

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26660200

研究課題名(和文) Air irrigation 効果の評価と応用

研究課題名(英文) Evaluation and application of air irrigation effects

研究代表者

北野 雅治 (Kitano, Masaharu)

九州大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30153109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：水蒸気の葉面結露等によってもたらされる葉面の濡れの効果を「Air irrigation効果」として新たに定義し、その物理的、生理生態的な効果を明らかにするために、黄河上流域の畑作圃場の植物群落内での観測および蒸散・光合成測定用の植物個体チャンバ等を用いた室内実験をおこなった。葉面の濡れによる葉近傍の蒸散要求度の低下によって、蒸散による植物体の水分損失が抑制され、乾燥地作物畑で見られるような乾燥土条件下において、葉の木部圧ポテンシャル、気孔開度が改善されて、光合成も高く維持され、水利用率が著しく上昇することを明らかにし、Air irrigation効果を考慮した節水農業の可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：In crop fields in arid and semi-arid regions, leaf wetting is brought by the nighttime dew formation and/or guttation every day during crop growing season. We newly defined "Air Irrigation effects" as the moistening of the leaf ambient air brought with the leaf surface wetting and its positive effects on crop water relations and photosynthesis. In this study, we demonstrated "Air Irrigation effects" on plant water relations and photosynthesis by the field observation in the Yellow River basin and the laboratory experiments with a whole plant gas exchange chamber and a sap flow meter etc.

The leaf wetting brought significant decreases in evaporative demand and transpirational water loss in plants, which remarkably improved plant water status, stomatal aperture and photosynthesis and consequently brought the higher water use efficiency. These results suggest the possible application of "Air irrigation effects" to the water saving agriculture in arid and semi-arid regions.

研究分野：農業気象学，生物環境工学

キーワード：葉の濡れ Air irrigation効果 光合成 蒸散抑制 水利用率 気孔コンダクタンス SPACモデル  
木部圧ポテンシャル

### 1. 研究開始当初の背景

植物の葉の濡れは、降雨のみならず、夜間における水蒸気の凝結（結露）や葉の水孔からの排水、および昼間における温室での細霧冷房等によっても頻繁に発生し得る現象である。それにもかかわらず、「葉の濡れ」については、植物生産に密接に関わる植物近傍の環境、生理生態反応、および水利用率の観点から議論された経緯はほとんど見当たらない。一方、植物環境系の輸送プロセスと植物生産の研究に取り組んできた申請者たちは、土壌が極度に乾燥した黄河上流域の乾燥地畑作圃場において、夜間に空気中の水蒸気凝結（結露）に起因する葉の濡れを観察し、さらに濡れが続く午前中は葉が萎れず、水ストレスによる気孔閉鎖も起きずに光合成が活発に保たれることを認めた(図1) (Yasukake, Kitano *et al.*, 2006; *Biologia*)。すなわち、「葉の濡れ」は植物生産における戦略的優位性を持つ可能性を示唆した。

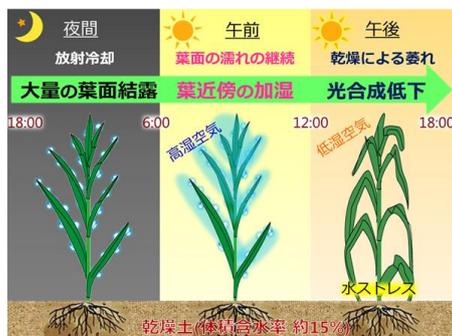


図1 トウモロコシに対する葉面結露の消長とその影響の模式図。

### 2. 研究の目的

葉面の濡れを引き起こす「水蒸気の凝結」、「水孔からの排水」等を「Air irrigation」として新たに定義付けし、その有効利用を目指した以下の課題達成を目的とした(図2)。

