

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18763

研究課題名(和文)イチゴの安定花芽誘導および同化産物の転流促進を目指した局所温度制御技術の開発

研究課題名(英文) Development of local-temperature control technique for stable flowering and promoting the photosynthate translocation to the fruits in strawberry plants

研究代表者

日高 功太 (Hidaka, Kota)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・九州沖縄農業研究センター・主任研究員

研究者番号：80547232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：気候変動下(温暖化, CO<sub>2</sub>濃度上昇)のイチゴ生産で懸念される花芽分化遅延の解決, CO<sub>2</sub>濃度の上昇による光合成促進を増収につなげるための転流動態の解明とそれに基づく転流促進を検討した。クラウン部(成長点)の局所冷却によって高温下での花芽の安定誘導が可能になった。また, イチゴの転流動態の可視化に初めて成功するとともに, 転流に対する生育ステージや葉位の影響を明らかにした。得られた転流の知見に基づきクラウン部や果実を局所的に加温することで, 果実への光合成産物の転流促進が示唆された。これらの成果は, 気候変動下におけるイチゴの高収益生産に資するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Climate change (e.g., global warming, raising CO<sub>2</sub> concentration) is predicted to influence on strawberry production. Raising air temperature will cause delayed flower bud differentiation, and raising CO<sub>2</sub> concentration will cause promotion of leaf photosynthesis. To resolve this flowering delay and promote the photosynthate translocation to fruits, we applied the local-temperature control to strawberry plants. By cooling treatment to the crown, which is the apical meristem, of strawberry, flower bud differentiation was stably induced. Furthermore, we firstly succeeded to visualize the dynamics of photosynthate translocation to fruits, and also clarified the effects of growth stage and leaf position on translocation. By the local-temperature control based on these translocation results, promotion of photosynthate translocation to the fruits was suggested. It can be considered that these results contribute to the highly profitable production of strawberries under the climate change.

研究分野：生物環境調節学、施設園芸学

キーワード：イチゴ 局所温度制御 クラウン温度制御 転流 花芽分化

### 1. 研究開始当初の背景

気候変動下(温暖化、CO<sub>2</sub>濃度上昇)のイチゴ生産においては、秋季の高温による花芽分化の遅延と、それがもたらす早期収量の低下が常態化することが懸念されるが、他方では、CO<sub>2</sub>濃度の上昇による葉の光合成促進が期待される。したがって、CO<sub>2</sub>濃度の上昇を飛躍的な増収につなげるためには、シンクとなる花芽の安定誘導およびシンク果実への光合成産物の転流促進を両立し得る温度制御技術の開発が必須となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、クラウン部(成長点)の局所冷却による高温下での花芽の安定誘導を検討するとともに、CO<sub>2</sub>濃度の上昇による光合成促進を飛躍的な増収につなげるために、植物環境系輸送プロセスの動態解析(ソース・シンク物質輸送の温度変化等)に基づく葉および果実の局所加温による果実への光合成産物の転流促進を検討する。これらの研究成果として、気候変動下でのイチゴの高収益生産に資する適応策を提示する。

### 3. 研究の方法

本研究は、以下の内容で構成される。

- 課題Ⅰ. 局所温度制御による高温下での花芽の安定誘導の検討
- 課題Ⅱ. ソース・シンク間での炭素・水の動態解析に基づく転流機作の解明
- 課題Ⅲ. 局所温度制御によるシンクへの光合成産物の転流促進の検討

課題Ⅰでは、九州沖縄農業研究センターにある太陽光利用型植物工場において、温暖化を想定した高昼温・高夜温環境下(気象庁のアメダスデータおよび地球温暖化予測情報を基に温度条件を設定)でクラウン部冷却による花芽分化への効果や収量性への影響を検証した。

課題Ⅱでは、ソース・シンク間での炭素動態を解明するために、果実の生育ステージ(開花、緑熟、白熟、着色、完熟)や葉位が同化産物の転流に及ぼす影響を<sup>13</sup>Cおよび<sup>11</sup>Cトレーサー法を用いて調査した。

課題Ⅲでは、シンク果実への光合成産物の転流促進を目的として、冬季における植物体全体または局所的な加温処理が果実への光合成産物の転流に及ぼす影響について<sup>13</sup>C法を用いて調査した。

