

イチゴの葉面積を推定する回帰モデルの作成

安藤(小島)寛子¹⁾・小川理恵¹⁾

摘要 : イチゴ品種「ゆめのか」、「章姫」の葉面積回帰モデルの作成を試みた。一般化線形モデル(GLM)に基づく回帰分析により16種類の回帰モデルを得た。本圃栽培中の個葉面積は、葉幅を説明変数とする回帰モデル(モデル式は $\ln(y) = a \ln(W) + b$ (y :個葉面積(cm^2)、 W :葉幅(cm)、 a 、 b :回帰係数))により高い精度で推定できた。さらに、株当たり葉面積は、回帰モデル($\ln(Y) = a W_3 + b \ln(N) + c \ln(R) + d$ (Y :株当たり葉面積($\text{cm}^2 \text{株}^{-1}$)、 W_3 :第3葉位葉幅(cm)、 N :着生葉数(枚 株^{-1})、 R :第2葉位葉幅(cm)/第4葉位葉幅(cm)、 a - d :回帰係数))による推定値が、「ゆめのか」で実測値と強い相関($r=0.766$)を示した。

キーワード : イチゴ、葉面積、一般化線形モデル

Construction of the Strawberry Leaf-Area Estimation Formula

KOJIMA-ANDO Hiroko and OGAWA Rie

Abstract : We constructed a leaf-area regression model of the strawberry cultivars 'Yumenoka' and 'Akihime.' A total of 16 types of regression models were obtained by a regression analysis based on a generalized linear model. In the harvesting season, individual compound leaf areas were estimated by two models that used leaf width as an independent variable. Both models used the same equation: $\ln(y) = a \ln(W) + b$, where y is the individual leaf area (cm^2), W is the leaf width (cm), and a and b are the regression coefficients. Subsequently, we constructed a regression model of the leaf area per plant using the following equation: $\ln(Y) = a W_3 + b \ln(N) + c \ln(R) + d$, where Y is the leaf area per strain ($\text{cm}^2 \text{strain}^{-1}$); W_3 is the third leaf position leaf width (cm); N is the number of leaves (sheets strain^{-1}); R is the ratio of the second leaf width(cm) to the fourth leaf width(cm); and a , b , c and d are the regression coefficients. Furthermore, we estimated the leaf area per plant of 'Yumenoka' using Model-T, and the estimated values showed strong correlations with the actual measurement values.

Key Words : Strawberry, Leaf-area, Generalized linear model

緒言

施設園芸では近年、施設内の炭酸ガス濃度、温度、湿度、光量を制御して作物の光合成量を増やす環境制御技術の発展が著しい。光合成量を増大させるには、光合成反応の場となる葉面積をいかに適正量保つかが課題である。現在、各作物において光合成量や植物体の受光効率を最大とする単位面積当たりの葉面積(葉面積指数(以下、LAI))の明確化と、LAI に基づいた高収量生産技術の開発が進められている。トマトにおいては、LAI は3~4が適正值とされている¹⁻³⁾。LAI の算出には従来、投影式の葉面積計を利用した個葉面積の実測が必要とされてきた。この測定は調査株の抜き取りや摘葉が求められる上に、膨大な時間と労力を要する。こうした測定に要する負担を軽減するために、これまで様々な作物で回帰モデルに基づく葉面積の推定が取り組まれてきた。キュウリでは摘除する古葉の個葉面積から LAI を推定する回帰モデルの作成⁴⁾がされており、トマトにおいても一般化線形モデル(以下、GLM)に基づく葉幅を利用した個葉面積推定式が作成されている⁵⁾。

イチゴにおいてもこれまで、線形モデル(以下、LM)に基づき小葉の葉身長、小葉幅を利用した個葉面積推定式が報告されている⁶⁻⁸⁾。これらの研究においては実測値と推定値の間に高い決定係数を示すモデルが作成されている。しかし、いずれの報告も異なる品種と説明変数、回帰係数が提示されており、現行の栽培品種や栽培方式にどこまで適用可能か不明である。また、樋江井ら⁵⁾の報告によると、個葉面積の確率分布が必ずしも正規分布に近似できるとは限らず、生育段階を通して分散が等しいとも言えない。このことから、LM に基づいた推定よりは、正規分布と等分散を前提としない GLM に基づく推定を行うことが適当と言える。

これらを踏まえて、本研究では、愛知県内で栽培されているイチゴの主要品種「ゆめのか」、「章姫」を対象としたGLMに基づく個葉面積回帰モデルの作成を試みた。作成に当たっては、生育調査項目を説明変数として、説明変数が最小となるモデルを目指した。さらに、植物体の光合成量を推定するにはLAIの把握が重要となるため、株当たり葉面積の回帰モデルについても作成を試みた。

材料及び方法

1 個葉面積回帰モデルの作成

(1) 耕種概要

愛知県農業総合試験場内の丸屋根パイプ施設1棟(南北棟：間口6 m×奥行23 m、農P0展張)にて栽培した。短日夜冷処理(日長8時間、夜温14℃以下)を「ゆめのか」は35日間、「章姫」は30日間行った後、高設栽培ベンチに設置した発泡スチロールプランタ(ゆりかごBOX、トーヨー工業株式会社、愛知)に有機培地(ゆりかごソイル本圃用肥料なし、三河ミクロン株式会社、愛知)を充填

