

博士学位論文

気候変動下の春キャベツおよび秋冬どりダイコン
における生育モデル手法の活用技術開発

Development and application of growth models for spring cabbage and
winter radish under climate change

2021年3月

東京農工大学
生物システム応用科学府
生物機能システム科学専攻

高田敦之

指導教員 豊田剛己教授

目次

要約	4
第1章 序論	
第1節 産地概況	6
第2節 技術開発の変遷	7
第3節 新たな課題	8
第2章 春キャベツの花芽分化期推定モデルに基づく早期抽苔リスクの予測	
第1節 緒言	10
第2節 材料および方法	
1. 栽培概況および気象データ	12
2. サンプルングおよび摘葉処理	13
3. 結球葉数の推定方法	16
4. 花芽分化期予測モデルの作成	17
5. 早期抽苔リスクの予測方法	20
第3節 結果	
1. 葉数と早期抽苔の関係	21
2. 結球葉数の推定	26
3. 花芽分化期予測モデル	30
4. 早期抽苔リスクの予測	33
第4節 考察	
1. 葉数と早期抽苔の関係	38
2. 結球葉数の推定	40
3. 花芽分化期予測モデル	40

4.	早期抽苔リスクの予測	41
第5節	摘要	42
第3章	秋冬どりダイコンにおける生育モデルの開発および地球温暖化の影響評価	
第1節	緒言	44
第2節	材料および方法	
1.	栽培概要	46
2.	生育データおよび気象データ	46
3.	機構的生育モデル	
(1)	葉面積の推定	47
(2)	日射遮蔽量 (DIR) の算出	48
(3)	日乾物生産量 (TDW) の算出	49
(4)	根重の算出	50
4.	温暖化の定量的影響評価	50
第3節	結果	
1.	機構的生育モデル	
(1)	葉面積の推定	51
(2)	日射遮蔽量 (DIR) の算出	55
(3)	日乾物生産量 (TDW) の算出	56
(4)	根重の算出	57
(5)	推定精度の検証	60
2.	温暖化の定量的影響評価	
(1)	温度上昇が収穫期に及ぼす影響	62
(2)	温度上昇が収量に及ぼす影響	62
(3)	日射量の増減が収穫期に及ぼす影響	63
(4)	日射量の増減が収量に及ぼす影響	63

第4節	考察	
1.	機構的生育モデル	65
2.	温暖化の定量的影響評価	67
第5節	摘要	71
第4章	総合考察	72
	謝辞	74
	引用文献	75

要約

本論文は、生育モデルの手法を活用した2つの研究課題から構成される。いずれも世界的な問題になっている地球温暖化や気候変動がキャベツおよびダイコンの生育に及ぼす影響について、現時点では顕在化していない、或いは把握できない影響を定量評価し、「見える化」する試みである。

春キャベツ (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) については、各産地が品種や作期を選択することによって回避している早期抽苔のリスクを予測する手法に関する研究である。抽苔した株は葉数が少ないことが知られていることから、本研究では、花芽分化期の結球葉数と早期抽苔の関係に着目して、日平均気温の積算値に基づく花芽分化期の推定および結球葉数の推定によって早期抽苔の発生予測を行った。その結果、花芽分化期の結球葉数 (> 1 g) が概ね 6.5 枚以下のとき、早期抽苔するリスクが高いことを明らかにし、花芽分化期を推定する DVR モデルおよび結球葉数を推定する一次関数式から早期抽苔リスクの発生を予測する手法を開発した。

秋冬どりダイコン (*Raphanus sativus* L. var. *longipinnatus* L. H. Bailey) については、根部新鮮重の増加を日平均気温、日射量および播種日を用いて予測する機構的モデルに関する研究である。このモデルの構造は、日平均気温データから求める葉面積と日射量データから植物体の受光量を求め、これを日射遮蔽量 (DIR) とし、これに日射利用係数 (RUE) を乗じて日乾物生産量 (TDW) を求めるものである。さらに、葉数の関数である根部分配率および積算温度の関数である根部乾物率から根部新鮮重 (RFW) を求めた。この生育モデルを用い、全球気候モデル MIROC5 および温暖化ガス排出シナリオ RCP8.5 に基づく

2050年の温度条件，さらに日射量を10%増減させて，シミュレーションを行った．その結果，9月7日～10月12日播種（三浦）における2050年の収穫期は6～56日前進，29～212%増収というような定量評価ができることを明らかにした．

第1章 序論

第1節 産地概況

神奈川県東南端に位置する三浦半島地域は、県農業産出額の約2割を占める県内最大の野菜産地である（農林水産省，2018）。冬・春作のダイコン、キャベツ、夏作のスイカ、カボチャ、メロンを主とするアブラナ科野菜とウリ科野菜の輪作体系を特徴としている。黒潮に面した半島地形により冬期温暖であり、トンネルやマルチ資材等の保温資材を使用しない露地栽培でダイコンとキャベツの2作が秋から春にかけて生産され、全国有数の土地利用型農業が営まれてきた。冬・春作は、競合産地が限られ、病虫害発生が少ない時期でもあり、いずれも全国5位の生産量となるダイコン、キャベツの高い収益性が農家経営の柱となっている（農林水産省，2016）。産地の歴史は古く、天保12年（1841年）の相模風土記にダイコン栽培の記録がある（三浦半島農業改良協議会，2014）。明治時代に在来の高円坊ダイコンと練馬ダイコンの交雑改良が進み、大正14年には東京市場に出荷されて「三浦ダイコン」の名が付けられている（三神，2010）。現在では、生産量の約99%が民間種苗会社育成の青首ダイコンになっているが、三浦ダイコンの特徴である緻密な肉質と食味のよさから、今も正月需要に欠かせない人気食材となっている（三神，2010）。一方、キャベツの栽培は、明治25年頃からといわれている（かながわ昭和農業史，1992）。主に11～3月に収穫する早春キャベツと4～5月に収穫する春キャベツがある。昭和40年に導入された‘金系201号’（（株）サカタのタネ）は、食味のよさや作りやすさなどから半世紀を過ぎた現在でも春キャベツの主力品種である。このようにダイコン、キ

ヤベツが長期に渡り連作され、全国有数の産地として維持、発展してきた要因には、恵まれた気象条件や土壌条件に加えて、生産者や関係機関のたゆまぬ技術開発の歴史があった。

第2節 技術開発の変遷

冬・春作のアブラナ科野菜と夏作のウリ科野菜という輪作体系の中で、夏作にはスイカ、カボチャ、メロンの他に緑肥栽培も盛んである。その契機となったのが、昭和40年代に問題になったダイコンのネグサレセンチュウ被害であった。耕種的防除法としてマリーゴールドの効果が明らかにされ、昭和49年から全国に先駆けて現地導入されている(近岡ら, 1971;大林, 1989;大林, 1990)。平成5年頃には、直播可能でネグサレセンチュウ抑制効果をもつエンバク野生種‘ヘイオーツ’が導入され、さらに表土の流亡対策や硝酸態窒素溶脱抑制の観点から緑肥栽培が推進され(三浦半島農業改良協議会, 2014;高田ら, 2015)、センチュウ防除に関する様々な研究が続けられてきた(Satoら, 2009;Wadaら, 2011;Satoら, 2011)。一方、昭和40年代以降は、スイカやメロンにおける急性萎凋症が度々問題になり、主たる要因とされたホモプシス根腐病が熱に弱いことから太陽熱消毒が導入され、現在も定着している(三浦半島農業改良協議会, 2014)。また、三浦半島の土壌は、ダイコン萎黄病(*Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani*)の発生を抑制する病害抑止土壌といわれ、長年の完熟牛ふん堆肥やCa資材の連用により放線菌や細菌などの有用微生物相が豊富になることで拮抗作用が誘起されたことが示唆されている(小林, 1992;小林, 1995;小林・駒田, 1983)。このように、輪作体系を基本としながら牛ふん堆肥等の有機質資

材を積極的に投入し、生産者と関係機関が一丸となって土作りに尽力してきたことで連作障害を回避し、産地が維持されてきたと考えられる。

第3節 新たな課題

ダイコン、キャベツに関する新たな課題として、三浦半島農業改良協議会（2014）は、次のように提示している。ダイコンでは、根部内が青くなる青変症の発生や気候変動下の安定生産への対応、キャベツでは、気候変動下における早期抽苔の発生や加工・業務対応などである。青変症は、昭和40年代にも三浦ダイコンでの発生が問題になっていたが（大林・平石，1974）、2008年以降、再び問題視されるようになり（三浦半島農業改良協議会，2014）、北海道や石川県のダイコン産地でも問題になっている（黒崎ら，2000）。青色物質については、永田ら（2012）、寺西ら（2015）によって、アントシアニンとは別の原因物質が特定され、発生条件等も明らかにされている（Teranishi・Nagata，2018；池下ら，2010；高田・増田，2016；永田，2021）。一方、キャベツについては、柔らかくてみずみずしく美味しい春系キャベツの産地ブランドを確立してきたため、主に肉厚で固く締まった寒玉系キャベツが使われる加工・業務用途には対応してこなかった。しかしながら、野菜消費に占める加工・業務用需要の割合が過半を占めるようになり、特に4～5月どりキャベツは、寒玉系キャベツが抽苔の問題から生産できないため、2～3月に収穫した寒玉系キャベツを低温貯蔵して4～5月需要に対応している実態がある（小林 2006）。近年、4～5月どりの寒玉系品種育成が盛んになってきたことから、三浦半島における4～5月どり新作型が研究され、加工適性や品質面の評価も行われた（Taniwaki ら，2009；

Kohyama ら, 2008a ; Kohyama ら, 2008b ; 玉木・高田, 2010 ; 永田, 2012 ; 高田ら, 2014).

これらの取り組みは現在も継続されているが, その一方で, 地球温暖化が進むことで気温の上昇, 雨量の増加, 海面上昇のほか異常気象の頻度が増すといわれており (大山, 2006), こうした気候変動下におけるダイコンの安定生産やキャベツの早期抽苔への対応が求められている. 前述のとおり, 三浦半島では, 露地栽培でダイコン, キャベツを生産しているため, 気象の影響を受けやすい. 過去の研究では, キャベツで問題になっていた腐敗病について, 気象災害の観点から凍害との関係を詳しく調べ, 原因と対策が明らかにされている (五十嵐・大林, 1985 ; 五十嵐, 1994). 本論文にまとめた2つの研究テーマは, このような先人らの絶え間ない努力に敬意を表し, その功績を将来に継承する思いで課題化したものでもある. 第2章に取りまとめたキャベツ早期抽苔の発生予測については, 平石 (1966) が当時問題になっていたキャベツ早期抽苔と葉数との関係を詳細に調べた結果を基に, 予測法に発展させたものである. キャベツの早期抽苔は, 現在でも各産地にとって重要な問題となっており, 特に地球温暖化や気候変動の影響が危惧されているものである. また, 第3章については, 平石ら (1979) が当時の三浦半島地域で主流であった地域ブランド品種‘三浦ダイコン’を対象に作成した生育予測法を現在主流である青首品種用に改良したものである. PC の普及や気象データを比較的容易に計測できるようになったことから, より簡便に, より高い精度で収量を予測したり, 地球温暖化や気候変動による影響を予測する手法を検討したものである.

第2章

春キャベツの花芽分化期推定モデルに基づく 早期抽苔リスクの予測

An empirical method for diagnosing premature bolting risk in spring cabbage by estimating the flower bud differentiation period

第1節 緒言

キャベツ (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) は、消費量、生産量ともに国内主要野菜の中で最も多く (総務省, 2017; 農林水産省, 2017a), 安定供給上極めて重要な品目である。産地リレーによって周年供給されており, 収穫時期によって春キャベツ, 夏秋キャベツ, 冬キャベツの作型に区分することができる (福地, 1996)。主に4~6月に出荷される春キャベツは, 渥美半島, 房総半島および三浦半島が主産地である。緑植物春化型植物であるキャベツは, ある大きさの苗が低温に一定期間遭遇することにより花芽分化し, 分化後の長日条件によって抽苔がやや促進される特性をもっている (岩間, 1972; Ito・Saito, 1961)。花芽分化とは, 肥大・肥厚した茎頂の基部に側花序または頂花序の原基が分化することと定義されている (藤目, 1992)。秋に播種し, 低温期を経て, 春に収穫する春キャベツは, 花芽分化を経て抽苔するリスクの高い作型である (福地, 1996; 岡本, 2002; Ngwenya, 2016)。抽苔リスクを考えるうえで, 花芽分化の条件となる低温感応する植物体の大きさ, 低温感応期間が重要となる (江口, 1950; ITO・SAITO, 1961; 岩間, 1972; 松原・飛高, 1940; 戸苅, 1954)。低温感応する植物体の大きさについて, 葉数25枚以下では低温下でも花芽分化しない (松原・飛高, 1940), 茎径6mmでは, 9°C, 約40日で花芽分化するが, 茎径8mmでは, 9°C, 約30日で花芽分化する (ito・saito, 1961) などの報告がある。すなわち, 花芽分化に必要な低温感応期間は, 苗の茎

径が大きいほど低温感応期間が短くなり (ito・saito, 1961), また, 同じ苗の大きさであっても, 低温感応期間には品種間差があることが知られている (江口, 1950; 岩間, 1972; 松原・飛高, 1940). 植物が葉を分化し続ける栄養成長相から, 花芽分化し, 生殖成長相へと相転換する時期については, 種々の予測モデルが開発されている. イネの出穂期を予測するモデル (川方・岡田 1989; 堀江・中川 1990), ダイズの開花期を予測するモデル (鮫島, 2000), ナシの開花日を予測するモデル (安達ら, 2018) などである. キャベツに関しては, 花芽分化と低温や植物体の大きさの関係を調べたもの (江口, 1950; 松原・飛高, 1940; Ito・Saito, 1961), 花芽分化期の理論値に関する研究 (平石, 1966) がある. 本章で開発したモデルは, 平石 (1966) が春キャベツ品種‘金系 201 号’を供試した作期移動試験の結果, 播種後の有効積算温度 (基準温度 7°C) が 750°C に達して以降, 日平均気温 14°C 以下の遭遇期間が 30 日間で花芽分化するとした仮説に準拠している.

春キャベツの主産地である三浦半島では, 早期抽苔が生産上の最大の問題といわれている (岡本, 2002). 早期抽苔とは, 花芽分化したキャベツが収穫期を迎える前に抽苔する現象である. 不結球になる場合もあるが, 本章では, 結球内部で抽苔し, 外観から判別できないまま出荷されるケースを想定している. 近年増加している加工業務においても, カットキャベツの製造工程中に抽苔によって形成された花茎や花蕾が混入して取引停止などの重大なクレームになるケースが問題になっている (農畜産業振興機構, 2019; 小林, 2006). 早期抽苔は, 早まきや早植えなどにより冬期の生育が進み過ぎると低温感応の鈍い品種でも花芽分化し, 結球に必要な葉数が確保できず発生するといわれている (福地, 1996). そのため, 春キャベツ産地では, 早期抽苔の回避と良品の安定生産のために, 各地域の気象条件に合った品種や作期を選定している. 平石 (1966) は, ‘金系 201 号’を供試して行った試験の結果, 分化総葉数が抽苔株で 52.5 枚, 結球株で 71.6 枚であったことから, 十分な葉分化 (60 枚以上) があれば正常に結球すると報告している. 三浦半島の場合では, 昭和 50 年代は, 9 月 11 日~20 日の間の播種が早期抽苔危険日で, 9 月 25 日前後が播種適期とされていたが, 暖冬の影響で播種適期が年々後退し, 2002 年

頃には、10月初旬以降に播種して早期抽苔を回避している（岡本，2002）．日本の温暖化については、21世紀末と20世紀末との比較で、年平均気温が4.5℃上昇（全国平均）という予測がある（気象庁，2017）．各産地では、こうした長期的な気候変動や年々に発生する極端な異常気象に対応し、安定生産に努めなければならない．しかしながら、キャベツの早期抽苔を回避する播種適期に関する研究報告は、平石（1996）や Ngwenya（2016）など比較的少ない．

本章では、花芽分化や抽苔への影響が大きい温度に着目して、春キャベツにおける花芽分化期の結球葉数と早期抽苔の関係解析、結球葉数の推定法および花芽分化期予測モデルの開発により、早期抽苔を回避する手法を検討した．外観での判別が困難なため出荷時に除去できないことから、播種前あるいは生育途中で早期抽苔リスクを予測することが重要と考えている．こうした出荷前予測により、抽苔が進む前に出荷することや他産地との集荷調整ができるなど、産地と実需者の双方に役立つことが期待される．

第2節 材料および方法

1. 栽培概況および気象データ

本章では、平石（1966）が花芽分化期の推定に供試した春キャベツの代表的品種‘金系201号’（（株）サカタのタネ）を供試した．2010～2014年の各9～10月にかけて3～4回、延べ17回播種して、神奈川県農業技術センター三浦半島地区事務所内の露地圃場（三浦市初声町、年平均気温15.8℃、年平均降水量1,557mm）で栽培した．各年の耕種概要は、概ね同じとした．施肥は、1a当たり牛ふん堆肥100kg、石灰肥料10kg（CaO34%）、苦土肥料4kg（MgO25%）、基肥としてN：P₂O₅：K₂O=1.0：2.6：1.0kg、追肥としてN：P₂O₅：K₂O=1.4：0.0：1.4kgを施用した．ダゾメット剤処理した育苗ベッドで地床育苗を行い、苗齢が本葉4～5葉期に畝間51cm、株間33cm（栽植密度594.1株/a）で定植した．定植時にはネオニコチノイド系殺虫剤（有効成分：クロチアニジン0.5%またはチア

メトキサム 0.5%またはイミダクロプリド 1%) の粒剤を処理し、生育中は神奈川県発行の「病害虫雑草防除指導指針」に準じて、殺菌剤および殺虫剤を 3~6 回散布した。気温および降水量は、所内に設置されている地域気象観測システム (AMeDAS) のデータを用い、日射量は、所内に設置されている農林水産情報センターのデータを用いた。なお、相関係数 (r)、決定係数 (R^2)、 p 値、信頼区間 (95%CT)、平均平方二乗誤差 (RMSE) 等の統計分析およびパラメータ最適化のためのソルバー機能に、Microsoft Excel ver.2004 を用いた。

2. サンプリングおよび摘葉処理

定植~収穫期に 6~10 回、各 6 株のキャベツ地上部をサンプリングし、葉数、結球重、花芽分化程度、抽苔程度を調査した。花芽分化期までの主要なデータセットを表 2-1 に示した。この他に、収穫期の抽苔程度について、1 回当たり 30 株程度をサンプリングして複数回調査した。前述のとおり、大きさの指標には茎径や葉数が使われている (ito・saito, 1961; 松原・飛高, 1940)。キャベツ苗の茎径を測定する際、子葉 (cotyledon) 周辺から根部にかけて細くなっていることが多いため、測定部位のわずかな違いで茎径が大きく変わる可能性がある。また、キャベツと同じ緑植物春化型植物であるネギでは、葉鞘径は生育環境による変動が大きく、葉数は条件にかかわらず安定しており、指標としては葉数が適切との報告がある (山崎ら, 2012)。そこで本章では、花芽分化期の指標を葉数とし、葉数との相関が高い積算温度で生育ステージを表すこととした。葉数は、外葉と結球葉に分け、結球葉は 1g 以上 (以下, >1g とする) と 1g 未満に分け、1g 未満の計測は 2013 年および 2014 年のみ行った。1g 未満の葉のうち極微細な葉は、茎頂部を实体顕微鏡 (7~30 倍) で観察し、成長点の側方に形成されたこぶ状のものを含めて分化葉とした。なお、出荷時のキャベツには、結球部に 1~2 枚の外葉をつけるため、これらの外葉を含めて結球葉とした。すなわち外葉は、サンプリングしたキャベツ地上部から 1~2 枚の外葉をつけた結球部を除いた部分に相当する。また、収穫時点で脱落していた落葉数は、全生葉数に含めなかった。なお、落葉数を推計するため、2010~2013 年

のうち、収穫始期および収穫期の外葉データが揃う 16 データを用いて、収穫期と収穫始期の外葉数の差を落葉数とした。さらに、2010 年の結球葉数 (>1g) は、2014 年の 9 月 29 日播種、9 月 26 日播種、9 月 29 日播種および 10 月 2 日播種の 176 データから 1 cm 以上と 1 g 以上の結球葉数の関係式から推定した。花芽分化程度は、成長点を実体顕微鏡 (7~30 倍) で検鏡し、江口 (1950) の区分に基づき形態的に未分化を 0, 分化初期を 1, 分化期を 2, 分化中期を 3, 分化後期を 4 と決定し、調査株 6 株のうち 3 株 (50%) 以上が 2 以上となった日を花芽分化期とした。抽苔程度は、結球部を縦に 2 等分割し、断面の観察により 0~4 の 5 段階に区分した (図 2-1)。芯の伸長が正常範囲にあり、側枝および花蕾が観察されない状態を 0, 芯の伸長および側枝がわずかに観察される状態を 1, 芯の伸長および側枝が 1 より目立つ状態を 2 とした。さらに芯の伸長が著しく、側枝や花蕾が目立ち、結球部の充実が悪い状態を 3, 芯が結球上部まで伸長し、側枝や花蕾が目立ち、結球部の充実が悪い状態を 4 とし、3 および 4 を出荷不能とした。調査株 6 株のうち 1 株 (17%) 以上が 3 または 4 の場合を早期抽苔と判定した。この他にを行った抽苔調査においても、調査株数にかかわらず、17%以上が 3 または 4 の場合を早期抽苔と判定した。また、葉数と早期抽苔の関係を詳細に調べるため、摘葉試験を 2013 年および 2014 年に行った。2013 年の 3 作期 (播種日: 9 月 24 日, 9 月 27 日, 9 月 30 日, データセット 10~12) の各 200 株について、各々花芽分化期前の 11 月 12 日, 11 月 19 日, 11 月 25 日に外葉を 5 枚摘葉 (9 月 30 日播種のみ 11 月 25 日に 5 枚摘葉, 花芽分化期後の 1 月 14 日に全 9 枚の 2 水準) を行い、収穫時の葉数, 抽苔程度を各播種日において 72~96 株調査した。2014 年は、4 作期 (播種日: 9 月 24 日, 9 月 26 日, 9 月 29 日, 10 月 2 日, データセット 14~17) の各 75~250 株について、花芽分化期後 (9 月 24 日播種, 9 月 26 日播種) または花芽分化期前 (9 月 29 日播種, 10 月 2 日播種) の 2015 年 1 月 6 日に外葉 5 枚摘葉を行い、収穫時の葉数, 抽苔程度を各播種日において 54~90 株調査した。

