

秋冬どりダイコンにおける生育モデルの開発 及び地球温暖化の影響評価

高田敦之・太田和宏・草野一敬・岡田邦彦¹⁾

Development of a Growth Forecast Model in Japanese Radish Harvested in Autumn to Winter and Evaluation of the Impact of Global Warming

Atsushi TAKADA, Kazuhiro OHTA, Kazutaka KUSANO, Kunihiko OKADA¹⁾

摘要

秋冬どりダイコンにおいて、根部生体重及び乾物重の増加を日平均気温、日射量及び播種日を用いて予測する構造的モデルを開発した。供試品種に青首ダイコン品種‘福誉’、2014～2018年における神奈川県内の三浦半島地域及び平塚地域の気象データ及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及び積算温度の関数である根部乾物率から根部生体重(RFW)を求めた。根部乾物重及び根部生体重(規格品)の予測精度は、各々相対誤差平均(MRE)17%及び20%であった。この生育モデルを用いて、全球気候モデルMIROC5及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。

キーワード：積算温度、日射遮蔽量、鉛直投影葉面積、日射利用係数、メッシュ農業気象データ

Summary

We developed a growth forecast model to predict the increase in root dry weight (RDW) and root fresh weight (RFW) of Japanese radish harvested in autumn to winter. We used cultivation data of a Japanese variety ‘Fukuhomare’ and meteorological data from 2014 to 2018 at the Miura Peninsula area and Hiratsuka area in Kanagawa. At the beginning, leaf area was calculated from cumulative temperature and total dairy increase of dry weight (TDW) was estimated using daily intercepted solar radiation (DIR) and radiation utilization efficiency (RUE). Then, root fresh weight (RFW) was calculated by assuming that the distribution of dry matter to root is a function of the leaf number, and ratio of fresh weight to dry weight of root is a function of cumulative temperature. The model predicted RDW and RFW (standardized products) with mean relative errors (MRE) of 17% and 20%, respectively. We simulated the influence of global warming in 2050 under conditions of 10% increase and decrease in the solar radiation. In Japanese radish seeded between September 7 and October 12 in 2050 at Miura Peninsula, temperature will rise by 2.7-3.3℃, harvest advanced by 6-56 days and yield increase by 29-212%. At the 10% increase and 10% decrease of the solar radiation, harvest will advance by 9-58 days and 4-53 days, and yield increase by 41-243% and 17-182%, respectively.

Key words: cumulative temperature, daily amount of intercepted solar radiation, mesh data, radiation utilization efficiency, vertical projection leaf area

¹⁾国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構野菜花き研究部門

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 200 mm 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と指摘されている (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、春及び夏は 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 89,200 t で、その約 8 割を三浦半島地域が占めている (農林水産省 2017, 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 2003)、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。そこで本研究では、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、温度上昇及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ので報告する。

なお、本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「農林業に係る気候変動の影響評価委託事業 (平成 27~29 年度)」の助成を受けて実施し、本報告の一部は、園芸学会平成 28 年度秋季大会、平成 29 年度秋季大会及び平成 30 年度秋季大会で発表した。

材料及び方法

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) 内の腐植質黒ボク土の圃場 (神奈川県三浦市、年平均気温 15.8°C、年平均降水量 1,557 mm)、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 1,710 mm) 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」を用い、表 1 の 21 作期で栽培した。施肥は 10 a 当たり石灰肥料 100 kg (CaO34%) を施用し、基肥として成分量 N:P₂O₅:K₂O=9:20:11 kg、追肥として成分量 N:P₂O₅:K₂O=12:0:12 kg を施用した。栽植密度は、畝間 50 cm、株間 24 cm (8,333 株/10a) とした。病害虫防除は、神奈川県発行の「病害虫雑草防除指導指針」に準じて、適宜行った。

2. 生育データ及び気象データ

表 1 の各作期について、生育期~収穫期のために 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 1 g 以上（以下、葉重）と 1 g 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。また、葉部及び根部の各サンプルの一部について生体重を秤量したのち、60°C 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/生体重 × 100 から葉部及び根部の各乾物率を算出した。さらに、2018 年 9 月 18 日及び 27 日播種において、根重 0.9 ~ 2.1 kg 時の葉重（出荷調製時に残す長さ 10 cm の葉）を測定した。

