

平成 29 年度
修士学位論文

トマト葉面積の簡易推定法
— 枝の機械的パラメータと葉面積の関係 —

平成二十九年

三重大学院 生物資源学研究科 共生環境学専攻
応用環境情報学研究室

堀尾 隼大

緒言	背景
	目的
第1章	大玉トマト枝の機械的パラメータと葉面積の関係
1.1	緒言
1.2	実験概要
1.2.1	材料
1.2.2	実験器具
1.2.3	実験方法
1.2.4	曲げ剛性の測定理論
1.2.5	解析方法
1.3	結果・考察
1.3.1	正規性検定・相関分析
1.3.2	多重回帰分析による個葉面積推定式の決定
1.3.3	個葉面積推定値と実測値の比較
第2章	ミニトマト枝の機械的パラメータと葉面積の関係
2.1	緒言
2.2	実験概要
2.2.1	材料
2.2.2	実験・解析方法
2.3	結果・考察
2.3.1	正規性検定・相関分析
2.3.2	生長段階ごとの解析
2.3.3	生長による葉の密度の変化
2.3.4	全葉面積と各葉位の個葉面積・枝パラメータの相関
2.3.5	個葉面積推定値と実測値の比較
第3章	今後の展望
	総合摘要
	謝辞
	参考文献
	付録

緒言

背景

施設園芸は、安定生産・出荷期間延長・高品質農作物の栽培が可能となり、近年では大規模施設の導入が進められている。施設栽培面積 1 位の品目であるトマトの栽培では、葉数・葉齢・葉位が光合成量・光合成産物の転流と関係しており（宍戸，1991），葉の管理が果実の肥大・糖度・収量に直結している（斉藤，2006 細井，2001）。しかし，葉の過繁茂は湿度上昇を招き，カビや細菌による病気を引き起こし，葉が邪魔になることで収穫作業等の非効率化の原因となる。

過去のトマト栽培の方法であり，つる降ろしをしない アンブレラ型は，植物が生長すると群落が大きくなり，上層の葉のみが光を利用でき，下層の植物が利用できる光は大幅に減少する。一方，現在の主流となっているハイワイヤー栽培では，茎が伸びるにつれてつる降ろしをすると同時に，下葉を摘除する。植物群落では上層部が強い光を受け，下層に移るにつれて光強度は急速に低下する。光補償点以下のところでは呼吸による消耗が光合成を上回ることになるので，そのような部分は摘葉する。下葉を摘除する効果は，光合成産物の転流や根から吸収されたミネラルの分布など植物生理学的に見ても大きいと考えられる。また，近年のオランダ式栽培方法では，季節によって単位面積当りの茎数を変えている。すなわち，単位面積当りの茎数は定植時の 12 月から春に光が強くなるまでは 1.8~2.0 本であり，光量が増加するにつれて側枝を増やし，最大には 4.0 本にする。この総葉面積を季節によって変え，太陽光を最大限活用した栽培方法が今後の主流となると見られる。（池田，2009 年）。このようにトマトの生育において葉は重要な役割を果たすが，適切な管理が必要になる。そこで LAI（Leaf Area Index）

（葉面積指数：単位土地面積に対する植物体の全葉面積を示した数値）が葉の管理指標として用いられている。過去の経験則から LAI に目標値を設定することで品種や気温，日射量などの圃場環境に応じた最適な葉面積を維持することができる。

現在，LAI を現場で測定する方法としては，メジャーを使った手作業での葉の大きさ計測と，LAI 測定機器による計測に限られる。しかし，手作業では高所の作業において身体的負担が大きいことや手間がかかること，正確な LAI が得られないなどの問題がある。LAI 測定機器での測定は機器が高額であることや地域の日射条件によって出力される値が異なり使用者の技術を必要とするなどの問題点が挙げられる。そこで安価かつ，現場対応型の新たな個葉面積測定技術の開発が必要とされる。

本研究では葉面積とその支持機能である枝の係りに着目した。マメ科では葉重が増加すると茎の乾燥重量が増加すること（津川，1981），キャベツ苗では葉面積と茎の曲げ剛性に相関がある（加藤，2009）ことが報告されている。これらから，葉の展開による

葉重増加に伴い、枝の支持機能も増大することが考えられる。

目的

これらの背景より、トマト枝の機械的パラメータを用いた葉面積の簡易推定法の開発を目的とする。今回は、トマト株における葉面積と枝の形態的・力学的パラメータの相関関係を明らかにするため、トマト枝の機械的パラメータと葉面積を計測した。