#### (1) Air irrigation 効果の物理的評価

Air irrigation によって、葉の極近傍は高い湿度環境が形成されると思われる。そこで、Air irrigation 条件下において、葉面境界層の湿度分布を評価するとともに環境側の蒸散要求度の変化を明らかにする。また、空気中の水蒸気凝結に起因する Air irrigation の発生プロセスについても解明する。

#### (2) Air irrigation 効果の生理生態的評価

Air irrigation の発生による葉周辺の環境変化が、Water relations (水関係; 蒸散速度, 気孔開度, 水ポテンシャルなど) に及ぼす影響、さらに、気孔開度等が直接影響する光合成速度に及ぼす影響を個葉および個体レベルで明らかにする。

#### (3) 植物生産における Air irrigation 効果の有効利用の検討

乾燥地灌漑畑では、夜間の結露と水孔からの排水による葉の濡れ (Air irrigation) が、植物に対する過度の蒸散要求度を緩和し、日中

の気孔閉鎖とそれに伴う光合成低下の回避に貢献する可能性を検証する。また、植物の水利用効率の観点から、Air irrigation の水資源としての価値も検証する。

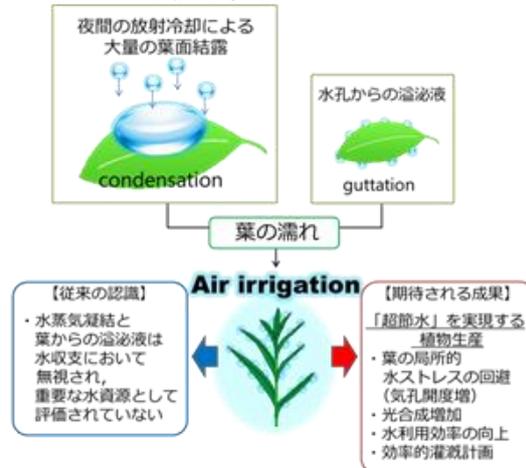


図2 Air irrigation 効果の模式図。

### 3. 研究の方法

材料植物として、ビニルハウスにおいてマサ土でポット栽培されたトウモロコシ (*Zea mays* L. 'P2307') を用い、土壌水分を黄河上流域の乾燥地畑作圃場で観測された体積含水率 8% = pF 3.8 程度の乾燥状態に維持した。トウモロコシの葉に蒸留水を十分に噴霧した Wet 条件 (Air irrigation 状態) および葉を濡らさない Unwet 条件のそれぞれについて下記の (1) ~ (4) の実験を行い、2 つの条件下での結果を比較するによって、Air irrigation 効果を定量的に評価した。

#### (1) 葉面境界層内の水蒸気濃度の測定:

図3に示すように、葉面境界層内の空気を、細管を通してサンプルチャンバー内にゆっくり吸引し、チャンバーに内蔵された温湿度センサ (HMP120, Vaisala) の測定値を用いて葉面境界層内の水蒸気濃度 (絶対湿度) を評価した。事前に、濡れた濾紙表面に接する空気を吸引し、濾紙面の温度から算出した飽