し、2019年9月9日に株間21 cm(プランタ当たり7株を2条千鳥植え)で定植した。給液は圃試処方にOATハウス5号を50 g 1000 L⁻¹添加した培養液をEC 0.3~0.9 dS m⁻¹に希釈して、タイマーを用いて1日4~5回、1回株当たり50 mLを給液した。施設内最低気温は5℃として、農P0で二重被覆し、灯油燃焼式温風暖房機で加温した。また、炭酸ガスは11月14日から2020年3月5日までの間、施設内気温24℃未満で700 ppm、施設内気温24℃以上32℃未満で400 ppmとなるよう施用し、換気温度は28℃とした。

(2) 葉の採取及び調査方法

2019年10月27日、11月30日、12月22日、2020年2月2日に「ゆめのか」、「章姫」の展開葉(各調査日1品種当たり6株45枚)を採取し、葉長、葉幅、葉身長、小葉幅(図1)をメジャーで計測した後、葉面積計(GA-5、東京光電株式会社、東京)で個葉面積(1複葉当たりの葉面積)を測定した。

(3) 個葉面積回帰モデルのパラメータ決定

個葉面積回帰モデルの作成は樋江井ら⁵⁾の方法を参考とした。1(2)の調査結果を用いた4分割交差検証を行い、個葉面積回帰モデルの回帰係数(以下、パラメータ)と赤池情報量基準(以下、AIC)、平均平方二乗誤差(Root Mean Squared Error、以下、RMSE)と相対誤差(Mean

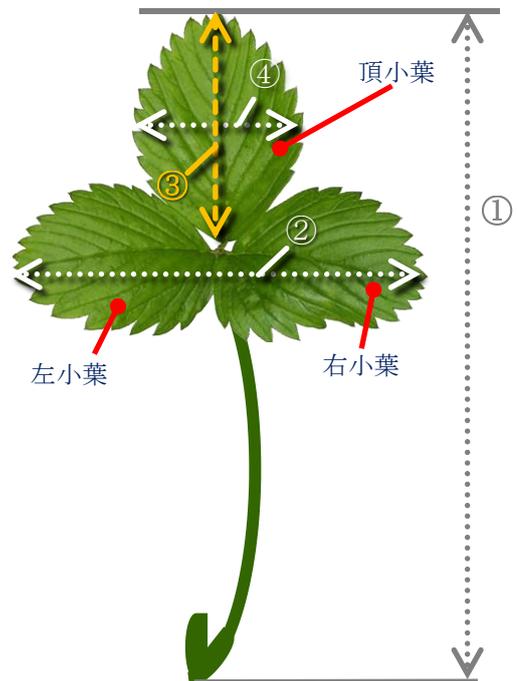


図1 イチゴ複葉の調査部位

イチゴの1複葉は頂小葉、左小葉、右小葉の3小葉で構成される。本研究において、調査部位は下記①~④の名称で区別した。①~④は調査時に葉を真直ぐに伸ばした最大値を測定した。

- ①葉長(頂小葉の先端から葉柄基部までの長さ)
- ②葉幅(左小葉の先端から右小葉の先端までの長さ)
- ③葉身長(頂小葉の縦の長さ)
- ④小葉幅(頂小葉の横幅)

表1 個葉面積回帰モデル作成に用いた葉の特性

品種	調査日	調査 葉数	葉長 (cm)				葉幅 (cm)				葉身長 (cm)				小葉幅 (cm)				個葉面積 (cm ²) ²⁾			
			最小	最大	平均	SD ¹⁾	最小	最大	平均	SD ¹⁾	最小	最大	平均	SD ¹⁾	最小	最大	平均	SD ¹⁾	最小	最大	平均	SD ¹⁾
ゆめのか	10月27日	45	10.0	25.0	16.6	4.3	8.8	20.0	14.1	3.0	4.7	10.4	7.3	1.5	4.1	10.0	7.1	1.6	39.5	215.2	113.4	50.9
	11月30日	45	12.6	30.3	23.6	3.9	9.1	22.4	17.1	2.9	5.1	11.3	8.9	1.4	4.2	10.6	8.3	1.5	49.0	282.9	163.1	52.9
	12月22日	45	10.6	33.6	23.8	6.0	8.5	22.7	16.7	3.7	4.2	11.3	8.7	1.9	4.0	11.5	8.3	2.1	31.9	275.4	159.2	72.2
	2月2日	45	9.0	30.0	19.4	6.6	7.5	21.3	14.2	4.2	3.5	11.3	7.2	2.3	3.5	11.1	7.1	2.4	31.3	259.2	120.4	74.5
章姫	10月27日	45	11.6	30.9	19.8	4.9	9.6	23.6	15.1	3.9	4.6	11.8	7.6	2.0	3.9	10.0	6.2	1.6	36.6	248.5	100.3	52.8
	11月30日	45	13.9	35.1	25.6	4.8	11.3	23.8	17.7	3.0	5.1	12.0	8.9	1.6	4.5	9.4	7.0	1.3	53.1	229.5	130.8	42.4
	12月22日	45	18.6	39.1	29.1	4.5	10.3	24.1	18.8	3.1	5.6	11.5	9.6	1.5	5.1	9.4	7.6	1.3	45.2	212.5	146.4	42.7
	2月2日	45	12.4	37.0	27.0	6.8	10.1	25.0	17.2	4.0	4.5	12.1	8.3	2.0	4.0	9.9	6.8	1.5	35.2	220.9	120.1	54.3

