

BULLETIN
OF THE
NATIONAL INSTITUTE OF VEGETABLE
AND TEA SCIENCE

野菜茶業研究所
研 究 報 告

第 15 号
平成 28 年 3 月



国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）

野菜茶業研究所

NATIONAL INSTITUTE OF VEGETABLE
AND TEA SCIENCE (NIVTS)

National Agriculture and Food Research Organization (NARO)



野菜茶業研究所研究報告 第 15 号

所 長	本多健一郎
編集委員長	荒木 陽一
編 集 委 員	吉田 建実
	坂田 好輝
	武田 光能
	高市 益行
	岡田 邦彦
	角川 修

BULLETIN OF THE
NATIONAL INSTITUTE OF VEGETABLE
AND TEA SCIENCE
No. 15

Director General Ken-ichiro Honda

Editorial Board

Chairman Yoichi Araki
Tatemi Yoshida
Yoshiteru Sakata
Mitsuyoshi Takeda
Masuyuki Takaichi
Kunihiko Okada
Osamu Sumikawa

野菜茶研研報. 15
Bull. Natl. Inst.
Veg. & Tea Sci. No. 15

本研究報告から転載・複製する場合には、
野菜茶業研究所の許可を得てください。

野菜茶業研究所研究報告

第 15 号

平成 28 年 3 月

目 次

キュウリ黄化えそ病抵抗性を有する ‘きゅうり中間母本農 7 号’ の育成経過とその特性 杉山 充啓・川頭 洋一・下村 晃一郎・吉岡 洋輔・坂田 好輝 吹野 伸子・野口 裕司 ----- 1	1
ISFET 硝酸イオンセンサの試作と野菜の硝酸含量測定への応用 伊藤 秀和・脇田 慎一 ----- 11	11
摘採適期前後におけるチャ品種 ‘やぶきた’, ‘りょうふう’, ‘ふうしゅん’ の 一番茶新芽の化学成分含有量の変動 池田 奈実子・水野 直美・田中 拓也・新井 真一郎・松延 健臣 ----- 19	19
種子を用いたダイコン青変症の発症リスク評価法 永田 雅靖・寺西 克倫 ----- 29	29
圃場接種試験によるチャ品種・系統の赤焼病抵抗性判定 吉田 克志 ----- 35	35
茶品種 ‘そうふう’ における栽培条件および製茶方法が 茶葉中フラボノール配糖体含有量に及ぼす影響 松永 明子・物部 真奈美・野村 幸子・江間 かおり 吉田 克志・堀江 秀樹 ----- 49	49
トマト育苗のための LED 光照射条件の検討 渡邊 恭成・安田 剛規・米田 正・中野 明正 ----- 57	57
寒候期キャベツの結球重増加モデルの開発 岡田 邦彦・佐々木 英和 ----- 67	67

Bulletin
of the
National Institute of Vegetable
and Tea Science
No. 15 March 2016

Contents

Development of Cucumber (<i>Cucumis sativus</i> L.) Parental Line 'Kyuri Chukanbohon Nou 7 Go' with Resistance to <i>Melon Yellow Spot Virus</i> Mitsuhiro Sugiyama, Yoichi Kawazu, Koichiro Shimomura, Yosuke Yoshioka, Yoshiteru Sakata, Nobuko Fukino and Yuji Noguchi	1
Nitrate Ion Determination of Vegetables Using a Portable ISFET-Nitrate Ion Sensor Hidekazu Ito and Shin-ichi Wakida	11
Change of Chemical Constituents in New Shoots of First Crop of Tea Cultivars 'Yabukita', 'Ryofu' and 'Fushun' around Harvesting Time Namiko Ikeda, Naomi Mizuno, Takuya Tanaka, Shinichiro Arai and Kenshin Matsunobu	19
A New Seed Testing Method for Evaluating the Risk of Blue Internal Discoloration in Daikon-Japanese Radish (<i>Raphanus sativus</i> L.)-Roots Masayasu Nagata and Katsunori Teranishi	29
Assay of Bacterial Shoot Blight Resistance among Tea Cultivars and Breeding Lines using a Field Inoculation Test Katsuyuki Yoshida	35
Effects of Cultivation Conditions and Tea Processing on Flavonol Glycoside Levels in Tea Leaves of Tea Cultivar 'Sofu' Akiko Matsunaga, Manami Monobe, Sachiko Nomura, Kaori Ema, Katsuyuki Yoshida and Hideki Horie	49
Examination of Irradiation Conditions Using LED Light for the Growth of Tomato Seedlings Yasumasa Watanabe, Takaki Yasuda, Tadashi Yoneda and Akimasa Nakano	57
Development of a Growth Model for Prediction of Top Dry Weight, Head Dry Weight and Head Fresh Weight of Cabbage Grown in Winter Season Kunihiko Okada and Hidekazu Sasaki	67

キュウリ黄化えそ病抵抗性を有する ‘きゅうり中間母本農7号’の育成経過とその特性[†]

杉山 充啓・川頭 洋一・下村 晃一郎・吉岡 洋輔*
坂田 好輝・吹野 伸子・野口 裕司

(平成 27 年 8 月 25 日受理)

Development of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Parental Line ‘Kyuri Chukanbohon Nou 7 Go’ with Resistance to *Melon Yellow Spot Virus*

Mitsuhiro Sugiyama, Yoichi Kawazu, Koichiro Shimomura, Yosuke Yoshioka,
Yoshiteru Sakata, Nobuko Fukino and Yuji Noguchi

I 緒 言

キュウリ黄化えそ病は、メロン黄化えそウイルス (*Melon yellow spot virus*, MYSV) を病原とするウイルス病である (Kato ら, 2000; 竹内ら, 2001)。現在, 日本国内では関東, 東海, 四国および九州地域 (奥田ら, 2009), 海外ではタイ, 台湾, 中国およびエクアドルで MYSV の発生が報告されている (Chen ら, 2008; Chiemsombat ら, 2008; Gu ら, 2012; Quito-Avila ら, 2014)。MYSV は *Bunyaviridae* 科 *Tospovirus* 属に属する 3 分節の 1 本鎖 RNA ウイルスで, ミナミキイロアザミウマ (*Thrips palmi* Karny) によって永続伝搬される (Kato ら, 1999)。MYSV に感染したキュウリ (*Cucumis sativus* L.) は葉にモザイク, 退緑斑点, 黄化およびえそ症状などを示す。一部の果実にも退緑斑点やモザイク症状を生じ, これらの症状による収量と商品果率の低下が問題になる。本病の防除には媒介虫であるミナミキイロアザミウマを駆除することが最も重要であるが, それは容易ではない。

トマト (*Solanum lycopersicum* L.) およびピーマン (*Capsicum annuum* L.) では, *Tospovirus* 属に属する

トマト黄化えそウイルス (*Tomato spotted yellow virus*, TSWV) を病原とする黄化えそ病に抵抗性を有する実用品種が育成され, 黄化えそ病対策に利用されている。しかし, キュウリでは, 黄化えそ病抵抗性品種の育成が強く求められているにもかかわらず, 未だその育成には至っていない。本病は, 世界的にも日本が初発生とされ, 海外から抵抗性品種・系統の導入ができなかった。そこで筆者らは, 黄化えそ病抵抗性を有するキュウリ遺伝資源の検索を行い, タイ原産のキュウリ系統 27028930 および山胡瓜-1 が黄化えそ病に中程度の抵抗性を有することを明らかにし (Sugiyama ら, 2009), 27028930 を育種素材として黄化えそ病に中程度の抵抗性を有する‘きゅうり中間母本農7号’を育成した。ここにその育成経過と特性について報告する。

‘きゅうり中間母本農7号’の育成に関して, 野菜育成系統評価試験における特性検定試験の実施にあたっては群馬県農業技術センター東部地域研究センター (群馬農技セ), 高知県農業技術センター (高知農技セ) および宮崎県総合農業試験場 (宮崎総農試) の担当者各位に多大な御協力を頂いた。また, 中央農業総合研究センター奥田充博士からウイルス株を分譲して頂いた。さらに, 野菜茶

〒 514-2392 三重県津市安濃町草生 360

野菜育種・ゲノム研究領域

* 筑波大学生命環境系

† 本報告の一部は, 園学研., 12, 255-261 (2013); Euphytica, 205, 615-625 (2015) において発表した。

業研究所・研究支援センター・業務第1科の方々、特に堀文明氏、増地智氏および山下大介氏には多大な業務支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。本品種の育成は、2013 および 2014 年度には農林水産省の「ゲノム情報を活用した農畜産物の次世代生産基盤技術の開発プロジェクト」(HOR-1001)により実施した。

II 育成経過

黄化えそ病抵抗性素材として27028930を用いた。27028930は雌花着生率が非常に低く、単為結果性を持たず、果皮は白色で、収量性が極めて低い等の欠点を有する。2006年に27028930をわが国の固定品種‘ときわ’に交雑し、黄化えそ病抵抗性について交雑後代の選抜・固定を繰り返し、F₅系統を得た(図-1)。2008年にこのF₅系統をF₁品種‘アンコール10’(株式会社ときわ研究所)に交雑し、抵抗性検定による交雑後代の選抜・固定を進め、2011年に育種素材の27028930に比べ、単為結果性および果実形質が格段に向上した固定系統を得た。本系統は育種素材である27028930に比べウイルスの感染に起因する病徴が軽く、抵抗性が高まり、減収率が罹病性品種に比べ大幅に抑制されることが明らかになったことから(杉山ら、2013)、本系統にキュウリ安

濃4号の系統名を付した。2013および2014年度に野菜育成系統評価試験を実施した結果、本系統の黄化えそ病抵抗性が確認され、さらに、本系統が有する黄化えそ病抵抗性は、後代に遺伝することが確認された。これらのことから、キュウリ安濃4号は中間母本として有望であると判断し、2015年に‘きゅうり中間母本農7号’として品種登録出願した(品種登録出願番号第30332号、2015年7月16日)。

III 特 性

1 育成地における試験成績

育成地で実施した試験の概要を表-1に示す。

a 黄化えそ病抵抗性

黄化えそ病抵抗性検定は、2013年度の半促成および抑制栽培、2014年度の抑制栽培で実施した。対照品種として、罹病性の‘ときわ’および‘アンコール10’、中程度抵抗性の27028930を用いた。ウイルスはキュウリから分離されたMYSV-FuCu05Pを供試し、MYSV感染キュウリ植物の葉を10倍量(v/w)の100mMリン酸ナトリウム緩衝液(pH7.0、0.1%2-メルカプトエタノール含有)で磨砕した。磨砕した粗汁液をガーゼに含ませ、カーボランダム(600メッシュ)をふりかけたキュウリの子葉にガーゼを擦り付け

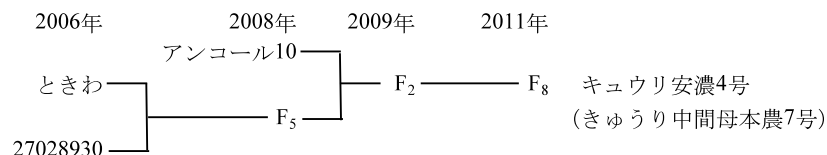


図-1 ‘きゅうり中間母本農7号’の育成系統図

表-1 育成地における試験の概要

試験内容・年度	作型	播種日	接種日	定植日	調査日	畦幅 (cm)	株間 (cm)	栽植本数 (株/a)	台木	施肥 (kg/a) N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	試験規模
黄化えそ病抵抗性検定											
2013	半促成	1/9	1/15	2/5	4/11	120	40	167	自根	1.2-1.2-1.2	10株×2反復
2013	抑制	10/2	10/7	10/17	12/10	120	40	167	自根	1.2-1.2-1.2	10株×2反復
2014	抑制	9/17	9/24	10/7	11/23	120	40	167	自根	1.2-1.2-1.2	10株×2反復
減収率・収量性											
2010	促成	11/19	11/26	12/8	2/4	120	40	167	自根	1.2-1.2-1.2	3株×4反復
2011	抑制	9/13	9/30	10/6	11/22	120	40	167	ゆうゆう 一輝(黒)	1.2-1.2-1.2	3株×4反復
遺伝解析											
2012		9/25	10/1	10/10	12/4	120	40	167	自根	1.2-1.2-1.2	
一般特性											
2012	早熟	3/6	-	4/2	-	120	45	148	自根	1.2-1.2-1.2	20株反復なし

ることで汁液接種を行った。接種後の植物をポリオレフィンフィルムハウス内に定植した。主枝1本仕立てとし、第16節程度で摘心した。側枝および果実は全て除去した。個体毎に第5～14葉における発病評点（0：無病徴，1：軽微なモザイクおよび退緑斑，2：モザイクおよび退緑斑，3：軽いえそおよび黄化（葉に占める黄化・えそ部分の面積～20%），4：えそおよび黄化（同面積20～50%），5：激しいえそおよび黄化（同面積50%以上），6：枯死）を調査し、第5～14葉の平均発病評点を算出した。

発病株率は、2014年の抑制栽培を除き全ての品種・系統で100%だったが、発病評点は品種・系統間差が認められた（表－2）。罹病性の対照品種である‘ときわ’および‘アンコール10’の発病評点は4.8～5.6と高く、激

表－2 育成地における黄化えそ病抵抗性検定試験の結果

年度・作型	品種・系統名	発病評点	発病株率 (%)
2013年半促成	きゅうり中間母本農7号	1.6 c ²	100
	ときわ	5.1 a	100
	アンコール10	4.8 a	100
	27028930	3.8 b	100
2013年抑制	きゅうり中間母本農7号	1.3 c	100
	ときわ	5.0 a	100
	アンコール10	4.9 a	100
	27028930	3.6 b	100
2014年抑制	きゅうり中間母本農7号	1.4 c ²	100
	ときわ	5.6 a	100
	アンコール10	5.6 a	100
	27028930	2.7 b	90

発病評点 1：軽微なモザイクおよび退緑斑，2：モザイクおよび退緑斑，3：軽いえそおよび黄化（葉に占める黄化・えそ部分の面積～20%），4：えそおよび黄化（同面積20～50%），5：激しいえそおよび黄化（同面積50%以上），6：枯死。

² 同一のアルファベットは、Tukeyの多重検定により5%水準で、品種・系統間に有意差がないことを示す。

しい黄化症状が認められた。また、中程度抵抗性の27028930の発病評点は2.7～3.8でやや高く、多くの葉で軽い黄化症状が認められた。一方、‘きゅうり中間母本農7号’の発病評点は1.3～1.6で最も低く、病徴は非常に軽かった（図－2）。

b 黄化えそ病抵抗性の遺伝解析

罹病性の‘きゅうり中間母本農4号’と‘きゅうり中間母本農7号’を両親として交雑した集団を用いて黄化えそ病抵抗性の遺伝解析を実施した。93個体のF₂、各10個体の親系統およびF₁を用いた。2012年9月25日に6cmポットに播種し、10月1日にウイルスを接種した。10月10日にポリオレフィンフィルムハウス内に定植し、12月4日に発病評点を調査した。接種方法、栽培方法および抵抗性の判定は、上記の黄化えそ病抵抗性試験と同様に行った。また、罹病性‘ときわ’と27028930のF₂集団を用いたQTL解析の結果、27028930由来の主要なQTLが第1および第3連鎖群、27028930由来の効果の低いQTLが第7連鎖群、‘ときわ’由来の効果の低いQTLが第4連鎖群に検出された（Sugiyamaら、2015）。そこで、‘きゅうり中間母本農4号’と‘きゅうり中間母本農7号’とのF₂集団において、27028930由来の主要なQTLのSSRマーカー（第1連鎖群：SSR13109，第3連鎖群：SSR31430）を用いて、マーカー遺伝子型と発病評点との関連性を調べた。各個体のマーカー遺伝子型を調べるため、まずDNeasy 96 Plant Kit（Qiagen）またはDNeasy Plant Mini Kit（Qiagen）を用いて、各個体の本葉からゲノムDNAを抽出した。次に、Shimizuら（2011）が報告した1チューブ



図－2 MYSVを接種したキュウリの植物体
左：‘きゅうり中間母本農7号’，右：‘ときわ’
子葉にMYSVを接種した後，49日目の様子（2013年12月5日撮影）

多重ポストラベル法を用いてPCR産物を蛍光色素標識し、シーケンサー Applied Biosystems 3730xl DNA Analyzer で泳動し、GeneMapper (Applied Biosystems) ソフトウェアでPCR産物の長さを解析した。PCRの温度条件は、95°C 5分間、「95°C 20秒間、55°C 90秒間、72°C 30秒間」を33サイクル、「95°C 20秒間、49°C 90秒間、72°C 30秒間」を3サイクル、68°C 5分間とした。

‘きゅうり中間母本農4号’と‘きゅうり中間母本農7号’とのF₁の発病評点は、両親のほぼ中間の値を示し、F₂集団の発病評点は連続的な分布を示した(図-3)。こ

のことから、黄化えそ病抵抗性は不完全優性に遺伝し、抵抗性遺伝子は複数存在すると推測された。また、第1連鎖群および第3連鎖群のSSRマーカーについて、‘きゅうり中間母本農4号’と‘きゅうり中間母本農7号’とのF₂集団の遺伝子型を決定し、遺伝子型別の発病評点を求めたところ、2つのマーカーの遺伝子型がともに‘きゅうり中間母本農7号’ホモ接合型の集団の発病評点が最も低かった(表-3)。これら2つのSSRマーカーを用いることで、‘きゅうり中間母本農7号’と罹病性品種との交雑後代から抵抗性個体を選抜できることが明らか

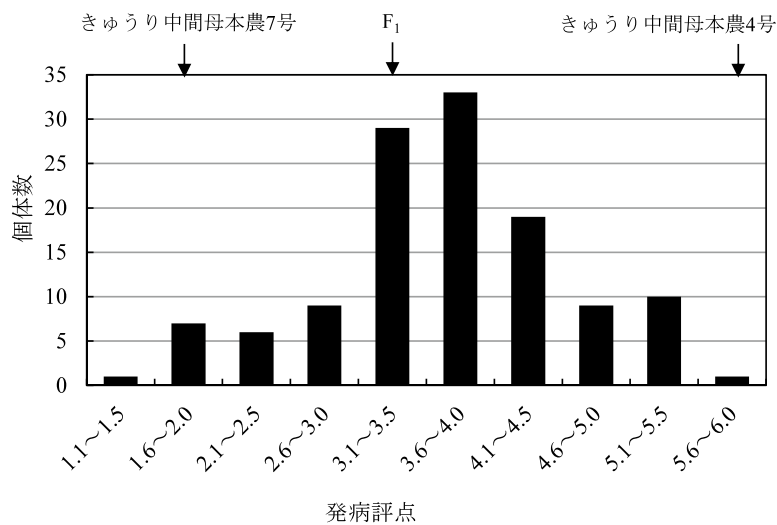


図-3 ‘きゅうり中間母本農4号’と‘きゅうり中間母本農7号’とのF₂集団における発病評点の分布

表-3 マーカー遺伝子型別に分類したF₂(‘きゅうり中間母本農4号’×‘きゅうり中間母本農7号’)個体の発病評点

品種・系統名	個体数	マーカー遺伝子型 ^z		平均発病評点 ^y
		SSR13109	SSR31430	
きゅうり中間母本農7号(A)	10	A	A	1.6 ± 0.1
きゅうり中間母本農4号(N)	10	B	B	5.8 ± 0.2
F ₁ (N × A)	10	H	H	3.3 ± 0.2
F ₂ (N × A)	5	A	A	2.5 ± 0.7 e ^x
	7	A	B	3.8 ± 0.4 bd
	12	A	H	3.5 ± 0.5 cd
	5	B	A	3.1 ± 0.5 de
	5	B	B	4.7 ± 0.4 ab
	13	B	H	3.9 ± 0.7 bc
	11	H	A	3.2 ± 0.5 de
	15	H	B	4.8 ± 0.1 a
	20	H	H	4.1 ± 0.6 bc

^zマーカー遺伝子型: A: ‘きゅうり中間母本農7号’型ホモ接合, B: ‘きゅうり中間母本農4号’型ホモ接合, H: ヘテロ接合。

^y 平均値±標準偏差。

^x 同一のアルファベットは, Tukeyの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す。

表-4 第3連鎖群のマーカー遺伝子型別に分類した F₂ (‘きゅうり中間母本農4号’ × ‘きゅうり中間母本農7号’) 個体の発病評点

系統名	マーカー遺伝子型 ²	マーカー名		
		CSN251	SSR7225	CSN161
F ₂ (農4号×農7号)	A	3.1 c ³ (26)	3.0 c (23)	3.2 b (28)
	B	4.6 a (22)	4.4 a (24)	4.2 a (23)
	H	3.8 b (45)	3.8 b (46)	3.9 a (42)

²マーカー遺伝子型:A:‘きゅうり中間母本農7号’型ホモ接合, B:‘きゅうり中間母本農4号’型ホモ接合, H:ヘテロ接合.

³同一のアルファベットは, Tukeyの多重検定により5%水準で有意差がないことを示す. カッコ内の数字は個体数.

表-5 各 SSR マーカーで検出される PCR 増幅断片長

品種・系統名	マーカー名		
	CSN251	SSR7225	CSN161
きゅうり中間母本農7号	284	212	217
27028930	284	212	217
きゅうり中間母本農4号	290	208	215
節青成	290	208	215
アルファ	290	208	215
アンコール10	290	208	215
加賀青長	290	208	215
エクセレント節成2号	290	208	215
輝世紀	290	208	215
極光607	290	208	215
霜知らず地這	290	208	215
シャープ1	290	208	215
ときわ	290	208	215
トップラン	290	208	215
夏節成	290	208	215
ハイグリーン21	290	208	215
久輝	290	208	215
Vアーチ	290	208	215
フレスコダッシュ	290	208	215
フレスコ100	290	208	215
プロジェクトX	290	208	215
モンドール	290	208	215
エテルノ	290	208	215
ZQ-7	290	208	215

表の数値は増幅サイズ(bp)を示す.

になった. ただし, SSR13109 のマーカー遺伝子型の違いのみでは平均発病評点に有意差が認められなかったことから (表-3), 選抜マーカーとして第3連鎖群の SSR31430 のみを用いても ‘きゅうり中間母本農7号’ と罹病性品種・系統の交雑後代から抵抗性個体を選抜できると考えられた. そこで次に, 選抜効果が高かった第3連鎖群の QTL 領域について, 3種類の多型マーカーを選定し, 各マーカーの選抜効果を検討した (表-4). 93 個体の F₂ を, 3種類のマーカー遺伝子型 (A 型 (‘きゅうり中間母本農7号’ ホモ接合), B 型 (‘きゅうり中間母本農4号’ ホモ接合), H 型 (ヘテロ接合)) に分類し, それぞれの集団について平均発病評点を求めたところ, い

ずれのマーカーにおいても, A 型の集団の平均発病評点が B 型の集団よりも低い値を示した. このことから, これらのマーカーは選抜マーカーとして利用可能であると考えられた. そこで次に, これらのマーカーの汎用性を確かめるため, 様々なキュウリ品種を用いて, ‘きゅうり中間母本農7号’ との間の多型の有無を調査した (表-5). その結果, 全てのマーカーにおいて, 抵抗性系統 (‘きゅうり中間母本農7号’ および 27028930) とそれ以外の品種との間に多型があったことから, 選抜マーカーとしての汎用性が高いと考えられた.

c 減収率の評価

ウイルスの感染による減収率の評価は, 2010 年度に促成栽培 (自根栽培), 2011 年度に抑制栽培 (接木栽培) で実施した (表-1). ‘きゅうり中間母本農7号’, 罹病性の対照品種として ‘ときわ’ および ‘アンコール10’ を用い, 2011 年度の抑制栽培では台木品種として ‘ゆうゆう一輝 (黒タイプ)’ (株式会社埼玉原種育成会) を用いた. ウイルスの接種は上記の黄化えそ病抵抗性試験と同様に行い, ウイルスを接種した接種区とリン酸緩衝液のみを擦り付けた無接種区を設定した. 接種後の植物はポリオレフィンフィルムハウス内に定植し, 主枝は畝面から 180cm の高さにある誘引線に達した段階で摘心した. 主枝第6節までに発生した側枝および果実を摘除し, 第7節以上から発生した側枝についてはすべて第1節で摘心した. 100g 程度の大きさの果実を収穫し, 接種区および無接種区の収量から減収率を算出した. また, 接種区の第15本葉におけるウイルスの蓄積量を DAS-ELISA 法 (Sigiyama ら, 2009) により測定した.

ウイルス接種区における ‘きゅうり中間母本農7号’ の収量 (全収穫果実重) は, 対無接種区比で 79~88% になり, モザイク果は認められなかった (表-6). 一方, 罹病性品種の収量は, 対無接種区比で 32~52% となり,

モザイク果の発生が認められた。‘きゅうり中間母本農7号’の第15本葉におけるウイルスの蓄積量は、罹病性品種に比べ有意に低い値となった(表-7)。以上の結果より、‘きゅうり中間母本農7号’は、MYSVに感染しても収量の低下は1~2割程度であり、本系統が有する中程度抵抗性は実用的に利用可能であると考えられた。

d 一般特性

一般特性の評価は2012年度に早熟栽培で実施した(表-1)。「きゅうり中間母本農7号」, ‘ときわ’, ‘アンコール10’ および27028930を用いた。2012年3月2日に9cmポットに播種し, 4月2日にガラス温室内に定植し, 植物体および果実特性を調査した。栽培方法については上記の減収率の評価(自根栽培)と同様とした。なお, ‘きゅうり中間母本農7号’の収量性の比較には, 減収率評価試験時のデータを用いた。

‘きゅうり中間母本農7号’は他の品種・系統と同様, 無限伸長を示した(表-8, 図-4)。主枝および葉柄は, ‘ときわ’ および ‘アンコール10’ に比べ短く, 葉は緑色でやや薄かった。葉身の長さは‘ときわ’ および ‘アンコール10’ と同程度で, 側枝の発生率は高かった。主枝上に雄花節と雌花節が混在する混性型であるが, 主枝の雌花着生率は低く, 側枝型の着果習性を示した。単為結果性は‘ときわ’ および ‘アンコール10’ と同程度で, 27028930よりも高かった。

果実の長さは‘ときわ’ および ‘アンコール10’ と同

程度で, 果肉は厚く, 胎座は小さかった(表-9)。果皮硬度は‘ときわ’ および ‘アンコール10’ と同程度で, 果肉はやや硬かった。果肉の食感の指標値(CI値)は‘ときわ’ および ‘アンコール10’ に比べやや低かった。果実基部に首(肩こけ)が認められた。果皮は濃緑色で斑点はなく, イボ・トゲが認められた(図-5)。ブルーム(果皮表面に発生する白い粉状の物質)の程度は‘ときわ’ および ‘アンコール10’ に比べ強かった。

収量(全収穫果実重)は1545~1890gで, ‘ときわ’ および ‘アンコール10’ の収量1963~2494g および 2801~3180g に比べ低かった(表-6)。

2 特性検定試験場所における試験成績

各特性検定試験場所で行った特性検定試験の概要を表-10に示す。対照品種, 仕立て方法および調査項目は育成地における特性検定試験と同様に行った。

表-7 ウイルス接種区におけるウイルスの蓄積量

品種名	促成栽培	抑制栽培
きゅうり中間母本農7号	0.53 ^z b ^y	0.88 b
ときわ	1.28 a	2.47 a
アンコール10	1.47 a	2.83 a

^z DAS-ELISAの405nm吸光度を示す。

コントロールとして設定した無接種区‘ときわ’の吸光度は, 2011年促成栽培および抑制栽培で, それぞれ0.23および0.09であった。

^y 同一のアルファベットは, Tukeyの多重検定により5%水準で, 品種間に有意差がないことを示す (n=4)。

表-6 ウイルス接種区と無接種区における収量性および接種区におけるモザイク果発生率

品種・系統名	試験区	促成栽培			抑制栽培		
		全収穫 果実数 (本/株)	全収穫 果実重 (g/株)	モザイク果 発生率 (%)	全収穫 果実数 (本/株)	全収穫 果実重 (g/株)	モザイク果 発生率 (%)
きゅうり中間母本農7号	接種区	13.1	1360	0.0	16.5	1485	0.0
	無接種区	15.4	1545		21.4	1890	
	接種区/無接種区	0.85 a ^y	0.88 a		0.77 a	0.79 a	
	t検定 ^z	**	**		**	*	
ときわ	接種区	12.3	1231	24.0	11.3	1021	53.1
	無接種区	23.8	2494		19.5	1963	
	接種区/無接種区	0.51 b	0.49 b		0.58 ab	0.52 b	
	t検定	**	**		*	**	
アンコール10	接種区	10.3	1027	40.5	13.5	1377	76.2
	無接種区	30.4	3180		27.9	2801	
	接種区/無接種区	0.34 c	0.32 c		0.48 b	0.49 b	
	t検定	**	**		**	**	

^z **および**はt検定によりそれぞれ1%および5%水準で, 接種区と無接種区の間有意差があることを示し, nsは有意差がないことを示す (n=4)。

^y 同一のアルファベットは, Tukeyの多重検定により5%水準で, 品種・系統間に有意差がないことを示す (n=4)。

表-8 育成地における‘きゅうり中間母本農7号’の植物体特性

品種・系統名	子葉の長さ (mm)	子葉の 幅/長さ	草姿	第15節までの 主枝の長さ (cm)	第1次側枝の 節間長 (cm)	第1次側枝の 発生率 (%)
きゅうり中間母本農7号	50.0	0.56	無限伸張	80.6	8.7	100.0
ときわ	52.7	0.60	無限伸張	95.3	10.0	100.0
アンコール10	48.7	0.60	無限伸張	98.6	8.1	98.8
27028930	43.6	0.55	無限伸張	79.6	8.3	100.0

植物体特性は各品種・系統につき20個体を調査した。

品種・系統名	葉身の長さ (cm)	葉柄の長さ (cm)	葉色	性表現型 ²	単為結果性	着果習性	八重成り性の 有無 ³
きゅうり中間母本農7号	30.1	18.5	緑	混性型	高	側枝型	無
ときわ	31.1	22.2	濃緑	混性型	高	側枝型	無
アンコール10	30.4	21.4	極濃緑	混性型雌性型	高	主枝側枝型	無
27028930	30.6	25.4	やや濃緑	混性型	低	側枝型	無

²混性型：雌花と雄花を着生する，混性型雌性型：全ての節に雌花を着生し，少数の雄花を着生する。

³1節に多数の雌花を着生する形質を八重成性と呼ぶ。



図-4 ‘きゅうり中間母本農7号’の植物体
(2012年11月13日撮影)



図-5 ‘アンコール10’ (左), ‘ときわ’ (中央), ‘きゅうり中間母本農7号’ (右)の収穫果
(2015年4月16日撮影)

a 黄化えそ病抵抗性

‘きゅうり中間母本農7号’の平均発病評点は0.2~3.0で，罹病性‘ときわ’および‘アンコール10’の発病評

点2.4~4.8および1.4~4.8に比べ低く，病徴は弱かった(表-11)．いずれの場所においても‘きゅうり中間母本農7号’の抵抗性は優れると判定された．

表-9 育成地における‘きゅうり中間母本農7号’の果実特性

品種・系統名	果実の長さ (cm)	果実の直径 (mm)	果実の長さ /直径	果肉の厚さ (mm)	胎座の半径 (mm)	果皮硬度 (N)	果肉硬度 (N)	果肉CI ¹⁾
きゅうり中間母本農7号	22.5	26.6	8.5	9.2	5.6	8.0	9.2	1.3
ときわ	21.2	26.7	8.0	7.6	6.8	7.7	8.1	1.5
アンコール10	23.4	24.7	9.5	7.4	5.8	8.1	7.2	1.7
27028930 ²⁾	—	—	—	—	—	—	—	—

果実特性は各品種・系統につき20果実を調査した。

²⁾27028930は着果しなかったため、過去のデータを参照に果実形質を調べた。

¹⁾「シャキシャキ(あるいはパリパリ)」感の指標(値が高いほど良いとされる)。

品種・系統名	果実の基部 の形	果皮色	トゲの色	トゲの密度	イボの有無	果実の斑点 の有無	ブルームの 程度	成熟期の果 実の地色
きゅうり中間母本農7号	首あり	濃緑	白	粗	有	無	強	緑
ときわ	首あり	緑	淡褐	中	有	有	中	緑
アンコール10	鈍形	やや濃緑	白	中	有	無	中	緑
27028930	首あり	白	白	粗	有	無	—	白

表-10 特性検定試験場所における試験の概要

検定場所 ²⁾	年度	播種日	接種日	調査日	試験規模
群馬農技セ	2013	9/30	10/8	11/29	10株×2反復
	2014	10/6	10/15	11/28	10株×2反復
高知農技セ	2013	4/5	4/13	6/10	10株反復なし
	2014	4/1	4/10	6/13	10株反復なし
宮崎総農試	2013	1/30	2/11	4/17	10株×3反復

²⁾所在地 群馬農技セ:群馬県館林市当郷町, 高知農技セ:
高知県南国市廿枝, 宮崎総農試:宮崎県宮崎市佐土原町下那
珂。

表-11 特性検定試験場所における黄化えそ病抵抗性検定試験の結果

検定場所	年度	きゅうり中間母本農7号		ときわ		アンコール10		27028930		判定 ²⁾
		発病評点	発病株率(%)	発病評点	発病株率(%)	発病評点	発病株率(%)	発病評点	発病株率(%)	
群馬農技セ	2013	1.0	100	4.8	100	4.8	100	2.7	100	○
	2014	0.6	100	2.4	100	1.4	100	0.8	100	○
高知農技セ	2013	1.4	70	3.8	100	3.5	100	0.6	20	○
	2014	0.2	60	4.6	100	3.3	100	0.3	70	○
宮崎総農試	2013	3.0	100	4.3	100	4.4	100	3.8	100	○

²⁾ ○:優れる, △:同等, ×:劣る。

3 用途, 利用上の注意点および種子の配布

‘きゅうり中間母本農7号’は, 黄化えそ病抵抗性キュウリ品種育成のための母本として用いることができる。本品種の黄化えそ病抵抗性は不完全優性に遺伝するため, ‘きゅうり中間母本農7号’と同程度の抵抗性を持つF₁品種を育成するためには, 両親への抵抗性付与が必要である。本品種を用いた交雑後代ではMYSVを接種すれば発病する。そのため, 品種育成過程の抵抗性検定におい

て全く発病しない個体は, 接種が上手くできなかった個体と考える必要がある。‘きゅうり中間母本農7号’の種子は, 野菜茶業研究所から入手可能である。

IV 考 察

‘きゅうり中間母本農7号’は, 育種素材である27028930よりも強い抵抗性を有する。この原因として,

‘ときわ’と27028930とのF₂集団を用いた黄化えそ病抵抗性のQTL解析において検出された効果の低いQTLの関与が示唆される。つまり、‘きゅうり中間母本農7号’では、第4連鎖群に検出されたQTL近傍のマーカー遺伝子型は、‘ときわ’ホモ接合型であることが確認されていることから、‘きゅうり中間母本農7号’は、27028930由来の2つのQTLに加え、‘ときわ’由来のQTLの関与によって27028930より強い抵抗性を有すると考えられる。よって、‘きゅうり中間母本農7号’と同程度の抵抗性を付与するためには、第3連鎖群のQTLのみでは不十分で、第1連鎖群のQTLおよびその他の効果の低いQTLを集積させる必要があると考えられる。

実際の圃場では、MYSVは接触伝染しにくく、ミナミキイロアザミウマによって永続伝搬される。‘きゅうり中間母本農7号’が有する黄化えそ病抵抗性は中程度であるため、植物体内でウイルスの増殖が認められる。よって、MYSVが感染した‘きゅうり中間母本農7号’の植物体は、ミナミキイロアザミウマによるウイルスの獲得源になり得る。本研究では、ウイルスの汁液接種により抵抗性を判定したが、MYSVを保毒したミナミキイロアザミウマを用いた接種試験においても、‘きゅうり中間母本農7号’は中程度の抵抗性を示すことが確認されている(櫻井ら, 2013)。また、MYSVに感染した‘きゅうり中間母本農7号’植物では、罹病性品種に比べ、ウイルス蓄積量が少なかったことから(表-7)、この抵抗性の利用によって、ミナミキイロアザミウマの感染植物からのウイルス獲得率低下が期待される。これについてはさらなる研究による確認が必要であろう。

‘きゅうり中間母本農7号’は、雌花着生率が実用品種に比べ低く、果実基部に首が認められる等の欠点を有する。本中間母本を素材として実用品種を育成する場合、雌花着生率を高く、果実形質を向上させるような品種・系統と交雑する必要がある。

黄化えそ病抵抗性を判定するためには、接種後2ヶ月程度を要し、早期判定することは難しい。また、抵抗性の判定のためには専用の検定圃場あるいは施設が必要である。このような問題を解決するためにも抵抗性に連鎖したDNAマーカーによる早期選抜法は極めて有効である。今後、DNAマーカーの利用により、‘きゅうり中間母本農7号’を母本とした実用品種の育成の早期化が期待される。

V 摘 要

1) ‘きゅうり中間母本農7号’は、黄化えそ病抵抗性を

有するキュウリ系統27028930と固定品種‘ときわ’を交雑したF₅世代にF₁品種‘アンコール10’を交雑し、抵抗性検定による選抜と自殖を繰り返すことにより、黄化えそ病抵抗性および主要形質を固定させた中間母本である。

2) ‘きゅうり中間母本農7号’は、罹病性品種に比べて病徴は弱い、MYSVに全身感染するため黄化えそ病に対して中程度の抵抗性を有する。さらに、キュウリ系統27028930より強い抵抗性を示す。

3) ‘きゅうり中間母本農7号’と罹病性‘きゅうり中間母本農4号’を交雑したF₁の発病評点は、両親のほぼ中間の値を示す。また、そのF₂集団における発病評点は幅広い分布を示すことから、黄化えそ病抵抗性には複数の遺伝子が関与し、抵抗性は不完全優性に遺伝すると推定される。第3連鎖群の3マーカーは、キュウリのMYSV抵抗性育種における選抜マーカーとして利用できる。

4) 幼苗期にMYSVに感染すると、罹病性品種は5~7割程度の減収になるのに対して、‘きゅうり中間母本農7号’は1~2割程度の減収に抑えられる。また、‘きゅうり中間母本農7号’の果実には、MYSVの感染に起因するモザイクなどの症状は見られない。

5) 主枝の長さは短く、側枝の発生率が高い。性表現は混性型で、単為結果性を有する。果皮は濃緑色で、果実基部に首があり肩こけが認められる。

6) 黄化えそ病抵抗性は不完全優性に遺伝するため、‘きゅうり中間母本農7号’と同程度の抵抗性を持つF₁品種を育成するためには、両親への抵抗性付与が必要である。

引用文献

- 1) Chen, T. C., Y. Y. Lu, Y. H. Cheng, C. A. Chang and S. D. Yeh (2008): *Melon yellow spot virus* in watermelon: a first record from Taiwan. *Plant Pathol.*, 57, 765.
- 2) Chiemsombat, P., O. Gajanandana, N. Warin, R. Hongprayoon, A. Bhunchoth and P. Pongsapich (2008): Biological and molecular characterization of tospoviruses in Thailand. *Arch. Virol.*, 153, 571-577.
- 3) Gu, Q. S., H. J. Wu, H. Y. Chen, X. J. Zhang, M. Z. Wu, D. M. Wang, B. Peng, X. Y. Kong and T. J. Liu (2012): *Melon yellow spot virus* identified in China for the first time. *New Dis. Rep.*, 25, 7.
- 4) Kato, K., K. Hanada and M. Kameya-Iwaki (1999): Transmission mode, host range and electron microscopy of a pathogen causing a new disease of melon (*Cucumis melo*) in Japan. *Ann. Phytopathol. Soc. Jpn.*, 65, 624-627.
- 5) Kato, K., K. Hanada and M. Kameya-Iwaki (2000): *Melon yellow spot virus*: A distinct species of the genus *Tospovirus* isolated from melon. *Phytopathology*, 90, 422-426.
- 6) 奥田 充・山崎修一・杉山充啓 (2009): キュウリ黄化えそ病の発生動向と防除対策の展望. 植物防疫, 63, 279-283.