表2-1 キャベツ生育の17データセット

データ セット 名	播種日	調査日	播種～調 査日まで の日数	結球葉数 (>1g)	積算温度 ^z (°C)	花芽分化 割合(%)	花芽分 化期 ^y	抽苔 割合 (%)	収穫期	結球部 新鮮重(g)
1	2010/9/27	12/10	74	(5.7) ^x	1,178	0				
		12/27	91	(11.6)	1,349	83	12/21	0	3/8	1,275
		1/5	100	(16.2)	1,413	100				
2	2010/9/30	12/21	82	(6.7)	1,230	0				
		12/27	88	(9.0)	1,290	17	1/2	0	3/15	1,325
		1/5	97	(10.1)	1,355	67				
		1/12	104	(10.5)	1,396	100				
3	2010/10/4	1/14	102	(8.6)	1,326	0				
		1/27	115	(11.6)	1,397	17	2/1	0	3/23	1,676
		2/2	121	(13.7)	1,424	67				
		2/10	129	(15.1)	1,483	50				
4	2011/9/9	11/30	82	11.3	1,555	0				
		12/14	96	16.3	1,691	17	12/27	0	2/16	1,114
		1/16	129	21.5	1,899	100				
5	2011/9/29	12/8	70	5.7	1,152	0				
		12/26	88	8.5	1,288	100	12/16	0	3/27	1,494
		1/30	123	22.5	1,472	100				
6	2011/10/3	12/14	72	4.7	1,119	17	12/25	100	3/27	1,464
		1/11	100	8.2	1,302	100				
7	2012/9/24	12/17	84	4.5	1,269	33				
		12/19	86	6.7	1,289	100	12/18	100	3/22	1,760
		12/25	92	7.5	1,326	100				
8	2012/9/28	12/17	80	4.7	1,184	67				
		12/19	82	4.8	1,204	50	12/17	50	3/29	1,885
		12/21	84	5.2	1,216	50				
		12/25	88	6.2	1,241	67				
		12/28	91	7.2	1,257	83				
9	2012/10/1	12/25	85	4.7	1,170	0				
		12/28	88	5.8	1,185	33	1/4	33	3/22	1,592
		1/4	95	6.5	1,239	50				
		1/10	101	7.5	1,267	83				
10	2013/9/24	1/15	106	8.3	1,296	83				
		12/6	73	5.3	1,201	83	no data	0	3/11	1,365
		12/17	84	8.0	1,308	100				
11	2013/9/27	12/6	70	2.2	1,135	0				
		12/10	74	3.3	1,176	50				
		12/17	81	4.8	1,241	67	12/10	83	3/31	no data ^w
		12/25	89	5.5	1,298	83				
		1/6	101	7.5	1,388	83				
12	2013/9/30	12/25	86	5.2	1,238	17	12/31	33	3/26	1,827
		1/6	98	8.0	1,328	83				
13	2013/10/7	3/27	171	20.3	1,755	33				
		4/4	179	22.3	1,867	50	4/4	0	4/4	1,344
		4/14	189	27.5	1,992	83				
14	2014/9/24	12/9	76	3.2	1,231	17				
		12/15	82	3.5	1,285	50	12/15	37	3/19	1,459
		12/22	89	4.3	1,332	83				
		1/5	103	8.2	1,423	100				
15	2014/9/26	12/9	74	0.8	1,186	0				
		12/15	80	1.8	1,239	17				
		12/22	87	1.8	1,286	50				
		1/5	101	5.0	1,377	17	12/22	39	3/27	1,441
		1/13	109	5.8	1,434	33				
		1/27	123	7.2	1,531	67				
16	2014/9/29	2/10	137	9.8	1,605	67				
		2/16	140	9.0	1,584	0				
		3/3	155	12.2	1,705	33	3/16	0	4/1	1,587
17	2014/10/2	3/26	178	19.2	1,932	67				
		3/3	152	12.2	1,640	17	3/16	3	4/2	1,548
		3/26	175	20.3	1,867	83				

^z積算温度は、播種日から調査日前日までの積算とした。^y花芽分化期は、調査個体の50%が分化した日と定義した。^x2010（データセット1-3）の結球葉数は、結球葉数 (>1 cm) から推定した。

^w3月26日の結球部新鮮重は、1,558 gであった。

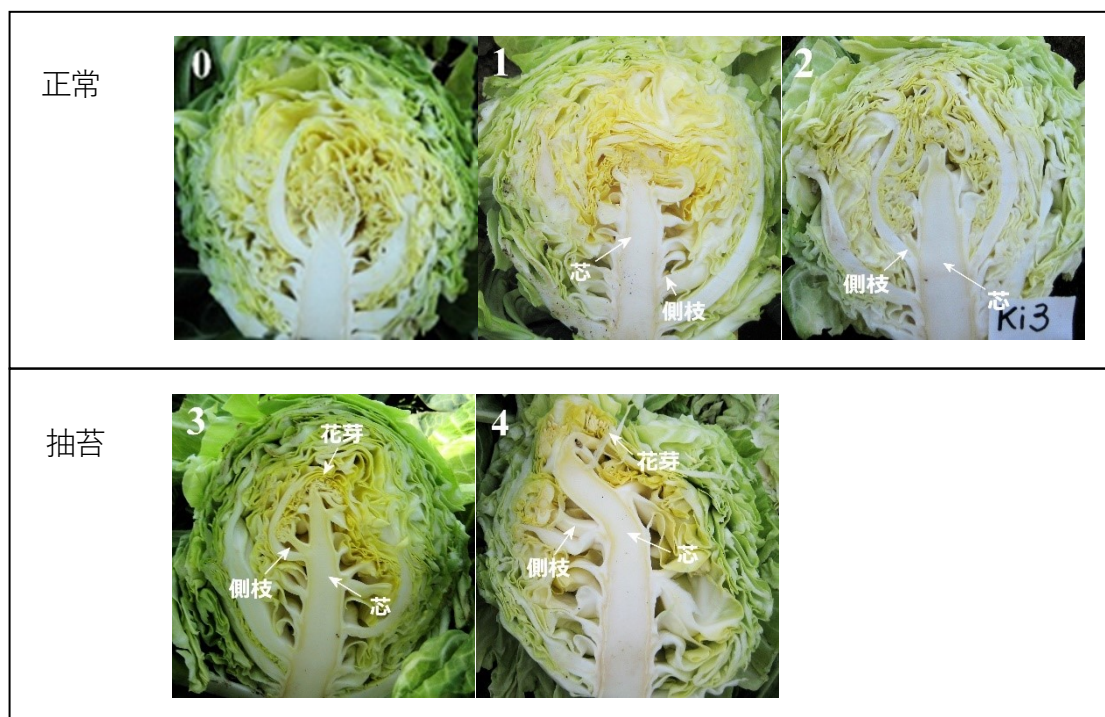


図 2-1 キャベツ縦断面における抽苔程度

- 0: 芯の伸長なし，側枝および花芽がみられない
- 1: 芯および側枝がわずかに伸長している
- 2: 芯の伸長および側枝が1より目立つ
- 3: 芯の伸長が著しく，側枝または花蕾が目立ち，結球が不完全（出荷不能）
- 4: 芯が結球上部まで伸長し，側枝または花蕾が目立ち，結球が不完全（出荷不能）

3. 結球葉数の推定方法

キャベツの葉は，外葉，結球葉に大別でき，2013～2014年は1g未満の葉数も計測した。1g未満の計測は実体顕微鏡を用いる必要があり，より簡便な推定モデルを開発するため，1g以上の結球葉数を推定する方法を検討した。キャベツの葉数推定に関しては，日平均気温の一次回帰式による葉齢増加モデルがある（岡田・佐々木，2016；岡田・菅原，2019）。一方，べたがけ下のハウレンソウにおける葉の展開，伸長速度に対して，温度環境だけでなく土壌水分の影響が大きいとの報告（浜本，1992）や三浦ダイコンの根重推定に気温，日射量および降水量との相関を求めた報告（平石ら，1979）があることから，データセット7～17を用いて，気温，日射量および降水量と結球葉数(>1g)との相関を調べた。また，基準温度を5℃とした平均気温法でタマネギの展葉数を推定す

る報告（白木ら，2019）を参考に，有効積算温度の基準温度についても検討した。すなわち，基準温度を0～7まで1℃ずつ変えて，結球葉数（>1g）と有効積算温度の相関が最も高くなる条件を決めた。なお，積算温度は，播種日からサンプリング前日までの日平均気温を積算して求めた。これらの結果を基に，結球葉数（>1g）を(1)式から求めることとした。ここでyが結球葉数（>1g），xは積算温度，aおよびbはパラメータとした。続いて，2012年（データセット7～9），2013年（データセット10～13）および2014年（データセット14～17）の各年の積算温度に対する出葉速度を求め，3か年の平均値をaとした。さらに，各年における結球初期の任意のサンプルデータを使い，結球葉数，積算温度を入力して年ごとにbを求めた。なお，用いるサンプルデータは，極端な生育ではない平均的な1データを選んだ。

$$y = ax + b \quad \dots (1)$$

4. 花芽分化期予測モデルの作成

本章では，平石（1966）が播種後の有効積算温度（基準温度7℃）により花芽分化期を推定する考え方に準拠している。ただし，川方（1998）がイネの出穂期を有効積算温度で予測する問題点として指摘しているように，日長反応が考慮されていないこと，高温障害や低温障害などの温度条件を含めると，例えば積算温度は増えても高温障害で生育が遅延するというように気温と発育の関係は非線形になるといった問題点がある。キャベツの花芽分化は，日長に影響されないといわれているため（岩間，1972），1つ目の問題点は無視できるが，2つ目の問題点が残る。そこで，花芽分化期を予測するにあたり，非線形にも対応できるモデルとして，de Witら（1970）が定義した発育ステージ（development stage；以下DVS）および発育速度（developmental rate；以下DVR），さらにこの概念を水稻の出穂期予測に適用した発育指数（developmental index；以下DVI）の概念（川方，1998；堀江・中川，1990）を利用して，日平均気温から花芽分化期を予測する方法について検討した。de Witら（1970）は，トウモロコシの実験において，葉の成長能力がその齢に依存するとして，定量的に表現する発育ステージ（development stage；

以下 DVS) という概念を考案した。出芽時の DVS を 0, 出穂時を 1 とし, その間の 1 日ごとの発育速度 (developmental rate; 以下 DVR) から定量できるとした。堀江・中川(1990) は, イネの幼穂分化, 出穂, 成熟などの発育現象は, ある量的な変化の積算値がある一定の値となったときに質的变化となって現れると考えた。これと同様に, キャベツの花芽分化についても, 播種後の栄養成長期 (vegetative phase) は量的な変化が進行し, その変化の積算値がある一定の値となったときに生殖生長相 (reproductive phase) に相転換し, 花芽分化という質的变化が現れると考えた。そこで, 播種 n 日後の花芽発育指数 (DVI) は, その間の発育速度 (DVR) を積算したものとし, 播種時の DVI=0, 花芽分化期の DVI=1 と定めることにより, (2)式で表すことができる。ここで DVR_i は播種後 i 日目の発育速度, DVI は播種後 n 日目の発育指数である。

$$DVI = \int_0^n DVR dt \cong \sum_{i=0}^n DVR_i \quad \dots (2)$$

キャベツの播種から花芽分化期までは, 環境に対する反応が等質とみなせる栄養成長相 (vegetative phase) と仮定した。前述のとおり, 春キャベツでは, ある大きさの苗が低温に一定期間遭遇することで花芽分化する (岩間, 1972)。そこで, 低温感応可能となる苗の大きさを感応ステージ係数 (response to cold treatment stage parameter; 以下 RS) とし, 低温係数 (chilling parameter; 以下 C), 低温遭遇時間 (chilling hour; 以下 CH), 温度に対する生育応答に関する係数 (growth response parameter; 以下 GR) を設定して, DVR を(3)式で表すこととした。なお, 少ないパラメータでの予測モデル開発を目的としていることから, 日平均気温 (daily mean air temperature : °C; 以下 T) 以外の環境要因の影響は無視する。また, 低温感応が始まって花芽分化するまでの期間である低温遭遇時間 (CH) は, 日単位とした。

$$DVR = \frac{1}{RS \times C \times GR} \cdot \frac{1}{CH} \quad \dots (3)$$

次に, 各パラメータの関数について述べる。苗の大きさは, 葉数や茎径で表すことができるが, ここでは平石 (1966) が行った播種後の有効積算温度で表す方法を適用した。また, 岡田・佐々木 (2016) がキャベツの日射利用係数を日平均気温のシグモイド関数

とした手法を参考に、植物体の低温感応性はある大きさに達する前後では緩やかに変化すると仮定してシグモイド関数を用い、(4)式から感応ステージ係数 (RS) を求めた。

$$RS = \frac{RS.top - RS.base}{1 + \exp\left(\frac{RS.mid - T}{RS.tange}\right)} + RS.base \quad \dots (4)$$

低温感応する温度域については、ダイコンの‘耐病総太り’ (タキイ種苗 (株)) を用いた変温条件での実験で、2~5°Cで低温感応が高く、上限が12.5°C前後との報告がある (北田, 1993)。また、多くの春化植物は、春化後25°C以上の高温に遭遇することで花芽形成の阻止または遅延する脱春化が起こる (藤田, 1993)。本章における春キャベツの作型では、花芽分化後の冬期 (12~2月) に高温条件になることがないことから、脱春化の可能性は無視した。低温になるに従い低温感応性が高まると仮定したシグモイド関数を用い、(5)式から低温係数 (C) を求めた。

$$C = \frac{C.top - C.base}{1 + \exp\left(\frac{C.mid - T}{C.tange}\right)} + C.base \quad \dots (5)$$

キャベツのように最適温度帯がある作物では、生育適温とされる15~20°Cの生育速度 (DVR) が高く、特に結球期から収穫期の生育速度は温度による影響が大きい (武田・加賀屋, 1999)。したがって、花芽分化に低温遭遇が必要な反面、低温に伴って生育速度も低下すると考えられる。そこで、生育応答係数 (GR) は、ある温度を変曲点として、温度低下とともに緩やかに低下すると仮定したシグモイド関数を用い、(6)式から求めた。

$$GR = \frac{GR.top - GR.base}{1 + \exp\left(\frac{GR.mid - T}{GR.tange}\right)} + GR.base \quad \dots (6)$$

また、前述のとおり、低温感応が始まって花芽分化するまでの期間である低温遭遇時間 (CH) は、日単位とした。一方、花芽分化期の実測値は、成長点の検鏡が必要なことから、定期的な抜き取り調査により求めた。江口 (1950) は花芽分化期を例えば1月15日というように特定している。また、リーフレタスの例では、花芽分化前後の花芽発育段階と生育日数との関係から分化日を推定しているが (刀祢, 1988)、いずれもその定義

に関する具体的な記載がない。この他に、軟弱野菜を10日毎に検鏡し、花芽分化の様相から10日間隔で分化期を決める方法(岩見, 1983)、ネギにおいては、花芽分化期を特定せず、分化率のみを表す方法(山崎ら, 2012)などがある。本章では、花芽分化期を特定する必要があるため、前述のとおり、調査株の50%が分化した日を花芽分化期と定義した。

5. 早期抽苔リスクの予測方法

早期抽苔に葉数不足が深く関係していることは、以前から知られている(福地, 1996; 平石, 1966)。本章では、相転換する花芽分化時点の結球葉数に着目し、早期抽苔リスクを予測する方法を検討した。また、実用的かつ正確な計測が可能になるよう、1g以上の結球葉数を使って予測する方法とした。

はじめに、2010~2014年における三浦半島地域の気象データおよび生育データから結球葉数(>1g)および花芽分化期の推定式を作成した。この推定式を用いて、2019年の抽苔リスクを予測する方法について検討した。次に地域気象観測システム(AMeDAS)の日平均気温データを入力した。さらに、春キャベツの主たる播種時期の前後1か月間(9月10日~10月10日)について、5日ごとの播種日を花芽分化期予測モデルに入力した。各播種日について、播種日から花芽分化期前日までの積算温度を求め、その積算温度データから結球葉数(>1g)を求めた。なお、実際には栽培しているキャベツの結球初期のサンプルデータで補正するが、このシミュレーション上は、2012~2014年の平均値からパラメータaおよびbを算出し、前出の(1)式、 $y=ax+b$ に当てはめた。ここでyは結球葉数(>1g)、xは播種後積算温度を示す。

このように求めた各播種日における播種日から花芽分化期前日までの積算温度と結球葉数(>1g)との関係式を求め、早期抽苔リスクが高いと考えられる結球葉数(>1g)からリスクの高い播種日をシミュレートした。

第3節 結果

1. 葉数と早期抽苔の関係

データセット 10~17 の 437 株（うち 179 株が摘葉処理, 258 株が無処理）について、収穫時の全生葉数（外葉数+結球葉数, 落葉数は含まず）と抽苔程度の間を調べた。結球葉数に 1g 未満を含む場合では、全葉数が 48 枚以上では抽苔程度が 1 または 2 となり、抽苔程度が 3 または 4 になるのは、すべて 47 枚以下の場合であった（図 2-2-A）。それに対し、結球葉数に 1g 未満を含まない場合では、一定の傾向が見られなかった（図 2-2-B）。そこで、全葉数（結球葉に 1g 未満を含む）について、正常（抽苔程度 0-2）と抽苔（抽苔程度 3, 4）に分けて比較したところ、摘葉処理の有無にかかわらず、48 枚以上の抽苔率は 0.3% のみ（1/345 株）、47 枚以下では 54%（50/92 株）で抽苔が認められた（図 2-3）。一方、抽苔と結球重との関係について図 2-4 に示した。収穫時の結球重と全生葉数の相関係数は $r=0.22$ 、結球重と抽苔程度の相関係数は $r=0.35$ で、いずれも相関は認められなかった。なお、収穫始期と収穫期の外葉数の差を落葉数として推定したところ、 $5.3 \pm 1.9(\text{SD})$ 枚であった（表 2-2）。また、結球葉数 ($>1\text{g}$) と結球葉数 ($>1\text{cm}$) の関係は、 $y(\text{結球葉数}, >1\text{g}) = 0.878x(\text{結球葉数}, >1\text{cm}) - 2.231$ ($R^2=0.99, p<0.001$) で表せることから、データセット 1~3 の結球葉数 ($>1\text{g}$) を結球葉数 ($>1\text{cm}$) から推定して求めた（表 2-1, 図 2-5）。

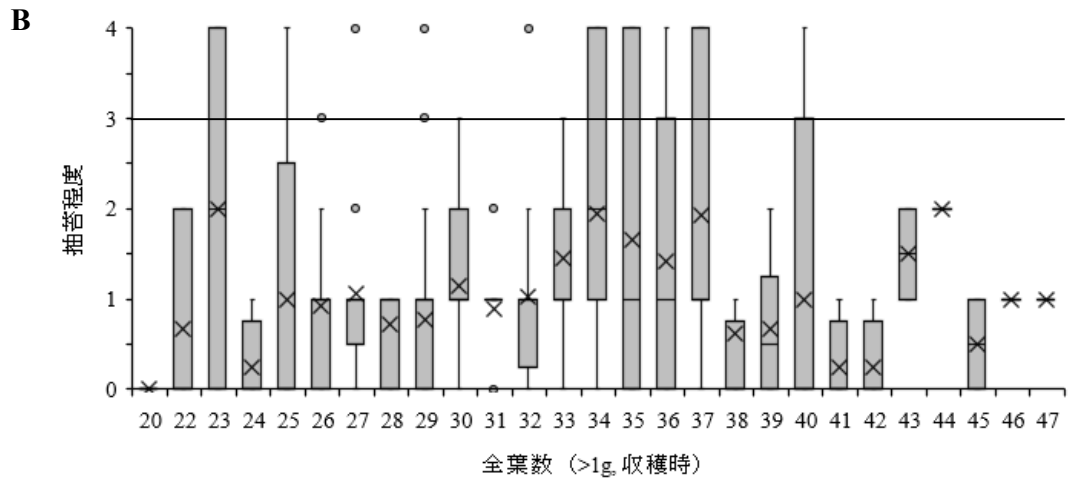
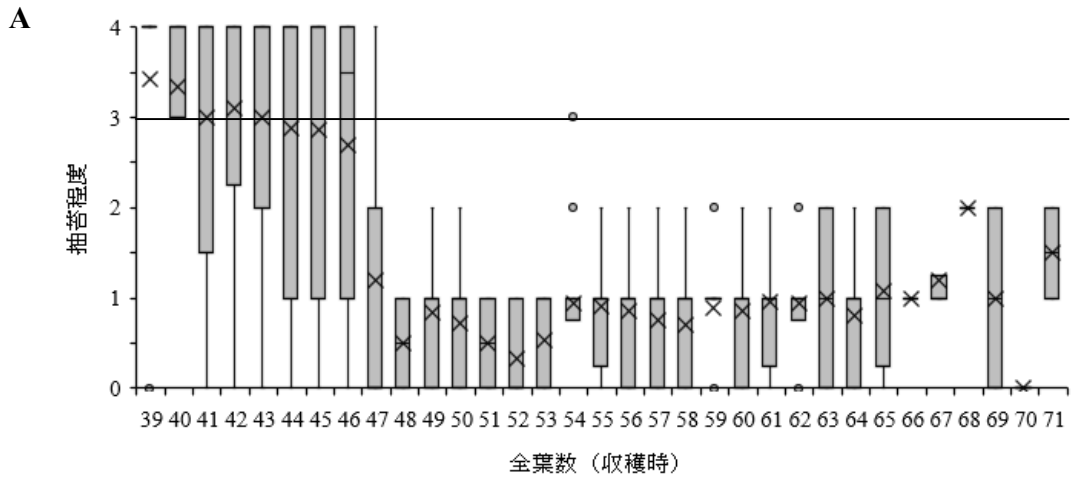


図 2-2 収穫時の葉数と抽苔程度の関係

表 2-1 のデータセット 10-17 から作成 (摘葉処理 $n=179$, 無処理 $n=258$).

