

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20380140

研究課題名（和文） 面積が1haを超える大規模温室におけるトマトの生産性向上に関する研究

研究課題名（英文） A study for improvement of tomato production in large scaled greenhouse

研究代表者

仁科 弘重 (NISHINA HIROSHIGE)

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号：70134509

研究成果の概要（和文）：

全国の大規模太陽光利用型植物工場の中から5菜園((有)いわき小名浜菜園(福島県), 世羅菜園(株)(広島県), 加太菜園(株)(和歌山県), (有)四万十みはら菜園(高知県), 響灘菜園(株)(福岡県))のトマト群落を対象として群落光合成機能の測定を行った。同一品種・同一作型のトマト群落を対象とした群落光合成機能の同時期測定では、菜園ごとに光合成機能は大きく異なっていることがわかった。例えば、いわき小名浜菜園の個葉の最大光合成速度は、加太菜園のそのの1.5倍であった(CO₂濃度 1500 mol mol⁻¹の条件下)。これは、各菜園における気象条件やCO₂施用などの栽培管理の違いによるものと考えられる。また、群落光合成機能の季節変化を評価するため、世羅菜園、四万十みはら菜園の同一品種・同一作型のトマト群落を対象として、群落光合成機能の測定を行った結果、群落光合成機能が季節変化することが確認され、さらにその変化の程度が菜園で異なることがわかった。このような測定を研究期間中継続して行った結果として、複数の菜園間で作物群落の光合成機能を比較することで、各菜園の群落光合成機能をより客観的に評価でき、生産性向上へ向けたより効果的な栽培管理計画の策定が可能になること、群落光合成機能測定も含めた植物生体情報計測を標準化し、菜園間で植物生体情報を共有するための基盤整備が必須であることなどが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

We investigated the photosynthetic function of tomato canopy cultivated in large-scaled greenhouses of five tomato production companies, i.e. Iwaki-onahama saien (Fukushima pref.), Sera saien (Hiroshima pref.), Kata saien (Wakayama pref.), Shimanto-mihara saien (Kochi pref.) and Hibikinada saien (Fukuoka pref.). The photosynthetic functions of the tomato canopies were varied among the greenhouses in spite of the same cultivar in the same cultivation process. Especially, the difference in the photosynthetic ability of single leaf evaluated by measuring light response curve was provably due to the difference in CO₂ enrichment. And, we proved that the photosynthetic functions of the tomato canopies in Iwaki-onahama saien and Shimanto-mihara saien showed significant seasonal changes and the extents of the seasonal changes were different from each greenhouse.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2009年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：温室，太陽光利用型植物工場，トマト，光合成，群落，生産性，標準化，CO₂

1. 研究開始当初の背景

太陽光利用型植物工場は、太陽光エネルギーを最大限に活用して大規模な農産物生産を行う施設であり、気温・湿度・CO₂濃度・光強度などの様々な環境要因を制御するための設備を有している。この太陽光利用型植物工場は、冬季の暖房が主目的であるハウス・温室の単なる発展型ではなく、人工光型植物工場で得られた最適栽培環境に関する知見をも最大限に利用して、環境条件が時々刻々と変化する太陽光下においても、人工光型と同様の4定（定時・定量・定質・定価格）の農産物生産を目指すものである（Fig. 1）。このような生産を実現するためには、環境情報だけでなく、植物生体情報をも高度に利用したスピーキング・プラント・アプローチ（Speaking Plant Approach: 以降、SPA）型環境制御が必須である。

SPA コンセプトは、様々なセンサを用いて植物の生体情報を計測して生育状態を診断し、それに基づいて生育環境を適切に制御するというものである。SPA では、光合成の最大化は元来の重要なテーマであり、太陽光利用型植物工場におけるトマトの生産性を向上させるためには、その前提条件として、トマト群落の光合成機能を正確に把握し、それに基づいて群落光合成を最大化させるための栽培管理計画を策定する必要がある。

