

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23380150

研究課題名(和文) 気候変動下の植物生産における夜温の生理生態的評価と省エネルギー管理

研究課題名(英文) The physio-ecological significance of night temperature and its management in agriculture under the climate change

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) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：夜温および夜温管理の生理生態的意義を検証するとともに、新規の夜温管理の方法を提案した。葉菜、果菜、果樹およびチャを対象に、根の物質吸収および果実への転流の呼吸依存性を通じた夜温効果、さらにチャの夜間熱収支および夜温履歴、耐凍温度および耐凍性適合溶質の消長の関係性等を定量的に明らかにした。植物生産における夜温管理の意義を科学的に検証するとともに、新規の夜温管理の方法として、果実への物質集積の動態に基づく省エネ夜温管理、地温不易層埋設パイプを応用した省エネ局所適温管理、チャ芽熱収支解析に基づく凍霜害防止対策を提案し、生理生態的效果と省エネルギー効果等を実証した。

研究成果の概要(英文)：The physio-ecological significance of night temperature and its management in agriculture under the climate change was examined, and new methods for the night temperature management were proposed from the view point of sustainability and profitability. Effects of the night temperature on root absorptive function of vegetables and on translocation into fruits were analyzed quantitatively through their dependences on respiration. Furthermore, for the frost protection of tea, the leaf heat balance and the relationship of the frost tolerance temperature of tea leaves with the experienced night temperature and the concentrations of compatible solutes for frost tolerance was analyzed. From these results, an energy-saving night temperature management based on the translocation into fruits, an energy-saving local temperature management applying the constant soil temperature layer and an effective frost protection method were proposed.

研究分野：農業気象学・生物環境工学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：夜温 気候変動 植物生産 省エネルギー 生理生態 生体計測 耐凍性

1. 研究開始当初の背景

気候変動下においては、寒い夜の減少と暑い夜の増加の傾向が顕著であり、さらに熱波や寒波などによる夜温の急激な変動も、植物の栄養成長、生殖成長、低温順化の生理生態的プロセスに重要な影響を及ぼすことが予想されている。多様な植物生産現場では、夜温の上昇・変動傾向による樹勢の低下、徒長、花芽分化遅延、休眠・発芽・着果不良、早熟、耐凍性獲得不足などの深刻な問題が顕在化しつつある。さらに、石油価格の高騰と温暖化防止の観点から、農業の生産現場において省エネルギーでの夜温管理が喫緊の課題になっている。

2. 研究の目的

本研究では、植物の栄養成長(呼吸、転流、伸長・肥大、養水分吸収)、生殖成長(花芽分化、休眠、着果、果実肥大、果実成熟)および低温順化(耐凍性獲得)に対する夜温の影響を調べる。その際、植物の正常な生理的機能に必要な呼吸(生理的コスト)および「積算有効低温」の視点も導入して解析を進め、気候変動下の植物生産における夜温管理の意義を科学的に検証する。さらに、温暖化防止の観点から求められている持続可能な省エネルギーでの夜温管理の多様な方法を提案し、生理生態的効果と省エネルギー効果を検証する。夜温を気象学、生理生態学および環境調節学の視点から体系的に取り扱う研究は今までにみられない。

3. 研究の方法

葉菜(ホウレンソウ)、果菜(トマト、イチゴ)、果樹(ミカン)およびチャを対象に多様な生理生態的プロセス(果実への物質集積、根の物質吸収、呼吸、肥大・伸長、低温順化等)に対する夜温の影響を調べ、気候変動下の植物生産における夜温管理の生理生態的意義を検証するとともに、新規の夜温管理の方法を提案し生理生態的効果と省エネルギー効果等を検証した。

(1) 大分県果樹試験場(ミカン)、九州沖縄農業研究センター久留米拠点と福岡県糸島市農家(イチゴ)、九州大(ホウレンソウ、トマト)および福岡県農業総合試験場八女分場と鹿児島県茶試験場等(チャ)の生産圃場および施設に実験拠点を設定した。