A: 全葉数に 1g/枚未満の葉を含み, 落葉は含まない.

B: 全葉数 (>1g) に 1g/枚未満の葉および落葉は含まない.

×: 平均値

●: 外れ値

図中の横線は, 抽苔程度 3 を示す.

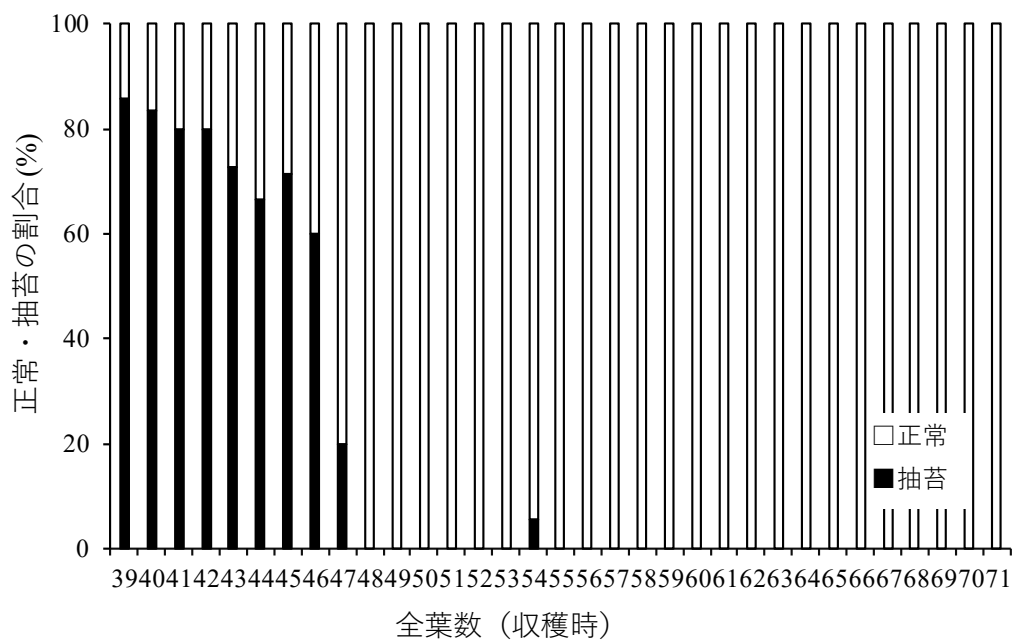


図 2-3 収穫時全葉数と抽苔の関係

表 2-1 のデータセット 10-17 から作成 (摘葉処理 n=179, 無処理 n=258).

全葉数に 1g/枚未満の葉を含み, 落葉は含まない.

□: 正常 (抽苔程度: 0-2), ■: 抽苔 (抽苔程度: 3, 4).

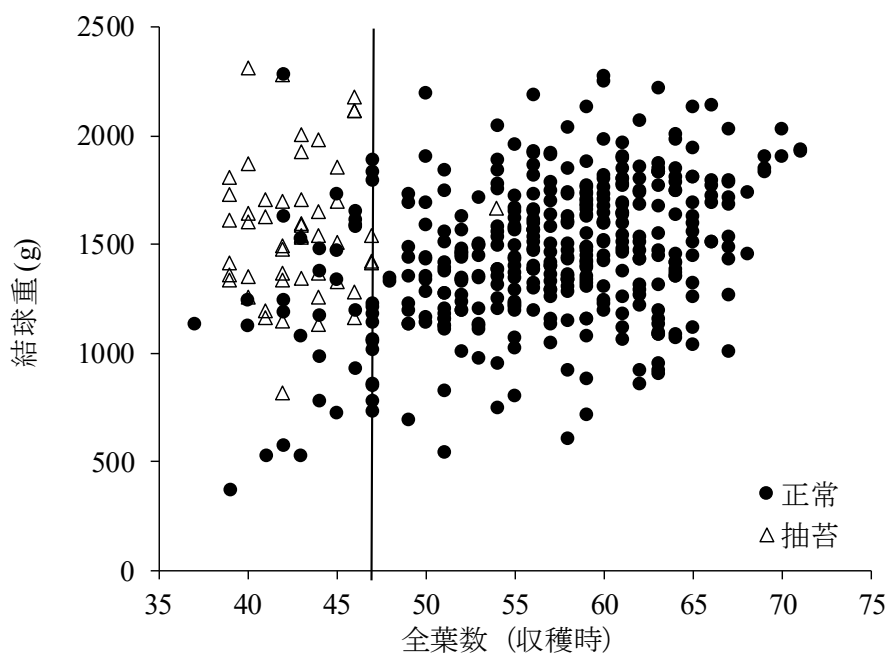


図2-4 収穫時の結球重と抽苔・全葉数の関係

表2-1のデータセット10-17から作成(摘葉処理 n=179, 無処理 n=258).

全葉数に1g/枚未満の葉を含み,落葉は含まない.

●:正常(抽苔程度:0-2), △:抽苔(抽苔程度:3,4).

結球重と全葉数の相関係数=0.22 ($p < 0.001$)

結球重と抽苔程度の相関係数=0.35 ($p < 0.001$)

表2-2 落葉数の推計

年度	播種日	外葉数		脱落葉数 (推計)
		結球始期	収穫期	
2011	9月22日	14.8	5.5	9.3
	9月26日	13.5	6.2	7.3
	9月29日	13.8	7.2	6.6
	10月3日	13.5	6.2	7.3
2012	9月24日	12.0	6.7	5.3
	9月28日	11.3	6.5	4.8
	10月1日	9.5	7.5	2.0
	10月4日	10.0	7.2	2.8
	10月10日	9.5	6.5	3.0
	10月15日	11.3	6.2	5.1
2013	9月24日	11.8	5.0	6.8
	9月27日	11.0	5.2	5.8
	9月30日	10.8	5.8	5.0
	10月3日	10.5	6.8	3.7
	10月7日	10.0	5.7	4.3
	10月10日	10.0	4.8	5.2
平均±標準偏差				5.3±1.9

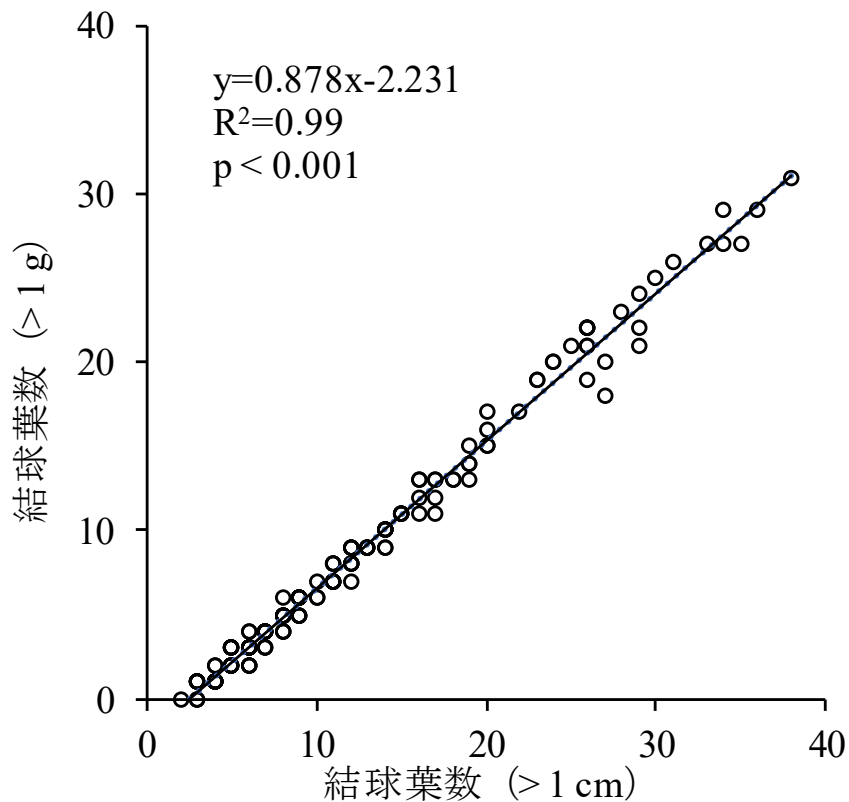


図 2-5 結球葉数 (> 1 cm) と結球葉数 (> 1 g) の関係
 2014 年のデータから作成 (無処理 n=176).

2. 結球葉数の推定

データセット 7~17 (n=82) を用い、主要な環境要素として積算温度、積算日射量および積算降水量と花芽分化期までの結球葉数 (> 1 g) との関係を見た。その結果、いずれの年も積算温度との相関係数が最も高くなった (表 2-3)。続いて、基準温度 0~7°C における有効積算温度と結球葉数 (> 1 g) との相関係数を比較したところ、基準温度 0°C ~2°C の相関係数が $r=0.90$ と相対的に高かった (表 2-4)。そこで、基準温度を 0°C とし、積算温度と結球葉数 (> 1 g) との関係を検討した。その結果、各年の単回帰式で正の相関が認められ、相関係数は、2012 年が 0.739 ($p<0.005$)、2013 年が 0.996 ($p<0.001$)、2014 年が 0.981 ($p<0.001$) であった (図 2-6)。出葉速度を表す単回帰式の傾きは、2012 年 0.0196、2013 年 0.0293、2014 年 0.0255 となり、3 カ年の傾きの平均値である 0.0248 を

a とし, (7)式を求めた. ここで y は結球葉数 (>1 g), x は播種後積算温度を示す.

$$y = 0.0248x + b \quad \cdots (7)$$

表 2-3 花芽分化期までの結球葉数 (>1 g)と播種後の積算温度, 積算日射量, 積算降水量の相関

年度	環境要素	相関係数 ^z	p
2012	積算温度 ^y	0.988	<0.001
	積算日射量	0.987	<0.001
	積算降水量	0.938	<0.001
2013	積算温度 ^y	0.967	<0.001
	積算日射量	0.920	<0.001
	積算降水量	0.893	<0.001
2014	積算温度 ^y	0.955	<0.001
	積算日射量	0.923	<0.001
	積算降水量	0.895	<0.001

表 2-1 のデータセット 7-17 から作成 (n=82). ^z各気象パラメータの播種日から調査日前日までの積算と結球葉数の相関を示す. ^y積算温度の基準温度は 0°C.

表 2-4 結球葉数と有効積算温度の相関

基準温度の範囲	相関係数 ^z	p
0	0.90	<0.001
1	0.90	<0.001
2	0.90	<0.001
3	0.89	<0.001
4	0.87	<0.001
5	0.80	<0.001
6	0.66	<0.001
7	0.46	<0.001

表 2-1 のデータセット 7-17 から作成 (n=82). ^z播種日から調査日前日までの積算温度と結球葉数 (>1 g) の相関係数

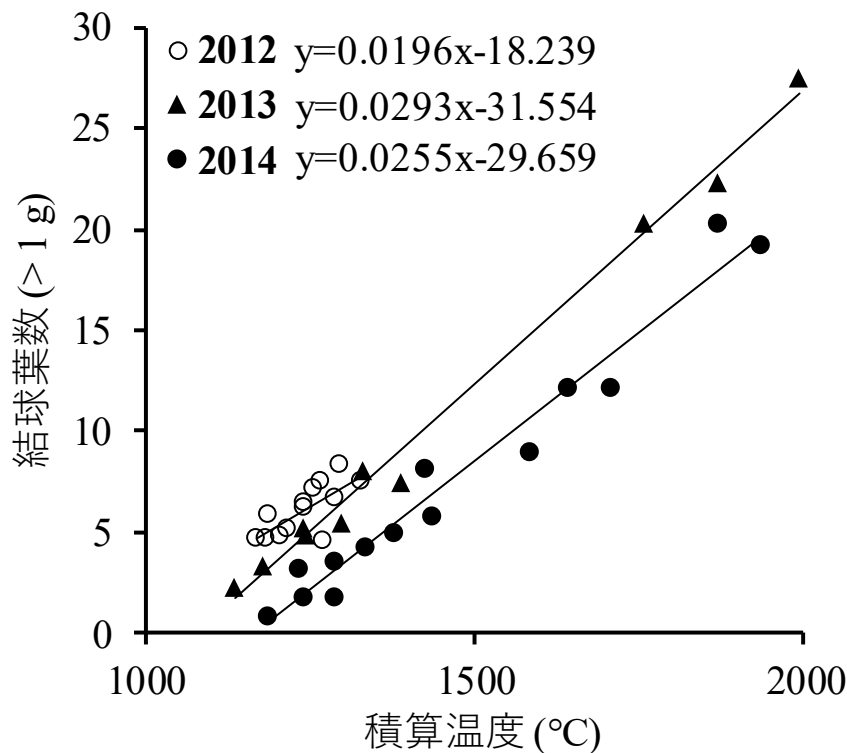


図 2-6 積算温度と結球葉数 (> 1g) の関係

表 2-1 のデータセット 7-17 から作成 (2012: n=13, r=0.739, p<0.005, 2013: n=10, r=0.996, p<0.001, 2014: n=14, r=0.981, p<0.001, 3 年分の計: n=37, r=0.933, p<0.001). 積算温度は、播種日から調査前日まで。

次に、各年のサンプリングデータのうち、結球初期の任意の 1 データを用い、(7)式から各年の b を求めた。用いたサンプルデータの播種後積算温度および結球葉数 (> 1g) は、2012 年が各々 1,106°C 日、2.2 枚、2013 年が各々 1,201°C 日、5.3 枚、2014 年が各々 1,186°C 日、0.8 枚であった。その結果、各年の推定式は、次の(8)~(10)式となった。

$$2012 \text{ 年} \quad y = 0.0248x - 25.229 \quad \cdots (8)$$

$$2013 \text{ 年} \quad y = 0.0248x - 24.485 \quad \cdots (9)$$

$$2014 \text{ 年} \quad y = 0.0248x - 28.613 \quad \cdots (10)$$

これらの推定式の精度を確認するため、各年の播種後積算温度を(8)~(10)式に当てはめ、花芽分化期までの結球葉数 (> 1g) の推定値を求めた。データセット 7~17 (花芽

分化期後1か月まで(n=37)について、決定係数は $R^2=0.957$ ($p<0.001$)、推定した37データのうち34データが信頼度95%の信頼区間に含まれた(図2-7)。

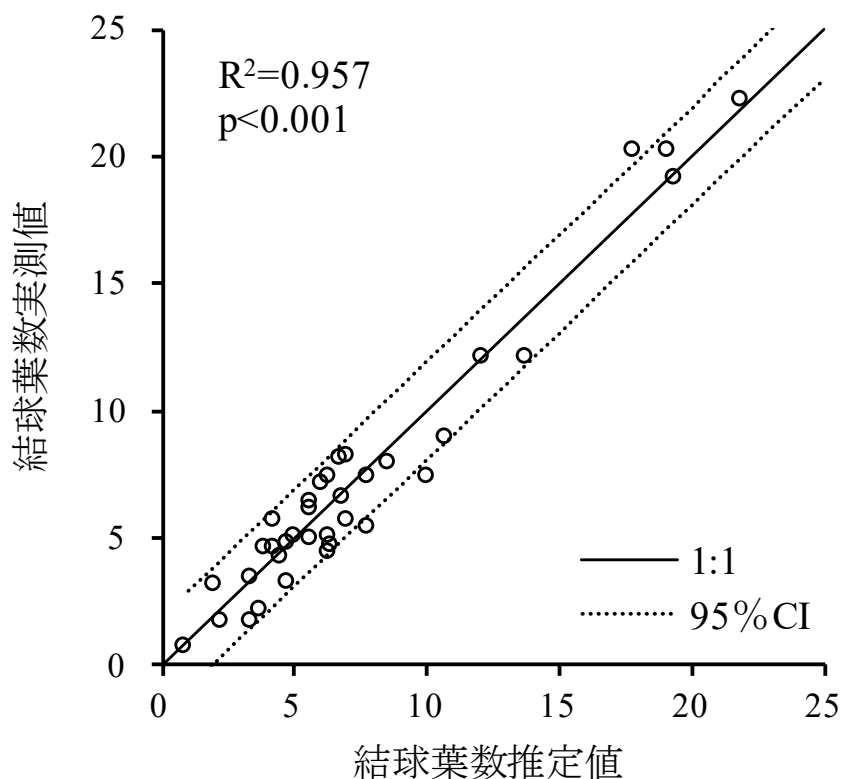


図2-7 結球葉数の実測値と推定値の関係

表2-1のデータセット7-17から作成(n=37).
95% CIは、95%信頼区間を示す。

3. 花芽分化期予測モデル

花芽分化期は、調査株の50%が分化した日と定義した。図2-8(データセット14)を例にとると、分化期に達する時期は、株によって12月9日から1月5日まで約1か月の差があるが、調査株の50%が花芽分化期に達する12月15日を花芽分化期とした。同様の方法により2010~2014年における17作期のうち、調査時点で全調査株が分化していたデータセット10を除く16作期について花芽分化期を求めた(表2-1)。

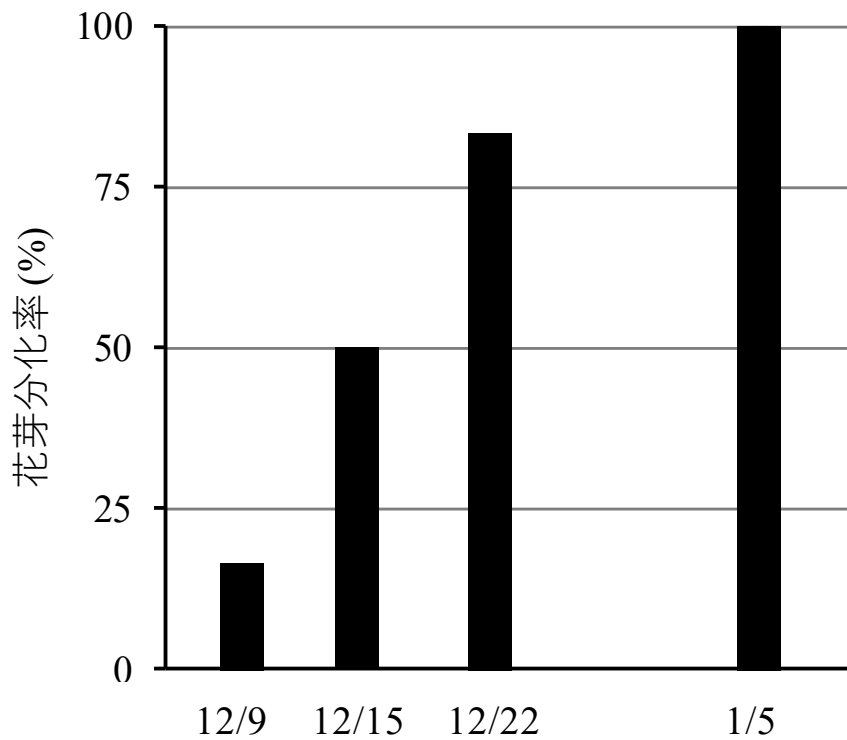


図 2-8 花芽分化率の推移

表 2-1 のデータセット 14 から作成 (n=6).

次に, (2)~(6)式により求める花芽分化期予測値と実測値との誤差が最小になるように, 各パラメータの初期値から始め, 残差二乗和を順次最小にするように反復させて, 最適解を求めた (表 2-5). このモデル式による予測値と実測値との関係を図 2-9 に示した. 推定値が明らかに実測値と外れた値がみられたため, 未分化データを除く 16 データについて, 四分位範囲 (IQR) および第三四分位から上内境界点を求めたところ, 30 となった. 予測値と実測値に 30 日以上の差がみられたデータセット 3, 13, 16, 17 を外れ値とした. なお, 外れ値を除く 12 データの平均平方二乗誤差 (以下 RMSE) は 5.3 日であった.

表 2-5 温度に対する生育応答に関する係数 (GR), 感応ステージ係数 (RS), 低温係数 (C), 低温遭遇期間 (CH) を決定するパラメータ値

温度に対する生育応答に関する係数(GR)	GR.top	1.0
	GR.mid	4.0
	GR.base	0.0
	GR.range	0.5
感応ステージ係数(RS)	RStop	1.0
	RSmid	750
	RSbase	0.0
	RSrange	10.0
低温係数(C)	C top	1.0
	Cmid	13.0
	Cbase	0.0
	Crange	0.2
低温遭遇期間(CH)		25

top：シグモイド関数の最大値.
 base：シグモイド関数の最小値.
 range：シグモイド関数の範囲.

