

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K20858

研究課題名(和文)不均一地表面でのMonin-Obukhov相似則の検証

研究課題名(英文)Understanding Monin-Obukhov Similarity over the heterogeneous land surface

研究代表者

小森 大輔 (Komori, Daisuke)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授

研究者番号：50622627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：乱流フラックスの時空間不確実性()の評価手法の高度化を図り、さらに群落スケールでの光合成・蒸散フラックスの観測手法に を導入、新たに開発した。不均一地表面上でのMonin-Obukhov相似則を検証した結果、特に植物生理的不均一性の影響が大きい二酸化炭素フラックスや土壌が乾燥して植生と乾燥地の土壌水分的不均一性の影響が大きい乾季の潜熱フラックスではMonin-Obukhov相似則が成立しない場合が多いことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：I developed an evaluation method of spatial-temporal uncertainty for turbulence measurements. Furthermore, I developed new evaluation method for partitioning Evapotranspiration/CO₂ fluxes into evaporation/transpiration and photosynthesis/soil respiration. I clarified that CO₂ flux and H₂O flux in the dry season were not often possible of Monin-Obukhov similarity due to the plant physiological heterogeneity and soil surface water heterogeneity.

研究分野：水文学、陸域水循環

キーワード：Monin-Obukhov相似則 不均一地表面 渦相関法 時空間的不確実性

1. 研究開始当初の背景

乱流拡散研究は Kolmogorov (1941) が乱流スペクトルに理論的解釈を与えた事で進み, Obukhov (1946) によって乱流拡散には同一のスケールパラメータがあることが発見された。そして, Monin and Obukhov (1954) は, Monin-Obukhov 相似則 (=均一地面上にて乱流状態にある風速や気温の各種統計量は摩擦応力や顕熱フラックスを用いてすべて同じように表されるといふ相似則) を発見した。

その後, 超音波風速計など乱流拡散を直接測定できる機材が開発され, 1980年代後半にはこれらの機材を用いて野外にてフラックス観測実験が行われるようになり, 多くのフラックス観測研究が国際的に行われるようになった。しかし, 過去30年間で観測機材の性能向上や理論上での精度向上はあったものの, Monin-Obukhov 相似則が不均一地面上で成立するか, どのような影響を受けるかは検討できていない。よって, 不均一地表がフラックス観測に与える影響を定量的に評価するとともに, どの程度までの不均一地表面上でも Monin-Obukhov 相似則が成立するかを明らかにすることが必要不可欠である。

2. 研究の目的

申請者らが世界に先駆けて開発した乱流フラックスの時空間不確実性 (δ) を定量化する手法 (式1; Kim and Komori et al., 2011) を深化し, 不均一地表が δ に及ぼす影響を明らかにすることで, 不均一地表面上での Monin-Obukhov 相似則を検証する。

$$\varepsilon = \frac{\delta}{|F|} = \frac{\delta_r + \delta_s + \delta_i}{|F|} \quad (1)$$

$|F|$ はフラックス, δ_r は偶然誤差, δ_s は系統誤差, δ_i は乱流データの定常性や地表面の不均一性による不確実性が含まれる過失誤差である。本研究では, δ_s は0と仮定し, δ は Finkelstein and Sims (2001) に基づいて算定する。

3. 研究の方法

不均一地表が δ に及ぼす影響を明らかにするために, はじめに, (1) 均一・不均一地表面上で雨季と乾季に野外観測実験を行い, δ を従来の乱流フラックス品質評価手法 (QC/QA) と比較検討し, δ の特性を理解し手法を深化する。これに基づき, (2) 均一植生上の異なる高度で野外同時観測実験を行い, Monin-Obukhov 相似則の普遍関数から各高度の理論フラックス値 (F_*) を求め, δ と比較して, 植物生理的な不均一地表面上での Monin-Obukhov 相似則を定量的に検証する。そして, (3) 不均一地表面上にて異なる高度での観測から Monin-Obukhov 相似則の普遍関数を求め, 地表面の不均一度の指標化とフラックス観測のフットプリントを解析し, 不均一地表がフラックスの δ に及ぼす影響を解明し, 不均一地表面上での Monin-Obukhov 相似則を定量的に検証する。

