

農薬の作物残留濃度に大きな影響を与える初期付着量および作物生長に関する研究の状況について

末永和也¹，坂部亮介²，松野倫也¹，池田淳一¹，早川泰弘³

¹独) 農林水産消費安全技術センター 農薬検査部

²農林水産省横浜植物防疫所業務部

³元 独) 農林水産消費安全技術センター 農薬検査部

消費者は、作物に散布された農薬を作物中の残留農薬という形で摂取している。消費者が消費する農作物にどの程度の農薬が残留しているのかを知ることは、残留農薬によるヒトへのリスクを管理する上で非常に重要である。平成 25 年度に実施した文献調査から、散布された農薬の作物への初期付着量および作物の生長速度の 2 つが作物における農薬残留濃度に大きな影響をおよぼすことが分かった。そこで平成 26 年度は、これら 2 つの事項について文献調査を実施した。関連する 14 文献（作物における農薬の初期付着量に関する国内文献 1 報，海外文献 3 報，作物生長に関する国内文献 10 報）を収集し、調査対象項目に関する研究の進展状況を取りまとめた。一部の農薬と作物の組み合わせでは、この 2 つの情報から作物中の残留濃度の経時変化をある程度予測できる事例が報告されており、今後の研究に期待される場所であるが、作物における農薬の残留濃度は、個別農薬の特性、作物の種類・品種、気候、施設・露地等の生育環境等に大きく影響を受けることから、現時点における残留農薬濃度の予測可能範囲は限定的なものに留まると理解された。

Keywords : 作物残留濃度，初期付着量，作物生長

緒言

収穫時に作物に残留している農薬の濃度の把握は、ヒトへの農薬のリスク管理のために非常に重要である。そのため、農薬の登録申請時には、作物残留試験成績の提出が必須となっており、その結果を基に作物中の残留農薬基準とともに農薬の使用方法が定められる。作物における農薬の残留程度やその経時変化をある程度予測

できれば、効率的な作物残留試験の実施等に資することができる。

平成 25 年度の調査研究として、農薬の作物残留濃度推定モデルに関する文献 17 報（海外文献 11 報，国内文献 6 報）を収集し調査したところ、多くの文献にお

いて、農薬の作物残留濃度に大きな影響を与えるのは作物における農薬の初期付着量と作物の生長速度との結論になっていた。

平成 26 年度の調査研究として、初期付着量および作物生長に関する文献を収集し内容を調査したので報告する。

調査内容

作物への農薬の初期付着量の推定・測定に関係する 4 報（国内文献 1 報，海外文献 3 報）および作物生長、重量変化の推定・測定に関係する国内文献 10 報を収集し（表 1）、それらの内容について、研究の目的、推定方法、推定式の特徴等について分類・整理を行った。

表 1. 調査対象文献一覧

文献番号	著者	タイトル	雑誌名等	区分	分類*
1	藤田俊一ら	農薬残留推定モデルによるマイナー作物の残留性評価	植物防疫	初期付着量 (国内)	実測データ
2	Maclachlan ら	A new tool for the evaluation of crop residue trial data (day-zero-plus decline)	Food Additives and Contaminants	初期付着量 (海外)	実際の試験を行わずに得られるデータ
3	Holland ら	Modelling of pesticide residues on fruit II: persimmon	Plant Protec. Conf.		
4	Linders ら	Foliar interception and retention values after pesticide application. A proposal for standardized values for environmental risk assessment	IUPAC, Pure Appl. Chem.		

5	田中修作ら	果径測定によるハウスメロンの果実肥大生長予測	熊本県農業研究センター研究報告	作物生長 (国内)	果実成長率
6	大矢武志ら	カラーピーマン（パプリカ）の品種と生理生態的特性	神奈川県農業総合研究所研究報告		重量
7	長崎県	施設軟弱野菜	諫早湾干拓初期営農技術対策の指針		
8	小林雅昭	秋作メロン後作ミズナの生育・収量予測と作付計画及び経営規模決定プログラムへの応用	(研究成果報告) 長崎県農林技術開発センター		
9	武田悟ら	気温から予測するキャベツの収穫重量	東北農業研究		
10	杉浦俊彦	ニホンナシの気象生態反応の解析と生育予測モデルの開発	京都大学学位論文		体積
11	田中実ら	長崎県におけるニホンナシ‘幸水’および‘豊水’の生育予測	長崎果樹試研報		
12	大谷義夫	気象生態反応に基づくニホンナシの収穫期, 果実肥大, 果実生理障害予測	栃木農研報		
13	田附明夫ら	着果状態におけるキュウリ果実の体積推定と生長解析	園学雑		
14	森下昌三	イチゴの基礎知識	誠文堂新光社		生長曲線