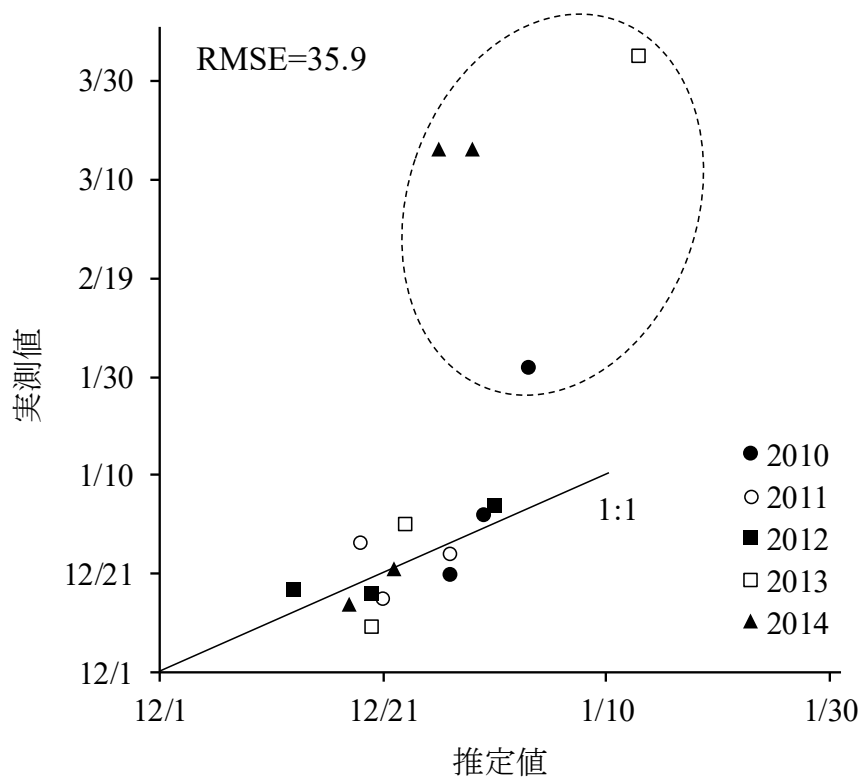


図2-9 花芽分化期の実測値と推定値の関係

表2-1のデータセット1-17から作成(花芽分化期が不明であったデータセット10を除く、 $n=16$)。点線円で囲んだ4つを外れ値とした。外れ値を除く12データの平均平方二乗誤差(RMSE)=5.3。

4. 早期抽苔リスクの予測

2011~2014年の各9~10月にかけて播種したデータセット4~17(データセット10を除く)について、花芽分化期の結球葉数(>1g)と収穫適期(結球重が概ね1.2~1.8kg)における抽苔程度を比較した。その結果、早期抽苔が発生したのは、いずれの年も9月24日~10月3日の間に播種した場合であった(表2-1, 図2-10)。また、抽苔したのはいずれも花芽分化期の結球葉数(>1g)が6.5枚以下の場合であった(図2-10)。

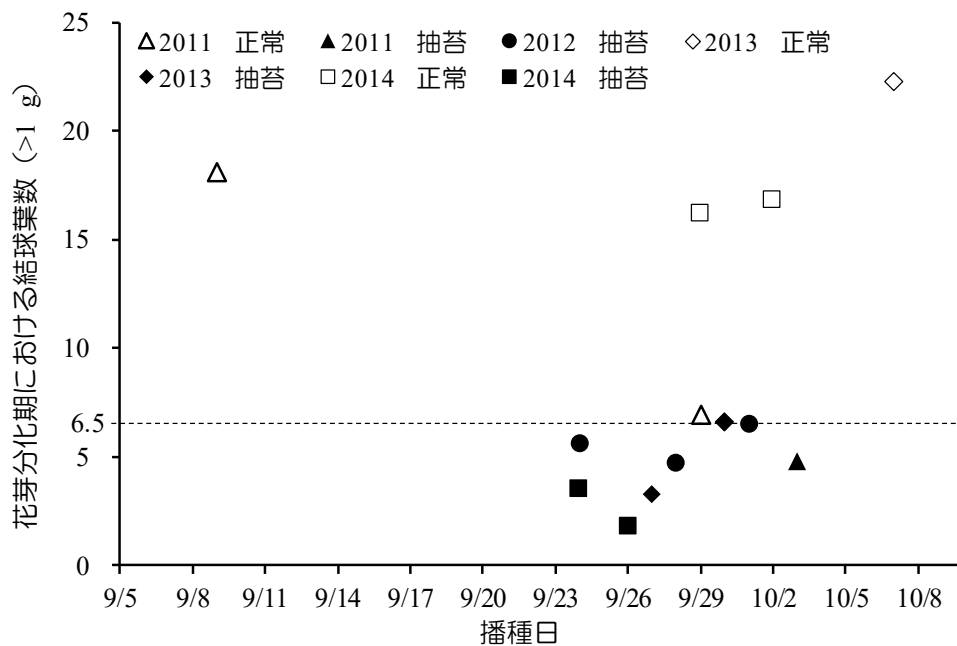


図2-10 キャベツの播種日と花芽分化期の結球葉数の関係

表2-1のデータセット4-17から作成(花芽分化期が不明であったデータセット10を除く、n=13)。点線は、抽苔株の最大結球葉数6.5枚を示す。

一方、抽苔が収穫期間中に進むことがあるため、収穫時期が抽苔に及ぼす影響について検討した。2013年のデータセット10~13を用い、結球肥大初期から収穫適期以降までの抽苔発生率を調査した。その結果、高リスク播種期と考えられる9月24日、9月27日および9月30日に播種した場合(データセット10, 11, 12)では、結球重1.8kg以上の88%(7/8個体)が抽苔した(図2-11-A)。一方、低リスク播種期と考えられる10月7日播種(データセット13)では、結球重1.8kg以上においても抽苔株は認められなかった(0/4個体)(図2-11-B)。

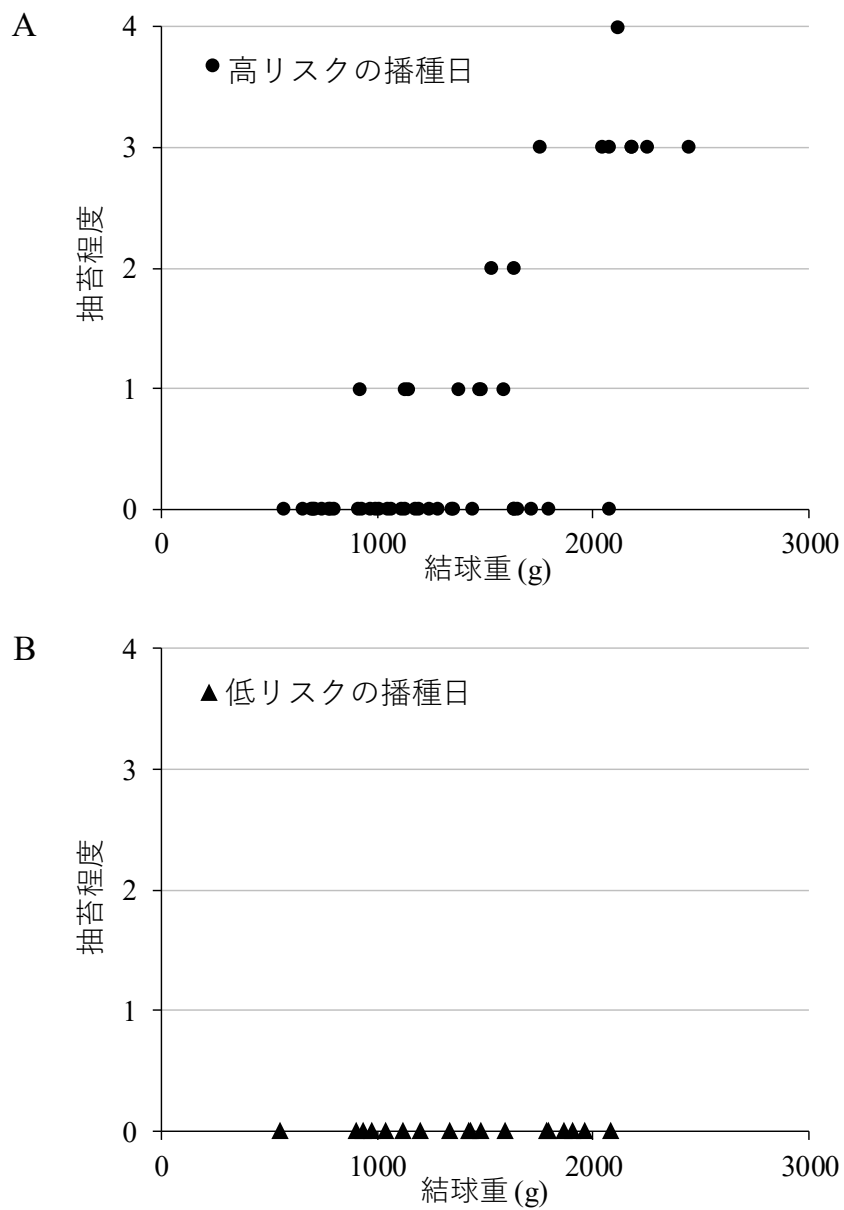


図 2-11 結球重増加による抽苔程度の変化

A：抽苔リスクの高い播種期となる表 2-1 のデータセット 10, 11, 12 (n=48).

B：抽苔率区の低い播種期となる表 2-1 のデータセット 13 (n=18).

葉数と抽苔の関係について、具体例を図2-12に示した。2014年9月24日播種（データセット14）の場合、花芽分化期は12月15日である（表2-1）。この時点での結球葉数（>1g）は3.5枚で、抽苔リスクが高いと考えられる6.5枚以下である。収穫時（結球重1,594g）の全生葉数は46枚、抽苔株率は37%と高かった（図2-12-A）。一方、2014年9月29日播種（データセット16）の場合、花芽分化期は3月16日である（表2-1）。この時点での結球葉数（>1g）は前後の葉数から16枚と推定でき、抽苔リスクが高いとされる6.5枚以下を大きく上回っている。収穫時（結球重1,638g）の全生葉数は59枚、抽苔株率は0%であった（図2-12-B）。

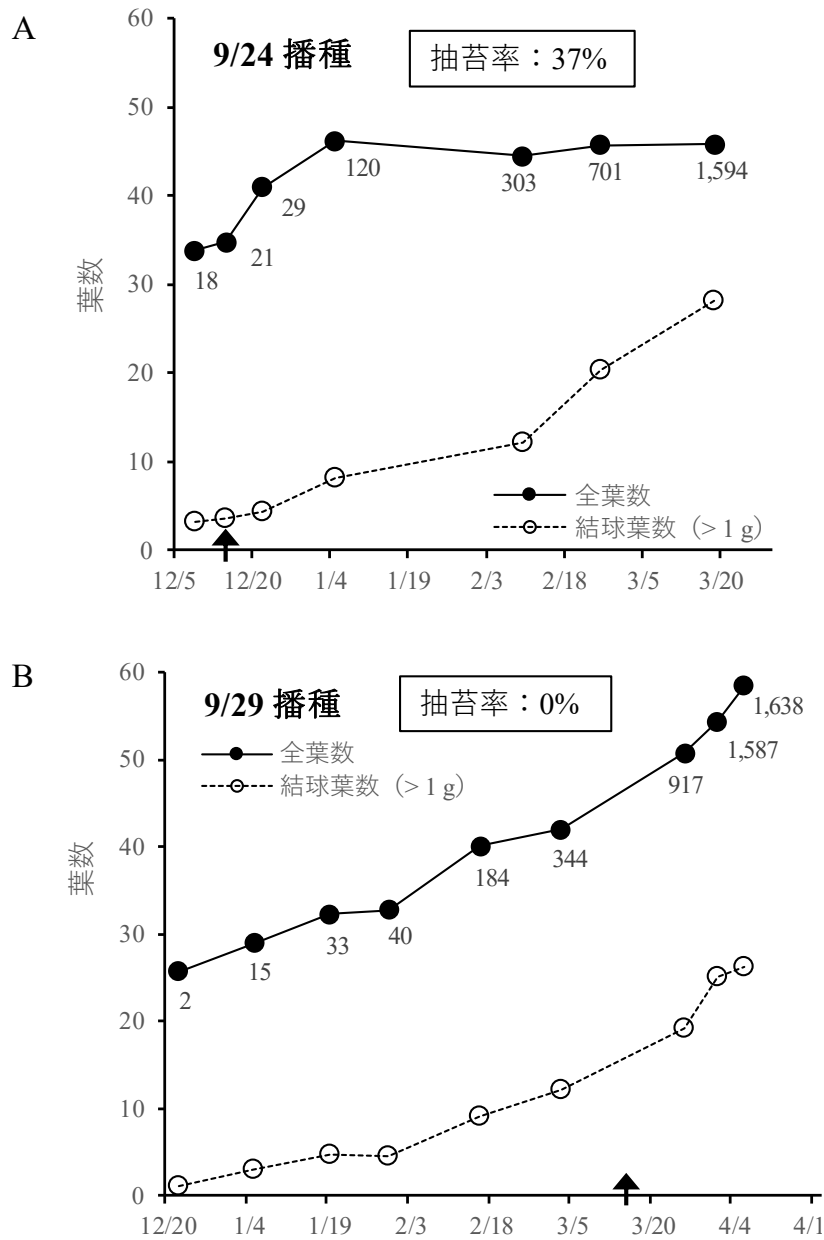


図 2-12 結球葉数と抽苔の関係

↑：花芽分化期，図中の数値：結球部新鮮重 (g).

A：抽苔リスクの高い播種日 (表 2-1 のデータセット 14, n=42).

B：抽苔リスクの低い播種日 (表 2-1 のデータセット 16, n=42).

最後に、2019 年の気象データを用いたシミュレーション結果について述べる。9 月 10 日～10 月 10 日の播種を想定して求められる花芽分化期および結球葉数 (> 1 g) との関係式を求めた (図 2-13)。その関係式は、 $y=0.0247x-25.954$ ($R^2=0.9987$) で表すことが

できた。この式の y に 6.5 枚を入力すると、 x は 1,314°Cであった。

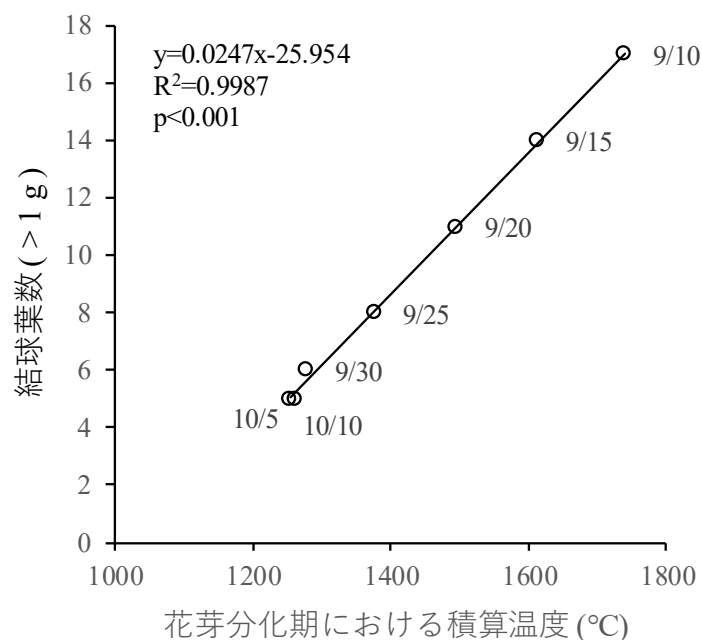


図2-13 推定結球葉数 (> 1g) と花芽分化期における積算温度との関係
図中の数値は播種日を示す。
2019年9月10日から10月10日まで5日間隔で7回播種したと仮定したときの花芽分化期における積算温度と結球葉数 (> 1g) との関係。

第4節 考察

1. 葉数と早期抽苔の関係

キャベツの葉数計測では、落葉や肉眼では識別できない分化葉の扱いが問題となる。落葉数の把握には多大な労力を要すること、分化葉を顕鏡で計測する際には誤差が生じやすいことなどが考えられる。そこで、現場レベルでの実用性の観点から、落葉や分化葉を含んだ総葉数ではなく、1g以上の結球葉数が早期抽苔判定の指標になり得るかという視点で検討した。キャベツでは、花芽分化すると生殖成長相 (reproductive phase) に

移り、栄養成長を行えなくなる（岩間，1972），花芽分化後は主枝上の葉数は増加しない（松原・飛高，1940），カリフラワーでは、葉の成長が抑制されることにより花芽分化が誘引される（Williams・Atherton，1990）などの報告がある。すなわち、花芽分化期以降、分化葉数は増加しないと考えられる。このことから、花芽分化期の結球葉数（>1g）を指標に、早期抽苔の発生を収穫前に予測できるか検討することとした。葉数と抽苔の関係について、平石（1966）が‘金系 201 号’を供試して行った試験の結果、抽苔株の分化総葉数は 52.5 枚であった。この試験データに示された分化総葉数には落葉数が含まれている。そこで、2010～2013 年の生育調査データにより結球始期と収穫時の外葉数の差を落葉数として推計したところ、落葉数は 5.3 枚±1.9（SD）であった（表 2-2）。図 2-3 で抽苔株が認められた全生葉数 47 枚以下にこの落葉数（推計値）を加えると、分化総葉数は 52.3 枚±1.9（SD）となり、平石の結果とほぼ一致していると考えられた。

ところで、全生葉数と抽苔程度の関係は、結球葉数に 1g 未満を含めた場合と含まない場合で傾向が異なった（図 2-2-A，図 2-2-B）。1g 未満を含めた場合には、全葉数が多いほど抽苔程度が低くなり、図 2-3 に示したように全葉数が 47 枚以下で抽苔した。一方、1g 未満を除いた場合では、全葉数と抽苔程度に一定の傾向がみられなかった（図 2-2-B）。このことから、収穫時の 1g 以上全葉数が同程度の個体であっても、分化葉数に差があると抽苔にも差異が生じる可能性が考えられる。夏まき 4 月どり寒玉系キャベツでは、結球緊度と抽苔程度に負の相関が認められ（高田ら，2013），葉数が多いことで結球緊度が高まり、物理的に花茎伸長を抑え、抽苔を抑制している可能性が示されている。しかしながら、‘金系 201 号’のように結球緊度が低い春系品種では、物理的な抽苔抑制は小さいと考えられ、一定数以上の分化葉を有すること自体が抽苔抑制に関連している可能性が示唆される。したがって、図 2-3 において、結球葉数が少なくても抽苔せず収穫できている株（花芽分化はしている）は、図 2-11-A でみたように、収穫時期が遅れると抽苔する可能性がある。春キャベツの収穫時期となる 4～5 月の比較的高い温度や長日条件が抽苔を促進させるため、収穫が数日遅れただけで球内抽苔が進むという

ことも考えられる。

また、図 2-10 において、結球葉数 (>1g) が 6.5 枚以下では、すべての個体が抽苔していることから、6.5 枚を抽苔発生の基準と考えた。しかしながら、6.5 枚から 16 枚までの葉数データが少ないため、6.5 枚が閾値であるか厳密にはわからない。例えば、7 枚、8 枚の場合に抽苔しないとは言い切れない点に注意が必要である。

2. 結球葉数の推定

図 2-6 に示したように、年ごとの結球葉数 (>1g) は播種後積算温度と高い相関 ($r=0.739, 0.996, 0.981$) が認められたが、3 か年合計での相関はやや低くなった ($r=0.933, p<0.001$)。特に、結球葉数 (>1g) が 1~2 枚のいわゆる結球始期に達するまでの播種後積算温度の年次差が大きく、それ以降の出葉速度 (回帰直線の傾き) は、各年ともに概ね同等であった (図 2-6)。浜本 (1992) や Milford ら (1985) などの報告にもあるように、作物葉の展開は温度だけでなく、土壌水分や気流、光強度などの影響も受けていることから、これら温度以外の気象条件が年度によって違ったことがキャベツの活着から初期生育に影響し、結球始期に到達する播種後積算温度の違いを生じさせた可能性がある。そこで本章では、2012 年、2013 年および 2014 年の積算温度に対する出葉速度が概ね同等であることから、各年における結球初期の任意のサンプルデータを使って初期生育の差を補正することにより、より高い精度で結球葉数 (>1g) が推定できることを示した。

3. 花芽分化期予測モデル

花芽発育指数 (DVI) を発育速度 (DVR) の積算として求めることで、花芽分化期を予測するモデルを開発した。日平均気温のみを用いるため、最高気温や最低気温などの影響、或いはその他の気象条件を無視しており、比較的簡易なモデルとなっている。推定を行った 16 データセットのうち 4 点が外れ値となった。前述のとおり、同一播種日であっても株によって花芽分化期に約 1 か月程度の差があるため、花芽分化期を定めること自体に難しさがある。外れ値となった 4 データは 9 月 29 日以降の播種で、いずれも予測値より実測値の分化期が遅かった。温度が低いほど低温感応期間が短くなること

から (ito・saito, 1961), より低温期での栽培となる 9 月 29 日以降の播種では, 低温感応期間は短くなると考えられる. それにも関わらず実測の分化期が遅かった要因として, 低温感応する大きさに達してない, または低温条件下における花芽分化の生育が推定モデルよりさらに遅い可能性が考えられるが, 明確な要因は不明である. 近年, キャベツの春化に関わる FLC オースログ遺伝子群が特定され, 低温条件下でリプレッサーの発現が抑制されると花成誘導されることが確認された (Itabashi ら, 2019). 今後, 植物の年齢 (age) や低温条件と遺伝子発現との関係が解明されることなどにより, 栽培試験において外れ値が生じた要因を明らかにし, 花芽分化期予測の精度向上につながることを期待される.