1) 標準偏差

2) 葉面積計で測定した1複葉の葉面積

Relative Error、以下、MRE)を求めた。統計処理は統計フリーソフトウェアR3.6.3を用いた。

$$RMSE = \sqrt{\{1/n \sum (\text{推定値} - \text{実測値})^2\}}$$

$$MRE = 1/n \sum (|\text{推定値} - \text{実測値}| / \text{実測値})$$

n=サンプル数

2 個葉面積回帰モデルの精度検証

(1) 耕種概要

精度検証に使用した株は、1の個葉面積回帰モデルの構築とは別の愛知県農業総合試験場内の丸屋根パイプ施設1棟(南北棟:間口5.8m×奥行20m、農P0展張)にて栽培した。「ゆめのか」は35日間、「章姫」は30日間の短日夜冷処理(日長8時間、夜温14℃以下)をした後、2019年9月17日に1(1)と同じ方式の高設栽培プランタと培地に定植した。給液は園試処方にOATハウス5号を50g/1000L⁻¹添加した培養液をEC 0.3~0.9 dS m⁻¹に希釈して、日射比例制御により排液率40%を目標として給液した。施設内最低気温は8℃として、農P0で二重被覆し、灯油燃焼式温風暖房機で加温した。炭酸ガスは11月14日から2020年3月17日までの間、施設内気温24℃未満で700ppm、施設内気温24℃以上32℃未満で400ppmとなるよう施用し、換気温度は28℃とした。

(2) 葉の採取及び調査方法

2020年2月16日に着生葉のうち最も古い葉を1株当たり1葉、各品種60葉採取して、1(2)と同様に調査した。

(3) 個葉面積回帰モデルの適用性の評価

各モデルに説明変数となる調査部位数値を当てはめ、予測精度としてRMSEとMREを求めて評価した。

3 株当たり葉面積回帰モデルの作成と検証

1の個葉面積回帰モデル作成に用いた葉の葉位別の葉幅、個葉面積及び着生葉数を利用して、株当たり葉面積回帰モデルの作成を試みた。株当たり葉面積回帰モデルの作成は、安ら⁴⁾の方法を参考とした。同モデルの予測精度の検証には2と同じ施設で栽培した株の個葉面積実測値と、各個葉の個葉面積回帰モデルによる葉面積推定値を利用して、なお、葉位は完全に展開した最も新しい葉を第1葉位として、古い葉ほど大きい葉位とした。

表2 各部位の相関係数¹⁾

品種	葉長	葉幅	葉身長	小葉幅	個葉面積
ゆめのか	葉長	1.000			
	葉幅	0.880	1.000		
	葉身長	0.874	0.951	1.000	
	小葉幅	0.858	0.935	0.958	1.000
	個葉面積	0.864	0.964	0.942	0.955
章姫	葉長	1.000			
	葉幅	0.839	1.000		
	葉身長	0.825	0.957	1.000	
	小葉幅	0.784	0.921	0.938	1.000
	個葉面積	0.789	0.967	0.942	0.937

1) Pearsonの積率相関係数(n=180)

試験結果

1 個葉面積回帰モデルの作成

調査葉の葉長、葉幅、葉身長、小葉幅、個葉面積を調査日毎に集計した(表1)。「章姫」はいずれの項目も12月22日(定植104日後)までは定植後日数を経るに従い大きい値となった。「ゆめのか」は11月30日に個葉面積が最大となり、12月22日、2月2日の順で全ての調査項目で値が低下する傾向を示した。「ゆめのか」で葉長9.0~33.6cm、葉幅7.5~22.7cm、葉身長3.5~11.3cm、小葉幅3.5~11.5cm、個葉面積31.3~282.9cm²であり、「章姫」では葉長11.6~39.1cm、葉幅9.6~25.0cm、葉身長4.5~12.1cm、小葉幅3.9~10.0cm、個葉面積35.2~248.5cm²であった。葉長、葉幅、葉身長は、「ゆめのか」が「章姫」に比べてどの調査日においても小さい傾向だった。小葉幅と個葉面積は、「ゆめのか」が「章姫」より大きい傾向であった。

表1の各項目の相関係数を求めた(表2)。両品種ともに、いずれの項目間においても相関係数は0.7以上となり、葉長を除く葉幅、葉身長、小葉幅と個葉面積の4項目間の相関係数は0.9以上と非常に強い相関関係を示した。個葉面積と最も相関が高い項目は葉幅で、その相関係数は「ゆめのか」で0.964、「章姫」で0.967であった。

応答変数に個葉面積を、葉長、葉幅、葉身長又は小葉幅のいずれか1つを説明変数とする個葉面積回帰モデルを16種類作成した(表3)。モデルA~Dは線形単回帰分析、モデルE・G~Iは二次回帰分析、モデルJ・K・M~O・Q~