* 初期付着量に関する文献は推定方法による分類, 作物生長に関する文献は推定対象による分類

調査結果

1. 初期付着量の推定に関する文献（文献1-4）

各文献を調査した結果, 実際の試験により得られた個別データを基礎とする推定法が2種類（文献1,2）, 実際の試験による個別データを用いずに経験則等を基礎とする推定法が2種類（文献2,3）という結果であった。実測データを基礎とした推定法としては, 付着試験を用いる推定法（文献1）もしくは作物残留試験結果を用いた推定法（文献2）があり, 実際の試験による個別データを用いずに推定する方法としては, 可食部への付着率による推定法（文献2）もしくは作物の単位表面積当たりの付着量による推定法（文献2,3）を用いていた。なお, 文献1-3については平成25年度の調査研究において調査した文献と同じものであるが, 初期付着量の推定方法に関する観点から内容を再度詳しく調査を行っている。

1.1. 実測データを用いる推定（文献1,2）

1.1.1. 付着試験による推定法（文献1）

本文献では, 実際の作物に水を付着させる試験を行って得た, 作物への水の付着量の実測データを基に作物への農薬散布液の初期付着量を推定している。果実類（果菜類を含む）と葉菜類とは異なる試験方法を用いている。

果実類では果実を水に浸漬し, 浸漬前後の重量差を求め, その結果を農薬散布液の付着量と仮定し, さらにその推定付着量の果実重量に対する割合から初期付着率を求めている。果実類（果樹29作物, 果菜11作物）について実施した付着試験の結果, 同一作物であ

っても品種によって付着率が異なり, 同一品種の果実であっても肥大生長の程度によって付着率が変化する場合も見られたが, 作物間の付着率の序列は経験的に認識されている残留傾向とおおむね一致しており, ある程度の推定が可能と考えられた。また, 実際の農薬散布では浸漬試験で得られる付着率よりも低い付着率に留まると仮定し, 補正係数0.8を用いて補正している。

一方, 葉菜類においては繁茂形状が複雑であるため, 茎葉ごとのばらつきが大きく, 果実類で用いた浸漬法は適用できなかった。このため, 葉菜類では円形ろ紙への付着量を基本として, 各葉菜類への付着量を相対化する方法を考案し, 各葉菜での残留濃度を推定している。具体的には, 葉菜類25作物を供試し, 円形ろ紙および各作物からそれと同型に切り出した作物葉片に対して同一条件で水を噴霧し, 噴霧前後の重量差からろ紙および作物葉片への付着量を求め, ろ紙への付着量を1としたときの作物葉片への付着量の比率を百分率として求めた。本文献では, この作物毎に求めた付着量の比率をパラメーターの一つとして用いる残留濃度推定モデル式を構築している。

葉菜類25作物について実施した付着試験の結果は, 農薬散布が想定される生育中期から後期において, 品種間の比率の差は果実類の場合よりも小さいことを示していた。

1.1.2. 作物残留試験を用いた推定法（文献2）

本文献では, 実際の作物残留試験データから導いた散布量と残留量の関係から初期付着量を初期付着濃度 C_0 として算出している。

具体的な推定方法として、1993～2007年までにJMPRで評価された残留試験データから、残留性の観点から同等とみなせる剤型、収穫前日数が14日以内（ほとんどの作物が該当）または7日以内（成育の早い作物）で、散布後0日(day-zero)のデータ C_0 を約2,600例求め、それらのデータについて、有効成分投下量が異なるためによって生ずる初期付着濃度の差を標準化するために、散布後0日のデータを有効成分投下量として1 kg/haの濃度 $C_{0,norm}$ に標準化し、作物ごとに $C_{0,norm}$ の中央値、90パーセンタイル値および95パーセンタイル値を算出している。

1.2. 実測データを直接用いない推定 (文献2,3)

1.2.1. 作物体への付着割合を用いた推定法 (文献2)

本文献では、十分な作物残留試験データがない作物について、初期付着濃度 C_0 を計算によって推定する方法を紹介している。

散布された農薬散布液のうち作物の可食部表面に付着する割合から付着量を推定しており、パラメータとして散布量、作物の収量、可食部の表面積、付着割合などを用いている。

$$C_0 = \frac{D \times 1000 \times f_{\text{int}} \times f_{\text{commodity}}}{Y_{\text{commodity}}}$$

D : 有効成分投下量(kg/ha)

f_{int} : 作物体への付着割合

$f_{\text{commodity}}$: 作物体に占める可食部の表面積の割合

$Y_{\text{commodity}}$: 可食部の単位面積当たりの収量(t/ha)

f_{int} は作物の品種、作物密度および生育段階による関数であり、 $f_{\text{int}} + f_{\text{drift}} + f_{\text{soil}} = 1$ (f_{drift} : 農薬散布における飛散割合、 f_{soil} : 土壌への付着割合) で表される。リンゴについては表2のとおり、2000年にLindersらによって具体的な数値が報告されている(文献4)。

