

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

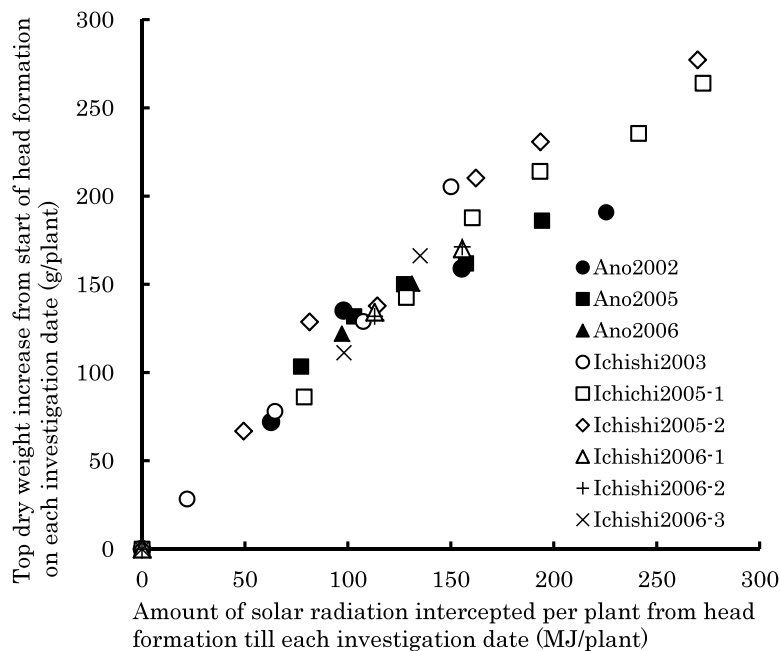


Fig. 1 Relationship between top dry weight increase of cabbage and intercepted solar radiation per plant from start of head formation to harvest in each dataset.

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。

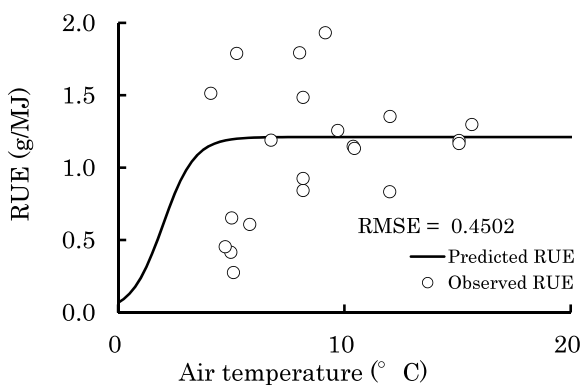


Fig. 2 Predicted and observed radiation-use efficiencies (RUEs) versus daily mean air temperature. Observed RUEs are calculated from data of 2 adjacent growth investigations (e.g. on 2006.1.12 and 2006.1.29), and plotted against periodic mean air temperature. RMSE = root-mean-square error.

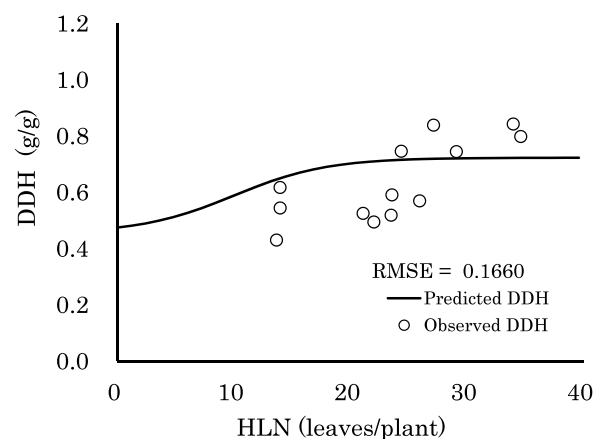


Fig. 3 Predicted (—) and observed (○) distributions of dry matter to head (DDHs) versus head leaf number (HLN). Observed DDHs are calculated from data of 2 adjacent growth investigations and plotted against periodic mean HLN. RMSE = root-mean-square error.