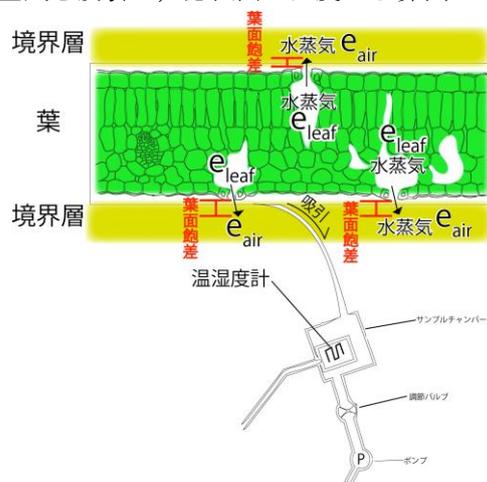


図3 葉面境界層内の水蒸気濃度分布計測の模式図。

和水蒸気濃度とほぼ一致したことから、この方法が濡れた湿面に接する気層の水蒸気濃度を評価できることを確認した。

(2) 個葉の蒸散、光合成、気孔コンダクタンス、水利用効率の測定：

個葉のガス交換の測定には、LED 人工光源を内蔵したリーフチャンバを用いた携帯型光合成蒸散測定装置 (LI-6400XT, LI-COR 社) を使用した。リーフチャンバ内の気温を 25°C とし、空気湿度を、Air irrigation 条件を想定した「高湿空気」飽差 5hPa (RH:84%) 条件および乾燥地の葉の濡れがない場合を想定した「低湿空気」飽差 20hPa (RH:37%) 条件に設定した。また、土壌水分条件として、乾燥地の水分状態に近い「乾燥土」(体積含水率 15%) と十分に灌漑された状態である「湿潤土」(体積含水率 60%) を設定した。すなわち、「低湿空気/乾燥土」、「高湿空気/乾燥土」、「低湿空気/湿潤土」、「高湿空気/湿潤土」の 4 処理区を設けて測定した。

(3) 植物個体のガス交換 (蒸散、光合成、水利用効率) の測定：

植物個体のガス交換に対する Air irrigation 効果を評価するために、図 4 に示すような開放型の植物個体チャンバー計測システムを作製した。開放型の植物個体チャンバーシステムでは、流入空気と流出空気の水蒸気濃度差および二酸化炭素濃度差を測定することにより蒸発散速度  $ET$  および純光合成速度  $P_n$  が評価される。流入空気および流出空気のいずれか一方をバルブの切り替えによってエアポンプ (MV-6005VP, E.M.P Inc.) で吸引し、温湿度計 (HMP60, Vaisala) で気温および相対湿度を計測した後、二酸化炭素濃度分析器 (LI-820, LI-COR Inc.) で二酸化炭素濃度を計測した。

植物個体チャンバーは、高さ 1.2 m、幅 0.5 m、奥行き 0.6 m のアクリル製で、光源としてチャンバー上に LED (LLM031, Stanley Electric Co., Ltd.) を 10 個設置し、植物個体の上方から光を照射した。光源の高さは、チャンバー天井より 5~35cm の間で調節が可能であり、高さに応じた光強度の制御が可能である。

また、植物の茎基部に茎内流量計 (SGB16-WS by Dynagage, Dynamax Inc.) を取り付け、葉からの蒸散により発生する茎内水流量を測定し、蒸散速度とした。また、熱電対および温湿度計 (おんどとり TR-72Ui, T&D) により、葉温  $T_L$  および葉の極近傍空気の水蒸気圧  $e_L$  を 3 点 (最大展開葉の先端から 7.5, 30 および 50 cm) で測定した。さらに、チャンバー内高さ 50, 75 および 100cm の位置に、植物の葉と同様の角度に固定した濡れセンサー (LWS, Decagon Devices, Inc.) を 3 個設置して葉の濡れを測定した。

この植物個体チャンバー計測システムを用いて、霧吹きで葉の表面および裏面に蒸留

水を十分噴霧することにより全ての葉を濡らした場合 (Wet 処理区) および葉の濡れが無い場合 (Unwet 処理区) における植物個体のガス交換特性を測定した。