$f_{\text{commodity}}$ は、可食部の表面積/作物全体の表面積で表され、オレンジ等の果樹の場合は樹木に占める果実の表面積の割合、葉菜類の場合は作物全体が可食部であるため $f_{\text{commodity}} = 1$ となる。

表2. リンゴの f_{int} , f_{drift} , f_{soil} の数値例

生育段階	f_{int}	f_{drift}	f_{soil}
春	0.4	0.1	0.5
茎葉展開期	0.7	0.1	0.2

1.2.2. 作物の単位表面積当たりの付着量を用いた推定法 (文献2,3)

文献3では、果実であるかきに有効成分投下量1 kg a.i./haの農薬を散布した際の、果実の単位表面積当たりの付着量(Constant deposit)を経験則から $2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ と推定し、以下の推定式から農薬散布時の農薬付着量 $D(t_1)$ を算出している。

$$D(t_1) = 2 \times W \times A(t_1)$$

t_1 : 農薬散布日

W : 有効成分投下量[kg a.i./ha]

$A(t_1)$: 散布日 t_1 における果実の表面積[cm^2]

【実測値】

文献2では、文献3で用いられた付着量の推定式を他の果実へ外挿するため、かき果実の単位表面積当たりの付着量から、他作物の果実における単位表面積当たりの付着量を以下の推定式から算出している。

Constant deposit =

$$2 \mu\text{g cm}^{-2} \times \frac{f_{\text{int},x}}{f_{\text{int,persimmon}}} \times \frac{\text{LAI}_x}{\text{LAI}_{\text{persimmon}}}$$

$f_{\text{int},x}$: 作物 x における付着割合

$f_{\text{int,persimmon}}$: かきにおける付着割合

(文献では0.8)

LAI (Leaf Area Index) :

地表面積に占める作物の葉の上側の表面積の割合 (ほ場被覆割合)

LAI_x : 作物 x のほ場被覆割合

$\text{LAI}_{\text{persimmon}}$: かきのほ場被覆割合

(文献では2.5)

文献1の推定法により導き出された散布後0日における残留濃度および実測値からの乖離度(推定値/実測値)を表3に、文献2に示されている作物ごとの実測値および各推定法によって導き出された初期付着濃度の一部を表4に示した。

1.3. まとめ

初期付着量の推定に関する文献を調査した結果、付着試験による初期付着率の推定法、既存の作物残留試験を用いた初期付着濃度の推定法、作物体への付着割合もしくは作物の単位表面積当たりの付着量を用いた推定法があり、これらの知見等からある程度の推定が可能であることが示されていた。しかしながら、表3および表4のとおり各推定法によって導き出される散布後0日における推定残留濃度や初期付着濃度にはそ

れなりの差があり，残留試験の実測値に近似する

ための推定法も作物によって異なっていた。

表 3. 文献 1 の推定法により導出される散布後 0 日における残留濃度

作物名	例数	散布後 0 日における残留濃度(mg/kg)		
		実測残留濃度	推定残留濃度* (1.1.1 項)	乖離度 (推定残留濃度 / 実測残留濃度)
うめ	1	6.86	8.66	1.4
	1	1.97	1.28	0.8
	1	9.78	6.96	0.5
りんご	1	1.16	0.76	0.7
	1	0.22	0.19	0.9
	1	1.34	0.88	0.6
こまつな	1	20.4	24.6	1.2
	1	4.04	4.63	1.0
しゅんぎく	1	12.9	17.4	1.4
	1	2.52	3.70	1.5

*: 付着率を基に散布 0 日後の残留濃度を推定

表 4. 文献 2 の各推定法により導出される初期付着濃度

作物名	例数	JMPR で評価された散布後 0 日における残留試験データ (実測値, mg/kg)		作物における初期付着濃度(mg/kg)		
		最小値-最大値	平均値	作物残留試験データを用いた推定法 (90%タイル値) (1.1.2 項)	作物体への付着割合を用いた推定法 (1.2.1 項)	単位表面積当たりの付着量による推定法 (1.2.2 項)
レモン	31	0.1-4.67	0.85	1.1	1.3	1.4
オレンジ	130	0.02-8.2	0.86	1.6	0.84	0.89
リンゴ	184	0.07-8.8	1.28	2.6	1.9	2.0
モモ	91	0.19-8.33	1.98	4.0	1.6	1.6
イチゴ	59	0.12-56.7	4.79	6.0	4.2	2.8
キュウリ	41	0.02-6.01	0.74	0.98	1.0	1.3
メロン	35	0.04-1.38	0.59	0.75	0.79	0.8
トマト	104	0.01-10.5	0.78	1.4	2.0	1.4
ハウレンソウ	13	3.8-173	52.9	89	90	82

2. 作物の生長に関する文献 (文献 5-14)