4. 早期抽苔リスクの予測

春キャベツは, 緑植物春化の特性から花芽分化を経て春になると抽苔する特性を有する. そのため, 収穫のタイミングによって抽苔の有無が変わる可能性がある. 図2-11-Aで示したように, 高リスク播種期では, 収穫適期で抽苔してない場合でも, 少し収穫が遅れただけで抽苔株が増える可能性があることに注意が必要である. 本章で示した予測法は, 日平均気温データが基になる. 次に, 予測に加えて, 結球初期のサンプル調査を行うことで予測精度向上を図るものである. 当該年の気象予報を基に抽苔リスクが高い時期を予測し, 播種時期を決定することができる. また, 播種後に気象変動が生じた場合には, 実測の気象データやサンプル調査で時点修正し, 仮に結球葉数が少ないと予測される場合は, 早めに収穫して可販率を高めるといった対策をとることも可能と考えられる. 図2-11に示したように, 結球葉数 (>1g) は花芽分化後も増加する. すでに葉分化している1g未満の葉が生長するためである. 図2-11-Aの場合, 分化してからの全生葉数はたちまち頭打ちになる. 一方, 図2-11-Bの場合, 花芽分化が遅いため, その間に葉分化が進んでいて, 全生葉数が増え続けたものと考えられる. 最終的な抽苔の有無に重要なのは, 落葉やごく小さな分化葉を含む総葉数の多寡であるが, 結球葉数 (>1g) を指標にすることでより簡便に抽苔リスクが評価できる点がこの評価法の利点と考えて

いる。また、図 2-13 でみたように、花芽分化期における播種後積算温度によっても抽苔リスクを判定することができる。すなわち、花芽分化期の播種後積算温度が概ね 1,314°C 以下のときは抽苔リスクが高く、逆に十分に高ければ抽苔リスクは低いと判定することができる。2019 年の気象条件では、9 月 30 日前後以降の抽苔リスクが高いことが図 2-13 から推察できる。ただし、9 月末～10 月上旬にかけての花芽分化期予測モデルの予測精度に改良の必要があるため、ここでのシミュレーション結果についても再考すべき点があることに留意が必要である。

本章における予測は、基本的に気象予報を基にしているため、予報と実際の気象が違った場合は、時点修正することが必要である。なお、各モデルは春系品種‘金系 201 号’を対象としているため、他品種に適用するためには、積算気温と葉数との関係、花芽分化に要する低温感応温度や抽苔する葉数などについての追加調査が必要である。

第 5 節 摘要

春キャベツ (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) は、秋期に播種して、翌年の春期に収穫する作型である。緑植物春化の特性から、春キャベツはある程度の大きさになると冬期の低温に感応して花芽分化を経て、春期の長日条件ならびに高温条件下で抽苔するリスクがある。各産地では、気象条件に適した品種と作期を選択することによって抽苔を回避しているが、地球温暖化や気候変動による早期抽苔の発生が危惧されている。本章では、花芽分化期の結球葉数と早期抽苔との関係に着目し、日平均気温の積算値に基づく花芽分化期の推定および結球葉数の推定による早期抽苔の発生予測を行った。本章では、春系品種‘金系 201 号’((株) サカタのタネ) を供試品種とする 2011～2014 年の作期移動試験を実施し、花芽分化期の結球葉数 (> 1 g) が概ね 6.5 枚以下のとき、早期抽苔するリスクが高いことを明らかにした。‘金系 201 号’の結球葉数 (> 1 g) (y) は、播種後の積算気温値 (x) を変数とする一次関数 $y=0.0248x+b$ ($b=-25.229(2013)$), -

24.485(2014), -28.613(2015)) により年毎に推定できることが判明した。‘金系 201 号’の花芽の発育ステージは、発育速度 (DVR) および発育指数 (DVI) の概念を適用して、播種時の発育指数 (DVI) を 0、花芽分化期を 1 と定め、日平均気温から低温感応する植物体の大きさや低温感応等を表す各パラメータ値を求めた。得られたパラメータ値から 2010~2014 年の花芽分化期の推定値と実測値を比較したところ、平均平方二乗誤差 RMSE=5.3 (外れ値除く) であった。以上から、播種日と日平均気温データを入力し、花芽分化期の結球葉数 (>1 g) を推定することにより、早期抽苔リスクを予測することが可能であると示唆された。

第3章

秋冬どりダイコンにおける生育モデルの開発および 地球温暖化の影響評価

Development of a growth forecast model in Japanese radish harvested in autumn to
winter and evaluation of the impact of global warming

第1節 緒言

地球温暖化については、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）をはじめ、様々な研究に基づく温暖化シナリオが報告されている。IPCC 第5次評価報告書によれば、温室効果ガスの排出量が最も多いシナリオでは、20世紀末から21世紀末までの100年で世界平均地上気温が3.7°C上昇すると予測されている（環境省，2014）。特に注視すべきは、最近の温室効果ガス濃度が過去63万年間に経験したことがないほど高濃度になっている点である（飯塚，2015）。日本については、21世紀末と20世紀末との比較で、年平均気温が4.5°C上昇、日降水量200mm以上の年間発生回数が2倍以上、本州や北海道内陸部では極端な降雪の頻度が増大すると予測されている（気象庁，2017）。温暖化が農作物に与える影響については、水稻の白未熟粒（森田，2008）、果樹の着色不良や果肉軟化（杉浦ら，2007）、生産適地の変動による産地間競争（大山，2006）、ウイルス病等病害虫被害の多発（中川，2003）などがある。また、高温の影響だけでなく、日射条件の変化も重要であり、気候モデルを用いた影響評価においては十分に吟味する必要がある（環境省，2012）。日射量は1990年頃から10年間で1 MJ/m²（10%相当）増加し（池鯉鮒，2011）、今後、東日本では、秋はやや減少、冬も減少し、春および夏は10%以上増加すると予測されている（Izumiら，2008）。

神奈川県におけるダイコン (*Raphanus sativus* L. var. *longipinnatus* L. H. Bailey) の生産量は 89,200t で、その約 8 割を三浦半島地域が占めている (農林水産省, 2017b; 農林水産省, 2018)。県全体の生産量は全国 4 位で (農林水産省, 2018), 特に 12~3 月の市場占有率は約 5 割と高い (東京都中央卸売市場, 2018)。三浦半島地域のダイコン作型は、秋まき秋冬どり栽培であり (川城, 2003a), トンネルやマルチ資材等の保温資材を使用しない露地栽培が行われているため、気象条件の影響を受けやすく、収穫時期や収量の変動は、需給安定に大きな影響を及ぼすと考えられる。

そこで、温暖化の影響を定量的に評価するため、秋冬どりダイコンの生育モデルを開発することとした。ダイコンの生育モデルには、根重と積算温度の回帰式による三浦ダイコンの生産予測法 (平石ら, 1979) のような経験的モデル (岡田, 2008) があるが、日射量を考慮した定量的モデル研究は少ない。日射量を扱った生育モデルとして、植物体の受光量に日射量係数を乗じて乾物生産量を求める光変換型機構的生育モデル (岡田, 2008) があり、先行研究には、ニンジンのトンネル栽培 (井方ら, 1999), レタス (岡田ら, 1997), 寒候期キャベツ (岡田・佐々木, 2016) などがある。そこで本章では、この光変換型機構的生育モデルの手法を用いて、秋冬どりダイコンの生育モデルを開発することを目的とした。さらに、このモデルに温暖化シナリオを適用し、温度上昇および日射量の増減が収穫期や収量に及ぼす影響の定量評価を試みた。

第 2 節 材料および方法

試験は、2014~2015 年度が神奈川県農業技術センター三浦半島地区事務所 (以下、三浦試験圃場) 内の黒ボク土の圃場 (神奈川県三浦市, 年平均気温 15.8°C, 年平均降水量 1,557mm), 2016~2018 年度が神奈川県農業技術センター (以下、平塚試験圃場) 内の黒ボク土の圃場 (神奈川県平塚市, 年平均気温 15.6°C, 年平均降水量 1,710mm) で実施した。

1. 栽培概要

供試品種には、青首ダイコン品種‘福誉’（みかど協和（株））を用い、表3-1の21作期で栽培した。施肥は1a当たり石灰肥料10kg（CaO34%）を施用し、基肥として成分量N:P₂O₅:K₂O=0.9:2.0:1.1kg、追肥として成分量N:P₂O₅:K₂O=1.2:0.0:1.2kgを施用した。栽植密度は、畝間50cm、株間24cm（833.3株/a）とした。病虫害防除は、神奈川県発行の「病虫害雑草防除指導指針」に準じて、適宜行った。

2. 生育データおよび気象データ

表3-1の各作期について、生育期～収穫期の間5～8回/作期（2014～2018年度に計126回）、極端な生育不良ではない6個体/回（2014～2018年度に計756個体）をサンプリングし、葉数、葉重、根重、根長、最大根径等を測定し、葉数は、葉重1g以上（以下、葉重）と1g未満に分けて計測した。このうち2018年度の2作期は、吸光係数Kを求める補完調査として行ったもので、調査方法の詳細については、材料および方法の3の(2)で述べる。また、葉部および根部の各サンプルの一部について新鮮重を秤量したのち、60℃に設定した通風乾燥機で約1週間乾燥させて乾物重を秤量し、乾物重/新鮮重×100から葉部および根部の各乾物率を算出した。さらに、2018年9月18日および27日播種において、根重0.9～2.1kgの葉重（出荷調製時に残す長さ10cmの葉）を測定した。

気象データは、三浦試験圃場および平塚試験圃場に設置されている神奈川県農林水産情報センターの日平均気温および日射量データを用いた。

表3-1 各年度の試験場所および作期別播種日

年度	場所	11月収穫	12月収穫	1月収穫	2月収穫	3月収穫
2014	三浦	9月5日	9月16日	9月19日	9月24日	—
2015	三浦	9月4日	9月15日	9月24日	9月28日	10月13日
2016	平塚	9月7日	9月15日	9月23日	9月27日	10月12日
2017	平塚	9月7日	9月15日	9月22日	9月27日	10月12日
2018	平塚	—	9月18日	—	9月27日	—

3. 機構的生育モデル

モデル構造は岡田 (2008) を基に改変し、はじめに入力する日平均気温データ (°C日) から葉数を推定し、葉数から葉重 (g) , 葉重 (g) から鉛直投影葉面積 (cm²) および葉面積 (cm²) を推定する. 続いて日射量 (MJ/m²/日) を入力して葉の受光量 (遮蔽する日射量) を求め、これと日射利用係数 (adiation utilization efficiency, g/MJ; 以下 RUE) の積から乾物生産量 (g/個体/日; 以下 TDW) を求め、葉数の関数である根部分配率との積から根部乾物重 (root dry weight, g; 以下 RDW) , さらに積算温度の関数である根部乾物率との積から根部新鮮重 (root fresh weight, g; 以下 RFW) を求めるものである (図 3-1) .

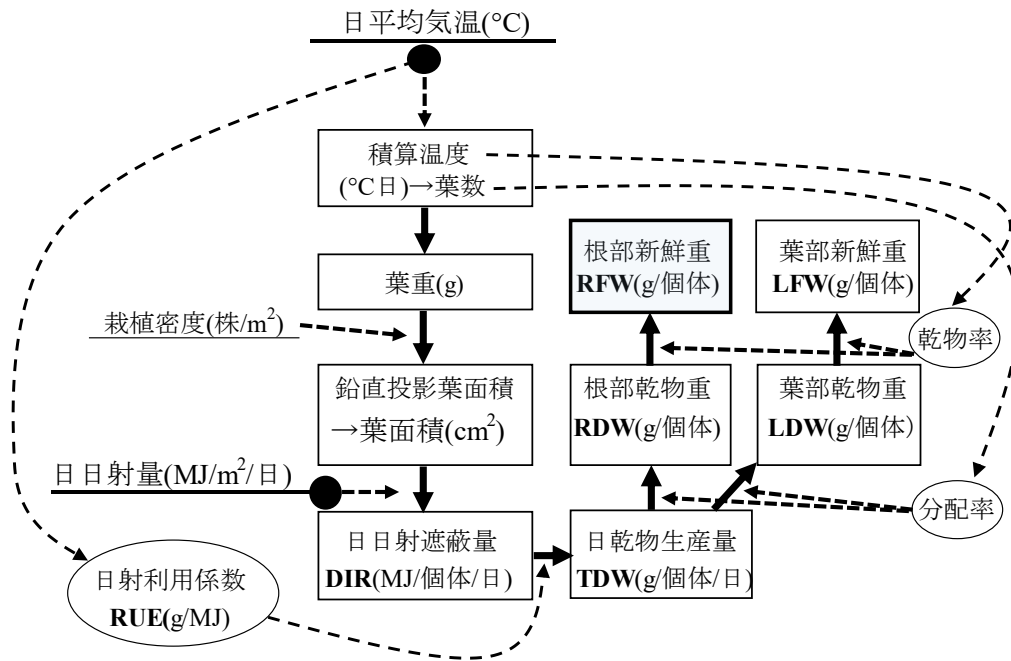


図 3-1 秋冬どりダイコンの機構的生育モデルの構造
(岡田 2008 を基に改変)

(1) 葉面積の推定

葉重と葉面積の関係を調べるため、2017年11月24日、2018年10月26日、11月8

日、30日および12月13日に生育ステージの異なる25個体について、葉重および葉面積測定器（fosis製LI-3100 AREA METER）により葉面積を計測した。また、葉重と鉛直投影葉面積（Vertical Projection leaf Area, cm^2/plant ；以下VPA）の関係を調べるため、画像データから鉛直投影葉面積を求める手法を用いた（松木ら、1997）。画像データは、2017年10月6日、11日、19日、26日、11月2日、10日、16日、12月14日、2018年1月15日、10月26日、11月8日および30日に生育ステージの異なる58個体について、植物体の直上からデジタルカメラで撮影した。その際に、長さ20cmの白色プラスチックラベル（以下、標準長ラベル）を葉の横に配置して撮影した（図3-2）。この画像データの植物体部分をペイントソフトで緑色に塗り、一般的な画像解析ソフトを用いてRGB別輝度から判定される画素数と標準長ラベルの長さとの縮尺から鉛直投影葉面積を算出するとともに、同一個体の葉重を計測した。

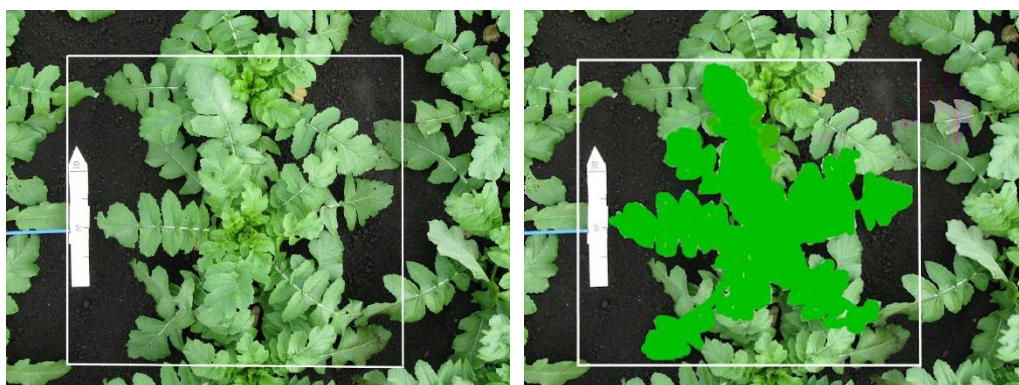


図3-2 ダイコン直上からの撮影画像（左）および加工画像（右）

(2) 日射遮蔽量（DIR）の算出

ダイコン1個体が1日に受光する日射遮蔽量(daily amount of intercepted solar radiation, $\text{MJ}/\text{plant}/\text{day}$ ；以下DIR)は、(1)式から求められる（岡田ら、1997；岡田・佐々木、2016）。

$$\text{DIR} = S \times \text{VPA} \times (1 - \exp(-K \times \text{LA} / \min(\text{VPA}, \text{AA}))) / 10000 \quad \dots (1)$$

S（daily solar radiation：日射量, $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ ）は、気象データから得られる。VPAは葉

重から推定することとした。推定には、材料および方法の3の(1)で調査した鉛直投影葉面積と葉重の実測データ（58 サンプル）を用い、岡田ら（1997）のレタス地上部乾物重と鉛直投影葉面積の関係式を参考に(2)式に当てはめた。

$$VPA=a \times (1 - \exp(-b \times (\text{葉重} - x_0)) + y_0) \quad \dots (2)$$

なお、キャベツのDIRの計算において、外葉が圃場全面を十分に覆っている状況では、栽植密度の逆数として計算される個体割当面積（allocated area to each plant, cm^2/plant ；以下AA）が用いられている（岡田・佐々木, 2016）。そこで、鉛直投影葉面積がダイコンの栽植密度（833.3 株/a）から計算される個体割当面積（1,200 cm^2/plant ）を超えた場合の鉛直投影葉面積は1,200 cm^2 とし、 $\min(VPA, AA)$ はVPAとAAの小さい方を採用することを示している。また、Lambert-Beerの法則、門司と佐伯のモデルから(3)式が成り立つ（星野ら, 1977；光合成辞典, 2015）。

$$I=I_0 \times \exp(-K \times LAI) \quad \dots (3)$$

Iを群落内、 I_0 を群落外の光強度とすると、作物固有の吸光係数Kは、(4)式で求められる。

$$K = \ln(I_0/I)/LAI \quad \dots (4)$$

LAIは葉面積指数を示し、単位面積当たりの葉面積を単位面積で除した値である。

群落内外の光強度については、ダイコン栽培圃場外（群落外 I_0 ）および栽培圃場内（群落内I）の地表面に日射量測定フィルム・オプトリーフ（R-3D）を2017年12月14日～21日、オプトリーフ（Y-1W）を2018年1月4日～15日および12月4日～21日に設置し、オプトリーフ測定器（D-Meter RYO-470）を用いて積算日射量を測定した。2017年度は9月15日、22日および27日に播種したダイコン、2018年度は9月18日に播種したダイコンを供試し、各々株元の周囲8カ所の地表面にオプトリーフを配置するとともに、材料および方法の3の(1)と同様の方法により、鉛直投影葉面積を測定した。

(3) 日乾物生産量（TDW）の算出

日乾物生産量（total daily increase of dry weight, $\text{g}/\text{plant}/\text{day}$ ；以下TDW）は、植物体が

受けた日射量に日射利用係数 (RUE) を乗じた(5)式で求められる。

$$TDW = DIR \times RUE \quad \dots (5)$$

日射利用係数 (RUE) は、乾物生産の推定に利用されているもので、トウモロコシやダイズ (Sinclair ら, 1992) , レタス (岡田ら, 1997) などの報告がある。2014~2017 年度の 19 作期 83 データセットについて作期ごとに乾物重増加量を積算 DIR で除して日射利用係数 (RUE) を算出し、同期間の日平均気温の平均値との関係式を求めた。

(4) 根重の算出

2014~2017 年度の 19 作期 83 データセットを用いて、根部乾物重 (root dry weight, g ; 以下 RDW) および葉部乾物重 (leaf dry weight, g ; 以下 LDW) から根部分配率の関係式を求めた。また、根部乾物重 (RDW) および根部新鮮重 (RFW) から根部乾物率の関係式を求めた。根部新鮮重 (RFW) は、(6)式で求めた。

$$RFW = TDW \times \text{根部分配率} / \text{根部乾物率} \quad \dots (6)$$

4. 温暖化の定量的影響評価

新たに開発した秋冬どりダイコンの機構的生育モデルを用いて、温度上昇および日射量の増減が収穫期および収量に及ぼす影響について、2017 年度の気象条件を基準として検討した。温度上昇の影響評価には、農研機構メッシュ農業気象データ (The Agro-Meteorological Grid Square Data, NARO) を用い、全球気候モデル MIROC5 および温暖化ガス排出シナリオ RCP8.5 による平塚 (北緯 35 度 20 分東経 139 度 16 分) および三浦半島 (北緯 35 度 10 分東経 139 度 37 分) における年々の変動を考慮して 2046~2055 年の日平均気温の 10 年平均を 2050 年予測値とした (小南ら, 2019 ; 西森ら, 2019) 。また、日射量増減の影響評価については、現在のところメッシュ農業気象データの将来気象予測に日射量が未搭載のため、温度データに 2050 年予測値を用い、日射量データには 2017 年度の各作期の播種~収穫までの日日射量を 10%増または 10%減したデータを入力した。各気象条件における、9 月 7 日, 15 日, 22 日, 27 日および 10 月 12 日播種のダイコン根部新鮮重をシミュレートし、L サイズ (出荷重 : 1 kg/本) に達する時期を求めた。

なお、出荷調製時に残す葉の重さは、材料および方法の2で述べた方法により長さ10cmの葉重を計測したところ86.7gであったことから、ここでは一律80gとした。

次に、温度上昇および日射量増減が収量に及ぼす影響を定量的に評価するため、温暖化前後の収穫期が同じと仮定してダイコン根部新鮮重をシミュレートした。1a収量は、出荷重（根重+葉重80g）と栽植本数（833.3株/a）の積から算出した。

第3節 結果

1. 機構的生育モデル

(1) 葉面積の推定

はじめに播種後積算温度と葉数の関係を調べたところ、直線回帰式(7)で表すことができた ($R^2=0.818$, $p<0.001$: 図3-3)。

$$\text{葉数}=0.021 \times \text{播種後積算温度} \quad \dots (7)$$

続いて、葉数と葉重の関係は指数関数式(8)で表すことができた ($RMSE=46.4$, $R^2=0.723$: 図3-4)。パラメータ値は、岡田・佐々木(2016)の方法と同様に、Microsoft Excelのソルバー機能(GRG非線形オプション)を用いて、各データセットの播種を起点とする葉重のシミュレーション値と各生育調査時の実測値との誤差平方和が最小となる値とした。

$$\text{葉重}=3.106 \times \text{葉数}^{1.352} \quad \dots (8)$$

次に、葉重と葉面積の関係は、直線回帰式(9)で表すことができた ($R^2=0.981$, $p<0.001$: 図3-5)。パラメータ値は、前述の方法と同様に、Microsoft Excelのソルバー機能(GRG非線形オプション)を用いて求めた。

$$\text{葉面積}=12.611 \times \text{葉重} \quad \dots (9)$$

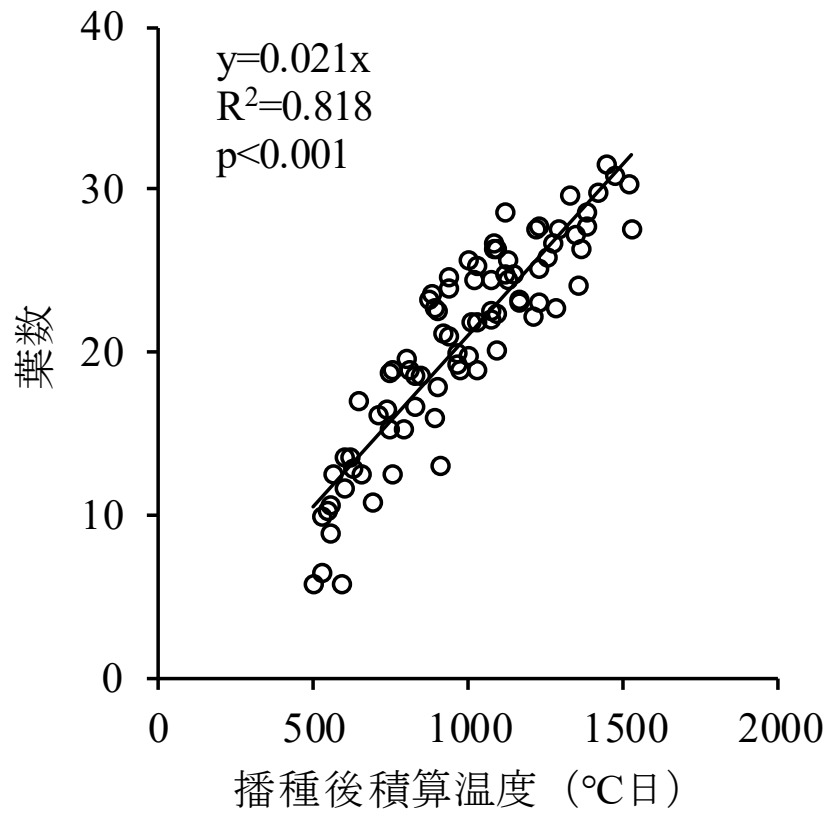


図 3-3 播種後積算温度と葉数の関係

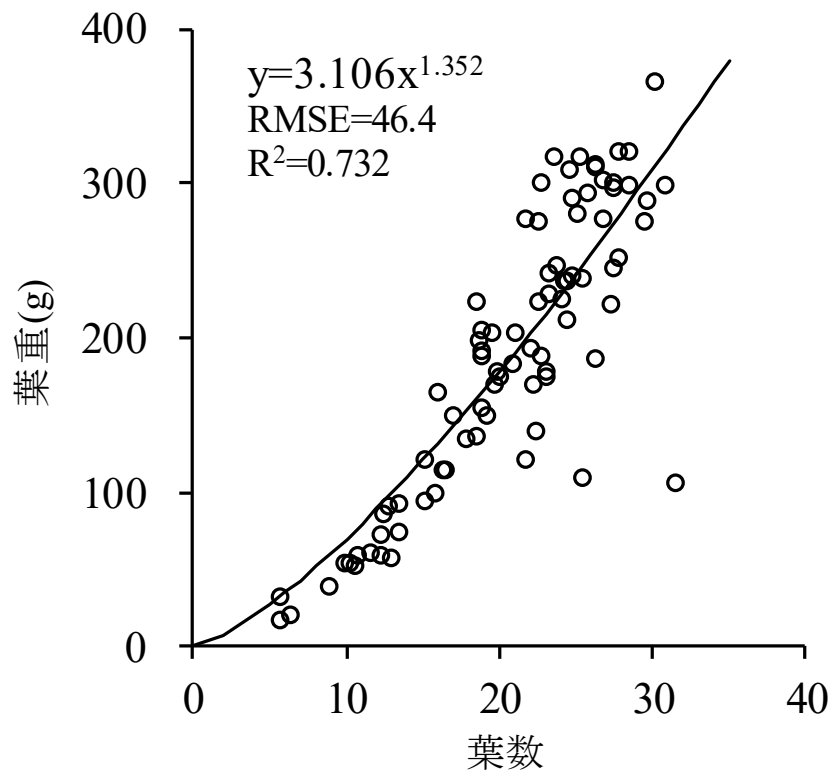


図 3-4 葉数と葉重との関係

RMSE：二乗平均平方根誤差(root mean square error)