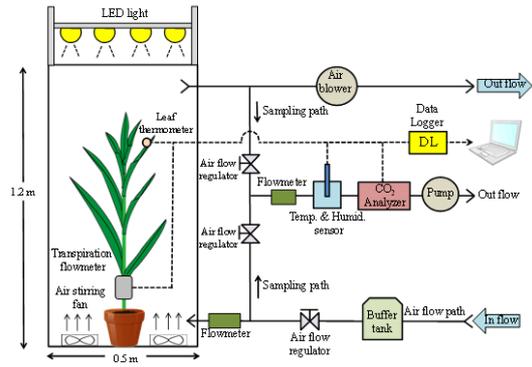


図 4 植物個体チャンバーの模式図。

(4) SPAC モデルによる植物個体の水ポテンシャルの動態の評価：

植物個体の水分状態に対する Air irrigation 効果を評価するために、図 5 に示す土壌 - 植物 - 大気連続体 (SPAC) における水分動態を再現する SPAC モデルを構築した。SPAC モデルは土壌、根茎部および葉を表す 3 つの貯水タンクにより構成され、葉からの蒸散に駆動される蒸散流により水分輸送が生じる。土壌タンク、根茎タンク、葉タンクの水位が、それぞれ土壌の水ポテンシャル ( $\psi_S$ )、木部圧ポテンシャル ( $\psi_X$ )、葉の水ポテンシャル ( $\psi_L$ ) を表し、根茎タンクおよび葉タンクのそれぞれの水収支に基づいて、木部圧ポテンシャル ( $\psi_X$ ) と葉の水ポテンシャル ( $\psi_L$ ) の変動は (1) 式と (2) 式で表される。

$$\frac{d\psi_X}{dt} = \frac{1}{C_X} [K_X(\psi_S - \psi_X) - K_L(\psi_X - \psi_L)] \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_L}{dt} = \frac{1}{C_L} [K_L(\psi_X - \psi_L) - Tr] \quad (2)$$

ここで、 $C$  は貯水タンクのキャパシタンス、 $K$  はタンク間の通水コンダクタンス、 $Tr$  は蒸散速度であり、下付き文字 X および L はそれぞれ木部および葉を表す。これらの 1 次遅れの連立微分方程式を 4 次のルンゲ・クッタ法により解いた。その際、通水コンダクタンス  $K$  は、トウモロコシを対象にした Yasutake *et al.* (2011) の実測結果に基づいて流量  $F$  に正比例して変化する場合、および流量に依存せ

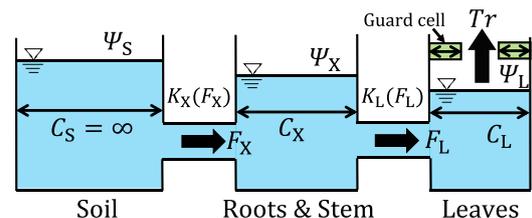


図 5 土壌 - 植物 - 大気連続体における水分動態を再現する SPAC モデルの模式図。

ず一定値にした場合を採用した。また、蒸散速度  $Tr$  は、ステップ状に入力し、植物個体チャンバでの実測結果に基づいて、葉の濡れによって  $Tr$  が 50% 減少することとした。

#### 4. 研究成果

(1) 葉面飽差に対する Air irrigation 効果：

図 6 に、濡れあり葉および濡れなし葉の光照射下（光合成有効光子束密度  $PPFD=500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）における表裏面の葉面境界層内水蒸気密度分布を示す。気孔がより多く分布し蒸散がより盛んな裏面において水蒸気濃度は高く、葉の濡れによって葉面飽差が約 4 分の 1 程度に低下したことから、Air irrigation 効果によって、蒸散の駆動力（葉面飽差）が抑制されることを示唆した。