表3 イチゴ2品種における個葉面積回帰モデルのパラメータ

品種	モデル 符号	説明 変数 ¹⁾	確率 分布 ²⁾	モデル式	モデル式のパラメータ			AIC ³⁾	RMSE ⁴⁾	MRE ⁵⁾
					a	b	c			
ゆめのか	A	P	正規	$y=aP+b$	9.58	-60.7	-	1339	1250	0.260
	B	W	正規	$y=aW+b$	17.2	-128	-	1167	334	0.128
	C	L	正規	$y=aL+b$	32.1	-118	-	1230	553	0.185
	D	F	正規	$y=aF+b$	32.0	-107	-	1197	421	0.145
	E	P	正規	$y=aP^2+bP+c$	-0.0867	13.0	-92.3	1340	2726	0.433
	G	W	正規	$y=aW^2+bW+c$	0.364	6.31	-51.3	1159	304	0.107
	H	L	正規	$y=aL^2+bL+c$	2.18	-1.11	-0.430	1215	457	0.139
	I	F	正規	$y=aF^2+bF+c$	1.31	12.7	-41.2	1190	404	0.129
	J	P	ガンマ	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(P)+b$	1.62	-0.0277	-	1309	1364	0.260
	K	W	ガンマ	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(W)+b$	2.19	-1.12	-	1121	327	0.104
	M	L	ガンマ	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(L)+b$	2.03	0.642	-	1203	455	0.139
	N	F	ガンマ	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(F)+b$	1.97	0.843	-	1153	398	0.120
	O	P	正規	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(P)+b$	1.45	0.509	-	1343	1274	0.262
	Q	W	正規	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(W)+b$	2.06	-0.774	-	1163	313	0.109
	R	L	正規	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(L)+b$	2.07	0.567	-	1213	455	0.138
S	F	正規	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(F)+b$	1.91	0.988	-	1190	395	0.125	
章姫	A	P	正規	$y=aP+b$	6.44	-38.5	-	1319	1060	0.236
	B	W	正規	$y=aW+b$	13.1	-102	-	1084	182	0.108
	C	L	正規	$y=aL+b$	24.7	-87.0	-	1158	300	0.118
	D	F	正規	$y=aF+b$	31.7	-94.2	-	1169	323	0.124
	E	P	正規	$y=aP^2+bP+c$	-0.117	12.1	-103	1317	1052	0.243
	G	W	正規	$y=aW^2+bW+c$	0.258	4.51	-33.3	1075	166	0.097
	H	L	正規	$y=aL^2+bL+c$	0.598	14.8	-48.9	1158	301	0.114
	I	F	正規	$y=aF^2+bF+c$	-0.0591	32.7	-98.2	1170	343	0.134
	J	P	ガンマ	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(P)+b$	1.48	0.0317	-	1295	1142	0.238
	K	W	ガンマ	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(W)+b$	1.97	-0.824	-	1075	168	0.094
	M	L	ガンマ	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(L)+b$	1.86	0.796	-	1123	304	0.113
	N	F	ガンマ	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(F)+b$	1.95	1.01	-	1151	365	0.126
	O	P	正規	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(P)+b$	1.29	0.641	-	1322	1074	0.243
	Q	W	正規	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(W)+b$	1.92	-0.683	-	1075	166	0.095
	R	L	正規	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(L)+b$	1.79	0.944	-	1158	303	0.117
S	F	正規	$\text{Ln}(y)=a\text{Ln}(F)+b$	1.80	1.32	-	1176	356	0.138	

供試葉数 n = 180、4 分割交差検証に基づく。モデル式の Ln() は自然対数を示す。

- 1) P : 葉長 (cm)、W : 葉幅 (cm)、L : 葉身長 (cm)、F : 小葉幅 (cm)
- 2) 応答変数である個葉面積 y (cm^2 枚⁻¹) の確率分布
- 3) 赤池情報量基準
- 4) Root Mean Squared Error
- 5) Mean Relative Error

Sはリンク関数に対数関数を利用したGLMと仮定して、応答変数は正規分布又はガンマ分布に従うものとした。回帰モデルは一般にAICが低いモデルほど良いとされる⁹⁾。「ゆめのか」、「章姫」とともに、葉幅を説明変数とするモデルB・G・K・QのAICで他のモデルに比べて低い値を示し、「ゆめのか」では次いで小葉幅を説明変数とするモデルD・I・N・Sで、「章姫」では葉身長を説明変数とするモデルC・H・M・Rで葉幅の次にAICが低い値を示した。また、RMSEとMREは予測誤差(モデルによる予測値と実測値

との差)であり、その値が小さいほど予測精度が高いことを示す^{5,10)}。RMSE、MRE両値ともにAICと同様に、「ゆめのか」、「章姫」で葉幅を説明変数とするモデルB・G・K・Qで他のモデルより小さい値を示し、とりわけモデルG・K・Qの3モデルはモデルBよりも低いMRE値を示した。

2 個葉面積回帰モデルの選定と検証

精度検証には、異なる施設から採取した葉を用いた(表4)。採取葉の大きさは、「ゆめのか」で葉長17.5～

表 4 個葉面積回帰モデルの精度検証に用いた葉の特性

品種	調査 葉数	葉長 (cm)				葉幅 (cm)				葉身長 (cm)				小葉幅 (cm)				個葉面積 (cm ²) ²⁾			
		最小	最大	平均	SD ¹⁾	最小	最大	平均	SD ¹⁾	最小	最大	平均	SD ¹⁾	最小	最大	平均	SD ¹⁾	最小	最大	平均	SD ¹⁾
ゆめのか	60	17.5	31.5	24.3	2.9	12.7	21.1	17.6	2.0	6.5	11.5	9.2	1.0	5.3	10.9	8.8	1.2	46.6	265.3	162.4	41.2
章姫	60	20.2	30.0	25.0	2.3	11.8	23.0	19.1	2.1	6.5	11.8	9.4	1.0	5.6	9.9	7.9	0.8	60.2	214.3	145.9	31.1

1) 標準偏差

2) 葉面積計で測定した 1 複葉の葉面積

31.5 cm、葉幅 12.7~21.1 cm、葉身長 6.5~11.5 cm、小葉幅 5.3~10.9 cm、個葉面積 46.6~265.3 cm²、「章姫」で葉長 20.2~30.0 cm、葉幅 11.8~23.0 cm、葉身長 6.5~11.8 cm、小葉幅 5.6~9.9 cm、個葉面積 60.2~214.3 cm²であった。検証の結果、葉幅を説明変数とする個葉面積回帰モデル G・K・Q は、両品種で他のモデルに比べて低い RMSE、MRE 値を示した(表 5)。