的に検証する。

4. 研究成果

(1) 定常性が δ に与える影響の解明

均一植生である耕作地 (CTT:測定高さ7m) および不均一植生である森林 (DTT:測定高さ100m) の雨季と乾季に野外観測において, QC/QA および δ を比較した。QC/QA には乱流の定常性 (SS) および積分乱流特性 (ITC) を用いた。SSは風上方向に十分様な領域が確保できているかなどの指標で, 観測周期で算出した共分散 (60分) と観測周期を等分割した周期で算出した共分散の積算した値 (6分割で10分毎) から算出する。ITCはSSと共によく用いられる指標で, 以下のように定義される (Kaimal and Finnigan, 1994) :

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = a \left[\frac{z}{L} \right]^b, \quad (2)$$

ここで, σ_w は鉛直風速の標準偏差, u_* は摩擦速度, a および b は Foken et al. (2004) によって安定度によって定義される。これらの結果から表1 (Foken et al., 2004) に基づき, 本地点において測定された乱流フラックスの QC/QA を行った。

CTT および DTT の雨季の顕熱の QC/QA および ε を図1に示す。CTT では, $\varepsilon < 0.1$ にて QC/QA で最良と判定されたデータ比率 (FQFs 1-3) はほぼ100%であり, 除外と判定されたデータ比率 (FQF > 7) は0%であった。これらの結果から, 低い ε は QC/QA の評価と一致することがわかった。次に, QC/QA で使用可能と判定されたデータ (FQFs 1-6) は, $\varepsilon < 0.2$ で50%, $\varepsilon < 0.3$ で60%, $\varepsilon < 0.4$ で71~85%であった。すなわち, QC/QA で使用可能と判定されたフラックスデータの10%は20-30%の不確実性を有し, また, 残りのデータは30%以上の不確実性を有し, フラックスデータとして信頼できないことを意味する。DTT では, 同様な傾向は見られたものの, FQFs 1-3 および FQFs 1-6 のサンプル数は CTT より少なかった。均一地表の方が δ_i が小さく, 定常性や地表面の不均一性による不確実性が小さいことが推察された。 δ は定常性および積分乱流特性と関係があることが確認された。

表1 SS および ITC に基づく QC/QA 判定。FQF 1-3 は最良なデータ, FQF4-6 は使用可能なデータ, それ以外は除外データと判定される。

| FQF | SS | ITC | SS & ITC tests | |
|-----|-----|-----|----------------|----------------|
| | | | Class | Difference (%) |
| 1 | 1 | | 1 | 0-15 |
| 2 | 2 | 1-2 | 2 | 16-30 |
| 3 | 1-2 | 3-4 | 3 | 31-50 |
| 4 | 3-4 | 1-2 | 4 | 51-75 |
| 5 | 1-4 | 3-5 | 5 | 76-100 |
| 6 | 5 | ≤5 | 6 | 101-250 |
| 7 | ≤6 | ≤6 | 7 | 251-500 |
| 8 | ≤8 | ≤8 | 8 | 501-1000 |
| 9 | | 9 | 9 | >1000 |