- 7) Quito-Avila, D. F., E. L. Peralta, R. R. Martin, M. A. Ibarra, R. A. Alvarez, A. Mendoza, M. Insuasti and J. Ochoa (2014): Detection and occurrence of *melon yellow spot virus* in Ecuador: an emerging threat to cucurbit production in the region. *Eur. J. Plant Pathol.*, **140**, 193-197.
- 8) 櫻井民人・杉山充啓 (2013): ミナミキイロアザミウマ虫媒性に対するメロン黄化えそウイルス抵抗性キュウリ品種の評価. 第57回日本応用動物昆虫学会大会講演要旨集, 107.
- 9) Shimizu, T. and K. Yano (2011): A post-labeling method for multiplexed and multicolored genotyping analysis of SSR, indel and SNP markers in single tube with bar-coded split tag (BStag). *BMC Research Notes*, **4**, 161.
- 10) Sugiyama, M., M. Okuda and Y. Sakata (2009): Evaluation of resistance to melon yellow spot virus in a cucumber germplasm collection. *Plant Breed.*, **128**, 696-700.
- 11) 杉山充啓・吉岡洋輔・下村晃一郎 (2013): メロン黄化えそウイルスの感染が黄化えそ病中程度抵抗性を有するキュウリ安濃4号および罹病性品種の生育と収量に及ぼす影響. 園学研., **12**, 255-261.
- 12) Sugiyama, M., Y. Kawazu, N. Fukino, Y. Yoshioka, K. Shimomura, Y. Sakata and M. Okuda (2015): Mapping of quantitative trait loci for *Melon yellow spot virus* resistance in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Euphytica*, DOI 10.1007/s10681-015-1444-x
- 13) 竹内繁治・奥田 充・花田 薫・川田洋一・亀谷満朗 (2001): メロン黄化えそウイルス (*Melon yellow spot virus*) によるキュウリ (*Cucumis sativus*) の黄化えそ病. 日植病報., **67**, 46-51.

Development of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Parental Line 'Kyuri Chukanbohon Nou 7 Go' with Resistance to *Melon Yellow Spot Virus*

Mitsuhiro Sugiyama, Yoichi Kawazu, Koichiro Shimomura, Yosuke Yoshioka,
Yoshiteru Sakata, Nobuko Fukino and Yuji Noguchi

Summary

'Kyuri Chukanbohon Nou 7 Go', a cucumber parental line with intermediate resistance to *Melon yellow spot virus* (MYSV), was developed from crosses among 27028930, which has intermediate resistance, and susceptible 'Tokawa' and 'Encore 10'. 'Kyuri Chukanbohon Nou 7 Go' shows milder symptoms than susceptible cultivars. Its resistance is controlled by polygenes with incomplete dominance. SSR markers on chromosome 3 allowed selection for MYSV resistance in breeding. The yields of 'Kyuri Chukanbohon Nou 7 Go' inoculated with MYSV were 79 to 88% of those of healthy controls, and mosaic fruits were not observed. On the other hand, the yields of susceptible cultivars were only 32 to 52% of those of the controls, and mosaic fruits were observed. 'Kyuri Chukanbohon Nou 7 Go' is monoecious and parthenocarpic. The fruits have dark green skin and a necked shape at the stem end.

ISFET 硝酸イオンセンサの試作と野菜の硝酸含量測定への応用

伊藤 秀和・脇田 慎一*

(平成 27 年 9 月 8 日受理)

Nitrate Ion Determination of Vegetables Using a Portable ISFET-Nitrate Ion Sensor.

Hidekazu Ito and Shin-ichi Wakida

I 緒 言

硝酸イオンはメトヘモグロビン血症等発生との関連が議論されるようになった (Santamaria, 2006). ヒトが摂取する硝酸イオンの 5~9 割は野菜由来といわれ (孫ら, 1996), 葉菜類に多い (山下, 2002). 硝酸イオンの定量法は主にイオンクロマトグラフィー (Ito ら, 2005), 硝酸イオン電極 (伊藤, 2009), 小型反射式光度計等 (Ito ら, 2003) がある.

先に, 野菜試料における硝酸イオンの測定法に関して平板型硝酸イオン電極を用いる方法の妥当性について報告した (伊藤, 2009). 平板型硝酸イオン電極を用いる方法の特徴として, 比較的安価で, 実験室のみならず現場でも栄養診断等の利用が可能であり, 定量可能な濃度域が広く, 野菜類の汁液を希釈せずに定量可能で希釈誤差が発生せず, 労力や硝酸イオン精製コスト削減が可能となる. また, イオン電極はベースラインが変動するため, 精度の高い測定には較正が欠かせないが, 平板型硝酸イオン電極では必要に応じて機器本体の較正を行うことができる. 平板型硝酸イオン電極を用いた野菜試料の測定値をノンサプレッサイオンクロマトグラフィー (IC) による硝酸イオン定量値を参照値として検討した結果, 広い濃度範囲で両者の定量値は良く一致し, 妥当性の高いことを示した.

平板型硝酸イオン電極を用いた場合には, 測定開始直後から指示値が低下するケースが多いため, 指示値が 7 分間変わらない時の値を読み取ることが適切であることを

前報において報告した (伊藤, 2009).

平板型硝酸イオン電極を利用した野菜汁液の定量法には多くのメリットがあるが, 測定開始直後は指示値が変動しやすく誤差原因となるリスクがある. そこで, 指示値が速やかに安定する新たな定量法の検討を行うこととした. 半導体技術を用いたイオンセンサは, 従来のイオン選択性電極 (Ion selective electrode : ISE) に対し, イオン感応性電界効果トランジスタ (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor : ISFET) と呼ばれる. 両者は典型的な電位差分析法であり, 比較電極と組み合わせて電池を構成させて起電力を測定することによりイオン濃度 (活量) を測定する. ISFET においてイオン選択性膜の導電性は必ずしも必要ではないので pH 応答材料として絶縁体の酸化 tantalum 等が使われている. 絶縁体材料は電気抵抗が高いので従来の ISE に使用出来ないが, ISFET の電荷検出機能は絶縁体を介した電場に基づく電界効果による高入力抵抗が特長であり, 絶縁体でも薄膜にすれば使用可能となる. 一般的に, イオン感応膜に薄膜を用いた ISFET センサの応答速度は従来のイオン電極よりも速い (春田ら, 1995). この ISFET 技術による pH 計は市販されている.

脇田ら (1989) はポリ塩化ビニルをプラスチック膜化材料とする硝酸イオン選択性電界効果トランジスタの長寿命化を達成した. また, 脇田らは ISFET を利用した硝酸イオンセンサを試作し, 雨水 (Wakida ら, 2007) や唾液中の硝酸イオン (脇田ら, 2011) を測定した. 農業分野では, 水耕液中の肥料成分 (Gieling ら, 2001) や土壌 (Artigas ら, 2001)

を測定した報告があるが、硝酸イオン濃度の高い野菜試料への適用は見あたらない。

そこで、速やかに指示値が安定することが期待される ISFET を利用した硝酸イオンセンサを試作し、野菜汁液測定への適用を試みた。

II 材料および方法

1 野菜試料

市販の結球レタス（以下レタス）4 試料，キャベツ 1 試料，ハクサイ 3 試料，チンゲンサイ 1 試料，ホウレンソウ 1 試料およびコマツナ 1 試料を供した。前報（伊藤，2009）と同様に、搾汁が容易で搾汁率の高い茎を主な対象とした。レタス茎 ($n = 2$ ，下から 1.5 cm) およびハクサイ葉柄 ($n = 3$ ，直径 40 mm のコルクボーラーを使って切り抜いたもの) はプラスチック製のニンニクおろし器を使ってすりおろした後に遠心分離（国産遠心器^株製 H-103N，3000 回転，10 分間）した。チンゲンサイ葉柄 ($n = 1$ ，直径 40 mm のコルクボーラーを使って切り抜いたもの) およびキャベツ茎 ($n = 1$) はセラミック製のおろし器を使ってすりおろした。ホウレンソウ ($n = 1$) およびコマツナ葉柄 ($n = 1$) は基部から約 5 mm の長さに切断後，ニンニク搾り器を使って搾汁した。レタス可食部 ($n = 2$) はジューサーミキサー（National MJ-C36）のミキサー機能を使って破碎後，遠心分離（3000 回転，10 分間）して汁液を得た。得られた野菜汁液は孔径 0.2 μm のディスポーザブルフィルター（Advantec, DISMIC-25CS020）を通した後に -20°C で凍結保存し，適宜解凍して各測定に供した。

2 ISFET 硝酸イオンセンサの試作

新電元工業^株製の ISFET pH 計（型式 KS723）に硝酸イオン選択性膜を貼り付けて硝酸イオンセンサ試作器（以下、「ISFET 試作器センサ」とする）とした（図 1）。硝酸イオン選択性膜の組成は，イオン感応物質：bis (bathocuproin)-copper (I) nitrate ($[\text{Cu}(\text{BCP})_2]\text{NO}_3$)（Hara ら，1994）5%，可塑剤（液膜溶媒）：2-nitrophenyldodecylether (NPDDE（同仁化学，現在は非売品）（Wakida ら，2007）65%，プラスチックとして固定するための物質：塩化ビニルポリマー（PVC，重合度約 1020，キシダ化学^株）30% の組成でテトラヒドロフラン約 1 mL に溶解した。この硝酸イオン測定用のカクテルをセンサ部にパスツールピペットを使ってキャストし，一晚室温で乾燥後に供試した（Wakida ら，2007）。実験終了後に膜をはがしてデジタル

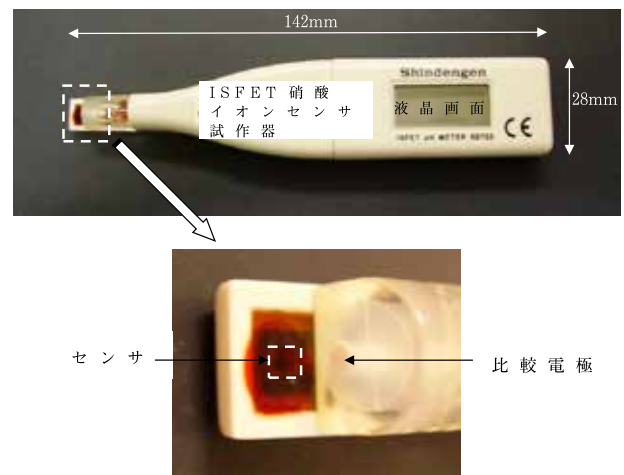


図-1 ISFET を利用した硝酸イオンセンサ試作器 (ISFET 試作器センサ)

ノギス（株）ミットヨ製デジマチックキャリパ CD-15CP）を用い膜厚を測定した結果，約 0.07mm であった。比較電極はアイスフェトコム^株製 R2K712 を使用した。

3 ISFET 試作器センサを用いる硝酸イオン定量

和光純薬工業製の特級硝酸カリ試薬を用いて硝酸イオン濃度 10 gL^{-1} の標準液を 1 L のメスフラスコを用いて調整し，適宜希釈して使用した。ISFET 試作器センサを用いた測定手順を表 1 に示す。標準液や野菜汁液の測定前に，フマル酸 0.1 gL^{-1} の水溶液をセンサ部に浸すことにより洗浄し，4 および 0.2 gL^{-1} の標準液を使って 2 点校正した。検量線は濃度の異なる標準液 ($n = 9$) を測定し Microsoft 製 Excel2013 を用いて作成した。測定時の試料容量は 50 μL とし，被験液の蒸発を防ぐために，本体に付属のキャップを装着した。被験液 50 μL をセンサ部に浸した後，液晶画面指示値が 3 分間安定した時の値を測定（定量）値とした。

4 IC を用いる硝酸イオン定量

HPLC 装置は日本分光製を使用した。カラムは Shodex IC I-524A（専用プレカラム Shodex IC IA-G を接続，昭光通商^株），溶離液は 1 mM フタル酸 (pH4.3) \cdot 1 mL/min，カラム温度は 40°C ，検出は電気伝導度検出器（Shodex IC CD-4，昭和電工^株）を使用し，極性は+に設定した。被験液を 100 倍希釈後，20 μL を注入し，1 点検量線法により定量値を算出した（Ito ら，2005）。

5 ISE を用いる硝酸イオンの定量

株）堀場製作所製平板型硝酸イオン電極 C-141 の更新機種

であるコンパクト硝酸イオンメーター (twin NO_3^- , B-343) を用いて被験液量は 50 または 100 μL とし、添付の 0.150 および 2 gL^{-1} の硝酸カリ水溶液を使って 2 点校正した。前報 (伊藤, 2009) に準じて測定時は被験液の蒸発を防ぐために付属のカバーをし、指示値が 7 分間安定した時の値を読み取って測定 (定量) 値とした。センサ部は蒸留水に浸すことにより洗浄した。

6 pH の測定

ポケット pH 計 (アイスフェトコム(株)製 S2K922) を用いて被験液量は 50 μL とし、測定時には被験液の蒸発を防ぐために本体に付属のキャップを装着し、和光純薬工業製の pH6.86 および 4.01 の標準緩衝液を使って 2 点校正した。指示値が 2 分間安定した時の値を読み取って測定値とした。センサ部は蒸留水に浸すことにより洗浄した。本機器は ISFET を利用した pH 計である。

7 統計解析

野菜試料 ($n = 10$) における IC を用いる硝酸イオン定量値と ISFET 試作器センサを用いる硝酸イオン定量値はペアの t 検定にかけた (池ヶ谷ら, 1988; 伊藤, 2009)。

III 結果および考察

1 ISFET 試作器センサを用いる測定手順

ISFET 試作器センサの洗浄液に関して、当初は前報 (伊藤, 2009) 同様に蒸留水を使用していたが、標準液測定後にベースライン (指示値) が高いまま元に戻りにくく再現性のある測定値が得られなかったため他の洗浄液を検討した。ベースラインが元に戻りにくい原因は硝酸イオンと電気的に同じ方向に反応する陰イオンと考えられる。そこで、水溶液中で陰イオンを生成するフマル酸の 0.1 gL^{-1} 水溶液を使用した結果、ベースラインをほ

ぼ元の値に戻すことが可能となり再現性のある測定値が得られるようになった。ベースラインが元に戻りにくい場合は再度 2 点校正を行った。以上の操作 (表 1) が測定精度を良好にしたと考えられる。

2 ISFET 試作器センサの検量線の作成

ISFET 試作器センサで 0.15 から 8.5 gL^{-1} の標準液 ($n = 9$) を測定し、硝酸イオン濃度と ISFET 試作器センサ測定値に決定係数 $R^2 = 0.996$ および次式 (検量線) (図 2) を得た。

試作器の測定値 =

$$0.97 \times \log_e (\text{自然対数}) (\text{硝酸イオン濃度 } (\text{gL}^{-1})) - 1.14$$

図 2 に示したように、濃度が高くなるほど活量係数が小さくなり相対的に感度が低くなる。

3 ISFET 試作器センサおよび ISE を用いる指示値の経時変化

ISFET 試作器センサを用いて指示値が 3 分間安定するまでの経時変化および ISE を用いて指示値が 7 分間安定

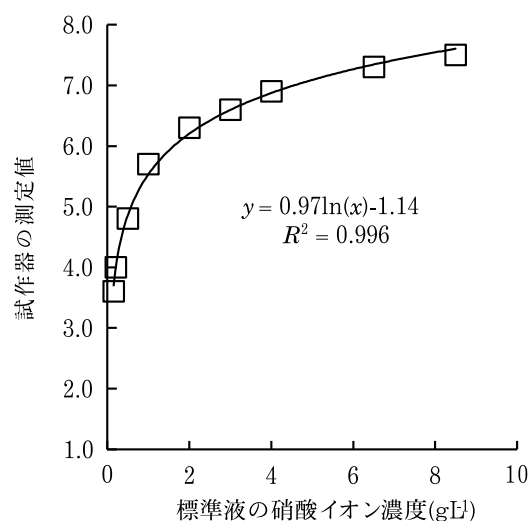


図-2 ISFET 試作器センサの硝酸イオン検量線

表-1 ISFET 試作器センサを用いる野菜中硝酸イオン濃度測定手順

- ①0.1 gL^{-1} フマル酸水溶液でセンサおよび比較電極 (図1) を2~3分間浸して洗浄 (2回)
- ②高濃度標準液 (4 gL^{-1}) を浸し、指示値が3分間安定したらキャリブレーション
- ③0.1 gL^{-1} フマル酸水溶液で2~3分間浸して洗浄 (3回)
- ④低濃度標準液 (0.2 gL^{-1}) を浸し、指示値が3分間安定したらキャリブレーション
- ⑤0.1 gL^{-1} フマル酸水溶液で2~3分間浸して洗浄 (2回)
- ⑥試料の測定 (指示値が3分間安定したら読みとって測定 (定量) 値とする)
- ⑦0.1 gL^{-1} フマル酸水溶液で浸して2~4回洗浄、終了時はさらに蒸留水で浸して洗浄 (2回)

* 各液量は50 μL

するまでの経時変化を図3に示す。前報(伊藤, 2009)ではISEを用いる時に実験上指示値が7分間安定した時の値を測定値として採用したため、指示値が7分間安定するまでの経時変化を示し、また、経時変化を直接出力できないため、特にISEの測定開始直後の最も変化する部分は除いた。ISFET試作器センサではISEと比較すると硝酸イオン濃度に関わらず速やかに指示値が安定するので、測定者によらずに正確な測定が期待される。一方、ISEでは測定開始3分後までに最も指示値が変化しやすく、野菜試料のみならず標準液においても濃度が高くなる程、安定するまでの時間が長くなる傾向がある。ISEでは、高濃度校正液(2 gL⁻¹)と同様の濃度では測定値が速やかに安定する場合があったが、3分間安定する時間を調べてもコマツナ茎被検液で15分、ホウレンソウ茎被検液で17分、レタス茎2被検液で7分を要し、測定値はそれぞれ各1, 1, 0.2 gL⁻¹低下した。

4 ISFET 試作器センサを用いる野菜試料の測定

ISFET 試作器センサを用いる測定は1試料あたり3から4分程度であり、平板型硝酸イオン電極と比較すると測定値が速やかに安定する(伊藤, 2009)。

野菜試料(n=10)におけるICを用いる定量値とISFET 試作器センサを用いる定量値との間には、1%水準で有意な相関係数(0.99**)が得られた。加えて、両者の定量値をペアのt検定にかけた結果、有意差は認められず、両者の定量値は良く一致する(図4)。

5 ISEを用いる標準液および野菜試料の測定

(株)堀場製作所製の平板型硝酸イオン電極(C-141)(従

来のISE)はマイナーチェンジしてtwin NO₃⁻, B-343となった。そこで、本試験においてはB-343を用いて測定した。ISFET 試作器センサと同様に0.15から8.5 gL⁻¹の標準液(n=9)を測定し、硝酸イオン濃度と測定値との間に決定係数R²=0.999と試作器同様の高い相関係数を得た。また、試作器と同様に濃度が高くなるほど活量係数が小さくなり相対的に感度が低くなる(図5)。なお、標準液および野菜汁液の測定値(図3, 5, 表2)は濃度が高くなる程、実際の濃度より低くなったが、試料の硝酸イオン濃度が高くなるほど、低くなる測定値は、前報同様に低濃度標準液を工夫して校正すれば改善可能である(伊藤, 2009)。

本試験においては校正する際に、ISFET 試作器センサ

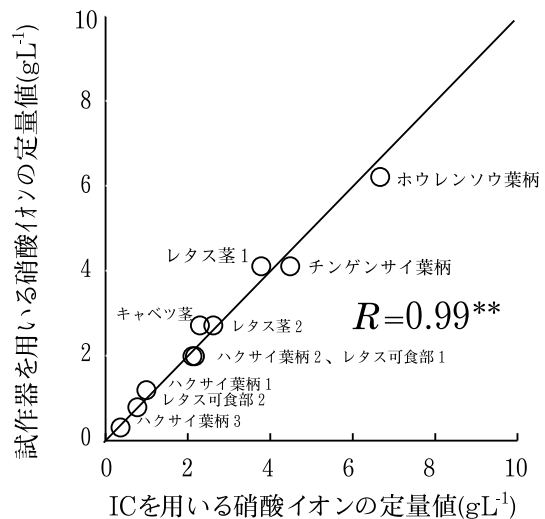


図-4 野菜試料におけるICを用いる定量値とISFET 試作器センサを用いる定量値の関係 (グラフ中の斜線はX=Yを示す。両値の相関係数(R)は0.99** (n=10), ペアのt検定で有意差無し。)

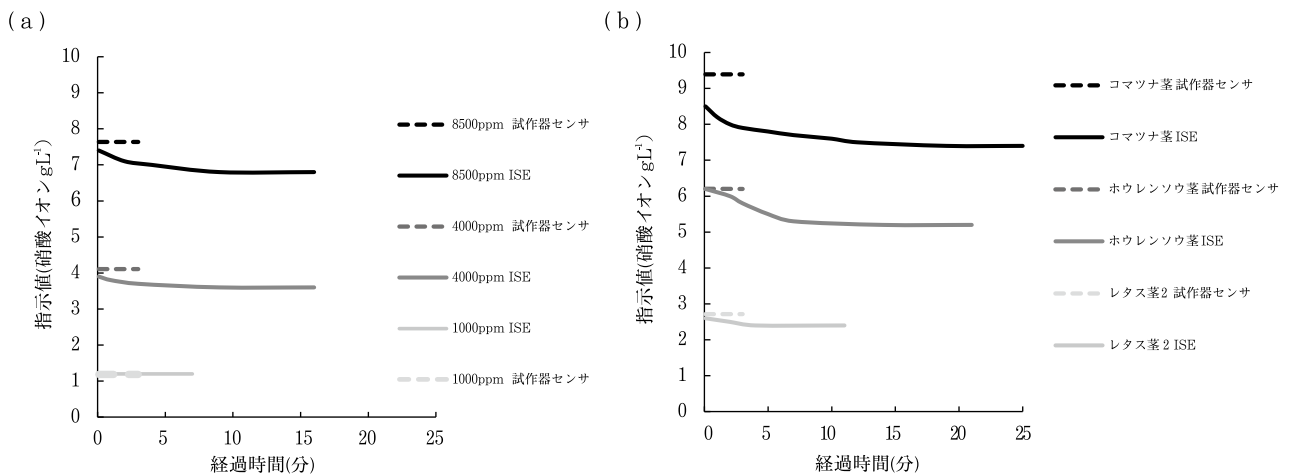


図-3 ISFET 試作器センサおよびISEによる指示値の経時変化 (a) 標準液 (b) 野菜試料 (ISFET 試作器センサは指示値が3分間安定するまでの経時変化, ISEは指示値が7分間安定するまでの経時変化)

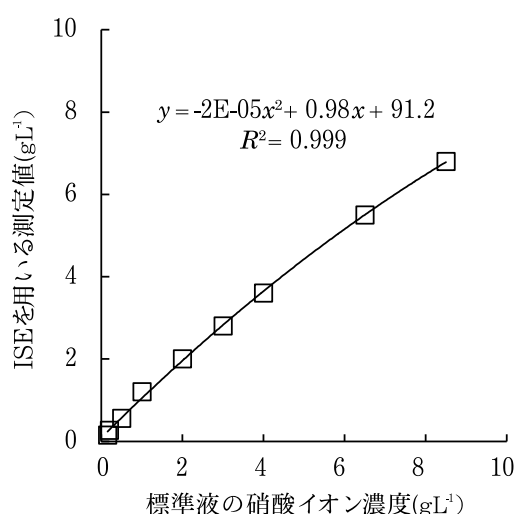


図-5 標準液の硝酸イオン濃度と ISE を用いる硝酸イオン測定値との関係

と統一して特段の工夫はしなかった。その結果、ISE と異なり ISFET 試作器センサでは図 2, 3 および 4 に示すように標準液および野菜試料において精度の高い測定値を得ることができた。

6 ISFET 試作器センサ, IC, ISE の定量値および pH の相関関係

野菜汁液中硝酸イオンの各定量値と pH を表 2 に示す。ISFET 試作器センサは ISFET を利用した pH 計に硝酸イオン感応膜を固定化して試作したので、ISFET を利用した pH 計を用いて pH を測定し、各硝酸イオンの定量値との相関を調査した。その結果、IC、試作器および ISE を用いる硝酸イオン定量値と pH との相関関係はいずれも明確に無相関といえる (表 3)。

IC、ISE および ISFET 試作器センサを用いる硝酸イオン定量値における 2 項目間の相関はどれも高かった (相関係数 0.99 **, 表 3)。このことは、ISE と試作器の両方とも硝酸イオンを選択性高く定量でき、試作器は従来の ISE と同等の精度で硝酸イオンを定量できたことを意味する。

今回は精度の高い厳密に規定された実験を実施するために、前報 (伊藤, 2009) に準じて ISE の指示値が 7 分間安定した場合に測定値として採用したが、現段階では測定直後の指示値を測定値として採用することを必ずしも否定するのではない。実際に、測定開始直後のやや落ちてきた指示値と IC の定量値との相関係数は 0.99 であり、センサ部を交換するなどして精度の高い測定ができたためと考えられる。しかし、ISE 電極部の反応が

表-2 野菜試料における IC, ISFET 試作器センサ, ISE を用いる硝酸イオンの定量値および pH

試料	硝酸イオンの定量値 (g/L ⁻¹)			pH
	IC	試作器	ISE	
ハクサイ葉柄1	0.994	1.200	0.880	5.85
ハクサイ葉柄2	2.170	2.000	2.000	5.80
ハクサイ葉柄3	0.361	0.310	0.330	5.73
レタス茎1	3.780	4.100	3.200	6.26
レタス茎2	2.600	2.700	2.400	6.70
レタス可食部1	2.110	2.000	1.900	5.91
レタス可食部2	0.776	0.780	0.910	6.20
キャベツ茎	2.290	2.700	2.300	6.78
チンゲン菜葉柄	4.480	4.100	3.800	5.35
ホウレンソウ葉柄	6.670	6.200	5.200	5.82

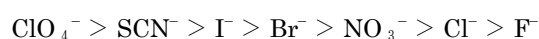
表-3 野菜試料における測定項目間の相関係数

	硝酸イオンの定量値			pH
	IC	試作器	ISE	
IC	1			
試作器	0.99	1		
ISE	0.99	0.99	1	
pH	-0.17	-0.06	-0.11	1

鈍くなると指示値が低下しにくくなり IC の定量値よりも高くなりやすい (Ito ら, 2003) ので、ISE 電極部の交換時期が不明な場合には、ある程度長い測定時間を設定した方がよい。加えて、前述のように測定開始直後は指示値の変化が激しいため、実験においては厳密に測定法を規定しておく必要がある。

7 誤差原因及び今後の方向性

アニオン電極に用いられるイオン感応物質 (交換体) の選択性は、特定イオンとの強い錯形成能を利用するカルシウム電極とは異なり、下記に示すホフマイスター系列に従うことが知られているが、アルキル基などの立体的障害により選択性を多少コントロール可能である (春田ら, 1995)。



前報 (伊藤, 2009) で、キャベツ茎が +0.849 g/L⁻¹ という比較的大きな誤差を発生し、誤差要因の一つとして被験液に含まれるチオシアン酸イオンが考察された。本試験においてもキャベツ茎を供試したが +0.421 g/L⁻¹ の誤差であり、前報ほど大きな誤差は発生しなかった (表 2)。このように、今回の実験では誤差が小さかったため、

誤差原因を明らかにすることはできなかったが、野菜では栽培法や収穫時期により成分含量が異なる場合のあることは周知の事実であるので、誤差原因に関しては今後の取り組みが必要である。

以上の結果から今後の実用化が期待され、その際にはより多くの野菜試料で検討し、被験液中に含まれている様々な成分に注目することにより適用範囲をより明確にできると思われる。また、濃度が高くなる程、感度が低くなるので、自動的にイオン活量を補正する機構の搭載が望ましい。洗浄に時間を要するので、洗浄時間の短縮も期待したい。

IV 摘 要

イオン感応性電界効果トランジスタ (ISFET) を利用した硝酸イオンセンサを試作し、野菜試料への適用を試みた。測定開始後、従来の硝酸イオン電極 (ISE) と比較して指示値は速やかに安定するので、測定者によらずに客観的かつ妥当性の高い定量値が得られることが期待される。また、平板型硝酸イオン電極のように、較正に使う低濃度標準液に特段の工夫をする必要は無い。定量値はノンサプレッサイオンクロマトグラフィー (IC) を用いる定量値と良く一致した。ISFET を利用した pH 計に硝酸イオン感応膜を固定化した試作器であったが、野菜試料において pH とは無関係に ISE と同様の精度で硝酸イオンを定量可能であった。平板型硝酸イオン電極同様、微量 (50 μ L) で測定可能であり、野菜汁液を希釈せずに定量可能であるので希釈誤差は発生しない。

引用文献

1) Artigas, J., A., Beltran, J., Alonso, J., Bartroli, C., Jimenez, J., Munoz, R., Mas and C., Dominguez (2001): Application of

ISFET based sensors to soil analysis. *Acta Hort.*, **562**, 287-294.

2) Gieling, T.H., J.F.J., Engbersen and J.J.W., Westra (2001): Chemically modified field effect transistors to monitor ion concentration in nutrient solutions. *Acta Hort.*, **562**, 413-421.

3) Hara, H., K., Takahashi and H., Ohkubo (1994): Nitrate ion-sensitive field effect transistor based on bis(bathocuproin)-copper (I) nitrate dissolved in solid solvents. *Analytica Chimica Acta*, **290**, 329-333.

4) 春田正毅・鈴木義彦・山添昇 (1995): センサ先端材料のやさしい知識. 107-135. オーム社, 東京.

5) 池ヶ谷賢次郎・高柳博次・阿南豊正・岩元陸夫・魚住純・西成勝好・趙米光 (1988): 近赤外分光法による煎茶およびまっ茶の全窒素・カフェイン・全遊離アミノ酸類・テアニンおよびタンニンの定量. 野菜茶試研報., **B2**, 47-90.

6) 伊藤秀和 (2009): 平板型硝酸イオン電極による野菜汁液中硝酸イオンの定量. 土肥誌, **80**, 396-398.

7) Ito, H., H., Horie, Y., Nagai, K., Ippoushi and K., Azuma (2003): The determination of nitrate in spinach and Japanese radishes by RQflex, portable ion electrode (pIE), high performance liquid chromatography (HPLC) and high performance capillary electrophoresis (CE). *Acta Hort.*, **604**, 545-548.

8) Ito, H., H., Kiya and H., Horie (2005): Simultaneous analysis of nitrate and major organic acids in spinach using ion chromatography (IC). *Acta Hort.*, **687**, 369-370.

9) Santamaria, P. (2006): Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *J. Sci. Food Agri.*, **86**, 10-17.

10) 孫尚穆・米山忠克 (1996): 作物体の硝酸の生理, 集積, 人の摂取. 農業及び園芸, **71**, 1179-1182.

11) 脇田慎一・宮道隆・渋谷康彦・村井康二・福士恵一・林祐司 (2011): 生体成分計測用バイオ FET の研究開発 (VII) 被験者全唾液計測の予備的検討. *Chemical Sensors*, **27**, supplement B, 116-118.

12) Wakida, S., T., Okumura, Y., Shibusaki and J., Liu (2007): Highly sensitive nitrate-sensing materials for ion-selective field-effect transistors for single-drop rain analysis. *Sensors and Materials*, **19**, 235-247.

13) 脇田慎一・山根昌隆・川原昭宣・高須賀さほり・東国茂 (1989): ポリ塩化ビニルをマトリックスとする硝酸イオン選択性電界効果トランジスタの長寿命化. 分析化学, **38**, 510-514.

14) 山田市二 (2002): 野菜の硝酸. 食衛誌, **43**, J12-J15.

Nitrate Ion Determination of Vegetables using a Portable ISFET-Nitrate Ion Sensor

Hidekazu Ito and Shin-ichi Wakida*

Summary

We prepared a prototype of the ion sensitive field effect transistor (ISFET)-nitrate ion sensor for vegetables using copper (I) complex as a nitrate ion-sensing material, 2-nitrophenyldodecyleher (NPDDE) as a liquid membrane material (platicizer) and poly(vinyl chloride) (PVC) as a conventional membrane material. The above-mentioned tetrahydrofran (THF) solution was casted onto the gate part of the ISFET- pH instrument, THF was evaporated at room temperature. The water solution of fumarate was dropped on the gate and reference electrode to wash. The water solution of potassium nitrate was measured and the calibration was developed. Juice of vegetable samples was collected and filtrated with a disposable filter (pore size 0.2 μm). Measuring times of the instrument were shorter than a conventional, card-shaped nitrate ions selective electrode (ISE). The instrument showed almost identical accuracy with a commercialized nitrate ISE, a high correlation ($n=10$, $R=0.99^{**}$) with ion chromatography, and no correlation with pH.