### 4. 研究成果

(1) 秋季の高気温環境下における花芽の安定誘導を目的として、高気温環境下でのクラウン部(成長点)の局所冷却が花芽分化や開花特性、早期収量に及ぼす影響を調査した。

一季成り性品種「福岡S6号(あまおう)」を用いて太陽光型植物工場での試験を行った。高気温環境の条件については、地球温暖化予測情報第8巻(気象庁)を参考にして、昼温

30℃および夜温27℃に設定した。設定した施設内気温(昼温30℃、夜温27℃)になるように、暖房機による加温や換気を行い、処理は8月19日から9月30日まで行った。

高気温環境下における安定花芽誘導のためのクラウン温度制御については、イチゴのクラウン部に設置した二連チューブ内の水温をチラーで制御することで実施し(図1)、二連チューブ内の水温を25℃に制御するクラウン25℃区、20℃に制御する20℃区、15℃に制御する15℃区、10℃に制御する10℃区の4処理区を設定するとともに、対照としてクラウン温度制御を行わない「無処理区」を設定した。クラウン温度制御は、定植後の8月19日から9月30日まで行った。



図1 クラウン温度制御の様子

クラウン温度制御が花芽分化に及ぼす影響を図2に示す。本研究では、花房分化期を花芽分化期とした。無処理区は、9月28日に花芽が分化した。10℃区は、8月24日で肥厚初期、9月14日で花芽が分化した。その後、9月21日に雄ずい形成期、9月28日に花を形成した。15℃区は、8月31日で肥厚初期、9月15日で花芽が分化した。その後、9月21日に雄ずい形成期、9月28日に雌ずい形成期をむかえた。20℃区は、9月7日に肥厚初期、9月19日に花芽が分化した。9月28日に雄ずい形成期をむかえた。25℃区は、9月21日に肥厚中期、9月27日に花芽が分化した。以上のことからクラウン冷却処理によって、花芽分化が早くなり、特に、10℃区および15℃区は無処理区よりも約2週間ほど分化が早くなった。

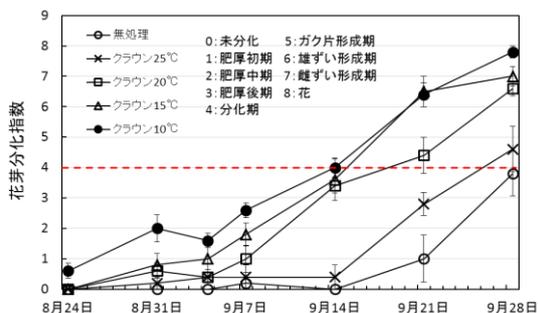


図2 クラウン温度制御が花芽分化に及ぼす影響

表1にクラウン温度制御が頂果房および一次腋果房の開花特性に及ぼす影響を示す。頂

果房の開花日については、10℃区は無処理区より6日早く、15℃、20℃区は約3日早くなった。一次腋果房の開花日については、10℃区、15℃区が無処理区より7日早く、20℃区は無処理区より17日早かった。25℃区は無処理区と同程度であった。10℃区では頂果房の出蕾、開花日が無処理区より早かったにもかかわらず一次腋果房の出蕾日は無処理区より4日しか早くなかった。このような10℃において、一次腋果房の出蕾・開花日が20℃より遅くなった理由としては、クラウンの冷却温度が20℃区より10℃区の方が低いことによって、生育が遅くなったため出蕾、開花が遅くなったと考えられる。

表1 クラウン温度制御が開花に及ぼす影響

処理区	頂果房		一次腋果房	
	出蕾日	開花日	出蕾日	開花日
無処理区	11月5日	11月16日	1月25日	2月18日
25℃	11月4日	11月16日	1月25日	2月17日
20℃	11月1日	11月13日	1月9日	2月1日
15℃	10月29日	11月12日	1月16日	2月11日
10℃	10月29日	11月10日	1月21日	2月11日