(2) 果実(ミカン)への物質集積に関しては、図1に示すように、 ^{13}C 炭酸バリウムを用いる ^{13}C 法、ヒートリング法、フルーツチャンバ法等を援用して、果実への師部輸送(師管液、糖)、木部輸送(道管液)、物質(炭素、水)収支、果実の呼吸、光合成、蒸散、肥大、品質、収量等を、異なる夜温管理パターン条件下等で測定した。

(3) イチゴ生産農家(福岡県糸島市)のハウスにおいて、多様な環境要素、特に夜温の動態と花芽分化、果実肥大、可販果収量の経日変化との関係を調べた。

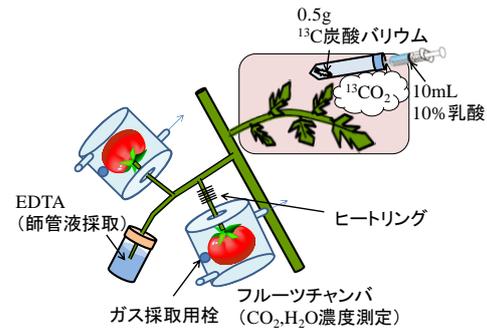


図1 果実の物質集積の評価システム (^{13}C 法, ヒートリング法, フルーツチャンバ法)

(4) 根の物質吸収速度を多様な根域温度、光強度、溶存酸素濃度条件下において測定し、根のイオン吸収の呼吸依存性と蒸散依存性を通じた夜温の影響を調べた。ホウレンソウについては、図2に示す独自に開発したシステムを用いて、根系の水およびイオンの吸収速度と呼吸速度を測定した。トマトについても独自に開発した水耕ベッドを、ビニルハウスに2セット設置し、異なる水耕液条件(温度、濃度)で水とイオン吸収速度の日変化を測定した。

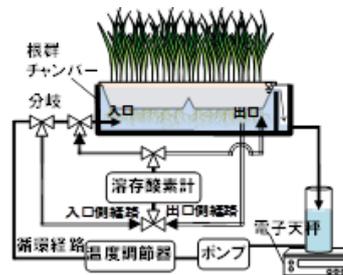


図2 根の水吸収、イオン吸収および呼吸速度の測定システム

(5) 鹿児島県茶業試験場の「やぶきた」と「ゆたかみどり」の茶園から、チャ芽を3日毎に採集し、代表的な対凍性適合溶質であるグリシンベタイン、プロリンおよび糖類(グルコース・フルクトース・スクロース)の定量分析を行うとともに、チャ芽をプログラムフリーザ内で低温処理した後、壊死の程度を目視し、壊死率50%の温度を耐凍温度として対凍性を評価した。さらに、チャ葉近傍の気温データをもとに、摘採前7日間の積算Degree hourで低温および暖温履歴を算出した。その際、低温および暖温基準温度は、品種ごとの耐凍性に基づいて推定した。温度(低温と暖温)履歴および適合溶質の消長と耐凍温度との関係を調べた。

(6) マイクロヒーターを内蔵したチャ葉の模擬様を多数作成し、チャ圃場の夜間の放射冷却時のチャ葉の葉面境界層コンダクタンスの評価方法を確立することによって、チャ葉の熱収支解析を可能にした。さらに、チャ

葉の夜間の熱収支解析によって、チャ葉の夜間の温度形成機構と既存および新規の防霜対策の熱的効果の定量的評価を可能にした。

(7) 上記(1)から(6)で得られた結果に基づいて、以下①～④の夜温管理法を提案し、生理生態的效果と省エネルギー効果等を検証した。

- ①果実の物質(炭素および水)収支に基づく省エネ夜温管理法
- ②潜熱蓄熱材を用いた簡易省エネ夜温管理法
- ③温度が、季節、昼夜を問わず常時植物の適温域に保たれる地温不易層に埋設した地中パイプを用いた局所適温管理法(図3)
- ④チャ芽の耐凍性およびチャ葉の温度形成機構に基づく防霜対策法