摘採適期前後におけるチャ品種 ‘やぶきた’, ‘りょうふう’, ‘ふうしゅん’ の一番茶新芽の化学成分含有量の変動

池田 奈実子・水野 直美*・田中 拓也**
新井 真一郎***・松延 健臣****

(平成 27 年 9 月 10 日受理)

Change of Chemical Constituents in New Shoots of First Crop of Tea Cultivars ‘Yabukita’, ‘Ryofu’ and ‘Fushun’ around Harvesting Time

Namiko Ikeda, Naomi Mizuno, Takuya Tanaka,
Shinichiro Arai and Kenshin Matsunobu

I 緒 言

チャ品種の収量性は、自然条件による環境的要因に大きく影響されるだけでなく、生育中の新芽を収穫するため、摘採の時期や部位のような人為的な条件にも大きく影響される。チャの育種試験および栽培試験では一般的に最も製茶品質がよい摘採適期に収穫する。摘採適期の判定は生産者においても、試験研究においても、手ざわりで判断されてきた(佐波, 1994)。萌芽から約1ヶ月後に新芽を握って硬化程度を判定して行うが、判定者による差異が生じるのは否定できない。客観的な摘採適期の判定方法として出開度がある。桑原ら(1960)は出開度が70%を超えると大きく製茶品質が低下することを報告している。出開度70%の時を摘採適期とすることはほとんどの場合妥当であるが、新芽の出開きの程度は定植年次、仕立てのような栽培管理によって異なるため、幼木や中切り、台切りの翌年や、玉露やてん茶栽培のような自然仕立てでは、出開度70%が摘採適期の基準として当てはまらないことがある。

チャの育種試験における収量性の検定は、摘採適期に

収穫して比較するのが原則で、客観的な摘採適期の指標として出開度が用いられてきた。チャ品種‘しゅんたろう’の育成報告においては、育成地での‘しゅんたろう’の収量は比較品種の‘くりたわせ’を大幅に上回ったと述べられている(根角ら, 2012)。しかし摘採適期の指標である出開度の記載は、育成地の試験では2009年以外は記載されておらず、他の年には摘採適期に収穫されたかどうか判断できない。摘採適期の指標が示されている2009年は、対照品種の‘くりたわせ’の出開度が14.5%と著しく小さく、‘くりたわせ’は摘採適期よりかなり前に収穫したため収量が少なくなったと考えられるので、両品種とも摘採適期に収穫して比較した場合には、‘しゅんたろう’が‘くりたわせ’より多収とは言えない可能性がある。また、‘さえみどり’の育成試験(武田ら, 1991)と比較して、対照品種および比較品種の育成地での収量が少な過ぎるため、試験の遂行において自然的あるいは人為的な阻害要因があったと考えられる。したがって、この報告のデータからは‘しゅんたろう’が‘くりたわせ’より多収であると結論づけることはできない。

出開度以外の摘採適期の判定法についても検討が行われてきた。此本(1980)は新芽の先におもりをつるす方

〒428-8501 静岡県島田市金谷猪土居2769

茶業研究領域

* 企画管理部

** 田中緑茶園

*** (株)新井園本店

**** 今福製茶協同組合

法によって湾曲位置から新芽の硬化度を測定した。その結果、チャ新芽の茎の硬化度はチャ収量と正の相関が高く、また製茶品質と負の相関が高く、新芽の茎の硬化度を測定することによって適採適期の判定に用いることができることを報告している。佐波ら(1993)はチャ新芽の節間と新葉をピアノ線で切断することによって硬化度を測定し、新芽の最下位葉の上の節間が硬化し始める時期に製茶品質が低下することを明らかにしている。どちらも新芽の硬化度を測定する方法であるが、出開度より簡便とは言えない。

チャは日本において1000年以上栽培されてきた作物であるが、長い間貴重品だったために量より質が求められてきた。しかし、現在、茶は安全、安価で国内で自給できる国民的な嗜好飲料であり、収量性が最も重要である。チャの収穫期の新芽は生育中で毎日収量が増加するため、収穫期の概念を統一しなければ、チャ品種の収量性の品種間差を正確に明らかにすることはできない。

1980年代後半に茶の近赤外分光分析法が開発されて、茶の化学成分含有量の簡易な測定が可能になり、製茶工場、JAなどの生産現場で実用化されている(池ヶ谷ら, 1990)。本試験では、チャ新芽の化学成分含有量で摘採適期を判定する方法を開発するために、‘やぶきた’、‘りょうふう’、‘ふうしゅん’について、2012年から2014年の一番茶摘採期中の化学成分含有量の変動を明らかにした。

3年間に渡って、試験圃場の管理について多大なご尽力をいただいた業務第2科、田村保晃氏、田中浩正氏、関義晃氏、岩切浩文氏、本田康之氏、伊藤康博氏に深謝する。

II 材料および方法

材料は野菜茶業研究所(金谷)内の圃場の‘やぶきた’、‘りょうふう’、‘ふうしゅん’を用いた。試験期間中の年間施肥量は成分量で窒素45.2kg/10a、リン酸12.8kg/10a、カリ16.4kg/10aであった。2012年5月21日に中切りを行った。

摘採適期の判定は萌芽後約1ヶ月を目安として、新芽を手で握って、手ざわりで硬化度を判定した。具体的には、握った時にぬるっとした感覚がなくなり、硬さを感じるようになったら、摘採適期を過ぎたと判断した。2012年、2013年、2014年の一番茶期に萌芽日の約3週間後から14~20日間、毎日、畝の東西1ヶ所ずつ、30cm四方の枠を用いて枠摘みを行い、出開度、新芽重の調

査を行った。2014年は‘さえみどり’、‘めいりよく’、‘おくゆたか’、‘おくみどり’について摘採適期の前後3日間、同様の方法で試料の採取と調査を行った。調査後、1分間蒸熱して殺青し、乾燥後、乾燥重を求めた。新鮮重と乾燥重から新芽の湿量基準の含水率を求めた。2012年は含水率の測定は行わなかった。試料は成分分析まで4℃の冷蔵庫内で保存した。分析直前に粉碎し、近赤外分光分析機 DICKEY-join Near Infrared Analyzer を用いて中性デタージェント繊維含有量を含む化学成分含有量の分析を行った。

気温、降水量の値は野菜茶業研究所(金谷)の気象観測値を用いた。

III 結果

2013年4月26日から2013年4月30日までは、気象観測装置の不具合によって値が採取できなかった。

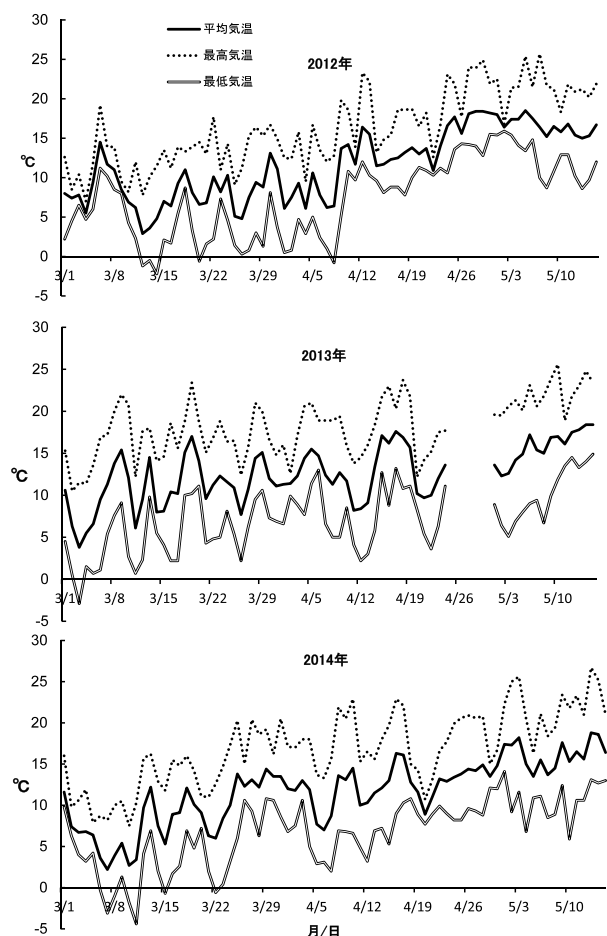


図-1 野菜茶業研究所(金谷)の2012年、2013年、2014年の3月~5月の気温

表-1 手触りで判定したチャ品種の摘採適期と出開度

品種	年					
	2012年		2013年		2014年	
	摘採適期	出開度	摘採適期	出開度	摘採適期	出開度
やぶきた	5月5日	77.7%	4月26日	44.5%	5月5日	79.9%
りょうふう	5月10日	70.7	4月28日	34.5	5月7日	77.6
ふうしゅん	5月10日	91.9	5月1日	47.4	5月8日	73.0

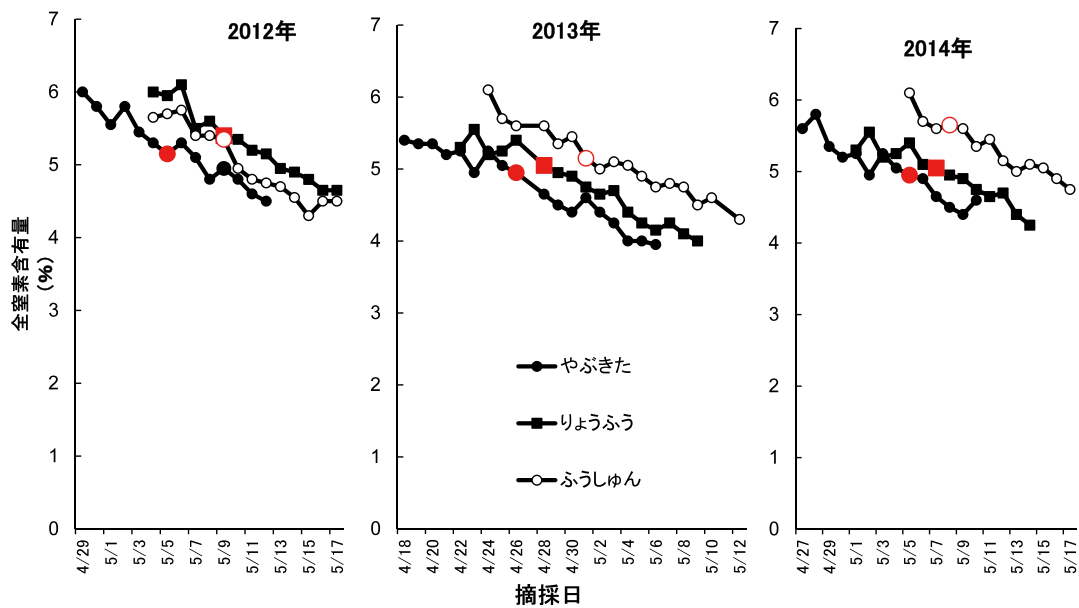


図-2 ‘やぶきた, りょうふう, ふうしゅん’ における一番茶摘採期のチャ新芽の全窒素含有量の変動
赤色のマーカーは手ざわりで判断した摘採適期。

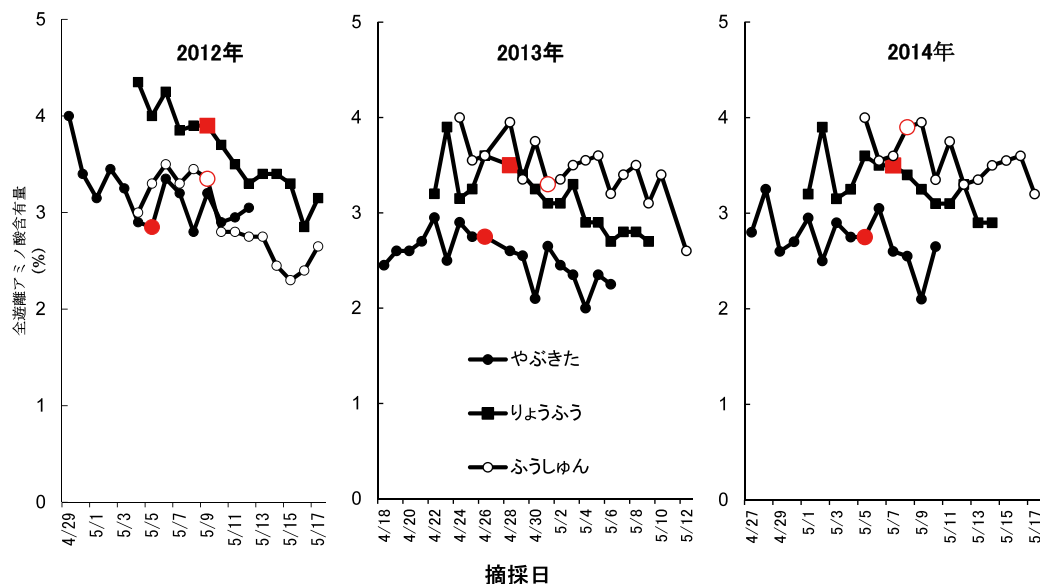


図-3 ‘やぶきた, りょうふう, ふうしゅん’ における一番茶摘採期のチャ新芽の全遊離アミノ酸含有量の変動
赤色のマーカーは手ざわりで判断した摘採適期。

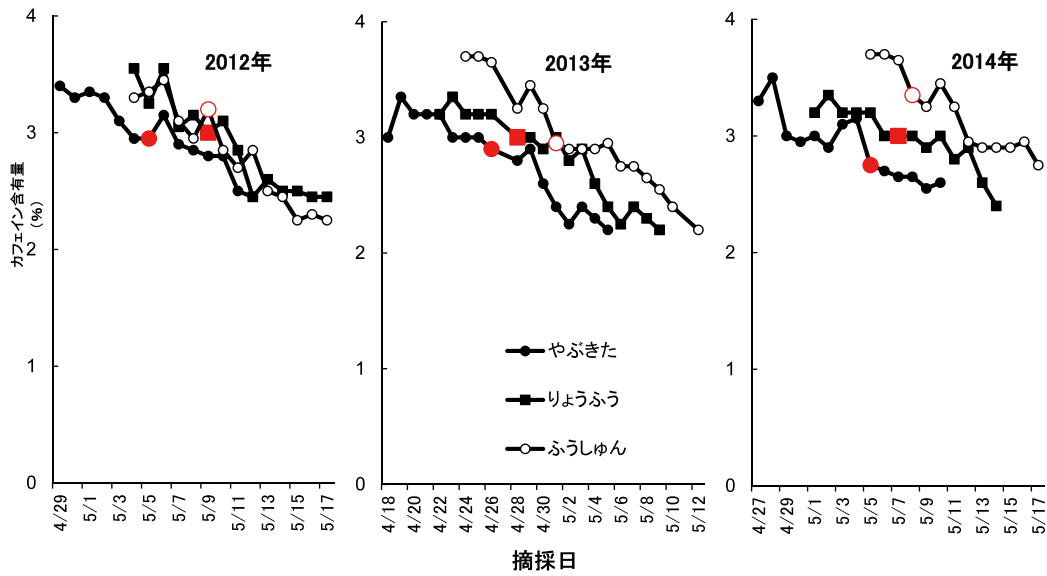


図-4 ‘やぶきた，りょうふう，ふうしゅん’における一番茶摘採期のチャ新芽のカフェイン含有量
赤色のマーカーは手ざわりで判断した摘採適期。

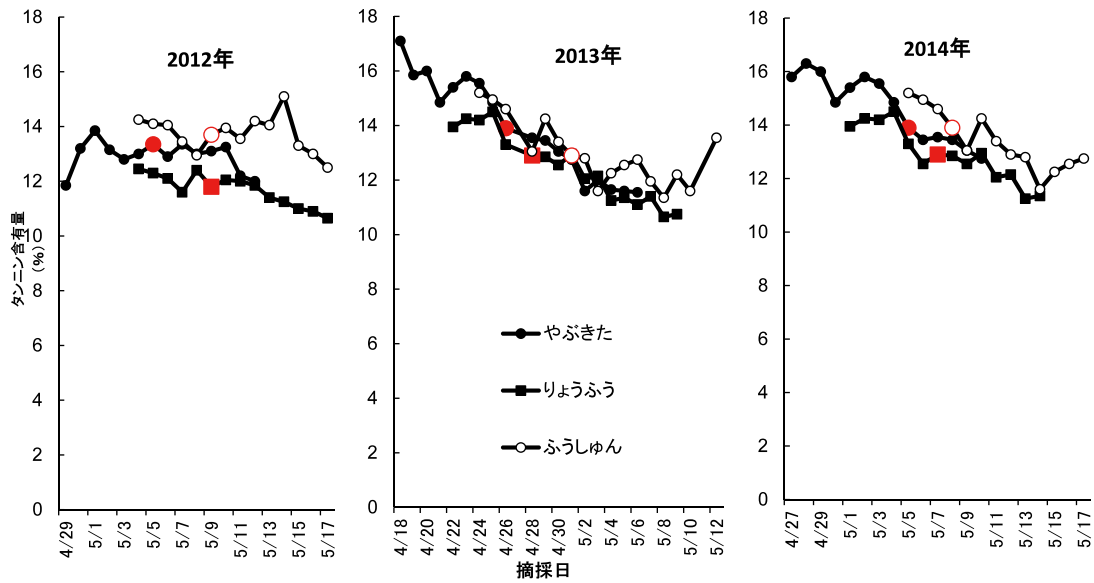


図-5 ‘やぶきた，りょうふう，ふうしゅん’における一番茶摘採期のチャ新芽のタンニン含有量
赤色のマーカーは手ざわりで判断した摘採適期。

2012年は3月の気温が低く，チャ新芽の萌芽が遅れた。4月10日頃から急に気温が上昇した。2013年は3月の気温が高く，萌芽が早かったが，4月に入って低温の日が続いた。特に4月12日には最低気温が0℃近くまで下がり，新芽の生長が停止した。2014年は，3月の気温が低く，萌芽が遅れたが，5月に入ると気温が上昇した(図-1)。

チャ品種‘やぶきた’，‘りょうふう’，‘ふうしゅん’の手ざわりから判定した摘採適期は，表-1に示すように判定された。出開度は2012年の‘やぶきた’，‘りょうふう’，2014年の‘やぶきた’，‘りょうふう’，‘ふうしゅん’は70%台であった。中切りをした翌年の2013年は34.5から47.4%と小さかった(表-1)。

一番茶新芽の全窒素含有量は，2012年，2013年，

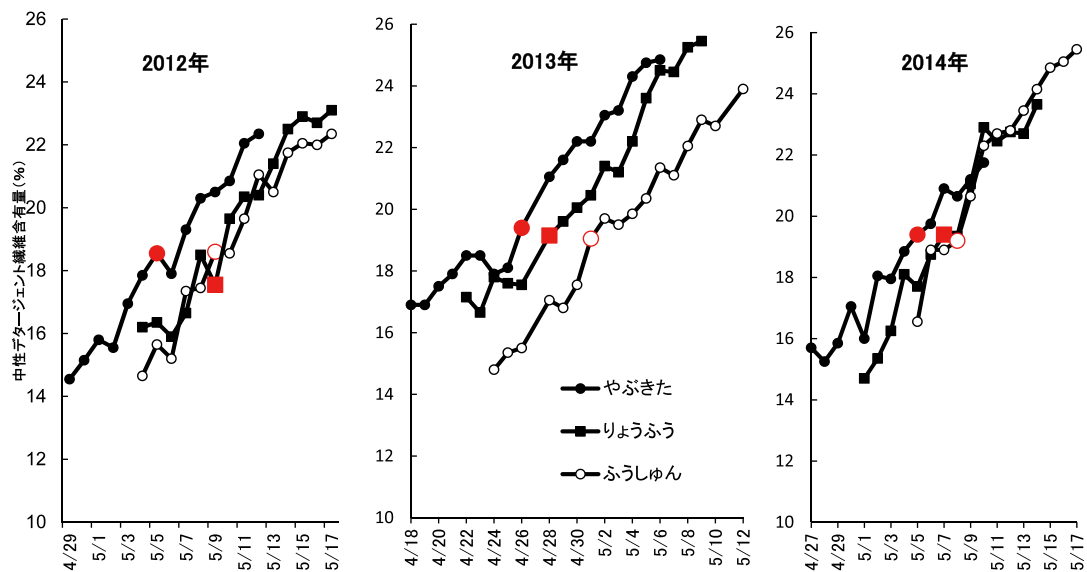


図-6 ‘やぶきた、りょうふう、ふうしゅん’における一番茶摘採期のチャ新芽の中性デタージェント繊維含有量
赤色のマーカーは手ざわりで判断した摘採適期。

表-2 2014年のチャ品種の手触りで判定した摘採適期と含水率及び中性デタージェント繊維含有量

品種	摘採適期	含水率 (%)	中性デタージェント繊維含有量 (%)
さえみどり	5月 3日	79.3	19.3
めいりよく	5月 5日	80.1	20.3
おくゆたか	5月 8日	79.9	19.9
おくみどり	5月 12日	79.5	20.0

2014年とも、摘採日が遅くなるにしたがって少なくなった。中切り翌年の2013年の全窒素含有量は、晩生品種の‘ふうしゅん’は増えたが、中生品種の‘やぶきた’、中晩生品種の‘りょうふう’は2012年より少なかった(図-2)。

一番茶新芽の全遊離アミノ酸含有量は摘採日が遅くなるにしたがってゆるやかに減少した。調査開始時点である摘採適期の1週間前では、2013年、2014年の‘やぶきた’を除き、約4%であった。摘採適期を1週間以上過ぎた調査終了時点では3%前後に減少した(図-3)。

一番茶新芽のカフェイン含有量は、摘採適期の1週間前から2週間の間に、1ポイント以上減少した。全遊離アミノ酸含有量よりも減少の程度は大きかった(図-4)。

一番茶新芽のタンニン含有量は、2012年、2013年、2014年とも摘採日が遅くなるにしたがって減少した。2012年、2014年の摘採適期の含有量は品種によって2ポイント以上差が認められた(図-5)。

一番茶の中性デタージェント繊維の含有量は、摘採適期の前後で、3ヶ年、3品種とも増加量が大きかった。2012年の摘採適期の含有量は‘やぶきた’が18.6%、‘りょうふう’が18.6%、‘ふうしゅん’が19.7%であった。2013年の摘採適期の含有量は‘やぶきた’が19.4%、‘りょうふう’が19.2%、‘ふうしゅん’が19.1%であった。2014年の摘採適期の含有量は‘やぶきた’が19.4%、‘りょうふう’が19.2%、‘ふうしゅん’が19.1%であった(図-6)。

一番茶新芽の含水率は、2013年、2014年とも降雨の後に上昇する傾向がみられた(図-7)。含水率の日変化を平滑化するため、前後3日間の移動平均を求めた(図-8)。2013年摘採適期までは80%前後で推移し、摘採適期を過ぎると減少した。2014年の‘りょうふう’も同様の傾向であった。2014年の‘やぶきた’の含水率は、試料採取開始時は78%で、その後上昇して摘採適期までは79~80%で、摘採適期を過ぎると減少した。2014年

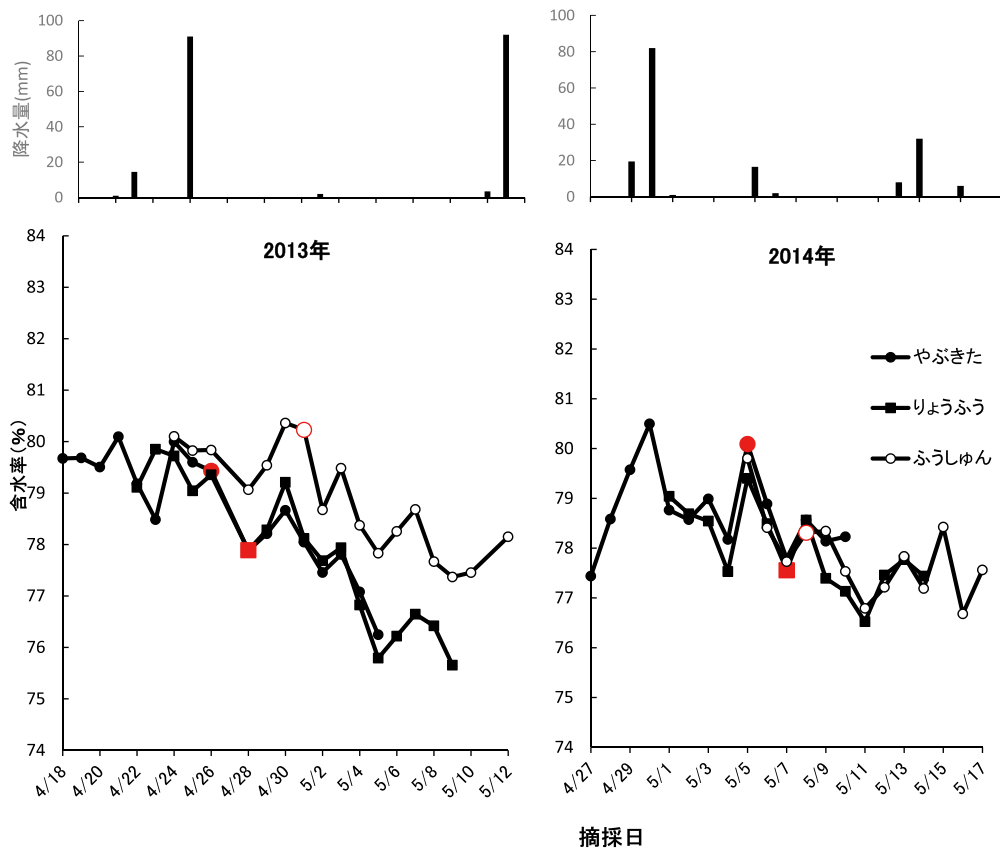


図-7 ‘やぶきた，りょうふう，ふうしゅん’における一番茶摘採期のチャ新芽の含水率と降水量
赤色のマーカーは手ざわりで判断した摘採適期。

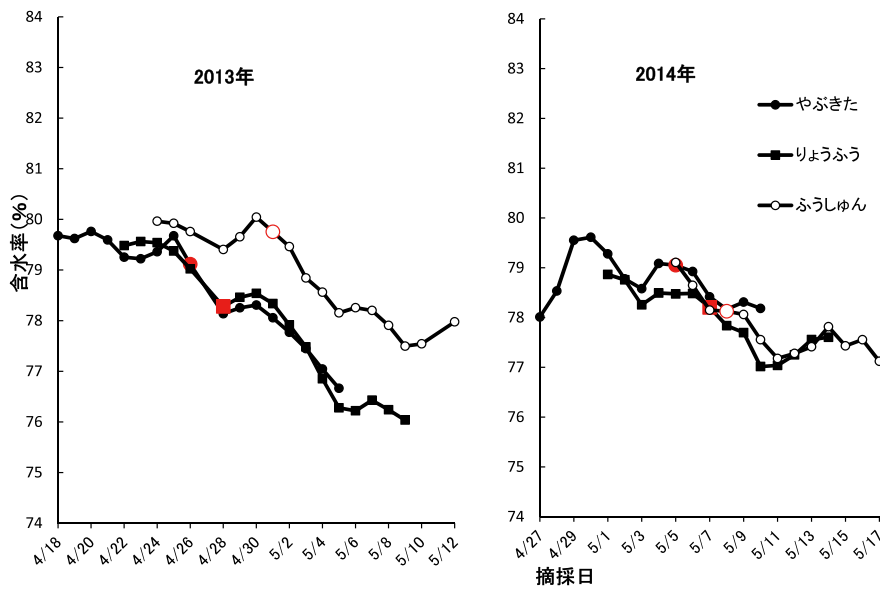


図-8 ‘やぶきた，りょうふう，ふうしゅん’における一番茶適期の含水量の移動平均
赤色のマーカーは手ざわりで判断した摘採適期。

の‘ふうしゅん’の含水率は，試験開始時が79%で，その後減少した。

‘さえみどり’，‘めいりょく’，‘おくゆたか’，‘おくみ

どり’の含水率は79~80%，中性デタージェント繊維含有量は19~20%であった(表-2)。

IV 考 察

チャは摘採日が遅いほど収量が増加し、品質、市場価格は低下する。生産者においては最も収益が上がる時点が摘採適期である。価格の低下割合は、気象、他産地の相場に加えて大地震などの自然災害のような社会的要因も影響を与えるため、複雑である。また、摘採適期の基準は茶の種類によって異なる。台湾の包種茶では新芽が若すぎると、青臭みが残り、香気が発揚しないので、日本の煎茶より新芽が硬化してから摘採する(徐, 2009)。日本の緑茶でもてん茶は萌芽日から40日以上経過して新芽が成熟してから摘採する(辻ら 1995)。本試験では煎茶に製造した場合に製茶品質が大きく低下する直前を摘採適期と定義した。本試験には日本の主要品種の‘やぶきた’と野菜茶業試験場(金谷)で育成されて、生育、収量性が良好で霜害を受けにくく、順調に普及している中晩生品種の‘りょうふう’と晩生品種の‘ふうしゅん’を用いた。

2013年は3月の気温が高く、萌芽が早かったが、4月に入って低温が続いた。試験場の圃場のチャ新芽は、褐変はしなかったが、低温によって新芽の生育が停止した。中切りの翌年は一般的に母枝が太くなって新芽の数が減り、1本あたりの新芽の栄養条件がよくなって全窒素含有量や全遊離アミノ酸含有量が増える(池田ら, 2006)。しかし、2013年の全窒素含有量や全遊離アミノ酸含有量は、中生品種の‘やぶきた’、中晩生品種の‘りょうふう’は2012年より少なく、4月12日から4月13日の低温の影響を受けたと考えられた。‘ふうしゅん’の全窒素含有量や全遊離アミノ酸含有量は2012年より多かった。

中性デタージェント繊維含有量は2012年、2013年、2014年の3品種すべてにおいて摘採適期の前後に増加量が大きくなり、摘採適期の含有量が19%前後であった。2012年一番茶後の中切りの影響も受けなかった。

芝(1925)、田中ら(1989)も本試験と同様、新芽の含水率は降雨の影響を受けることを報告している。これらの報告では試験採取は2、3日に1回であるが、本試験では毎日採取を行って移動平均を求めることによって、一番茶新芽の摘採適期前後の含水率の経時的変化を明らかにすることができた。

本試験では、2014年の‘やぶきた’の新芽の含水率は摘採適期の約1週間前は含水率が摘採適期より低かった。芝(1925)は摘採適期の10日以上前の未熟な新芽では含水率はやや少なく、成熟に伴って増加し、その後減少

すると報告している。大森ら(1987)は煎茶および玉露の原料について、茎や葉の含水率が硬化と関連が深いことを報告している。田中ら(1989)は、チャ新芽の含水率は生長とともに上昇した後、減少すると報告している。2014年の‘やぶきた’の含水率は、これらの報告と同様の傾向で、採取を開始した時期には新芽が未熟であったと考えられた。未熟な新芽の含水率が低いのは、含水率が高い茎の割合が低いためと考えられる(芝, 1925; 大森ら, 1987)。一方、2013年のすべての品種、2014年の‘りょうふう’、‘ふうしゅん’は試料採取開始時には新芽がある程度成熟していて、含水率が高い茎の部分の割合が2014年の‘やぶきた’より多かったため、含水率が80%前後であったと考えられた。

全窒素含有量、全遊離アミノ酸含有量、カフェイン、タンニンとも調査期間中にすべての品種において含有量が減少する傾向が認められた。田中ら(1989)、忠谷ら(2006)は、摘採適期を10日以上過ぎると、全窒素、全遊離アミノ酸の含有量が大きく減少することを報告している。しかし、本試験のように摘採適期後1週間目までは減少程度はゆるやかで、さらに品種間差や年次間差も認められるため(池田ら, 2006)、これらの成分含有量によって摘採適期の判定を行うのは難しいと考えられた。

2014年‘さえみどり’、めいりよく、おくゆたか、おくみどり’の摘採適期中性デタージェント繊維含有量と含水率は、本試験で明らかになった基準とおおよそ一致していると考えられた。含水率は測定が簡易であり、試験研究だけでなく、生産者においても、数日測定して、含水率の推移で摘採適期を推定できることが明らかになった。また中性デタージェント繊維含有量も近赤外分光分析計を用いれば測定は簡易である。これまで客観的な摘採適期の指標として用いられてきた出開度70%の基準は、ほとんどの場合妥当であるが、中切りの翌年のような場合は適用できないことがある。チャ新芽の中性デタージェント繊維含有量19%、含水率80%は出開度70%(桑原ら, 1960; 佐波ら, 1993)とともに、煎茶に加工する場合の摘採適期の指標として用いることができると考えられた。‘しゅんたろう’の育成試験のように、出開度で摘採適期の採取かどうか疑われる場合でも、製茶した試料を保存して分析することによって、原料の熟度を判断できると考えられた。

本試験の結果、新芽の全遊離アミノ酸の含有量のよう茶の味を形成する化学成分は摘採適期を過ぎてもかなり多く含まれていることが明らかになった。しかし、摘採適期を1週間ほど過ぎた原料を用いて現行の煎茶製造

ラインを用いて製茶を行った場合、硬葉臭や苦渋味が強くなる。摘採適期は茶種によって異なり、日本茶でも、揉捻を行わないてん茶では煎茶より新芽が硬化してから摘採する。現行の煎茶製造法は摘採適期の原料を加工するためには適しているが、摘採適期を過ぎた原料には適していないと考えられ、CTC 緑茶製造法（稲葉，2012）のような他の製茶法で加工することによって、原料を損なわずに、現行の製茶法より良質な緑茶が製造できると考えられた。

V 摘 要

出開度に替わる、あるいは出開度と併用できる客観的な化学成分含有量によるチャ摘採適期の判定法を開発することを目的として、2012年から2014年に、チャ品種‘やぶきた’，‘りょうふう’，‘ふうしゅん’について、一番茶の摘採適期の前後2週間の新芽の全窒素，全遊離アミノ酸，カフェイン，タンニン，中性デタージェント繊維含有量および含水率の測定を行った。中性デタージェント繊維含有量は、摘採適期の前後で増加量が大きかった。摘採適期中性デタージェント繊維含有量は19%前後であった。含水率は、新芽が未熟な時は少なく、摘採適期付近では約80%で一定で、摘採適期を過ぎると80%より少なくなった。新芽の全窒素，全遊離アミノ酸，カフェイン，タンニン含有量は摘採期間中にゆるやかに減少した。煎茶に加工する場合の摘採適期の指標として、中性デタージェント繊維含有量19%，含水率80%が出開度70%とともに用いることができると考えられた。

引用文献

- 1) 池ヶ谷堅次郎・高柳博次・阿南豊正（1990）：茶の分析法。茶業研究報告，71，43-74.
- 2) 池田奈実子・堀江秀樹・向井俊博・後藤哲久（2006）：チャ品種の一番茶新芽の化学成分含有量の年次変動。日本作物学会記事，75，511-517.
- 3) 稲葉清文（2012）：CTC 機を利用した新緑茶製法の試み。茶，65(8)，12-15.
- 4) 此本晴夫（1980）：チャの新芽の熟度判定法。茶業研究報告，52，11-18.
- 5) 桑原穆夫・佐藤哲哉（1960）：茶葉の熟度に関する研究（第2報）。一茶芽の出開度と諸形質・茶品質との関係。東海近畿農業試験場研究報告（茶），7，110-129.
- 6) 根角厚司・吉田克志・田中淳一・谷口郁也・荻野暁子・佐波哲次・武田善行・吉富均・大前英・武弓利雄・和田光正（2012）：暖地向け緑茶用極早生品種‘しゅんたろう’の育成とその特性。野菜茶業研究所研究報告，11，89-97.
- 7) 大森薫・中村晋一郎・渡辺敏朗・甲木和也（1987）玉露の生葉品質評価－玉露・煎茶原料の部位別含水率－。茶業研究報告，65，138-139.
- 8) 佐波哲次・青野英也・田中静夫（1993）：チャの新芽形質による品質面からみた摘採適期の判定 第1報 生育に伴う新芽形質の変化と品質面からみた摘採適期との関係。野菜茶業試験場研究報告 B，6，11-20.
- 9) 佐波哲次（1994）：摘採と整枝。茶の栽培と利用加工，142-147，養賢堂，東京.
- 10) 芝時孝（1925）：茶芽の伸育と水分量との関係。茶業試験場彙報，2，46-50.
- 11) 武田善行・和田光正・根角厚司・池田奈実子・八戸三千男・築瀬好光（1991）：煎茶用早生品種‘さえみどり’の育成。野菜茶業試験場研究報告 B，4，1-15.
- 12) 田中伸三・岩浅潔・深津修一（1989）：茶葉の摘採適期と製茶品質との関係。野菜茶業試験場研究報告 B，3，53-64.
- 13) 辻正樹・西郷知博・高橋成徳（1995）：せん茶用品種からのてん茶適応性品種の選定。愛知農業総合試験場研究報告，27，127-130.
- 14) 忠谷浩司・竹若与志一（2006）：直がけ被覆期間が一番茶新芽の生育および成分含有率に及ぼす影響。茶業研究報告，101，9-16.
- 15) 徐英祥（2009）：包種茶摘採法。台湾の茶，124-127，日報印刷，大阪.

Change of Chemical Constituents in New Shoots of First Crop of Tea Cultivars ‘Yabukita’, ‘Ryofu’ and ‘Fushun’ around Harvesting Time

Namiko Ikeda, Naomi Mizuno, Takuya Tanaka, Shinichiro Arai and Kenshin Matsunobu

Summary

To indicators of the best quality time to harvest tea (*Camellia sinensis*), we investigated chemical constituents in new shoots of the first crop in cultivars ‘Yabukita’, ‘Ryofu’, and ‘Fushun’ from 2012 to 2014. Contents of total nitrogen, total amino acids, caffeine, and tannin decreased slowly during the growth of the first crop. The neutral detergent fiber contents in shoots was about 19% at the timing of best quality, then increased rapidly. The moisture contents was under <80% in immature shoots, about 80% a few days before the timing of best quality time, and subsequently decreased to 75%.