各文献を調査した結果、収穫時の作物重量を推定するにあたり、文献毎に数式化するための観点やパラメーターが異なっていた。そのため、収穫時の作物重量を直接推定していないが、密度等の値が分かれば推定が可能となり得る文献についても調査・整理を行った。数式化するための観点で各文献を整理したところ、交配後の生長指標の測定回数と果実成長率の関わりに着目したもの (文献 5)、温度等から作物重量を推定したもの (文献 6,7,8,9)、日射量・体積の初期値等から日本なしの収穫時の体積を推定したもの (文献 10,11,12) もしくは果菜類の周囲長等を経時的に測定した値を用いて作物重量を推定したもの (文献 13,14) があつた。それぞれの推定式および用いられたパラメーターの概要について取りまとめた。

2.1. 交配後の生長指標の測定回数と果実成長率の関りに着目したもの (文献 5)

本文献では、アンデスメロンの交配日 (開花日) から収穫までの果高・果径の推移を調査し数式化したところ、交配 27 日後以降は一定の傾きを持つ直線になることが明らかにしている。そして、果実成長率についてより客観的に評価するために、交配後 25 日または 30 日を起点とした果高・果径の収穫時の長さ x 回目 ($1 \leq x \leq 9$) の調査時の長さとの比 (肥大率) の推移を数式化している。

推定のために実施した試験の概要および求められた推定式は以下のとおり。

試験概要

作物名：メロン (n=30) 品種：アンデス
試験場所：熊本県 調査実施年：2000~2003 年
露地/施設：施設

推定式

・交配後 25 日~収穫時

$$\text{果高 } y = -0.0111x + 1.0757 \quad (R^2 = 0.9846)$$

$$\text{果径 } y = -0.0125x + 1.0857 \quad (R^2 = 0.9570)$$

・交配後 30 日~収穫時

$$\text{果高 } y = -0.0100x + 1.060 \quad (R^2 = 1.0000)$$

$$\text{果径 } y = -0.0111x + 1.0673 \quad (R^2 = 0.9516)$$

独立変数 x (回) : 交配後 25 日または 30 日からの
果高・果径の測定回数
(5 日ごとに測定)

従属変数 y : 果高・果径の収穫時の長さ x 回目
($1 \leq x \leq 9$) の調査時の長さとの比 (肥大率)

R^2 : 決定係数

求められた推定式から、アンデスメロンは交配後 25 日以降に肥大は殆ど起こらないことが示されている。そのため、本文献では収穫 1 ヶ月前以降にアンデスメ

ロンに農薬を散布した場合、アンデスメロンは果実の生長による残留濃度の希釈が殆どないことを明らかにしている。

しかしながら、上記の推定式は独立変数が測定回数、従属変数が果高または果径の増加率であるため、作物重量の変化については考慮できないため、濃度を直接予測することはできない。また、交配後 25 日以降の生長についてのみ数式化されており、それよりも早い時期の果実の生長については推定の対象とはなっていない。

2.2. 温度等から作物重量を推定したもの (文献 6,7,8,9)

2.2.1. 日数を独立変数、作物重量を従属変数として、作物の収量を予測したもの (文献 6)

本文献では、47 品種のカラーピーマンについて、開花から完熟までの日数、積算温度、果実重量等を調査し、開花から完熟までの日数と果実重量の関係式を導いている。

推定のために実施した試験の概要および導き出された推定式は以下のとおり。

試験概要

作物名：カラーピーマン (n=10)
品種：ワンダーベル、スピリット、他 (計 47 種)
試験場所：神奈川県 調査実施年：1998~2000 年
露地/施設：施設 (トンネル被覆)

推定式

$$y = 7.560x - 269.579 \quad (r^2 = 0.957)$$

独立変数 x (日) : 開花から完熟までの日数

従属変数 y (g) : 収穫したピーマンの果重

r^2 : 決定係数

本文献では作物重量を計算式で求めるため、農薬残留濃度の推定に利用できる可能性はあるが、独立変数が日数のみであり、気象条件等の環境条件により本式は大きく変化すると考えられる。そのため、本結果はあくまでも本試験を行った際の環境条件に依存した結果である。

2.2.2. は種後日数またはは種後積算温度を独立変数、株当たりの重量またはは m^2 当たりの収量を従属変数として、作物の生長を予測したもの (文献 7)

長崎県の収穫期間・作付規模等の予測プログラムに関する研究であり、本文献では、ハウレンソウ・コマツナ・チョウホウナ・チンゲンサイの 4 作物について、作物収量とは種後日数・積算温度との関係を調査している。