第1章では枝の硬さと葉面積の関係を明らかにするために、物体の曲げ変形のしにくさである曲げ剛性を計測し葉面積との関係を統計的に評価した。第2章では1株の上から14葉の個葉面積、枝パラメータを計測することで、全葉面積と葉位ごとの個葉面積、全葉面積と葉位ごとの枝パラメータを評価した。

第1章 大玉トマト枝の機械的パラメータと葉面積の関係

1.1 概要

トマト枝の機械的パラメータを用いて葉面積を推定するためには、これらの相関関係を明らかにする必要がある。トマトには株の根本から伸び全体を支える主茎と主茎から伸びる脇芽が存在している。トマトは、主茎・脇芽から3枚の葉が着葉した後1つ果実をつける(3葉1果性)ことを繰り返し生長する。今回は、主茎・脇芽から伸びる1本の枝に着葉した葉すべてを1つの葉(個葉)とし、その葉面積(個葉面積)と枝の力学的パラメータについて解析を行った。この章では相関関係と葉面積推定のための回帰式について述べる。

1.2 材料と方法

1.2.1 材料

実験には附帯施設農場の実験圃場で水耕栽培した大玉トマト“桃太郎ピース”を用いた。実験サンプルとなる個葉は、2017年6月29日から7月5日の8時半ごろに圃場内から無作為に採取した。この実験では全48サンプルの個葉を供試した。



図1 供試したトマト個葉

1.2.2 実験器具

・プリンタ複合機

葉面積の測定にはプリンタ複合機（PM-A820,EPSON）を用いた。



図 1-1 PM-A820,EPSON

・クリープメータ

枝の応力測定にはクリープメータ（RE-3305S YAMADEN）を用いた。仕様書を表 1 に示す。



図 1-2 RE-3305S YAMADEN

表1 クリープメータ RE-3305S YAMADEN 仕様書

測定モード	1, 応力測定 2, クリープ測定 3, テクスチャー測定の3モード その他応用により様々な測定が可能	
測定範囲 (荷重測定)	±199.9N	(200Nロードセル* 使用時)
	±19.99N	(20Nロードセル使用時、または200Nロードセル* と10倍アンプ* 使用時)
	±1.999N	(2Nロードセル* 使用時、または20Nロードセルと10倍アンプ* 使用時)
測定範囲 (変形測定)	±199.9mm	(STEP:0.1mmクリープ測定時) ※オプション品
	±19.99mm	(STEP:0.01mmクリープ測定時)
オペレート	圧縮・引張試験 両用	
電源	AC100v 50/60Hz、消費電力 約120W	
測定部寸法重量	W330mm×H145mm×D205mm (スタンドを建てた場合はH175×D230) (約5kg)	
検出部寸法重量	W152mm×H490×D340mm (約11.5kg)	

・3Dプリンタ

トマト枝を固定する治具(図1-7)を3Dプリンタ(UP Plus2 Delta-Microfactory)を用いて作製した。治具の幅は40mmとし、枝を支持する溝を設けた。

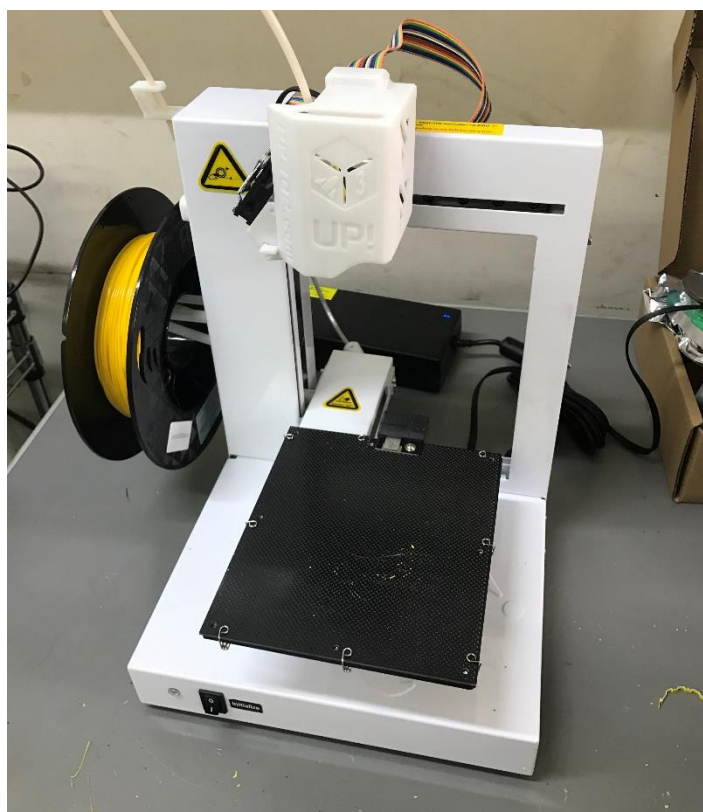


図1-3 UP Plus2 Delta-Microfactory

- ・定温乾燥機

トマト個葉の乾物重測定のため, 乾燥には定温乾燥機 (SDN27 SANSYO) を用いた.



