

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05907

研究課題名（和文）農業ビッグデータ活用によるトマト機能性成分の高含有化条件の探索と予測モデルの構築

研究課題名（英文）Optimization and prediction of tomato health-promoting properties by using agricultural big data

研究代表者

園師 一文（kazufumi, Zushi）

宮崎大学・農学部・教授

研究者番号：50435377

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、実際の栽培現場から得られる農業ビッグデータを利用しトマトの機能性成分含量向上のための条件探索および含量予測モデルを作成し、そのメカニズムの解明をふまえて検証することを目的とした。研究の結果、実際の栽培現場から得られる農業ビッグデータを利用しトマトの機能性成分（アスコルビン酸、ポリフェノールおよび抗酸化活性）向上のための光環境の重要性を明らかにできるとともに、含量予測モデルを構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トマトは機能性成分が豊富な野菜の一つであるが、その含量を予測する技術は未開発である。トマトの収量や生育の予測モデルは国内外の多くの研究グループが進めているが、機能性成分含量予測モデルを構築した研究成果は国内外を見渡しても無く、本研究が初めてである。これらのことから、本研究で得られた知見は、我が国のデータ駆動型スマート農業技術への貢献だけでなく、機能性成分における新たな研究の幕開けとなる大きなインパクトを持つ。

研究成果の概要（英文）：英文

The aim of this study was to explore the factors that improve the content of health-promoting properties in tomatoes using agricultural big data obtained from cultivation sites, and to develop a predictive model for their contents, based on the clarification of the mechanism. As a result, the study was able to clarify the importance of light environment for the improvement of health-promoting properties (ascorbic acid, polyphenol, and antioxidant activity) of tomatoes using agricultural big data obtained from cultivation sites, and and prediction models for their contents could be constructed with high accuracy.

研究分野：植物環境工学

キーワード：トマト 機能性成分 予測モデル アスコルビン酸 ポリフェノール 抗酸化活性

1. 研究開始当初の背景

トマトは世界中で広く栽培されており、機能性成分が豊富に含まれている野菜の一つである。トマトの機能性成分は、がんや生活習慣病の予防に効果のあるアスコルビン酸（ビタミンC）およびポリフェノールなどが含まれ、消費および生産の現場において、収量だけでなく機能性成分含量の高いものが望まれている。

一方、トマトの機能性成分は様々な環境条件によって変動することが知られており、栽培時期によって含量が異なること、塩・乾燥ストレスを与えることで含量が増減することが知られている。しかしながら、これまでの研究は単独の環境条件に注目したものが多く、実際の栽培現場のように様々な環境条件が変動する中で、どのような条件が機能性成分含量の上昇あるいは低下につながるかは完全に明らかにされていない。

近年、スマート農業の実現の一つとして、ICT・IoT技術を用いて栽培現場における多くの気象条件（気温、光強度、日射時間、湿度、CO₂、飽差、土壤水分など）や生育状況を詳細にモニタリングし、農業ビッグデータとして利用可能になってきた。これらのデータは、栽培環境の「見える化」、病害虫、収量、収穫時期の「予測」など様々な観点から利用されているが、品質に関する研究は十分に行われていない。このことから、栽培現場における農業ビッグデータ（気象、土壤、生育データ）と機能性成分含量の関連性を解明することによって、栽培環境・生育条件と機能性成分含量にどのような関連性があるか、何が変化することによって含量が変動するのかを可視化でき、機能性成分含量を高めるための条件や予測技術を明らかにできると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、実際の栽培現場から得られる農業ビッグデータを利用してトマトの機能性成分含量（アスコルビン酸、ポリフェノール）向上のための環境・生育条件の探索および含量予測モデルを作成し、そのメカニズムの解明をふまえて検証することを目的とした。

具体的には、

- (1) 機能性成分含量と農業ビッグデータとの関連性、
 - (2) 機能性成分変動メカニズムの解明
 - (3) 機能性成分含量予測モデルの確立
- の3つについて研究を行った（図1）。