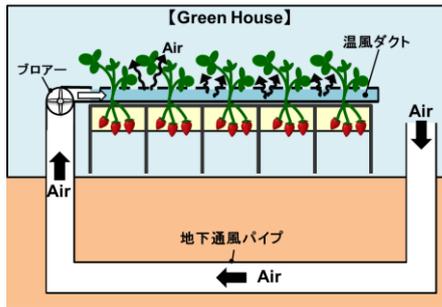


図3 地温不易層の地中パイプと条間配風ダクトを用いた局所適温管理システム

4. 研究成果

(1) 呼吸を抑制したミカン果実への師部輸送が著しく減少したことから、果実への正常な師部輸送に果実呼吸が必要であることを明示し、夜温が果実呼吸を通して果実への師部輸送に影響し得ることを示した。しかしながら、図4に示すように、昼間曇天の場合は、夜間に慣行夜温23°Cに加温しても、果実の師部輸送や肥大は、晴天日に比べて著しく小さく、冬季に多い曇天日には低夜温(13-15°C)で省エネ管理でも、果実への物質集積の観点からは、支障がないことを示唆した。

(2) 慣行夜温23°Cに対して、低夜温13-15°Cでも果実に蓄積される炭素量は大きく、満開後90-120日の30日間は低夜温(17°C)で省エネ管理しても、高品質果実生産が可能であること等を実証した。

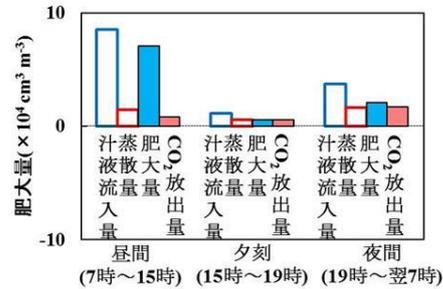
(3) 相変化の温度を夜温設定温度に応じて任意に設定可能で、相変化に伴う吸熱・発熱を利用する潜熱蓄熱材をハウスミカンの樹間に宙づりにすることによって、約20%の省エネ夜温管理が可能であり、潜熱蓄熱材の減価償却期間が約4年であることを示した。

(4) イチゴ生産農家においては、残暑をとまなう秋季の高夜温による花芽分化の遅延、冬季の低夜温によるイチゴ株の休眠がもたらす花芽不足、低日照低夜温による光合成と果実肥大の抑制が、可販果収量を著しく低下させていること等、夜温管理の重要性を明らかにした。

(5) 上記の生産農家での調査結果に基づい

て、地温不易層地中パイプと条間配風ダクトを用いたイチゴ株近傍の局所周年適温管理法(図3)を導入した結果、図5に示すように冬季夜間の暖房負荷を半減でき、図6に示すように、収量も1.3倍に増加できることを実証した。

曇天日(3/7~3/8)



晴天日(3/17~3/18)

