31.4 % と極めて高かった（小宮, 2012）．気泡は稲わら等の作物残渣が鋤き込まれた水田土壌において形成されやすいので（Watanabe and Kimura, 1995），稲わらが土壌に鋤き込まれている本実験水田においても，CH_4 気泡が形成されやすい条件であった．実際に土壌温度が上昇した 7 時頃から 15 時頃にかけて，気泡が湛水下の表面土壌から噴出する様子を目視により観察した．土壌の温度の上昇により気泡が膨張して，浮力が大きくなることで地表面から水中を上昇した後，大気へ解放されて，水面経由の CH_4 フラックスが上昇したと考えられる（Kellner et al., 2006）.

気泡の体積は気圧の低下によっても増加する（Fechner-Levy and Hemond, 1996; Kellner et al., 2006; Tokida et al., 2007）．Tokida et al.（2007）により，16 hPa 程度の大きな気圧の低下に伴い，気泡による突発的な CH_4 放出が生じたことが報告されている．本測定期間中では，気圧が低下した 9 時から 15 時にかけて，CH_4 フラックスは上昇し，極大となった（Fig. 4 a, d）が，気圧の低下は最大で 4 hPa 程度であった．そのため，気圧低下は CH_4 フラックスの上昇に寄与した可能性はあるが，その寄与の度合い等は今後の更なる研究を待つ必要がある.

測定期間を通じて REA 法による水田全体からの CH_4 フラックスはイネのない場所に設置したチャンバーによる測定値の平均と比べて大きい傾向にあった（Fig. 5）．また，REA 法による CH_4 フラックスが 1 : 1 直線の上側にある時，REA 法とチャンバー法の CH_4 フラックスの間には有意な線形関係が認められ（傾き 1.06, 相関係数 $r = 0.976$, $p < 0.001$, n = 10），切片は 0 でなかった（$p < 0.001$）．REA 法による CH_4 フラックスはチャンバー法のイネのない場所のフラックスより平均で約 6.4 mg m^{-2} h^{-1} 大きかった．これは，イネのない場所のフラックスは水面経由のみであるのに対し，REA 法による