クラウン温度制御が可販果収量に及ぼす影響を図3に示す。年内の1株あたりの収量は、10℃区で25.7g、15℃区で22.4gと無処理区10.1gの2倍以上となった。1月は25℃区で最も収量が多くなり、10℃および15℃区の収量は他の処理区に比べて少なくなった。2月も1月と同様の傾向を示し、20℃区で多く10℃あるいは15℃区で少なかった。12月から翌年2月の合計収量については、20℃区は最も多くなっており、10℃および15℃区では頂果房が早く出蕾・開花しているにもかかわらず無処理区よりも少なかった。20℃あるいは25℃区で頂果房の花数が多かったことが、1月の収量が多くなったことにつながったと推測された。年内収量が他の処理区と比べて多くなった。10℃および15℃区において、2月までの合計収量が無処理区よりも少なくなった理由としては、クラウン部の冷却温度が低いことによって生育の遅延や抑制が起こったためであると考えられる。

以上の結果から、秋季の高温環境下においても未分化苗定植し、20℃のクラウン冷却処理を実施することで、花芽の安定誘導や年内～2月までの安定生産が可能となることが示唆された。

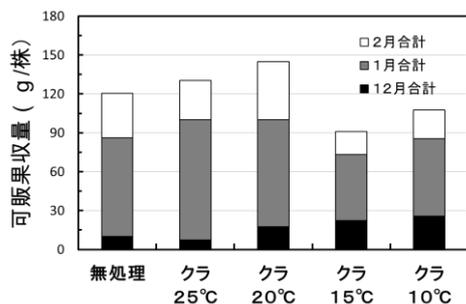


図3 クラウン温度制御が収量に及ぼす影響

(2) ソース・シンク間での炭素動態の解明

を目的として、果実の生育ステージが同化産物の転流に及ぼす影響を調査した。一季成り性イチゴ品種「福岡S6号(あまおう)」を用いて、様々な果実生育ステージにおける同化産物の転流を<sup>13</sup>Cトレーサー法で調査した。開花前(BA)、緑熟期(G)、白熟期(W)、着色期(IR)の4ステージにおいて、光合成産物の転流を調べた結果、各器官への<sup>13</sup>Cの分配率は果実の生育ステージによって異なり(図4)、根への<sup>13</sup>Cの分配率は、開花前54%であったが果実の生育ステージが進むにつれて、緑熟期22%、白熟期7%、着色期1%にまで低下した。クラウンへの分配率については、開花前35%であったが果実の生育ステージが進むにつれて、緑熟期15%、白熟期4%、着色期3%にまで低下した。果実への分配率は、根やクラウンへの分配パターンとは逆に、緑熟期以降、果実の生育ステージが進むにつれて、緑熟期49%、白熟期89%、着色期95%にまで増加した。葉への分配率は、開花前において11%であったが、他の生育ステージでは、葉への分配はほとんどみられなかった。果柄についても緑熟期のみで15%の分配率が確認された。

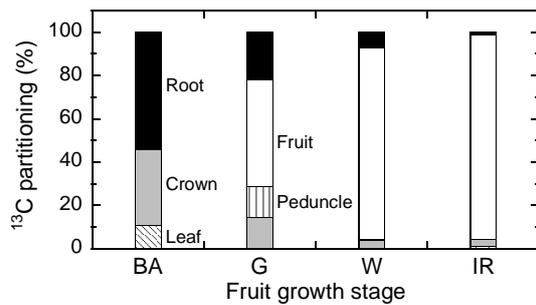


図4 果実生育ステージが<sup>13</sup>C分配率に及ぼす影響

(3) ソース・シンク間での炭素動態の解明を目的として、同化産物の転流を非破壊かつリアルタイムで連続的に定量・可視化が可能なポジトロンイメージング技術(PETIS)を用いて、イチゴ果実への同化産物の動態や、それに対する果実生育ステージの影響について調査した。一季成り性イチゴ品種「福岡S6号(あまおう)」を用いて、PETISによって転流計測を実施した(図5)。

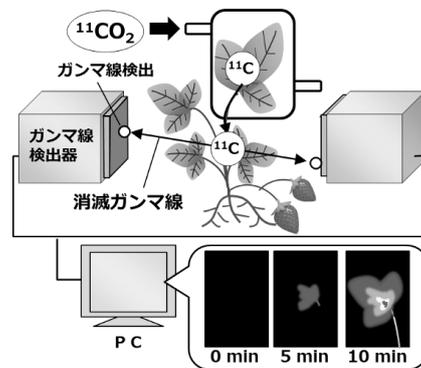


図5 PETISによる同化産物転流の計測

図6にPETISへの植物体の設置の様子を示す。温湿度等の環境制御が可能な人工気象器内に設置されたPETISの対向型のガンマ線検出器の間に植物体を配置し、検出器の視野内に計測対象のイチゴ果実を果房ごと設置した。設置した果実(図6b)の番号:生育ステージの対応は、①:着色期, ②:白熟期, ③:白熟期, ④:緑熟期, ⑤:緑熟期, ⑥:緑熟期であった。PETISに植物体を設置した後、果房直下の展開第4葉をアクリル製のチャンバに封入し、約200 MBqの $^{14}\text{C}$ ガスを葉にフィードした。フィード開始から180分間の撮像を実施した。