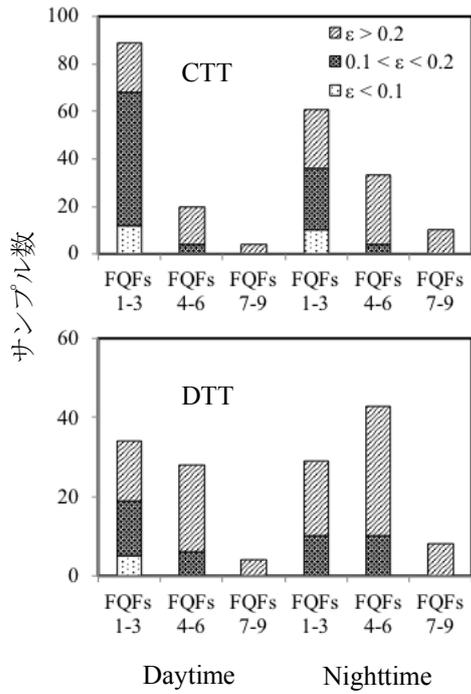


図1 CTTおよびDTTの雨季におけるεおよびQC/QA評価の比較

(2) 植物生理的な不均一地表面上でのMonin-Obukhov 相似則の検証

DTTにて、雨季に、植物生理的な不均一地表面である測定高さ 20m および 30m において (図2), 同時観測実験を行なった。乱流フラックス観測は Monin-Obukhov 相似則が成立しなければ測定できないことにより、2 高度の観測点から Monin-Obukhov 相似則を各高さのフラックス値に適用させた F_* を式 (3), (4) 式より算出し、2 高度の F_* の比 ($\epsilon_{30m}/\epsilon_{20m}$) を算出した。

$$F_* = \frac{|F|}{\phi_m} \quad (3) \quad \phi_m = \left(1 - 16 \cdot \frac{z}{L}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad (4)$$

ここで、 ϕ_m は普遍関数 (Dyer and Hicks, 1970), z は測定高さ, L はオブコフ長である。 $\epsilon_{30m}/\epsilon_{20m}$ が 1:1 に近いほど異なる高さで同

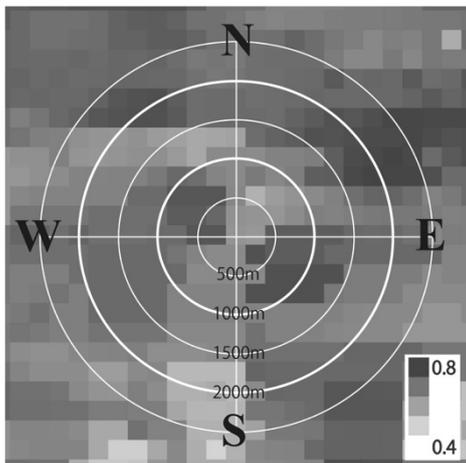


図2 観測点 (図中心) 周辺の植生指数

じフラックスが観測できたことを意味し、Monin-Obukhov 相似則が成立することになる。この指標と CO_2 フラックスの ϵ_{CO_2} , 潜熱フラックス (IE) の ϵ_{IE} , 顕熱フラックス (H) の ϵ_H と比較し、植生の不均一性が CO_2 , IE および H に及ぼす影響を解析した。解析にあたり、乱流フラックスは1時間ごとに算出し、大気安定度が0以上のものは大気が安定しており乱流観測に適さないため除外した。また、 $0.9 < \epsilon_{30m}/\epsilon_{20m} < 1.1$ のデータだけを用いた。

CO_2 フラックスについて 30m 地点の ϵ_{CO_2} と F_{*30m}/F_{*20m} の関係を図3に示す。同様に IE および H について、30m 地点の ϵ_{IE} および ϵ_H と F_{*30m}/F_{*20m} の関係をそれぞれ図4および図5に示す。ここで、プロットは CO_2 の F_{*30m}/F_{*20m}