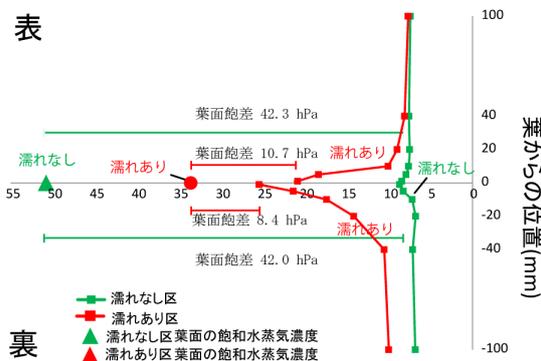


図 6 濡れが有る葉と無い葉の葉面境界層における水蒸気濃度分布。

(2) 個葉のガス交換と水利用効率に対する効果：

図 7 に光強度が  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （圃場における 7 月の晴天日の 9~11 時の平均  $PPFD$ ）のときの蒸散速度、光合成速度および水利用効率を示す。乾燥土において、葉近傍の空気が高湿になることで蒸散が抑制されるが、乾燥土条件下においても光合成速度が上昇し、その結果として植物の水利用効率は、低湿空気条件下の湿潤土よりも向上することが確認された。これらのことから、根に吸水させるために土壤に多量の灌水を行なわなくとも、自然発生の葉の濡れによる葉面近傍の湿度上昇が、植物を好適な水分状態にし、光合成を増加させ、水利用効率を高める効果をもたらすことが示唆された。

(3) 植物個体のガス交換と水利用効率に対する効果：

図 8 に植物個体チャンバーにより測定した、晴天日の光強度に相当する  $PPFD 1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  条件下での Wet および Unwet における葉面飽差  $e_L - e_A$ 、蒸散速度  $Tr$ 、葉コンダクタンス  $G_L$  および光合成速度  $P_n$ 、水利用効率  $WUE = P_n / Tr$  を示す。Wet においては、葉の濡れによって  $e_L - e_A$  は著しく減少して葉近傍の湿度環境に大きな改善が見られた。その結果

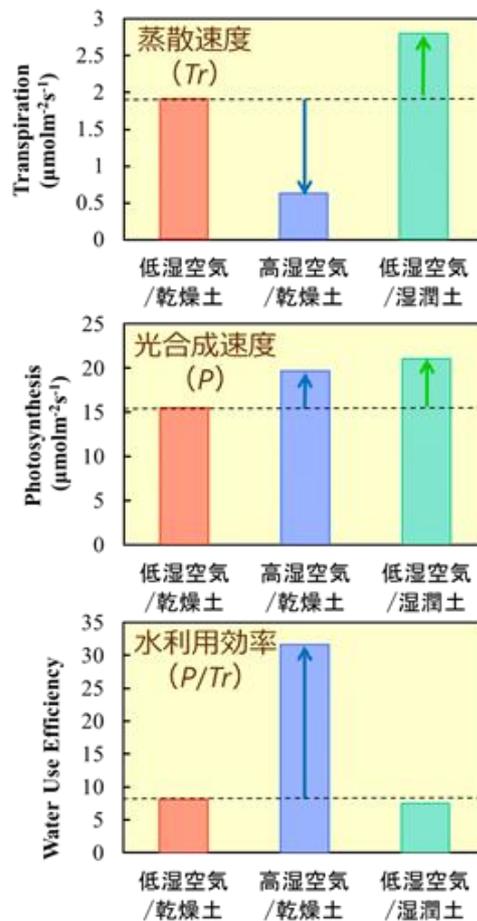


図 7 異なる空気湿度と土壤水分条件下における個葉の蒸散速度、光合成速度、および水利用効率 ( $PPFD 1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )。