図 1-4 SDN27 SANSYO

1.2.3 実験方法

- ・生体重・乾燥重測定

主茎・脇芽から伸びる個葉を根元から採取し, 電子天秤 (asp-413, アズワン株式会社) で生体重を測定し, すべての測定が終わった後, 定温乾燥機で 100°C1 時間, 80°C24 時間乾燥させ, 乾燥重を測定した. 測定した生体重と乾物重から含水率を算出した.

- ・枝径測定

生体重測定後, サンプルの枝の根本 5cm を切り取り, その中点である根本から 2.5cm の位置の枝の径をノギスで測定した. 重力方向を縦とし, 枝の縦径・横径の 2 方向測定した. この縦径・横径から, 枝の断面形状を楕円とみなして断面積と 2 方向の断面二次モーメントを算出した.

- ・葉面積測定

サンプルの根本 5cm を切除した後, 残り全てを葉面積とし, プリンタ複合機でスキャンし個葉面積画像 (図 1-5) を取得した. スキャンソフト (EPSON Scan, EPSON)

を用い, 取得画像はイメージタイプを 8bit グレー, 解像度を 72bit, 保存形式を BITMAP (*bmp) とした. 次に画像編集ソフト JTrim を用いて二値化し (図 1-6), ヒストグラムから葉面積のピクセル数を, 1 ピクセル当たりの面積から個葉面積を算出した. 1 ピクセル当たりの面積は, 単位面積の色紙をスキャンし, そのピクセル数から算出した.



図 1-5 個葉面積画像二値化処理前



図 1-6 個葉面積画像二値化処理後

・枝応力測定

サンプルから切除した枝の根元 5cm を幅 4cm の治具 (図 1-7) で固定し, 3 点曲げ試験を行った. クリープメータを用いて枝に変位量を与え, その間の応力と最大の応力を測定した. 変位量は現場での使用を想定し植物体に影響の少ない範囲かつ, 曲げ剛性を簡易式で算出可能な 1mm とした. また, 1つのサンプルに対し, 縦, 横の 2 方向の計測を行った. 出力される応力-変位グラフ (図 1-8) からグラフの直線部分を取り出し (図 1-9), その近似直線の傾きから曲げ剛性を算出した. 曲げ剛性の測定理論は 1.2.4 で示す. 得られた曲げ剛性と断面二次モーメントを用いて 2 方向の断面二次半径と弾性係数を算出した.