気象データは、三浦試験圃場及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及び日射量データを用いた。

表 1 各年度の試験場所及び作期別播種日

年度	場所	11月どり	12月どり	1月どり	2月どり	3月どり
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、日平均気温から葉数、葉面積を導き、葉の受光量（遮蔽する日射量）と日射利用係数（RUE）の積から乾物生産量を求め、根部乾物率、根部分配率から根部生体重（RFW）を求めるものである（図 1）。

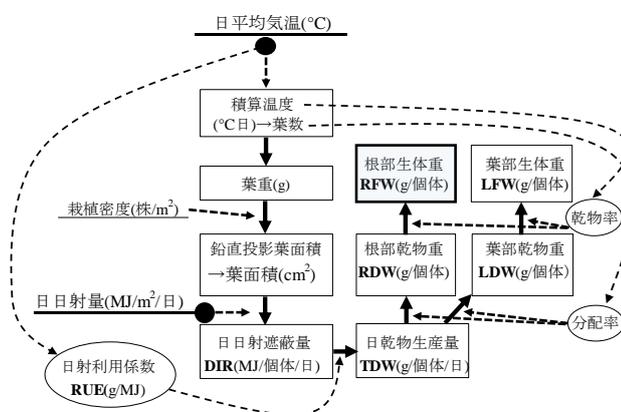


図 1 秋冬どりダイコンの機構的生育モデルの構造
（岡田 2008 を基に改変）

(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 日及び 12 月 13 日に生育ステージの異なる 25 個体について、葉重及び葉面積測定器（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（VPA : Vertical Projection leaf Area, cm²/plant）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 日及び 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 20 cm 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。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、葉面積推定ソフトを用いて 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。

(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（DIR : daily amount of intercepted solar radiation, MJ/plant/day）は、(1)式から求められる（岡田ら 1997, 岡田・佐々木 2016）。

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

S（daily solar radiation : 日射量, MJ/m²/day）は、気象データから得られる。VPA（vertical projection leaf area : 鉛直投影葉面積, cm²/plant）は葉重から推定した。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（AA : allocated area to each plant, cm²/plant）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（8,333 株/10a）から計算される個体割当面積（1,200 cm²/plant）を超えた場合の鉛直投影葉面積は 1,200 cm²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(2)式が成り立つ（星野ら 1977,

光合成辞典)。

$$I = I_0 \times \exp(-K \times LAI) \quad \dots(2)$$

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、(3)式で求められる。

$$K = \ln(I_0/I) / LAI \quad \dots(3)$$

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)及び栽培圃場内(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日及び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日及び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、材料及び方法3(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(TDW: total daily increase of dry weight, g/plant/day)は、植物体が受けた日射量に日射利用係数(RUE: radiation utilization efficiency, g/MJ)を乗じた(4)式で求められる。

$$TDW = DIR \times RUE \quad \dots(4)$$

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(RDW: root dry weight, g)及び葉部乾物重(LDW: leaf dry weight, g)から根部分配率の関係式を求めた。また、根部乾物重(RDW)及び根部生体重(RFW: root fresh weight, g)から根部乾物率の関係式を求めた。根部生体重(RFW)は、(5)式で求めた。

$$RFW = TDW \times \text{根部分配率} / \text{根部乾物率} \quad \dots(5)$$

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、温度上昇及び日射量の増減が収穫期及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及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)及び三浦半島(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日及び10月12日播種のダイコン根部生体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、材料及び方法2で述べた方法により一律80 gとした(データ省略)。

次に、温度上昇及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生体重をシミュレートした。10 a収量は、出荷重(根重+葉重80 g)と栽植本数(8,333株/10a)の積から算出した。