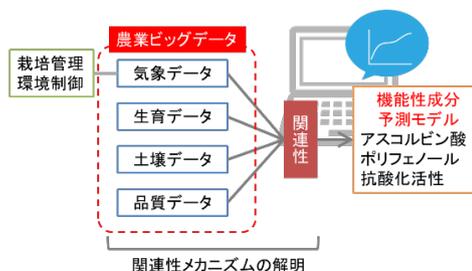


図1 研究目的の概要

3. 研究の方法

(1) 機能性成分含量と農業ビッグデータとの関連性

実際の栽培現場においてトマトを栽培し、機能性成分含量と気象、土壤、生育データとの関連性を検討した。具体的には、2018, 2019, 2020年の3年間にわたりトマト栽培農家圃場（2か所、9月から翌年6月まで）においてトマトを栽培し、第1表に示したデータを取得した。生育データと機能性成分含量は2週間ごとに測定し、時期による変動を調べた。

第1表 本研究で取得した気象、生育、品質（機能性成分）データ

取得データ	測定項目	取得方法
気象	温度、湿度、CO ₂ 、飽差、日射量	環境モニタリングシステムから自動的にデータを取得
生育	開花位置、莖径、葉色、光合成活性、葉面積指数、蒸散速度	栽培期間中、2週間毎に測定 光合成活性をクロロフィルa蛍光測定器、植物体の蒸散をリーフポロメーターで測定
品質	糖度、酸度、アスコルビン酸（ビタミンC）、ポリフェノール、抗酸化活性	栽培期間中、2週間毎に測定 機能性成分は、高速液体クロマトグラフィーを用いて測定

(2) 機能性成分変動メカニズムの解明

機能性成分の変動メカニズムの解明として、実験室レベルでの光環境がアスコルビン酸含量に及ぼす影響について検討した。具体的には、トマトを試験管内で培養することによって果実の環境を正確に制御できる in vitro 培養トマト実験系を用いてグロースキャビネット内の光強度および光質を変えてトマトを培養した（図2）。その後、得られた果実の、アスコルビン酸含量および関連する抗酸化酵素活性の測定を行った。

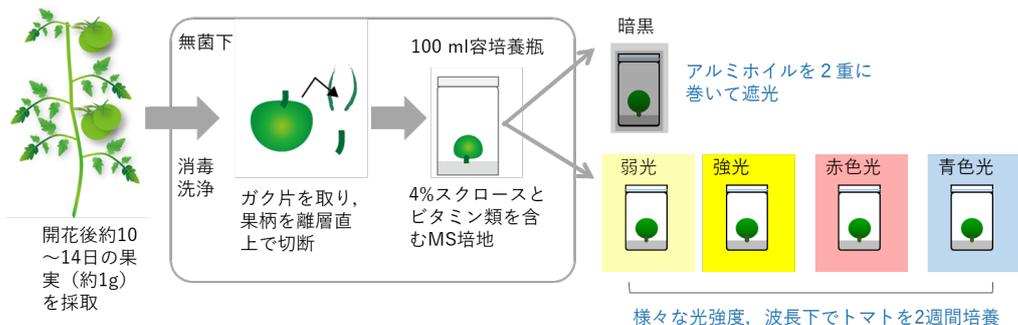


図2 トマトの in vitro 培養果実の作成方法および処理概要

(3) 機能性成分含量予測モデルの確立

3年間にわたり、トマト栽培農家圃場（2か所，9月から翌年6月まで）から環境，生育，果実品質データを取得後，それぞれのデータについて時期別（例えば，日毎，1，2，3週間毎，1～2，2～3，1～3週間毎）に平均，最高，最低など様々な項目でまとめ直した．その後，機能性成分を目的変数，環境，生育，果実品質データを説明変数とし，ステップワイズ重回帰分析を用いて，機能性成分含量の予測モデルを作成した．このとき作成する予測モデルとして，環境データのみのように一つのデータセット単独で予測するモデル，様々なデータセットを組み合わせて予測する統合モデルを検討し，一部のデータを検証データとして用いてそれぞれの予測精度を比較した．また，環境データについてはモデルに導入する期間を変え，収穫前のどの期間が予測モデル作成に重要か検討した．