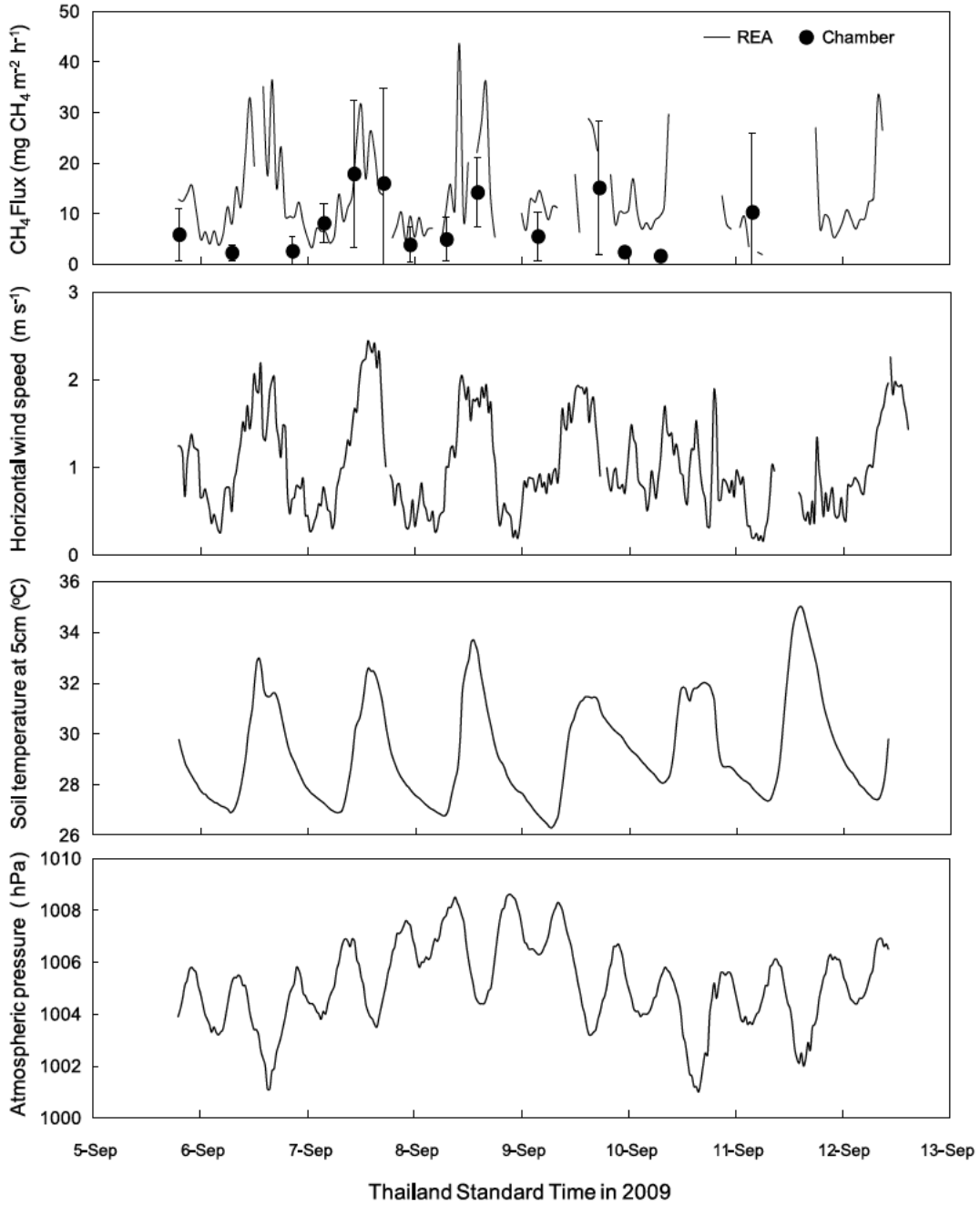


Fig. 4 (a) REA 法とチャンバー法による CH_4 フラックス，(b) 水平風速，(c) 深度 5cm の土壌温度，(d) 気圧の経時変化
Temporal changes in (a) CH_4 flux by REA and chamber methods, (b) horizontal wind velocity, (c) soil temperature at 5 cm deep, and (d) atmospheric pressure.

水田全体からのフラックスはイネの通気組織経由と水面経由の両方であるためと考えられた．

しかし，9 月 7 日と 9 月 11 日夜間には，チャンバー法による CH_4 フラックスの平均値が REA 法の値を上回った（Fig. 5）．チャンバーは 3 地点に設置したので，いずれかのチャンバーが気泡の噴出による急激な CH_4 放出を測定したことで，チャンバー法による CH_4 フラックスの平均値が大きくなったと考えられる．それに対し，REA 法は風上側の大気中の平均的な CH_4 濃度を測定するので，チャンバー法の様に特定箇所での急激な CH_4 濃度上昇を検出しにくい性質がある．そのため，9 月 7 日と 9 月 11 日夜間において，チャンバー法による CH_4 フラックスが REA 法に比べて大きくなったと考えられる．

4. まとめ

本研究では，REA 法とチャンバー法を用いて，タイ王国の水田における CH_4 フラックスを測定した．両手法で測定した CH_4 フラックスの値（1.9 mg m^{-2} h^{-1} から 43.6 mg m^{-2} h^{-1}）は東南アジアの既往の報告値（3.4 mg m^{-2} h^{-1} から 55.6 mg m^{-2} h^{-1}）と同程度であった．さらに，CH_4 フラックス · 水平風速 · 土壌温度は朝方から日中にかけて増加し，夜間にかけて減少した．このことから，CH_4 フラックスの日周変動は，既往の報告例と同