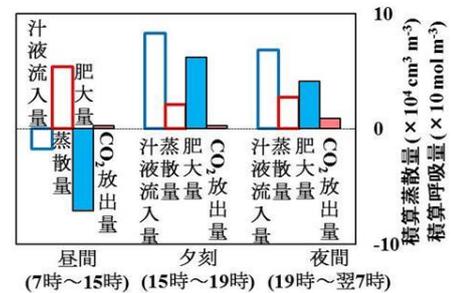


図4 晴天日と曇天日のミカン果実の汁液流入量、蒸散量、肥大量および炭酸ガス放出量の経時変化

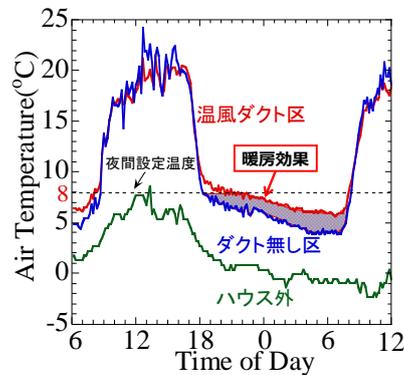


図5 地温不易層を用いた局所適温管理システム(図3)の省エネ効果

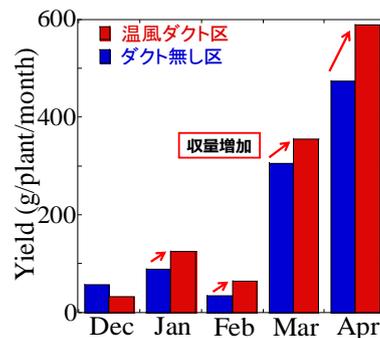


図6 地温不易層を用いた局所適温管理システム(図3)の省エネ効果

(6) 根系の呼吸を抑制した場合、図7に示すように養分吸収が著しく低下することから、根の正常な養分吸収には、根の呼吸が必要であることを明示した。

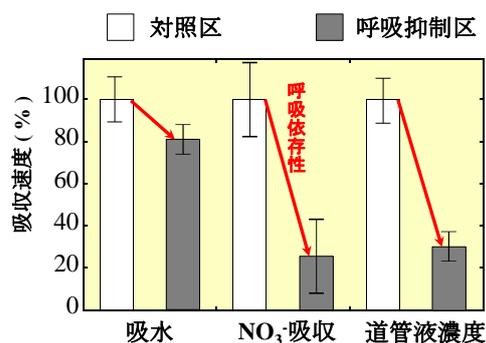


図7 根の水吸収およびイオン吸収に対する呼吸抑制の影響

(7) ハウスでのトマト水耕栽培の根系において、主に蒸散に支配される昼間の養分吸収と、呼吸に依存する夜間の養分吸収を明らかにした。さらに、地温不易層に埋設した地中水パイプを通して水耕液を循環させることによって、根域温度の周年適温管理を省エネで可能にした。

(8) チャの耐凍性獲得に最も影響しているのは糖類（フルクトース・グルコース・スクロース）であることを確認した。耐凍性獲得の低温基準温度および耐凍性消失の暖温基準温度をそれぞれ、「やぶきた」で7℃および17℃、「ゆたかみどり」で5℃および15℃に設定することで、低温履歴・暖温履歴を反映した積算温度を評価した。また、これらの積算温度の増減が、耐凍温度で評価した耐凍性獲得過程および消失過程によく対応すると共に、チャ芽の糖類の消長もこれらによく対応することを明らかにした。これらの結果から、チャ芽の低温履歴および暖温履歴から耐凍温度を予測できる可能性を示唆した。

(9) チャ葉の熱収支解析によって、各種の凍霜害防止策の葉温上昇機構と熱的效果の定量的評価が可能となった。さらに、最も普及している凍霜害防止策である防霜ファンの他に、暖風を茶株面に供給する新規の凍霜害防止策の熱的效果とその最適化を可能にした。

以上のように、本研究の成果は、温暖化のもとでの植物生産における夜温の生理生態的評価と管理に関する体系的な学術的意義を有するとともに、気候変動（温暖化など）に適応する農業技術の確立に寄与する実用的意義を有している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 26 件)

- ① Miyoshi, Y., Hidaka, K., Okayasu, T., Hirano, O., Yasutake, D. and Kitano, M. Application of the Constant Soil

Temperature Layer for Energy-saving Control of the Local Environment of Greenhouse Crops. I. Local Control of the Ambient. Environment of Strawberry. Environmental Control in Biology, 査読有, 51, 2013, pp. 89-94.

DOI: 10.2525/ecb.51.89

- ② Yano, T., Ohara, M., Matsubara, K., Tamanoi, A., Araki, T., Setoyama, S., Yasunaga, E. and Kitano, M. Effect of Light Condition on Water and Carbon Balance in Satsuma Mandarin (Citrus unshiu Marc.) Fruit. Environmental Control in Biology, 査読有, 51, 2013, pp. 49-56.

