

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24780246

研究課題名(和文)高温環境下における植物群落内の局所的な熱動態の計測手法の開発

研究課題名(英文)Development of a method to measure local heat exchange in the plant canopy under high temperature environment

研究代表者

丸山 篤志(MARUYAMA, Atsushi)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境変動研究センター気候変動対応研究領域・上級研究員

研究者番号：90355652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：高温環境下での作物の被害発生を左右する群落内の熱の動態を解明するため、局所的な熱輸送量(フラックス)を計測する新たな手法を開発した。化学工学分野で発達したSurface Renewal解析を植物群落に適用し、イネ、ダイズ、トウモロコシの群落で取得した気温の変化パターンから、顕熱フラックスの空間的分布を評価した。その結果、植物-大気間の熱輸送に寄与する空気塊はその一部のみが最下層まで達しており、群落下層ほど次の空気塊が侵入するまでの時間が長いことが示唆された。また、同手法によって野外で簡便に群落内の顕熱フラックス密度の鉛直分布を測定するための装置を試作した。

研究成果の概要(英文)：A new method to measure local heat exchange (flux) in the plant canopy was developed to understand the heat dynamic in the canopy, which affects crop damage by high temperatures. Surface renewal analysis was applied to a rice, maize and soybean canopies to obtain spatial variation in sensible heat flux from the measurements of air temperature. The results suggest that i) not all turbulent structures penetrate deeply into canopies, and ii) a duration between the ejection of turbulent structures and commencement of next structures is longer at lower layer in the canopies. Based on above surface renewal analysis, we developed a simple equipment to measure the profile of heat flux density in the plant canopy.

研究分野：農業気象学

キーワード：熱環境 フラックス計測 作物群落 高温障害 乱流輸送

1. 研究開始当初の背景

植物群落内の熱環境は、植物の伸長、展葉、開花、登熟など全ての生育過程に強い影響を与え、極端な高温はこれら生育を阻害する。近年の温暖化により、イネなど各種作物の高温による収量や品質の低下が国内各地で問題となっており、今後は高温不稔による著しい減収などさらに深刻な被害の発生も懸念される。これら高温障害の発生は、気温よりも栄養成長器官である葉の温度、あるいは生殖成長器官である穂の温度に支配されるため (Maruyama et al., 2013)、温暖化による群落内の温度環境 (葉温・穂温) や熱の動態 (輸送量) の変化、あるいは品種や栽培管理によるその違いを把握することは、今後の高温障害の発生予測とその対策技術を確立する上で極めて重要な課題である。しかしながら、群落内における熱輸送量 (フラックス) は群落上のフラックスと異なり、その直接的な計測手法が存在しない状況にあった。

2. 研究の目的

本研究では、粘性流体内の物質動態解析に用いられる Surface Renewal 解析 (Van Atta, 1977) を植物群落に適用することで、作物体周辺の熱フラックスの詳細な分布を得る新たな手法を開発することを目的とした。すなわち、群落内気温の高周波の変化パターンから同解析によってフラックスの詳細な空間的分布を算出することを試みた。同解析の植物群落への適用はこれまで米国と EU 諸国が中心で、しかも群落上への適用に限られていた。本研究では、同解析を世界で初めて群落内に適用することで、作物周辺の詳細な熱動態を計測可能にすることを目的とした。さらに、開発した手法を用いてイネの各種高温対策によって群落内の熱環境がどのように変化するのか解明し、どのような対策が効果的なのか検討可能にすることをねらいとした。

3. 研究の方法

(1) 群落構造の異なるイネ・トウモロコシ・ダイズの 3 種類の作物群落を対象に Surface Renewal 解析による群落内の熱フラックスの計測を試みた。九州沖縄農業研究センター (熊本県合志市) の牧草畑および佐賀平野 (佐賀県佐賀市) の輪作水田に設けられたフラックス長期観測サイトにおいて試験を実施した。各作物の開花期～成熟期 (トウモロコシでは開花前～黄熟期) に、群落内の複数高度 (6~8 高度) の気温を 10Hz で連続測定した。気温の計測には線径 0.076mm の極細熱電対を用い、全ての計測値はデータロガー (Campbell, CR1000) に記録した。(図 1)