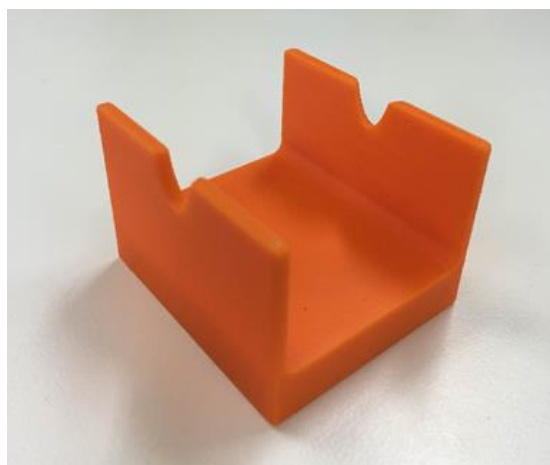


図 1-7 枝の固定に使用した治具

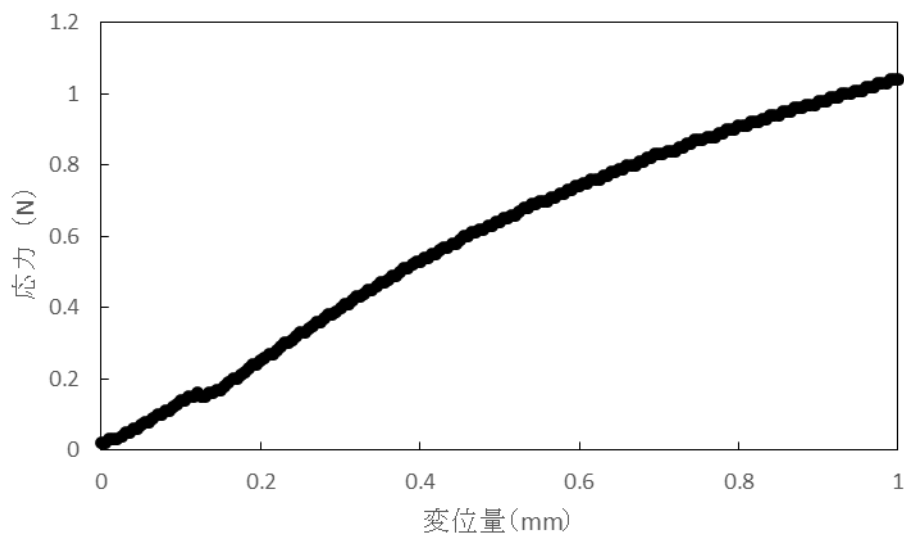


図 1-8 枝の応力-変位グラフ

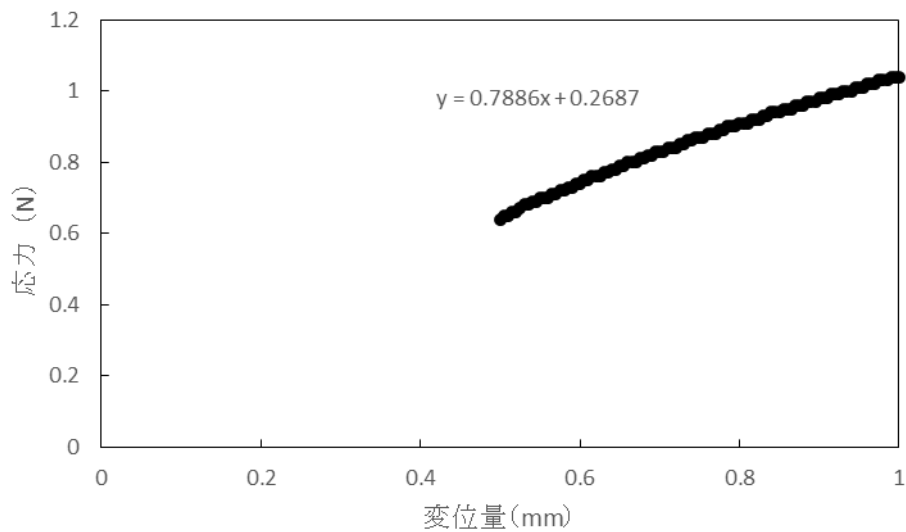


図 1-9 枝の応力-変位グラフの直線部分

1.2.4 曲げ剛性測定理論

曲げ剛性は曲げに対する物体の変形抵抗の大きさを示すものであり，物体の縦弾性係数（ヤング率）と断面二次モーメントの積であらわされる．ここでは真直ばりに曲げモーメントを与えたときに生ずる曲げ応力とのつりあい式から曲げ剛性を説明する．