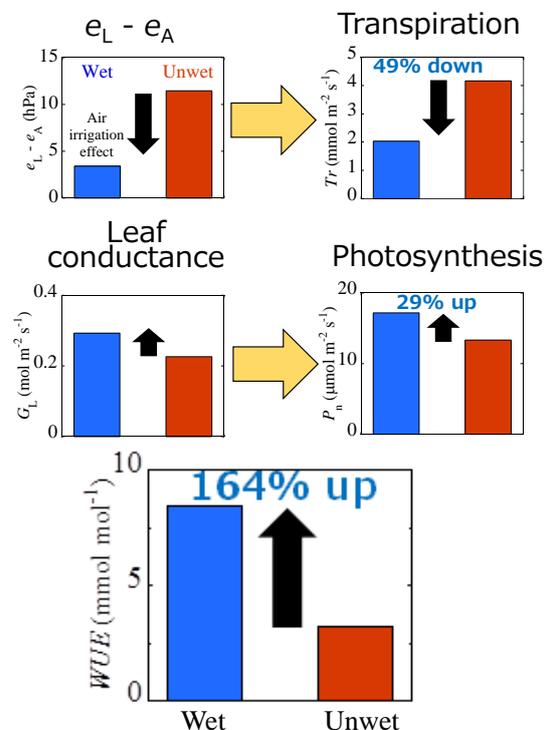


図 8 濡れが有る植物個体および無い植物個体における葉面飽差 ( $e_L - e_A$ )、蒸散速度 ( $Tr$ )、葉コンダクタンス ( $G_L$ )、光合成速度 ( $P_n$ )、および水利用効率 ( $WUE$ )。

Wet における  $Tr$  は Unwet の 49% に抑制された。  $e_L - e_A$  および  $Tr$  が共に大きく減少したため、これらの比により評価される  $G_L$  は、Wet で Unwet より高い値を示した。  $G_L$  の増加により葉のガス交換速度が上昇し、  $P_n$  は Wet において 29% 増加した。  $Tr$  が減少し、  $P_n$  も増加したため、  $WUE$  には 164% もの向上効果が確認された。  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の光強度下でも同様の効果が見られたものの、暗黒条件下においては植物のガス交換に対する Air irrigation 効果は確認されなかった。この結果から、光照射下の植物個体において、葉の濡れによる顕著な Air irrigation 効果がもたらされ、蒸散が抑制とそれに伴う葉コンダクタンスと光合成の上昇によって、水利用効率が著しく改善されることが示唆された。

(4) 植物個体の水ポテンシャルの動態に対する効果：

光強度  $PPFD=1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  で植物個体を照射した時の蒸散速度  $Tr$  のステップ変動に対する木部圧ポテンシャル  $\Psi_x$  の応答を SPAC モデルによって予測した。図 9 に葉の濡れのある場合 (Wet) と濡れない場合 (Unwet) における  $\Psi_x$  の応答を、通水コンダクタンス  $K$  を一定にした場合と蒸散流に比例して変化させた場合について示す。蒸散速度の増加によって、木部圧ポテンシャルは低減するが、その低下は Unwet では 0.25 MPa に達したが、葉の濡れた Wet では低下が 0.1 MPa 以下に抑制された。このことから、葉の濡れが蒸散流を抑制する結果、植物個体の水分状態を改善することが示唆された。また、通水コンダクタンス  $K$  が蒸散流に比例して変動することで木部圧ポテンシャルの低下が抑制されたことから、可変の通水コンダクタンスが植物個体の水分状態の安定性に寄与していることが示唆された。

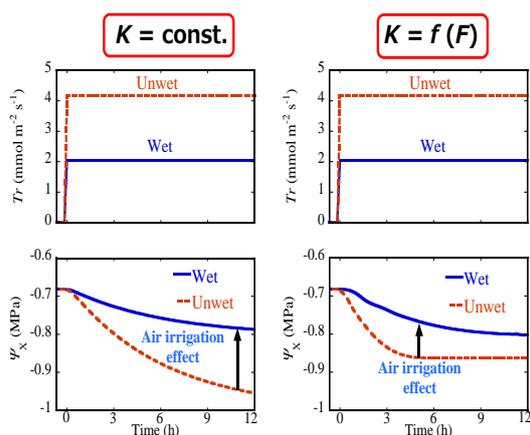


図 9 葉の濡れのある場合 (Wet) と濡れない場合 (Unwet) における  $\Psi_x$  の応答特性。左は通水コンダクタンス  $K$  を一定とし、右は蒸散流に比例して変化した場合。

以上の結果から、葉の濡れによって以下のような Air irrigation 効果が示唆された。

(1) 葉の濡れによって葉面近傍の湿度が上昇して環境側から植物体に対する蒸散要求度が減少し、蒸散による植物体からの水分損失が抑制されることによって、植物体内の水分状態が改善される。