結果及び考察

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、井方ら(1999)のトンネルニンジンと同様に直線回帰式(6)で表すことができた($R^2=0.818$, $p<0.001$: 図2)。

$$\text{葉数} = 0.021 \times \text{播種後積算温度} \quad \dots(6)$$

続いて、葉数と葉重の関係は指数関数式(7)で表すことができた(RMSE=46.4, $R^2=0.723$: 図3)。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。

$$\text{葉重} = 3.106 \times \text{葉数}^{1.352} \quad \dots(7)$$

ダイコンの生育が進み、葉数が増えるにつれて 1 枚当たりの葉が大きくなるのが観察されたことから、葉数と葉重との関係が指数関数になったと考えられた。

次に、葉重と葉面積の関係は、直線回帰式(8)で表すことができた ($R^2=0.981$, $p<0.001$: 図 4)。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。

$$\text{葉面積} = 12.611 \times \text{葉重} \quad \dots(8)$$

さらに、葉重と鉛直投影葉面積 (VPA) との関係は、指数関数式(9)となった ($RMSE=104$, $R^2=0.871$: 図 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。

$$\text{VPA} = 1150.4 \times (1 - \exp(-0.0144158 \times (\text{葉重} - 1))) \quad \dots(9)$$

ダイコンの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るが、徐々に増大程度が小さくなった (図 5)。