3 モデルのうちモデル K・Q による「ゆめのか」と「章姫」の個葉面積推定値は、実測値に近い値を示した(図 2)。それら推定値と実測値の相関係数は、「ゆめのか」で 0.926、「章姫」では 0.915~0.916 を示した。

3 株当たり葉面積回帰モデルの作成と検証

葉位別個葉面積は、調査日によって異なる傾向を示した(図 3)。両品種ともに、10月27日調査では第2~第4葉位で、2月2日調査では第1~第3葉位で他の葉位に比べて個葉面積が大きかった。一方で、11月30日調査では第4~第7葉位で、12月22日調査では第4~第8葉位で他の葉位より個葉面積が大きかった。第3葉位の葉幅、第2葉位と第4葉位の葉幅の比率(以下、葉幅比)、着生葉数を説明変数として、株当たり葉面積を応答変数とする回帰モデルの作成を GLM に基づき行い、表 6 のモデル T を得た。

モデル T により求めた株当たり葉面積推定値と、個葉面積回帰モデル Q を用いて全着生葉の葉幅から求めた株当たり葉面積推定値及びその実測値を比較したところ、個葉面積回帰モデル Q を用いて求めた株当たり葉面積推定値は実測値に近い値を示し、相関係数は「ゆめのか」で 0.964、「章姫」で 0.949 であった(図 4)。モデル T で求めた株当たり葉面積推定値は、「ゆめのか」で実測値との相関係数 0.766 の正の相関を示したが、「章姫」では相関係数 0.201 で相関関係はみられなかった。

考察

1 個葉面積回帰モデルの設定

葉長、葉幅、葉身長、小葉幅は、いずれも個葉面積に対して相関を示すだけでなく、これら4項目は互いに相関関係が認められた。個葉面積回帰モデルの説明変数にこれらの項目を選ぶに当たって、相関のある項目を同時に説明変数とすると多重共線性を生じる可能性がある¹⁾。このため、回帰モデルは表 3、4 に示したとおり、1項目ずつ説明変数とした16モデルを設定した。

表 5 個葉面積回帰モデルの精度検証結果

品種「ゆめのか」			品種「章姫」		
モデル 符号 ¹⁾	RMSE ²⁾	MRE ³⁾	モデル 符号 ¹⁾	RMSE ²⁾	MRE ³⁾
A	36.2	0.225	A	36.2	0.210
B	21.0	0.130	B	13.3	0.078
C	143.4	0.982	C	96.6	0.706
D	25.1	0.137	D	20.1	0.126
E	36.2	0.227	E	33.8	0.197
G	19.8	0.119	G	12.7	0.073
H	29.3	0.164	H	17.4	0.101
I	25.6	0.136	I	20.2	0.127
J	37.7	0.227	J	37.5	0.218
K	20.1	0.116	K	12.7	0.072
M	28.6	0.162	M	17.7	0.102
N	26.3	0.135	N	21.7	0.128
O	36.2	0.221	O	36.8	0.213
Q	19.2	0.113	Q	12.6	0.072
R	29.3	0.164	R	17.6	0.102
S	25.9	0.136	S	19.9	0.121

1) モデル符号は表 3 の同一項目に同じ

2) Root Mean Squared Error

3) Mean Relative Error

2 個葉面積回帰モデルの選定

設定した16モデルのうちAICが低いモデルは、「ゆめのか」、「章姫」とともにモデルB・G・K・Qであり、これらのモデルはいずれも個葉面積との相関係数が最も高い値を示す葉幅を説明変数としていた。一方で、葉幅、葉身長、小葉幅と比べて個葉面積との相関係数が低い値となった葉長を説明変数とするモデルA・E・J・Oは、AICが大きい値となった。従って個葉面積の推定には葉長は説明変数として相応しくないと判断した。AICの小さいモデルB・G・K・QのうちモデルBを除くG・K・Qは、モデル作成時及びモデルの精度検証の両方においてRMSE、MREの値が小さく、個葉面積推定に有用であると考えられた。ただし、モデルGは二次関数であり、「ゆめのか」で葉幅6.0 cm以下、「章姫」で葉幅5.5 cm以下になると推定値は負となる。一方、モデルK・Qにおいては、対数リンク関数を用いることで個葉面積推定値はどのような条件下においても非負の値となる。葉幅5.5 cm、6.0 cmは今回のモデル作成時の葉幅の値の範囲から外れておりモデルの適用