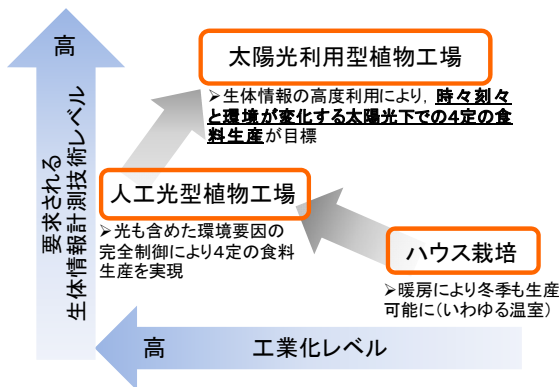


Fig.1 太陽光利用型植物工場の位置づけと生体情報計測の必要性

2. 研究の目的

近年、わが国においても栽培面積が数 ha にも及ぶ大規模太陽光利用型植物工場が建設されている。このような大規模施設におけるトマトの生産性向上のためには、トマト群落の光合成機能の的確な把握と、それに基づいた栽培管理計画の策定が必須である。本研究では、国内の代表的なトマト生産植物工場において栽培されているトマト群落の群落

光合成機能を詳細に分析することにより、大規模太陽光利用型植物工場におけるトマトの生産性向上に寄与する環境制御方法に関する知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 光環境の測定

各葉群の光環境を把握するために、各葉群の中央部の相対光強度を測定した。各葉群の相対光強度は、2つのPPFDセンサ(LI-250, LI-COR, Inc.)を用いて、群落上部に入射する光強度と、各葉群の中央部付近の光強度を同時に測定(15秒間の平均値を算出)し、後者を前者で除した値とした。なお、光強度測定は、直達日射がほとんどない曇天日の正午頃に行った。

(2) 光-光合成曲線の測定

各葉群に属する葉それぞれ3枚を対象として、携帯型光合成蒸散測定システム(LI-6400, LI-COR, Inc.)を用いて光-光合成曲線を測定した。光源にはLED冷光光源(6400-02B, LI-COR, Inc.)を用い、光強度をPPFD 0~2000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲で降順に変化させた。測定開始前に、測定対象葉をLI-6400のリーフチャンバにはさみ、LED光源を用いて一定強度の光を約20分間照射して明順化させた。なお、光強度を変化させた後、光合成速度と気孔コンダクタンスが安定したことを目視で確認したうえで光合成速度を測定した。

(3) クロロフィルの定量

各葉群に属する葉をそれぞれ5枚採取し、コルクローラーを用いて、1枚の葉から2片の円形葉片(1片の面積が0.89 cm²)を切り出した。この2葉片を1本の試験管に入れ、これにN, N-ジメチルホルムアミド(N, N-Dimethylformamid, 和光純薬工業) 3 mlを加え、低温貯蔵室(4°C, 暗条件)に24時間静置してChlを抽出した。得られたChl抽出液2.5 mlをセルに分注し、分光光度計(V-550, 日本分光(株))を用いて、646.8 nm, 663.8 nm および750.0 nmの吸光度を測定した。これらの吸光度をPorra et al. (1989)の式に代入して単位葉面積当りのChl a含量およびChl b含量を算出した。

(4) SPAD値の測定

葉緑素計(SPAD-502, コニカミノルタセンシング(株))を用いて、各葉群に属する葉それぞれ90枚を対象としてSPAD値を測定した。

4. 研究成果

(1) 大規模太陽光利用型植物工場におけるトマト群落の光合成機能解析—全国5カ所の植物工場における同時期計測—

本研究では、全国5カ所のカゴメ(株)系列のトマト菜園(大規模太陽光利用型植物工場)で栽培されているトマト群落を対象として、ほぼ同時期に群落光合成機能の測定を行った。

材料および方法

Fig. 2 に、測定を行ったトマト菜園の所在地(栽培面積)と測定日を示す。響灘菜園を除く4菜園では、ラウンド3(*Solanum lycopersicum* L.)を測定対象とし、響灘菜園ではラウンド4を測定対象とした。