図 1-10 に示すはりについて考える．

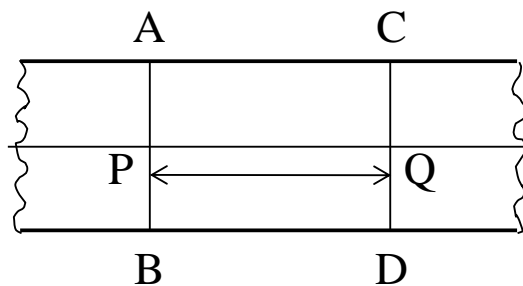


図 1-10 変形前のはり

横断面 AB と CD は曲げモーメントを受けて変形を受けた後も平面を保ち縦繊維に直行すると仮定する．

曲げモーメント M を受け変形したはりを図 1-11 に示す．

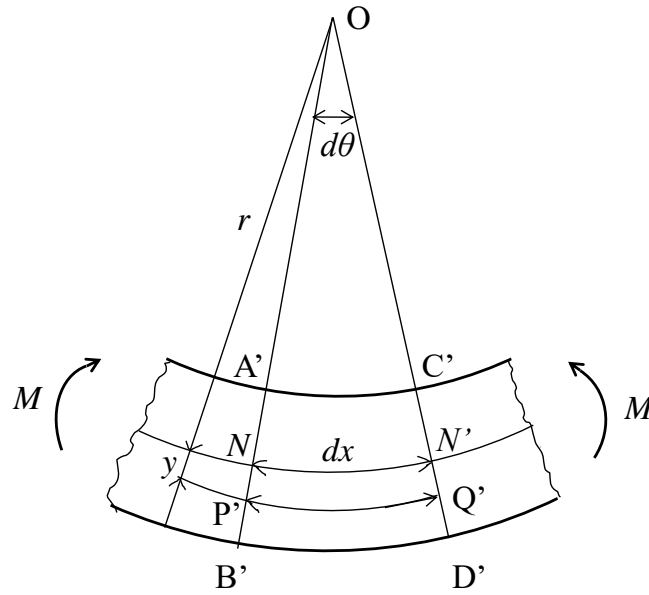


図 1-11 変形後のはり

変形前平行だった AB と CD は $A'B'$, $C'D'$ のように傾き、はりの上側は縮み下側は伸びる．したがってその中間には中心軸 NN' を含み伸び縮みしない中立面が存在する．中立軸と横断面との交線を中立軸という．変形後の横断面 $A'B'$ と $C'D'$ の延長線の交点を O , そこから弧 NN' までの距離を r , また $\angle NON' = d\theta$ とする． r は中心軸弧 NN' の曲率半径である．

変形後のはりのさらに微小部分を切り取ったものを図 1-12 に示す．

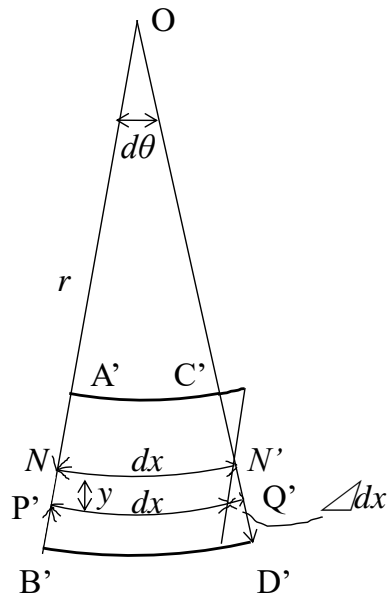


図 1-12 変形後はりの微小部分

ひずみの定義と $d\theta$ を微小としたときの三角形の相似関係から縦方向のひずみ ϵ_x は次式であらわされる．

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{1}{dx} \times \frac{y}{r} dx = \frac{y}{r} \quad (1)$$

つぎに応力について考える．応力はひずみに比例するというフックの法則は次式である．

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

はりを形作る材料がこのフックの法則に従い，かつ引っ張りと圧縮に対するヤング率 E が等しければ垂直応力 σ_x は

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = \frac{Ey}{r} \quad (3)$$

となる．

つぎに図 1-13 に示すはりの断面 N-N' について考える．

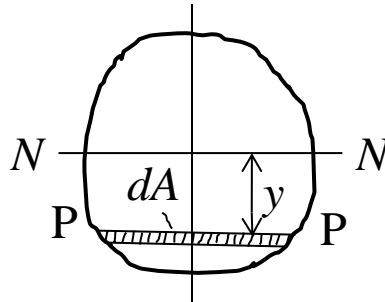


図 1-13 はりの N-N' 断面図

断面 N-N' に曲げモーメント M_x のみが作用するとする． PP に接している微小面積 dA を考えると， dA 上の応力の和はつりあい条件から次式となる．

$$\int_A \sigma_x dA = \int_A \frac{Ey}{r} dA = 0 \quad (4)$$

さらに微小面積 dA 上の応力の中立軸に対するモーメントを考えると， そのモーメントの和は断面 N-N' の図心に作用するモーメント M_x とつり合わなければならない． 距離が y なので式は次のようになる．

$$\int_A y \sigma_x dA = \int_A \frac{Ey^2}{r} dA = \frac{E}{r} \int_A y^2 dA = M_x \quad (5)$$

ここで

$$\int_A y^2 dA = I \quad (6)$$

は図心軸に対する断面の 2 次モーメントである． これを用いて M_x をあらわすと

$$M_x = \frac{EI}{r} \tag{7}$$

となる。ここで EI を曲げ剛性とよぶ。

たわみ理論

つぎに、はり全体について任意点のたわみとたわみ角をあらわすため、たわみ曲線の微分方程式を導いていく。

変形前の両端支持ばりの地点 A から B の方向を X 軸，点 O を通り X 軸に引いた垂線を Y 軸とする。それぞれ右方向と下方向を正とする。荷重を受けて変化したはりの A, B をそれぞれ A', B' とする。 A' における接線と X 軸がなす角を θ とすると A' から B' へのたわみ角の変位 $d\theta$ は図 1-14 のような関係となる。