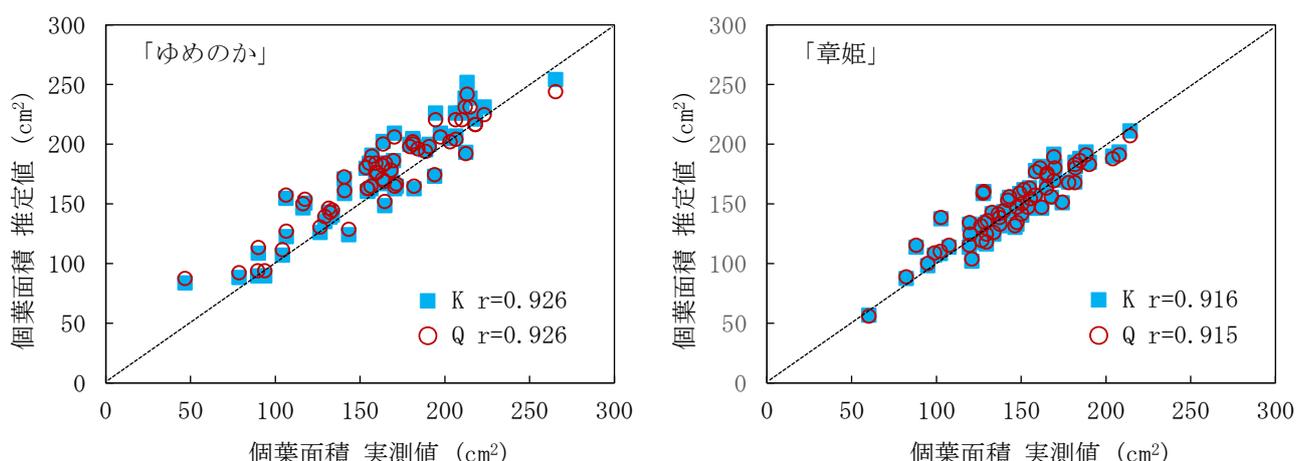


図2 個葉面積の実測値と推定値

2020年2月16日調査、1品種当たり n=60。

個葉面積推定値は、表3の個葉面積回帰モデル(■：モデルK、○：モデルQ)を用いて算出した。点線は傾き1の直線、rは各モデルの推定値と実測値の相関係数を示す。

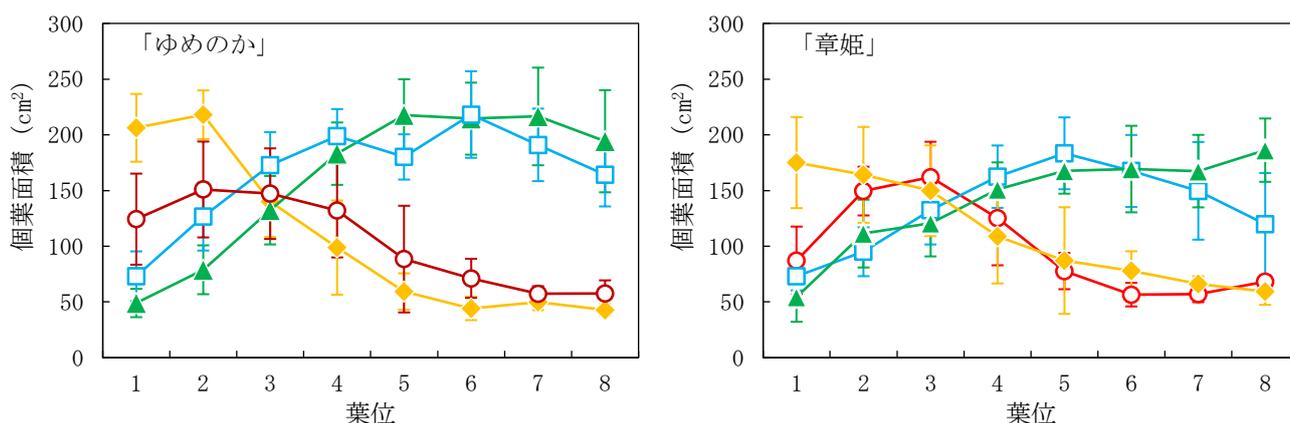


図3 本圃栽培期の葉位別個葉面積

エラーバーは標準偏差を示す(n=6)。

○:2019年10月27日調査、□:11月30日調査、▲:12月22日調査、◆:2020年2月2日調査

範囲とは断言できないが、回帰モデルの推定値は非負が条件となるため、モデルGは相応しくないと考えられた。よって、「Yumekaka」、「Chakka」の個葉面積推定モデルは、想定した16モデルのうちモデルK・Qが最適だと判断した。モデルKは個葉面積の確率分布としてガンマ分布を、モデルQは個葉面積の確率分布として正規分布を想定しており、双方のモデル式の構成は同一でパラメータも近い値を示した。このためモデルK・Qいずれを選択しても実際の個葉面積に近い葉面積推定値が得られると結論した。

3 株当たり葉面積回帰モデルの作成と検証

株当たり葉面積の推定は、安ら⁴⁾がキュウリにおいて最大葉の葉面積との対比であるRLA値を用いた回帰モデルを作成しており、この手法がイチゴでも利用できないか考えた。しかし、イチゴはキュウリと異なり、育苗期に展開した葉が残る期間が長く、定植後48日を経た

10月27日においても葉位が大きいほど個葉面積が小さくなり、また、厳寒期に展開した葉が外葉となる2月2日には、10月27日の調査結果と同様に外葉ほど個葉面積が小さくなった。イチゴの葉の大きさは日射量と気温、施肥量との相関が高いとされる。さらに、新葉は光合成産物を花房や根と奪い合う¹²⁾。このため、日射量が多く比較的高温で、果実が肥大する前の9月から10月にかけては大きい葉が形成され、着果負担が強く収穫最盛期となる同時に日射量と気温が低下する12月から、日射量が再び増大する2月までは小さい葉が形成されやすい。10月27日の調査では、葉位が大きい葉(外葉)ほど個葉面積が小さくなった。イチゴの葉は通常、7~10日に1枚展開する¹³⁻¹⁴⁾。10月27日の第7、第8葉位は育苗時期に展開した葉であり、第6葉位は定植時に展開途中、第5葉位は定植後2週間以内の根が完全に活着する前に展開した葉であった。日射量と温度は葉の生長に十分量達しているものの、育苗期は花芽分化促進のために施肥量が制限されて