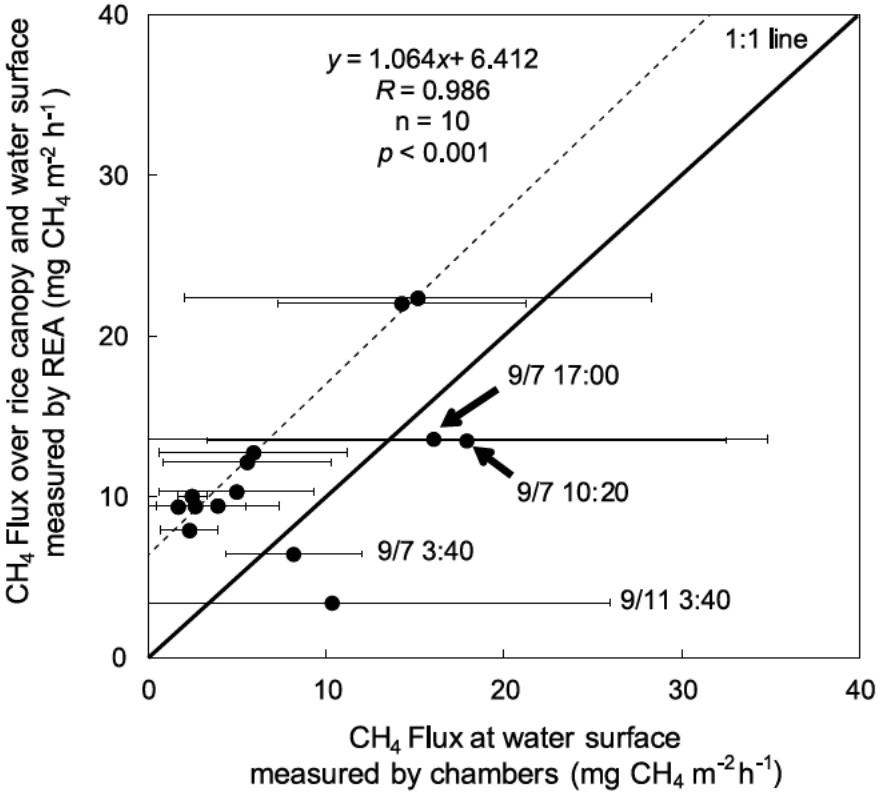


Fig. 5　REA 法による水稲群落上及び田面水上の CH_4 フラックスとチャンバー法による田面水上の CH_4 フラックスの比較（エラーバーは ±1SD を示す, n = 3）.
Comparison of CH_4 fluxes over rice canopy and the water surface measured by REA and at the water surface measured by chamber methods. Bars indicate one standard deviation with n = 3.

様に，水平風速と土壌温度の影響を受けたと考えられた．測定期間を通じて，REA 法による水田全体からの CH_4 フラックスはイネのない場所に設置したチャンバーの平均 CH_4 フラックスに比べて約 6.4 mg m^{-2} h^{-1} 大きかった．これは，イネのない場所の CH_4 フラックスは田面水経由であるのに対し，REA 法による水田全体からの CH_4 フラックスはイネ通気組織経由と田面水経由の両方であるためと考えられた．

謝辞

本研究の一部は（財）日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（A）課題番号 18208021），文部科学省平成 21 年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（事業番号: S0901028），日本学術振興会特別研究員科学研究費の助成を受けて行った．タイ王国イネ科学研究所の Meechai Siangliw 博士にはシステムの維持管理をして頂いた．農業環境技術研究所の小野圭介博士には微気象学的手法の理論について御指導頂いた．国立環境研究所の近藤文義博士には論文を執筆する上で御助言を頂いた．ここに記して謝意を表する．

引用文献

Ammann, C. and Meixner, F. (2002): Stability dependence of the relaxed eddy accumulation coefficient for various scalar quantities. J. Geopys. Res., 107(D8): 4071.

Baldwin, K., Childs, N., Dyck, J. and Hansen, J. (2012): Southeast Asia's Rice Surplus. A Report from the Economic Research Service, Outlook No. (RCS-12l-01): 1–38, USDA, Washington, DC.