推定のために実施した試験の概要および提案された推定式は以下のとおり。株当たりの重量と m^2 当たり

の収量について、は種後日数またはは種後積算温度との関係式を $2 \times 2 = 4$ 通りの組み合わせとして、それぞれ導き出している。

試験概要

①ハウレンソウ

品種：オーライ 調査実施年：2004～2005年

②コマツナ

品種：楽天 調査実施年：2004～2005年

③チョウホウナ

品種：記載なし 調査実施年：2005～2006年

④チンゲンサイ

品種：長陽 調査実施年：2006～2007年

4作物とも、試験場所：長崎県 露地/施設：施設

推定式

①ハウレンソウ

$$y_1 = -0.0003x_1^2 + 0.4968 \quad (r^2 = 0.7059)$$

$$y_1 = -9 \times 10^{-7}x_2^2 + 0.0409x_2 \quad (r^2 = 0.7050)$$

$$y_2 = -5.4797x_1^2 + 875.76x_1 - 31411 \quad (r^2 = 0.5572)$$

$$y_2 = -0.0453x_2^2 + 85.059x_2 - 36363 \quad (r^2 = 0.5488)$$

②コマツナ

$$y_1 = -0.0012x_1^2 + 0.6885x_1 \quad (r^2 = 0.8611)$$

$$y_1 = -2 \times 10^{-6}x_2^2 + 0.0519x_2 \quad (r^2 = 0.8668)$$

$$y_2 = -0.2598x_1^2 + 78.097x_1 + 6.7741 \quad (r^2 = 0.9338)$$

$$y_2 = -0.0015x_2^2 + 6.2651x_2 + 7.4099 \quad (r^2 = 0.9364)$$

③チョウホウナ

$$y_1 = -0.0154x_1^2 + 2.949x_1 - 79.216 \quad (r^2 = 0.8441)$$

$$y_1 = -8 \times 10^{-5}x_2^2 + 0.2154x_2 - 88.154 \quad (r^2 = 0.8489)$$

$$y_2 = -5.5012x_1^2 + 824.03x_1 - 26454 \quad (r^2 = 0.9276)$$

$$y_2 = -0.0235x_2^2 + 53.472x_2 - 26029 \quad (r^2 = 0.9485)$$

④チンゲンサイ

$$y_1 = -0.0534x_1^2 + 9.7668x_1 - 345.54 \quad (r^2 = 0.9894)$$

$$y_1 = -0.0002x_2^2 + 0.4855x_2 - 257.97 \quad (r^2 = 0.9827)$$

$$y_2 = -1.1059x_1^2 + 247.3x_1 - 9763.9 \quad (r^2 = 0.7596)$$

$$y_2 = -0.0028x_2^2 + 11.475x_2 - 6979.6 \quad (r^2 = 0.7348)$$

独立変数：は種後日数 x_1 (日)

は種後積算温度 x_2 (°C)

従属変数：収穫した作物の株当たりの重量 y_1 (g)

収穫した作物の m^2 当たりの収量 y_2 (g)

r^2 ：決定係数

本文献では独立変数に積算気温のような一般化された変数を用いて作物重量を直接予測しており、農薬残留濃度推定に応用できる可能性がある。

2.2.3. 生育積算温度を独立変数、株当たりの重量を従属変数として、作物の成長を数式化し、作物の生育・収量特性を予測したもの (文献8)

2.2.2.項で紹介した生育・収量予測プログラムに関する研究を、ミズナの生育・収量予測プログラムへ応用

したものである。本文献では、ミズナの生育のは種後日数・積算温度との関係を調査し、株重量と積算温度の関係式を導いている。

推定のために実施した試験の概要および提案された推定式は以下のとおり。

試験概要

作物名：ミズナ 品種：京みぞれ

試験場所：長崎県 調査実施年：2008年

露地/施設：施設 (ハウス)

推定式

$$y = 0.001x^2 - 1.4213x + 585.68 \quad (R^2 = 0.9517)$$

独立変数 x (°C)：は種後の積算温度

従属変数 y (g)：収穫したミズナの株重

R^2 ：寄与率

本文献では、2.2.2.項と同様に作物重量を直接予測している。そのため農薬残留濃度推定に応用可能と考えられる。

2.2.4. 平均気温を独立変数、株当たりの重量を従属変数として、作物の成長を数式化し、作物の生育・収量特性を予測したもの (文献9)

入手が容易な気象要素である気温を用いたキャベツの収穫時作物重量の予測に関する研究であり、本文献では、生育期間を4つに区切り、収穫時の重量と各期間の平均気温との関係式を導いている。

推定のために実施した試験の概要および求められた推定式は以下のとおり。

試験概要

作物名：キャベツ ($n = 17$) 品種：YR青春2号

試験場所：秋田県 調査実施年：1996～1997年

露地/施設：露地

推定式

$$Y = 220.4X_1 - 223.0X_2 - 29.8X_3 + 124.6X_4 + 1578 \quad (R^2 = 0.72)$$

独立変数 X (°C)：

X_1 【定植 (3.5葉)～結球期 (50%の株の結球部がテニスボール大になった時期)における平均気温】

X_2 【結球前20日間における平均気温】

X_3 【収穫 (50%の株が収穫できた時期)前10日間における平均気温】

X_4 【 X_2 一定植後10日間における平均気温】

従属変数 Y (g)：キャベツの球重

R^2 ：決定係数

導き出された推定式は作物重量を直接予測することができるため、農薬残留濃度推定に応用可能と考えられる。複数の期間について平均気温を算出する必要はあるが、キャベツは主に露地で栽培される作物であるため、アメダスデータ等の利用により作物の重量を簡便に推定できる方法である。