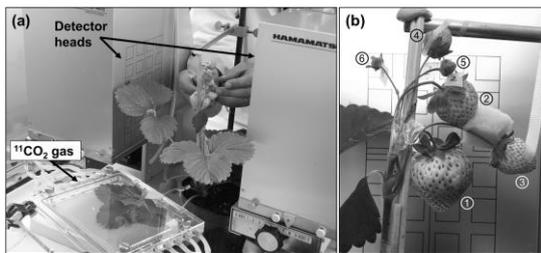


図6 PETISへの植物体設置(a)と設置した果実(b)

図7に $^{14}\text{C}$ フィード後のイチゴ果実への同化産物の動態を示す。葉への $^{14}\text{C}$ フィード後約60分後から果実①および③へ同化産物が流入し、果実④については、約110分後からの流入が確認された。その後、時間の経過とともにこれら果実①, ③, ④へ同化産物が蓄積していく様子を確認された。その他の果実②, ⑤, ⑥への同化産物の流入はみられなかった。

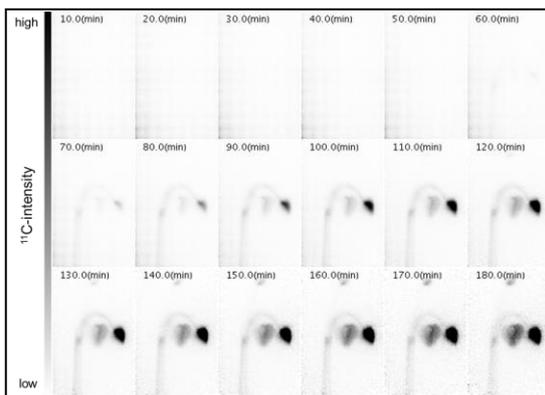


図7 イチゴ果実への同化産物の動態

同化産物の蓄積がみられた果実①, ③, ④への $^{14}\text{C}$ 流入量の経時変化をみた結果(図8), ①, ③, ④の果柄長は21.7, 24.4, 24.0 cmと、果実③の方が①や④に比べて糖の輸送距離が長いにもかかわらず、同化産物の流入量は白熟期の③が最も多くなり、次いで着色期の①, 緑熟期の④の順となった。

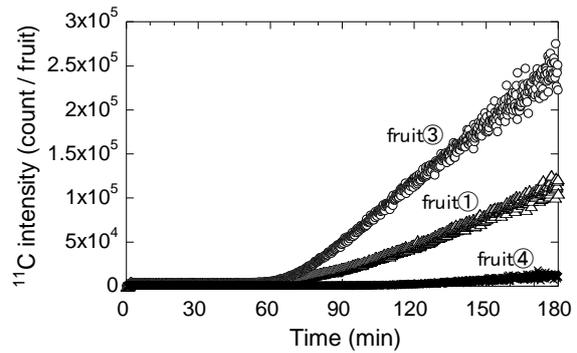


図8 一果あたりの $^{14}\text{C}$ 放射活性の経時変化

果実①, ③, ④への $^{14}\text{C}$ 流入量を果実体積あたりでみると(図9), 白熟期の③が顕著に多く、着色期の①と緑熟期の④が同程度となった。このことから、果実への同化産物の転流は果実生育ステージの影響を受け、特に、白熟期の果実において転流活性が高くなることが示唆された。