DOI: 10.2525/ecb.51.49

- ③ Hidaka, K., Dan, K., Imamura, H., Miyoshi, Y., Takayama, T., Sameshima, K., Kitano, M. and Okimura, M. Effect of Supplemental Lighting from Different Light Sources on Growth and Yield of Strawberry. Environmental Control in Biology, 査読有, 51, 2013, pp. 41-47.

DOI: 10.2525/ecb.51.41

- ④ Chadirin, Y., Sago, Y., Hidaka, K., Wajima, T. and Kitano, M. Application of Temperature Stress to Root Zone of Spinach III. Effective Method for Short Term Application of Low and High Temperature Stress to Roots. Environmental Control in Biology, 査読有, 50, 2012, pp. 199-207.

DOI: 10.2525/ecb.50.199

- ⑤ Yano, T., Kawano, T., Ohara, M., Sato, Y., Kotegawa, R., Kagawa, H., Setoyama, S., Yokota, N., Nomiyama, R., Araki, T., Yasunaga, E., Eguchi, T. and Kitano, M. Water and Carbon Balance in Developing Fruit of the Satsuma Mandarin (Citrus unshu Marc.). Environmental Control in Biology, 査読有, 50, 2012, pp. 189-198.

DOI: 10.2525/ecb.50.189

- ⑥ Nomiyama, R., Sago, Y., Yasutake, D. and Kitano, M. Application of a Kinetic Model for Analysis of Salt Absorption of Crop Roots under the Salinized Condition. Environmental Control in Biology, 査読有, 50, 2012, pp. 153-161.

DOI: 10.2525/ecb.50.153

- ⑦ Hidaka, K., Ito, E., Sago, Y., Yasutake, D., Miyoshi, Y., Kitano, M., Miyachi, K., Okimura, M. and Imai, S. High Yields of Strawberry by Applying Vertically-Moving Beds on the Basis of Leaf Photosynthesis. Environmental Control in Biology, 査読有, 50, 2012, pp. 143-152.

- DOI: 10.2525/ecb.50.143
- ⑧ Zushi, K., Kajiwara, S., Matsuzoe, N. Chlorophyll a fluorescence OJIP transient as a tool to characterize and evaluate response to heat and chilling stress in tomato leaf and fruit. *Scientia Horticulturae*, 査読有, 148, 2012, pp. 39-46.
DOI: 10.1016/j.scienta.2012.09.022
- ⑨ Chadirin, Y., Hidaka, K., Sago, Y., Wajima, T. and Kitano, M. Application of temperature stress to roots of spinach II. Effect of the high temperature pre-treatment on quality. *Environmental Control in Biology*, 査読有, 49, 2011, pp. 157-164.
DOI: 10.2525/ecb.49.157
- ⑩ Yasutake, D., Ishikawa, M., Mori, M., Miyuchi, K. and Kitano, M. Development of a supersonic pan-evaporimeter for dynamic analysis of evaporative demand in a greenhouse. *Journal of Agricultural Meteorology*, 査読有, 67, 2011, pp. 193-198.
DOI: 10.2480/agrmet.67.3.5
- ⑪ Chadirin, Y., Hidaka, K., Takahashi, T., Sago, Y., Wajima, T. and Kitano, M. Application of temperature stress to roots of spinach I. Effect of the low temperature stress on quality. *Environmental Control in Biology*, 査読有, 49, 2011, pp. 133-139.
DOI: 10.2525/ecb.49.133

[学会発表] (計 87 件)

- ① Kitano, M., Takamura, S. and Miyoshi, Y. Sustainable control of the local environment of greenhouse crops by applying constant soil temperature layer. I. Improvement of root zone temperature in soilless culture. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2014*, 18 March, 2014, Sapporo.
- ② Miyoshi, Y., Hidaka, K. and Kitano, M. Sustainable control of the local environment of greenhouse crops by applying constant soil temperature layer. II. Improvement of shoot environments. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2014*, 18 March, 2014, Sapporo.
- ③ Maruo, K., Miyoshi, Y., Nakazono, K., Yoshioka, T., Muroya, A., Matsuo, K. and Kitano, M. Heat balance analysis of a tea leaf for evaluating frost protection. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2014*, 18

March, 2014, Sapporo.