次に気温の 10Hz の測定データから、構造関数を用いて温度の変化パターンを解析した。用いたパターンは、Castellvi and Snyder (2009) の構造関数による単純な温度上昇・急低下の繰り返しパターン (パターン)、および Paw U et al. (2005) の構造関数による温

度上昇・急低下をした後に一定時間を置いてから再び温度が上昇するパターン (パターン) の二種類である。パターン の解析からは、各高度での渦の発達にともなう温度上昇 (安定時は温度低下) の振幅 (a) と周期 (d+s) を求めた。パターン の解析からは、さらに温度変化の周期のうち、温度上昇が継続している時間 (d) と温度が一定の時間 (s) を個別に評価した。これらの模式図を図 2 に示す。

次に、得られた温度変化パターンの振幅と周期から Paw U et al. (1995) および Katul et al. (2006) と同様の方法で、空気塊の総温度上昇量 (または下降量) を求めて群落内各層における顕熱フラックス密度を算出した。同時に、群落上で超音波風速計による顕熱フラックスを観測し、上記のフラックスと比較することで Surface Renewal 解析による計測値の妥当性を検証した。



図 1. トウモロコシ群落での観測の様子

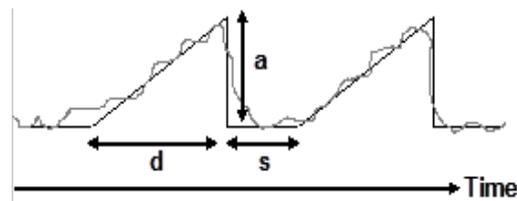


図 2. 温度変化パターンの模式図

(2) 作物の生育に影響を及ぼす群落内の熱環境について、開発した手法をもとに、イネの群落を対象に水田の水管理方法によって熱動態がどのように変化するのか解明するための試験を行った。中央農業総合研究センターの水田圃場 (茨城県つくばみらい市) において、コシヒカリの登熟期に水管理方法の異なる 2 つの区 (日中湛水区および夜間湛水区) を設け、両区で群落内の温度環境、特に田面温度の連続測定を行った。田面温度 (水温) はロガー内蔵型の水温センサ (HOB0, U12-015-02) を用いて、5 分毎に計測値を記録した。日中湛水区は日中の 8~16 時に水深を 10cm で管理し夜間は落水する区、夜間湛水区は逆に 16~8 時に水深を 10cm で管理し日中は落水する区である。これらの水管理処理は 8 月上旬から下旬にかけて実施し、主に両区の水深と群落内の熱動態の関係を解析した。

一方で、野外圃場で群落内の熱フラックスを簡便に計測できるようにするため、Surface Renewal 解析によって顕熱フラックス密度の鉛直分布を連続測定するための計器のプロトタイプを開発した。イネ、コムギ、ダイズ等の作物を想定し、気温の計測部位を0.2m間隔で6高度に鉛直配置した棒状のセンサを作成した。また、Surface Renewal 解析によるフラックス密度の計算を自動化するプログラムを作成し、野外圃場で簡便に設置してデータ取得できる装置の開発を目指した。

4. 研究成果

(1) Surface Renewal 解析によって得られたイネ群落での顕熱フラックス (H) の時間変化を図3に示した。群落上端 (0.7m) の H は $-80 \sim 120 \text{ Wm}^{-2}$ の範囲で、日中に大きくプラスで夜間にマイナスとなる一般的な日変化を示した。しかしながら、群落内部 (0.3m) の H は明らかに小さく、日中もマイナスとなる場合がみられた。これは群落下の水面 (あるいは雪面) で日中にも度々形成される局所的な大気安定状態によるものと考えられた。