(2) 植物体内野水分状態が改善されることによって、気孔コンダクタンスが上昇し、それに伴って光合成速度も上昇する。

(3) 蒸散が抑制され光合成が促進される結果、水利用効率が顕著に向上する。

乾燥地の畑作圃場では、葉の濡れが毎日のように繰り返し発現していることから、このような Air irrigation 効果を考慮することは、節水農業に資する新たな技術の確立に寄与するものと期待される。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

(1) Yasutake D., Mori M., Kitano M., Nomiya R., Miyoshi Y., Hisaeda D., Cho H., Tagawa K., Wu Y., Wang W. (2015) Night-time leaf wetting process and its effect on the morning humidity gradient as a driving force of transpirational water loss in a semi-arid cornfield. *Biologia* 70(11), 1485-1489. DOI: 10.1515/biologia-2014-0175

[学会発表] (計 8 件)

(1) 丸尾恭輔, 安武大輔, 北野雅治: 葉の濡れによる Air irrigation 効果の評価と応用 1. Air irrigation 効果の仮説, 日本生物環境工学会 2015 年宮崎大会, 2015 年 9 月 8-11 日, 宮崎市。

(2) 丸尾恭輔, 北野雅治, 安武大輔, 田代碧: 植物-環境系の水分動態に対する Air irrigation 効果, 日本農業気象学会九州支部会 2015 年 11 月 13-14 日, 那覇市。

(3) 田代碧, 丸尾恭輔, 安武大輔, 北野雅治: 個葉ガス交換および水利用効率に対する Air irrigation 効果, 日本農業気象学会九州支部会, 2015 年 11 月 13-14 日, 那覇市。

(4) Maruo K., Tashiro M., Yasutake D., Kitano M.: Air irrigation effects of leaf wetting on crop water relations and photosynthesis III. Effects on dynamics of whole plant water relations, International Symposium on Agricultural Meteorology 2016, 14-17 March, 2016, Okayama, Japan.

(5) 安武大輔, 森牧人, 北野雅治, 久枝大祐, 長裕幸, 田川健太, 王維真, 呉月茹: 乾燥地トウモロコシ畑における葉面結露とその発生プロセスの微気象学的解析, 日本農業気象学会中国・四国支部大会, 2014 年 12 月 4-5 日, 山口市。

(6) Kitano M., Yasutake D., Nonoshita M., Yoshizawa S., Miyoshi Y., Mori M., Cho H., Tagawa K., Wu, Y. and Wang W. Air irrigation effects of leaf wetting on crop water relations and photosynthesis. I. A hypothesis of air irrigation effects. International Symposium on Agricultural

Meteorology, International Symposium on Agricultural Meteorology ISAM 2015, 16-20 March, 2015, Tsukuba, Japan.

(7) Yasutake D., Kitano M., Nonoshita M., Yoshizawa S., Miyoshi Y., Mori M., Cho H., Tagawa K., Wu Y. and Wang W. Air irrigation effects of leaf wetting on crop water relations and photosynthesis. II. Nighttime leaf wetting and morning humidity gradient, International Symposium on Agricultural Meteorology ISAM 2015, 16-20 March, 2015, Tsukuba, Japan.

(8) 野々下萌, 吉澤哲, 三好悠太, 安武大輔, 北野雅治: Air irrigation 効果としての葉のガス交換の湿度応答, 日本農業気象学会九州支部・日本生物環境工学会九州支部合同大会, 2014年11月21日, 熊本県合志市.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等:

<http://www2.bpes.kyushu-u.ac.jp/~www-met/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

北野 雅治 (KITANO Masaharu)

九州大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号: 30153109

### (2)研究分担者

安武 大輔 (YASUTAKE Daisuke)

九州大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号: 90516113