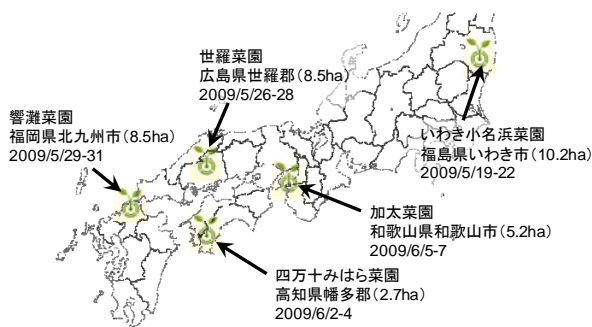


Fig.2 測定対象としたトマト生産太陽光利用型植物工場

各菜園では、群落を構成する個体測定(葉数、平均葉間長および葉面積)と群落内光環境測定を行った。さらに、トマト群落の葉群を高さ方向に3層に等分し、各葉層(上・中・下層)に含まれる完全展開葉を対象として、光-光合成曲線、Chl含量(総Chl含量とChl a/b比)およびSPAD値の測定を行った。光-光合成曲線の測定には、LED冷光源とCO₂インジェクタを装着した光合成蒸散測定装置(LI-COR:LI-6400)を使用した。なお、同一葉同一葉面領域を対象として、CO₂濃度を400ppm、800ppm、1500ppmと変化させた条件下で光-光合成曲線の測定を行った。Chl含量は、採取した葉からコルクボーラーを用いて直径1cmの円形葉片を切り抜き、冷暗所にてDMFに24時間浸して得られたChl抽出液をセルに分注し、分光光度計を用いて646.8nm、663.8nm、750.0nmの吸光度を測定し、Porra et al. (1989)の式を用いてChl aおよびb含量を算出した。群落光環境については、光量子センサ(LI-COR:LI-250A)を用いて群落上および直下の光強度を測定し、群落直下での相対光強度を算出した。

結果および考察

Table 1 に、5菜園の個体測定結果と群落内光環境の解析結果を示す。小名浜菜園は、葉群直下相対光強度が高く、減衰係数が最小であった。世羅菜園は、1個体あたりの葉数

が多く、個体総葉面積が大であった。響灘菜園は、葉数が大であったにもかかわらず、小葉の面積が小さかったため個体総葉面積は小であった。さらに、減衰係数は5菜園中で最大であり、葉群直下相対光強度は最小であった。これは、品種の違いがひとつの原因であると考えられる。みはら菜園は、葉量調整(生長点付近から積極的な葉かきを行い、葉量を2/3とする)を行っており、葉間長が大であり、減衰係数は比較的大であった。加太菜園は、個葉の葉面積が小であった。また、ラウンド3群落を対象として測定を行った4菜園中で葉群直下相対光強度が最小であり、減衰係数は比較的大であった。

Table 1 5 植物工場の個体測定結果と群落内光環境

	小名浜	世羅	響灘	みはら	加太
平均葉数(枚)	13.5±2.5	17.0±1.4	16.0±0.8	13.5±2.4	15.5±0.6
平均葉間長(cm)	8.9±0.9	8.0±0.6	8.9±0.8	10.6±1.4	9.9±0.6
個体総葉面積(m ²)	0.767	1.029	0.601	0.709	0.710
栽培密度(plant m ⁻²)	3.75	3.13	3.75	3.13	3.75
葉面積指数(m ² m ⁻²)	2.88	3.19	2.25	2.20	2.66
群落直下相対光強度(%)	37.2	30.8	26.2	30.7	26.8
減衰係数	0.34	0.37	0.59	0.54	0.49

Fig. 3 に、5菜園の葉群中層の総Chl含量を示す。中層の総Chl含量には有意差は認められなかったものの、響灘菜園が最大、次いで小名浜菜園と加太菜園、そして世羅菜園、みはら菜園の順でChl含量が低くなっていた。5菜園間の葉群上層の総Chl含量を比較した場合でも、同様の傾向が認められた(Data not shown)。しかし、葉群下層の総Chl含量に関しては、みはら菜園が最大となっており、小名浜菜園と世羅菜園の総Chl含量が他菜園よりも低かった(Data not shown)。

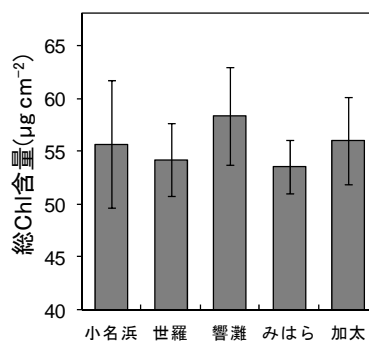


Fig.3 各菜園の総Chl含量

Fig. 4 に、5菜園の葉群中層のChl a/b比を示す。小名浜菜園のChl a/b比が、他菜園よりも有意に小であった。上・下層のChl a/b比についても、中層と同様の傾向が認められた(Data not shown)。