2.3. 日射量・体積の初期値等から日本なしの収穫時の体積を推定したもの（文献10,11,12）

京都大学における研究（文献10）では、日本なし果実の初期体積および日射量と果実の体積変化の関係式を導きだし、関係式から得られるパラメーターを用いた満開後体積の推定式を提示している。長崎県または栃木県における研究（文献11,12）では、文献10で提案された推定式をそれぞれの現場で用いる品種にも適用できるように、改良も試みられている。

2.3.1. 京都大学における研究（文献10）

本文献では、日本なし（幸水）について、果実体積および日射量を調査し、果実体積の推定式を導き出した。

推定のために実施した試験の概要は以下のとおり。

試験概要

品種：幸水（n=45） 試験場所：茨城県
調査実施年：1989～1990年 露地/施設：露地

n回目とn+1回目の測定（測定間隔：m日間）における果実体積の増加量【 $V_{n+1}-V_n$ (cm³)】を従属変数、満開33日後の果実体積【 V_{33} (cm³)】および日射量【 S_n (MJ/m²)】を独立変数として、式(1)を得ている（b, p：定数）。

$$V_{n+1}-V_n = A_n \cdot S_n^b \cdot V_{33}^p \quad (1)$$

式(1)に V_{n+1} , V_n , V_{33} , S_n の測定値を代入することで係数 A_n を算出している。1日ごとの日射量【 S_d (MJ/(m²・day))】の総和および A_n を式(2)に代入し、係数 k_n を求めている。

$$k_n = A_n \cdot (S_n^b / \sum_{d=1}^m S_d^b) \quad (2)$$

式(1), (2)より、満開 x 日後の体積【 V_x (cm³)】は式(3)で推定できるとしている。

$$V_x = V_{33} + \sum_{d=33}^{x-1} k_n \cdot S_d^b \cdot V_{33}^p \quad (3)$$

収穫した果実の新鮮重【FW (g)】と体積【V (cm³)】との関係は概ね直線的であり、関係式として式(4)が得られている。式(4)を用いることで、式(3)で得られた体積から重量へ変換することができる。

$$FW = 1.088V + 18.93 \quad (4)$$

2.3.2. 長崎県における研究（文献11）

本文献では、2.3.1.項で紹介した推定式を長崎県の現場において適合させるために改良している。式(3)をベースとして、幸水および豊水の満開 x 日後の体積【 V_x (cm³)】の推定式を導き出しており、豊水については体積の初期値として満開33日後の果実体積【 V_{33} (cm³)】ではなく、細胞分裂停止期の果実体積【 V_0 (cm³)】を用いている。

推定のために実施した試験の概要および求められた推定式は以下のとおり。

試験概要

品種：幸水、豊水 試験場所：長崎県
調査実施年：1985～2004年 露地/施設：露地

推定式

$$\text{幸水： } V_x = V_{33} + \sum_{d=33}^{x-1} k_n \cdot S_d^b \cdot V_{33}^p \quad (\text{式(3)と同一})$$

$$\text{豊水： } V_x = V_0 + \sum_{d=33}^{x-1} k_n \cdot S_d^b \cdot V_0^p \quad (5)$$

本文献では、各品種における定数（b, p）として表5の値を用いている。本文献では重量の推定は行っていないが、2.3.1.項の式(4)を用いることで果実重量を推定可能なことから、農薬残留濃度の推定への応用が可能と考えられる。

表5. 各品種における定数例（文献11）

品種	p	b
幸水	0.5842	0.4842
豊水	0.5808	～満開92日後：0.1614 満開93日後～：0

2.3.3. 栃木県における研究（文献12）

本文献では、2.3.1.項で紹介した推定式を栃木県の現場において適合させるために改良している。式(3)をベースとして、果実体積の初期値【 V_{33} (cm³)】を細胞分裂停止期の果実体積【 V_0 (cm³)】、満開後の日数を細胞分裂停止後の日数【x(日)】に変更して、幸水、豊水およびにっこのり体積【 V_x (cm³)】の推定式を導き出している。また、得られた体積から、新鮮重【FW (g)】および横径【w (cm)】を導いている。

推定のために実施した試験の概要および求められた推定式は以下のとおり。

試験概要

品種：幸水、豊水、にっこり 試験場所：栃木県
調査実施年：1984～2003年 露地/施設：露地

推定式

$$V_x = V_0 + \sum_{d=0}^{x-1} k_n \cdot S_d^b \cdot V_0^p \quad (6)$$

本文献では、各品種における定数 (b, p), 横径および新鮮重の推定式は表 6 に示したものを利用している。

表 6. 各品種における定数例 (文献 12)