種子を用いたダイコン青変症の発症リスク評価法

永田 雅靖*・寺西 克倫**

(平成 27 年 9 月 18 日受理)

A New Seed Testing Method for Evaluating the Risk of Blue Internal Discoloration in Daikon-Japanese Radish (*Raphanus sativus* L.) -Roots

Masayasu Nagata and Katsunori Teranishi

I 緒 言

ダイコン (*Raphanus sativus* L.) は、日本で生産される野菜の中ではキャベツに次いで収穫量が多く (1,452 千 t)、栽培面積もキャベツに次いで広い (33,300ha) 野菜である (農林水産省, 2015)。また、ダイコンは、サラダや刺身のつま、大根おろしとして生食するだけでなく、煮物や漬け物など利用の用途も多様である。ダイコンの国内生産量の約 60% が加工・業務用として利用され、食品産業の重要な加工原料となっている (農畜産業振興機構, 2014)。

収穫時には品質に問題の無かったダイコンの肥大根部 (以下、根部と記す) の内部が、出荷後 3 日程度で青色に変色する現象が知られている (池下ら, 2011)。このような現象は、日本各地で発生しており、ダイコン青変症 (せいへんしょう) と呼ばれている (図-1)。

青変症を発生したダイコンを見つけた消費者や実需者からは、安全性に関する問い合わせが保健所等に寄せられる。食品産業においては、加工の準備段階で青変症が確認されると、当日の生産計画に大幅な変更を余儀なくされる。ダイコン青変症は、日本各地で散発的に発生しているため、詳細な統計は取られていないが、著者の聞き取り調査では、例えば石川県の全農の販売担当者へのクレーム件数は年によって変動し、少ない年で数件から

十件、多い年 (2009 年) には数十件のクレームが寄せられている。他県でも同様なクレームが寄せられているものと推察される。ある実需者では、おろし用食材で青変症が発生して使用不可となる例が 3 月を中心に十件程度発生し、返金になるケースもある。青変症が発生すると、出荷した大根が回収・廃棄されたり、さらには産地と実需者間で取引停止に至る場合もある。これまで、ダイコン青変症の発生機構や発生要因が明らかでないために、根本的な対策が立てにくく、ダイコン青変症の発生は、産地における潜在的な脅威になっていた。

従来、ダイコン青変症の発症程度の評価は、20℃程度の温度でダイコンを貯蔵し、5~7 日後に根部を切断して青色の発生を確認していた。池下ら (2011) は貯蔵試験による発症評価で、品種によって発症の程度が異なることなどを明らかにした。しかし貯蔵試験による評価は、再現性にばらつきが大きく、判定までに時間がかかることから、ダイコン青変症の発症機構解明や現場での対策に用いることは困難であった。



図-1 ダイコン青変症の例 (品種 '福登' の切断面)

〒 514-2392 三重県津市安濃町草生 360

野菜病害虫・品質研究領域

* 農研機構食品総合研究所食品工学研究領域

** 三重大学大学院生物資源学研究所

ダイコン青変症の色素は、植物性食品に生じる青色色素のため、従来はアントシアニンであると考えられていたが、物質として同定された例は無かった。著者らが青変症を発症したダイコンに含まれる青色色素の有機溶媒に対する溶解性や pH 反応など基本的な化学特性を解析した結果、従来説とは異なって、ダイコン青変症ではアントシアニンとは特性が全く異なる青色色素が生成していることを見いだした(永田ら, 2012)。これらの知見を得る過程で、ダイコン青変症を発症している根部の切片を還元物質であるアスコルビン酸で処理すると青色が退色することも発見した。そこで、この逆反応として、青変症を発症していないダイコン切片を様々な酸化物質で処理してみた結果、過酸化水素水(1~3%)で処理すると、塗布した面に青色色素が生成することを見いだした(寺西ら, 2013b)。さらに、青変症を発症していないダイコン根部の切片を用いて、この方法により、ダイコン青変症を発症しやすい品種と発症しにくい品種を比較したところ、発症しやすいダイコン品種では、過酸化水素処理により明らかな青色の生成が見られるのに対し、発症しにくいダイコン品種では青色が生成しなかった。このことは、ダイコン根部には、無色の色素前駆物質が含まれており、それが酸化を経てアントシアニンとは全く異なる機構で青色色素になることを示している。ダイコン根部を用いたダイコン青変症リスク評価法は、過酸化水素処理により1~10分程度で発症のリスクを知ることができるため、従来の貯蔵試験による発症程度の評価に比べて簡便で、確実性も高いため、栽培や流通の現場でも使われるものと期待している。

しかし、先に開発したダイコンの切片を用いた青変症リスク評価法(寺西ら, 2013b)は、評価のためにダイコンを長期間栽培する必要があった。そこで、同様の検出原理を種子に応用することで、圃場での栽培を必要とせず、ダイコン青変症の発症リスクを簡易・迅速に判定できる検定法の開発を試みた。

本試験を行うにあたり、ダイコン試料を供与いただいた、石川県農林総合研究センター農業試験場砂丘地農業研究センター、増田大祐氏および、神奈川県農業技術センター三浦半島地区事務所、増田義彦氏に深く感謝いたします。

II 材料および方法

供試した18品種のダイコンの品種名、販売元の種苗会社と栽培地を表-1に示す。

表-1 ダイコン根部および種子の青変症リスク評価に用いたダイコン品種、種苗会社およびダイコン根部試料の栽培地

品種名	種苗会社	栽培地
福誉	みかど協和	石川県 ^a
夏みどり8号	中原採種場	石川県 ^a
夏の守	サカタのタネ	石川県 ^a
夏みどり5号	中原採種場	石川県 ^a
俊才	トーホク	石川県 ^a
夢誉	みかど協和	石川県 ^a
秋峠	トーホク	神奈川県 ^b
福天下	みかど協和	神奈川県 ^b
YR健勝2号	丸種	神奈川県 ^b
青づまり2号	中原採種場	神奈川県 ^b
与作	中原採種場	神奈川県 ^b
青大将2号	中原採種場	神奈川県 ^b
YR早生おでん	中原採種場	神奈川県 ^b
ホワイトスティック	ナント	三重県 ^c
源助	タキイ種苗	三重県 ^c
白秋	タキイ種苗	三重県 ^c
冬の浦総太り	カネコ	三重県 ^c
耐病総太り	タキイ種苗	三重県 ^c

^a 石川県農林総合研究センター農業試験場砂丘地農業研究センター(石川県かほく市)

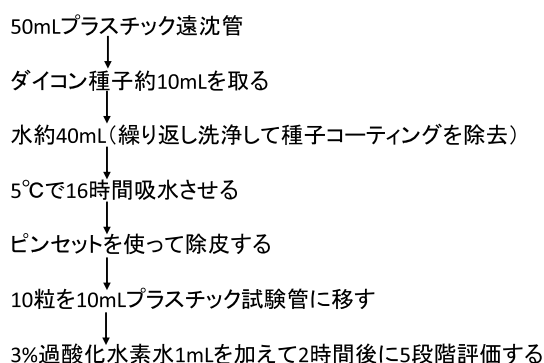
^b 神奈川県農業技術センター三浦半島地区事務所(神奈川県三浦市)

^c 三重大学研究農場(三重県津市)

ダイコンの肥大根部(以下、ダイコン根部)を用いた評価には、石川県農林総合研究センター農業試験場砂丘地農業研究センター(石川県かほく市)、神奈川県農業技術センター三浦半島地区事務所(神奈川県三浦市)、三重大学研究農場(三重県津市)で2012年の秋冬期に、それぞれの標準的な条件で栽培したダイコン根部を用いた。収穫後、4℃で保存したダイコン4本の根部を中央で約3mm厚に縦割りスライスし、1%過酸化水素水を塗布して室温で10分後に写真撮影した。過酸化水素処理で青色色素が生成した根部の切片は、青色の最も濃いものを5、最も薄いものを1として5段階評価した。

ダイコン種子を用いた評価は、それぞれ10mL程度の種子を50mLプラスチック遠沈管に取って水道水を約40mL入れ、超音波洗浄機で繰り返し洗浄して表面の殺菌剤等のコーティングを取り除き、約5℃の冷蔵庫中で16時間程度吸水させた。これらの種子からランダムに10粒を選んで、種皮の一部をGG型ピンセットを使って切開し、種子を取り出した。これらの除皮した種子を10mLプラスチック試験管に移し、3%過酸化水素水1mLを加えて室温で処理し、青色色素の生成や褐変の進行程度を

処理開始後の時間経過とともに観察した。3% 過酸化水素水は、オキシドール（日本薬局方，2.5～3.5 w/v%）の原液を用いた。過酸化水素処理で青変化した 10 粒の種子は、青色が濃く青変化した種子数が多いものを 5，青変化が見られないものを 1 として 5 段階で達観的に評価した（図－2）。



図－2 種子を用いたダイコン青変症リスク評価法の手順

III 結果および考察

ダイコン根部を用いた貯蔵試験や，根部の切片を用いて過酸化水素処理したこれまでの試験により，‘福誉’は比較的青変症が発生しやすい品種であり，‘耐病総太り’は比較的青変症が発生しにくい品種と考えられている（池下ら，2011）．今回の試験で用いた 16 品種のダイコン根部も，過酸化水素処理による青色生成程度は，‘福誉’と‘耐病総太り’の間に分布した（図－3）．

種子を用いた評価条件については，除皮した種子に 3% 過酸化水素処理した直後は，カタラーゼの作用により，酸素の泡が多く発生した．その後，種子に含まれるポリフェノール等による部分的褐変とともに青色色素の生成が進行したが，褐変は 2 時間程度で色が薄くなり，青色のみが残存して観察しやすくなったことから，過酸化水素処理開始 2 時間後に青色の評価を行うこととした．‘福誉’の種子ではほとんどの種子に青色色素の生成が認められたが，繰り返し試験を行っても 10 粒の種子のうち 1 粒程度は青色色素の生成が認められないものもあった（図－4）．‘耐病総太り’の種子ではいずれも青色色素はほとんど生成しなかった．これらの結果から，ダイコン根部で青変症を発症しやすい品種では，その種子においても，根部と同様の青色色素前駆物質を含んでいるものと推察された．

ダイコン根部の切片を用いて過酸化水素処理による青

種子の青色生成程度	5			福天下	福誉
	4	白秋	夢誉		
	3		青大将2号 俊才 YR早生おでん ホワイトスティック	秋峠 YR健勝2号 青づまり2号 夏みどり8号	
	2	源助 冬の浦総太り	夏の守 夏みどり5号 与作		
	1	耐病総太り			
	1	2	3	4	5

ダイコン根部切片の青色生成程度

図－3 ダイコン根部とダイコン種子を用いた青変症リスク評価法による青色生成程度の比較

ダイコン根部：過酸化水素（1%）処理 10 分後の青色生成程度

ダイコン種子：過酸化水素（3%）処理 2 時間後の青色生成程度

色生成程度と，ダイコン種子を用いて行った青色生成程度を合わせてプロットしたところ，根部と種子の 5 段階のスコア値が同じだったものが 8 品種，スコア値の差が 1 であったものが 9 品種であった．これらのスコア値を用いて求めたケンドールの順位相関係数は 0.516 ($p < 0.01$) で，根部と種子の青色生成程度にはやや強い正の相関がみられ，種子を用いる評価法は，根部を用いる評価方法の簡便法として使用できるものと考えられた（図－3）．

さらに，この方法を応用して，ダイコン根部から色素前駆物質を含む画分を分離精製して，紫外吸収スペクトル（UV），赤外吸収スペクトル（IR），核磁気共鳴スペクトル（NMR），マススペクトル（MS）等各種のスペクトル解析および，確認のために合成した標品との比較により，色素前駆物質は，インドールグルコシノレートの 1 種である 4-hydroxy glucobrassicin (4-OHGB) と同定された．これらの結果を受けて，ダイコン青変症の色素はアントシアニンとは異なることが確定した（寺西ら，2014）．

West ら（2004）は，アブラナ科野菜の種子に含まれる 2 種類のインドールグルコシノレートの含量を測定し，ダイコン種子に 4-OHGB が含まれることを示している．また，Ishida ら（2012）は，28 品種のダイコンを用いて，根部に含まれるグルコシノレートのうち，3 種類のインドールグルコシノレートの合計値を求め，全グルコシノレートに対するそれらの割合が品種によって顕著には相違しないことを報告している．後者の論文では，個別のインドールグルコシノレートの定量値は示されてい



図-4 ダイコン種子を用いた青変症リスク評価法による青色生成程度
過酸化水素（3%）で処理2時間後の様子
左：除皮したダイコン品種‘福誉’，右：同‘耐病総太り’

ないが、HPLCクロマトグラムから、ダイコン根部には4-OHGBが含まれていると推察され、青変症が発症する際には、4-OHGBが酸化されて青色色素になるものと考えられた。ただし、ダイコン種子中や根部のインドールグルコシノレート濃度と青変症の発症程度については現時点では必ずしも明らかではないため、今後、栽培時の環境要因による変動や、種子のロット間差等も含めて検討することが必要と考えられる。

ダイコンの栽培期間を約60日間とすると、従来の貯蔵試験法では、収穫してからさらに5~7日が必要である。それに対し、ダイコン根部の切片を用いて過酸化水素処理する場合には、10分程度で青変症リスクの評価が可能である。ダイコン種子を用いた評価法は、吸水から、種皮を除去して過酸化水素処理を含めて1日以内に判定できるため、リスク評価にかかる時間は栽培を行って試験の1/60に短縮できる。

これまでの発生事例の蓄積により、青変症の発症リスクが高い品種であっても、栽培年次や栽培地などによって、青変症の発症件数や発症程度に変動があるとされており、温度、日照、降水、土壌など栽培条件が青変症の発症しやすさに影響していることも考えられる。ダイコン青変症の場合には、収穫後の温度や湿度等流通条件も発症に影響があり、現状では、品種、栽培、流通の3つの段階について総合的に青変症の対策を進める必要がある。ダイコンの根部を用いた評価法と、今回開発した種子を用いたリスク評価法は、併せて特許出願を行った(寺西ら, 2013a)。

我々の研究によって青変症発症機構が明らかになるにつれ、発症機構に基づいた品種・栽培・流通の根本的かつ迅速な対策が求められるようになってきた。

現在、ダイコンの産地では、‘福誉’のようにダイコンの栽培特性として草姿が立性で密植栽培が可能など、生産性が高く、そろいが良く曲がりにくいなど高品質な品種への要望が強い。今回検討した種子を用いたダイコン

青変症リスク評価法は、上記の栽培特性を踏まえた上で、青変症の発症リスクが低い品種を育成する過程を飛躍的に効率化する可能性がある。今後、ダイコン種子を用いた評価法がダイコンの育種に用いられることにより、当該特性の遺伝様式の解明等が効率よく進み、前駆物質量が少なく、優れた栽培特性や高い品質を併せ持ったダイコン品種の育成につながるものと期待している。

摘 要

ダイコン種子を用いたダイコン青変症リスク評価法を開発した。ダイコン種子を洗浄後、16時間程度吸水し、ピンセットで除皮した後、3%過酸化水素水を加え、室温で2時間処理後に種子の青色の着色程度を観察する。種子の青変のポジティブコントロールとして‘福誉’、ネガティブコントロールとして‘耐病総太り’を用いる。ダイコン根部の切片を用いた過酸化水素処理による青変程度スコア値と、種子を用いた本法のスコア値とのケンドールの順位相関係数は0.516 ($p < 0.01$)で、根部と種子の青色発色にはやや強い正の相関がみられた。青変症のリスクを回避するためには、このような種子を用いた評価が、生産者や育種者にとって有効であると考えられた。

引用文献

- 1) 池下洋一・石端一男・金森友里 (2011)：収穫後の貯蔵方法がダイコン青変症の発生に及ぼす影響，園学研，10 (別1)，514.
- 2) Ishida, M., M. Nagata, T. Ohara, T. Kakizaki, K. Hatakeyama and T. Nishio (2012)：Small variation of glucosinolate composition in Japanese radish (*Raphanus sativus* L.) requires simple quantitative analysis for breeding of glucosinolate component. *Breeding Sci.*, 62, 63-70.
- 3) 永田雅靖・増田大祐・池下洋一・寺西克倫 (2012)：青変症ダイコンに含まれる青色色素はアントシアニンではない，平成24年度園芸学会東海支部大会研究発表要旨，4.
- 4) 農畜産業振興機構 (2014)，平成25年度加工・業務用野菜仕入価格等調査結果，<https://www.alic.go.jp/content/000105916.pdf>.
- 5) 農林水産省 (2015)，平成26年産野菜生産出荷統計，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001141603>.
- 6) 寺西克倫・永田雅靖 (2013a)：ダイコン青変症の発症リスク評価剤及び評価キット，並びに評価方法，特願2013-184638.
- 7) 寺西克倫・永田雅靖・増田大祐・池下洋一・増田義彦 (2013b)：ダイコン根を用いたダイコン青変症の発症リスク評価法，園学研，12 (別2)，252.
- 8) 寺西克倫・永田雅靖・増田大祐 (2014)：ダイコン根の青変症における原因物質の究明，園学研，13 (別2)，300.
- 9) West, L. G., K. E. Meyer, B. A. Balch, F. J. Rossi, M. R. Schultz and G.W.Haas (2004)：Glucosinolate and 4-hydroxyglucobrassicin contents in seeds of 59 cultivars of broccoli, raab, kohlrabi, radish, cauliflower, Brussels sprouts, kale, and cabbage. *J. Agric. Food Chem.*, 52, 916-926.

A New Seed Testing Method for Evaluating the Risk of Blue Internal Discoloration in Daikon-Japanese Radish (*Raphanus sativus* L.) -Roots

Masayasu Nagata and Katsunori Teranishi

Summary

We developed a new seed testing method for evaluating the risk of blue internal discoloration in daikon (Japanese radish roots), and assessed it against the roots. Seeds of 18 cultivars of daikon were washed and soaked in water about 16 h, then the seed coat was removed with tweezers. The seeds were treated with 3% hydrogen peroxide at room temperature for 2 h and examined for blue pigmentation which indicates the presence of a precursor to the pigment. 'Fukuhomare' was used as a positive control and 'Taibyousubutori' as a negative control. Rankings of seed bluing and root bluing were positively correlated (Kendall's rank-correlation coefficient=0.516, $p<0.01$). To avoid the risk of blue discoloration in daikon roots, this seed testing method will be useful for farmers and breeders.

圃場接種試験によるチャ品種・系統の赤焼病抵抗性判定

吉田 克志

(平成 27 年 9 月 30 日受理)

Assay of Bacterial Shoot Blight Resistance among Tea Cultivars and Breeding Lines using a Field Inoculation Test

Katsuyuki Yoshida

I 緒 言

チャ赤焼病（以下、赤焼病，病原細菌：*Pseudomonas syringae* pv. *theae* (Hori 1915) Young, Dye & Wilkie 1978) は主に晩秋から春期の低温時に茶園で発生する細菌病であり，現在，糸状菌病である炭疽病と輪斑病と共にチャの三大病害とされている。赤焼病は 1914 年に静岡県で初めて確認され（堀，1914），その後，静岡県内の静岡雑 131 の幼木園で発生が多く認められた（戸崎，1965）。そして 1975 年から鹿児島県（荒井ら，1979）で，1979 年から静岡県（堀川，1985）で‘ゆたかみどり’，‘するがわせ’等の成木園で多発生が認められた。現在，赤焼病は全国各地で認められ，中でも静岡県と鹿児島県における発生が多い（堀川，1989；富濱，2009）。赤焼病が多発生した場合，一番茶の収量が激減，著しくは皆無になるため，チャの病害の中で，経済的な被害が最も大きい（成澤ら，1991；富濱，2005）。赤焼病の発生は，環境条件や栽培条件に大きく左右され，過剰な施肥（宮田ら，2003；富濱，2009），秋期のマシン油乳剤散布（富濱，2009）および霜寒害（安藤，1988；富濱，2009）により赤焼病が多発する。また，氷核活性細菌による赤焼病の発病助長が報告されている（富濱，2006）。赤焼病は成木園に比べ，幼木園での発生が多く，甚発生の場合，ほぼ全ての越冬葉が発病，その後落葉し（図-1），成園化が 1 年遅れるほどの被害が生じる（戸崎，1965；堀川，1982）。一方，全国の主要茶産地に発生が拡大し

た侵入害虫チャトゲコナジラミ (*Aleurocanthus camelliae* Kanmiya & Kasai) の防除として，越冬幼虫への冬期マシン油乳剤散布が有効であり，基幹防除として導入する府県が多い（山下ら，2010）。しかし，吉田ら（2013）は，冬期のマシン油乳剤散布は赤焼病の発病を助長することを明らかにした。このため，冬期のチャトゲコナジラミ防除を目的としたマシン油乳剤使用により，全国的な赤焼病の増加が懸念されている。

チャの三大病害の中で，輪斑病と炭疽病については，既に接種検定法が確立され（Takeda，2003；Yoshida ら，2006），両病害に対する主要品種の抵抗性の程度ならびに抵抗性の遺伝様式が明らかにされており（Takeda，



図-1 2015 年 2 月鹿児島県枕崎市‘なんめい’茶園における赤焼病の激発全株が同様に発病し，3 月には全ての感染葉が落葉した。

2003; 池田ら, 2004; Yoshida ら, 2006), 両病害に対する抵抗性品種‘さえあかり’が育成された(吉田ら, 2012). しかし, チャ品種の赤焼病抵抗性に関する研究は, 古い品種を対象とした研究である上に, 報告ごとに抵抗性の評価が異なる.(岡部, 1956; 堀川, 1985, 1989; 静岡県茶業試験場, 1988).

本研究では, 近年の育成品種を含むチャ品種・系統の赤焼病抵抗性を明らかにすることを目的として, 圃場接種試験により赤焼病抵抗性を判定した. また, 冬期のマシン油乳剤散布は赤焼病の発病を助長するので(吉田ら, 2013), この現象を利用し, 人為的な赤焼病甚発生の環境条件とした後に赤焼病細菌を接種することによって, 強度抵抗性品種を判別する手法を開発した. なお, 本研究の一部は農林水産省・食品産業科学技術推進事業 23014「中山間地域の茶業活性化に資するチャ品種とその利用技術の開発」(平成23年~25年)の助成を受けて行った.

II 材料と方法

1 供試菌

供試細菌として, 鹿児島県農業開発総合センター茶業部保存菌株 *P. syringae* pv. *theae* K9301 株を供試した. 接種源の調製は既報(吉田ら, 2013)に従った. また, 野菜茶業研究所保存菌株のチャ輪斑病菌 *Pestalotiopsis longiseta* (Spegazzini) Dai et Kobayashi の NP2-2-1 株およびチャ炭疽病菌 *Discula theae-sinensis* (I. Miyake) Moriwaki & Toy. Sato, comb. Nov. の CT001 株を既報(Yoshida ら, 2010)に従って接種源として調製した.

2 供試品種・系統

a 品種・系統の圃場接種試験

野菜茶業研究所枕崎茶業研究拠点の E4 園で栽培している表-1~表-3 に示すチャ (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) の 160 品種・系統を供試し, 圃場接種試験を 4 年間反復して行った. この中には農林認定品種 56 品種(表-1), 府県・民間育成品種・系統 56 点(表-2), 野菜茶業研究所育成品種・系統 48 点(表-3)が含まれる. これらは 2006 年 3 月に各品種・系統を 2 本ずつ, 株間 50cm, 単条植えて定植した. 供試品種には, チャ育成系統評価試験(旧系統適応性検定試験, 以下, 旧系適試験)で品種育成の比較品種として用いられる‘やぶきた’, ‘ゆたかみどり’, ‘おくみどり’, ‘かなやみどり’, ‘さやまかおり’, ‘さえみどり’が含まれる.

b 新品種および新品種候補系統の圃場接種試験

旧系適試験 11 群供試系統の新品種‘きりり 31’は 2005 年 3 月に J1 園に定植, 旧系適試験 12 群から品種候補として選抜予定の宮崎 34 号および金谷 33 号は 2008 年 3 月に E3 園に定植し, 比較品種として‘やぶきた’, ‘おくみどり’, ‘さやまかおり’を供試した. さらに, 新品種の‘なごみゆたか’, ‘さえあかり’, ‘おくはるか’は, 2010 年 10 月に N3 園に定植し, ‘やぶきた’と‘おくみどり’を比較品種として試験を行った. J1, E3, N3 園の 1 品種の畝の大きさ(幅×長さ)は, 約 1.8m × 6m である.

c マシン油乳剤を使用した圃場接種試験

マシン油乳剤を使用した圃場接種試験には, 2010 年度~2012 年度の試験結果で赤焼病の発病程度が異なった品種を供試した. 供試品種は枕崎茶業研究拠点内の F2 園に 1985~90 年に定植した‘あさつゆ’, ‘やぶきた’, ‘あかね’, ‘なつみどり’, ‘やえほ’, ‘べにひかり’, ‘かなやみどり’, ‘さやまかおり’, ‘おくみどり’, ‘しゅんめい’, ‘さえみどり’, ‘みなみさやか’, ‘べにふうき’, ‘さみどり’の計 14 品種である. これらは, 1 畝の大きさ(幅×長さ)は約 1.8m × 10 m で, 2013 年度の試験後の 2014 年 6 月に中切り更新を行った.

d 試験圃場の施肥量

接種試験を実施した各園の年間施肥量は成分量で窒素 40.1, リン酸 16.8, カリ 7.8 (kg/10a) であり, 8 月下旬に堆肥を 1t/10a 相当量散布した.

3 接種および発病調査

圃場接種は, 背負い式電動噴霧器 (SBR301K, 株やまびこ) を用いて, 約 1×10^8 cfu/ml に調整した赤焼病菌懸濁液を樹冠面に 100ml/ m^2 無傷接種した. 接種は降雨直後もしくは降雨時に行った. 発病調査は全品種・系統の発病調査が可能な早生品種の萌芽期に実施し, 50cm × 50cm 枠を用いて枠内の罹病葉を数えた. E4 園での試験では, 1 品種・系統当たり 2 個体の南北 2 か所合計 4 か所を調査し, その平均値を 1 m^2 あたりの発病葉数に換算した. その他の試験では, 畝を南北に縦断する形で 50cm 枠を用いて 3 か所調査し, それを 1 区分として 3 反復調査し, 1 m^2 あたりの発病葉数に換算した.

a 品種・系統の圃場接種試験

E4 園の圃場接種試験は 2010 年度, 2011 年度, 2012

年度および2014年度に行った。2010年度の試験では2010年12月28日に接種し、2011年3月10～14日に発病調査を行った。2011年度の試験では2011年12月22日に接種し、2012年3月24～25日に発病調査を行った。2012年度の試験では、2012年12月28日に接

種し、2013年3月14～15日に発病調査を行った。2014年度の試験では、2014年12月16日に接種し、2015年3月13～14日に発病調査を行った。なお、‘からべに’、‘きらか’、‘TR777’および枕崎20号は2010年度の試験時は生育不十分であったため、供試しなかった。

表－1 供試した農林認定品種

農林 番号	品種名	来歴 ^{a)}	用途 ^{b)}	農林 番号	品種名	来歴	用途
1	べにほまれ	アッサム実生選抜 (A)	紅	29	うんかい	たかちほ×宮F ₁ 9- 4-48 (S×A)	釜
2	あさつゆ	宇治種実生選抜 (S)	緑	30	かなやみどり	S6×やぶきた (S×S)	緑
3	みよし	宇治種実生選抜 (S)	緑	31	さやまかおり	やぶきた実生選抜 (S)	緑
4	たまみどり	宇治種実生選抜 (S)	緑	32	おくみどり	やぶきた×静在16 (S)	緑
5	さやまみどり	宇治在来実生選抜 (S)	緑	33	とよか	さやまみどり×や ぶきた (S×S)	緑
6	やぶきた	静岡在来実生選抜 (S)	緑	34	おくゆたか	ゆたかみどり×NN8 (S×S)	緑
7	まきのはらわせ	静岡在来実生選抜 (S)	緑	35	めいりよく	やぶきた×Z1 (S×S)	緑
8	こやにし	宇治種選抜 (S)	緑	36	ふくみどり	やぶきた×埼23-17 (S×S)	緑
9	ろくろう	在来選抜 (S)	緑	37	しゅんめい	ゆたかみどり×NN8 (S×S)	緑
10	やまとみどり	奈良在来実生選抜 (S)	緑	38	みねかおり	やぶきた×うんか い (S×A)	釜
11	たかちほ	在来選抜 (S)	釜	39	みなみかおり	やぶきた×宮A11 (S×C)	緑
12	いんど	アッサム雑種選抜 (A×S)	紅	40	さえみどり	やぶきた×あさつ ゆ (S×S)	緑
13	はつもみじ	Ai2×Nka05 (A×S)	紅	41	ふうしゅん	Z1×かなやみどり (S×S)	緑
14	べにたちわせ	Ai26×Nka01 (A×S)	紅	42	みなみさやか	宮A6×NN27 (A×S)	緑
15	あかね	Ai21×Nka03 (A×S)	紅	43	ほくめい	さやまみどり×埼 5507 (S×S)	緑
16	なつみどり	静岡在来選抜 (S)	緑	44	べにふうき	べにほまれ×枕 Cd86 (A×C)	紅・緑 ・半
17	やえほ	静岡在来選抜 (S)	緑	45	りょうふう	ほうりよく×やぶ きた (A×S)	緑
18	あさぎり	京都在来選抜 (S)	玉	46	むさしかおり	やぶきた×埼玉 27F ₁ 73 (S×C)	緑
19	きょうみどり	京都在来選抜 (S)	玉	47	さきみどり	NN27×ME52 (S×S)	緑
20	はつみどり	三重在来実生選抜 (S)	緑	48	はるみどり	かなやみどり×や ぶきた (S×S)	緑
21	べにかおり	Ai21×Nka03 (A×S)	紅	49	そうふう	やぶきた×静印雑 131 (S×A)	緑・半
22	べにふじ	べにほまれ×C19 (A×C)	紅	50	さいのみどり	さやまかおり実生 選抜 (S)	緑
23	ひめみどり	福岡在来選抜 (S)	玉	51	はるもえぎ	NN27×ME52 (S×S)	緑
24	いずみ	べにほまれ実生選 抜 (A×S)	釜	52	みやまかおり	京研283×さやまみ どり (S×S)	緑
25	さつまべに	Nka03×Ai18 (S×A)	紅	53	ゆめわかば	やぶきた×埼玉9号 (S×S)	緑
26	おくむさし	さやまみどり×や まとみどり (S×S)	緑	54	ゆめかおり	さやまかおり×宮 崎8号 (S×A)	緑
27	やまなみ	中国湖北省導入実 生選抜 (C)	釜	55	さえあかり	Z1×さえみどり (S×S)	緑
28	べにひかり	べにかおり×枕Cn1 (A×C)	紅	56	はるのなごり	埼玉1号×宮崎8号 (S×A)	緑

a) () 内の英字は、それぞれA:アッサム変種またはアッサム雑種、C:海外導入中国変種の品種、S:日本在来中国変種の品種を示す。

b) 主な用途を示し。「緑」は緑茶用、「紅」は紅茶用、「半」は半発酵茶用、「釜」は釜炒り茶用、「碾」は碾茶用、「玉」は玉露用を示す。

旧系適11群と12群の接種試験は2011年度と2012年度に行った。2011年度の試験では、2011年12月21日に接種し、2012年3月26日に発病調査を行った。2012年度の試験では2013年1月16日に接種し、3月13日に発病調査した。新品種の接種試験は、2013年度と2014年度に行った。2013年度の試験は2013年12

月26日に接種し、2014年3月17日に発病調査を行った。

2014年度の試験は2015年1月26日に接種し、3月14日に調査した。また2014年度の新品種の接種試験では、後述するマシン油乳剤散布を併用した接種試験も併せて行い、下記bの方法で2015年1月25日にマシン油乳剤を散布した。

表-2 供試した府県および民間育成品種・系統ならびに海外導入品種

育成者	品種・系統名	来歴	用途	育成者	品種・系統名	来歴	用途
静岡	くりたわせ	静岡在来選抜 (S)	緑	京都	京45	京都在来選抜 (S)	緑
静岡	ただにしき	アッサム実生選抜 (A)	紅	京都	京研283	京都在来選抜 (S)	緑
静岡	くらすわ	やぶきた実生選抜 (S)	緑	三重	三重緑萌1号	やぶきた実生選抜 (S)	緑
静岡	ふじみどり	静7224 (A)	緑	三重	三重うえじま	在来種実生選抜 (S)	緑
静岡	ほうりよく	アッサム雑種選抜 (A)	緑	鹿児島	あさのか	やぶきた×鹿Cp1 (S×C)	緑
静岡	からべに	中国湖北省実生選抜 (C)	紅	鹿児島	鹿CA278	鹿Ch2×Ai57 (C×A)	緑
静岡	するがわせ	やぶきた実生選抜 (S)	緑	埼玉	埼玉1号	埼玉53G1-7×さやまみどり (S)	緑
静岡	おおいわせ	やえほ×やぶきた (S×S)	緑	埼玉	埼玉9号	やぶきた実生選抜 (S)	緑
静岡	やまかい	やぶきた実生選抜 (S)	緑	宮崎	宮崎8号	宮A-6×NN27 (A×S)	緑
静岡	おくひかり	やぶきた×静Gy225 (S×C)	緑	宮崎	宮崎17号	さやまかおり×ME52 (S×S)	緑
静岡	さわみずか	やぶきた×ふじみどり (S×A)	緑	宮崎	宮崎21号	みなみさやか×おくゆたか (A×S)	緑
静岡	山の息吹	やぶきた実生選抜 (S)	緑	宮崎	ME52	宮崎在来選抜 (S)	緑
静岡	香駿	くらすわ×かなやみどり (S×S)	緑	台湾	鉄観音	中国導入品種 (C)	半
静岡	つゆひかり	静7132×あさつゆ (S)	緑	台湾	大葉烏龍	中国導入品種 (C)	半
静岡	静在16	静岡在来選抜 (S)	緑	台湾	青心大パン	中国導入品種 (C)	半
静岡	静印雑131	アッサム雑種選抜 (A)	緑	台湾	武夷	中国導入品種 (C)	半
静岡	静7132	やぶきた実生選抜 (S)	緑	台湾	台茶17号	中国導入品種 (C)	半
京都	てらかわわせ	宇治在来種選抜 (S)	碾	越南	TR777	ベトナム導入品種 (A)	紅
京都	あさひ	宇治種実生選抜 (S)	碾	民間	大棟	静岡在来選抜 (S)	緑
京都	さみどり	京都在来選抜 (S)	碾・玉	民間	さとうわせ	安倍1号実生選抜 (S)	緑
京都	こまかけ	宇治種実生選抜 (S)	玉	民間	いなぐち	やぶきた実生選抜 (S)	緑
京都	うじひかり	京都在来選抜 (S)	碾・玉	民間	たかねわせ	やぶきた実生選抜 (S)	緑
京都	うじみどり	宇治種実生選抜 (S)	玉	民間	司みどり	静岡在来選抜 (S)	緑
京都	おぐらみどり	京都在来選抜 (S)	碾	民間	藤かおり	静-印雑131×やぶきた (A×S)	緑
京都	ごこう	宇治種実生選抜 (S)	玉	民間	まりし	杉山八重徳実生選抜 (S)	緑
京都	成里乃	宇治在来種選抜 (S)	碾	民間	きらか	やぶきた枝変わり (S)	緑
京都	奥の山	宇治在来種選抜 (S)	玉	民間	松寿	くりたわせ枝変わり (S)	緑
京都	鳳春	さみどり実生選抜 (S)	玉	民間	藤沢晩生	埼玉在来選抜 (S)	緑

a) () 内の英字は、それぞれA:アッサム変種またはアッサム雑種、C:海外導入中国変種の品種または系統、S:日本在来中国変種の品種・系統を示す。

b) 主な用途を示し。「緑」は緑茶用、「紅」は紅茶用、「半」は半発酵茶用、「釜」は釜炒り茶用、「碾」は碾茶用、「玉」は玉露用を示す。

b マシン油乳剤散布後の圃場接種試験

マシン油乳剤散布後に接種する試験は2013年度と2014年度に行った。2013年度の試験では、2014年2月5日に97%マシン油乳剤（トモノールS、OATアグリオ）50倍を1m幅で一畝3か所200L/10a相当量を散布し、2月7日に赤焼病菌を接種した。初発は3月1日に確認され、調査は3月21日に行った。2014年度の試験では、2015年1月25日に97%マシン油乳剤50倍を散布し、1月26日に接種した。初発は2月14日に確認され、調査は3月11日に行った。

c 茶葉へのマシン油乳剤処理が炭疽病と輪斑病の発病に及ぼす影響

2012年3月16日に、圃場から‘やぶきた’と‘べにふうき’の越冬葉を採取した。水洗・風乾後に97%マシン油乳剤50倍に浸漬し、保水したオアシス育苗成形培地（ニッソーグリーン）に挿して15℃の人工気象器内で3時間保持し、風乾した。その後、炭疽病菌と輪斑病菌を既報（Yoshidaら、2010）に従い、接種・培養した。3月26日に病斑長径を計測し、マシン油乳剤処理の有無が炭疽病と輪斑病の病斑拡大に及ぼす影響を調査した。

表-3 供試した野菜茶業研究所育成品種・系統

品種・系統名	来歴	用途	品種・系統名	来歴	用途
ゆたかみどり	あさつゆ実生選抜 (S)	緑	枕崎11号	Ak1843×やぶきた (A×S)	緑
しゅんたろう	埼玉9号×枕F ₁ 33422 (S×A)	緑	枕崎12号	べにたちわせ×かなやみどり (A×S)	緑
なんめい	さやまかおり×枕崎13号 (S×A)	緑	枕崎13号	やぶきた×枕F ₁ 10115 (S×A)	緑
茶中間母本農2号	やぶきた放射線突然変異 (S)	緑	枕崎14号	さつまべに×やぶきた (A×S)	緑
茶中間母本農3号	アッサム実生選抜 (A)	紅	枕崎15号	やぶきた×枕F ₁ 10115 (S×A)	緑
茶中間母本農4号	金Ck17×さやまかおり (C×S)	緑	枕崎16号	やぶきた×枕F ₁ 10087 (S×A)	緑
茶中間母本農5号	金Ck17×さやまかおり (C×S)	緑	枕崎17号	やぶきた×枕F ₁ 10123 (S×A)	緑
茶中間母本農6号	<i>C. taliensis</i> 自然交雑実生	緑	枕崎18号	やぶきた×枕F ₁ 10123 (S×A)	緑
AN3	A2×S24 (A×S)	紅	枕崎20号	さやまかおり×やえほ (S×S)	緑
NN8	たまみどり×S6 (S)	緑	枕崎21号	さやまかおり×枕在81-20 (S×S)	緑
NN27	やぶきた×静在16 (S)	緑	枕崎23号	やぶきた×枕F ₁ 10115 (S×A)	緑
S6	静岡在来選抜 (S)	緑	枕崎24号	さやまかおり×ME52 (S)	緑
S24	静岡在来選抜 (S)	緑	枕崎25号	やえほ×枕系28-1 (S×S)	緑
Z1	たまみどり実生選抜 (S)	緑	枕崎26号	かなやみどり×枕F ₁ 10087 (S×A)	緑
金谷13号	AN3×かなやみどり (A×S)	緑	枕崎27号	枕崎13号×こまかげ (A×S)	緑
金谷15号	ゆたかみどり×くらすわ (S×S)	緑	枕崎28号	Z1×さえみどり (S×S)	緑
枕崎1号	べにかおり×Ak937 (A×A)	紅	枕崎29号	Z1×さえみどり (S×S)	緑
枕崎2号	枕Cd80×Ak937 (C×A)	紅	枕崎31号	さやまかおり×枕崎13号 (S×A)	緑
枕崎4号	べにたちわせ×べにひかり (A×A)	紅	枕崎32号	ふうしゅん×さえみどり (S×S)	緑
枕崎5号	べにたちわせ×べにひかり (A×A)	紅	枕崎33号	さきみどり×さえみどり (S×S)	緑
枕崎6号	京都在来選抜 (宇治市) (S)	緑	枕崎34号	さやまかおり×枕崎13号 (S×A)	緑
枕崎7号	京都在来選抜 (京都市) (S)	緑	枕崎36号	ふうしゅん×さえみどり (S×S)	緑
枕崎8号	福岡在来選抜 (黒木町) (S)	緑	枕F ₁ 10123	枕F ₁ 288×べにたちわせ (A×A)	緑
枕崎10号	枕F ₁ 288×やぶきた (A×S)	緑	枕F ₁ 67480	IND113×NN27 (A×S)	紅