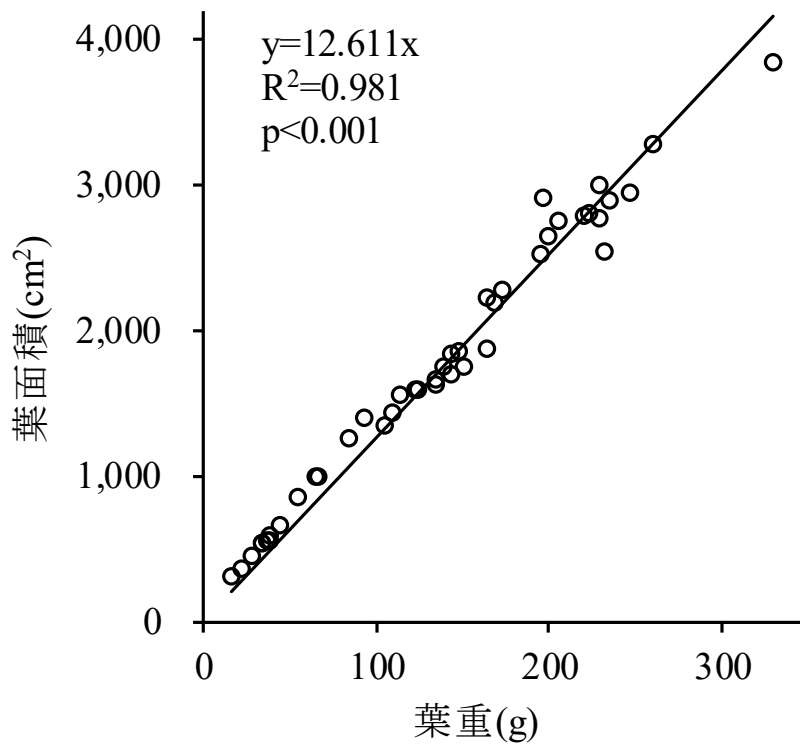


図 3-5 葉重と葉面積の関係

さらに、葉重と鉛直投影葉面積（VPA）との関係は、指数関数式(10)となった（RMSE =104, $R^2=0.871$ ：図 3-6）。パラメータ値は、前述の方法と同様に、Microsoft Excel のソルバー機能（GRG 非線形オプション）を用いて求めた。

$$VPA=1150.4 \times (1 - \exp(-0.0144158 \times (\text{葉重} - 1))) \quad \cdots (10)$$

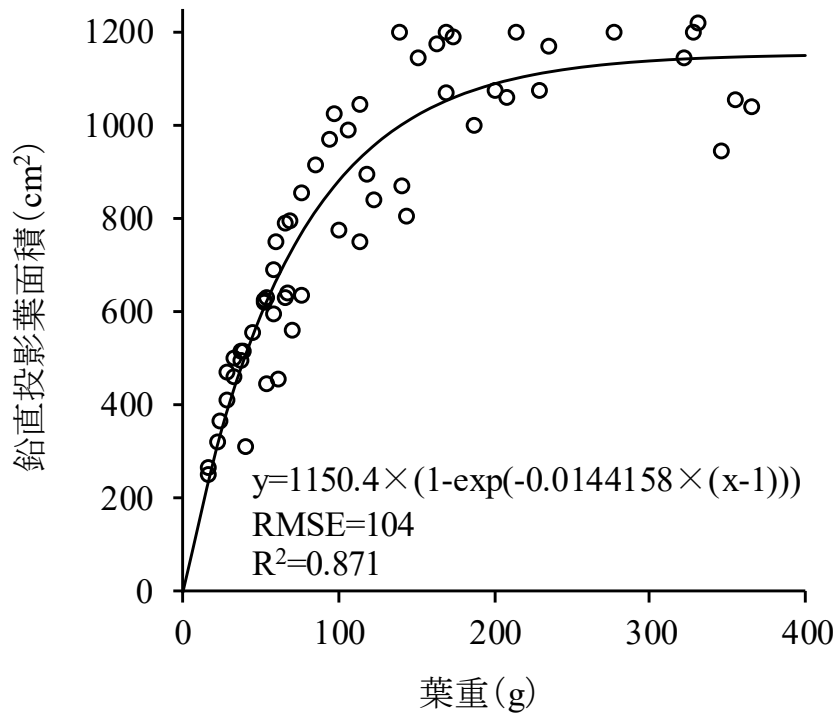


図 3-6 葉重と鉛直投影葉面積の関係

RMSE：二乗平均平方根誤差(root mean square error)

(2) 日射遮蔽量 (DIR) の算出

鉛直投影葉面積と葉面積の関係は、式(11)で表された (RMSE = 383, R² = 0.829 : 図 3-7) . パラメータ値は、前述の方法と同様に、Microsoft Excel のソルバー機能 (GRG 非線形オプション) を用いて求めた.

$$\text{葉面積} = 181.1e^{0.0023 \times \text{鉛直投影葉面積}} \quad \dots (11)$$

また、日射量測定フィルムを用いて、群落外 (I₀) および群落内 (I) の積算日射量を測定した結果と(3)式から吸光係数 (K) は 0.61~0.91 (平均 0.739) となり (表 3-2) , 日遮蔽日射量 (DIR) は(12)式となった.

$$\text{DIR} = S \times \text{VPA} \times (1 - \exp(-0.739 \times \text{LA} / \min(\text{VPA}, \text{AA}))) / 10000 \quad \dots (12)$$

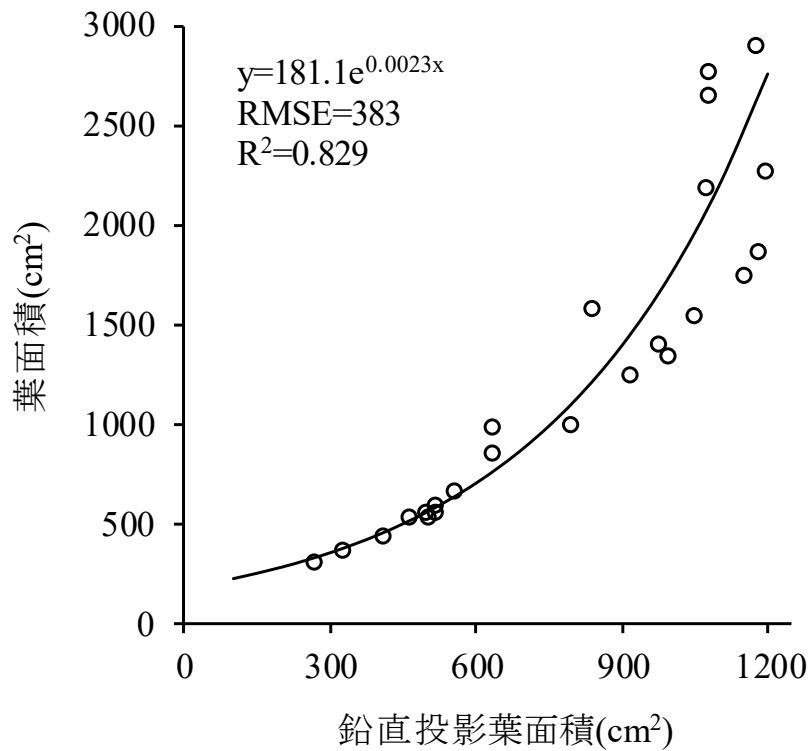


図 3-7 鉛直投影葉面積と葉面積の関係

RMSE：二乗平均平方根誤差(root mean square error)

表 3-2 生育中の吸光係数 K

年度	播種日	測定期間	積算日射量 (MJ/m ²)	群落吸光率	鉛直投影面積 (cm ²)	葉面積 ² (cm ²)	LAI	吸光係数K
	群落外		33.5	-	-	-	-	-
2017	9月15日	12月14日	6.5	0.81	1,195	2,759	2.3	0.71
	9月22日	~21日	5.8	0.83	1,053	1,963	1.9	0.91
	9月27日		7.4	0.78	1,004	1,744	1.9	0.79
	群落外	1月4日	88.0	-	-	-	-	-
	9月22日	~15日	52.9	0.40	772	999	0.8	0.61
2018	群落外	12月4日	138.9	-	-	-	-	-
	9月18日	~21日	33.4	0.76	1,155	2,507	2.1	0.68

²葉面積は、図 3-6 の関数により鉛直投影葉面積から推定した値。

(3) 日乾物生産量 (TDW) の算出

日平均気温と日射利用係数 (RUE) の関係をみたところ、RUE は低温時にやや低下する傾向が認められた (図 3-8)。寒候期キャベツの RUE がシグモイド関数で表せること

(岡田・佐々木, 2016) にしたがって、シグモイド関数 (13) 式で表すこととした。パラメータ値は、前述の方法と同様に、Microsoft Excel のソルバー機能 (GRG 非線形オプション) を用いて求めた。

$$RUE=1.923/(1+\exp((8.540-\text{日平均温度})/0.981)) \quad \cdots (13)$$

その結果、RUE は日平均気温が 10°Cを上回るあたりから一定になる関数となった (RMSE=0.263, R²=0.933 : 図 3-8)。

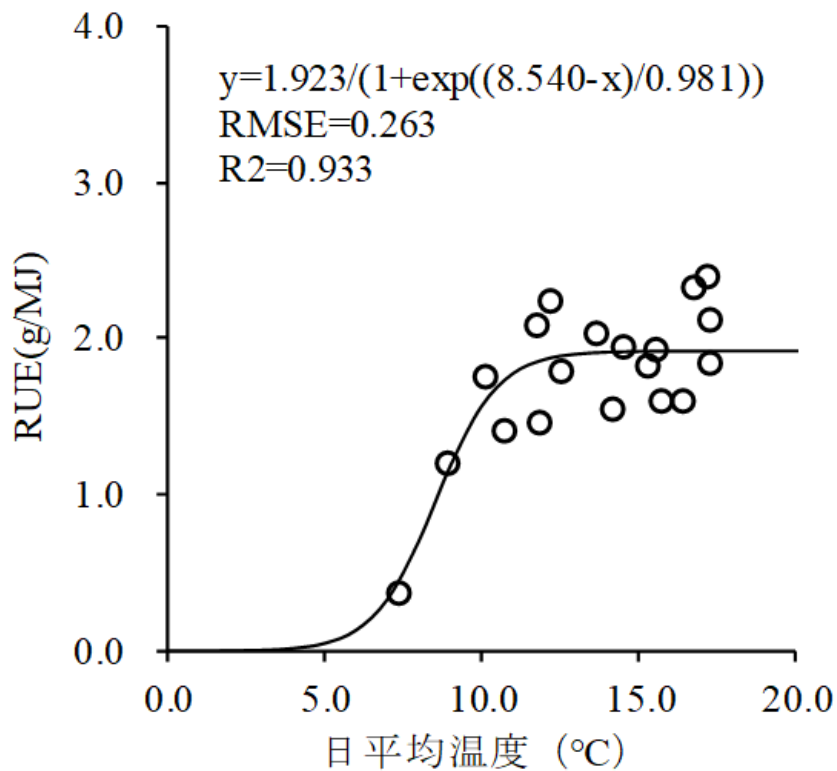


図 3-8 日平均温度と日射利用係数(RUE)の関係
RMSE : 二乗平均平方根誤差(root mean square error)

(4) 根重の算出

葉数と根部分配率との関係をみたところ、葉数が増えるに従い根部分配率が高くなった (図 3-9)。すなわち生育が進むに従いダイコンの T/R 比が低下し、乾物生産量に占

める根部乾物重の割合が高まり、その結果として葉数と根部分配率の関係は指数関数(14)で表すことができた (RMSE=0.0849, R²=0.792 : 図3-9) . パラメータ値は、前述の方法と同様に、Microsoft Excel のソルバー機能 (GRG 非線形オプション) を用いて求めた.

$$\text{根部分配率} = 0.807 / (1 + \exp((15.048 - \text{葉数}) / 5.912)) \quad \dots (14)$$

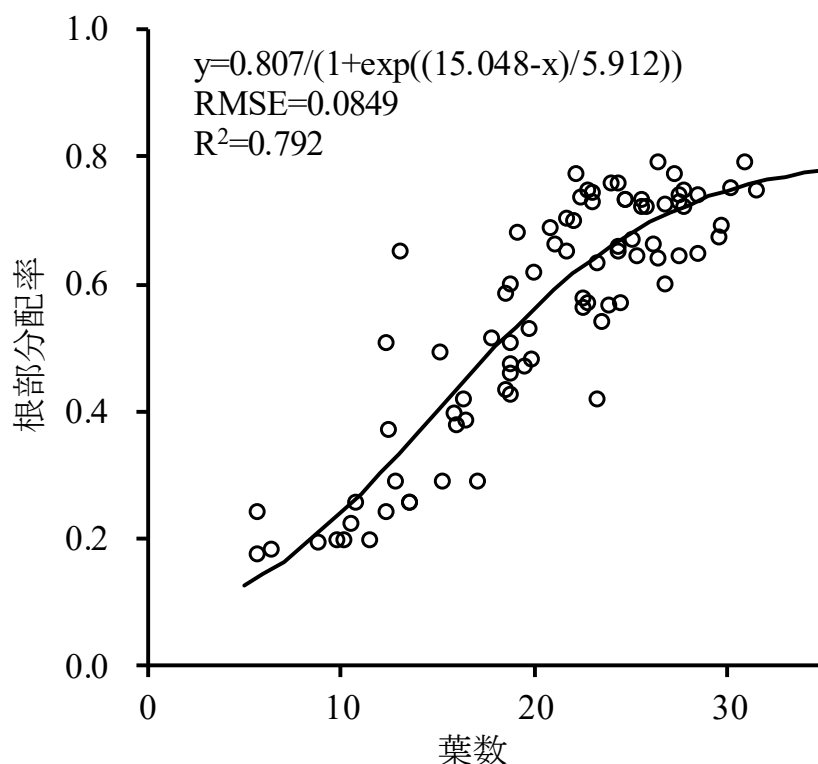


図3-9 葉数と根部分配率の関係

RMSE : 二乗平均平方根誤差 (root mean square error)

また、播種後積算温度と根部乾物率との関係は、直線回帰式(15)で表すことができた (R²=0.449, p<0.001 : 図3-10) .

$$\text{根部乾物率} = 0.0000225 \times \text{播種後積算温度} + 0.0762 \quad \dots (15)$$

以上により得られた各推定式を用い、2017年9月7日播種での根部新鮮重シミュレー

シヨンを図3-11 に例示した. 全乾物重 (TDW) と根部分配率の積から根部乾物重 (RDW) が求められ, さらに根部乾物重を根部分配率で除して根部新鮮重が導かれ, 連続的な根重増加を推定できた.

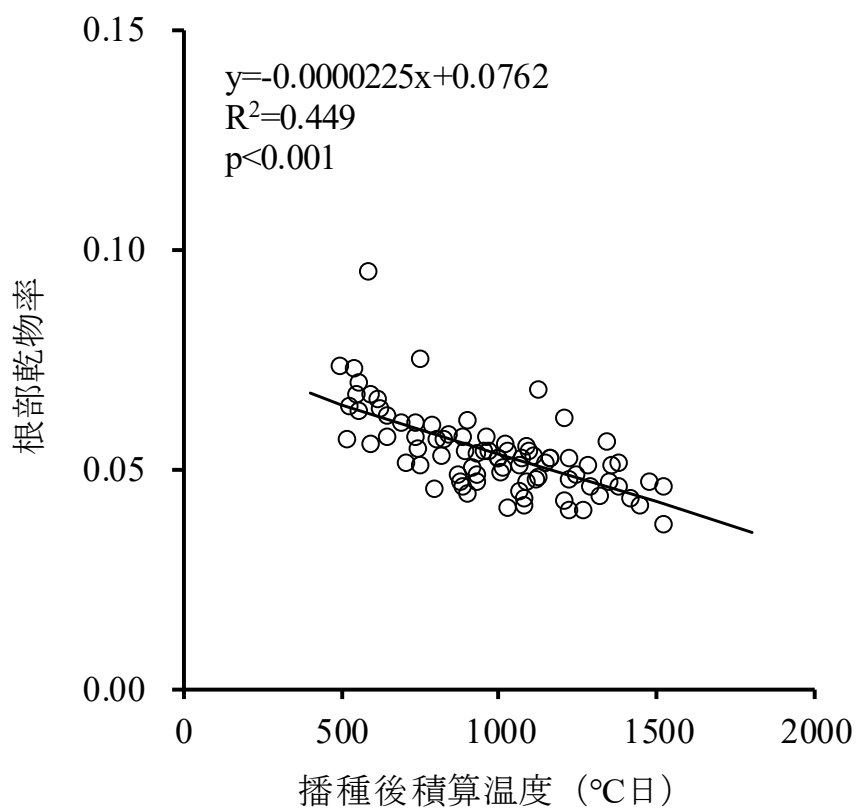


図 3-10 播種後積算温後と根部乾物率の関係

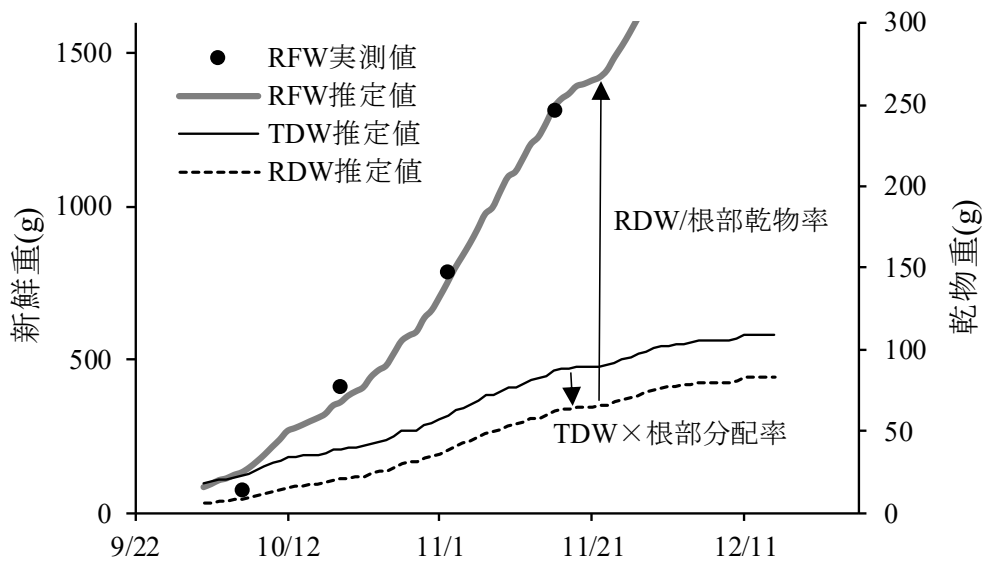


図 3-11 根部新鮮重の算出イメージ
(2017年9月7日播種の実測値および推定値)

(5) 推定精度の検証

2014～2017年度までの19作期のデータを用いて、新たに開発した生育モデルによる推定値と実測値の相対誤差（mean relative error；以下 MRE）について規格品（出荷重：0.5～1.8 kg/本）を対象に求めたところ、根部乾物重で17.2%，根部生体重で20.1%であった（図3-12，図3-13）。