Beverland, I.J., Oneill, D.H., Scott, S.L. and Moncrieff, J.B. (1996): Design, construction and operation of flux measurement systems using the conditional sampling technique. Atmospheric Environment, 30: 3209–3220.

Buendia, L.V., Neue, H.U., Wassmann, R., Lantin, R.S. and Javellana, A.M. (1997): Understanding the nature of methane emission from rice ecosystems as basis of mitigation strategies. Applied Energy, 56: 433–444.

Businger, J.A. and Oncley, S.P. (1990): Flux measurement with conditional sampling. J. Atmos. Ocean Tech., 7: 349–352.

Campbell (1986): Wind. In: An introduction to environmental biophysics. (ed Campbell), pp. 32–45, Springer, Berlin Heidelberg New York.

Cicerone, R.J. and Shetter, J.D. (1981): Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and a discussion. J. Geopys. Res., 86: 7203–7209.

de Mello, W.Z. and Hines, M.E. (1994): Application of static and dynamic enclosures for determining dimethyl sulfide and carbonyl sulfide exchange in Sphagnum peatlands: Implications for the magnitude and direction of flux. J. Geopys. Res., 99: 14,601–14,607.

Denmead, O.T. (1991): Sources and sinks of greenhouse gases in the soil-plant environment. Plant Ecol., 91: 73–86.

FAO (2002): FAO Rice Information, Vol. 3, December 2002, FAO, Rome, Italy. Available at http://www.fao.org/docrep/005/y4347e/y4347e00.HTM. (2013. 12. 29)

Fechner-Levy, E.J. and Hemond, H.F. (1996): Trapped methane volume and potential effects on methane ebullition in a northern peatland. Limnol. Oceanogr., 41(7): 1375–1383.

Green, S.M. (2013): Ebullition of methane from rice paddies: the importance of furthering understanding. Plant and Soil, 370(1–2): 31–34.

鱧谷 憲 · 文字信貴 · 山口浩司 (2001): REA 法による CO_2 フラックス長期観測システムの開発 — 密度変動補正法の検討を含む —. 農業気象学会誌, 57(2): 93–99.

Harazono, Y., Kim, J., Miyata, A., Choi, T., Yun, J.I. and Kim, J.W. (1998) : Measurement of energy budget components during the International Rice Experiment (IREX) in Japan. Hydrological Processes, 12(13–14) : 2081–2092.

原薗芳信, 文字信貴, 宮田 明, 北 和之, 鱧谷 憲, 内田洋平, 吉本真由美, 佐野琢巳, 藤原正智, 礒部誠之, 小川利紘 (1996): 接地境界層における大気微量気体のフラックス測定法と評価法, 農業環境技術研究所報告, 13: 166–226.

平野高司 (2001): 気象研究ノート第 199 号: 微量気体のフラックス 5.6 節 土壌呼吸量 (eds. by 塚本 修 · 文字信貴), pp.132–137, 日本気象学会, 東京.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): Climate Change 2001, The Scientific Basis. Cambridge University Press.

Jermsawatdipong, P., Murase, J., Prabuddham, P., Hasathon, Y., Khomthong, N., Naklang, K. and Kimura, M. (1994): Methane emission from plots with differences in fertilizer application in Thai paddy fields. Soil Sci. Plant Nutr., 40(1): 63–71.

Kanemasu, E.T., Flitcroft, I.D., Shah, T.D.H., Nie, D., Thurtell, G.W., Kidd, G., Simpson, I., Lin, M., Neue, H.-U. and Bronson, K. (1995): Comparison of micrometeorological and chamber measurements of methane emissions from rice fields. In: Climate change and rice. (eds Peng, S., et al.), pp. 91–101, Springer, Berlin Heidelberg New York.

Kellner, E., Baird, A.J., Oosterwoud, M., Harrison, K. and Waddington, J.M. (2006): Effect of temperature and atmospheric pressure on methane (CH_4) ebullition from near-surface peats. J. Geopys. Res., 33: L18405, doi:10.1029/2006GL027509.