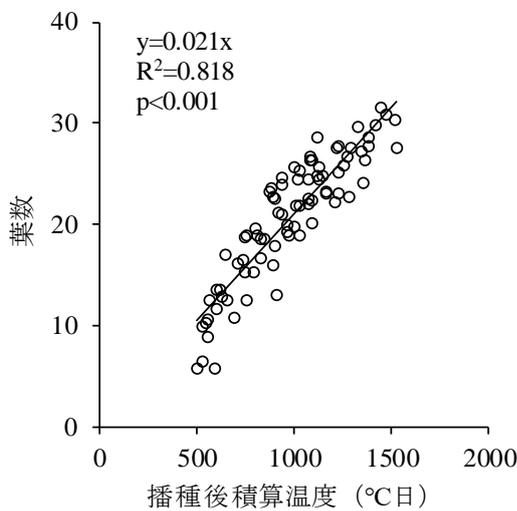


図 2 播種後積算温度と葉数の関係

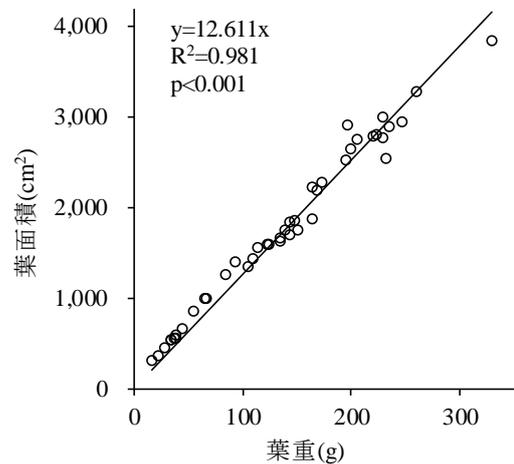


図 4 葉重と葉面積の関係

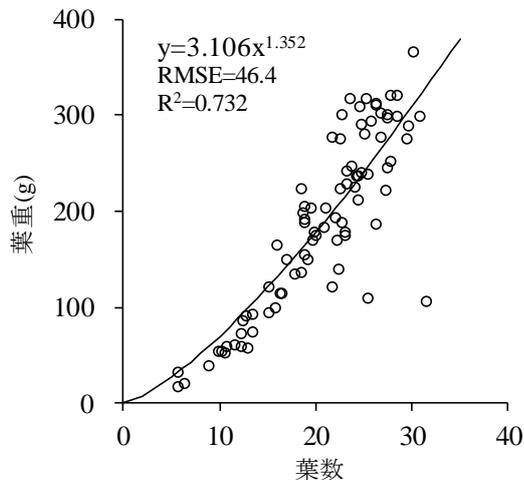


図 3 葉数と葉重との関係

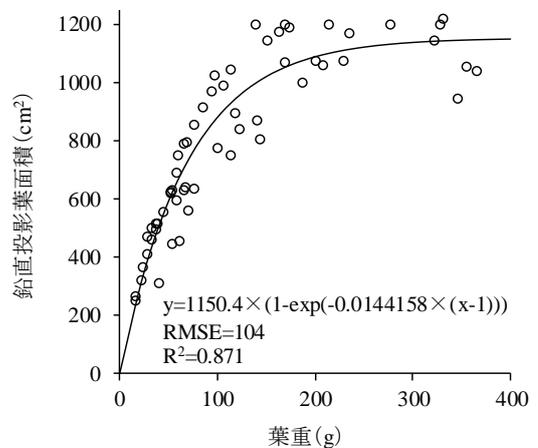


図 5 葉重と鉛直投影葉面積の関係

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

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

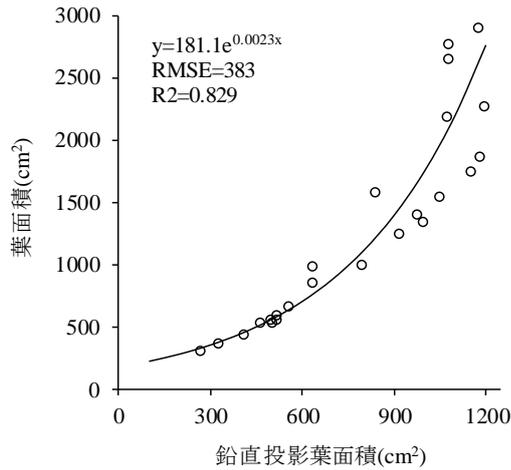


図6 鉛直投影葉面積と葉面積の関係

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

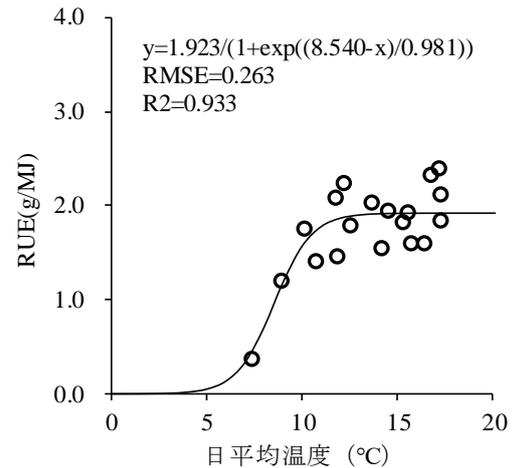


図7 日平均温度と日射利用係数(RUE)の関係

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

表2 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 ^a (cm ²)	LAI	吸光係数K
2017	群落外		33.5	-	-	-	-	-
	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
2018	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
	9月18日	~21日	33.4	0.76	1,155	2,507	2.1	0.68

^a葉面積は、図6の関数により鉛直投影葉面積から推定した値。

(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(10)で表された (RMSE=383, R²=0.829 : 図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。

$$\text{葉面積} = 181.1e^{0.0023 \times \text{鉛直投影葉面積}} \quad \dots(10)$$

また、日射量測定フィルムを用いて、群落外 (I₀) 及び群落内 (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2) , 日遮蔽日射量 (DIR) は(11)式となった。

$$\text{DIR} = S \times \text{VPA} \times (1 - \exp(-0.739 \times \text{LA} / \min(\text{VPA}, \text{AA}))) / 10000 \quad \dots(11)$$

(3) 日乾物生産量 (TDW) の算出

日平均温度と日射利用係数 (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

(データ省略) . 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) と同様に、シグモイド関数 (12) 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。

$$\text{RUE} = 1.923 / (1 + \exp((8.540 - \text{日平均温度}) / 0.981)) \quad \dots(12)$$

その結果、RUE は日平均温度が 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7) . これは、ダイコンと同じアブラナ科のブロッコリー及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 J.E ら 1997) と類似した結果であった。

(4) 根重の算出

葉数と根部分配率との関係をみたところ、葉数が増えるにつれ根部分配率が高くなる傾向であった(図 8)。すなわち生育が進むにつれてダイコンの 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、その関係は指数関数(13)で表すことができた(RMSE=0.0849, $R^2=0.792$: 図 8)。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。

$$\text{根部分配率} = 0.807 / (1 + \exp((15.048 - \text{葉数}) / 5.912)) \quad \dots(13)$$