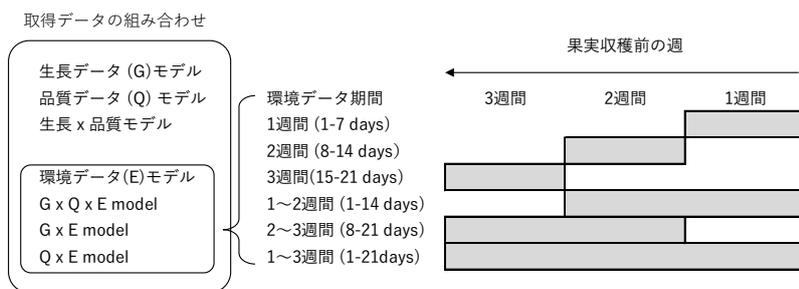


図3 取得データの組み合わせの模式図

4. 研究成果

(1) 機能性成分含量と農業ビッグデータとの関連性

トマト生産者圃場で3年間にわたり温室内環境データを取得するとともに，栽培期間中2週間毎に生育データ（光合成活性，蒸散速度，葉色，葉長，葉幅，開花位置など），品質データ（果重，果色，糖度，酸度，ビタミンC）の測定を行った結果，季節変動が認められるものと認められないものが存在した．例えば，生育データにおいて，トマトの栄養成長と生殖成長のバランスを示すと考えられている，開花位置は季節変動が認められなかったが，葉の大きさや葉面積指数は調査した各年とも光強度と温度環境が高まる栽培後期に低下した（データ省略）．

一方，機能性成分と果実品質において，総ポリフェノール含量は，比較的栽培時期に関わらず安定したが，糖度，アスコルビン酸含量および活性酸素を消去する能力を示す酸化活性は調査した各年とも栽培後期に上昇する傾向にあった（図4）．

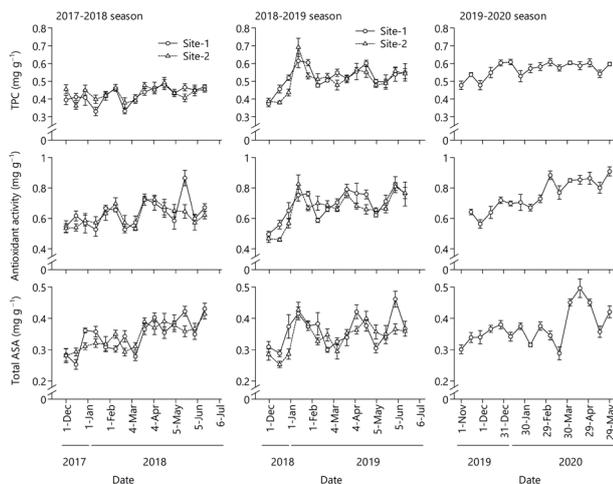


図4 トマトの総ポリフェノール含量（TPC），抗酸化活性，総アスコルビン酸（ASA）含量の季節変動．値は平均±標準偏差を示す（ $n = 6$ ）．

次に、機能性成分含量と生育、果実品質データとの関連性をみるために相関分析を行った結果、機能性成分は糖度と正の相関、果重、果色と負の相関があった。これらのことから、トマトを長期栽培する際は、機能性成分含量に季節変動が認められ、栽培時の環境条件の変動により果重や糖度に影響が及ぼされ、結果として機能性成分含量の変動につながると考えられた。

(2) 機能性成分変動メカニズムの解明

トマトを試験管内で培養することによって果実の環境を正確に制御できる *in vitro* 培養トマト実験系を用いて実験 1: 暗黒と光照射の品種間差, 実験 2: 異なる光強度の影響, 実験 3: 異なる光波長 (赤色光, 青色光) の影響について検討した結果, *in vitro* 培養トマト実験系において光が無い場合 (暗黒) アスコルビン酸含量が大きく低下すること, 強い光強度と光質 (特に青色光照射) によってアスコルビン酸含量が上昇することが明らかになった (図 5)。

また、この結果は、過酸化水素のような活性酸素の生成とアスコルビン酸を用いて活性酸素を消去する抗酸化システム (アスコルビン酸-グルタチオンサイクル) 関連酵素活性の変化と関連することが明らかになった。

これらの結果は、実際の栽培現場における光環境の重要性を示唆するものであり、園芸分野の国際誌である *Scientia Horticulturae* 誌に発表した (Zushi et al., 2020)。

(3) 機能性成分含量予測モデルの確立

栽培圃場下における温室内の環境データ (気温, 光強度, 日照時間, 湿度, CO₂ 濃度, 飽差), 栽培期間中 2 週間毎の生育データ (葉色, 葉長・葉幅, 開花位置) および品質データ (果重, 果色, 糖度, 酸度) を用いてトマトの機能性成分含量 (アスコルビン酸, ポリフェノール) および抗酸化活性の予測モデルの作成と評価を行った。この結果, 使用するデータと使用する環境データの時期によって調整済み R² 値で示されるモデルの精度が大きく異なることが明らかになった (図 6)。すなわち, 環境, 生育および品質データセット単独の利用では機能性成分予測モデルの精度は低く, これら 3 つのデータセットを組み合わせることでモデル精度が高まるということが明らかになった。