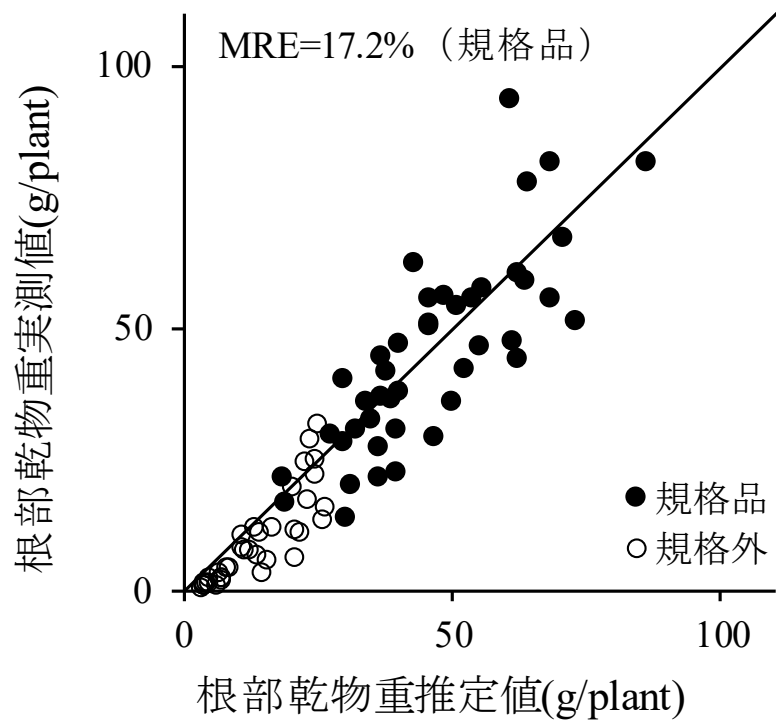


図 3-12 根部乾物重の推定精度
MRE：相対誤差 (mean relative error)

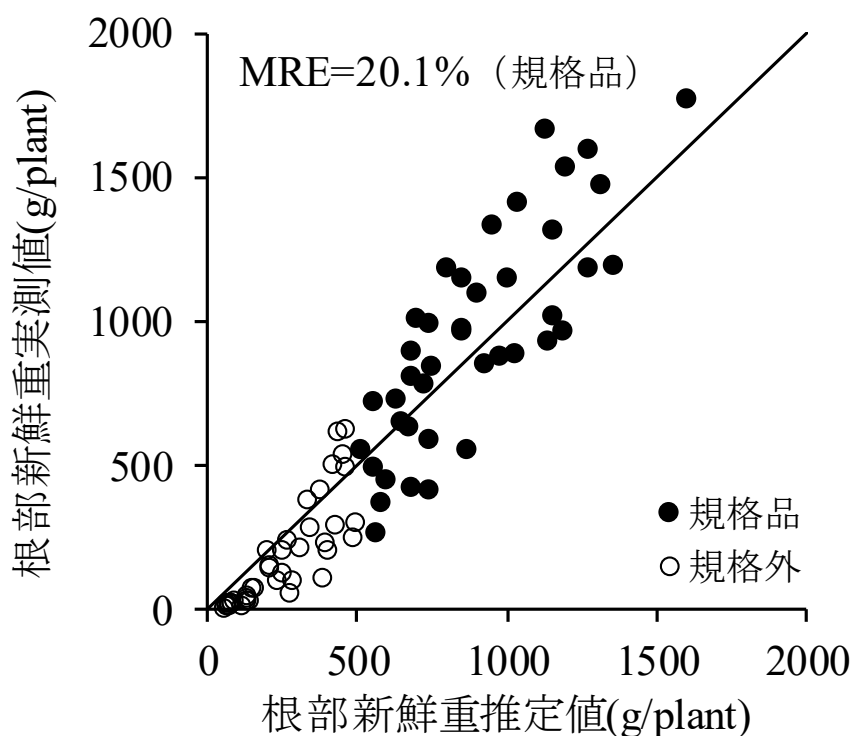


図 3-13 根部新鮮重の推定精度
MRE：相対誤差 (mean relative error)

2. 温暖化の定量的影響評価

(1) 温度上昇が収穫期に及ぼす影響

Lサイズ（出荷重 1kg/本）に達するまでの収穫日の変動を表 3-3（平塚）および表 3-4（三浦）に示した。2017 年度の気象条件における収穫日は、各作期により 11 月 6 日～3 月 13 日（平塚）、11 月 7 日～2 月 15 日（三浦）であった。全球気候モデル MIROC5 および温暖化ガス排出シナリオ RCP8.5 による 2050 年度の日平均気温は 2017 年度より 2.2～2.6℃（平塚）、2.7～3.3℃（三浦）各々上昇すると予測され、収穫期は 4～70 日（平塚）、6～56 日（三浦）各々前進すると予測された。前進程度は、播種期が遅いほど大きい傾向であった。

(2) 温度上昇が収量に及ぼす影響

2017 年度と同じ日に収穫すると仮定した収量への影響を表 3-3 および表 3-4 に示し

た。2017年度の気象条件における収量は、播種日により8.4～8.6t/10a（平塚）、8.3～8.6t/10a（三浦）であった。2050年度の収量は22～161%（平塚）、29～212%（三浦）各々増収すると予測された。増収程度は、播種期が遅いほど大きい傾向であった。

(3) 日射量の増減が収穫期に及ぼす影響

表3-3 および表3-4 に示したとおり、2050年度における温度上昇に加えて日射量が10%増えた場合、2017年度の収穫期に対して6～75日（平塚）、9～58日（三浦）各々前進すると予測された。温度上昇時との差が日射量10%増のみの影響と仮定すると、日射量10%増のみの影響は2～6日（平塚）、2～3日（三浦）の収穫期前進であった。一方、日射量が10%減る場合では、2～61日（平塚）、4～53日（三浦）各々前進すると予測された。温度上昇時との差が日射量10%減のみの影響と仮定すると、日射量10%減のみの影響は2～9日（平塚）、0～3日（三浦）の収穫期後退であった。

(4) 日射量の増減が収量に及ぼす影響

表3-3 および表3-4 に示したとおり、2050年度における温度上昇に加えて日射量が10%増えた場合、2017年度の収量に対して、34～187%（平塚）、41～243%（三浦）各々増収すると予測された。温度上昇時との差が日射量10%増のみの影響と仮定すると、日射量10%増のみの影響は12～26%（平塚）、12～31%（三浦）の増収となった。一方、日射量10%減の場合では、11～136%（平塚）、17～182%（三浦）各々増収すると予測され、温度上昇時との差が日射量10%減のみの影響と仮定すると、日射量10%減のみの影響は11～25%（平塚）、0～30%（三浦）の減収となった。

表 3-3 温度上昇および日射量変動が収穫日および収量に及ぼす影響（平塚）

播種日	2017		上昇温度 ^w (°C)	2050 ^x		2050(日射+10%) ^t		2050(日射-10%) ^s	
	収穫日 ^z	収量 ^y (t/10a)		収穫日 変動 ^v (日)	収量 変動 ^u (%)	収穫日 変動 ^v (日)	収量 変動 ^u (%)	収穫日 変動 ^v (日)	収量 変動 ^u (%)
9月7日	11月6日	8.4	2.2	-4	122	-6	134	-2	111
9月15日	11月24日	8.5	2.4	-9	124	-12	136	-7	113
9月22日	12月16日	8.4	2.4	-17	128	-19	140	-12	116
9月27日	1月20日	8.4	2.6	-35	137	-41	150	-26	124
10月12日	3月13日	8.6	2.5	-70	261	-75	287	-61	236

^z2017年の気象条件でLサイズ（葉付き出荷重 1kg）に到達する推定収穫日、^yLサイズ出荷重×栽植本数（8,333株/10a）から算出、^x農研機構メッシュ農業気象データ（MIROC5, RCP8.5）に基づく2046～2055年の日平均温度の平均値を2050年シナリオとした、^w2017年の播種～収穫までの平均気温との差、^vLサイズ到達日の2017年との日数差、^u2017年と同日に収穫すると仮定した場合の2017年収量との対比、^t2050年シナリオで日射量が10%増となった場合、^s2050年シナリオで日射量が10%減となった場合。

表 3-4 温度上昇および日射量変動が収穫日および収量に及ぼす影響（三浦）

播種日	2017		上昇温度 ^w (°C)	2050 ^x		2050(日射+10%) ^t		2050(日射-10%) ^s	
	収穫日 ^z	収量 ^y (t/10a)		収穫日 変動 ^v (日)	収量 変動 ^u (%)	収穫日 変動 ^v (日)	収量 変動 ^u (%)	収穫日 変動 ^v (日)	収量 変動 ^u (%)
9月7日	11月7日	8.4	3.0	-7	142	-9	156	-5	129
9月15日	11月18日	8.3	2.7	-6	129	-9	141	-4	117
9月22日	12月2日	8.4	2.7	-10	137	-12	150	-10	137
9月27日	12月15日	8.3	2.9	-15	162	-18	177	-12	147
10月12日	2月15日	8.6	3.3	-56	312	-58	343	-53	282

^z2017年の気象条件でLサイズ（葉付き出荷重 1kg）に到達する推定収穫日、^yLサイズ出荷重×栽植本数（8,333株/10a）から算出、^x農研機構メッシュ農業気象データ（MIROC5, RCP8.5）に基づく2046～2055年の日平均温度の平均値を2050年シナリオとした、^w2017年の播種～収穫までの平均気温との差、^vLサイズ到達日の2017年との日数差、^u2017年と同日に収穫すると仮定した場合の2017年収量との対比、^t2050年シナリオで日射量が10%増となった場合、^s2050年シナリオで日射量が10%減となった場合。

第4節 考察

1. 機構的生育モデル

本章で開発したモデルは、作物体の受光量に光乾物変換係数を乗じて乾物生産量を求める光変換型モデルで、光合成速度をベースに成長を記述する光合成速度型に比べて扱いが容易であり、露地栽培が主となる葉根菜類に適しているとされる（岡田，2008）。根重と積算温度の回帰式による三浦ダイコンの生産予測法（平石ら，1979）、ダイコン・ハクサイの三角法による生育予測（大沼・佐々木，1993）のような経験的モデル（empirical model）に比べると複雑なモデル構造になるが、作物の成長に合わせて植物体が受光する日射量と利用率から生産力を記述するという点では理にかなっている。このようなモデル構造のため、特に日射遮蔽量（DIR）の推定と日射利用係数（RUE）の決定が重要である。日射遮蔽量（DIR）は、日平均気温を入力して、葉数、葉重、葉面積の順に推定した。播種後積算温度と葉数の関係式は、トンネルニンジン（井方ら，1999）やタマネギの直播栽培（臼木ら，2019）と同様の直線回帰（ $R^2=0.818$, $p<0.001$ ）を示しており、妥当と考えられる（図3-3）。葉数と葉重の関係式は指数関数（ $RMSE=46.4$, $R^2=0.732$ ）で表された（図3-4）。これは、ダイコンの葉数が増えるにつれて1枚当たりの葉が大きくなることが観察されたことから、妥当と考えられる。葉重と葉面積の関係式は、トンネルニンジン（井方ら，1999）と同様の直線回帰（ $R^2=0.981$, $p<0.001$ ）を示しており、妥当と考えられる（図3-5）。葉重と鉛直投影葉面積（VPA）の関係式は指数関数（ $RMSE=104$, $R^2=0.871$ ）で表された（図3-6）。これは、生育が進むにつれて葉の重なりが大きくなるため、生育初期は葉重の増加にともない鉛直投影葉面積（VPA）が直線的に大きくなり、徐々に増大程度が小さくなったためと考えられる。鉛直投影葉面積と葉面積の関係式は、レタス（岡田ら，1997）と同様となり、作物の葉が圃場全面を覆っている状態は、栽植密度の逆数から計算される個体割当面積として $1,200\text{cm}^2$ に近似する指数（ $RMSE=38.3$, $R^2=0.829$ ）で表された（図3-7）。日射遮蔽量（DIR）の算定に必

要となる吸光係数 (K) は、測定時期による影響があったと思われる。表 3-2 に示したとおり、吸光係数 (K) は 0.61~0.91 (平均 0.739) と幅があり、特に 2017 年 1 月 4~15 日調査の LAI が 0.8 と低く、吸光係数 (K) も 0.61 と低くなった。この時期のダイコンは、低温乾燥状態で落葉が増えることにより LAI が低下したものと考えられる。吸光係数 (K) は、一般的に水平葉タイプの種は大きく、イネ科のような葉が立っている種は小さいとされている (星野ら, 1977; 光合成辞典, 2015)。キュウリの 1.09-1.57 (東出ら, 2012), トマトの 0.75 (Heuvelink ら, 2004), ニンジンの 0.648 (井方ら, 1999) などと比べて、0.739 (平均値) は概ね妥当と考えられるが、栽培条件によって変わることから、作型に合わせて調査する必要がある。日射利用係数 (RUE) は、寒候期のキャベツ (岡田・佐々木, 2016) と同様のシグモイド関数 ($RMSE=0.263$, $R^2=0.933$) で表された (図 3-8)。これは、ダイコンと同じアブラナ科のブロッコリーおよびカリフラワーにおいて、RUE に相当する radiation conversion coefficient が日平均気温 13.8°C まで増加したのち一定になるとの報告 (Olesen・Grevsen, 1997) と類似した結果で、妥当と考えられる。

本章で開発したモデルの推定精度については、必ずしも十分とはいえない。平石ら (1979) による三浦ダイコンの生産予測モデルでは、根重 500 g 以下の実測値に対する推定誤差が大きいため、500 g 以上に適用するとされている。本モデルも実際に適用が必要とされる規格品 (出荷重: 0.5~1.8 kg/本) を対象に相対誤差 (MRE) を求めた。岡田・佐々木 (2016) が開発した寒候期キャベツ生育モデルの相対誤差 (MRE) が結球部乾物重で 9.8%、結球部新鮮重で 15.4% であるのに比べると、本モデルの相対誤差 (MRE) は乾物重 (規格品) で 17.2、新鮮重 (規格品) で 20.1 と相対的に大きい。寒候期キャベツ生育モデルは、加工業務用の契約栽培における出荷 1 か月前の収穫予測を念頭に、キャベツの外葉が圃場全体を十分に覆った結球開始期~結球肥大初期を起点とする予測モデルである (岡田・佐々木, 2016)。これに対し、本モデルは播種日を起点としていることが予測誤差を大きくした要因の 1 つと考えられる。さらに精密な予測を行うためには、

降水量など温度および日射量以外の気象要因への対応や栽培途中のサンプリングデータによる補正等の方法について検討することが今後の課題である。

2. 温暖化の定量的影響評価

永年性作物である果樹は気候に対する適応範囲が狭く地域性が高いことに比べると、野菜は耐暑性品種の導入や高冷地栽培、施設や資材の活用などによって温暖化に適応しやすい面がある（大山，2006）。しかしながら、キャベツやダイコンは野菜の中でも特に価格伸縮性が大きく、天候による作柄の変動に伴って価格が大きく変動しやすい品目である（農林水産省，2009）。価格低迷時の産地廃棄、価格高騰時の輸入増を未然に防止するうえでも、収穫期や収量の定量的な予測が重要と考えられる。

温度上昇による収穫期前進程度は、播種日が遅いほど大きい傾向であった（表 3-3、表 3-4）。これは、秋冬ダイコンの場合、播種期が遅いほど栽培期間の温度条件が低く、低温期ほど温度上昇の影響が相対的に大きくなるためと考えられる。地域差については、平塚地域より三浦半島地域の方が上昇温度が高いにもかかわらず、平塚地域の前進程度が大きい傾向であった（表 3-3、表 3-4）。播種期の場合と同様に、冬期温暖な三浦半島地域に比べてより低温条件となる平塚地域で温度上昇の影響が相対的に大きくなるためと考えられる。なお、本モデルは降水量に対応していないため、生育期間が大きく変動することによる降水量の違いによって、予測される収穫期が変わる可能性がある。各産地では、需給調整のため作期毎の作付面積と作柄を把握して出荷時期別の出荷量を調整しているが、温度上昇により収穫期が大きく前進すると、作付計画の大幅見直しや産地移動の可能性が考えられる。

温度上昇が収量に及ぼす影響は、総じて増収になると予測された（表 3-3、表 3-4）。ダイコンの生育適温は、生育初期は平均気温 24℃ 前後で最も生育が促進され、24℃ 以上の高温に耐えるが、生育中期以降は平均気温 25℃ 以上の高温で根部肥大が抑制される（川城，2003b）。秋冬ダイコンの作型では、平塚地域、三浦半島地域いずれの 2050 年シナリオにおいても生育中期以降に平均気温 25℃ 以上の高温にならないため（図 3-14）、

温度上昇は生育促進に作用するものと考えられる。なお、表3-3 および表3-4 に示した収量変動は、基準年と収穫日が同じと仮定して試算したものである。実際には収穫期を早めるため、この増収率にはならないと考えられるが、温度上昇による増収傾向が価格暴落や産地間競争の激化などを誘発し、産地間リレーの見直し、他作物への転換などの対応が必要になると考えられる。

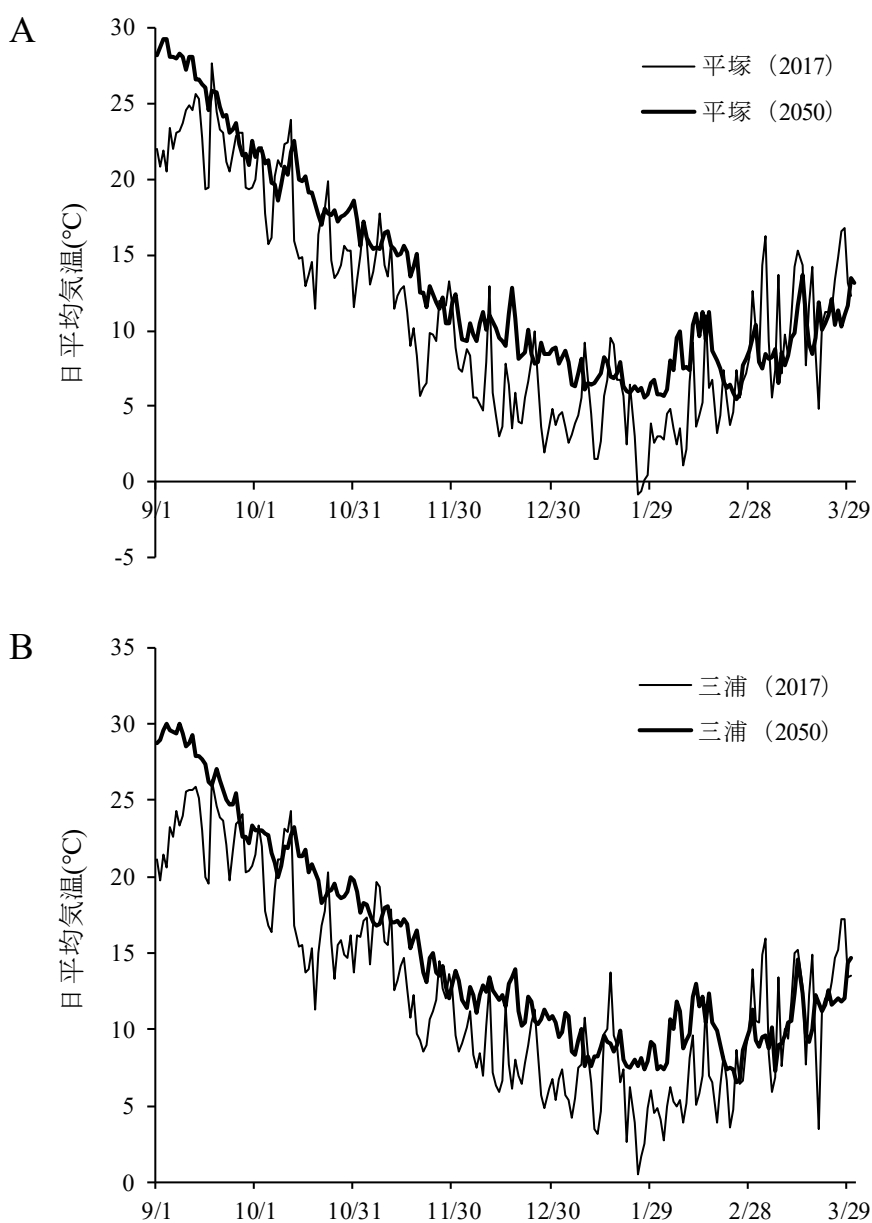


図3-14 2050年シナリオ²における日平均気温推移

²農研機構メッシュ農業気象データ(MIROC5, RCP8.5)に基づく
2046~2055年の日平均気温の平均値を2050年シナリオとした。

続いて、日射量の増減が収穫期に及ぼす影響については、日射量10%増による収穫期への影響は2~6日(平塚)、2~3日(三浦)の前進となり、温度上昇の影響が4~70日(平塚)、6~56日(三浦)であったのに比べると小さかった(表3-3, 表3-4)。同様に、日射量10%増による収量への影響は、12~26%(平塚)、12~31%(三浦)の増収

となり、温度上昇の影響が22~161%（平塚）、29~212%（三浦）であったのに比べると小さかった（表3-3、表3-4）。平石ら（1979）が三浦ダイコンにおける根重と積算気温、積算日射量との重回帰分析を行った結果では、 $Y=2.4171X_1+0.0189X_2-2375.407$ （ Y ：根重、 X_1 ：積算気温 $^{\circ}\text{C}$ 、 X_2 ：積算日射量 cal）となり、積算日射量の重みづけは小さく、積算気温のみで推定した場合と比べて誤差も小さかったと報告されている。また、トマトにおいて、積算受光量と地上部総乾物生産量との関係はほぼ1本の直線で示され（回帰直線の傾き1.93が光利用効率）、生育ステージによる光利用効率の違いがなくても、積算受光量の違いが総乾物生産量や収量の違いになったと報告されている（東出, 2018）。これらのことから、日射量増は積算受光量に直接的に影響することで増収効果はあるものの、それ以上に温度上昇により葉数の展開速度が早まり（浜本, 1992；山崎ら, 2012）、葉面積が増加すること、すなわち積算受光量が増加することによる増収効果の方が遙かに大きいことを意味していると考えられる。

以上の結果、温暖化は、秋冬どりダイコンの収穫期の前進、収量増に働くものと考えられる。生産性の向上は利点ではあるが、価格低落、栽培適地の移動、作付体系の見直しなど新たな課題を生じさせる側面もある。作期ごとの収穫期や収量について定量的に予測することが需給調整や作付計画などの参考になるものと期待する。なお、このモデルは気象条件に違いのある神奈川県内の2つの地域（三浦市、平塚市）のデータを基にして作成しており、ある程度の汎用性はあると考えられる。しかしながら、適用する品種の肥大特性、栽植密度、土壌条件の違いによって肥大速度が違うことから、他産地で利用する際には、その産地の栽培条件に合わせてモデルの各推定式を改良する必要がある。また、本章では検討していないが、温暖化に伴う高い二酸化炭素濃度大気の影響、病害虫被害や生理障害の増加リスク（大山, 2006）も含め、引き続き研究が必要と考えられる。