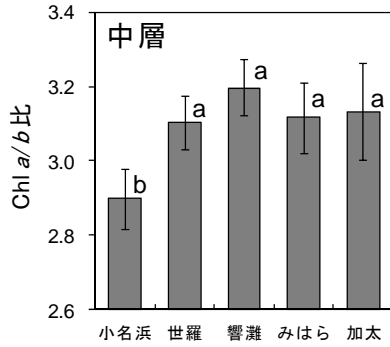


Fig.4 各菜園の Chl a/b 比

Fig. 5 に、5 菜園の葉群中層の SPAD 値を示す。小名浜菜園と響灘菜園の SPAD 値が有意に大であり、世羅菜園の SPAD 値が有意に小であった。

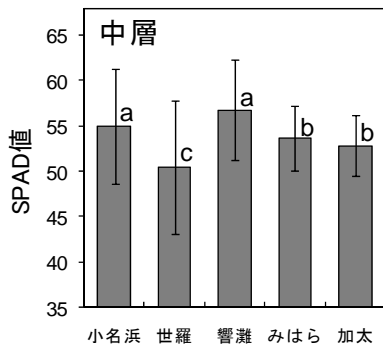


Fig.5 各菜園の SPAD 値

Fig. 6 に、各菜園の葉群中層の光-光合成曲線を示す。なお、400ppm と 1500ppm の CO₂ 濃度条件下で測定した光-光合成曲線を同一グラフ中に示してある。CO₂ 濃度が 400ppm (大気 CO₂ 濃度) の条件下では、いずれの菜園でも光強度 PPFD 500 μmol m⁻²s⁻¹ (夏季の太陽光強度の約 1/4) 程度で光飽和することがわかった。また、最大光合成速度は 10~20 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹ であり、加太菜園、みはら菜園の順で低くなり、小名浜菜園、世羅菜園および響灘菜園は 10 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹ 程度であった。一方、CO₂ 濃度 1500ppm 条件下では、

400ppm 条件下と比較して、いずれの菜園でも純光合成速度が顕著に増加し、小名浜菜園の最大光合成速度 (PPFD 1500 μmol m⁻²s⁻¹) は 40 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹ を超えた。また、明確な光飽和が認められず、光強度 PPFD 1500 μmol m⁻²s⁻¹ まで純光合成速度が上昇し続ける場合が多く確認された。また、CO₂ 濃度 1500ppm 条件下での最大光合成速度は 20~40 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹ とばらつきが大きくなり、小名浜菜園、世羅菜園、みはら菜園、響灘菜園の順で低くなっていた。CO₂ 濃度 400ppm 条件下では最大光合成速度が低かった小名浜菜園と世羅菜園であったが、CO₂ 濃度 1500ppm 条件下では他菜園よりも最大光合成速度が大となっていた。

(2) 大規模太陽光利用型植物工場における トマト群落の光合成機能解析-広島・高知の植物工場における同一品種・作型を対象とした季節変化の解析-

本研究では、気象条件と栽培管理が異なる広島県と高知県のカゴメ(株)系列の大規模トマト菜園で周年栽培されている同一品種・同一作型のトマト群落を対象として、群落光合成機能の季節変化の解析を行った。

群落光合成機能の測定

測定は広島県世羅郡世羅町の世羅菜園(株)(以降、世羅菜園)および高知県幡多郡三原村の(有)四万十みはら菜園(以降、みはら菜園)で栽培されているラウンドトマト (*Solanum lycopersicum* L. 品種 Round3) 群落を対象として、2008 年 12 月下旬、2009 年 2 月下旬および 2009 年 5 月下旬に行った。トマト群落の葉群を垂直方向に等間隔で上層、中層、下層の 3 つの葉層に分け、それぞれの葉層に属する完全展開葉を測定対象とした。

光-光合成曲線測定：各葉層に属する個葉の光合成能力を把握するために、個葉の光-光合成曲線を CO₂ 濃度 400 μmol mol⁻¹ の条件下で測定した。光源には LED 冷光源(LI-COR: 6400-02B)を使用し、光強度を PPFD 0