品種	P	b	横径【w (cm)】	新鮮重【FW (g)】
幸水	0.3390	0.4687	$(5.968V/\pi)^{0.346}$	$0.8979V^{1.0469}$
豊水	0.6475	満開 30~70 日後 : 0.1219 満開 71 日後 ~ : 0	$(5.6232V/\pi)^{0.3449}$	$124.54w - 748.17$
にっこり	0.4042	0	$(5.6232V/\pi)^{0.3449}$	$106.24w - 417.44$

2.4. 果菜類の周囲長等の経時的な測定値を用いた、作物重量の推定 (文献 13,14)

本文献では、キュウリ果実の果実長および周囲長 (文献 13) もしくはイチゴ果実の縦径および横径 (文献 14) を非破壊的かつ経時的に測定し、得られた結果を各種関数 (ゴンペルツ曲線, ロジスティック曲線および指数曲線) にフィッティングさせている。

2.4.1. 果実の果実長と周囲長から果実の体積指数および果実体積ならびに果実重量を推定したもの (文献 13)

本文献では、キュウリ果実を円柱形とみなし、着果したままの状態でも果実長および周囲長 (3ヶ所) を測定し、体積を表すパラメーターとして果実の体積指数 FVI (mm³) を推定している。

推定のために実施した試験の概要および提案された推定式は以下のとおり。

試験概要

作物名 : キュウリ (n = 59)
 品種 : フクダ交配ときわ光 3 号 A 型
 試験場所 : 東京大学農学部実験ほ場
 調査実施年 : 1981 年 露地/施設 : 露地

推定式

$$FVI = 1 \cdot (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

独立変数 : 果実長 l (mm)
 3ヶ所の周囲長 : a₁, a₂, a₃ (mm)
 従属変数 : 体積指数 FVI (mm³)

式(7)で得られた体積指数【FVI (mm³)】と体積【V (cm³)】、新鮮重【FW (g)】および乾重量【DW (g)】の相関性についても着目し、それぞれの値を以下の式に

表 5 の推定式を用いることで各品種の果実重量を推定でき、農薬残留濃度の推定に応用可能と考えられる。しかしながら、推定に必要な係数である k_n や定数を求めるには日射量と体積変化の実測値が必要であることから利用可能な範囲は大きくない。

より推定できるとしている。これらの推定式は、高い相関 (相関係数 : r > 0.99) を示している。

$$V = 22.61 \cdot FVI \quad (r=0.9992)$$

$$FW = 22.42 \cdot FVI \quad (r=0.9993)$$

$$DW = 0.9075 \cdot FVI + 0.4150 \quad (r=0.9924)$$

作物生長を表す曲線として、ゴンペルツ曲線 ($y = Kb e^{-cx}$) およびロジスティック曲線 ($y = K/(1 + be^{-cx})$) を選定している。両曲線のグラフ例を図 1 に示す。

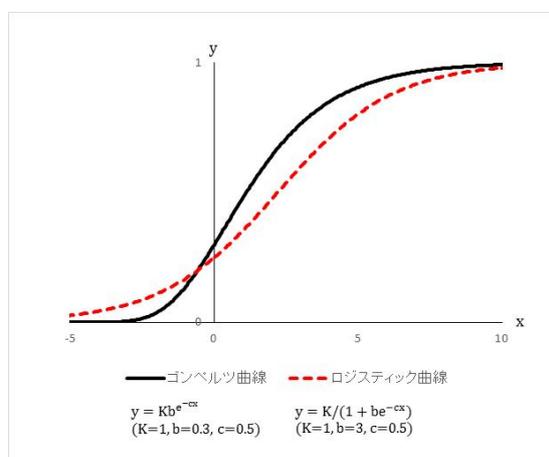


図 1. ゴンペルツ曲線およびロジスティック曲線

体積指数【FVI (mm³)】を従属変数、日数【T (日)】を独立変数としゴンペルツ曲線およびロジスティック曲線へフィッティングを行っている。その結果、両曲線の近似式は、以下のように求められた (a, b : 果実間で異なる定数, c : 同一品種ではほぼ同じ値)。

$$\text{ゴンペルツ曲線近似 : } FVI = ae^{-be^{-cT}}$$

$$\text{ロジスティック曲線近似 : } FVI = a/(1 + be^{-cT})$$

両成長曲線の適合度を比較したところ、ゴンペルツ曲線近似式の方が適合度が高い結果であった。

本文献で提案された手法は、作物を収穫することなく作物重量を精緻に予測することができ、農薬残留濃度の推定に応用可能と考えられるが、近似式を求めるために多数の果実についてデータを取得する必要がある。

2.4.2. 各果実の縦径と横径から果重を推定したもの (文献 14)