また、環境データをモデルに取り入れる際に利用する期間において、収穫直近より、2, 3 週間前のデータを用いることで予測精度が高まった。さらに、2019~2020 年データを検証データとして作成したモデルの精度を検証した結果 (図 7), 次のことが明らかになった。

- ① 収穫 7~14 日前の環境データ (早朝の湿度の平均値など), 収穫時の糖度, 果重を用いることで, 抗酸化活性を精度高く予測できる。
- ② 収穫 14~21 日前の環境データ (夜間気温の平均値, タ方の CO₂ 濃度の平均値), 収穫時の果色, 糖度, 果重を用いることで, ポリフェノール含量が中程度の精度で予測できる,
- ③ アスコルビン酸については他の項目より精度が低く, 使用データの精査などがさらに必要である。
- ④ 補正係数をモデル式に適用することでモデルのあてはまりが向上する。これらについては現在論文投稿中である。

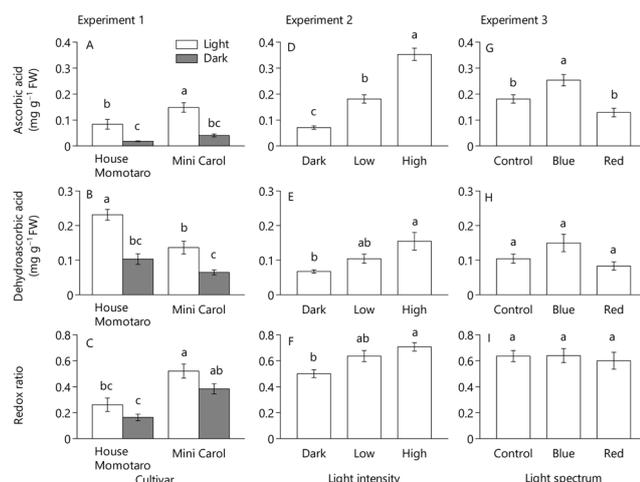


図 5 様々な光環境下で *in vitro* 培養したトマト果実のアスコルビン酸, 酸化型アスコルビン酸および還元割合の変化. 値は平均±標準偏差を示す (n = 6). 異なるアルファベットは Tukey 検定において有意差 (P < 0.05) があることを示す. 実験 1 は暗黒と光照射の影響, 実験 2 は異なる光強度の影響, 実験 3 は異なる光波長 (赤色光, 青色光) の影響を示す。

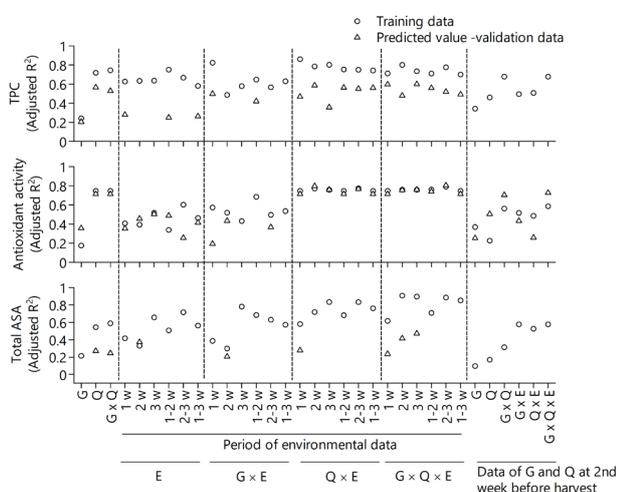


図 6 環境, 生育, 品質データを用いて作成したトマトの総ポリフェノール含量 (TPC), 抗酸化活性および総アスコルビン酸 (ASA) 含量予測モデルの調整済み R² 値の使用したデータセット間の比較. 結果は, 統計的に有意なモデルのみ示した。