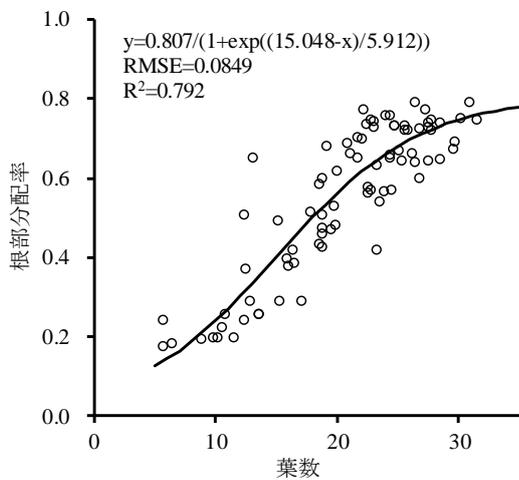


図 8 播種後積算温度と根部分配率の関係

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

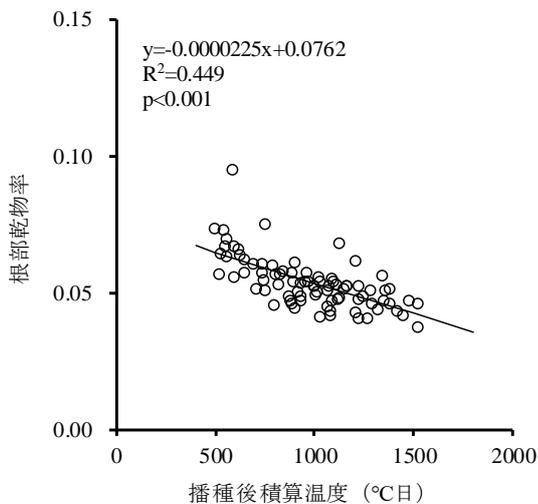


図 9 播種後積算温度と根部乾物率の関係

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(14)で表すことができた($R^2=0.449$, $p<0.001$: 図 9)。

$$\text{根部乾物率} = 0.0000225 \times \text{播種後積算温度} + 0.0762 \quad \dots(14)$$

以上により得られた各推定式を用い、2017年9月7日播種での根部生体重シミュレーションを図 10 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生体重が導かれ、連続的な根重増加を推定できた。

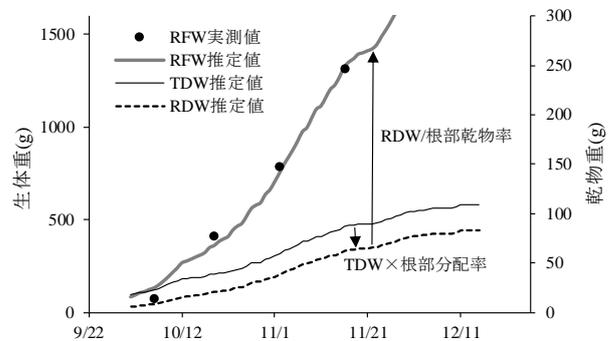


図 10 根部生体重の算出イメージ
(2017年9月7日播種の実測値及び推定値)

(5) 推定精度の検証

2014~2017年度までの19作期のデータについて、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(MRE: mean relative error)を規格品(出荷重: 0.5~1.8 kg/本)を対象として求めたところ、根部乾物重で17.2%、根部生体重で20.1%であった(図 11, 図 12)。

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は、結球部乾物重で9.8%、結球部生体重で15.4%であるのに比べると、乾物重、生体重とも相対的に誤差が大きかった。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ヵ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。より精密な予測

を行うために、降水量など温度及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によって予測精度を上げていくことが今後の課題である。