図3. Surface Renewal 解析により得られた顕熱フラックス (H) の時間変化

次に観測高度による温度変化のパターンの違いに着目すると、パターン (1) の解析から群落下層ほど振幅 a (温度変化量) が小さく、一方で周期 $d+s$ は長い傾向を示していた。また、周期のうち d の値には高度による明確な違いがみられなかった一方で、 s の値は群落下層ほど大きい傾向がみられた (データ略)。すなわち、群落下層での周期が長い主な要因は、温度が急低下 (急上昇) したのちに再び上昇 (低下) し始めるまでの時間が長いためであることが明らかになった。この結果から、熱輸送に寄与する空気塊はその一部のみが最下層まで達しており、群落下層ほど次に空気塊が侵入するまでの時間が長いことが示唆された。(図4)

気温の変化パターンを決定する構造関数には多くの種類があり (Mengistu and Savage, 2010)、さらに用いるデータのサンプリング周期によっても解析結果は異なる (Spano et al, 2000) ことから、これらの最適な選択方法が今後の課題として残されている。また、同解析で得られる群落内の熱フラックス密度の精度については、群落微気象モデル (例えば、Maruyama and Kuwagata, 2010) の計算値を用いた検証が期待される。

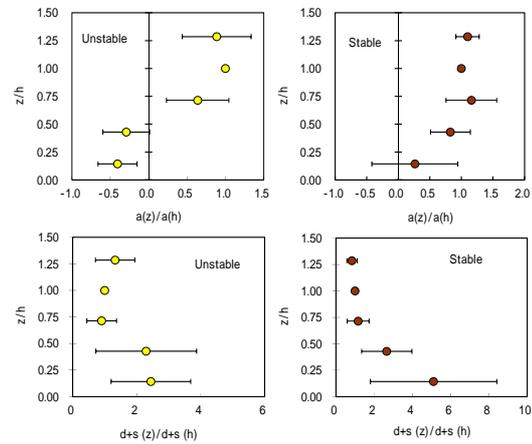


図4. 各高度 z における温度変化パターンの振幅 (a) と周期 ($d+s$) の分布 (群落高 h での値に対する比率を表す)

(2) 登熟期前半に相当する8月上旬~中旬の気温は約 $23 \sim 33$ の範囲で変化したが、水温の時間変化は水管理方法によって大きく異なった。すなわち、水体の土壌の体積熱容量の違いを反映し、日中の最高水温は水深の浅い夜間湛水区で高く、夜間の最低水温も水深の深い夜間湛水区で高い傾向がみられた。日中のほとんどは両区とも水温が気温よりも低かったため、水深の深い状態は (浅い上体よりも) 水温低下によって群落下から水面 (群落下) への顕熱フラックスが増加しているものと考えられた。反対に、夜間のほとんどは両区とも水温が気温よりも高かったため、水深の深い状態は (浅い状態よりも) 水面から群落下への顕熱フラックスが増加しているものと考えられた。(図5)

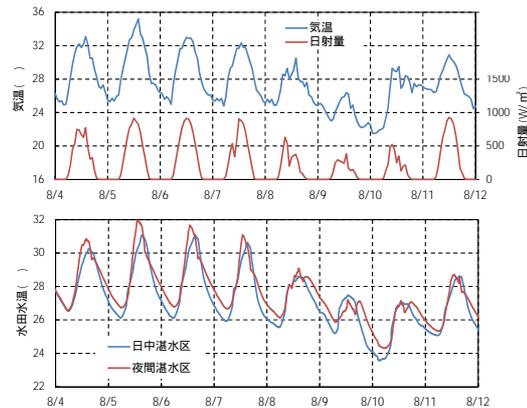


図5. 水管理による水田の熱環境の違い

一方、群落内の熱フラックスを連続測定する装置について、開発した気温の鉛直分布を計測する棒状のセンサで取得される高周波データから Surface Renewal 解析によってフラックス密度を計算するプログラムを VBA で作成した。プログラムでは、気温の変化パターンを構造関数に当てはめて自動的に解析することで、各高度における 30 分毎の顕熱フラックス密度を計算することができる。また、センサを野外で簡便に使用できるよう