表中の記載は表-2の通り。

4 統計解析

圃場接種試験では、赤焼病発病の年次間差及び品種・系統間差が大きかったことから、データの解析にはエクセル統計2012を用い、ノンパラメトリック分析を行った。年度別の品種・系統の発病葉数の平均値の記述統計量を計算し、発病葉数の中央値ならびに外れ値の算出と年度別の発病葉数の箱ひげ図を作成した。また、平均値を用いた赤焼病発病葉数の年次間差と品種・系統間差について、クラスカル・ウォリス検定を行った。次に、以下の式で、発病葉数の中央値に対する各供試品種・系統の比率（以下、中央値比）を試験年度ごとに算出した。

中央値比 = 品種・系統の発病葉数 / 発病葉数の中央値

この中央値比を用いて、前述の平均値の場合と同様の手法で統計解析を行った。

また、前項cの試験では、一元配置分散分析とTukeyの多重検定を行った。

III 結果

1 品種・系統の圃場接種試験

a 圃場接種試験結果の統計解析

E4園の4年間の圃場接種試験の結果、赤焼病の発病に年次間差および品種・系統間差が認められた。試験年度ごとの供試品種・系統の発病葉数の平均値を用いて記述統計量を計算し、箱ひげ図を作成すると、発病葉数の年次間差および品種・系統間差が大きいことが示された(図-2A)。各試験年度の中央値は、2010年度が34.0、2011年度が35.5、2012年度が160.3、2013年度が68.0となり、上側外れ値となった品種・系統は、2010年度は2点、2011年度は10点、2012年度は1点、2014年度は2点認められた。次に平均値を用いた発病葉数の年次間差および品種・系統間差をそれぞれクラスカル・ウォリス検定したところ、いずれも1%水準で有意差が認められた(表-4、表-5)。一方、中央値比を用いて記述統計量を計算し、箱ひげ図の作成(図-2B)と、発病葉数の年次間差および品種・系統間差のクラスカル・ウォリス検定を行ったところ、年次間の有意差は無く、品種・系統間は1%水準で有意差が認められた(表-4、表-5)。そこで、赤焼病の品種・系統間の抵抗性は中央値比の比較で判定した。

b 品種・系統の抵抗性判定

E4園の160品種・系統の4年間の圃場接種試験の中央値比の平均値を算出し、赤焼病抵抗性の強弱を判定し

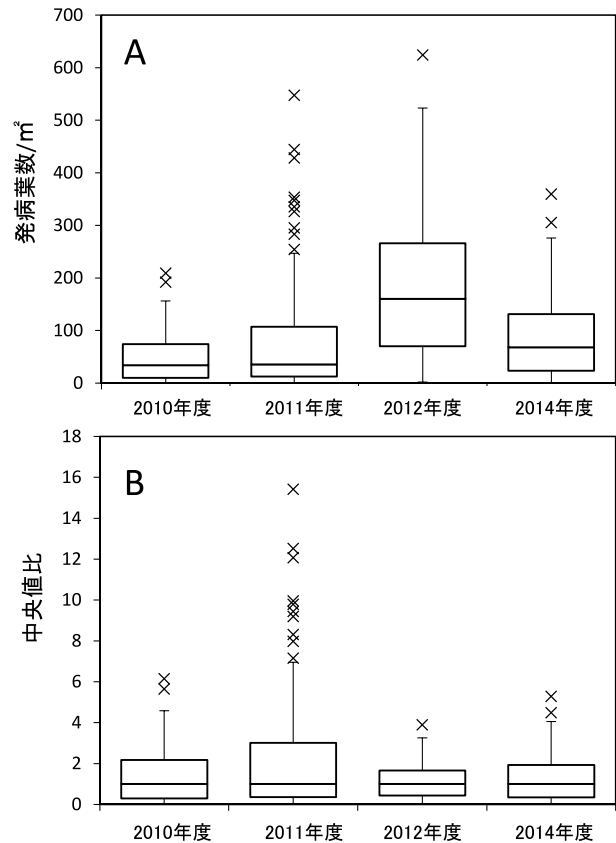


図-2 圃場接種試験によるチャ品種・系統の赤焼病発病の年次間差

A: 発病葉数の平均値から作成した箱ひげ図。

B: 各年度の中央値に対する発病葉数の比(中央値比)から作成した箱ひげ図。

a) 図中の×は外れ値を示す。

た。中央値比の箱ひげ図(図-2B)の下側1/4点の4年間の平均値と標準偏差は 0.357 ± 0.05 である。そこで、中央値比0.4未満を抵抗性「強」、さらに中央値比0.2未満を「極強」とした。また、中央値比が0.4以上0.6未満を「中」、0.6以上1.0以下を「やや弱」、1.0以上2.0未満を「弱」、2.0以上を「極弱」とし、6段階に分類した(表-6)。各抵抗性の品種・系統数は、「極強」が15点、「強」が13点、「中」が16点、「やや弱」が29点、「弱」が42点、「極弱」が45点となった(表-6)。抵抗性「極強」の「さえあかり」と「極弱」の「藤沢晩生」の病徴の差を図-3に示す。また、育成系統評価試験の比較品種の赤焼病抵抗性は、「おくみどり」と「さやまかおり」は「強」、「やぶきた」と「さえみどり」は「やや弱」、「ゆたかみどり」は「弱」と判定された。

c 新品種および品種候補系統の抵抗性判定

新品種と品種候補系統の赤焼病抵抗性は比較品種との

表－4 圃場接種試験におけるチャ品種・系統における赤焼病発病の年次間差のクラスカル・ウォリス検定

検定データ：平均値					検定データ：中央値比				
水準	2011年	2012年	2013年	2015年	水準	2011年	2012年	2013年	2015年
n	156	160	160	160	n	156	160	160	160
平均順位	228.76	271.28	451.33	320.38	平均順位	315.37	342.38	307.54	308.63
カイ二乗値	自由度	P 値	判定		カイ二乗値	自由度	P 値	判定	
131.4266	3	0.0000	**		3.7798	3	0.2862	—	

a)**：1%有意，－：有意差なし。

発病葉数の差で評価した。新品種‘きらり31’は「やや弱」の‘やぶきた’より発病葉数が多く、抵抗性は「弱」と判定された。また、金谷33号と宮崎34号は‘さやまかおり’と同等の発病葉数で抵抗性「強」と判定された(表－7)。次に、新品種‘おくはるか’、‘なごみゆたか’および‘さえあかり’の赤焼病抵抗性を調査した(表－8)。2013年度と2014年度の‘やぶきた’の発病葉数の差は大きかったが、供試新品種の2年間の発病は同等で、‘おくはるか’は「やや弱」、‘なごみゆたか’は「中」、‘さえあかり’は「強」と判定された。また、2014年度の試験では、マシン油乳剤散布が発病に及ぼす影響を同時に調査し、‘おくはるか’、‘なごみゆたか’は発病葉数が増加し「弱」と判定されたが、‘さえあかり’は‘おくみどり’と同等の「強」と判定された。

2 マシン油乳剤散布後の圃場接種試験

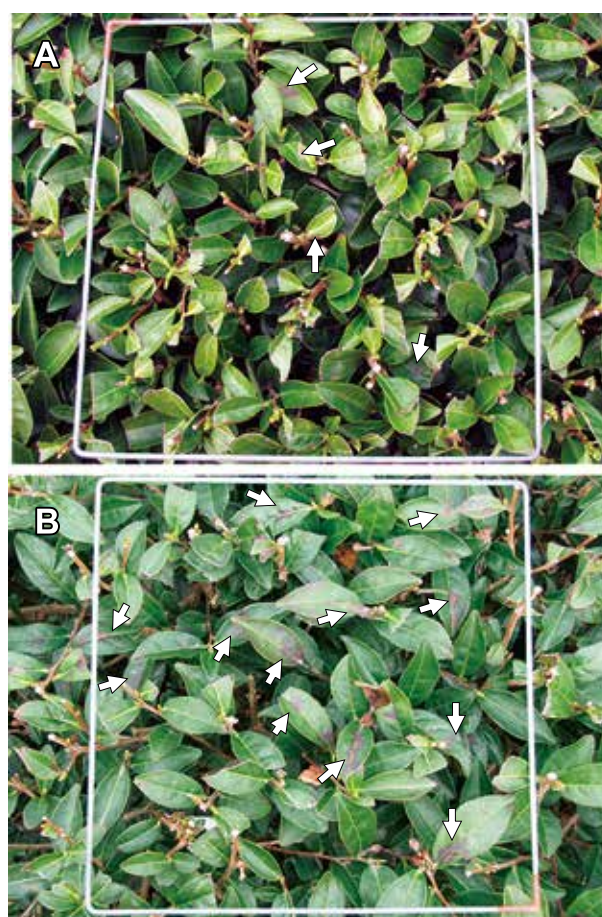
2013年度の試験では、無処理の赤焼病の発病葉数は‘さえみどり’の64.7枚/㎡が最多であったが、マシン油乳剤を散布した場合、発病の助長程度に顕著な品種間差が認められた(図－4)。表－6で抵抗性「極強」～「強」と判定された‘あかね’、‘やえほ’、‘べにひかり’、‘さやまかおり’、‘しゅんめい’および‘べにふうき’のマシン油乳剤散布による発病葉数は21枚/㎡以下で、発病助長は少ないが、‘おくみどり’は55.8枚/㎡に発病葉数が増加し、‘なつみどり’は203.3枚/㎡と著しく発病葉数が増加した。一方、マシン油乳剤散布した抵抗性「中」の‘みなみさやか’と‘さみどり’は無処理の約5倍に発病葉数が増加した。これに対し、抵抗性「中」の‘あさつゆ’、‘やや弱’の‘やぶきた’、‘さえみどり’および「極弱」の‘かなやみどり’は300枚/㎡以上に発病葉数が増加した。

2014年度の試験では、無処理の赤焼病の発病葉数は「極弱」の‘かなやみどり’が最多で274枚/㎡であり、2013年度の試験より発病葉数が多い傾向であった(図－4)。マシン油乳剤を散布した場合、抵抗性「極強」または「強」の‘あかね’、‘やえほ’、‘べにひかり’、‘さやまかおり’、‘べにふうき’の発病葉数は、50枚/㎡以下

表－5 圃場接種試験におけるチャ品種・系統間の赤焼病発病葉数のクラスカル・ウォリス検定

検定データ	水準	n		
平均値	160	4		
中央区比	160	4		
検定データ	カイ二乗値	自由度	P 値	判定
平均値	357.9270	159	0.0000	**
中央区比	454.7708	159	0.0000	**

a) 平均順位は省略。b)**：1%有意。



図－3 圃場接種による赤焼病発病の品種間差異
Aは‘さえあかり’（抵抗性・極強）、Bは‘藤沢晩成’（極弱）を示し、図中の白矢印は病斑を示す。
2011年3月19日に撮影、写真の枠は30cm枠。

表-6 圃場接種試験によるチャ品種・系統の赤焼病抵抗性判定

順位	品種・系統名	中央値比	抵抗性	順位	品種・系統名	中央値比	抵抗性	順位	品種・系統名	中央値比	抵抗性
1	茶中間母本農6号	0.027		55	枕崎27号	0.726		109	静7132	1.800	
2	やえほ	0.040		56	松寿	0.757		110	埼玉1号	1.809	
3	あかね	0.049		57	ただにしき	0.769		111	司みどり	1.849	
4	はつもみじ	0.082		58	枕崎14号	0.776		112	きらか	1.867	弱
5	べにふうき	0.084		59	おくむさし	0.777		113	静在16	1.887	
6	枕崎31号	0.087		60	京研283	0.781		114	なんめい	1.941	
7	茶中間母本農4号	0.125		61	やぶきた	0.807		115	Z1	1.999	
8	枕崎2号	0.131	極強	62	さえみどり	0.832		116	三重緑萌1号	2.003	
9	さえあかり	0.131		63	ほうりよく	0.884	やや弱	117	枕崎18号	2.014	
10	台茶17号	0.145		64	やまなみ	0.894		118	はるもえぎ	2.028	
11	べにひかり	0.155		65	こやにし	0.902		119	こまかげ	2.046	
12	茶中間母本農3号	0.156		66	てらかわわせ	0.908		120	S6	2.089	
13	なつみどり	0.172		67	宮崎17号	0.913		121	たかちほ	2.117	
14	いんど	0.193		68	鉄観音	0.921		122	とよか	2.121	
15	べにかおり	0.195		69	うじみどり	0.939		123	AN3	2.205	
16	おくみどり	0.223		70	宮崎21号	0.970		124	枕崎17号	2.278	
17	枕崎29号	0.232		71	ごこう	0.976		125	めいりよく	2.281	
18	べにたちわせ	0.237		72	たかねわせ	0.979		126	おくゆたか	2.318	
19	枕崎5号	0.238		73	枕崎28号	0.993		127	みやまかおり	2.328	
20	あさぎり	0.272		74	ほくめい	1.006		128	香駿	2.346	
21	おおいわせ	0.277	強	75	むさしかおり	1.034		129	みよし	2.353	
22	さやまかおり	0.282		76	三重うえじま	1.036		130	ひめみどり	2.369	
23	枕崎4号	0.287		77	さきみどり	1.036		131	ふくみどり	2.371	
24	枕崎32号	0.288		78	成里乃	1.056		132	みねかおり	2.377	
25	茶中間母本農5号	0.318		79	さいのみどり	1.143		133	さわみずか	2.474	
26	枕崎13号	0.336		80	枕崎7号	1.171		134	つゆひかり	2.477	極弱
27	からべに	0.358		81	埼玉9号	1.173		135	さつまべに	2.489	
28	しゅんめい	0.375		82	ゆたかみどり	1.220		136	いなぐち	2.519	
29	茶中間母本農2号	0.420		83	鳳春	1.250		137	枕崎36号	2.525	
30	みなみさやか	0.427		84	青心大パン	1.261		138	うんかい	2.725	
31	あさつゆ	0.438		85	はるのなごり	1.262		139	さとうわせ	2.747	
32	べにほまれ	0.439		86	枕崎10号	1.278		140	かなやみどり	2.792	
33	きょうみどり	0.445		87	あさひ	1.322		141	枕崎6号	2.819	
34	さみどり	0.450		88	ふじみどり	1.357		142	枕崎26号	2.869	
35	枕崎11号	0.457		89	ゆめわかば	1.365		143	山の息吹	2.907	
36	金谷15号	0.457	中	90	あさのか	1.392	弱	144	いずみ	2.951	
37	おぐらみどり	0.475		91	ろくろう	1.426		145	しゅんたろう	3.061	
38	ふうしゅん	0.476		92	はるみどり	1.471		146	枕崎16号	3.159	
39	りょうふう	0.479		93	枕崎12号	1.524		147	枕崎25号	3.182	
40	たまみどり	0.479		94	金谷13号	1.556		148	NN27	3.200	
41	奥の山	0.534		95	そうふう	1.595		149	枕崎21号	3.333	
42	はつみどり	0.564		96	京45	1.611		150	S24	3.364	
43	枕崎15号	0.571		97	枕崎1号	1.619		151	枕崎23号	3.456	
44	武夷	0.577		98	べにふじ	1.627		152	枕崎24号	3.530	
45	うじひかり	0.617		99	ME52	1.628		153	まりし	3.943	
46	大葉烏龍	0.626		100	くらさわ	1.636		154	NN8	4.136	
47	枕F ₁ 67480	0.648		101	やまかい	1.643		155	静印雑131	4.343	
48	みなみかおり	0.654		102	ゆめかおり	1.646		156	おくひかり	4.501	
49	宮崎8号	0.664	やや弱	103	するがわせ	1.666		157	藤かおり	4.554	
50	さやまみどり	0.674		104	枕F ₁ 10123	1.724		158	大棟	5.720	
51	枕崎33号	0.683		105	枕崎34号	1.733		159	藤沢晩生	6.719	
52	まきのはらわせ	0.704		106	鹿CA278	1.751		160	枕崎8号	6.975	
53	くりたわせ	0.720		107	TR777	1.774					
54	枕崎20号	0.725		108	やまとみどり	1.776					

a) 中央値比0.2未満：極強、0.2以上0.4未満：強、0.4以上0.6未満：中、0.6以上1.0未満：やや弱、1.0以上2.0未満：弱、2.0以上：極弱。

b) 中央値比を発病葉数（枚/㎡）に換算した場合、0.2は14.9、0.4は29.0、0.6は44.7、0.8は59.6、1.0は74.5、2.0は148.9となる。

表－7 新品種・旧系適供試系統の赤焼病抵抗性

品種・系統名	来歴	平均発病葉数 (枚/m ²)			判定
		2011年度	2013年度	平均値	
やぶきた	静岡在来 実生選抜 (S)	76.0	29.0	52.5	やや弱
おくみどり	やぶきた×静在16 (S)	17.3	3.0	10.2	強
きらり31	さきみどり×さえ みどり (S×S)	91.3	158.0	124.7	弱
さやまかおり	やぶきた 実生選抜 (S)	3.3	5.0	4.2	強
金谷33号	金F183×金谷13 号 (S×A)	1.3	5.5	3.4	強
宮崎34号	さえみどり×さき みどり (S×S)	6.0	21.0	13.5	強

a) ‘やぶきた’, ‘おくみどり’, ‘きらり31’ は2005年3月に定植,
‘さやまかおり’, 金谷33号, 宮崎34号は2008年3月に定植した。

表－8 新品種の赤焼病抵抗性とマシン油接種前散布が
発病に及ぼす影響

品種・系統名	来歴	平均発病葉数 (枚/m ²)			判定	マシン油処理区	
		2013年度	2014年度	平均値		発病葉数 (枚/m ²)	判定
やぶきた	静岡在来実生選抜 (S)	46.8	216.0	131.4	弱	481.5	極弱
おくみどり	やぶきた×静在16 (S)	4.7	13.2	9.0	強	29.0	強
なごみゆたか	埼玉16号×福8 (S×S)	46.7	43.0	44.9	中	94.5	弱
さえあかり	Z1×さえみどり (S×S)	17.3	12.3	14.8	強	26.5	強
おくはるか	埼玉20号×埼玉8 号 (S×S)	70.7	65.0	67.9	弱	110.3	弱

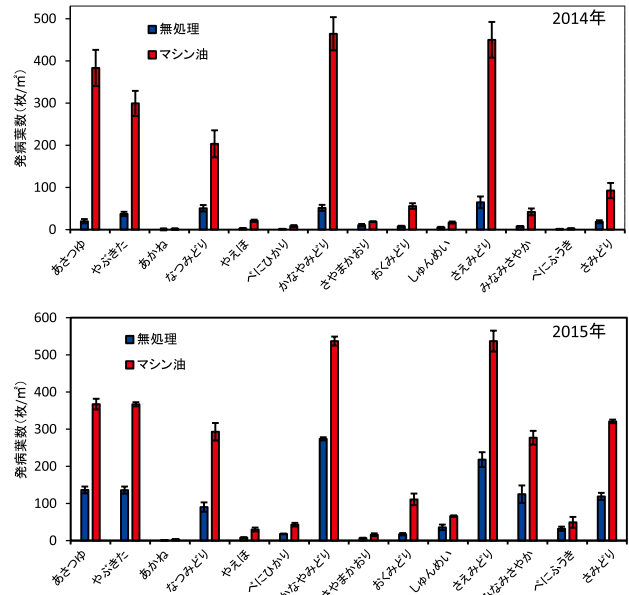
a) 供試品種は2010年10月に定植した。

表－9 越冬葉への接種前マシン油乳剤処理が輪斑病と
炭疽病の発病に及ぼす影響

供試品種	処理区	病斑長径 (mm)	
		輪斑病	炭疽病
やぶきた	無処理	16.3 ± 0.89 *	7.9 ± 0.82 *
	マシン油	17.0 ± 0.57 *	7.7 ± 0.56 *
べにふうき	無処理	3.3 ± 0.05 **	4.6 ± 0.13 **
	マシン油	3.7 ± 0.21 **	4.3 ± 0.27 **

a) 表中の±は標準誤差を示し, 異なる*数はTukey多重検定
で1%水準で有意差があることを示す (n=14)。

であったが, ‘しゅんめい’ と ‘おくみどり’ の発病葉数は 65.7 枚/m² と 111 枚/m² であり, やや多かった。また, 抵抗性「極強」の ‘なつみどり’ は 293 枚/m² に発病葉数が増加し, 表－6 で抵抗性「中」以下と判定された全ての品種で, 250 枚/m² 以上に発病葉数が増加した。また, 抵抗性「中」以下の場合, マシン油乳剤散布により, 病斑も大きくなったが, 抵抗性「極強」または「強」の病斑の大きさは無処理の場合と同様に, 小さかった (図－5, 図－6)。



図－4 接種前のマシン油乳剤散布が異なる品種の赤焼病発病助長に及ぼす影響
図中のバーは標準誤差を示す。

3 マシン油乳剤処理が輪斑病と炭疽病の発病に及ぼす影響

炭疽病と輪斑病に罹病性の ‘やぶきた’ と抵抗性の ‘べにふうき’ の越冬葉にマシン油乳剤を処理後に, 輪斑病菌と炭疽病菌を接種し, 発病に及ぼす影響を調査した。輪斑病菌を両品種に接種した場合, ‘やぶきた’ では病斑が拡大したが, ‘べにふうき’ では病斑の病斑拡大は抑制され, 品種間の病斑の大きさに有意差が認められたが, 各品種の無処理とマシン油乳剤処理の病斑の大きさに有意差は無かった (表－9)。また, 炭疽病菌を両品種に接種した場合も, 輪斑病菌を接種した場合と同様の結果が得られ (表－9), マシン油乳剤処理は発病を助長しなかった。

IV 考 察

チャ品種・系統の赤焼病抵抗性の品種間差に関する報告は, 古い品種のチャ園での自然発病を単年度試験で調査した報告が主で (堀川, 1985, 1989; 静岡県茶業試験場, 1988), 判定が報告ごとに異なる。また, 圃場接種試験は岡部 (1956) の報告だけで, 新しいチャ品種について, 圃場接種試験で赤焼病抵抗性判定を行った研究は無い。また, 赤焼病抵抗性の室内検定法が検討されているが (池田ら 2009; 池田ら, 2012), 再現性の面でまだ課題が残されている。本研究では 165 品種・系統の赤焼病抵抗性を圃場接種試験により判定した。これには全て



図-5 マシン油乳剤処理後に接種した場合の赤焼病発病の品種間差

Aは‘やえぼ（極強）’、Bは‘さえみどり（やや弱）’を示し、図中の白矢印は病斑を示す。2015年3月24日に撮影、写真の枠は20cm枠。

の農林認定品種、2015年までに品種登録された府県育成の品種、主要な民間育成品種、及びチャ育種で交配親に使用される育成系統が含まれる。赤焼病の発生は環境条件に大きく左右され、晩秋期から萌芽期前後までに霜寒害を受けた場合に、赤焼病が激発することが報告されている（安藤，1988；Tomihamaら，2009）。野菜茶業研究所枕崎茶業研究拠点はアッサム変種の遺伝資源を屋外で栽培可能な無霜地帯で、萌芽期以降に晩霜害を受けることはあるが（吉田ら，2010）、本研究実施中に霜寒害の発生は認められなかった。従って、本研究は霜寒害の影響を排除した環境条件下で、チャ品種・系統の赤焼病抵抗性を判定したと考えられる。

本研究は圃場接種試験のため、発病の年次間差が認められた。そこで、各試験年度の発病葉数の中央値を算出して、中央値に対する各品種・系統の中央値比を算出後に統計解析を行った。その結果、発病の年次間差の有意差が無いことが確認されたので、4年間の中央値比の平

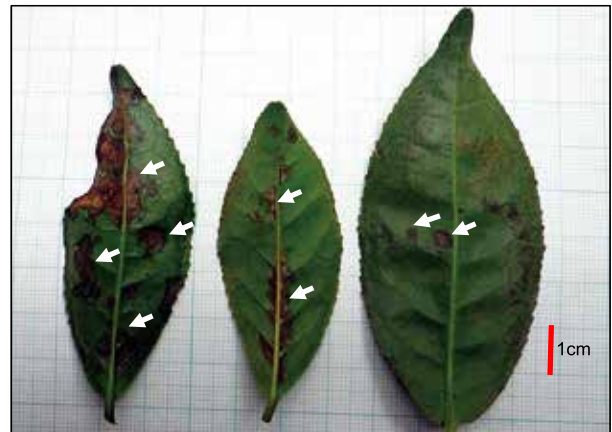


図-6 マシン油乳剤散布後に圃場接種した場合の赤焼病の病斑の品種間差

左から‘かなやみどり（極弱）’、‘おくみどり（強）’、‘あかね（極強）’の罹病葉を示し、図中の白矢印は病斑を示す。2015年3月14日に採取・撮影。

均値で品種・系統間の赤焼病抵抗性を判定した。抵抗性判断基準として、中央値比0.4未満を「強」とした。各年度の中央値比0.4を発病葉数に換算した平均値は29枚/m²である。富濱（2005）は赤焼病の要防除水準ならびに防除有効水準を提唱し、春整枝前の3月上旬時点での発病葉数が慣行園で50枚/m²未満であれば、薬剤防除は不要であることを報告した。従って、今回の試験で、中央値比0.4未満を抵抗性「強」以上と判定したのは妥当と考えられる。また、静岡県茶業試験場（1988）の報告で‘かなやみどり’は抵抗性「強」、‘やえぼ’は「やや弱」と判定されたが、本研究ではそれぞれ‘極弱」と‘極強」と判定され、抵抗性判定が逆転した。これは、圃場における自然発病を調査した静岡県茶業試験場の単年度試験と本研究における年次反復のある圃場接種試験の試験精度の差に起因すると考えられる。

本研究の結果は、赤焼病常発地における品種選定や耐病性育種の交配母樹の選定に活用できる。特に、抵抗性「極強」と判定された緑茶品種‘さえあかり’、紅茶品種の‘べにふうき’と‘べにひかり’は、炭疽病と輪斑病にも抵抗性であり（Takeda, 2003；Yoshidaら，2006；吉田ら，2012）、栽培適地が広く、製茶品質も優れることから、耐病性品種を活用した減農薬チャ栽培に有望な品種と考えられる。ただし、この3品種はもち病が発生した事例が確認されており、もち病常発地に導入する場合は注意が必要である。一方、定植後1～2年の幼木園では、赤焼病が発生しやすく（戸崎，1965；堀川，1982，1989）、2015年冬には新品种‘なんめい’の幼木園で赤焼病の甚発生が確認された（図-1）。さらに、園田ら

(2012)は台風通過後の幼木園における赤焼病の発生について報告している。幼木園と成木園における赤焼病の抵抗性を比較した報告はなく、本研究で抵抗性と判定されたチャ品種・系統の幼木期の赤焼病抵抗性について改めて調査する必要がある。

今回、供試した165品種・系統は、中国変種(*C. sinensis* var. *sinensis*)の日本在来種から選抜されたもの、日本在来種の交雑育種により育成されたもの、海外から導入したアッサム変種(*C. sinensis* var. *assamica*)や中国変種との交雑品種・系統を含むが、抵抗性の強弱は来歴に関係なく、多様であった。Takeda(2003)はチャ品種・遺伝資源の中で、アッサム変種や海外導入中国変種は、そのほとんどが輪斑病抵抗性であることを明らかにし、Yoshidaら(2006)は炭疽病の付傷接種検定で、アッサム変種およびその交雑後代と海外導入中国変種の多くが炭疽病抵抗性であることを明らかにした。これに対し、赤焼病は海外導入遺伝資源の交雑品種・系統であっても、抵抗性「弱」や「極弱」を示す品種・系統が確認された。また、本研究の結果から赤焼病抵抗性の遺伝様式の解析に関する手がかりが得られた。「さえあかり」は抵抗性「弱」のZ1と抵抗性「やや弱」の「さえみどり」との交雑後代から選抜され、抵抗性「極強」であるが、同じ交雑組合せの枕崎29号は「強」、枕崎28号は「やや弱」と抵抗性発現が異なった。一方、抵抗性「強」の「さやまかおり」×枕崎13号の交雑後代である枕崎31号は「極強」、枕崎34号は「弱」、'なんめい'は「弱」と抵抗性発現が異なった。これらの結果から、チャの赤焼病抵抗性の遺伝様式は主動遺伝子に支配された真性抵抗性ではなく、相加効果がある複数の量的抵抗性遺伝子により決定されると推察された。今後、抵抗性と罹病性の品種の交雑後代の抵抗性の分離ならびにQTL解析を行うことにより、赤焼病抵抗性の遺伝様式が明らかにされると考えられる。

マシン油乳剤を散布した「やぶきた」に赤焼病細菌を接種すると、無処理に比べ赤焼病の発病が著しく増加する(吉田ら, 2013)。これに対し、マシン油乳剤をチャ越冬葉に処理し、炭疽病菌と輪斑病菌を接種した場合、病斑の大きさに品種間差は認められたが、マシン油乳剤処理と無処理の病斑の大きさに有意差は無かった。これは、チャ葉へのマシン油乳剤処理は、両病原菌の感染に影響を与えないことを示している。従って、マシン油乳剤による発病助長は、チャ赤焼病に特異的な現象と考えられ、マシン油乳剤の赤焼病細菌感染促進効果(吉田ら, 2013)に起因すると考えられる。そこで、2010年度から2012年度の試験で赤焼病の発病程度が異なった14品

種を用いて、マシン油乳剤散布後に、赤焼病細菌を接種し、無処理の場合と比較調査した。その結果、抵抗性「中」以下の品種では、マシン油乳剤散布により顕著に発病が増加した。さらに、「なつみどり」のように、通常接種で抵抗性「極強」と判定された場合でも、マシン油乳剤散布後の接種では、発病葉数が100枚/㎡以上に増加する場合が認められた。以上の結果は、マシン油乳剤散布後の圃場接種は、通常接種の場合より、赤焼病抵抗性品種の検出精度が高まることを示している。マシン油乳剤散布後の圃場接種は、赤焼病強度抵抗性品種の有望な選抜手法と考えられ、今後のチャ育種における耐病性品種開発に活用できる。本法による抵抗性検定は供試品種・系統がハサミ摘み可能なまで成長した段階で実施し、比較品種として、抵抗性「強」の「さやまかおり」、'おくみどり'および「やや弱」の「やぶきた」を使用することが望ましい。

本研究では、既存の165品種・系統の赤焼病抵抗性を明らかにするとともに、赤焼病抵抗性系統の新規検定法として、圃場のチャ樹にマシン油乳剤を散布後に赤焼病細菌を接種する方法を開発した。既存の品種・系統の赤焼病抵抗性が明らかにされたことから、今後、この結果を反映できる、再現性の高い室内接種検定法の開発が可能になると考えられる。また、開発された室内接種検定法を用いて、赤焼病抵抗性の遺伝解析を効率的に進めることにより、チャの赤焼病抵抗性に関する知見が蓄積されることが期待される。

IV 摘 要

チャ品種・系統の赤焼病抵抗性は未解明である。今回、チャ品種・系統165点を用い、冬期に赤焼病菌を圃場で接種し、発病程度の年次間差と品種・系統間差のデータに基づき、赤焼病抵抗性を判定した。2~4年間の圃場試験により、緑茶品種9種、紅茶品種8種、13育成系統が赤焼病抵抗性「極強」または「強」と判定され、これには炭疽病と輪斑病に抵抗性の緑茶品種「さえあかり」も含まれた。これに対し、135品種・系統は抵抗性「中」以下であり、これには輪斑病と炭疽病の両方に抵抗性であることが多い。アッサム変種や中国導入系統の交雑後代も含まれた。冬期にマシン油乳剤をチャ樹に散布後に赤焼病細菌を接種すると、発病が著しく助長される。これを応用して、赤焼病抵抗性が異なる14品種にマシン油乳剤を散布して、接種試験を行うと、抵抗性の強弱が、無処理の場合より強調され、強度抵抗性品種の検出が可

能であった。本法は赤焼病抵抗性品種・系統の選抜に有効な手法と考えられる。

引用文献

- 1) 安藤康雄・浜屋悦次・瀧川雄一・後藤正夫 (1986): チャ赤焼病の病徴変異. 日植病報., 52, 478-486.
- 2) 安藤康雄 (1988): 霜寒害年におけるチャ赤焼病の激発. 野菜茶試研報 B (金谷)., 2, 41-45.
- 3) 荒井啓・野中寿之・三木洋二・植原一雄 (1979): 薩摩半島南部に発生した茶の細菌性病害について. 鹿大農学報., 29, 55-61.
- 4) 堀正太郎 (1914): 細菌の寄生に基づく茶樹の一大病害 (赤焼病). 病虫雑., 1, 242-252.
- 5) 堀川知廣 (1982): 秋から春にかけての病害“赤焼病”について. 茶 35., (2), 2-6.
- 6) 堀川知廣 (1985): 静岡県におけるチャ赤焼病の分布, 病徴, 発生時期および品種間差異. 関西病虫研報., 7, 7-14.
- 7) 堀川知廣 (1989): チャ赤焼病とその防除. 茶., 42 (1), 22-27.
- 8) 池田奈実子・安間瞬 (2004): チャ炭疽病抵抗性に関するダイアレル分析. 育種学研究., 6, 135-141.
- 9) 池田奈実子・桐明智也・吉田克志 (2009): チャ赤焼病抵抗性の品種間差. 茶研報., 108 (別), 86-87.
- 10) 池田奈実子・廣野祐平・吉田克志 (2012): 人工接種条件下におけるチャ赤焼病の病斑拡大と葉中の全窒素含有量及び葉の成熟度の関係. 野菜茶研研報., 11, 99-106.
- 11) 宮田裕次・塚本統・瀧道則 (2003): 窒素施肥量が茶樹幼木園のチャ赤焼病に及ぼす影響. 長崎総農林試研報 (農業部門)., 29, 65-71.
- 12) 成澤信吉・木場隆廣 (1991): チャ赤焼病の発生が一番茶, 2番茶収量に及ぼす影響. 茶研報., 74 (別), 70-71 (講要).
- 13) 岡部徳夫 (1956): 茶樹の赤焼病とその防除. 農葉., 3(12), 13-16.
- 14) 園田亮一・山田憲吾・吉田克志 (2012): 台風4号の通過後に認められた幼木におけるチャ赤焼病の発生. 茶研報., 114 (別), 130-131.
- 15) Takeda, Y. (2003): Phenotypes and genotypes related to tea gray blight disease resistance in the genetic resources of tea in Japan. *JARQ.*, 37, 31-35.
- 16) 富濱毅 (2005): チャ赤焼病の被害許容水準に基づく要防除水準および防除有効水準. 九州病害虫研究会報., 51, 35-39.
- 17) 富濱毅・中村孝 (2006) チャ赤焼病に対する銅殺菌剤の残効性, 適切な散布量および散布時期と銅殺菌剤による防除体系の確立. 茶研報., 102, 7-16.
- 18) 富濱毅 (2006): チャ赤焼病の発生に及ぼす氷核活性細菌 *Xanthomonas campestris* の影響. 日植病報., 72, 14-21.
- 19) 富濱毅 (2009): チャ赤焼病の病原細菌の諸性質, 生態ならびに防除に関する研究. 鹿児島県農開総セ研報・耕種部門., 3, 225-282.
- 20) Tomihama, T., T. Nonaka, Y. Nishi and K. Arai (2009): Environmental control in tea field to reduce infection by *Pseudomonas syringae* pv. *theae*. *Phytopathology.*, 99, 209-216.
- 21) 戸崎正弘 (1965): 茶赤焼病 (*Pseudomonas theae* Okabe et Goto) に関する研究—発生生態および病原細菌に対する防除薬剤の室内検定. 関西病虫研報., 7, 34-39.
- 22) 山下幸司・佐藤安志・吉安裕 (2010) ミカントゲコナジラミ (チャ系統) の分布拡大と防除対策. 茶業技術., 53, 4-10.
- 23) Yoshida, K. and Y. Takeda (2006): Evaluation of anthracnose resistance among tea genetic resources by wound-inoculation assay. *JARQ.*, 40, 379-386.
- 24) Yoshida, K., A. Ogino, K. Yamada and R. Sonoda (2010): Induction of Disease Resistance in Tea (*Camellia sinensis* L.) by Plant Activators. *JARQ.*, 44, 391-398.
- 25) 吉田克志・荒木琢也・根角厚司 (2010): 野菜茶業研究所枕崎茶業研究拠点の茶園における2010年3月11日の凍霜害. 茶研報., 110, 99-103.
- 26) 吉田克志・根角厚司・田中淳一・武田善行・佐波哲次・谷口郁也・荻野暁子・松永明子・大前英・武弓利雄・和田光正・吉富均 (2012): 炭疽病・輪斑病複合抵抗性のやや早生緑茶用品種‘さえあかり’の育成. 野菜茶研研報., 11, 73-88.
- 27) 吉田克志・荻野暁子・山田憲吾・園田亮一 (2013): 茶園における冬期のマシン油乳剤散布によるチャ赤焼病の発病助長とその防除技術の開発. 九病虫研報., 59, 13-21.
- 28) 静岡県茶業試験場 (1988): 5. 各種耐病性の品種間差異. 創立80周年記念静岡県茶業試験場成績収録., 24-25. 静岡県菊川市, 静岡県茶業試験場.