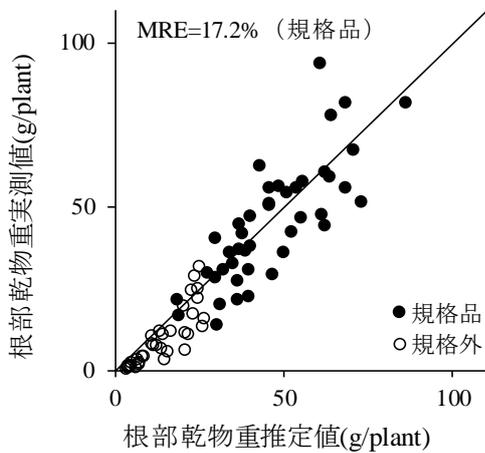


図 11 根部乾物重の推定精度

MRE：相対誤差 (mean relative error)

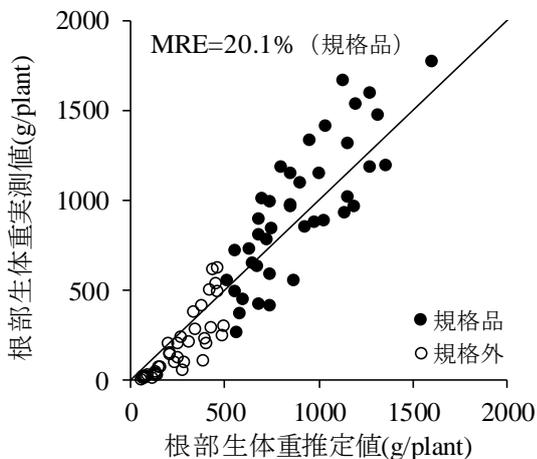


図 12 根部生体重の推定精度

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(平塚)及び表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及び温暖化ガ

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、播種日が遅いほど大きい傾向であった。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に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。

(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及び表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8.4～8.6 t/10a(平塚)、8.3～8.6 t/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。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、産地間リーの見直しなど対応が必要になることも考えられる。

(3) 日射量の増減が収穫期に及ぼす影響

表3及び表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)となり、温度上昇のみの影響に比べると小さいと考えられた。一方、日射量が10%減の場合では、2～61日(平塚)、4～53日(三浦)各々前進すると予測された。

(4) 日射量の増減が収量に及ぼす影響

表3及び表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)となり、温度上昇のみの影響に比べると小さいと考えられた。また、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た。

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。温暖化に伴う病害虫被害や生理障害の増加リスク等も含めて、引き続き研究が必要と思われる。

表 3 温度上昇及び日射量変動が収穫日及び収量に及ぼす影響（平塚）

播種日	2017		2050 ^x		2050(日射+10%) ^t		2050(日射-10%) ^s		
	収穫日 ^z	収量 ^y (t/10a)	上昇温度 ^w (°C)	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 4 温度上昇及び日射量変動が収穫日及び収量に及ぼす影響（三浦）

播種日	2017		2050 ^x		2050(日射+10%) ^t		2050(日射-10%) ^s		
	収穫日 ^z	収量 ^y (t/10a)	上昇温度 ^w (°C)	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。

引用文献

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 第26号：43-51.

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.

飯塚悟. 地球温暖化研究の概要. 2015. 日本風工学会誌第40巻第4号：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.

Izumi, T., Nishimori, M. and Yokozawa, M. 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.
- 川城英夫. 2003. ダイコン作型の特性と適応品種. 農業技術体系第9巻: 97-98の1の2.
- 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.
- 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第9巻: 1-39.
- 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(日本光合成学会編). <http://photosyn.jp/pwiki/index.php?門司と佐伯のモデル>.
- 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. 長野野花試報第10号: 19-26.
- 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.
- 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. 静岡県農試研報第48号: 75-86.
- 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. シミュレーション第38巻第3号: 1-5.
- 農林水産省. 2017. 平成27~28年神奈川県農林水産統計年報. https://www.maff.go.jp/kanto/to_jyo/2017data/kana_gawa_h27-28.html
- 農林水産省. 2018. 平成30年産野菜生産出荷統計. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500215&tstat=000001013427&cycle=7&year=20180&month=0&tclass1=00001032286&tclass2=000001032933&tclass3=00001135323>
- 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号: 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. 野菜茶研研報 15: 67-76.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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/>