センサを地面上に固定するための土台を作成し、極細熱電対を破損しにくいよう加工することで、作物群落内の熱動態の計測からフラックス算出までの一連の解析を簡便に実施することが可能となった。さらに、本研究の過程において、熱電対に特殊な加工を施して複数の感温部のデータを解析することで、野外の気温を通風装置なしに精度良く計測できることが明らかになり、当該測定装置および測定手法について特許出願した。

<引用文献>

Castellvi F., Snyder R.L. (2009) Sensible heat flux estimates using surface renewal analysis: A study case over a peach orchard. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1397-1402.

Katul G., Porporato A., Cava D., Siqueira M. (2006) An analysis of intermittency, scaling, and surface renewal in atmospheric surface layer turbulence. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 215, 117-126.

Maruyama A., Kuwagata T. (2010) Coupling land surface and crop growth models to estimate the effects of changes in the growing season on energy balance and water use of rice paddies. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 919-930.

Maruyama A., Weerakoon W.M.W., Wakiyama Y., Ohba K. (2013) Effects of increasing temperatures on spikelet fertility in different rice cultivars based on temperature gradient chamber experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science* 199, 416-423.

Mengistu M.G., Savage M.J. (2010) Open water evaporation estimation for a small shallow reservoir in winter using surface renewal. *Journal of Hydrology* 380, 27-35.

Paw U K.T., Qiu J., Su H.B., Watanabe T., Brunet Y. (1995) Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes without velocity data. *Agricultural and Forest Meteorology* 74, 119-137.

Paw U K.T., Snyder R.L., Spano D., Su H.B. (2005) Surface renewal estimates of scalar exchange. *Micrometeorology in agricultural systems*, 455-483.

Spano D., Snyder R.L., Duce P., Paw U K.T. (2000) Estimating sensible and latent heat flux densities from grape wine canopies using surface renewal. *Agricultural and Forest Meteorology* 104, 171-183.

Van Atta C.W. (1977) Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. *Arch. Mech.* 29, 161-171.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

丸山篤志 (2014) 近年の温暖化による水稲の高温障害の発生と水管理による対策. *農業および園芸*, 査読無し, 89, 957-963.

〔学会発表〕(計 3件)

Atsushi Maruyama (2015) Relationship between thermal environment and grain fertility of rice plant. 3rd International Symposium on Energy Challenges and Mechanics (ECM3), July 7-9, Aberdeen, UK.

Atsushi Maruyama, Kyaw Tha Paw U, and Richard L. Snyder (2013) Surface renewal analysis to obtain sensible heat flux in rice, maize and soybean canopies. AGU Fall meeting, Dec. 9-13, San Francisco, USA.

Atsushi Maruyama, Kyaw Tha Paw U, and Richard L. Snyder (2012) Surface renewal analysis in the canopy to obtain heat fluxes on agricultural land. AOGS-AGU Joint Assembly, Aug. 13-17, Singapore.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1件)

名称 : 温度センサ、温度測定装置及び温度測定方法

発明者 : 丸山篤志・中川博視 (持分7:3)

権利者 : 国立研究開発法人

農業・食品産業技術総合研究機構

種類 : 特許

番号 : 特願 2015-199498 号

出願年月日 : 2015年10月7日

国内外の別 : 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 篤志 (MARUYAMA, Atsushi)

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

総合研究機構・農業環境変動研究センター

気候変動対応研究領域・上級研究員

研究者番号 : 90355652

(2) 海外研究協力者

Kyaw Tha Paw U (PAW U, Kyaw Tha)

カリフォルニア大学デービス校・教授