Assay of Bacterial Shoot Blight Resistance among Tea Cultivars and Breeding Lines using a Field Inoculation Test

Katsuyuki Yoshida

Summary

Bacterial shoot blight (BSB) caused by *Pseudomonas syringae* pv. *theae* is one of the most serious diseases of tea (*Camellia sinensis* L.) in Japan. BSB is epidemic from late autumn to early spring, and an outbreak can significantly reduce the yield of the first crop. However, little is known about the variations in BSB resistance among tea cultivars. This study assayed BSB resistance among tea cultivars and breeding lines in a field inoculation test. Small hedge (about 1.0 m long by 1.5 m wide) of 165 cultivars and breeding lines were inoculated with a suspension of *P. syringae* pv. *theae* (1×10^8 cfu/mL, 100mL/m²) in late December. Infected leaves were counted in a 50-cm-square frame (4 replicates per tested plant) in late March of the next year. The inoculation tests were performed at least twice. The number of infected leaves per m² was calculated. Median value of the number of infected leaves in all tested plants was calculated by statistical assay at each tested years. BSB resistance of tested plants was classified by the average of the ratio to median value (ARM) of each years. It was classified into highly resistant (HR, ARM < 0.2), resistant (R, $0.2 \leq \text{ARM} < 0.4$), moderately resistant (MR, $0.4 \leq \text{ARM} < 0.6$), slightly susceptible (SS, $0.6 \leq \text{ARM} < 1.0$), susceptible (S, $1.0 \leq \text{ARM} < 2.0$), or extremely susceptible (ES, $2.0 \leq \text{ARM}$). The assay identified 17 HR or R cultivars (9 green tea and 8 black tea) and 13 HR or R breeding lines. The degree of resistance in the other 135 accessions was MR or lower. Pre-spraying the hedges with petroleum emulsifiable concentrate before inoculation enhanced the disease severity. These results indicate that the assay can screen for cultivars that are highly resistant to BSB for use in tea breeding.

茶品種 ‘そうふう’ における栽培条件および製茶方法が 茶葉中フラボノール配糖体含有量に及ぼす影響

松永 明子・物部 真奈美・野村 幸子・江間 かおり・吉田 克志・堀江 秀樹

(平成 27 年 10 月 19 日受理)

Effects of Cultivation Conditions and Tea Processing on Flavonol Glycoside Levels in Tea Leaves of Tea Cultivar ‘Sofu’

Akiko Matsunaga, Manami Monobe, Sachiko Nomura,
Kaori Ema, Katsuyuki Yoshida and Hideki Horie

I 緒 言

茶品種 ‘そうふう’ は野菜茶業研究所において ‘やぶきた’ を種子親, ‘静印雑 131’ を花粉親として交配し育成された特有の花様の香気を有する早生の緑茶および半発酵茶用品種である (近藤ら, 2003; 水上ら, 2012). 最近の研究で, Monobe ら (2015) は野菜茶業研究所が所有する茶品種のフラボノール配糖体含有量を測定し, ケルセチン配糖体が他の品種と比較し ‘そうふう’ に, 多く含まれていることを明らかにした.

フラボノールはフラボノイドの一種であり, ケルセチン, ミリセチン, ケンフェロールなどがある. 植物体には主に配糖体として存在し, 配糖体の糖以外の構造部分はアグリコンと呼ぶ. 茶にも, 様々なフラボノイドが含まれており, ケルセチンなどのフラボノールも配糖体の形で存在する (滝野ら, 1962). フラボノールは植物を紫外線から防御する物質と考えられているが, 茶の品質面において水色に関与する成分として研究が行われてきた (坂本, 1970; 津志田ら, 1986; Ujihara ら, 2009). また, Monobe ら (2015) は食品としての機能性に注目した研究を行っている.

これまでの研究により, ‘そうふう’ のフラボノール配糖体の含有量が年次, 茶期, 葉位で変動することが確認されたが (Monobe ら, 2015), 栽培条件や製茶方法が

フラボノール配糖体含有量へ及ぼす影響は明らかになっておらず, フラボノール配糖体の摂取を目的としたフラボノール配糖体高含有の茶の栽培と製茶方法を明らかにすることが必要である. そこで, ‘そうふう’ の栽培条件として摘採前の被覆や新芽の熟度の違いが, 茶葉中のフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響について検討した. また, 製茶方法について製茶時における蒸し時間について検討した. さらに, ‘そうふう’ は緑茶のみではなく半発酵茶用としても育成された品種であるため, 蒸し製緑茶以外の加工条件も検討した. すなわち香気発揚を目的とした軽度の萎凋処理, さらに釜炒り茶や紅茶への加工がフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響について試験を行った.

なお, 本研究の栽培管理, 製茶試験において野菜茶業研究所研究支援センター業務第 2 科に多大なご支援をいただきました. ここに記して感謝いたします.

II 材料および方法

1 供試材料

野菜茶業研究所金谷茶業研究拠点の圃場に定植された茶品種 ‘そうふう’ (12 年生, 2 条植) を用い, 2014 年の一番茶芽と二番茶芽を用いて試験を行った. 栽培管理は野菜茶業研究所金谷茶業拠点の慣行の方法で行い, 年間窒素施肥量は 54kg/10a とした.

2 栽培条件による茶葉中のフラボノール配糖体含有量の違いに関する試験

被覆の有無や新芽の熟度による茶葉中のフラボノール配糖体含有量の違いを検討するため、対照区、遅摘み硬葉区、被覆区、被覆遅摘み硬葉区（二番茶のみ）を圃場に各処理3反復設定した（一区1.8×5m. 二番茶の遅摘み硬葉区は1.8×2.5m.）。被覆は遮光率75%の遮光資材（パロンスクリーン#1600）による直かけ被覆を一番茶は9日間、二番茶は、被覆区は8日間、被覆遅摘み硬葉区は13日間行った。各区の新芽をそれぞれ機械摘採し、送带式蒸機（寺田製作所）で40秒間蒸熱し（二番茶の遅摘み硬葉区と被覆遅摘み硬葉区は50秒間）、2K少量製茶機械（カワサキ機工）を用いて粗揉、揉捻、中揉、乾燥の工程を経て製造した。

3 製茶条件による茶葉中のフラボノール配糖体含有量の違いに関する試験

萎凋処理、蒸し時間などの製茶工程の条件、釜炒り茶や紅茶などの茶種がフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響について一番茶と二番茶で試験した。

製茶工程の条件に関する試験は摘採後各処理に供試する原葉を量り分けた（3反復）。対照区は、送带式蒸機で40秒間蒸熱し、2K少量製茶機械を用いて粗揉、揉捻、中揉、乾燥の工程を経て製造した。萎凋処理は通風乾燥機を用い30℃で1時間行い、その後は対照区と同様に蒸熱し、製造した。蒸し時間の影響は、対照区と深蒸し区で比較し、深蒸し区は送带式蒸機で180秒間蒸熱し、対照区と同様に製造した。

茶種に関する試験も摘採後に原葉を量り分けた（3反復）。釜炒り茶の製造は少量釜炒り製茶機械（寺田製作

表-1 本論文中におけるフラボノール配糖体の略号

	物質名	略号
ミリセチン	Myricetin-3-O-galactoside	M-gal
	Myricetin-3-O-glucoside	M-glu
ケルセチン	Quercetin-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-galactoside	Q-glu-rham-gal
	Quercetin-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-glucoside	Q-glu-rham-glu
	Quercetin-3-O-rutinoside	rutin
	Quercetin-3-O-galactoside	hyperoside
	Quercetin-3-O-glucoside	isoquercitrin
ケンフェロール	Kaempferol-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-galactoside	K-glu-rham-gal
	Kaempferol-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-glucoside	K-glu-rham-glu
	Kaempferol-3-O-rutinoside	K-rut

表-2 浸出条件の違いによる茶浸出液中のフラボノール配糖体含有量

	μg/ml					
	さえみどり		やぶきた		ゆたかみどり	
	4℃ 1時間	100℃ 5分	4℃ 1時間	100℃ 5分	4℃ 1時間	100℃ 5分
Myricetin-3-O-galactoside	22.1	29.8	22.7	31.8	15.7	22.0
Myricetin-3-O-glucoside	16.5	21.0	7.9	10.9	7.7	11.4
Quercetin-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-galactoside	13.1	13.7	60.1	65.5	1.2	1.5
Quercetin-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-glucoside	348.9	353.9	111.5	124.4	97.4	103.1
Quercetin-3-O-rutinoside	22.1	25.2	9.6	12.3	7.7	10.0
Quercetin-3-O-galactoside	17.7	24.5	19.9	27.3	11.4	16.7
Quercetin-3-O-glucoside	8.3	11.8	2.9	4.1	1.5	2.9
Kaempferol-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-galactoside	16.5	14.3	122.8	125.7	7.0	8.4
Kaempferol-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-glucoside	121.4	121.9	70.2	74.1	78.9	82.7
Kaempferol-3-O-rutinoside	10.2	11.0	6.1	7.0	10.7	10.3

茶葉は一番茶

所)を用いて炒り葉,揉捻,水乾,乾燥の工程で製造した.紅茶の製造は前日より室内萎凋し,紅茶用揉捻機(伊達鉄工所)を用いて揉捻し,25°Cで一番茶は1時間から1時間30分,二番茶は30分から50分の発酵工程の後,通風乾燥機を用いて発酵止し乾燥を行って製造した.二番茶は製茶工程の条件に関する試験と茶種に関する試験を同日摘採の原葉を用いて一試験で行い,対照(緑茶),萎凋処理,紅茶製造に関してのみ製造試験を行った.

4 成分分析

フラボノール配糖体の含有量の測定は,Monobeら(2015)の方法に従い,ミリセチン配糖体は myricetin-3-O-galactoside (M-gal), myricetin-3-O-glucoside (M-glu), ケルセチン配糖体は quercetin-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-galactoside (Q-glu-rham-gal), quercetin-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-glucoside (Q-glu-rham-glu), quercetin-3-O-rutinoside (rutin), quercetin-3-O-galactoside (hyperoside), quercetin-3-O-glucoside (isoquercitrin), ケンフェロール配糖体は kaempferol-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-galactoside (K-glu-rham-gal), kaempferol-3-O-glucosyl-(1-3)-rhamnosyl-(1-6)-glucoside (K-glu-

rham-glu), kaempferol-3-O-rutinoside (K-rut) を分析した.各フラボノール配糖体の本論文中における略号を表-1に示した.フラボノール配糖体の浸出条件は温度による顕著な浸出効率の差はみられなかったので(表-2),茶粉末に40倍量の蒸留水を加え10°Cで1時間抽出後,ろ過し,液体クロマトグラフィー質量分析法(Liquid Chromatography Mass Spectrometry, LC/MS)を用いて分析した.

III 結 果

1 栽培条件による茶葉中のフラボノール配糖体含有量の違いに関する試験

a 被覆の影響

表-3に栽培条件の違いが一番茶のフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響を示した.被覆の有無によるフラボノール配糖体含有量を比較すると,一番茶は被覆を行うとM-gal, M-gluなどのミリセチン配糖体とQ-glu-rham-gal, Q-glu-rham-glu, rutin, hyperoside, isoquercitrinなどのケルセチン配糖体が大きく減少した.ミリセチン配糖体とケルセチン配糖体の被覆による減少の程度はそれぞれの配糖体により異なり,フラボノール

表-3 栽培条件の違いが一番茶のフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響

		対照	被覆	遅摘み硬葉
ミリセチン	M-gal	25.0 ^a	16.5 ^b	24.1 ^a
	M-glu	8.9 ^a	4.3 ^b	10.4 ^a
ケルセチン	Q-glu-rham-gal	52.7 ^a	28.4 ^b	56.3 ^a
	Q-glu-rham-glu	184.5 ^b	119.5 ^c	207.1 ^a
	rutin	7.7 ^a	4.0 ^b	8.3 ^a
	hyperoside	8.1 ^a	4.8 ^b	7.3 ^a
	isoquercitrin	1.3 ^a	0.2 ^b	1.5 ^a
ケンフェロール	K-glu-rham-gal	70.2 ^a	66.5 ^a	52.4 ^a
	K-glu-rham-glu	95.8 ^a	85.0 ^a	73.7 ^a
	K-rut	7.1 ^a	6.0 ^a	6.1 ^a
総ミリセチンアグリコン		17.0	10.4	17.2
総ケルセチンアグリコン		102.6	63.0	112.6
総ケンフェロールアグリコン		66.6	60.5	50.9
総フラボノールアグリコン		186.1	133.9	180.8
総フラボノール配糖体		461.4	335.3	447.1

対照と被覆の摘採は2014年4月26日,遅摘み硬葉は5月1日.被覆は4月17日から摘採まで行った.数値は浸出液中の含量(μg/ml).

総アグリコンは配糖体含有量から算出.

各行において異なるアルファベットはTukeyの多重検定の結果,5%水準で有意差あり.

表-4 栽培条件の違いが二番茶のフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響

		対照	被覆	遅摘み 硬葉	被覆 遅摘み硬葉
ミリセチン	M-gal	45.2 ^a	24.3 ^b	40.0 ^a	20.3 ^b
	M-glu	31.6 ^a	13.2 ^b	30.9 ^a	10.3 ^c
ケルセチン	Q-glu-rham-gal	86.4 ^a	54.6 ^c	68.9 ^b	40.8 ^d
	Q-glu-rham-glu	342.7 ^a	216.6 ^b	319.6 ^a	195.4 ^b
	rutin	14.6 ^a	5.6 ^b	13.4 ^a	4.0 ^b
	hyperoside	8.1 ^a	3.4 ^c	5.7 ^b	2.3 ^d
	isoquercitrin	3.9 ^a	1.0 ^c	2.6 ^b	0.2 ^c
ケンフェロール	K-glu-rham-gal	45.2 ^a	48.0 ^a	29.9 ^c	36.4 ^b
	K-glu-rham-glu	66.2 ^a	66.6 ^a	47.7 ^b	52.3 ^b
	K-rut	6.5 ^a	5.0 ^b	5.8 ^{ab}	4.0 ^c
総ミリセチンアグリコン		38.4	18.7	35.5	15.3
総ケルセチンアグリコン		182.6	111.5	163.7	95.8
総ケンフェロールアグリコン		45.5	46.0	32.3	35.7
総フラボノールアグリコン		266.5	176.3	231.5	146.8
総フラボノール配糖体		650.3	438.4	564.5	366.1

対照と被覆の摘採は2014年6月18日、遅摘み硬葉と被覆遅摘み硬葉は6月23日、被覆は6月10日から摘採まで行った。数値は浸出液中の含量 (µg/ml)。

総アグリコンは配糖体含有量から算出。

各茶期の各行において異なるアルファベットはTukeyの多重検定の結果、5%水準で有意差あり。

表-5 製茶工程の条件の違いがフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響 (一番茶)

		対照	萎凋	深蒸し
ミリセチン	M-gal	24.2 ^a	24.4 ^a	24.5 ^a
	M-glu	8.1 ^a	7.9 ^a	7.7 ^a
ケルセチン	Q-glu-rham-gal	52.7 ^a	54.3 ^a	51.4 ^a
	Q-glu-rham-glu	178.0 ^a	183.0 ^a	174.8 ^a
	rutin	7.8 ^a	8.1 ^a	7.9 ^a
	hyperoside	8.9 ^a	8.4 ^a	8.5 ^a
	isoquercitrin	1.4 ^a	1.3 ^a	1.2 ^a
ケンフェロール	K-glu-rham-gal	76.8 ^a	83.6 ^a	77.2 ^a
	K-glu-rham-glu	94.3 ^a	101.9 ^a	95.8 ^a
	K-rut	8.7 ^a	9.0 ^a	8.7 ^a
総ミリセチンアグリコン		16.2	16.2	16.1
総ケルセチンアグリコン		100.6	103.0	98.6
総ケンフェロールアグリコン		69.3	74.9	70.0
総フラボノールアグリコン		186.1	194.0	184.7
総フラボノール配糖体		460.9	481.8	457.8

摘採は2014年4月24日。

数値は浸出液中の含量 (µg/ml)。

総アグリコンは配糖体含有量から算出。

各行において異なるアルファベットはTukeyの多重検定の結果、5%水準で有意差あり。

表－6 製茶工程の条件と茶種の違いがフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響（二番茶）

		対照 (緑茶)	萎凋 (緑茶)	紅茶
ミリセチン	M-gal	42.5 ^a	47.1 ^a	20.2 ^b
	M-glu	29.9 ^a	36.5 ^a	12.3 ^b
ケルセチン	Q-glu-rham-gal	83.6 ^a	95.8 ^a	77.6 ^a
	Q-glu-rham-glu	354.7 ^a	402.4 ^a	321.1 ^a
	rutin	14.4 ^{ab}	16.7 ^a	12.4 ^b
	hyperoside	8.0 ^a	9.2 ^a	6.0 ^b
	isoquercitrin	3.7 ^{ab}	4.6 ^a	2.9 ^b
ケンフェロール	K-glu-rham-gal	43.1 ^a	48.1 ^a	39.5 ^a
	K-glu-rham-glu	65.1 ^a	75.0 ^a	58.6 ^a
	K-rut	6.3 ^{ab}	7.0 ^a	6.0 ^b
総ミリセチンアグリコン		36.2	41.8	16.2
総ケルセチンアグリコン		185.9	211.7	167.5
総ケンフェロールアグリコン		44.2	50.2	40.2
総フラボノールアグリコン		266.3	303.7	224.0
総フラボノール配糖体		651.3	742.3	556.4

摘採は2014年6月19日。

数値は浸出液中の含量 (μg/ml)。

総アグリコンは配糖体含有量から算出。

各行において異なるアルファベットはTukeyの多重検定の結果、5%水準で有意差あり。

配糖体のうち‘そうふう’に多く含まれる Q-glu-rham-glu は 35% 程度減少した。K-glu-rham-gal, K-glu-rham-glu, K-rut などケンフェロール配糖体の含有量に有意な被覆の影響はなかった。

二番茶は、対照区と同日に摘採した被覆区では、ミリセチン配糖体とケルセチン配糖体の含有量が対照区と比較して低かった (表－4)。ケンフェロール配糖体の含有量は K-rut の被覆区が対照区よりわずかに低かったが、対照区と被覆区で大きな違いはなかった。被覆遅摘み硬葉区では、ほとんどのフラボノール配糖体含有量は対照区や硬葉区より低かったが、ケンフェロール配糖体のうち、K-glu-rham-gal は対照区より低く、硬葉区より有意に高い含有量となった。一番茶と同様にミリセチン配糖体とケルセチン配糖体の被覆による減少の程度はそれぞれの配糖体により異なったが、rutin や isoquercitrin はいずれの被覆処理においても減少程度が大きい傾向があった。

b 熟度による差異

一番茶は遅摘みで硬葉になると、Q-glu-rham-glu はやや増加した。他のフラボノール配糖体の遅摘み硬葉区の

含有量は対照区と比較し有意な差はなかった (表－3)。

二番茶の遅摘み硬葉区は Q-glu-rham-gal, hyperoside, isoquercitrin, K-glu-rham-gal, K-glu-rham-glu 含有量が対照区と比較し減少した (表－4)。このため総フラボノールアグリコンの減少に対し総ケンフェロールアグリコンの減少程度が大きかった。

2 製茶条件による茶葉中のフラボノール配糖体含有量の違いに関する試験

a 萎凋の影響

表－5 に一番茶の製茶工程の条件がフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響を示した。一番茶は蒸熱前に 30℃ で 1 時間の萎凋処理を行っても、いずれのフラボノール含有量も無処理と比較し有意に変化しなかった。二番茶も萎凋処理によるフラボノール配糖体含有量の有意な増減は認められなかった (表－6)。

b 蒸し時間の影響

一番茶の原葉を用いて蒸し時間がフラボノール含有量に及ぼす影響を試験した。その結果、蒸し時間を 180 秒

表-7 茶種の違いがフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響 (一番茶)

		対照 (緑茶)	釜炒り茶	紅茶
ミリセチン	M-gal	23.3 ^a	23.3 ^a	6.7 ^b
	M-glu	9.4 ^a	9.6 ^a	0.6 ^b
ケルセチン	Q-glu-rham-gal	52.1 ^a	52.2 ^a	37.5 ^b
	Q-glu-rham-glu	205.4 ^a	201.8 ^a	155.9 ^b
	rutin	7.4 ^a	6.8 ^a	4.7 ^b
	hyperoside	6.3 ^a	6.2 ^a	3.8 ^b
	isoquercitrin	1.1 ^a	1.2 ^a	0.2 ^b
ケンフェロール	K-glu-rham-gal	54.3 ^a	54.9 ^a	44.7 ^a
	K-glu-rham-glu	77.3 ^a	81.9 ^a	63.5 ^b
	K-rut	5.9 ^a	6.0 ^a	4.7 ^a
総ミリセチンアグリコン		16.4	16.4	3.7
総ケルセチンアグリコン		109.0	107.3	80.4
総ケンフェロールアグリコン		52.9	54.9	43.4
総フラボノールアグリコン		178.3	178.7	127.5
総フラボノール配糖体		442.5	443.9	322.4

摘採は2014年5月3日.

数値は浸出液中の含量 ($\mu\text{g/ml}$).

総アグリコンは配糖体含有量から算出.

各行において異なるアルファベットはTukeyの多重検定の結果, 5%水準で有意差あり.

とした深蒸しの場合もフラボノール含有量への影響は40秒の蒸し時間と比較し有意に認められなかった(表-5).

c 茶種による差異

同一の一番茶原葉を用いて緑茶と釜炒り茶を製造し, フラボノール配糖体含有量を比較した(表-7). その結果, 緑茶と釜炒り茶のフラボノール含有量に有意な差は認められなかった.

さらに, 同一の原葉で製造した緑茶と紅茶のフラボノール配糖体含有量を比較すると, 一番茶は, 紅茶は対照の緑茶より含有量が低くなる傾向が認められ, 特にミリセチン配糖体の減少が顕著であった. 二番茶期も同様に紅茶に製造するとフラボノール配糖体は減少傾向にあり, 特にミリセチン配糖体含有量が大きく減少した(表-6).

IV 考 察

本試験では, ‘そうふう’の茶葉中のフラボノール配糖体含有量に摘採前の被覆や新芽の熟度の違いなどの栽培

条件や製茶時における蒸し時間, 蒸熱前の萎凋処理, 釜炒り茶や紅茶への加工などの製茶条件が及ぼす影響を試験した.

栽培条件の試験において, 摘採前の被覆処理により両茶期ともミリセチン配糖体とケルセチン配糖体の含有量は大きく減少し, ケンフェロール配糖体の被覆による含有量への影響は小さかった. また, 一番茶と二番茶のフラボノール含有量を比較すると, 一番茶の対照区の総フラボノールアグリコン含有量は186.1 $\mu\text{g/ml}$ で(表-3), 二番茶は266.5 $\mu\text{g/ml}$ であり(表-4), 二番茶の方がフラボノール含有量は高かった. 総ケンフェロールアグリコンは一番茶のほうが高かった. これは, Monobeら(2015)の試験結果と同様の結果であった. フラボノールは紫外線から植物体を防御すると考えられているので, ミリセチン配糖体とケルセチン配糖体の生合成は, 一番茶より日射量の多い二番茶で含有量が高く, 被覆により茶樹が受ける光が制限されることで含有量が減少したと考えられた. 中林(1953)も被覆により茶葉中のフラボノールの生成が抑制されることを報告している. ケンフェ

ロール配糖体は被覆の影響を受けなかったため、ケンフェロールの生合成は光の影響を受けにくい可能性が推察された。‘そうふう’のフラボノール配糖体の含有量はケルセチン配糖体が最も多いため、フラボノールの摂取を目的とした茶を生産する場合は、被覆栽培は行わない方が良いと考えられた。

硬葉になると、一番茶はQ-glu-rham-glu含有量はやや増加し、二番茶はQ-glu-rham-gal, hyperoside, isoquercitrin, K-glu-rham-gal, K-glu-rham-glu含有量が減少し、総ケンフェロールアグリコンが大きく減少した。Monobeら(2015)の報告では、一番茶新芽の葉位別のフラボノール配糖体の含有量は、ミリセチン配糖体とケルセチン配糖体はある程度硬化した葉に多く含まれ茎や未熟な芽には少なく、ケンフェロール配糖体は上位の未熟な芽や葉に多く含まれる傾向であった。これらのことから、ケンフェロール配糖体は硬葉では減少するが、他の配糖体の含有量は、葉と茎の割合も含有量に影響することから、熟度による新芽中の含有量の増減は様でないと考えられた。

製茶条件について検討した結果、30°Cで1時間程度の萎凋処理や蒸し時間のフラボノール配糖体への影響は認められなかった。茶種について検討した結果、釜炒り茶に製造した場合は緑茶製造とフラボノール配糖体含有量に差はなかったが、紅茶として製造した場合は減少した。特にミリセチン配糖体は他のフラボノール配糖体と比べて減少程度が大きかった。Robertsら(1951)も茶葉の酸化酵素によりミリセチンが酸化されることを報告している。フラボノール配糖体を摂取源として利用したい場合は、紅茶製造は避け、緑茶として加工するほうが適すると考えられる。

近年、茶は嗜好品としてだけでなく機能性を求めて飲用される機会も多くなっている。‘そうふう’は花様の香気が特徴の品種としてこれまで導入されてきたが、今後はフラボノールの摂取源としても利用が考えられる。今回の試験において、食品機能性成分のケルセチンの‘そうふう’における含有量は、ケルセチンアグリコンに換算すると、含有量の低い一番茶の被覆区の含有量は63.0 μ g/mlであり(表-3)、含有量の高い二番茶の対照区で

は182 μ g/mlであった(表-4)。栽培条件や茶期によりケルセチン含有量が2倍以上変化するため、ケルセチンの高含有を目的とする生産においては、露地栽培が適しており、茶期は二番茶が良く、加工面においては、緑茶が適し、紅茶は含有量が減少するので避けたほうが良いと考えられた。

V 摘 要

茶品種‘そうふう’の摘採前の被覆、新芽の熟度、製茶時における萎凋や蒸し時間、釜炒り茶と紅茶の加工がフラボノール配糖体含有量に及ぼす影響について試験した。その結果、摘採前の被覆はフラボノール配糖体含有量を減少させ、特にミリセチン配糖体とケルセチン配糖体が大きく減少した。製茶時における萎凋処理と蒸し時間はフラボノール配糖体含有量に影響を及ぼさなかった。釜炒り茶として製造すると、フラボノール配糖体含有量は変化せず、紅茶として製造すると、フラボノール配糖体は減少し、特にミリセチン配糖体の減少が顕著であった。

引用文献

- 1) 近藤貞昭・池田奈実子・根角 厚司・田中惇一・武田善行・武弓利雄・山口聰(2003): 緑茶及び半発酵茶用新品種‘そうふう’の育成, 野菜茶研報, 2, 71-82.
- 2) 水上裕造・松永明子(2012): 品種‘そうふう’と‘やぶきた’の煎茶に含まれる香氣奇成分, 茶業研究報告, 114, 21-28.
- 3) Monebe, M., S. Nomura, K. Ema, A. Matsunaga, A. Nesumi, K. Yoshida, M. Maeda-Yamamoto and H. Horie (2015): Quercetin Glycosides-Rich Tea Cultivars (Camellia sinensis L.) in Japan. *Food Sci. Technol. Res.*, 21(3), 333-340.
- 4) 中林敏郎(1953): 茶葉中のカテキン及び色素の研究(其の4) ルチンの分離及び定量. 農化., 27, 274-276.
- 5) Roberts, E.A.H., and D. J. Wood (1951): Oxidation of Anthoxanthins by tea-oxidase. *Nature*, 167, 608.
- 6) 坂本裕(1970): 緑茶の水色に関与する成分C-グリコシルフラボンの分離と化学構造. 茶業試験場研究報告, 6, 1-63.
- 7) 滝野慶則・今川弘・吉田宏之(1962): 茶葉のFlavonoidに関する研究(第5報) Kaempferol配糖体及びkaempferin及びquercetin配糖体quertrinについて. 農化., 36(11), 943-946.
- 8) 津志田藤二郎・大田敏・松浦俊明・村井敏信(1986): 茶のフラボノールの分離と同定. 茶業技術研究, 69, 51-57.
- 9) Ujihara, T. and N. Hayashi (2009): Hypochromic Effect of an Aqueous Monoglucosyl Rutin Solution Caused by Green Tea Catechins. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 73(12), 273-277.

Effects of Cultivation Conditions and Tea Processing on Flavonol Glycoside Levels in Tea Leaves of Tea Cultivar ‘Sofu’

Akiko Matsunaga, Manami Monobe, Sachiko Nomura, Kaori Ema,
Katsuyuki Yoshida and Hideki Horie

Summary

We evaluated the effect of preharvest shading, the degree of new shoot maturity, withering and degree of steaming during green tea processing, and tea types (pan-fired tea and black tea) on flavonol glycoside levels in tea leaves of tea cultivar ‘Sofu’. Preharvest shading largely decreased the content of myricetin glycoside and quercetin glycoside. With shoots maturing, kaempferol content decreased. Withering and degree of steaming did not effect on the flavonol glycoside levels. Pan-fired tea processing did not change the content of the flavonol glycoside, and black tea processing decreased the flavonol glycoside levels, especially myricetin glycoside decreased significantly.

トマト育苗のための LED 光照射条件の検討

渡邊 恭成*・安田 剛規*・米田 正*・中野 明正

(平成 27 年 10 月 23 日受理)

Examination of Irradiation Conditions Using LED Light for the Growth of Tomato Seedlings

Yasumasa Watanabe, Takaki Yasuda, Tadashi Yoneda and Akimasa Nakano

I 緒 言

日本の農家における育苗はハウス（温室）内で行われることが多い。しかし、ハウスといえども内部環境は天候に左右されることや、内部環境が不均一なために苗の成長が揃わない、害虫が一年中発生しやすいなどの問題点も指摘されてきた（古在ら, 2005）。これらの問題点だけでなく、近年、農業従事者の高齢化が進む中、手間のかかるハウス内での育苗は敬遠される傾向にあり、苗購入へのシフトが進み始めた。このようなニーズに対応し、育苗の計画生産設備として閉鎖型人工光育苗装置（例えば、苗テラス、三菱樹脂アグリドリーム）が開発され、育苗会社などでの実用化検討が始まっている。苗供給大手であるベルグアース（株）でも閉鎖型苗生産システム（人工光型植物工場）を導入しており、2014 年度は 3,630 万本の苗を生産している（瓦, 2015）。トマトでは既に約 5 割が購入苗であるとの調査結果もあり（土屋, 2015）、今後さらに扱いやすい、定植後の活着が良いなどの、高品質苗に対するニーズが高まるものと思われる。

一方、現状の人工光型植物工場による育苗では照明に蛍光灯を使用しているため、電気代が高い、蛍光灯の定期的な交換が必要と、コスト面に問題がある。

上記の問題を解決する可能性のある代替照明として LED が注目されている。LED は蛍光灯に比べ消費電力が低く、交換頻度が少ないことが知られている。近年、人

工光型植物工場ではリーフレタスのような葉菜類の栽培に白色 LED 照明や、赤色光や青色光のみの単色 LED 照明が使われ始めた。白色 LED 照明は室内照明用途であり、波長や光強度を植物栽培用に最適化することは通常困難であるが、単色 LED 照明の組み合わせでは、波長ごとに光強度の最適化が可能であるという利点がある。

そこで我々は、蛍光灯に比べ消費電力が低く、かつ照明方法に自由度の高い LED に注目し、各種波長の単色 LED 照明を用い、LED 光の組み合わせ、光量および照射パターンを変えてトマト育苗を行い、蛍光灯を用いた場合との比較から育苗に適した LED 光照射条件の検討を行った。合わせて、苗乾燥重当たりの照明の消費電力量を算出し、各種 LED 光照射条件における生産効率を評価した。

本研究は筆頭著者の渡邊が 2015 年 5 月まで野菜茶業研究所に依頼研究員として在籍した期間に行った研究であり、ご支援を頂いた野菜生産技術研究領域・施設野菜生産プロジェクトの皆さまに深く感謝いたします。

II 材料および方法

a 育苗方法

育苗は、苗テラス（人工光育苗装置 4 段×6 棚、三菱樹脂アグリドリーム）を用いて行った。実験には‘桃太郎ヨーク’（タキイ種苗）および‘りんか 409’（サカタのタネ）の 2 品種のトマトを使用した。育苗は 72 穴のセルトレイ（セルトレイ AP、東罐興業製）を用い、各セルに培養土（TM-

1, タキイ種苗製)を充填し, 品種ごとに1セル当たり1粒を播種した. 播種後, 催芽器に3日間入れ, 播種後3日目に苗テラスに移動し, 光照射しながら24日目まで育苗を行った. 培養液は, 1L当たりハイテンポ Cu (住友化学製) 2.93mLとハイテンポ Ar (住友化学製) 0.98mLを溶解したものをうい, EC 1.6dS/m, pH5.9 (N・P・K = 5.9・1.1・2.4)とした. 灌水は1日1回10分間(8時から8時10分まで), セルトレイ底面から30mm程度の高さまで培養液が満たされた状態とした. 栽培温度は暗期18°C, 明期25°Cとした. 苗テラス内のCO₂濃度は1000ppmとした.

b 光照射方法

本実験では, 異なる波長のLEDの組み合わせ, 光量, 照射パターンを変えて, 合計4回実験を行った. 各回の実験に使用した照明は次の通りである. 蛍光灯は3波長系昼白色Hf蛍光灯(FHF32EX-N-H, パナソニック製)を用いた. 使用する本数は栽培棚一段当たり6本とした. 各色のLEDは直管型LED照明を使用し, 赤色光と青色光の照明(RRB, 品番: UL0005#01-0R, LEDチップ: 赤160個+青80個, ピーク波長: 赤660nm, 青450nm, 最大消費電力: 赤20W, 青11W, 昭和電工製)および緑色光と遠赤色光の照明(FrFrG, 品番: UL0013#01-0R, LEDチップ: 遠赤色160個+緑80個, ピーク波長: 遠赤色740nm, 緑525nm, 最大消費電力: 遠赤色18W, 緑13W, 昭和電工製)を用いた. LED照明は苗テラスの栽培棚に設置してある蛍光灯を外して, 棚底面からの高さが蛍光灯と同じになるように設置した. 照明の本数は光強度に応じて適宜変更した. これらのLED照明の光強度の調整および照射時間の設定は, タイマー付き調光器によって各色独立して行った. 以下略号として, 赤色光; R, 緑色光; G, 青色光; B, 遠赤色光; Frと表記する.

照射時間は0時から8時までの8時間を暗期とし, 8時から24時までの16時間を明期とした.

各実験の試験区には蛍光灯照射区(蛍光灯区)を対照区として1試験区設定し, 光量は光合成有効光量子束密度(PPFD) 503 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, Fr 2.64W $\cdot\text{m}^{-2}$, 日積算光合成有効光量子量(Daily light integral; DLI) 29.0 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ とした.

LED照射区(LED区)は各実験で照射条件が異なる3ないし4試験区を設定した. 各実験のLED区の光照射条件は以下の通りである. ここでいう同時照射とは二色以上のLED光を混合して同時に照射する照射方法のことである. また, 交互照射とは, 単色光または二色以

上の混合光を一定時間照射した後, 別の単色光または二色以上の混合光を一定時間照射し, それを繰り返す照射方法のことである. その場合, 途中で暗期を挟むことも含む. 各実験の試験区の光照射条件を表-1にまとめた.

実験1. 赤色光照射区(R区) PPFD 115 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, DLI 6.6 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 青色光照射区(B区) PPFD 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, DLI 5.2 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 緑色光照射区(G区) PPFD 190 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, DLI 10.9 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の3試験区とした.

実験2. 赤青遠赤色光同時照射区(RBFr区) PPFD R 115, B90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, Fr 17.8 W $\cdot\text{m}^{-2}$ の混合光, DLI 11.8 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤青/遠赤色光交互照射区(A_(RB)Fr区) PPFD R230, B180 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光を8時間, Fr 17.8 W $\cdot\text{m}^{-2}$ を8時間, DLI 11.8 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤青光同時照射区(RB区) PPFD R 115, B90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光, DLI 11.8 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤青光交互照射区(A_RB区) PPFD R230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, B180 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 11.8 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の4試験区とした.

実験3. 赤緑青遠赤色光同時照射区(RGBFr区) PPFD R 168, G33, B168 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, Fr 30 W $\cdot\text{m}^{-2}$ の混合光, DLI 21.3 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤緑遠赤色/青色光交互照射区(A_(RGFr)B区) PPFD R230, G33 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, Fr 30 W $\cdot\text{m}^{-2}$ の混合光を8時間, B175 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 12.6 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤青光同時照射区(RB区) PPFD R 200, B200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光, DLI 23.0 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤青光交互照射区(A_RB区) PPFD R230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, B200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 12.4 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の4試験区とした.

実験4. 赤緑青色光同時照射区(RGB区) PPFD R 200, G62, B200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光, DLI 26.6 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤緑色/青色光交互照射区(A_(RG)B区) PPFD R200, G62 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光を8時間, B200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 13.3 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤青光同時照射区(RB区) PPFD R 300, B300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光, DLI 34.6 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 赤青光交互照射区(A_RB区) PPFD R300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, B300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 17.3 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の4試験区とした.

LED区のうち, 交互照射区と記載のあるものは, 明期のうち最初の8時間に前者, 残りの8時間に後者の光照射を行った. その他の試験区は明期の16時間光照射を行った.