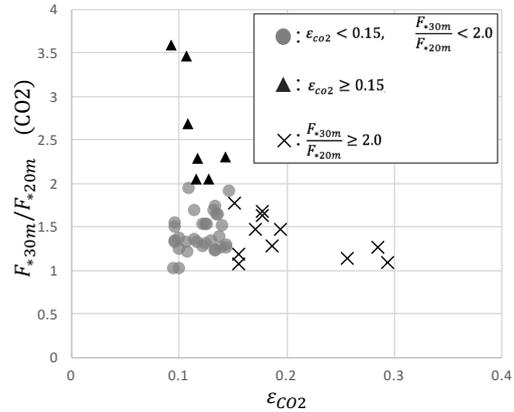


図3: F_{*30m}/F_{*20m} と ϵ_{CO_2} の関係

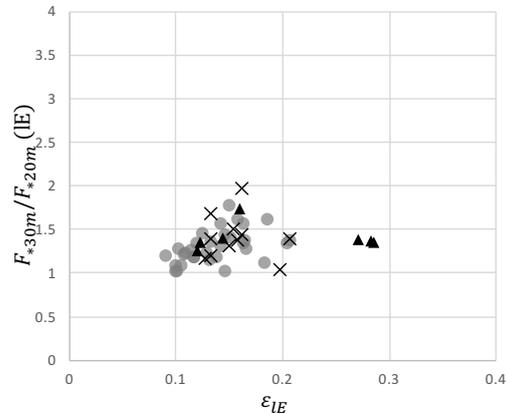


図4: F_{*30m}/F_{*20m} と ϵ_{IE} の関係

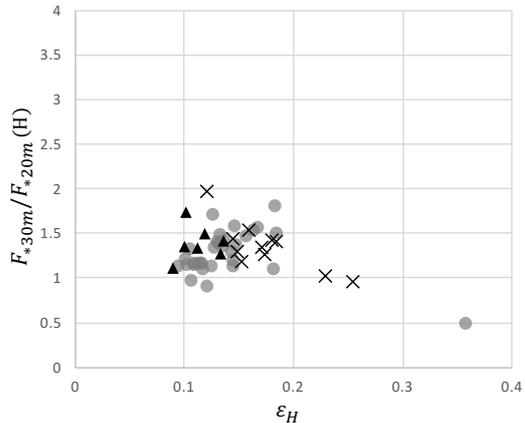


図5: F_{*30m}/F_{*20m} と ϵ_H の関係

≥ 2.0 を三角印, CO_2 の $F_{*30m}/F_{*20m} < 2.0$ のうち 30m 地点の $\varepsilon_{\text{CO}_2} < 0.15$ を丸印, $\varepsilon_{\text{CO}_2} \geq 0.15$ をバツ印である。また, F_{*30m}/F_{*20m} に関して, 1 より小さい値は逆数を取り分類をした。

バツ印のプロットは, IE および H では CO_2 に比べ小さい値を示した。三角印のプロットは, IE および H では F_{*30m}/F_{*20m} は 2.0 以下となり, CO_2 環より IE および H 環境は地表面均一性が高いことが推察された。 IE は CO_2 フラックスと光合成/蒸散に関して相似性があるが, 雨季の降水に伴う土壌水分の均一性が植物生理的な不均一よりも大きく影響したことが推察された。 H は日射量と相関があり, 日射の均一性が H の地表面均一性が高いことに寄与していると考えられる。

(3) ①不均一地表面上での Monin-Obukhov 相似則の検証 (1)

DTT にて, 不均一地表面である測定高さ 100m において, Kim and Komori et al. (2011) に基づき地表面不均一性 η を算出した。

$$\eta = 1 - \frac{\omega}{\varepsilon} \quad (5)$$

ここで, ω は観測実験と乱流物理モデルによる数値実験から得られた δ_r の理論値 (0.07) である。すなわち, 式 (1) より η は δ_i の関数と考えられる。

次に, Soegaard et al. (2000) に基づきフットプリント解析よりフェッチ (乱流フラックスに影響を与える地表面領域) を抽出し, 衛星画像データよりフェッチ内の土地利用を分類した (図 6)。そして, Join 検定 (吉川, 1995) を用いてフェッチ内の土地利用のばらつき (ランク値) を指標化した。ここで, Join 検定は隣り合うセル同士が異なる場合の個数を数える手法で, 2 変数のばらつきを指標化し, その集塊の程度をランク値として評価する手法である。そのため, 3 変数以上の土地利用のばらつきを考慮することは出来なため, CO_2 フラックスに関係する因子として光合成の有無 (すなわち植生の有無) で土地利用を 2 変数に分類した。さらに, 図 7 のようにランク値は等しくても η が異なると推定される場合が想定されることより, 2 分類した土地利用の面積比でフィルタリングし, ランク値と