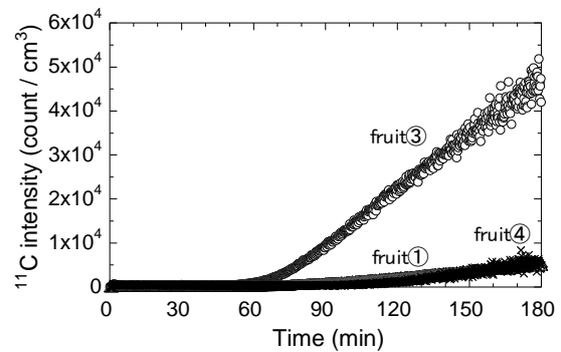


図9 果実体積あたりの $^{14}\text{C}$ 放射活性の経時変化

(4) ソース・シンク間での炭素動態の解明を目的として、PETISを用いて果実への転流に対する葉位の影響を調査した。ソース葉は8枚で、最も新しい葉が1葉、果房直上の葉が3葉、果房直下の葉が4葉、最も古い葉が8葉であり、シンク果実は生育ステージごとに4果で、第1果が赤熟期(fruit 1)、第2果が白熟期(fruit 2)、第3果が2果で緑熟期(fruit 3, fruit 4)となっていた。同一個体における3葉(直上葉), 4葉(直下葉)および8葉(最下葉)からなる葉位別の同化産物の転流動態を180分間撮像した。

図10にPETISによる撮像開始から60分, 120分, 180分後の $^{14}\text{C}$ 分布画像を示す。直上葉, 直下葉, 最下葉をソース葉としたいずれの撮像においても, $^{14}\text{C}$ で標識された同化産物が葉柄, クラウン(根茎)を経由しシンク果実へと転流する動態を確認できた。直上葉, 直下葉では赤熟期であるfruit 1の $^{14}\text{C}$ 放射活性が強く, 最下葉では緑熟期であるfruit 3, fruit 4の $^{14}\text{C}$ 放射活性が強くなっていた。また, 直上葉では $^{14}\text{C}$ がfruit 1全体に均等に送られているのに対し, 直下葉ではfruit 1の上部に優先的に送られていた。同一の果実内部であってもソース葉によって同化産物の転流先が異なる可能性が示唆された。

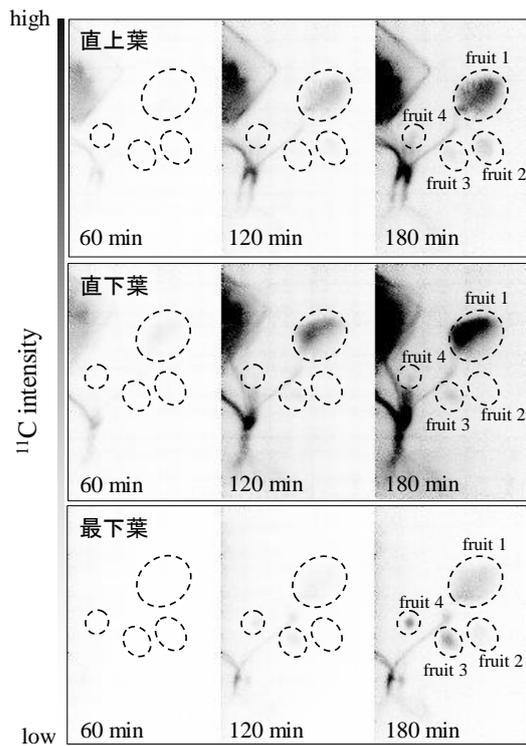


図10 ソース葉位別のシンク果実への転流動態

図11aに<sup>14</sup>C投与180分後の果実1果当たりの<sup>14</sup>C蓄積量を示す。シンク果実への転流量は、直下葉で最も多く、次いで直上葉、最下葉となっていた。ソース葉位によって転流への寄与が異なることが示唆された。図11bに<sup>14</sup>C投与180分後の果実体積当たりの<sup>14</sup>C蓄積量を示す。直上葉、直下葉ではfruit 1の体積当たりの転流量が多くなっていたが、最下葉ではfruit 3, fruit 4の体積当たりの転流量が顕著に多くなっていた。すなわち、ソース葉によって優先的に同化産物を送るシンク果実が異なり、直上葉、直下葉ではfruit 1の転流活性が高く、最下葉ではfruit 3, fruit 4の転流活性が高くなることが示唆された。以上より、葉位によって異なるソース・シンク関係について確認した。