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.

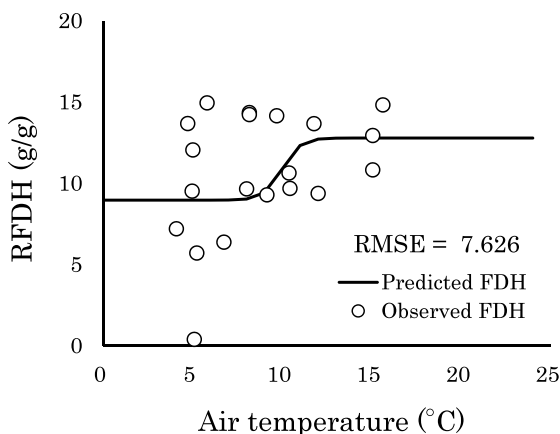


Fig. 4 Predicted and observed ratios of fresh-weight increase to dry-weight increase of head (FDHs) versus daily mean air temperature. Observed FDHs are calculated from data of 2 adjacent growth investigations and plotted against periodic mean air temperature. RMSE = root-mean-square error.

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

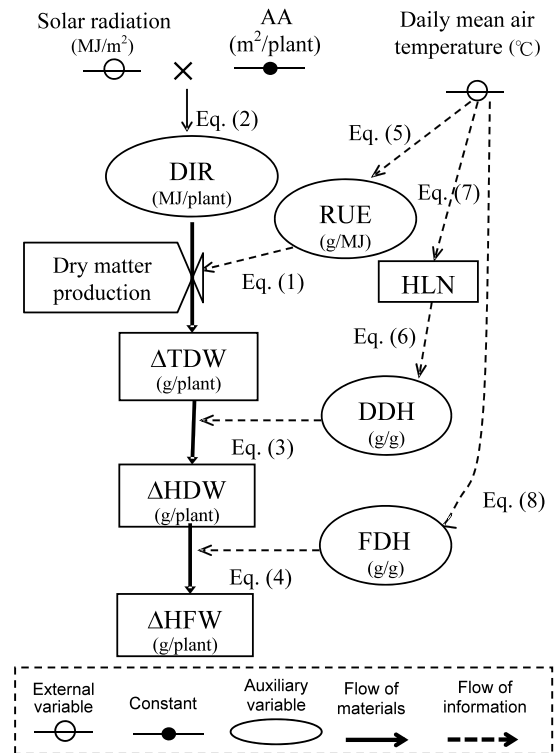


Fig. 5 Schematic of the model describing the increase in top dry weight (TDW), head dry weight (HDW), and head fresh weight (HFW) of winter cabbage, where, AA: Allocated area to each plant, DIR: Daily intercepted solar radiation, RUE: Radiation-use efficiency, HLN: Head leaf number, DDH: Distribution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

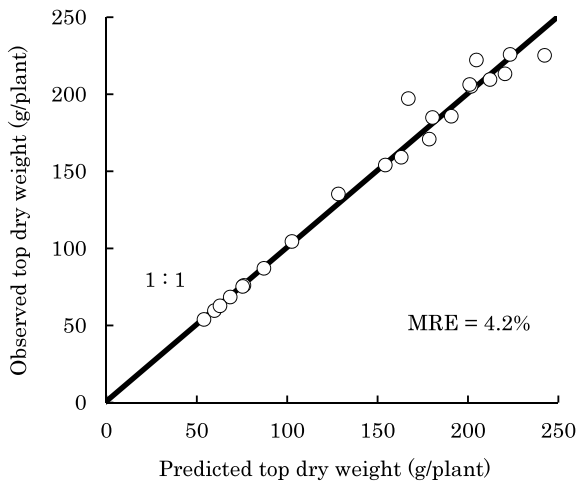


Fig. 6 Relationship between observed and predicted top dry weights of all datasets in Table 1 except Anou 2005 and Ichishi 2005-1. MRE = mean relative error.