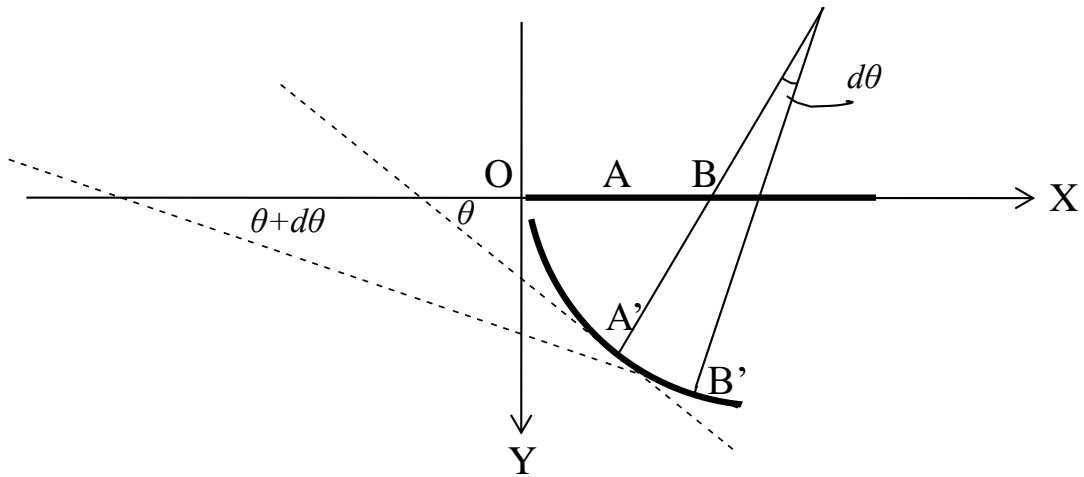


図 1-14 荷重を受けたはりの変化の様子

このとき

$$ds = r d\theta \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{d\theta}{ds} \tag{8}$$

をえる。また $d\theta$ は θ に対して負の変位量であるため図のように θ が正である場合、

$$\frac{1}{r} = -\frac{d\theta}{ds} \tag{9}$$

となり式(7)、式(9)よりつぎのたわみ曲線の式をえる。

$$\frac{M}{EI} = \frac{1}{r} = -\frac{d\theta}{ds} \tag{10}$$

図 1-15 に $d\theta$ を微小としたときの $A'B'$ 部分の拡大図を示す。 $d\theta$ が微小な時たわみ ds は図 1-15 のように直線であらわすことができ、 A' に引いた接線の傾きに近づく。した

がったわみ曲線上の二点間の X 軸方向と Y 軸方向の微小距離 dx , dy とは, θ を含む直角三角形を形成する.

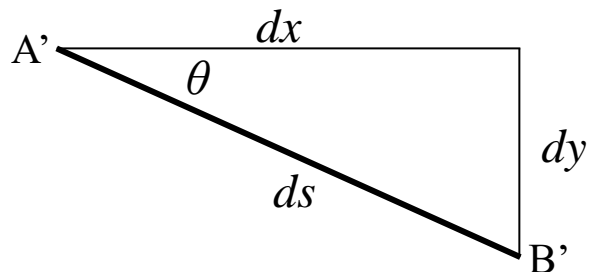


図 1-15 両端支持ばりのたわみ部分拡大図

以上より

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} \Rightarrow \theta = \tan^{-1} \left(\frac{dy}{dx} \right) \quad (11)$$

また式 9 を変形すると,

$$\frac{1}{r} = - \frac{d\theta}{dx} \frac{dx}{ds} \quad (12)$$

式 11, 式 12 より

$$\frac{1}{r} = - \frac{d}{dx} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{dy}{dx} \right) \right\} \frac{dx}{ds} \quad (13)$$

ここで,

$$\frac{d}{dx} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{dy}{dx} \right) \right\} = \frac{1}{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \left(\frac{dy}{dx} \right)' = \frac{1}{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \frac{d^2y}{dx^2} \quad (14)$$

また,

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}} \quad (15)$$

これらを式 13 に代入して曲率半径 r は,

$$\frac{1}{r} = -\frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right\} \frac{d^2y}{dx^2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = -\frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}} \frac{d^2y}{dx^2}} \quad (16)$$

とあらわされる.