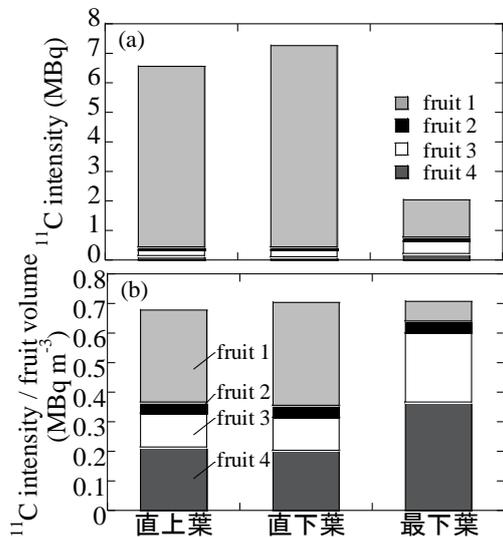


図11 1果あたりの転流量 (a) および体積当たりの転流量 (b)

(5) 局所温度制御によるシンクへの光合成産物の転流促進を目的として、クラウンおよび果実の加温処理が同化産物の転流に及ぼす影響を<sup>13</sup>Cトレーサー法により調査した。処理区については、冬季において、二連チューブ内の水温を20°Cに調節してクラウン部を加温する「クラウン加温区」(図1)、面状ヒーターを用いて果実周囲の気温を25°Cに調節する「果実加温区」および「無処理区」を設定した。

図12に各処理区におけるフィードから48時間後のクラウンおよび果実への<sup>13</sup>Cの分配率を示す。クラウンへの<sup>13</sup>Cの分配は、クラウン加温によって増加し、果実加温によって低下した。果実への<sup>13</sup>Cの分配率は、全処理区において80%以上と高くなり、さらに、果実加温によって増加する傾向がみられた。以上のことから、クラウンおよび果実への局所加温によって、加温部への同化産物の転流が促進される可能性が示唆された。

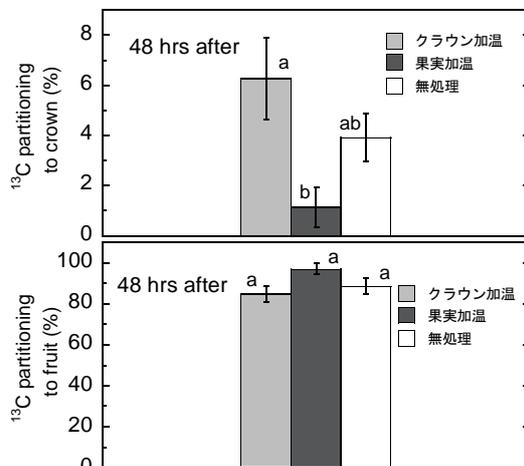


図12 各処理区のクラウン・果実への<sup>13</sup>C分配率

以上、本研究ではイチゴのクラウン冷却による花芽の安定誘導、新規の転流可視化手法を用いた転流動態の解明および局所加温による転流促進についての成果が得られ、特に、PETISを用いたイチゴの転流可視化については、世界初の試みであり、インパクトの高いものと考えられる。また、高温環境下における花芽分化の安定誘導や局所加温による転流促進の成果については、今後さらなる研究を要するが、気候変動下におけるイチゴの安定多収生産に資するものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① Kota Hidaka, Yuta Miyoshi, Akihide Okamoto, Kazuhiro Dan, Hitoshi Imamura, Daisuke Yasutake, Masaharu Kitano, Effect of fruit gas exchange on photosynthate accumulation and fruit growth of strawberries, Acta Horticulturae, 1156, 2017, pp.509-516. DOI:10.17660/ActaHortic.2017.1156.76
- ② Kota Hidaka, Kazuhiro Dan, Hitoshi

- Imamura, Tomohiko Takayama, Crown-cooling treatment induces earlier flower bud differentiation of strawberry under high air temperatures, *Environmental Control in Biology*, 55, 2017, pp. 21-27. DOI:10.2525/ecb.55.21
- ③ Yuta Miyoshi, Tomomi Hidaka, Kota Hidaka, Takashi Okayasu, Daisuke Yasutake, Masaharu Kitano, Dynamics of photosynthate loading in strawberries affected by light condition on source leaves, *Environmental Control in Biology*, 55, 2017, pp. 53-58. DOI:10.2525/ecb.55.53

[学会発表] (計23件)