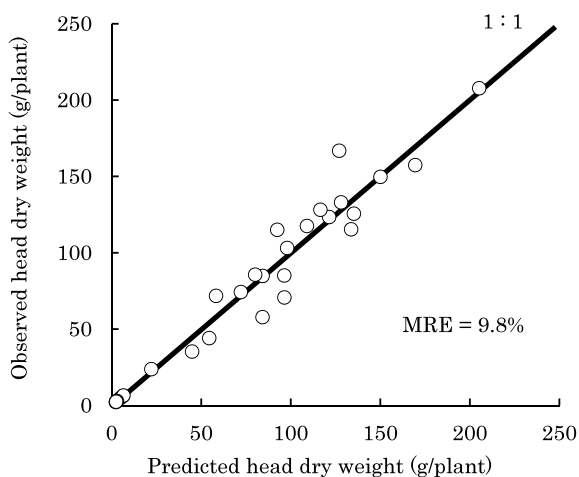


Fig. 7 Relationship between observed and predicted head dry weights of all datasets in Table 1 except Anou 2005 and Ichishi 2005-1. MRE = mean relative error.

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

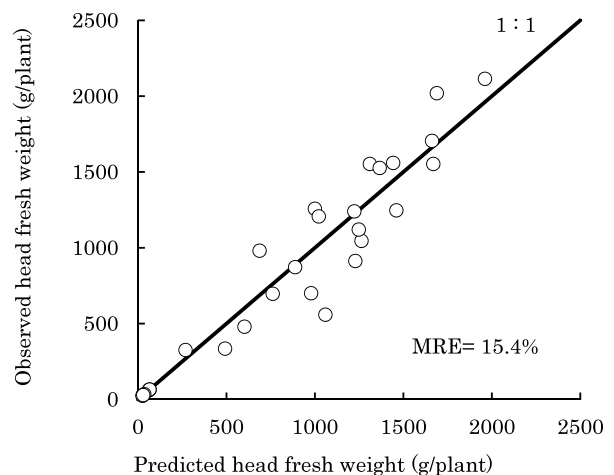


Fig. 8 Relationship between observed and predicted head fresh weights of all datasets in Table 1 except Anou 2005 and Ichishi 2005-1. MRE = mean relative error.

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

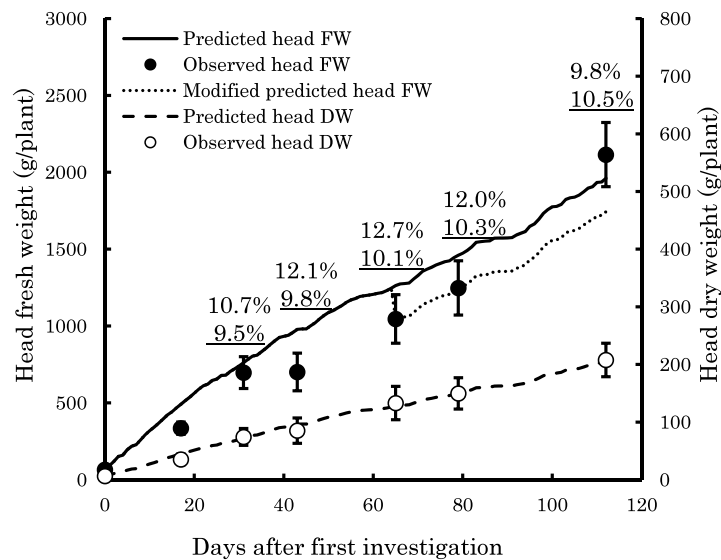


Fig. 9 Predicted and observed head fresh weights (FW) and dry weights (DW) in the Ichishi2005-2 dataset.

- 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.