本文献では、イチゴ果実について、果高(縦径)および果径(横径)を測定し、果実重量を推定している。

推定のために実施した試験の概要および求められた推定式は以下のとおり。推定式の相関係数は $r = 0.996$ であり、高い相関を示した。

試験概要

作物名：イチゴ (n = 160) 品種：はるのか
試験場所：記載なし 調査実施年：1980～1981年
露地/施設：露地

推定式

$$\text{果重} = 0.2637 \times (\text{縦径} \times \text{横径})^{1.5127}$$

独立変数：縦径・横径 (cm)

従属変数：果重 (g)

さらに、果実重量【y (g)】を従属変数、縦径×横径【x (cm²)】を独立変数とした近似式を推定し、指数曲線およびゴンペルツ曲線への適合度を検証した。両曲線への近似式は、以下のとおり推定された。定数 a, b, A, B および極限值 K についても、成熟日数【t (日)】および収穫時果重【W (g)】から以下のとおり求めることができる。とされている。

$$\text{指数曲線近似：} y = a \cdot b^x$$

$$a = W/b^t \quad b = A \cdot t^B$$

$$A = -6.884B + 0.9536$$

$$B = -0.00153W - 0.07685$$

$$\text{ゴンペルツ曲線近似：} y = K \cdot a^{b^x}$$

$$K = W/a^{b^t} \quad a = A \cdot t^B$$

$$b = 0.69307 \cdot t^{0.085826}$$

$$A = -0.000273874W + 1.00638$$

$$B = -0.0138431W - 2.33845$$

両成長曲線の適合度を比較したところ、成長前期においては指数曲線近似式、成長後期においてはゴンペルツ曲線近似式に対して適合度が高い結果を示している。

本文献で示された推定式は、2.4.1.項と同様作物重量を精緻に予測することができるため、農薬残留濃度の推定に応用可能と考えられるが、気象条件が考慮されておらず一般化されたものではない。

2.5. まとめ

作物生長の推定に関する文献を調査した結果、気温等の生育環境から容易に推定可能な推定方法が見られ、収穫時の果実重量の推定に有用である方法が報告されていることが確認された。また、果実の周囲長を計測する等非破壊的な測定でより精度の高い推定を行っている例も見られた。しかしながら、作物の生長は品種や栽培条件によって異なるため、実際に活用するためには、可能な限り各地域・各品種の情報を収集し作物重量を推定する必要があることがわかった。

おわりに

今回の調査により、作物残留濃度推定の重要なパラメーターである初期付着量および作物生長の推定について、海外および国内での研究の概要について把握することができた。初期付着量の推定方法には実測データを基礎とするものと、実際の試験を行わずに経験則等を基礎とするものがあり、これらの手法からある程度予測が可能であることが確認された。推定方法は単一では無く、結果も算出方法によって大きく異なる事例が見られ、より精度の高い推定を行うためには実測値との更なる比較・検証が必要な研究分野であることが明確になった。

また、作物生長については、気温等の生育環境から容易に推定可能な推定方法のほか、果実の周囲長を計測する等非破壊的な測定でより精度の高い推定を行っている例も見られた。調査した文献によっては、収穫日予測プログラム等の開発に伴う作物生長に関する研究として行われているものもあり、そうした知見と組み合わせることで容易な推定が可能になると考えられる。しかしながら、作物の生長は品種や栽培条件によって異なるため、より精度の高い推定を行うためには地域・品種ごとの情報の収集が必要である。

参考文献

- 1) 藤田俊一, 和田豊, 高橋義行: 植物防疫 67, 55-61 (2013)
- 2) D. J. Maclachlan and D. Hamilton: *Food Additives and Contaminants* 27, 347-364 (2010)
- 3) P. T. Holland, C. P. Malcolm, A. D. Mowat, B. H. Rohitha and R. E. Gaskin: *Plant Protection Conf* 49, 192-197 (1996)
- 4) J. Linders, H. Mensink, G. Stephenson, D. Wauchope and K. Racke: *IUPAC, Pure Applied Chemistry* 72,

- 2199-2218 (2000)
- 5) 田中修作, 石田豊明: 熊本県農業研究センター研究報告 14, 49-60 (2007)
 - 6) 大矢武志: 神奈川県農業総合研究所研究報告 142, 49-55 (2001)
 - 7) 長崎県: 諫早湾干拓初期営農技術対策の指針 (2007)
 - 8) 小林雅昭: (研究成果報告) 長崎県農林技術開発センター (2008)
 - 9) 武田悟, 加賀屋博行: 東北農業研究 52, 195-196 (1999)
 - 10) 杉浦俊彦: 京都大学学位論文 (1997)
 - 11) 田中実, 林田誠剛: 長崎果樹試研報 11, 29-42 (2008)
 - 12) 大谷義夫: 栃木農試研報 58, 17-29 (2006)
 - 13) 田附明夫, 崎山亮三: 園学雑 53, 30-37 (1984);
 - 14) 森下昌三: イチゴの基礎知識, 誠文堂新光社, 62-72 (1983)