同様に式 10 も,

$$\frac{M}{EI} = -\frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}} \frac{d^2y}{dx^2}} \quad (17)$$

である. これはたわみが大きい場合の微分方程式であり, 大たわみ式とよぶ. はりのたわみは一般に微小であるから, そのような場合図 1-13 の dy は微小となり $(dy/dx)^2$ は式 17 において無視することができる. したがって,

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (18)$$

という式を得る.

式 17 は二階の非線形常微分方程式である. 今回は一階の常微分方程式に展開する.

図 1-14 に荷重 P を受けたときの両端支持ばりの力のつりあいを示す. 二つの支点到働く応力をそれぞれ R_A, R_B とする. はりの長さを L , 支点 A から荷重までの距離を a とする. また支点 A を原点としはりの軸を X 軸, 支点 A を通り X 軸に引いた垂線を Y 軸とする.

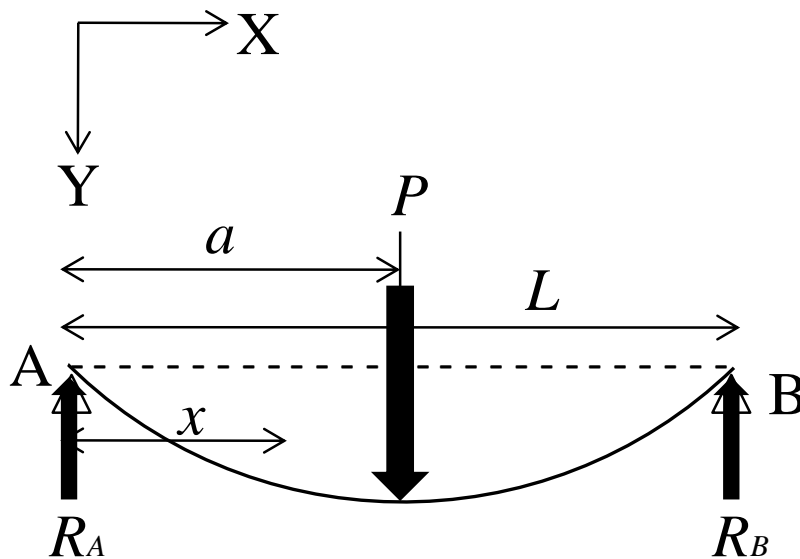


図 1-16 両端支持ばりの力のつりあい

力のつりあいより

$$P = R_A + R_B \quad (19)$$

B 点まわりのモーメントのつりあいより

$$P(L-a) - R_A L = 0 \Rightarrow R_A = \frac{P(L-a)}{L} \quad (20)$$

A から x の距離にある任意断面のモーメント M をもとめる.

$0 \leq x \leq a$ のとき

$$M = R_A x \Rightarrow M = \frac{P(L-a)x}{L} \quad (21)$$

たわみの小さいときの式は式 18, 式 21 より,

$$\frac{1}{EI} \left\{ \frac{P(L-a)x}{L} \right\} = -\frac{d^2 y}{dx^2} \quad (22)$$

となる.

$$\frac{dy}{dx} = X$$

とおいて積分し, さらに本研究では試験の際枝部の中心に荷重を加えるため

$$a = \frac{L}{2}$$

を代入する. よって式 22 は

$$\int \frac{P(L-a)x}{EIL} dx = -\int dX$$

$$X = -\frac{Px^2}{4EI} + C \quad (23)$$

となる. C は積分定数である. C をもとめるために以下の境界条件を用いる.

$$x = \frac{L}{2}$$

のとき

$$X = \frac{dy}{dx} = 0$$

なので,

$$C = \frac{PL^2}{16EI}$$

が得られる。X を元に戻すと式 23 は

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{Px^2}{4EI} + \frac{PL^2}{16EI} \quad (24)$$

となる。これをもう一度積分すると、

$$y = -\frac{P}{12EI}x^3 + \frac{PL^2}{16EI}x + C' \quad (25)$$

という式が得られる。ここで再び積分定数 C' が出てくるが、 $x=0$ のとき $y=0$ という境界条件により $C'=0$ となる。したがって式 25 は

$$x = \frac{L}{2}$$

のとき、

$$y = \frac{PL^3}{48EI} \quad (26)$$

となる。これがたわみ量をもとめる式である。曲げ剛性について解くと式 26 は

$$EI = \frac{PL^3}{48y} \quad (27)$$

となる。本研究の応力測定では枝 40mm に対したわみ 1mm と小さなたわみを与えるため、式 27 を用いて曲げ剛性を決定する。

1.2.5 解析方法

統計解析ソフト SPSS Statistics 21 (IBM) を用いて、サンプルが偏りなく採取できているか、以後の解析が可能であるか調査するため、各計測項目について正規性検定をコルモゴロフ-スミルノフの検定で行った後、枝の機械的パラメータで個葉面積を推定可能か調査するため、これらの相関分析をピアソンの相関係数で行った。また、多重回帰分析を行い、枝の機械的パラメータを用いた個葉面積推定式を決定した。