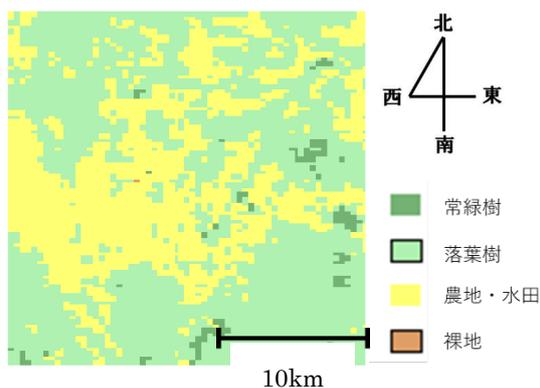


図 6 分類した土地利用 (2010 年のケース)

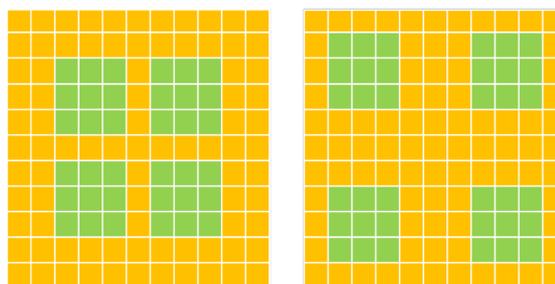


図 7 ランク値が等しくても η が異なる例

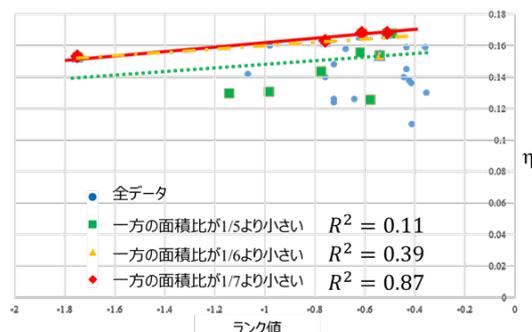


図 8 η とランク値の関係 (2004 年-乾季)

η の関係を調べた。

η とランク値の散布図を示す (図 8)。測定期間全体において両者に相関は確認できなかった。次に, それぞれの面積比における両者の相関は, 面積比が 1/5 より小さい範囲では決定係数が 0.11, 1/6 では 0.39, 1/7 では 0.87 と決定係数の増加が確認され, 正の線形関係が顕著になる結果が示された。これは, 土地利用分布が集塊化するほど, η が減少し, すなわちフラックスの変動が小さくなることを表す。2 つに分類した土地利用図の面積に大きな差があるとき, 土地利用分布が集塊化するほどフラックスに生じる誤差が小さくなることが示された。これは, 地表面の土地利用の面積比に大きな差が有る場合, 一方の土地が 1 箇所に集まった状態のほうが地表面が均一に近いことを示唆する。また本研究において, 2 種に分類した面積のうち, 一方の面積が小さく集塊化したほうが, フラックスの変動係数が小さくなるという Gang et al. (2011) による数値解析の結果に近い結果も示された。

(3) ②不均一地表面上での Monin-Obukhov 相似則の検証 (2)

DTT にて, 不均一地表面である測定高さ 100m において H の ϕ_m を式 (6) で算出し (ϕ_{H_o}), ϕ_m の理論値 (ϕ_{H_t}) (Businger, 1971) と比較することで Monin-Obukhov 相似則の検証を試みた。

$$\phi_{H_o} = \frac{kz \overline{\partial \theta}}{\theta_* \partial z} \quad (6)$$