表6 本圃栽培期の株当たり葉面積回帰モデルのパラメータ

モデル 符号	品種	説明変数		確率 分布 ²⁾	モデル式	モデル式のパラメータ			
		数	種類 ¹⁾			a	b	c	d
T	ゆめのか	3	W_3 N	ガンマ	$\text{Ln}(Y)=aW_3+b\text{Ln}(N)+c\text{Ln}(R)+d$	0.0201	0.606	-0.457	5.33
			R						
T	章姫	3	W_3 N	ガンマ	$\text{Ln}(Y)=aW_3+b\text{Ln}(N)+c\text{Ln}(R)+d$	0.0484	1.29	-0.789	3.23
			R						

モデル式中の $\text{Ln}()$ は自然対数を示す。

1) W_3 : 第3葉位葉幅(cm)、N: 完全展開葉着生葉数(枚 株⁻¹)、R: 葉幅比(第2葉位葉幅(cm)/第4葉位葉幅(cm))

2) 応答変数である株当たり葉面積($Y(\text{cm}^2 \text{株}^{-1})$)の確率分布。

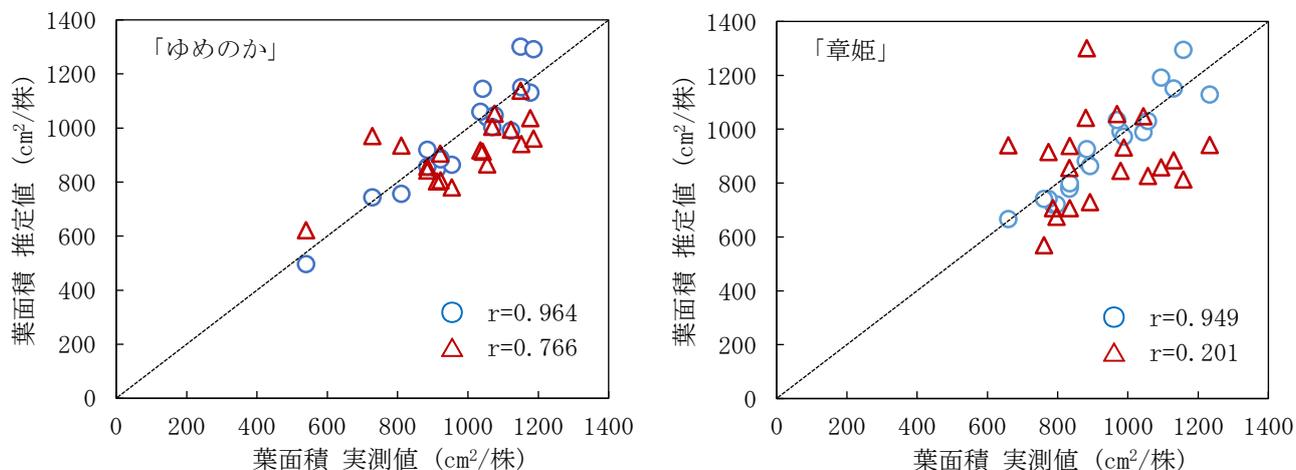


図4 本圃栽培期の株当たり葉面積の推定

図中点線は傾き1の直線。1品種当たり20株調査。

○: 全着生葉の葉幅から個葉面積回帰モデルQ(表3)を用いて算出した値の総和を葉面積の推定値とした。

△: 株当たり葉面積回帰モデルT(表6)を用いて算出した値を葉面積の推定値とした。

おり、定植以降2週間の根が完全に活着がしていない時期もまた、植物体の養分吸収が制限されて、葉が小さくなったと考えられた。11月30日と12月22日の調査では、すべての葉位において施肥量、日射量、気温に応じて葉が大きくなり、とりわけ根の活着後から10月にかけて展開した第4葉位以上は1~3葉位に比べて大きくなった。しかし、最も日射量と気温が低下する12~1月に展開した葉を付ける2月2日には、10月27日と同じように葉位が高まるほど葉は小さくなり、図3の個葉面積の推移を示したと考えられた。

本研究では、10月から2月の4回の調査で採取した葉を用い、株当たり葉面積回帰モデルの作成を試みた。説明変数には、着生葉数のほか、第3葉位の葉幅、第2葉位と第4葉位の葉幅比を採用した。

イチゴでは通常、株当たりの最大葉は第3葉位あるいはその前後の第2葉位か第4葉位が挙げられる。個葉面積は葉幅から推定できたため、第3葉位の大きさを示す値として、葉幅を説明変数とした。しかし、本研究では、図3のいずれの調査日においても第3葉位の個葉面積は約150 cm^2 と他の葉位に比べて変化が少なかった。このため、第3葉位の個葉面積、即ち第3葉位葉幅は株当たり葉

面積の変化に影響しないと考えて説明変数から外したモデルも検討したが、第3葉位の葉幅を除く回帰モデルは、説明変数に第3葉位葉幅を含むモデルよりAICがわずかに大きくなったため、モデルTには第3葉位葉幅を含めた。

また、図3のとおり、第2葉位に対して第4葉位の個葉面積が大きい場合、第4葉位より外葉の個葉面積が大きい傾向となり、逆に第2葉位が第4葉位より大きい場合、第4葉位より外葉の個葉面積が小さい傾向であったため、葉幅比が葉位による個葉面積の変化を説明できるものと仮定して、これを説明変数に採用した。