Kim, K.-H., Kim, M.-Y. and Kim, J (2005): Application of micrometeorological approaches to measure methane exchange in a dry paddy field in the western coast of Korea. Chemosphere, 59: 1613–1624.

小宮秀治郎 (2012): 微気象学的手法による水田における温室効果ガスフラックスの測定. 明治大学大学院農学研究科修士論文.

McInnes, K.J. and Heilman, J.L. (2005): Relaxed eddy accumulation. In: Micrometeorology in agricultural systems. Agronomy monograph no. 47. (eds Hatfield, J.L., et al.), pp. 437–453, ASA-CSSA-SSSA publishers, Madison, WI, USA.

Miyata, A., Leuning, R., Denmead, O.T., Kim, J. and Harazono, Y. (2000): Carbon dioxide and methane fluxes from intermittently flooded paddy field. Agricultural and Forest Meteorology, 102: 287–303.

宮田 明 · 原薗芳信 (2001): 気象研究ノート第 199 号: 微量気体のフラックス 5.2 節 メタンフラックスの測定 (eds. by 塚本 修 · 文字信貴), pp.114–119, 日本気象学会, 東京.

Nugroho, S.G., Lumbanraja, J., Suprapto, H., Haraguchi, H. and Kimura, M. (1996): Three-year measurement of methane emission from an Indonesian paddy field. Plant and Soil, 181(2): 287–293.

Redfern, S.K., Azzu, N., Binamira, J.S., Meybeck, A., Lankoski, J., Redfern, S. and Gitz, V. (2012): Rice in Southeast Asia: facing risks and vulnerabilities to respond to climate change. In: Building Resilience for Adaptation to Climate Change in the Agriculture Sector. Proceedings of a Joint FAO/OECD Workshop, pp. 295–314, FAO, Rome.

Schütz, H., Seiler, W. and Conrad, R. (1989): Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. Biogeochemistry, 7: 33–53.

Seiler, W., Holzapfel-Pschorn, A., Conrad, R. and Scharffe, D. (1984): Methane emission from rice paddies. J. Atmos. Chem., 1: 241–268.

庄子侑希 (2009): 水田における温室効果ガスフラックスの測定 ～ 簡易渦集積法による自動連続測定システムの開発 ～. 明治大学大学院農学研究科修士論文.

Simpson, I.J., Thurtell, G.W., Kidd, G.E., Lin, M., Demetriades-Shah, T.H., Flitcroft, I.D., Kanemasu, E.T., Nie, D., Bronson, K.F. and Neue, H.U. (1995): Tunable diode laser measurements of methane fluxes from an irrigated rice paddy field in Philippines. J. Geophys. Res., 100: 7283–7290.

滝本貴弘, 岩田 徹, 山本 晋, 三浦健志 (2010): 岡山県南部の大麦 — 水稲二毛作地における CO_2 と CH_4 フラックス特性. 農業気象学会誌, 66(3): 181–191.

TMD (2009): Automatic Weather System, Thai Meteorological Department. Available at http://www.aws-observation.tmd.go.th/web/main/index.asp. (2014. 01.09)

Tokida, T., Miyazaki, T., Mizoguchi, M., Nagata, O., Takakai, F., Kagemoto, A. and Hatano, R. (2007): Falling atmospheric pressure as a trigger for methane ebullition from peatland. J. Geopys. Res., 21: GB2003, doi:10.1029/2006GB002790.

Towprayoon, S., Smakgahn, K. and Poonkaew, S. (2005): Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. Chemosphere, 59: 1547–1556.

Tsai, J.L., Tsuang, B.J., Kuo, P.H., Tu, C.Y., Chen, C.L., Hsueh, M.T., Lee, C.S., Yao, M.H. and Hsueh, M.L. (2012): Evaluation of the relaxed eddy accumulation coefficient at various wetland ecosystems. Atmospheric Environment, 60: 336–347.