第5節 摘要

秋冬どりダイコンにおいて、根部新鮮重および根部乾物重の増加を日平均気温、日日照量および播種日を用いて予測する機構的モデルを開発した。供試品種に青首ダイコン品種‘福誉’（みかど協和（株））、2014～2018年における神奈川県内の三浦半島地域および平塚地域の気象データおよび栽培データを用いた。はじめに播種後積算温度から葉面積を求め、植物体の受光量を日射遮蔽量（DIR）とし、これに日射利用係数（RUE）を乗じて日乾物生産量（TDW）を求めた。続いて、葉数の関数である根部分配率および積算温度の関数である根部乾物率から根部新鮮重（RFW）を求めた。根部乾物重および根部新鮮重（規格品）の予測精度は、各々相対誤差平均（MRE）17%および20%であった。この生育モデルを用いて、全球気候モデルMIROC5および温暖化ガス排出シナリオRCP8.5に基づく2050年の温度条件、さらに日射量を10%増減させて、シミュレーションを行った。その結果、9月7日～10月12日播種（三浦）における2050年の温度は、2017年に比べて2.7～3.3℃上昇し、収穫期は6～56日前進、29～212%増収、日射量10%増では9～58日前進、41～243%の増収、日射量10%減でも4～53日前進、17～182%増収すると予測された。

第4章 総合考察

全国の農家数は215万5千戸（2015）で、10年前の314万4千戸（2005）からマイナス31%と急減しており、65歳以上の農業就業人口は58.2%（2005）から63.5%（2015）と急激に高齢化が進んでいる（農業センサス、2015）。野菜の作付面積は41.2万ha（2015）で25年前の59.9万ha（1990）より32%減少、野菜生産量は1,186万t（2015）で25年前の1,585万t（1990）より25%減となっている（農水省、2017）。一方、1経営体当たりの耕地面積は全国平均で1.9ha（2005）から2.5ha（2015）に大きくなっており（農業センサス、2015）、大規模経営を前提とした栽培方法への転換が今後進んでいく可能性も考えられる。このような構造的変化に加えて、近年は、地球温暖化をはじめとする気候変動が顕在化し、異常高温、大雨、竜巻、豪雪など観測史上の記録を更新するような異常気象が頻発しており、毎年のように各産地に甚大な被害を及ぼしている（気象庁、2015）。農業を取り巻くこうした厳しい状況の中で、スマート農業への転換が最近のトレンドになっており、産学官が一体となって研究開発が進められている（農林水産省、2020）。目玉の1つにICTによる環境制御があるが、これは主に施設栽培を対象としている。一方、露地栽培においては、GPSを搭載した自動走行トラクターが普及し始めているほか、ドローン（無人航空機）を使ったセンシングや農薬散布などの実用化も進みつつある（岡安ら、2016）。また、ICTや人工知能（AI）により、熟練農業者がもつ属人的な経験知や勘のような感覚的ノウハウを解析し、技術を可視化して新規就農者などに継承するシステムも開発されている。こうした先端技術が農家の減少や気候変動の対策としても有力なツールになると大いに期待されるが、これらが農業の現場に広く普及するまでにはかなりの時間を要す。また、神奈川県のように中小規模の農家によって成り立っている産地では、先端技術を集約したスマート農業による大規模経営が馴染まない面もある。

本論文で取り組んだ機構的生育モデルは、実際の作物の生育プロセスに基づいている

点に特徴がある。PC とインターネット環境があれば、気象データ（平均気温、日射量）を PC（Microsoft Excel）に入力して利用することができる。しかしながら、その入力作業自体が煩雑であり、誰もがすぐに使えるソフトウェアにはなっていない。すでに実用化されているトマトの生育・収量予測ツール（東出，2018）は、ダイコンの生育モデルと類似した構造になっており、積算受光量と光利用効率などから AI を使って収量予測するものである。これまで AI による学習・解析では、結果を導いた根拠がわからないブラックボックスモデルというものであったが、最近では、病害虫診断における判断の根拠となる画像を可視化できる AI も開発されている（Habaragamuwa ら，2019）。

こうした革新的技術が世帯保有率 83.4%のスマートフォンのように（総務省，2020）比較的安価で、誰もが簡便に利用できるツールとなっていくことが期待される。キャベツの早期抽苔予測やダイコンの生育予測についても、将来的には、スマートフォンで撮影した画像データやインターネットから入手した気象データなどで簡単に予測するようなアプリケーションの開発が望まれる。農家自らが圃場で撮影したキャベツやダイコンの生育状況の画像データから葉数や鉛直投影葉面積などを推定し、品種や播種日などの基本情報からの予測値を補正しながら、早期抽苔リスクや収穫適期を判定するような使い方ができれば、大規模経営だけでなく中小規模農家にも普及するであろう。なお、このモデルを他産地に適用する場合、キャベツでは栽培品種の抽苔特性に合わせた改良を行い、ダイコンでは産地の品種、栽植密度、土壌条件における肥大特性に合わせて改良することにより汎用性が獲得できると考えられる。また、地球温暖化と各種災害との因果関係についてはなお不明な点も少なくないが、すでに多くの深刻な事態が世界各地で生じており、対応策、適応策の取り組みが急務と思われる。2019 年現在で 77 億人いる世界人口はさらに増え続けると予測されており、食料の安定供給は新たな局面を迎えているという危機感をもつべきであろう。先人らの絶え間ない努力により受け継がれてきた産地をこれからも維持し、品質のよい野菜を安定供給するための一助として、本論文にまとめた基礎的知見が少しでも役に立てばと切に願っている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導、ご鞭撻を賜りました。

豊田剛己教授には、新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「メタゲノム線虫診断の導入による殺線虫剤使用量の30%削減」(2009~2011)や革新的技術開発・緊急展開事業「都市近郊エダマメ栽培体系に適応したダイズシストセンチュウの生物的防除法の開発」(2016~2018)等のご縁で指導教官になっていただき、平成27(2015)年9月の東京農工大学生物システム応用科学府博士後期課程入学から長期間に渡る論文作成において適切なお助言、激励をいただきました。心より深く感謝の意を表します。

岡田邦彦氏(農研機構)には、平成20(2008)年度の農研機構依頼研究員受け入れ以来長きにわたり生育モデルを含む研究全般についてご教授いただくとともに、農林水産省委託プロジェクト研究「地球温暖化が農業分野に与える影響評価と適応技術の開発」(2010~2014)および「農林業に係る気候変動の影響評価委託事業」(2015~2017)への参画や研究実施の中で大変お世話になりました。心より深く感謝の意を表します。

平石雅之氏(元神奈川県園芸試験場)には、本論文の基となる春キャベツの早期抽苔や三浦ダイコンの生育予測に関する研究実績を参考にさせていただくとともに、有益なお助言をいただいたことについて、厚く感謝の意を表します。

農林水産省委託プロジェクト「地球温暖化が農業分野に与える影響評価と適応技術の開発」および「農林業に係る気候変動の影響評価委託事業」の研究実施にあたりご協力および有益なお助言をいただいた北宜裕氏(現日本大学)並びに北浦健生氏、藤代岳雄氏、草野一敬氏、太田和宏氏、安藤正博氏、加藤成人氏(神奈川県農業技術センター)に厚く感謝の意を表します。

東出忠桐氏(農研機構)、鮫島良次氏(北海道大学)、濱寄孝弘氏(農研機構)には、春キャベツの早期抽苔予測のモデル化にあたり、大変有意義なお示唆をいただいたことについて、厚く感謝の意を表します。

引用文献

- 安達義輝・志村浩雄・額田光彦・斎藤祐一・桑名篤・安部充. 2018. 温暖化傾向における果樹の発育速度 (DVR) モデルの検証. 福島農総セ研報. 9: 11-22.
- 近岡一郎・大林延夫・推名清治. 1971. 三浦ダイコンを加害するキタネグサレセンチュウの総合防除に関する研究. 神奈川農試共同研報. 2: 1-50.
- 独立行政法人農畜産業振興機構. 2019. 平成30年度カット野菜・冷凍野菜・野菜惣菜に係る小売り販売動向調査報告概要: 1-34.
- 江口庸雄. 1950. 花芽分化の研究(7). 農業及び園芸. 25 (9): 89-90.
- 福地信彦. 1996. キャベツ作型と品種選択. 農業技術体系. 7. 基: 67-74.
- 藤田政良. 1993. バーナリゼーション. 農業技術体系. 1: 127-132.
- Habaragamuwa, H., Y. Oishi, M. Takeya and K. Tanaka. 2019. Plant disease identification using explainable features with deep convolutional neural network, 2019 International joint conference on JSAM and SASJ, and CIGR VI Technical symposium joining FWFNWG and FSWG workshops, 2019/9/4.
- 浜本浩. 1992. べたがけ下の環境がハウレンソウの生育におよぼす影響. 農業気象. 48 (3): 247-255.
- Heuvelink, E., M.J. Bakker, A. Elings, R. Kaarsemaker and L. F. M. Marcelis. 2004. Effect of leaf area on tomato yield. Acta Hort. : 43-50.
- 東出忠桐・後藤一郎・鈴木克己・安場健一郎・塚澤和憲・安東赫・岩崎泰永. 2012. 収量構成要素の解析からみたキュウリ短期栽培の摘心およびつる下ろし整枝法の差異. 園学研. 1 (4): 523-529.
- 東出忠桐. 2018. 施設トマトの収量増加を目的とした受光と物質生産の関係の利用. 園学研. 17 (2): 133-146.

- 平石雅之. 1966. 秋まき早生キャベツの抽台予測法に関する試験. 神奈川園試成績書：2-8.
- 平石雅之・大林延夫・横溝剛. 1979. 三浦ダイコンの生育予測に関する研究（第1報）根部の発育に対する気温と日射量の影響. 神奈川園試研報. 26：43-51.
- 堀江武・中川博視. 1990. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究第1報モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適用. 日作紀. 59(4)：687-695.
- 星野和生・吉川雅夫・野口正樹・池田澄男. 1977. 野菜の収量成立要因の解析に関する研究. 野試報：1-29.
- 五十嵐大造・大林延夫. 1985. 夏まき冬どりキャベツの凍害と腐敗病の関係について. 神奈川園試研報. 32：35-41.
- 五十嵐大造. 1994. キャベツの凍害防止に関する研究. 神奈川園試研報. 44：101-148.
- 飯塚悟. 2015. 地球温暖化研究の概要. 日本風工学会誌. 40(4)：375-379.
- 井方宏典・板東一宏・川下輝一・岡田邦彦. 1999. ニンジンのトンネル栽培における生育予測モデル. 徳島農試研報. 35：7-13.
- 池鯉鮒悟. 2011. 国内の日射量変化について. 久留米工業大学研報. 33：21-26.
- 池下洋一・石端一男・金森有里. 2010. 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. 園学北陸研究発表要旨：29.
- Itabashi, E., D. J. Shea, N. Fukino, R. Fujimoto, K. Okazaki, T. Kakizaki and T. Ohara. 2019. Comparison of cold responses for orthologs of cabbage vernalization-related genes. Hort. J. 88(4): 462-470.
- Ito, H. and T. Saito. 1961. Time and temperature factors for the flower formation in cabbage. Tohoku J. Agr. Res. 12: 297-316.
- 岩間誠造. 1972. キャベツ花成生理. 農業技術体系野菜編. 7. 基：37-48.

- 岩見直明, 1983. 主要軟弱野菜の花芽分化ならびに抽だいに関する研究. 東京農試研報 : 1-62.
- Izumi, T., M. Nishimori and M. Yokozawa. 2008. Combined equations for estimating global solar radiation: projection of radiation field over Japan under global warming conditions by statistical downscaling. J. Agric. Meteorol. 64 (1): 9-23.
- 神奈川県農政部農業技術課, 1992. かながわ昭和農業史(大日本印刷株式会社):226-228.
- 環境省, 2012. 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究 : 1-70.
- 環境省, 2014. IPCC 第5次評価報告書の概要 : 1-59.
- 川方俊和・岡田益己, 1989. 発育指数を用いた水稻の幼穂形成始期と出穂期の推定. 横行気象, 45(3) : 137-142.
- 川方俊和, 1998. 気象情報に基づいた水稻生育のモデル化に関する研究. 農研セ研報, 29 : 13-65.
- 川城英夫, 2003a. ダイコン作型の特性と適応品種. 農業技術体系野菜編, 9 : 97-98 の1の2.
- 川城英夫, 2003b. ダイコンの生理・生態を生かす栽培の基本. 農業技術体系野菜編, 9 : 98 の18-32.
- 気象庁, 2015. 異常気象レポート 2014 概要編 : 1-34.
- 気象庁, 2017. IPCC の RCP8.5 シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変動予測. 地球温暖化予測情報, 9 : 1-41.
- 北田幹夫, 1993. ダイコンの発達に対する低温の影響. 富山農技セ研報, 13 : 41-48.
- 小林紀彦・駒田旦, 1983. 土壌病害に対する病害抑止土壌. 肥料科学, 6 : 69-97.
- 小林紀彦, 1992. 三浦ダイコン産地では何故ダイコン萎黄病が見られないのか? (その1). 農薬と科学 : 2-6.

- 小林紀彦. 1995. 三浦ダイコン産地では何故ダイコン萎黄病が見られないのか？（その2）. 農薬と科学：1-6.
- 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.
- Kohyama, K., A. Takada, N. Sakurai, F. Hayakawa and H. Yoshiaki. 2008a. Tensile test of cabbage leaves for quality evaluation of shredded cabbage. Food Sci. Technol. Res. 14: 337-344.
- Kohyama, K., Y. Takezawa and A. Takada. 2008b. Effects of head size on the mechanical properties of shredded cabbage. Food Sci. Technol. Res. 14: 541-546.
- 小南靖弘・佐々木華織・大野宏之. 2019. 技術マニュアル「メッシュ農業気象データ利用マニュアル Ver.4」：1-67.
- 光合成辞典 Web 版（日本光合成学会編）. 2015. 門司と佐伯のモデル.
<<http://photosyn.jp/pwiki/index.php?>>
- 黒崎友紀・西田忠志・入谷正樹. 2000. だいこん新品種の特性調査と収穫後に発生する生理障害. 北海道十勝農試成果情報.
- 松原茂樹・飛高義雄. 1940. 甘藍（品種野崎中生及 succession）の播種期並に移植回数と花芽の分化との関係に就て. 園学誌. 11 (3)：317-333.
- 松木宏司・塚田元尚・小口伴二・上杉壽和・小澤智美. 1997. 鉛直投影面積測定システムとレタス生育予測への利用可能性. 長野野花試報. 10：19-26.
- 三神和彦. 2010. 三浦ダイコンと三浦半島ダイコンの現状. だいこんの魅力にせまる「だいこんサミット六年間をふりかえって」（株式会社松田）：26-32.
- Milford, G. F. J., T. O. Pocock and J. Riley. 1985. An analysis of leaf growth in sugar beet, I. Leaf appearance and expansion in relation to temperature under controlled conditions. Ann. Appl. Biol. 106: 163-172.
- 三浦半島農業改良協議会. 2014. 三浦半島農業のあゆみ：8-16.
- 森田敏. 2008. イネの高温登熟障害の克服に向けて. 日作紀. 77 (1)：1-12.

- 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ンではない. 園学東海研究発表要旨: 4.
- 永田雅靖. 2012. 加工・業務葉キャベツの収穫時期と貯蔵後の品質特性. 日食工誌. 39: 40-44.
- 永田雅靖. 2021. 収穫後の成果物における品質変化ならびにその制御に関する生化学的・分子生物学的研究. 日食保蔵誌. 47(1): 47-50.
- 中川孝俊. 2003. 静岡県における温暖化の実態と農業生産への影響評価. 静岡農試研報. 48: 75-86.
- Ngwenya, S. M. 2016. The effect of low temperature on growth and bolting of cabbage. University of Pretoria: 1-66.
- 西森基貴・石郷岡康史・桑形恒男・滝本貴弘・遠藤伸彦. 2019. 農業利用のための SI-CAT 日本全国 1km 地域気候予測シナリオデータセット (農研機構シナリオ 2017) について. シミュレーション. 38(3): 1-5.
- 農林水産省. 2009. 野菜の需給調整について: 1-14.
- 農林水産省. 2015. 農林業センサス. e-Stat 政府の統計窓口.
<<https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2015/top.html>>.
- 農林水産省. 2016. 神奈川県農林水産業: 1-20.
- 農林水産省. 2017a. 野菜をめぐる情勢: 1-30.
- 農林水産省. 2017b. 平成 27~28 年神奈川県農林水産統計年報. e-Stat 政府の統計窓口.
□. <https://www.maff.go.jp/kanto/to_jyo/2017data/kanagawa_h27-28.html>.
- 農林水産省. 2018. 平成 30 年産野菜生産出荷統計. e-Stat 政府の統計窓口.
<<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500215&tstat=000001013427&cycle=7&year=20180&month=0&tclass1=000001032286&tclass2=000001032933&tclass3=000001135323>>.

- 農林水産省. 2020. スマート農業の展開について：1-42.
- 大林延夫・平石雅之. 1974. 青アザダイコン（仮称）再現試験. 神奈川園試三浦試研成績：100-101.
- 大林延夫. 1989. ダイコンを加害するキタネグサレセンチュウの防除技術に関する研究. 神奈川園試報. 39：1-90.
- 大林延夫. 1990. マリーゴールド利用によるキタネグサレセンチュウの防除. 農業技術体系：171-177.
- 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. 四国農試報. 61：67-72.
- 岡田邦彦. 2008. 露地野菜の生育予測に対するニーズと技術的課題～生育モデルの生育予測への利用. 平成20年度野菜茶業課題別研究会資料：1-5.
- 岡田邦彦・佐々木英和. 2016. 寒候期キャベツの結球重増加モデルの開発. 野菜茶研報. 15：67-76.
- 岡田邦彦・菅原幸治. 2019. 加工業務葉露地野菜生産・出荷におけるデータ駆動型生産支援システム. 農研機構研報. 1：43-45.
- 岡本保. 2002. キャベツ春どり栽培. 農業技術体系. 7. 基：116の26-31.
- 岡安崇史・深見公一郎・長谷川克也. 2016. 露地栽培作物の生育評価のためのドローン利用. 農業食料工学会誌. 78(2)：110-115.
- 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*). *Exp. Bot.* 48: 1591-1598.
- 大沼康・佐々木丈夫. 1993. 露地野菜の三角法による生育予測. 東北農研. 46：283-284.
- 大山英久. 2006. 地球温暖化と日本の農業. 議会官房リファレンス：28-47.

- Sato, E., Y. Y. Min, K. Toyota and A. Takada. 2009. Relationships between the damage to radish caused by the root-lesion nematode *Pratylenchus penetrans*, its density prior to cultivation and the soil nematode community structure evaluated by polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis. *Soil Sci. Plant Nutr.* 55 (4): 478–484.
- Sato, E., K. Toyota, H. Takeda and I. Okumura. 2011. Difference of soil biological responses to amendment with okara and coffee residue compost or cow manure compost. *Soil Microorganisms.* 65 (1): 18–26.
- 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.
- 総務省. 2017. 家計調査年報. <<https://www.stat.go.jp/data/kakei/2017np/index.html>>.
- 総務省. 2020. 情報通信白書.
<<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/index.html>>.
- 杉浦俊彦・黒田治之・杉浦裕義. 2007. 温暖化がわが国の果樹生育に及ぼしている影響の現状. *園学研.* 6(2): 257–263.
- 高田敦之・太田和宏・北浦健生・北宜裕. 2014. 三浦半島における寒玉系キャベツの新作型4～5月どり栽培技術の確立. *神奈川農技セ研報.* 157: 7–16.
- 高田敦之・小勝淑弘・曾我綾香. 2015. 夏季緑肥栽培による土壌中硝酸態窒素の溶脱低減効果及び後作への影響. *神奈川農技セ研報.* 159: 15–19.
- 高田敦之・増田義彦. 2016. 冬春どりダイコンにおける青変症発生条件の解明. *神奈川農技セ研報.* 160: 17–21.
- 武田悟・加賀屋博行. 1999. ノンパラメトリック DVR 法によるキャベツの収穫期予測. *秋田農試研報.* 39: 8–11.
- 玉木有子・高田敦之. 2010. 4月、5月どり加工・業務用キャベツの品質評価と消費者嗜好. *日本味旬誌.* 17: 347–350.

- Taniwaki, M., S. Takahashi, N. Sakurai, A. Takada and Y. Nagata. 2009. Effects of harvest time and low temperature storage on the texture of cabbage leaves. *Postharvest Biol. Technol.* 54: 106–110.
- 寺西克倫・永田雅靖・増田大祐. 2015. ダイコン根の青変症における青色色素形成の前駆物質. *園学研.* 14 (別1) : 253.
- Teranishi, K. and M. Nagata. 2018. Prediction and suppression of internal blue discoloration in roots of daikon, the Japanese radish (*Raphanus sativus* L.). *Food Sci Nutr.* (6): 2134–2140.
- 刀祢茂弘. 1988. リーフレタスの生育、花芽分化抽台に及ぼす気温の影響. *山口農試研報.* 40 : 34–43.
- 東京都中央卸売市場. 2018. 市場統計情報 (月報) .
<<http://www.shijou.metro.tokyo.jp/torihiki/geppo/>>
- 白木一英・室崇人・末貞辰朗・東野裕広・川城英夫・森田直彦・森永靖武. 2019. タマネギ直播栽培における気温による展葉数推定法の検討. *園学研.* 18 (1) : 17–23.
- Wada, S., K. Toyota and A. Takada. 2011. Effects of the nematicide imicyafos on soil nematode community structure and damage to radish caused by *Pratylenchus penetrans*. *Journal of Nematology.* 43: 1–6.
- Williams, C. A. and J.G. Atherton. 1990. A role for young leaves in vernalization of cauliflower: I. Analysis of leaf development during curd induction. *Physiol. Plant.* 78: 61–66.
- Wit, C. T. de, R. Brouwer and P.F.W.T. Penning de Vries. 1970. The simulation of photosynthetic systems. *Proc. IBP/PP Tech. Meet.:* 47–70.
- 山崎篤・田中和夫・位田晴久. 2012. ネギの花芽分化に関わる植物体の生育ステージ—特に葉数との関連について—. *園学研.* 11 (2) : 257–263.