光強度の測定は, 光量子センサ(LI-190SA, LI-COR製)を用いてPPFDの測定を行った. 照明は棚底面から26.5cmに設置し, PPFD測定は, 栽培棚の中央, 棚底面より13cm

表-1 光照射条件

照射条件 ^{a, b}	PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			DLI ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$)	放射照度 ^c ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) Fr (遠赤色光)		
	明期 8時間	8時間	暗期 8時間				
① R	R	—	115	6.6			
① B	B	—		5.2			
① G	G	—	190	10.9			
① 蛍光灯	蛍光灯	—	154	217	132	29.0	2.64
② RBFr	RBFr	—	115		90	11.8	17.8
② ^d A_(RB)Fr	RB → Fr	—	230		180	11.8	17.8
② RB	RB	—	115		90	11.8	
② ^d A_RB	R → B	—	230		180	11.8	
② 蛍光灯	蛍光灯	—	154	217	132	29.0	2.64
③ RGBFr	RGBFr	—	168	33	168	21.3	30.0
③ ^d A_(RGFr)B	RGFr → B	—	230	33	175	12.6	30.0
③ RB	RB	—	200		200	23.0	
③ ^d A_RB	R → B	—	230		200	12.4	
③ 蛍光灯	蛍光灯	—	154	217	132	29.0	2.64
④ RGB	RGB	—	200	62	200	26.6	
④ ^d A_(RGB)	RG → B	—	200	62	200	13.3	
④ RB	RB	—	300		300	34.6	
④ ^d A_RB	R → B	—	300		300	17.3	
④ 蛍光灯	蛍光灯	—	154	217	132	29.0	2.64

a: LED照明はR, G, B, Frで表わす。それぞれのピーク波長はR(660nm), G(525nm), B(450nm), Fr(740nm)。

b: 蛍光灯はR:601-700nm, G:501-600nm, B:401-500nm に分けてPPFDを算出。
蛍光灯の701-780nmは Fr とした。

c: Fr は放射照度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) を表記した。この値はDLIに含まない。

d: 照明条件の冒頭に 'A' が記載されているものは、8時間毎の交互照射を表わす。

上に測定器を設置し、測定を行った。また、蛍光灯および Fr の光強度測定には、分光放射照度計 (CL-500A, コニカミノルタ製) を用いて分光放射束密度を測定した。蛍光灯の波長 401nm~700nm の測定値を、401~500nm を B, 501~600nm を G, 601~700nm を R として PPFD へ変換した。Fr は 701~780nm の測定値を放射照度とした。

c 生産効率評価方法

播種後 24 日目に各区 10 株収穫し、葉数、総葉面積、葉、茎の新鮮重および乾燥重を測定した。ただし特異的に生育が著しく不良な株は除去した。乾燥重は、それぞれを 105°C のオーブンで 3 日間乾燥した後に測定した。葉と茎の乾燥重を合計したものを地上部乾燥重とした。

苗の生産効率の評価は以下のように行った。まず蛍光灯および LED 照明の R, B の単色光を各々最大光強度で照射した時の PPFD を測定し、蛍光灯および各単色光照明の PPFD 当たりの消費電力を求めた。G の照明については R の最大光強度照射時 PPFD の値に発光効率比を乗じた値を G の最大光強度照射時 PPFD とし、同様に PPFD 当たりの消費電力を求めた。次に各試験区の PPFD と育苗日数から、育苗に係る期間の照明の消費電力量を算出した。Fr の照明については電力測定器 (ET30D, REVEX 製) を用いて測定した消費電力と育

苗日数から同様に消費電力量を算出した。さらに苗テラスの栽培棚 1 段には 72 穴のセルトレイを 4 枚置くことから、1 段の最大育苗数を 288 株とし、最大数育苗したと仮定した時の 1 株当たりの照明の消費電力量を算出した。これを実際に育苗した各株の乾燥重実測値で除することにより、苗ごとの乾燥重当たりの照明の消費電力量を算出した。なお、蛍光灯の消費電力は、苗テラス仕様書の制御回路図に記載の値 (288W) とした。これにより、照明の種類や光強度によらず、苗乾燥重当たりの照明の消費電力量、すなわち光合成による苗の生産効率を比較した。

得られた測定値および算出値の統計処理にはエクセル統計 2015 ((株) 社会情報サービス) を使用し、Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。

III 結果

実験 1. LED 単色光による育苗

赤、青、緑の各単色光での育苗を試みた。播種後 24 日での地上部新鮮重、地上部乾燥重、葉数、総葉面積を図-1 に示す。また、苗の草姿の写真を図-2 に示す。'桃太郎ヨーク' および 'りんか 409' のいずれの場合も、地上部新鮮重および乾燥重は蛍光灯区が最大となった。'桃太郎

ヨーク’では赤色光区(R区)および緑色光区(G区)では新鮮重で蛍光灯区の1/2程度生育したが、青色光区(B区)では1/8程度しか生育しなかった。‘りんか409’ではいずれのLED区でも蛍光灯区の1/5~1/6程度しか生育しなかった。葉数は‘桃太郎ヨーク’では蛍光灯区と各LED区で顕著な差は見られなかったが、‘りんか409’ではLED区で蛍光灯区の1/2程度となった。総葉面積は地上部乾燥重と同様の結果となった。赤色光区および緑色光区では草姿が徒長していることが観察された。次に、地上部乾燥重

をDLIで除したDLI当たりの地上部乾燥重で比較した。図-3に示す。その結果、‘桃太郎ヨーク’では青色光区以外は大きな差がなく、特に赤色光区においては光量当たりの生育は蛍光灯区と同等であることが分かった。一方、‘りんか409’の場合はいずれのLED区に対しても蛍光灯区が大となり、‘りんか409’は‘桃太郎ヨーク’と比較してLED単色光での生育が悪く、品種による違いが認められた。

以上の結果から、LED光を用いる場合、単色光ではな

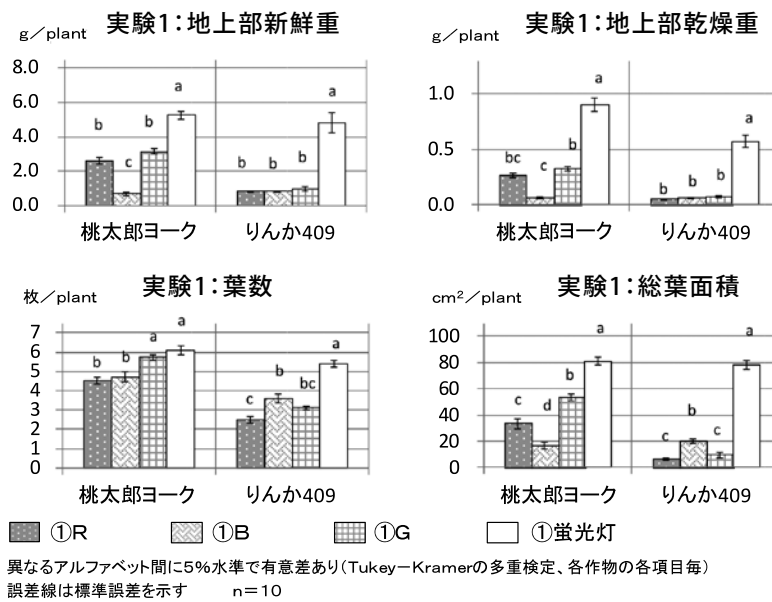


図-1 地上部新鮮重, 乾燥重, 葉数, 総葉面積 (実験1, 播種後24日目)

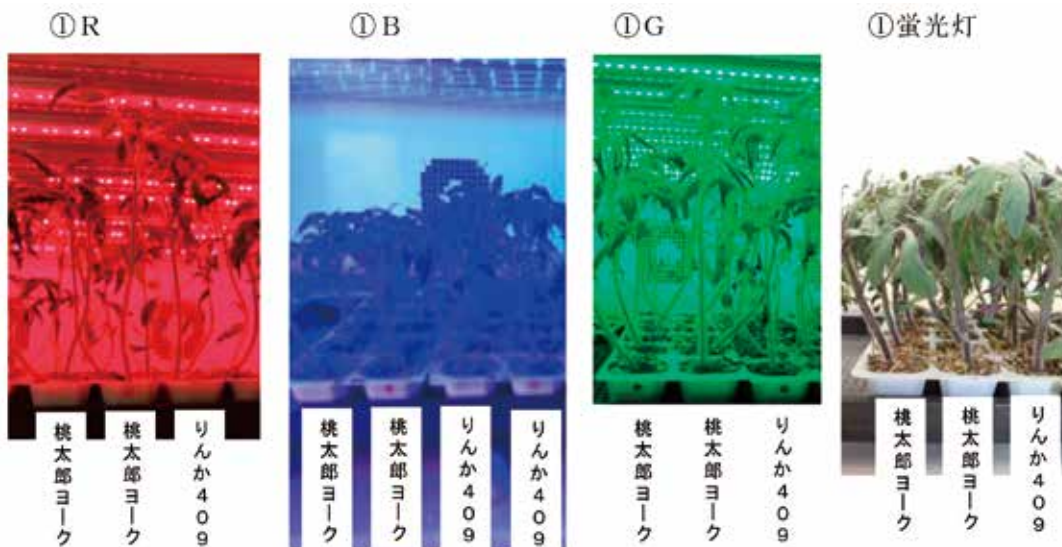


図-2 苗の草姿 (実験1, 播種後24日目)

く、複数の波長の異なる光をより高いDLIで照射することが必要であると考え、以下の実験2~4を行った。

実験2. 赤、青、遠赤色の組み合わせ、および同時照射と交互照射

赤青遠赤色の三色混合同時照射 (RBFr区)、赤青二色混合光と遠赤色光の交互照射 (A_(RB)Fr区)、赤青二色の混合同時照射 (RB区)、赤と青の単色交互照射 (A_RB区) の4条件で育苗を試みた。結果を図-4に示す。‘桃太郎ヨーク’ および ‘りんか409’ のいずれの場合も、地上部新鮮重および乾燥重では蛍光灯区が最も大きく成長した。葉数および総葉面積では、‘桃太郎ヨーク’ では蛍光灯区と各LED区で顕著な違いは認められなかった。‘りんか409’ では葉数は蛍光灯区が最も多く、RB区が最も少な

かった。総葉面積ではRBFr区とRB区が顕著に小さかった。実験1と同様にDLI当たりの地上部乾燥重で比較した。図-5に示す。その結果、‘桃太郎ヨーク’ ではRB区以外は同等の値となっており、Fr照射および赤青交互照射の効果が認められた。一方、‘りんか409’ の場合はRBとFrの交互照射および赤青交互照射の効果が認められ、ここでも品種による違いが認められた。草姿の観察結果の写真を図-6に示す。A_(RB)Fr区では徒長が認められた。

実験3. 緑色光の追加および光量の増加

赤緑青遠赤色の四色混合同時照射 (RGBFr区)、赤緑遠赤三色混合光と青色光の交互照射 (A_(RGFr)B区)、赤青二色の混合同時照射 (RB区)、赤と青の単色交互照射 (A_RB区) の4条件で育苗を試みた。各区とも実験2より光量を増加した。結果を図-7に示す。‘桃太郎ヨーク’ および ‘りんか409’ のいずれの場合も、地上部新鮮重および乾燥重では蛍光灯区とRGBFr区が同等となった。実験2よりもDLIを増加したRB区とA_RB区は、実験2より重量が増加した。A_(RGFr)B区はDLIが同等であるA_RB区と同等の生育を示した。RB区はDLIを約2倍に増加した結果、地上部新鮮重が1.6~2.4倍と顕著に増加した。葉数は‘桃太郎ヨーク’ および ‘りんか409’ のいずれの場合も、各区同様となった。総葉面積は‘りんか409’ のRB区のみ顕著に小さかった。DLI当たりの地上部乾燥重で比較した。図-8に示す。

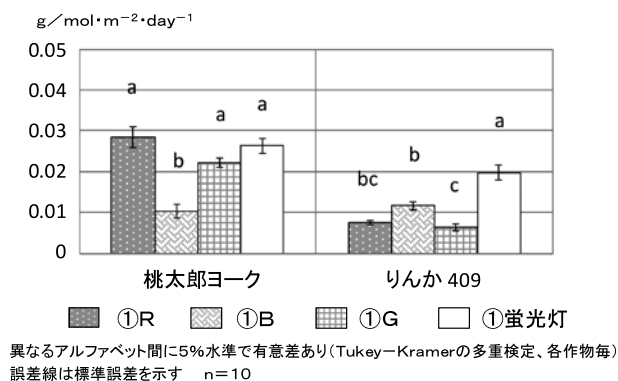


図-3 DLI当たりの地上部乾燥重(実験1, 播種後24日目)

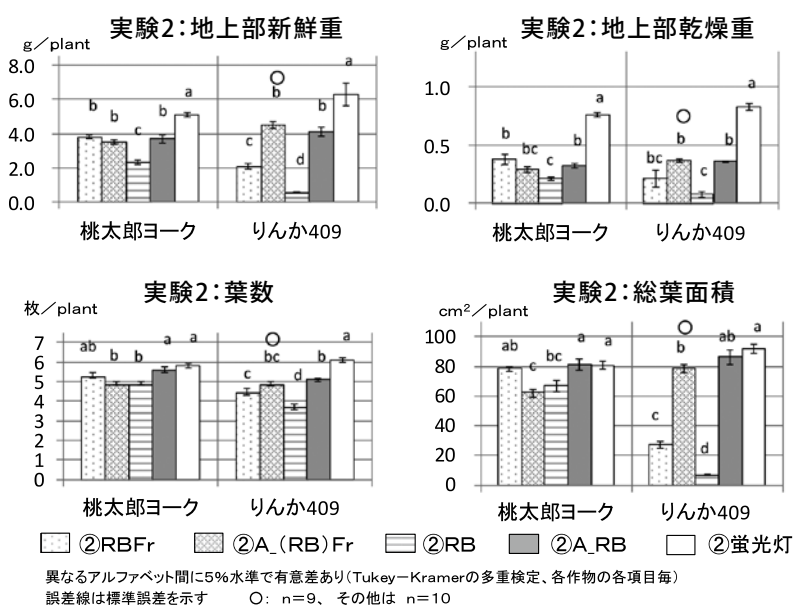


図-4 地上部新鮮重, 乾燥重, 葉数, 総葉面積(実験2, 播種後24日目)

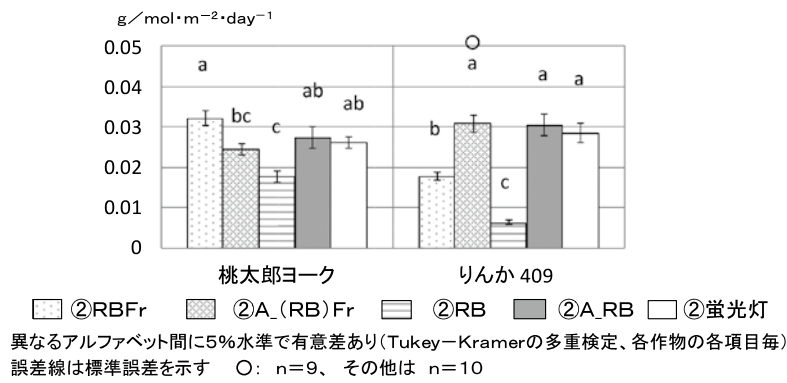


図-5 DLI 当たりの地上部乾燥重 (実験2, 播種後24日目)

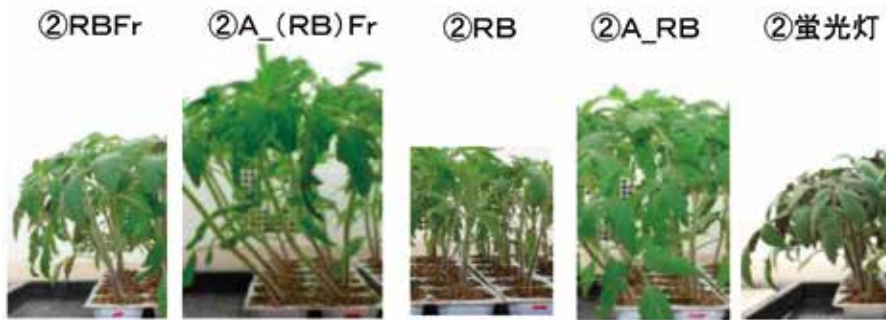


図-6 苗の草姿 (実験2 '桃太郎ヨーク', 播種後24日目)

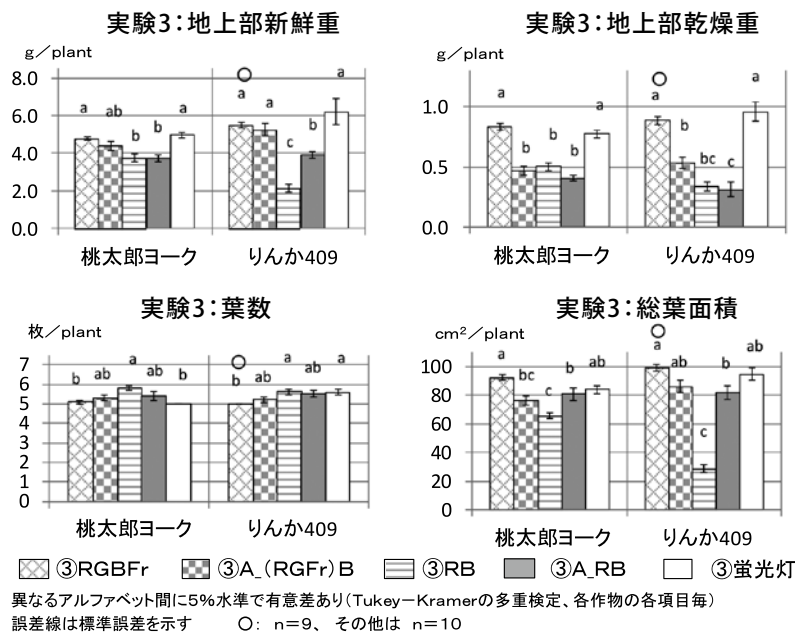


図-7 地上部新鮮重, 乾燥重, 葉数, 総葉面積 (実験3, 播種後24日目)

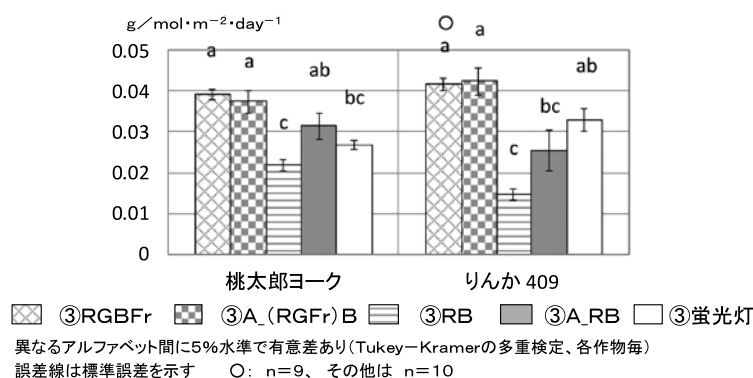


図-8 DLI当たりの地上部乾燥重(実験3, 播種後24日目)

その結果, ‘桃太郎ヨーク’ではRGBFr区およびA_(RGFr)B区が蛍光灯区を上回った。‘りんか409’でも同様の傾向が認められた。‘桃太郎ヨーク’, ‘りんか409’いずれもRB区は最も値が低く, RB区に対し, A_RB区はDLI当たりの地上部乾燥重で高い値を示すことから, 交互照射の効果が認められた。

実験4. 遠赤色光を除いた緑色光の効果および光量の増加

赤緑青色の三色混合同時照射(RGB区), 赤緑二色混合光と青色光の交互照射(A_(RG)B区), 赤青二色の混合同時照射(RB区), 赤と青の単色交互照射(A_RB区)

の4条件で育苗を試みた。各区とも実験3より光量を増加した。結果を図-9に示す。‘桃太郎ヨーク’および‘りんか409’のいずれの場合も, 地上部新鮮重および乾燥重では蛍光灯区が大となった。RGB区とA_(RG)B区とは実験3のFrがある場合と比べて顕著に小さくなった。RB区とA_RB区とは実験3よりも大となり, 光量増加の効果が認められた。

葉数は‘桃太郎ヨーク’および‘りんか409’のいずれの場合も, 蛍光灯区が大となったが, 顕著な差はなかった。総葉面積は地上部新鮮重と同様の傾向を示した。DLI当たりの地上部乾燥重の比較(図-10)において, ‘桃太郎ヨーク’ではA_RB区が蛍光灯区を上回った。

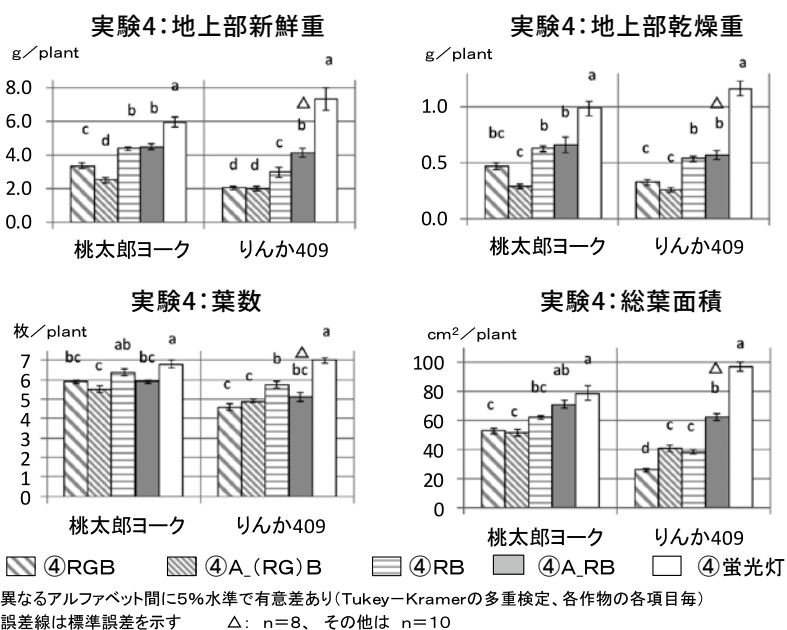


図-9 地上部新鮮重, 乾燥重, 葉数, 総葉面積(実験4, 播種後24日目)

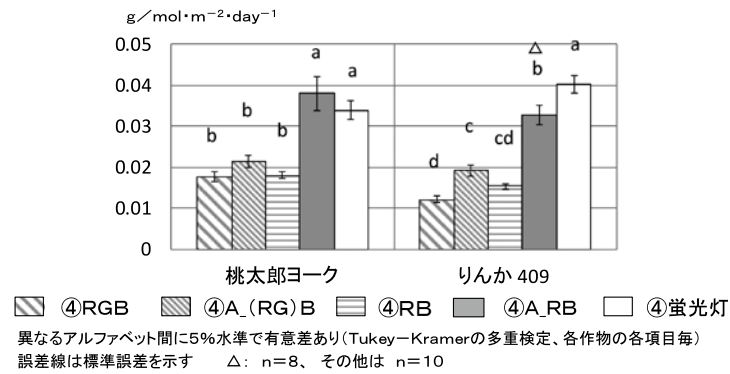


図-10 DLI当たりの地上部乾燥重(実験4, 播種後24日目)

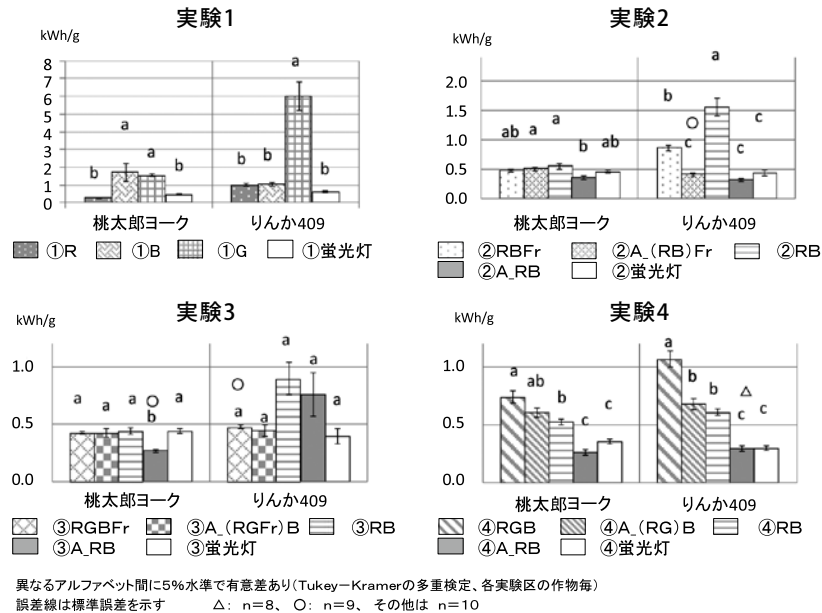


図-11 乾燥重当たりの照明の消費電力量(播種後24日目)

‘りんか409’では蛍光灯区が大となったが、A_RB区も高く、他の3条件区が低いという同様の結果となった。Gを加えた区ではFrを除くと顕著に生育が悪くなったことから、Gの効果は認められなかった。RB区に対し、A_RB区はDLI当たりの地上部乾燥重で高い値を示すことから、交互照射の効果がここでも認められた。

乾燥重当たりの照明の消費電力量の比較

実験1~4における乾燥重当たりの照明に係る消費電力量を算出した。結果を図-11に示す。‘桃太郎ヨーク’の場合、実験1において、蛍光灯区と赤色光区で消費電力量が同等の結果となった。しかし、苗の徒長が認められ、赤色光単独照射は育苗には不適であることが分かった。青

色光区および緑色光区では生育がよくないことに加え、消費電力量の観点からも効率が低いことが分かった。実験2、実験3では蛍光灯とLED区で消費電力量は概ね同等となったが、A_RB区は他の試験区よりも生産効率が高い傾向が認められた。実験4では、A_RB区を除くLED区は蛍光灯区より低い生産効率となった。実験3のRGBFr区、A_(RGFr)B区が蛍光灯区と生産効率が同等であったことと比較すると、Fr照射の効果が認められた。実験4でA_RB区は他のLED区よりも生産効率が高いことが分かった。

‘りんか409’の場合、実験1においては‘桃太郎ヨーク’と同様にLED単色光区では蛍光灯区と同等以下の生産効率であった。実験2、実験3はバラつきが大きく、

明確な結果が得られなかった。実験4では、‘桃太郎ヨーク’と同様に、A_RB区を除くLED区は蛍光灯区より低い生産効率となり、A_RB区は他のLED区よりも高い生産効率であることが分かった。

以上の結果から、‘りんか409’の場合は明瞭な結果が得られなかったが、‘桃太郎ヨーク’では、A_RB区が良好な生産効率を示し、Frが一定の効果を示すことが分かった。特にA_RB区は、RB区のDLIを蛍光灯区以上としても蛍光灯区より生育がよくないのに対し、DLI当たりの乾燥重が蛍光灯区と同等となった。

IV 考 察

今回の検討において、実験1のLED単色光での育苗で蛍光灯に比較して生育が不良であった。各LED区はDLIが蛍光灯区よりも小さく、光量が少ないためと考えられた。赤色光区、緑色光区では苗の徒長が観察され、草姿も不良であったことから、複数の波長の異なる光をより高いDLIで照射することが必要であると考え、実験2~4を行った。複数種類のLEDを用い、DLIを高くすることにより、蛍光灯での生育に近づく傾向は認められた。しかしながら、実験4のRGB区およびRB区では、蛍光灯区と同等程度のDLIとなる光照射を行っても、蛍光灯区の乾燥重の6割程度以下であったことから、赤色青色混合光では蛍光灯と同様の苗生産は困難であると考えられた。一方、同じ赤色光と青色光であっても、交互照射を行った場合（実験2~4のA_RB区）は、DLI当たりの乾燥重で蛍光灯区と概ね同等の乾燥重が得られたことから、DLIをより高くすることで、蛍光灯区と同等の育苗を行うことができる可能性が考えられた。このことから、同じLED照明であっても、照射パターンを変えることにより、従来知られていない生育状況を生じさせることができる可能性が示唆された。また、遠赤色光を照射した場合（実験2のRBFr区、A_(RB)Fr区、実験3のRGBFr区、A_(RGFr)B区）、‘りんか409’の実験2RBFr区を除きDLI当たりの乾燥重で蛍光灯区と同等以上の乾燥重が得られたことから、遠赤色光照射が育苗期の重量増に好影響を与えることが示唆された。ただしRBFr区を除いては草姿に徒長が観察されることから、赤青色光との組み合わせ方や照射強度を適切に設定する必要があると考えられた。

‘桃太郎ヨーク’と‘りんか409’を比較した場合、各LED光照射条件に対する生育の傾向は概ね同様であったが、‘りんか409’ではRB区の地上部新鮮重が‘桃太郎ヨーク’と比較して低い傾向が認められた。一方で交互

照射であるA_RB区では‘桃太郎ヨーク’と‘りんか409’とで大きな差は認められなかった。‘りんか409’の生育については、短節間であることなど桃太郎系の品種とは異なる形質を示すことが知られており、光照射条件に対する何らかの反応の違いが影響した可能性が考えられるが、その理由は今回の実験では明らかにできなかった。Nanyaら（2012）は、赤色光と青色光の混合光によるトマト育苗において、‘麗容’（サカタのタネ）を用いて実験を行い、赤色光 $75\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、16時間照射に、青色光 $25, 50, 75\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ をそれぞれ同時に混合照射すると、青色光量の増大に伴って節間長が短くなることから、青色光により徒長抑制効果が得られると報告している。後藤（2010）は育苗時には光強度と日長（明期）の組み合わせが重要な因子となることを指摘しており、畑ら（2011）は人工光の連続照射下において葉に激しい障害が発症することがあると報告している。今後赤色光青色光交互照射における赤青の光量比、光強度、照射時間等を変えて試験を行うことにより優良な苗生産に必要なLED光照射条件を明らかにすることができると考える。

苗生産コストの指標として、乾燥重当たりの照明の消費電力量を試算した。‘桃太郎ヨーク’では上記DLI当たり地上部乾燥重で良好な結果を示したA_RB区で消費電力量が蛍光灯区と同等以下となるという試算を得た。A_RB区では、有意差がつかない試験区があるものの、消費電力量が蛍光灯区の62%~79%となり、電力コストの削減に寄与できる可能性が示唆された。適切なDLIで良好な育苗が可能なLED光照射条件を定めることにより、苗生産に係る電力コストを大幅に削減できる可能性が見出された。

V 摘 要

トマト苗の生育検討を目的として、各種波長の単色LED照明を用い、LED光の組み合わせ、光量および照射パターンを変えてトマト育苗を行い、蛍光灯を用いた場合との比較から育苗に適したLED光照射条件の検討を行った。合わせて、苗乾燥重当たりの消費電力量を算出し、各種LED光照射条件における生産効率を評価した。実験には‘桃太郎ヨーク’および‘りんか409’の2品種のトマトを使用した。育苗は苗テラスを用いて行った。苗テラスの蛍光灯に変えて赤、青、緑、遠赤色の4色のLED照明を用いて各種照射条件にて育苗を行い、蛍光灯の場合と比較した。その結果、日積算光合成有効光量子量当たりの苗乾燥重の比較で、‘桃太郎ヨーク’では赤色光、青色光に加えて遠赤色光を照射した試験区および赤色光と青色光

の交互照射区で蛍光灯区と同等以上の値となった。赤色光と青色光の交互照射区では乾燥重当たりの照明の消費電力量が蛍光灯区の62%~79%となり、電力コストの削減に寄与できる可能性が示唆された。‘りんか409’でもほぼ同様の結果となったが、一部照射条件で‘桃太郎ヨーク’と異なる結果となり、品種による違いが認められた。

引用文献

- 1) 古在豊樹・板木利隆・岡部勝美・大山克己(2005):第1章. 閉鎖型苗生産システムの実用化が始まった. 最新の苗生産実用技術, 4. 農業電化協会, 東京.
- 2) 瓦 朋子(2015):ベルグアース(株)の苗供給の現状. ハイドロポニックス, 28(2), 6-7.
- 3) 土屋 和(2015):育苗技術の進展と養液栽培での展望. ハイドロポニックス, 28(2), 2-3.
- 4) Nanya, K., Y.Ishigami, S.Hikosaka and E.Goto(2012): Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. *Acta Horticulturae*, 956, 261-266.
- 5) 後藤英司(2010):3. 葉菜類での生産で考慮すべき波長. 人工光源の農林水産分野への応用, 112-113. 農業電化協会, 東京.
- 6) 畑 直樹・榊田正治・小林昭雄・村中俊哉・岡澤敦司・村上賢治(2011):閉鎖型植物工場における連続光の利用(第1報)連続光下におけるナス科・ウリ科作物の生育様相ならびに障害発生. 植物環境工学, 23(3), 93-100.

Examination of Irradiation Conditions Using LED Light for the Growth of Tomato Seedlings

Yasumasa Watanabe, Takaki Yasuda, Tadashi Yoneda and Akimasa Nakano

Summary

To study the growth of tomato seedlings, we used LED light at different wavelengths under various irradiation conditions such as different combinations of LED light, light intensity, and lighting time schedule. For the experiments, we used the ‘Momotaro-York’ and ‘Rinka 409’ cultivars of tomato. We examined LED irradiation conditions suitable for the growth of tomato seedlings, and compared the growth results to those obtained using fluorescent light. In addition, we calculated and evaluated the electricity consumption and efficacy of LED light per dry weight of tomato seedlings produced. To culture the seedlings, we used the “Nae terrace” system, and we changed the light source from fluorescent light to red, blue, green, and far-red LED light. A comparison of the dry weight of the seedlings per daily light integral under each light condition for ‘Momotaro-York’ suggested that irradiating tomatoes with far-red light in addition to red and blue light, or irradiating with blue and red light alternately, yields similar or better results as compared to those obtained using fluorescent light. Moreover, the electricity consumption when using alternating blue and red light irradiation was 62-79% of that when fluorescent light was used. This suggests that alternating blue and red light irradiation could contribute to electrical cost saving in tomato seedling production.

We obtained similar results for ‘Rinka 409’; however, we obtained different results for ‘Momotaro-York’ under some irradiation conditions, which could be attributed to the varietal differences between the two tomato cultivars.

Accepted: October 23, 2015

Vegetable Production Technology Division

3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8666 Japan

寒候期キャベツの結球重増加モデルの開発[†]

岡田 邦彦・佐々木 英和*

(平成 27 年 12 月 21 日受理)

Development of a Growth Model for Prediction of Top Dry Weight,
Head Dry Weight and Head Fresh Weight of Cabbage
Grown in Winter Season

Kunihiko Okada and Hidekazu Sasaki

I 緒 言

国民の生活様式の変化などにより、野菜の消費形態は、小売店から青果として野菜を購入し、家庭内で調理・消費する形態（家計消費用需要）から、惣菜・弁当などの「中食」や外食によるもの（業務用需要）や、調理品やカット野菜などの加工品を介した形態（加工原料用需要）への移行が進んでおり、キャベツでも業務用需要と加工原料用需要で過半を占めるに至っている（小林，2006）。生産現場でも加工原料用需要・業務用需要向け（以下、加工・業務用）生産への取組拡大ニーズが高まっている。加工・業務用キャベツ生産では、一定期間継続的に定時・定量で出荷を行う契約栽培で行われるのが一般的で、原則として、契約期間中、不足することなく出荷することが求められている。実際には、温度などの気象条件などによる生育の遅速や、降雨などの天候条件により計画通りに作業が出来ない、などにより、収穫予定量が契約量に対して過不足することは珍しくない。生産者から野菜を調達し、加工業者などに納入する中間事業者、流通業者や大規模生産法人への聞き取りでは、2~3日前に出荷量の過不足が判明しても、ほとんど手の打ちようがないが、2週間くらい前に過不足が判明すれば、調達先・出

荷先と調整が可能であり、1ヶ月以上前なら、より調整が容易であることが指摘されている（岡田，2014a）。そのため、収穫予測を行うことにより、契約栽培を円滑に進めることが期待される。

また、加工・業務用キャベツの契約栽培では、市場出荷主体で生産する場合より、出荷期間を前後に拡大して、長期に渡って継続的に出荷する方が、有利な契約を取りやすい。そのためには、複数の作期を組み合わせ、長期間安定的に出荷が可能な生産計画を策定することが望ましい。しかし、生産計画策定のために生産現場で入手可能な情報は、地域における定植可能期間と収穫想定期間の組み合わせが、旬単位程度で示されたものが主体である。これらは、栽培事例に基づく暦日モデルと言うことが出来るが、出荷実績のない時期への適用は仕組み上不可能であり、収穫期拡大を目指す場合には使えない。また、暦日モデルには年次による気象変動は反映されにくく、例えば、低温年が想定されたとしても、それを反映した生産計画の策定が難しい。

すなわち、気象条件の変動を想定しながら、キャベツの安定生産を図るためには、環境条件が生育に及ぼす影響を定量的に把握することが重要であり、そのためには、環境条件と生育との関係を定量的に記述した生育モデルは有用なツールとなる（小林，1994）。気象条件が生育

〒 514-2392 三重県津市安濃町草生 360

企画管理部

* 野菜生産技術研究領域

† 本報告の一部は園芸学会平成 18 年度春季大会において発表した。

に及ぼす影響をシミュレートできる生育モデルを用いて、契約期間の出荷予定日ごとにシミュレーションを行えば、それぞれの出荷予定日に対応した定植日の策定を客観的に行うことが可能となる(岡田, 2014b, 2014c)。

本報では、寒候期のキャベツ栽培において、結球肥大への影響が大きい、結球肥大期の日射量・気温が結球重増加に及ぼす影響を解析・モデル化した結果について報告する。

モデル開発のための栽培試験・現地調査・現地設置機器の工作などで、野菜茶業研究所・研究支援センター・業務第1科のスタッフ、特に、別所種久氏、高士保弘氏、丸山寿美氏には、多大な業務支援を頂いたほか、山崎敬亮博士(当時、契約研究員、現近畿中国四国農業研究センター)にも、調査やデータ整理に尽力頂いた。ここに記して厚く感謝の意を表する。

II モデル開発用データ概要

生育モデル開発の対象品種は‘松波’(石井育種場)と

した。生育モデルの開発には、2002年、2005年、2006年の秋冬期に研究所内圃場(三重県津市安濃町)で行った栽培試験のデータおよび三重県津市一志町の農業生産法人が‘松波’の経済栽培を行っている圃場からの抜き取り調査データを用いた。Table 1, Table 2にそれぞれのデータセットの栽培時期と生育概況、生育環境温度を示した。所内外とも、育苗は市販培養土と128穴標準セルトレイを用いて行い、定植時の苗齢は本葉3~4葉期であった。栽培様式は研究所内外で異なり、研究所内試験では、条間60cm株間35cm1条植え(栽植密度4762本/10a)であったのに対し、津市一志町の生産者圃場では、株間30cmで畝間150cm畝面条間60cmの2条植え(栽植密度4444本/10a)であった。

所内外とも、施肥・防除は地域における慣行に準じて行った。Anou2005では球内茎の早期伸長が見られ、出荷可能な結球重には達せず、Ichishi2005-1では、結球肥大に顕著な遅れが見られたが、これら以外のデータセットでの栽培経過は順調であった(Table 1)。

生育調査は、結球重数g~数十gの結球開始期~結球

Table 1 Dates of transplanting and investigation, and growth of cabbage in the nine datasets.