Uzaki, M., Mizutani, H. and Wada, E. (1991): Carbon isotope composition of CH_4 from rice paddies in Japan. Biogeochemistry, 13(2): 159–175.

Wang, B., Neue, H.U. and Samonte, H.P. (1997): The effect of controlled soil temperature on diel CH_4 emission variation. Chemosphere, 35(9): 2083–2092.

Wassmann, R., Papen, H. and Rennenberg, H. (1993) : Methane emission from rice paddies and possible mitigation strategies. Chemosphere, 26: 201-217.

Wassmann, R., Neue, H.U., Alberto, M.C.R., Lantin, R.S., Bueno, C., Llenaresas, D. and Rennenberg, H. (1996): Fluxes and pools of methane in wetland rice soils with varying organic inputs. Environmental Monitoring and Assessment, 42: 163–173.

Wassmann, R. and Aulakh, M.S. (2000): The role of rice plants in regulating mechanisms of methane missions. Biology and Fertility of Soils, 31(1): 20–29.

Wassmann, R., Neue, H.U., Lantin, R.S., Buendia, L.V. and Rennenberg, H. (2000): Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. I. Comparison among field sites in five countries. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 58: 1–12.

Watanabe, A. and Kimura, M. (1995): Methane production and its fate in paddy fields: VIII. Seasonal variations in the amount of methane retained in soil. Soil Sci. Plant Nutr. 41: 225–233.

Werle, P. and Kormann, R. (2001): Fast chemical sensor for eddy-correlation measurements of methane emissions from rice paddy fields. Applied Optics, 40: 846–858.

Westermann (1993): Temperature regulation of methanogenesis in wetlands. Chemosphere, 26: 321–328.

Xie, B., Zheng, X., Zhou, Z., Gu, J., Zhu, B., Chen, X., Shi, Yi., Wang, Y., Zhao, Z., Liu, C., Yao, Z. and Zhu, J. (2010): Effects of nitrogen fertilizer on CH_4 emission from rice fields: multi-site field observations. Plant Soil, 326: 393–401.

Yagi, K. and Minami, K. (1990): Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. Soil Sci. Plant Nutr., 36: 599–610.

Yagi, K., Tsuruta, H., Kanda, K.I. and Minami, K. (1996): Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. Global Biogeochemical Cycles, 10: 255-267.

八木一行 (2004): 大気メタンの動態と水田からのメタン発生. 農業環境研究叢書第 15 号, 農業生態系における炭素と窒素の循環, pp. 23–50, 独立行政法人農業環境技術研究所.

要　　旨

水田は，温室効果ガスである CH_4（メタン）に対する主要な人為的発生源のひとつである．近年，広域な測定範囲からの CH_4 フラックスを測定するために微気象学的手法が開発されている．本研究では，微気象学的手法の一つである緩和渦集積（REA）法を用いて，タイ王国の水田において出穂開花期の CH_4 フラックスを測定した．また，チャンバーをイネのない場所に設置して，田面水からの CH_4 フラックスを測定した．REA 法とチャンバー法で測定した CH_4 フラックスの観測値（1.9 mg m^{-2} h^{-1} から 43.6 mg m^{-2} h^{-1}）は既往研究で報告された値と同程度であった．水稲群落と大気間の CH_4 交換量は日中に大きい傾向があり，水平風速と土壌温度に依存した日周変動を観測した．田面水からの CH_4 フラックスも同様に，土壌温度上昇に伴って大きくなった．REA 法によって観測された CH_4 フラックスは測定期間を通じてチャンバー法による値に比べて大きい傾向にあった．これはチャンバー法によるイネのない場所からの CH_4 フラックスは田面水経由であるのに対し，REA 法による水田全体からの CH_4 フラックスはイネ通気組織経由と田面水経由の両方であるためと考えられた．

キーワード：密閉式チャンバー法，水平風速，メタン（CH_4），緩和渦集積（REA）法，水田，土壌温度