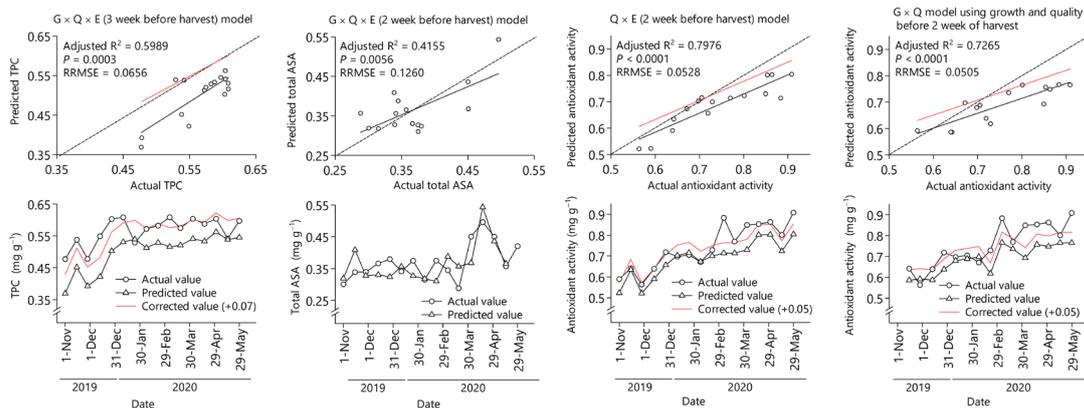


図7 環境、生育、品質データを用いて作成したトマトの機能性成分含量（アスコルビン酸，ポリフェノール）および抗酸化活性の予測モデル. 結果は，調整済みR²値をもとに，それぞれの機能性成分で最も精度の高いモデルを示した. 図中の赤線は予測モデル式に補正係数を加えた結果を示す.

以上のことから，実際の栽培現場から得られる農業ビッグデータを利用しトマトの機能性成分含量（アスコルビン酸，ポリフェノール）向上のための光環境の重要性を明らかにするとともに，含量予測モデルを構築できた. 一方，機能性成分含量予測モデルについては，他品種（大玉トマトや中玉トマトなど）あるいは異なる栽培方法（有機栽培やストレス農法）では未着手のままであり，本研究で開発した予測モデルとは異なる可能性がある. これらの課題については，本研究で得られた知見をもとに研究を進める必要がある.

また，トマトにおいて，収量や生育予測モデルは国内外の多くの研究グループが進めているが，機能性成分含量予測モデルについての取り組みは国内外を見渡しても無く，本研究が初めてである. これらのことから，本研究で得られた知見は，我が国のデータ駆動型スマート農業技術への貢献だけでなく，機能性成分における新たな研究の幕開けとなる大きなインパクトを持つ.

<引用文献>

Zushi, K., Suehara, C., & Shirai, M. (2020). Effect of light intensity and wavelengths on ascorbic acid content and the antioxidant system in tomato fruit grown in vitro. *Scientia Horticulturae*, 274, 109673. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109673>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zushi Kazufumi, Suehara Chisato, Shirai Minori	4. 巻 274
2. 論文標題 Effect of light intensity and wavelengths on ascorbic acid content and the antioxidant system in tomato fruit grown in vitro	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientia Horticulturae	6. 最初と最後の頁 109673 ~ 109673
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scienta.2020.109673	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 末原千聖, 圖師一文
2. 発表標題 異なる光波長がin vitro培養トマト果実のアスコルビン酸含量に及ぼす影響
3. 学会等名 日本生物環境工学会2019年千葉大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白井末紀, 末原千聖, 圖師一文
2. 発表標題 光環境がin vitro培養トマトのアスコルビン酸含量および抗酸化システムに及ぼす影響の品種間差
3. 学会等名 日本生物環境工学会九州支部 2019 年久留米大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田大輝, 久須美剣, 圖師一文
2. 発表標題 ミニトマト長期多段取り栽培におけるアスコルビン酸含量の季節変動
3. 学会等名 日本生物環境工学会九州支部 2019 年久留米大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末原千聖, 永木理子, 圖師一文
2. 発表標題 光環境がIn vitro培養トマト果実の抗酸化システムに及ぼす影響の品種間差
3. 学会等名 日本生物環境工学会九州支部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 圖師一文, 末原千聖, 永木理子
2. 発表標題 光環境がIn vitro培養トマト果実のアスコルビン酸含量に及ぼす影響の品種間差
3. 学会等名 日本生物環境工学会2018年東京大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------