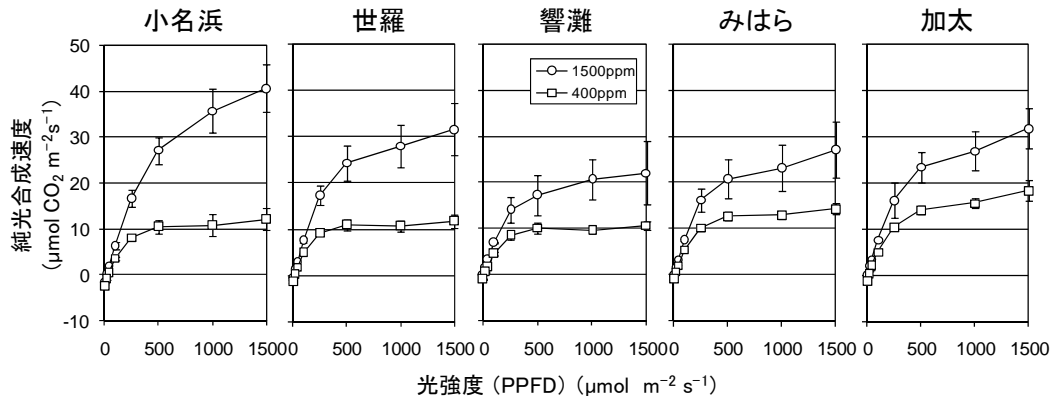


Fig.6 各菜園の葉群中層の光-光合成曲線 (CO₂ 濃度 400ppm, 1500ppm)

~1500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲で変化させ、光合成蒸散測定装置(LI-COR:LI-6400)を用いて純光合成速度を測定した。

個体形状測定: 群落を構成する個体の形状を把握するために、個葉の全長と全幅、生長点からの距離および葉間長の測定を行った。また、個葉の全長と全幅から葉面積を算出した。葉面積指数は、栽培密度(2008年12月は2.5株、2009年2月および5月は3.1株)に基づいて算出した。

クロロフィル含量測定: 各葉層から採取した葉からコルクボーラーを用いて直径1cmの円形葉片を切り抜き、冷暗所にてN,N-ジメチルホルムアミド(DMF)に24時間浸して得られたクロロフィル(以下、Chl)抽出液をセルに分注し、分光光度計を用いて646.8nm, 663.8nm, 750.0nmの吸光度を測定し, Porra et al. (1989)の式を用いてChl a および b 濃度を算出した。

結果および考察

Fig. 7 に葉数の季節変化を、Fig. 8 に葉面積指数(LAI)の季節変化を示す。葉数は両菜園とも2009年2月が小となり、2009年5月が最大であった。これは、光環境に合わせて下層の葉を取り除いているためである。また、LAIも葉数の変化と同様の変化を示していた。

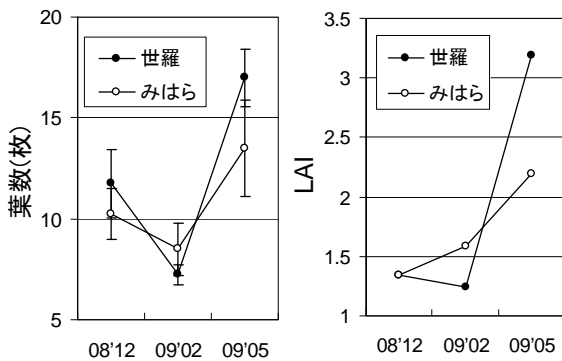


Fig.7 葉数の季節変化 Fig.8 LAIの季節変化

Fig. 9 に総 Chl 含量の季節変化を示す。世羅菜園では、すべての葉層において測定期間中に有意な変化は認められなかった。みはら菜園では、すべての葉層において、2008年12月と2009年2月の総 Chl 濃度には有意差はなかったが、2009年2月から5月にかけて有意に上昇していた。これは、冬季から夏季にかけての日射量の増大によるものと考えられる。

Fig. 10 に Chl a/b 比の季節変化を示す。両菜園のすべての葉層において、2008年12月から2009年2月にかけて上昇し、その後、5月にかけて低下していた。なお、Chl a/b 比は、同一菜園の同一時期にあつては、上層、