Dataset name	Date of transplanting	Initial investigation (head growth initiation stage)					Dates of destructive growth investigation
		Investigation at harvest (after head fresh weight exceeds 1500 g)					
		Date	Top FW	Top DW	Head FW	Head DW	
NIVTS field (Tsu-City, Ano, Mie Pref.)							
Ano2002	2002.9.3	2002.10.25 2003.2.25	1146 ± 68 2632 ± 163	87.1 ± 5.7 278.0 ± 18.5	63 ± 7 1706 ± 114	5.0 ± 0.5 157.5 ± 10.7	2002.11.22, 12.16, 2003.1.21
Ano2005	2005.9.13	2005.10.27 2006.2.3	419 ± 47 1926 ± 149	42.4 ± 4.0 228.6 ± 16.7	8 ± 2 869 ± 79	1.0 ± 0.2 98.8 ± 8.6	2005.11.20, 12.14, 12.26, 2006.1.12
Ano2006	2006.8.21	2006.10.3 2006.11.29	678 ± 117 2587 ± 226	62.8 ± 10.9 213.3 ± 22.1	29 ± 13 1527 ± 161	2.5 ± 0.9 117.6 ± 13.7	2006.11.8
Farmer's field (Tsu-City, Ichishi, Mie Pref.)							
Ichishi2003	2003.9.5	2003.10.31 2004.1.13	826 ± 113 2588 ± 167	76.1 ± 11.1 281.5 ± 21.5	66 ± 14 1553 ± 107	6.3 ± 1.9 166.8 ± 12.8	2003.11.12, 12.5, 12.26
Ichishi2005-1	2005.8.25	2005.10.13 2006.1.26	696 ± 168 2456 ± 300	56.0 ± 13.1 320.0 ± 34.1	21 ± 168 1605 ± 249	1.9 ± 13.1 192.1 ± 26.9	2005.11.25, 12.9, 12.21, 2006.1.12
Ichishi2005-2	2005.9.20	2005.11.8 2006.2.28	710 ± 43 3172 ± 288	68.5 ± 4.8 345.8 ± 29.0	65 ± 9 2115 ± 209	6.6 ± 0.7 207.8 ± 18.5	2005.11.25, 12.9, 12.21, 2006.1.12, 1.26
Ichishi2006-1	2006.8.18	2006.10.4 2006.12.1	900 ± 109 3262 ± 629	75.4 ± 7.3 245.5 ± 47.1	35 ± 9 2020 ± 466	2.9 ± 0.6 125.6 ± 30.2	2006.11.10
Ichishi2006-2	2006.8.19	2006.10.4 2006.12.1	639 ± 170 2647 ± 476	54.0 ± 13.0 225.3 ± 37.0	27 ± 4 1554 ± 365	2.3 ± 0.4 115.4 ± 26.7	2006.11.10
Ichishi 2006-3	2006.8.25	2006.10.12 2006.12.1	625 ± 102 2458 ± 601	59.7 ± 8.8 225.9 ± 47.3	25 ± 7 1560 ± 463	2.8 ± 0.6 128.2 ± 36.0	2006.11.13

FW: fresh weight (g/plant); DW: dry weight (g/plant)
Values are means ± 95% confidence interval (n = 8-12).

Table 2 Daily air temperature after first sampling in the nine datasets.

Days after first sampling	Temperature (°C; mean for 10 days)													through harvest time	Dry matter content of head at harvest (%)
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120		
Ano2002	-9	-19	-29	-39	-49	-59	-69	-79	-89	-99	-109	-119	-129	6.7	9.2
Ano2005	14.5	13.3	9.5	8.3	5.3	3.1	4.0	2.9	4.1	4.7				6.9	11.4
Ano2006	19.7	18.5	17.7	13.9	11.2									16.2	7.7
Ichishi2003	16.0	12.3	11.8	10.0	6.3	5.2	6.2	4.2						9.0	10.7
Ichishi2005-1	19.2	16.1	15.3	11.4	11.1	7.4	4.4	4.3	3.6	5.9	3.6			9.3	12.0
Ichishi2005-2	13.1	10.8	8.6	5.8	4.1	4.3	5.1	4.0	4.9	5.3	6.9			6.6	9.8
Ichishi2006-1	19.4	17.9	16.6	13.2	11.3	10.5								14.8	6.2
Ichishi2006-2	19.4	17.9	16.6	13.2	11.3	10.5								14.8	7.4
Ichishi2006-3	18.4	17.1	13.9	11.1	11.4									14.4	8.2

肥大初期に開始した（以下、この時点を一各データセット開始点と呼ぶ）。その後、収穫時および結球肥大途中に1～5回の生育調査を行った。サンプリングは、極端な生育不良を示さず、かつ、隣接個体も欠株や極端な生育不良ではない8～12個体を地際から切断して行った。サンプリング後、結球部と外葉部とに分けて、生体重を秤量後、80°Cで風乾し、乾物重として秤量した。また、各データセット開始点で、鉛直投影面積を計測した。具体的には、外葉が脱落しないように群落外に持ち出し、20cmあるいは25cmの標準長ラベルを添えて、個体直上より画像撮影を行った。その後、自作プログラムを用いて、RGB別輝度から植物葉と判定された画素数と写し込んだ標準長ラベルの画像上の長さで決定した画像の縮尺から、鉛直投影面積を計算した。ただし、ハレーションや陰のため、RGB輝度からの植物体判定が難しい箇所については、一般的なペイントソフトにより、緑色で塗る画像修正を施した。

また、Ano2005, Ichishi2005-1 および Ichishi2005-2 でのデータセット開始点日では、サンプリングした個体のうち、全地上部重が中庸のそれぞれ4個体について、外葉部を風乾・秤量後に粉碎して、N-Cアナライザー（（株）住化分析センター製、SUMIGRAPH, NC-22F）を用いて窒素含有率を測定した。その結果、Ano2005で 4.26 ± 0.03 、Ichishi2005-1で 2.83 ± 0.44 、Ichishi2005-2で 4.77 ± 0.20 （いずれも、乾物重あたり%（g/g）、平均値 $\pm t$ 検定による95%両側信頼区間、 $n = 4$ ）であった。このことから、Ichishi2005-1で見られた顕著な結球肥大の遅れは、結球肥大期における窒素栄養欠乏によるものと考えられた。

III 生育モデル開発

1. 生育過程のモデル化

a 乾物生産過程

乾物生産については、作物が受けた日射量に RUE (radiation utilization efficiency; 日射利用係数 (g/MJ)) を乗じたもの、すなわち、

$$\Delta TDW = DIR \times RUE \quad (1)$$

(ΔTDW (daily increase of top dry weight): 地上部乾物重日増加量 (g/plant/day), DIR (daily amount of intercepted solar radiation): 日射遮蔽量 (MJ/plant/day)) とした。この乾物生産を受光日射量と日射利用係数の積で把握するという枠組は、作物の生産性を検討するために、生育モデル開発以外にもしばしば用いられている (Shibles ら, 1966, Sinclair ら, 1989, 1992, Stockle ら, 1990, Wilson, 1981)。

なお、結球性野菜は生育初期に個体間の空隙が大きいため、作物が受光する面積として鉛直投影面積が使われることがある (岡田ら, 1997)。本報で用いた所内外の全てのデータセットにおいては、最初の生育調査時点において既に、鉛直投影面積が十分大きく、外葉が圃場全面を十分に覆っていることを確認したので、 DIR の計算には、栽植密度の逆数として計算される個体割当面積を用いて、

$$DIR = S \times AA \quad (2)$$

S : 日射量 (MJ/m²/day), AA (allocated area to each plant): 個体割当面積 (m²/plant) = 1/density (栽植密度 (plants/m²)) とした。

b 乾物の結球部への分配過程

ΔTDW から、定められた分配率に応じて、結球部に分配されることとした。すなわち、

$$\Delta HDW = \Delta TDW \times DDH \quad (3)$$

(Δ HWD (daily increase of head dry weight) : 結球部乾物重日増加量 (g/day), DDH (distribution factor of dry matter to head) : 結球部への乾物分配率 (g/g)) とした。

c 結球部の生体重増加過程

結球部の生体重増加を扱うために、生体重増加の乾物重増加に対する比 (以下, FD 比) という概念を新たに案出・導入し,

$$\Delta\text{HFW} = \Delta\text{HWD} \times \text{FDH} \quad (4)$$

(Δ HFW (daily increase of head fresh weight) : 結球部生体重日増加量, FDH (ratio of fresh-weight increase to dry-weight increase of head) : 結球部の FD 比 (g/g)) とした。

2 生育過程に対する環境条件や他の生育要素が及ぼす影響を表すモデルパラメータ

前述したように Anou2005 および Ichishi2005-1 では

顕著な結球不良が生じていた。そこで、以下のモデルパラメータの推定に際しては、この2つを除いた7データセットを用いることとした。これに伴い、明らかな結球不良が観察されていないことがモデルの適用条件となる。

a 乾物生産に関わるパラメータ

各データセット開始点以降の地上部乾物重増加量と DIR 積算値の関係および個々のデータセットに対し、原点を通る直線で当てはめた場合の回帰式を Fig.1 に示した。地上部乾物重の遮蔽日射量積算値に対する単回帰直線の傾きはその期間の平均 RUE である (Tei F. ら 1996)。今回使用したデータセットでは、結球肥大期間中の平均 RUE は 0.966~1.301 (g/MJ) の範囲であった。また、連続する2回の生育調査間での地上部乾物重の期間増加量を当該期間の DIR の積算値で除して求めた RUE の期間平均値と当該期間の平均気温との間に、相関係数 0.2757 の弱い正の相関が見られた。また、生育後半に低温に遭

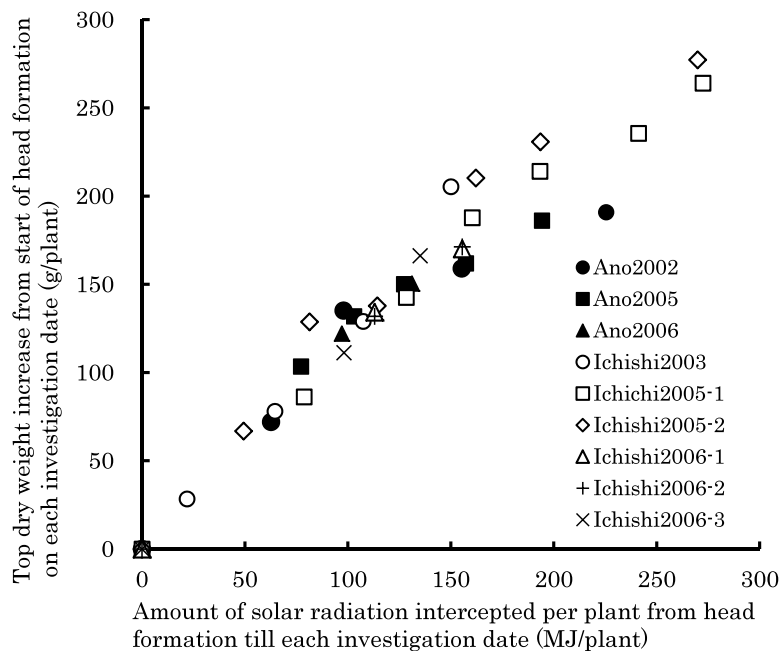


Fig. 1 Relationship between top dry weight increase of cabbage and intercepted solar radiation per plant from start of head formation to harvest in each dataset.

Approximate lines passing through the origin and coefficients of determination for each dataset are as follows:

Ano2002 :	$y = 0.966x$	$R^2 = 0.8885$
Ano2005 :	$y = 1.074x$	$R^2 = 0.9264$
Ano2006 :	$y = 1.187x$	$R^2 = 0.9943$
Ichishi2003 :	$y = 1.301x$	$R^2 = 0.9906$
Ichishi2005-1 :	$y = 1.033x$	$R^2 = 0.9746$
Ichishi2005-2 :	$y = 1.154x$	$R^2 = 0.9446$
Ichishi2006-1 :	$y = 1.126x$	$R^2 = 0.9954$
Ichishi2006-2 :	$y = 1.124x$	$R^2 = 0.9977$
Ichishi2006-3 :	$y = 1.197x$	$R^2 = 0.9959$

遇したデータセットのうち、Ichishi2003 以外では、DIR 積算値に対する地上部乾物重が小さくなる傾向が認められたことから、RUE を日平均気温のシグモイド関数、

$$RUE = \frac{RUE.temp.top}{1 + \exp\left(\frac{RUE.temp.mid - temp}{RUE.temp.range}\right)} \quad (5)$$

(temp: 日平均気温 (°C), RUE.temp.top, RUE.temp.mid, RUE.temp.range はパラメータ) で表すこととした。

それぞれのパラメータ値は Microsoft Excel のソルバー機能 (GRG 非線型オプション) を用いて、各データセット開始点を起点とした地上部乾物重のシミュレーション値と各生育調査時点における地上部乾物重の実測値との誤差平方和が最小となる値を採用した。

その結果、RUE は日平均気温 5°C を下回るあたりから、顕著に低下するような関数が得られた (Fig.2)。一方、5°C 以上の RUE に温度依存性がほとんどないことについては、Olesen J.E. ら (1997) も、キャベツと同種のブロッコリーおよびカリフラワーで、13.8°C 以上では一定であることを報告している。このため、キャベツでも、適温を含む比較的広範な温度範囲で、RUE をほぼ一定として扱うことは不適切ではないと考える。

b 結球部への乾物分配率に関わるパラメータ

結球肥大初期には DDH は小さく、結球肥大盛期以降には、 ΔTDW の大部分が ΔHDW に占められる、すなわ

ち、DDH が 1 に近くなることが予想された。そこで、結球葉数が少ない間の DDH は低く、その後、急速に増加し、結球肥大後半では、一定に近い値を保持する、というパターンを想定し、HLN (Head Leaf Number; 結球葉数) のシグモイド関数として、

$$DDH = \frac{DDH.HLN.top - DDH.HLN.base}{1 + \exp\left(\frac{DDH.HLN.mid - HLN}{DDH.HLN.range}\right)} + DDH.HLN.base \quad (6)$$

で当てはめることとした。

なお、HLN は、日増加分 (ΔHLN) が日平均気温に比例するとして求めた。

$$\Delta HLN = HLN.temp \times temp \quad (7)$$

($HLN.temp$ はパラメータ)

DDH に関するパラメータも、RUE のそれと同様に Microsoft Excel のソルバー機能 (GRG 非線型オプション) を用いて、結球部乾物重のシミュレーション値と実測値の誤差平方が最小となるように定めた。シミュレーションの際、RUE については、上記で既に求めた関数式・パラメータを用いた。得られたパラメータによる DDH と HLN との関係および連続する 2 回の生育調査間での結球部乾物重の期間増加量を当該期間の地上部乾物重の期間増加量で除して求めた DDH の期間平均値を当該期間の平均 HLN に対してプロットしたものを Fig.3 に示した。

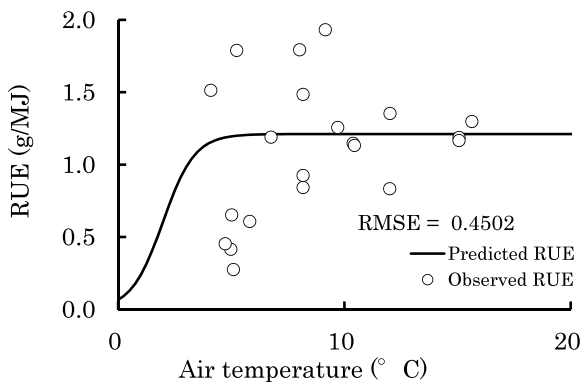


Fig. 2 Predicted and observed radiation-use efficiencies (RUEs) versus daily mean air temperature. Observed RUEs are calculated from data of 2 adjacent growth investigations (e.g. on 2006.1.12 and 2006.1.29), and plotted against periodic mean air temperature. RMSE = root-mean-square error.

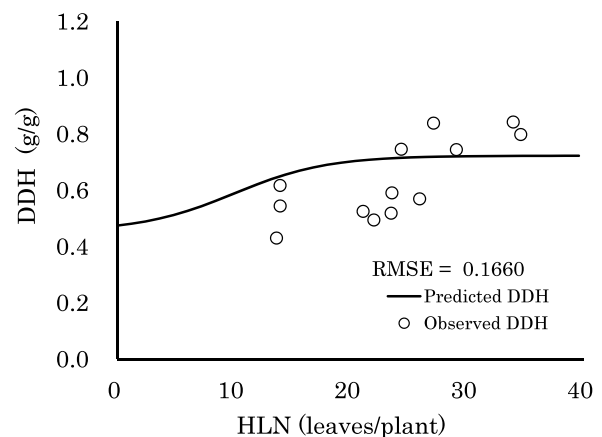


Fig. 3 Predicted (—) and observed (○) distributions of dry matter to head (DDHs) versus head leaf number (HLN). Observed DDHs are calculated from data of 2 adjacent growth investigations and plotted against periodic mean HLN. RMSE = root-mean-square error.

c 結球部生体重増加に関わるパラメータ

FDHについて、連続する2回の生育調査間での結球部生体重の期間増加量を当該期間の結球部乾物重の期間増加量で除して求めたFDHの期間平均値を当該期間の平均気温の間に、弱い正の相関関係(相関係数0.228)が見られた。また、肥大期間を通しての期間平均FDHの逆数でもある収穫時の結球部乾物率は、球内茎の早期伸長が見られたAnou2005を除き、結球肥大期間の気温が高いほど小さかった(Table 2)。これらのことから、FDHを日平均気温に対する単調増加関数として、

$$FDH = \frac{FDH.temp.top - FDH.temp.base}{1 + \exp\left(\frac{FDH.temp.mid - temp}{FDH.temp.range}\right)} + FDH.temp.base \quad (8)$$

であてはめることとした。

FDHに関するパラメータも、RUEやDDHのそれと

Table 3 Values of parameters used for determination of RUE, DDH, HLN and FDH.

<i>RUE.temp.top</i>	1.21	<i>HLN.temp</i>	0.04
<i>RUE.temp.mid</i>	1.98		
<i>RUE.temp.range</i>	0.70	<i>FDH.temp.top</i>	12.78
		<i>FDH.temp.base</i>	8.96
<i>DDH.HLN.top</i>	0.72	<i>FDH.temp.mid</i>	10.00
<i>DDH.HLN.base</i>	0.45	<i>FDH.temp.range</i>	0.50
<i>DDH.HLN.mid</i>	10.00		
<i>DDH.HLN.range</i>	4.00		

Determined with all datasets except Anou2005 and Ichishi2005-1.

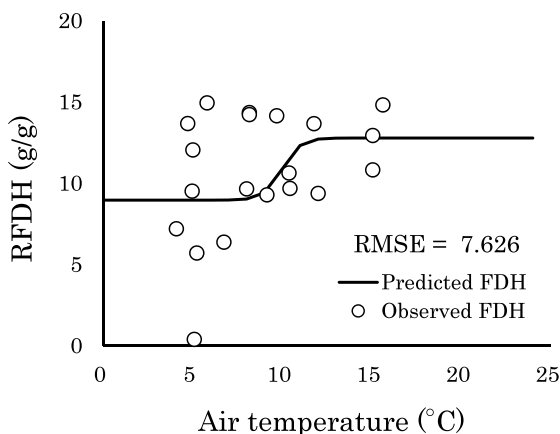


Fig. 4 Predicted and observed ratios of fresh-weight increase to dry-weight increase of head (FDHs) versus daily mean air temperature. Observed FDHs are calculated from data of 2 adjacent growth investigations and plotted against periodic mean air temperature. RMSE = root-mean-square error.

同様に Microsoft Excel のソルバー機能 (GRG 非線型最適化) を用いて、結球部生体重のシミュレーション値と実測値の誤差平方和が最小となるように定めた。その際、RUE と DDH については、上記で既に求めた関数式・パラメータを用いた。得られたパラメータによるFDHと日平均気温との関係は、Fig.4に示した。

以上による、モデル全体の概念図を Fig.5に、求めた全パラメータを Table 3 に示した。

IV 生育モデルのシミュレーション結果と検証

1 結球開始直後を起点とするモデルシミュレーション

それぞれのデータセット開始点 (Table 1) を起点として、その時点での実測値を初期値としてシミュレーションを行い、Anou2005 と Ichishi2005-1 を除く各データセットにおける収穫時と生育調査時点 (Table 1) での実

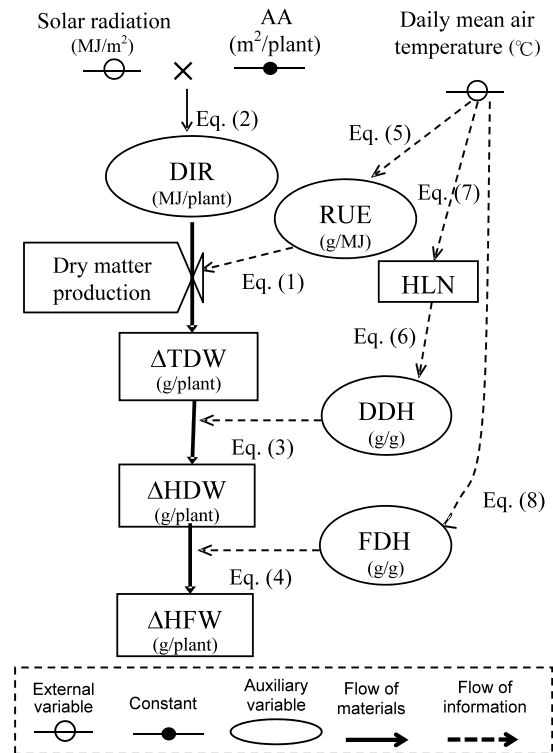


Fig. 5 Schematic of the model describing the increase in top dry weight (TDW), head dry weight (HDW), and head fresh weight (HFW) of winter cabbage, where, AA: Allocated area to each plant, DIR: Daily intercepted solar radiation, RUE: Radiation-use efficiency, HLN: Head leaf number, DDH: Distribution of dry matter to head and FDH: Ratio of fresh-weight increase to dry-weight increase of head.

測値とシミュレーション値との相対誤差を求めた。

また、モデルパラメータ決定法の妥当性を検証するため、クロスバリデーションを行った。すなわち、例えば Anou2002 データセット以外の6つのデータセットを用いて求めたモデルパラメータで、Anou2002の気象条件と初期値でシミュレーションを行い、相対誤差を求める、ということを、全7個のデータセットに対して行い、そこで得られたシミュレーション値と実測値との相対誤差

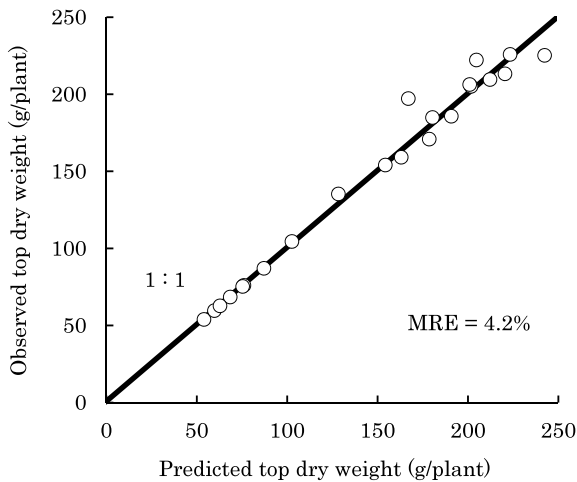


Fig. 6 Relationship between observed and predicted top dry weights of all datasets in Table 1 except Anou 2005 and Ichishi 2005-1. MRE = mean relative error.

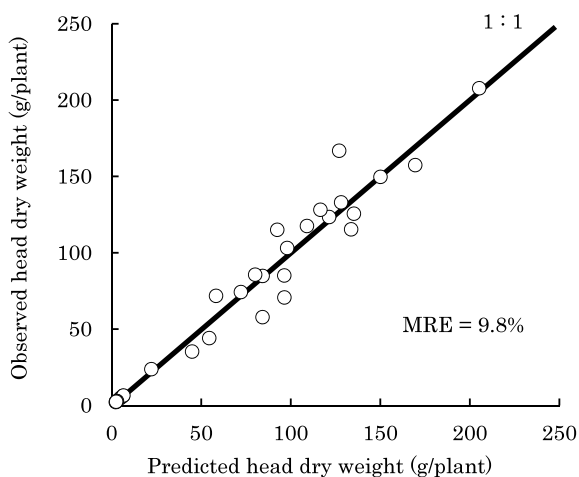


Fig. 7 Relationship between observed and predicted head dry weights of all datasets in Table 1 except Anou 2005 and Ichishi 2005-1. MRE = mean relative error.

を求めた。

その結果、地上部乾物重については相対誤差の平均値は小さく、4.2%（クロスバリデーションでの相対誤差の平均値 4.8%）であり、高い精度でシミュレーション値が実測値に適合していた (Fig.6).

結球部乾物重についても、地上部乾物重に比べると劣るものの、相対誤差の平均値は大きくなく、9.8%（クロスバリデーションでの相対誤差の平均値 10.9%）であり、良好な精度でシミュレーション値が実測値に適合した (Fig.7).

結球部生体重については、相対誤差の平均値 15.4%（クロスバリデーションでの相対誤差の平均値 16.5%）であり、結球部乾物重と比べ低くなったが、一定の精度でシミュレーション値が実測値に適合した (Fig.8).

2 収穫前の実測値で修正したモデルシミュレーション

シミュレーションモデルを用いて生育予測を行う場合、シミュレーション途中で、実測値を入力することにより推定精度が向上することが期待される（菅原，2014）。そこで、データセット開始点を起点としてシミュレーションを開始した後、その途中で生育調査データを上書き入力する補正シミュレーションを実施し、結球部生体重推定値の検討を行った。

緒言で述べたように、契約栽培の場合、出荷量の過不足があっても、事前連絡を行えば生産者・中間事業者な

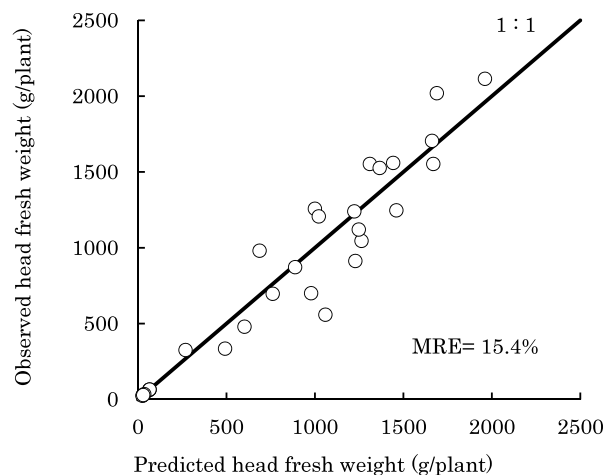


Fig. 8 Relationship between observed and predicted head fresh weights of all datasets in Table 1 except Anou 2005 and Ichishi 2005-1. MRE = mean relative error.

どの関係者間で調整が可能である。その調整に必要な期間の目安は最低2週間といわれている。しかし、生育期間が長い冬どりキャベツでは、より早い時点での予測が求められるので、約1ヶ月前時点での予測を想定した検討を行うこととした。すなわち、Anou2002, Ichishi2003, Ichishi2005-2の収穫前、それぞれ、35日、39日、47日前の結球部生体重の実測値を上書き入力する補正シミュレーションを行った(2006年度のデータセットでは、収穫より1ヶ月以上前には生育調査を行っていないので除外)。なお、将来的な生産現場での適用を考え、試験研究機関以外では困難な80°C風乾を要する乾物重データは、用いないこととした。本モデルでは結球部生体重は最下流であり、かつ、他のモデル要素にフィードバックする構造になっていないので、結球部生体重で上書き補正を行っても、モデル全体の整合性には何ら問題は無い。

その結果、結球開始時点で推定した収穫時結球部生体重の実測値に対する相対誤差平均がAnou2002, Ichishi2003, Ichishi2005-2でそれぞれ、2.6%, 15.6%, 7.3%, 平均8.5%であったのに対し、収穫約40日前時点で推定した場合には、それぞれ、1.5%, 3.3%, 17.6%, 平均7.5%であった。このように、全体的には推定精度

の向上が認められた。ただ、Ichishi2003で大幅な精度向上が見られる一方、Ichishi2005-2では、逆に推定精度が低下した。

そこで、Ichishi2005-2で推定精度が低下した要因を解明するために、結球部重のシミュレーション値と実測値の推移を乾物重も含めて検討した(Fig.9)。その結果、結球部乾物重は結球肥大期間を通して実測値と良く適合しており、収穫時推定値の相対誤差も1.2%、シミュレーション期間を通しての相対誤差も6.9%であった。一方、結球部乾物重と結球部生体重のシミュレーション値から計算される乾物率について見てみると、シミュレーション値では約10%と比較的安定しているのに対し、実測値の方は9.5%~12.7%と変動が大きい。そのため、今回の補正に用いたデータが得られた時期が、たまたま乾物率の高い、すなわち、乾物重の割に生体重が小さい時期であったため、結果としては逆効果となる下方修正を強いられ(Fig.9中の点線)、その後の急激な乾物率低下(水分吸収の増加)に追従できなかったものと考えられた。レタスでは、生育期間中の植被率・結球重の生育調査データで予測精度が向上するのが一般的であるが(菅原, 2014)、冬キャベツの場合には、生育調査時に結球部の

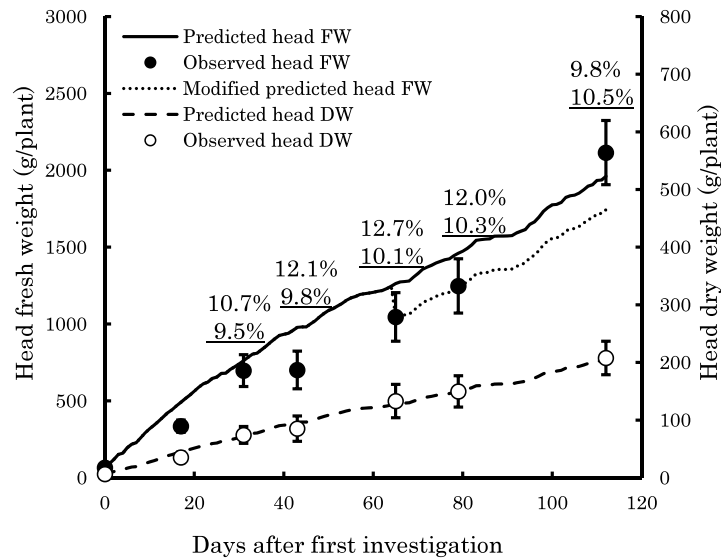


Fig. 9 Predicted and observed head fresh weights (FW) and dry weights (DW) in the Ichishi2005-2 dataset.

- Head FW predicted from simulation initiated on first investigation date
- Observed head FW with 95% CI
- ⋯ Head FW predicted from model simulation initiated 47 days before harvest with measured head FWs
- Head DW predicted from simulation initiated on first investigation date
- Observed head DW with 95% CI

Plain percentages are observed DM contents; underlined percentages are DM contents calculated from predicted head FWs and DWs.

乾物率が高くなっている場合には、むしろ誤った推定に繋がりがねないことが明らかとなった。

3 結球不良が認められたデータセットへの適用

球内茎伸長や低窒素含有率による結球不良が認められた Anou2005 および Ichishi2005-1 に対して、データセット開始点を起点とするシミュレーションを行ったところ、結球部乾物重については相対誤差が 37.5%、26.5%、結球部生体重については相対誤差が 68.4%、50.9%であり、予想されたとおり、適用が不可であることが確認された。しかし、地上部乾物重については、相対誤差が 3.3%、6.5%と、良く適合しており、結球肥大不良が見られる場合でも、地上部全体の物質生産はほとんど低下していないことが示唆された。

次に、Anou2005 で収穫 39 日前、Ichishi2005-1 で収穫 36 日前に結球部生体重実測データを入力して、シミュレーションを補正したところ、結球部生体重の収穫時推定値の相対誤差 0.8%、5.3%と大幅に向上した。しかし、実測値データ調査時の結球部乾物率はそれぞれ、12.7%、11.7%と結球重の過小評価の要因となりえる高さであった。したがって、上述の推定精度向上は種々の誤差が相殺した結果である可能性は否定できず、結球不良時での適用は避けるべきであると考えられた。

V 摘 要

1) 寒候期キャベツの地上部乾物重、結球部乾物重、結球部生体重の増加を、日射量と日平均気温を入力条件として記述し、結球開始期をシミュレーション開始点とするモデルを、‘松波’ (石井育種場) を供試品種として、開発した。

2) 遮蔽日射量に RUE (日射利用係数) を乗じて地上部乾物重の日増加量とし、結球葉数の関数である DDH (結球部への乾物分配率) を乗じて、日結球部乾物増加量とした。さらに、FDH (結球部生体重増加量の結球部乾物重増加量に対する比) を乗じて日結球部生体重増加量と

したが、FDH は日平均気温の関数とした。

3) 地上部乾物重、結球部乾物重、結球部生体重を相対誤差平均でそれぞれ 4.2%、9.8%、15.4%の精度で推定できた。

引用文献

- 1) 小林和彦 (1994) : 影響評価モデル. 新しい農業気象・環境の科学, 日本農業気象学会編, 190-206, 養賢堂. 東京.
- 2) 小林茂典 (2006) : 野菜の用途別需要の動向と国内産地の対応課題. 農林水産政策研究, 11, 1-27.
- 3) 岡田邦彦, 竹崎あかね, 亀野 貞 (1997) : 日射量がレタスの乾物重増加に及ぼす影響のモデル化. 四國農業試験場報告, 61, 67-73.
- 4) 岡田邦彦. (2014a) : カット用途に適した寒玉キャベツの端境期 (特集 端境期出荷をねらえ!). 農耕と園芸, 69(4), 12-16.
- 5) 岡田邦彦. (2014b) : 加工・業務用キャベツの現状と生産技術について (特集 キャベツの動向と栽培技術). 農耕と園芸, 69(9), 34-37.
- 6) 岡田邦彦. (2014c) : 栽培最適化と出荷予測. 農業情報学会編, スマート農業, 94-96. 農林統計出版, 東京.
- 7) Olesen J. E. and K. Grevsen (1997) : Effects of temperature and irradiance on vegetative growth of cauliflower (*Brassica oleracea L. botrytis*) and broccoli (*Brassica oleracea L. italica*). J. Exp. Bot., 47(8): 1591-1598.
- 8) Shibles, R.M. and C.R.Weber(1966) : Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns, Crop Sci. 6, 55-59.
- 9) Sinclair, T.R. and T. Horie(1989) : Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: A review, Crop Sci. 29, 90-98.
- 10) Sinclair, T.R., T. Shiraiwa and G.L. Hammer (1992):Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation, Crop Sci. 32,1281-1284.
- 11) Stockle, C.O. and J.R.Kiniry (1990) : Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor-pressure deficit, Field Crops Res. 25, 171-181.
- 12) 菅原幸治. (2014) : ジャストインタイムを目指した露地野菜の出荷予測. 農業情報学会編, スマート農業, 97-99. 農林統計出版, 東京.
- 13) Tei F., A. Scaife and D.P.Aikman (1996) : Growth of lettuce, onion, and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. Annals of Bot., 78. 633-643.
- 14) Wilson, J.W. (1981) : Analysis of light interception by single plants, Ann. Bot. 48, 501-505.

Development of a Growth Model for Prediction of Top Dry Weight, Head Dry Weight and Head Fresh Weight of Cabbage Grown in Winter Season

Kunihiko Okada and Hidekazu Sasaki

Summary

We developed a growth model to predict the increase in top dry weight (DW), head DW, and head fresh weight (FW) of winter cabbage. Daily dry matter production is derived from the product of daily intercepted solar radiation and radiation-use efficiency and photosynthate is distributed to the head according to head maturity (head leaf number). Head FW is calculated by assuming that the ratio of FW increase to DW increase of the head is a function of the daily mean air temperature. In simulations from the head formation stage (>2 months before harvest), the model predicted top DW, head DW and head FW with low mean relative errors of 4.2%, 9.8%, and 15.4% respectively.

野菜茶業研究所研究報告 第 15 号

2016年（平成 28 年）3 月 25 日 発 行

発行者 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
野菜茶業研究所 所長 本多健一郎

〒514-2392 三重県津市安濃町草生 360

360 Kusawa, Anō, Tsu, Mie, 514-2392 Japan

Tel (050) 3533-3863

Fax (059) 268-3124

URL <http://www.naro.affrc.go.jp/vegetea/index.html>

印刷所 伊藤印刷株式会社 三重県津市大門32-13