- ④ 堂脇翔太、野見山綾介、山田あすか、佐合悠貴、北野雅治 根の養水分吸収プロセスの呼吸依存性に関する研究 日本農業気象学会 2014 年全国大会、2014 年 3 月 18 日、札幌市
- ⑤ Maruo, K., Kitano, M., Eguchi, T., Zushi, K., Nakazono, K., Yoshioka, T., Katsuda, M., Tokuda, A. and Matsuo, K. Cold acclimation of tea plants and accumulation of compatible solutes. *ICOS2013*, 6 November 2013, Shizuoka.
- ⑥ Kitano, M., Nomiyama, R., Sakuragi, T. and Sago, Y. Application of environmental resources in watershed for sustainable and profitable agriculture II. A kinetic model of root ion absorption. *Third international seminar of JSPS Core-to-Core Program SOWAC project 2013*, 7 August, 2013, Hanoi.
- ⑦ Yasunaga, E., Yano, T., Araki, T., Setoyama, S., and Kitano, M. Effect of Environmental Condition on Xylem and Phloem Transport of Developing Fruit. *The 2013 IFAC Bio-Robotics Conference*, 27 March, 2013, Sakai.
- ⑧ Hidaka, K., Dan, K., Imamura, H., Miyoshi, Y., Takayama, T., Sameshima, K., Okimura, M. and Kitano, M. Investigation of supplemental lighting with different light source for high yield of strawberry. *The 2013 IFAC Bio-Robotics Conference*, 27 March, 2013, Sakai.
- ⑨ 北野雅治、野見山綾介、日置洋平、瀬戸山修仁、佐合悠貴、矢野拓、安永円理子、荒木卓也 ウンシュウミカン果実への物質集積に関する環境生理学的研究 第 7 報 シンク・ソース関係のフレキシブルな動態 生物環境工学会 2012 年度大会、2012 年 9 月 5 日、文京区
- ⑩ 矢野拓、松原公明、小原誠、三好悠太、荒木卓也、安永円理子、北野雅治 ウンシュウミカン果実への物質集積に関する環境生理学的研究 第 6 報 ハウスミカン果汁発現期以降の夜温の影響 生物環境工学会 2012 年度大会、2012 年 9 月 5 日、文京区

[その他]

- ① *International Conference on O-CHA(Tea) Culture and Science* ベストポスター賞受賞
Maruo, K. and Kitano, M. Heat balance analysis of a tea leaf for evaluating effectiveness of frost protection. November, 2013.

- ② 日本生物環境工学会論文賞受賞
Sago, Y., Yasutake, D., Hidaka, K.,
Yasunaga, E., Eguchi, T., Yoshida, S.
and Kitano, M. Kinetics of root ion
absorption affected by environmental
factors and transpiration. September,
2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野 雅治 (KITANO Masaharu)
九州大学・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)
高知大学・自然科学系・准教授
研究者番号：90516113

荒木 卓哉 (ARAKI Daisuke)
愛媛大学・農学部・准教授
研究者番号：10363326

吉田 敏 (YOSHIDA Satoshi)
九州大学・生物環境利用推進センター・准
教授
研究者番号：90191585

江口 壽彦 (EGUCHI Toshihiko)
九州大学・生物環境利用推進センター・准
教授
研究者番号：40213540

安永 円理子 (YASUNAGA Eriko)
東京大学・農学生命科学研究科・准教授
研究者番号：00380543

森 牧人 (MORI Makito)
高知大学・自然科学系・准教授
研究者番号：60325496

圖師 一文 (ZUSHI Kazuhumi)
宮崎大学・農学部・准教授
研究者番号：50435377

日高 功太 (HIDAKA Kota)
独立行政法人農業・食品産業技術総合研究
機構・九州沖縄農業研究センター・研究職
員