ここで, $\overline{\quad}$ は平均を表し, k はカルマン定数 (0.4), θ_* は摩擦温度, θ は温位である。 ϕ_{H_o}/ϕ_{H_t} を用いて, 両者の一致度を調べた。

図 9 に乾季 (2010 年 1-2 月), 雨季 (2010 年

7-8月)の各1時間における $0.8 \leq \phi_{H_2O} \leq 1.2$ の出現頻度を示す。乾季は日中の出現頻度が高かった。これは、不均一地表面上でも日中は日射により H は均一であることが推察される。一方、雨季は乾季のような特徴は見られなかった。降水により乱流観測に不適であること、強い日射がもたらされないことなどが、 H の不均一性をもたらしていることが推定された。

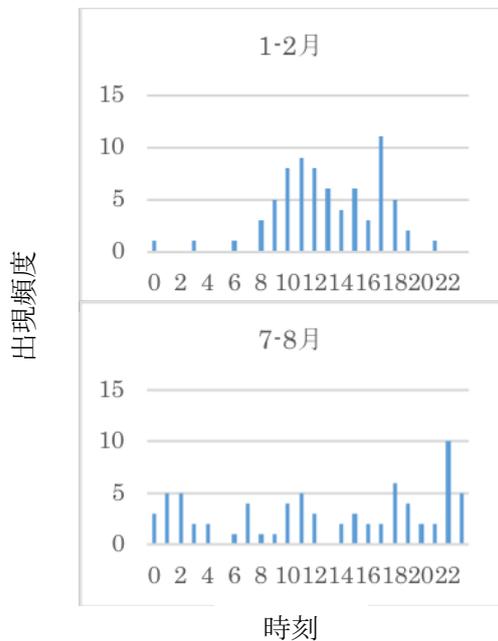


図9 時刻と ϕ_{H_2O} の出現頻度

(4) 群落スケールでの光合成・蒸散フラックスの観測手法の開発

植物生理的な不均一地表面上での Monin-Obukhov 相似則の検証において、種々の光合成のばらつきが CO_2 フラックスの δ に影響を与えることが示された。その傾向は特に午後に見られ、植物の昼寝現象が世界で初めて群落スケールで捉えられた可能性(=日中に根からの吸水能力が葉からの蒸散に追いつかなくなり、一時的に気孔を閉じる現象)が考

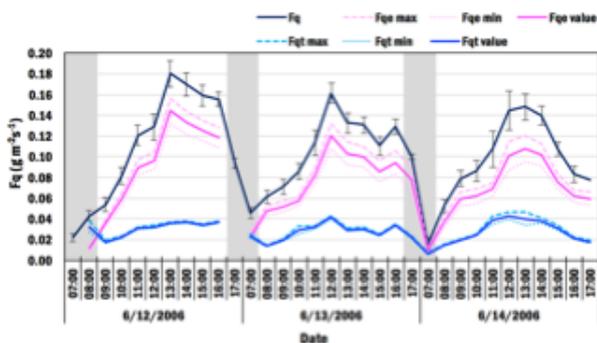


図10 2006年6月におけるタイ国天水田での蒸発散フラックスと推計された蒸散フラックス(青線)と蒸発フラックス(赤線)。破線はそれぞれのフラックスの δ を示す。

られる。未だ群落スケールの光合成や蒸散を直接測る測定技術は開発されておらず、Scanlon et al. (2008) や Sulman et al. (2016) は、 IE と CO_2 フラックスの相似性 (Flux-variance similarity, FVS) から数学的に蒸発、蒸散、光合成、土壌呼吸を推計する手法 (SS08) を提案している。そこで、SS08 に δ を導入し (SS08- δ)、世界に先駆けて蒸散・光合成フラックスの δ を定量化した (図10)。

今後、群落スケールでの光合成・蒸散フラックスを測定する強力な手法として期待される。そして、世界初の群落スケールでの植生の昼寝現象の観測を実現し、昼寝現象のメカニズムが解明されることが期待される。