株当たり葉面積をモデルTで推定したところ、個葉面積回帰モデルQを利用して各葉位の葉幅から求めた株当たり葉面積推定値に比べて、モデルTの予測値は実測値との差が大きかった。予測値と実測値の差が大きくなった原因として、以下の三つが原因として考えられた。一つは、モデルTの作成に用いた株数が調査日、品種当たり6株と少なく、精度が低下したことである。二つめに、モデルTで選定した以外の説明変数の選定がイチゴでは必要であることが考えられた。三つめには、前述のとおりイチゴは一度展開した葉の着生期間が長く、加え

て日射量、気温といった季節変動や、花房の成熟に応じた光合成産物の分配率の変化が大きく、これらの事象が個葉面積に大きく影響することが挙げられた。株当たり葉面積を高精度で推定するには、花房が開花して着果負荷の掛かる以前の秋期、収穫開始期、厳寒期そして春期など、栽培期間を生育段階や環境に応じて細かく分け、それぞれの期間の葉から回帰モデルを作成するべきと考えられた。

品種別にみると、モデルTの予測値は、「ゆめのか」では実測値との相関係数は0.766と高い値となり、一方で「章姫」は相関係数0.201と弱い相関に留まった。葉位別の個葉面積の推移は「ゆめのか」、「章姫」ほぼ同様に推移しており、本研究結果の限りではモデルTによる予測精度が品種により異なった原因の特定には至らなかった。イチゴの株当たり葉面積回帰モデルの作成に当たっては、モデルTとは異なる説明変数の選定を必要があると考えられた。

4 個葉面積回帰モデルの活用

イチゴのLAIの推定に当たり、「ゆめのか」、「章姫」の個葉面積回帰モデル、株当たり葉面積回帰モデルの作成を試みた。葉幅のみを説明変数とする個葉面積回帰モデルK・Qは十分有用性を有し、一方で、株当たり葉面積の回帰モデルTは「ゆめのか」に限り相関がみられ、「章姫」では相関がみられなかった。ただし、個葉面積回帰モデルから全ての着生葉の個葉面積を推定し、それらを総和して株当たり葉面積を求めることは可能であり、その値は実測値に近いことが判明した。全着生葉の葉幅を測定する手間は残るが、イチゴは定植から1月までに15枚前後、4月までに25枚程度の葉が展開し、1月までは1芽10枚程度に管理することが多いため、全葉の葉幅の測定はそれほど困難ではない。また、回帰モデル以外のLAIの推定方法として、イチゴを株上部から撮影した画像を解析した算出方法が報告されている¹⁵⁻¹⁶⁾。イチゴの葉は2/5葉序で展開し地際から最高位の葉までの数十cmの間で密に重なり合う。重なり合う葉の画像と本研究の個葉面積回帰モデルで推定した株当たり葉面積から、受光効率などイチゴの光合成量に係る値を明らかとして、これらの値を利用した光合成量、果実収量を最大にする栽培技術の開発や、受光効率の高い品種の効率的な選抜に活用できると考えられた。

引用文献

1. Heuvelink, E. Crop growth and yield. Tomatoes. CABI Publishing. Wallingford. p.85-144(2005)
2. Heuvelink, E. , Bakker, M. J. , Elings, A. , Kaarsemaker, R. and Marcelis, L. F. M. Effect of leaf area on tomato yield. Acta Hort. 691, 43-50(2005)
3. 東出忠桐. 農業技術大系野菜編2トマト. 農山漁村文化協会. 東京. p. 基560の4-17(2014)
4. 安東赫, 東出忠桐, 岩崎泰永, 河崎靖, 中野明正. 施設キュウリのハイワイヤー栽培におけるLAI簡易推定. 野菜茶業研究所研究報告. 14(3), 23-29(2015)
5. 樋江井清隆, 伊藤緑, 番喜宏, 恒川靖弘. 非破壊によりトマトの個葉面積を推定する回帰モデルの構築及び検証. 愛知県農業総合試験場研究報告. 50, 19-26(2018)
6. Mandal, K. K. , Ghosh, S. K. and Gayen, P. A non-destructive way of leaf area estimation in the strawberry. Ann. Biol. 18(1), 19-24(2002)
7. Demirsoy, H. , Demirsoy, L. and Ozturk, A. Improved model for the non-destructive estimation of strawberry leaf area. Fruits. 60, 69-73(2005)
8. 幡野卓義, 伊藤善一. 種子繁殖型イチゴを用いた個葉面積を非破壊で簡易推定する回帰モデルの検討. 園学研. 18(別1), 310(2019)
9. 久保拓弥. データ解析のための統計モデリング入門. 岩波書店. 東京. p.1-267(2012)
10. 岩沢宏和, 平松雄司. 入門Rによる予測モデリングー機械学習を用いたリスク管理のために. 東京図書株式会社. 東京. p. 1-256(2019)
11. 川端一光, 岩間徳兼, 鈴木雅之. Rによる多変量解析入門. 株式会社オーム社. 東京. p.1-417(2018)
12. 宍戸良洋. 光合成産物の転流と分配. 養賢堂. 東京. p. 247-260(2016)
13. 木村雅行. 農業技術大系野菜編3イチゴ. 農山漁村文化協会. 東京. p. 基14(2019)
14. 柳智博. イチゴ大事典. 農山漁村文化協会. 東京. p. 40(2016)
15. 田中一久, 磯崎真英. イチゴ画像処理による生育解析に関する研究. 三重県農業技術センター研究報告. 25, 21-29(1997)
16. Yamamoto, Satoshi, Hayashi, Shigehiko and Tsubota, Shogo. Growth Measurement of a Community of Strawberries Using Three-Dimensional Sensor. Environ. Control Biol. 53(2)49-53(2015)