- ① Yuta Miyoshi, Dynamics of photosynthate translocation to strawberry fruits dramatically changes depending on the leaf position, *International Symposium on Agricultural Meteorology 2018*, 2018
- ② 日高功太、光合成産物の転流を意識した環境調節—イチゴ栽培での事例—、日本生物環境工学会 2017 年松山大会、2017 年
- ③ 三好悠太、イチゴ果実への同化産物の転流に対する葉位の影響—1.RI イメージング解析による微分的評価—、日本生物環境工学会 2017 年松山大会、2017 年
- ④ 日高功太、イチゴ果実への同化産物の転流に対する葉位の影響—2.<sup>13</sup>C トレーサー法による積分的評価—、日本生物環境工学会 2017 年松山大会、2017 年
- ⑤ 三好悠太、RI イメージング技術による転流動態の可視化、日本生物環境工学会 2017 年松山大会、2017 年
- ⑥ 日高功太、イチゴの光合成動態に着目した環境制御による多収生産への取組みについて、第 30 回三重県いちご共進会表彰式・生産者研修会、2017 年
- ⑦ 日高功太、イチゴの光合成・転流と環境制御、JA 熊本宇城主催いちご生産技術・販売検討会、2017 年
- ⑧ 日高功太、いちごの多収生産のための光合成反応に基づく環境制御、平成 29 年度岐阜いちご生産者研究大会、2017 年
- ⑨ 日高功太、イチゴの光合成・転流と環境制御、平成 29 年度久留米地区「あまおう」合同研修会、2017 年
- ⑩ 日高功太、イチゴの環境制御と光合成産物の動態、高知県農業振興部主催「平成 29 年度イチゴ生産者交流会」、2017 年
- ⑪ 日高功太、施設果菜類での環境制御の基礎、鹿児島県園芸振興協議会主催「施設野菜の環境制御技術研修会」、2017 年
- ⑫ 日高功太、イチゴの光合成・転流と環境制御、大分県いちご販売強化対策協議会主催「大分いちご生産者研修会」、2017 年
- ⑬ 日高功太、イチゴの光合成・転流と環境制御、JA 全農九州営農資材事業所主催平成 28 年度いちご研究会、2017 年
- ⑭ 日高功太、いちごの多収生産のための植物体反応に基づく環境制御、JA ぎふいちご生産者研修会、2017 年
- ⑮ 日高功太、「PETIS」ライブイメージング解析を援用したイチゴ果実への同化産物転流に対する果実生育ステージの影響の評価、日本生物環境工学会 2016 年金沢大会、2016 年
- ⑯ 日高功太、高温環境下におけるイチゴのクラウン冷却処理による安定花芽誘導の検討、日本生物環境工学会 2016 年金沢大会、2016 年
- ⑰ 三好悠太、イチゴシンク果実における光合成産物のアンローディング動態モデルの構築、日本生物環境工学会 2016 年金沢大会、2016 年
- ⑱ Kota Hidaka, Effect of fruit gas exchanges on photosynthate accumulation and fruit growth of strawberries, 8<sup>th</sup> International Strawberry Symposium 2016, 2016
- ⑲ Yuta Miyoshi, Dynamics of photosynthate loading in strawberries affected by irradiation on source leaves, 8<sup>th</sup> International Strawberry Symposium 2016, 2016
- ⑳ 三好悠太、RI イメージング解析を用いたイチゴ果実におけるアンローディング動態の評価、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 2016 年合同大会、2016 年
- ㉑ 日高功太、イチゴの環境制御技術と生理生態（光合成・転流等）について、佐賀県農業試験研究センター主催平成 28 年度新技術セミナー「施設内の環境制御によるイチゴの多収生産技術」、2016 年
- ㉒ 日高功太、一季成り性イチゴ品種における果実の生育ステージが同化産物の転流に及ぼす影響、園芸学会平成 27 年度秋季大会、2015 年
- ㉓ 日高功太、イチゴのクラウンおよび果実への加温処理が同化産物の転流に及ぼす影響、日本生物環境工学会 2015 年宮崎大会、2015 年

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

日高 功太 (HIDAKA, Kota)  
 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・九州沖縄農業研究センター・主任研究員  
 研究者番号：80547232

### (2) 研究協力者

荒木 卓哉 (ARAKI, Takuya)  
 愛媛大学・社会連携推進機構・准教授  
 研究者番号：10363326