5. 主な発表論文等 [雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計15件)

- ① Daisuke Komori, Wonsik Kim, 他5名: Quantitative assessment of data quality control and assurance for eddy covariance flux using the fractional uncertainty analysis, International Conference on Fluid Mechanics, 2018.
- ② 近将史, 小森大輔, Pimsiri Suwannapat, 坂井七海, 金元植: 不均一地表面上における Monin-Obukhov の相似則成立の時間的傾向, 日本農業気象学会2018年全国大会, 2018.
- ③ 坂井七海, 小森大輔, 近将史, 金元植: 植生が CO_2 フラックスに与える影響, 日本農業気象学会2018年全国大会, 2018.
- ④ 近将史, 小森大輔, 坂井七海, Pimsiri Suwannapat, 金元植: 不均一地表面上において Monin-Obukhov 相似則が成立する条件の解析, 土木学会東北支部平成29年度技術研究発表会, 2018.
- ⑤ 近将史, 小森大輔, Pimsiri Suwannapat, 坂井七海, 金元植: 不均一地表面上における CO_2 フラックスの動態解析, 水文・水資源学会2017年度研究発表会, 2017.
- ⑥ 坂井七海, 小森大輔: 植物生理的な不均一地表面が乱流特性に及ぼす影響, 2017年度日本農業気象学会東北支部大会, 2017.
- ⑦ Masafumi Kon, Daisuke Komori, Pimsiri Suwannapat, Ananya Sritawan, Nanami Sakai: Dynamics Evapotranspiration fluxes over the heterogeneous land change, 14th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, 2017.
- ⑧ Pimsiri Suwannapat, Daisuke Komori, Wonsik Kim: Effect of random error on wavenumber coefficients for water vapor and carbon dioxide transfer efficiencies, International Symposium of Agricultural Meteorology 2017, 2017.
- ⑨ 近将史, 小森大輔, Ananya Sritawan, Pimsiri Suwannapat, 坂井七海: 不均一地

表面における顕熱・潜熱・CO₂フラックスの動態解析, 土木学会東北支部平成28年度技術研究発表会, 2017.

- ⑩ 坂井七海, 小森大輔, Ananya Sritawan, Pimsiri Suwannapat, 近将史: 植生が境界層内の乱流特性に及ぼす影響, 土木学会東北支部平成28年度技術研究発表会, 2017.
- ⑪ Pimsiri Suwannapat, Daisuke Komori, Wonsik Kim: Relationship between Water Vapor and Carbon Dioxide Exchanges over A Paddy Field, 土木学会東北支部平成28年度技術研究発表会, 2017.
- ⑫ Daisuke Komori, Wonsik Kim, 他4名: Quantitative analysis of fractional uncertainty for eddy covariance flux using the data quality control and assurance, International Symposium of Agricultural Meteorology 2016, 2016.
- ⑬ Pimsiri Suwannapat, Daisuke Komori, Wonsik Kim: Negative Correlation of Transpiration and Carbon Dioxide Uptake over a Paddy Field, International Symposium of Agricultural Meteorology 2016, 2016.
- ⑭ 小森大輔, 金元植: 乱流フラックスデータの不確実性の定量化とデータ品質評価, 土木学会東北支部平成27年度技術研究発表会, 2016.
- ⑮ Pimsiri Suwannapat, Daisuke Komori, Wonsik Kim: Estimation of Maximum Water-Use Efficiency in Paddy Field by Using Eddy Covariance Method, 土木学会東北支部平成27年度技術研究発表会, 2016.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小森 大輔 (Komori Daisuke)
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号: 50622627

(4) 研究協力者

Amnat Chidthaisong
キングモンクット工科大学トンブリ校・
准教授

Warangluck Sonklin
ナレスアン大学・講師

Montri Sanwangsri
パヤオ大学・講師

Pimsiri Suwannapat
パヤオ大学・講師