中層、下層の順に低下し、群落中・下層において恒常的に弱光馴化がおきていることを示していた。

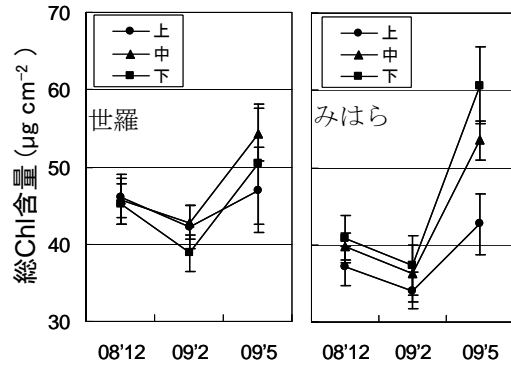


Fig.9 総 Chl 含量の季節変化

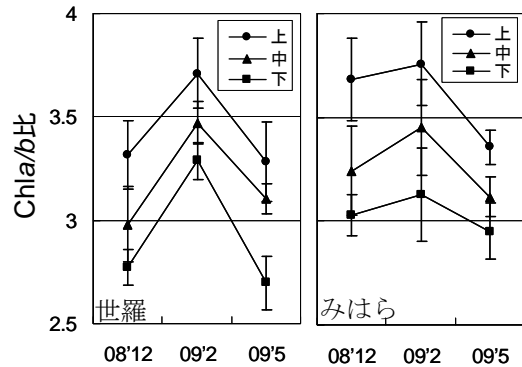


Fig.10 Chl a/b 比の季節変化

Fig. 11 に各菜園の個葉の光-光合成曲線の季節変化を示す。上層の光合成能力は両菜園とも測定期間中大きな変化はなかった。また、世羅菜園の下層の光合成能力についても測定期間中大きな変化はなかったものの、みはら菜園では、下層の光合成能力が徐々に低下していく傾向がみられた。

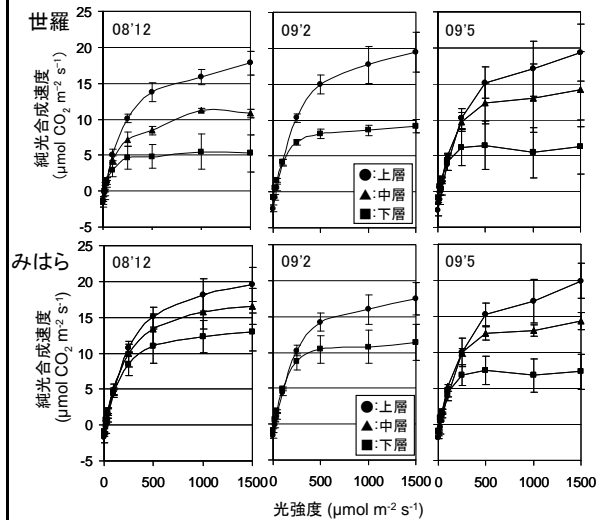


Fig.11 個葉の光-光合成曲線の季節変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 高山弘太郎・仁科弘重・久枝和昇・末岐剛・原田聡. 太陽光利用型植物工場のトマト群落における光合成機能の空間分布の解析. 植物環境工学, 22(4): 175-180. 2010.

〔学会発表〕(計4件)

- ① 高山弘太郎. トマトの生育・物質生産の情報プラットフォームの提案. スーパーホルトプロジェクト協議会セミナー(東京), 2010年4月20日
- ② 有馬誠一・仁科弘重・羽藤堅治・高山弘太郎・上加裕子・岡侍秀. ロボットによる植物生育診断情報収集システムの構築. 第69回農業機械学会年次大会(松山), 2010年9月15日
- ③ 佐藤卓・高山弘太郎・仁科弘重・原田聡・東宣雄・古籴淳一. 大規模太陽光利用型植物工場におけるトマト群落の光合成機能解析-広島・高知の植物工場における同一品種・作型を対象とした季節変化の解析-, 日本生物環境工学会 2009年福岡大会(福岡), 2009年9月8日
- ④ 高山弘太郎・佐藤卓・仁科弘重・原田聡. 大規模太陽光利用型植物工場におけるトマト群落の光合成機能解析-全国5カ所の植物工場における同時計測-, 日本生物環境工学会 2009年福岡大会(福岡), 2009年9月8日

〔図書〕(計2件)

- ① 高山弘太郎・仁科弘重. 大規模トマト生産温室における生体情報計測. 施設と園芸 150: 27-33. 2010.
- ② 羽藤堅治・森本哲夫. 知能的太陽光植物工場の新展開 [7] 知能的制御システム. 農業および園芸 85(7): 771-784. 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仁科 弘重 (NISHINA HIROSHIGE)
愛媛大学・農学部・教授
研究者番号：70134509

(2) 研究分担者

高山 弘太郎 (TAKAYAMA KOTARO)
愛媛大学・農学部・講師
研究者番号：40380266

羽藤 堅治 (HATO KENJI)
愛媛大学・農学部・准教授
研究者番号：50274345

有馬 誠一 (ARIMA SEIICHI)
愛媛大学・農学部・准教授