・ピアソンの相関係数

データが正規分布に従う時のみ用いることができるパラメトリックな相関分析方法である。相関係数は-1.0~+1.0 で計算され、-では負の相関、+では正の相関を示す。±1.0 に近いほど高い相関である。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

r : 相関係数 n : データ数 \bar{x} : x の平均値 \bar{y} : y の平均値

1.3 結果・考察

1.3.1 正規性検定・相関分析

正規性検定の結果を表 1-1 に示す. 有意確率 0.05 以上であれば測定項目が正規分布していることが認められる. 葉面積とほとんどの枝の機械的パラメータに関して正規性が認められた. しかし, 枝横方向の曲げ剛性には正規性が認められなかった. この原因として取得したデータが小さな値に偏っていたことが考えられ, 枝の縦方向に比べ横方向は葉を支持するという目的には寄与しないと考えられた. 正規性が認められなかった横方向のデータは以後の解析からは除外した.

表 1-1 各測定項目の正規性検定結果

		有意確率
長さ		.200*
全体生体重		.062
全体乾物重		.057
個葉面積		.066
断面積		.200*
縦方向	枝径	.200*
	I	.114
	E	.103
	断面二次半径	.200*
	最大応力	.200*
	EI	.200*
横方向	枝径横	.200*
	I横	.079
	E横	.200*
	断面二次半径	.200*
	横最大応力	.052
	横EI	.016

*有意水準の下限

枝横方向のデータは正規性検定の結果より除外し, 枝縦方向の機械的パラメータと個葉面積との相関解析の結果を表 1-2 に示す. 弾性係数以外の枝の機械的パラメータと葉面積間に相関が認められた. 特に, 断面積と断面二次半径, 枝縦径と枝の形状に関するパラメータに高い相関が認められ, 最大で 0.889 の相関係数を得た. この結果から, 葉の展開に伴い枝の断面形状を肥大させることで葉を支持していると考えられる. これは本研究の目的である枝の機械的パラメータを用いた葉面積推定の可能性を示唆する結果である.

表 1-2 個葉面積と枝パラメータの相関分析結果

	断面二次 半径	断面積	枝縦径	最大応力	曲げ剛性	断面二次 モーメント	弾性係数
相関係数	.898**	.899**	.898**	.786**	.821**	.874**	.173

**．相関係数は 1% 水準で有意

1.3.2 多重回帰分析による個葉面積推定式の決定

相関分析の結果から、枝縦方向の機械的パラメータと個葉面積に相関が認められたため、多重回帰分析による個葉面積推定式の決定を行った。変数投入は現場での利用を考慮し、複雑な推定式になることを避けるために、ステップワイズ法と呼ばれる推定式に有用な変数から順に投入する手法で行った。多重回帰の結果を表 1-3、1-4 に示す。それぞれのモデルに投入された変数は、1:断面積 2:断面二次半径 3:断面二次半径と曲げ剛性 4:枝縦径 5:枝縦径と曲げ剛性となっている。表 1-3 から全ての推定式は 0.898 から 0.912 と高い決定係数があり、モデル 3 とモデル 5 が特に高い決定係数を得た。表 1-4 から有意確率は 0.000 となり、これらの推定式による推定値は 1%水準で有意であることが分かった。しかし、モデル 3 とモデル 5 は共に変数同士の共線性の許容度が 0.346 であり、推定式の安定性を担保できない結果となった。そのため、実用を考えるとモデル 1, 2, 4 が推定式として適切である。

表 1-3 多重回帰による個葉面積推定式の要約

モデル	R	R ²	標準誤差	共線性の許容度
1	.899	.809	28.0	
2	.898	.806	28.2	
3	.912	.833	26.6	.346
4	.898	.806	28.2	
5	.912	.833	26.6	.346

表 1-4 各推定式の分散分析結果

モデル		平方和	自由度	平均平方	F	有意確率
1	回帰	119255	1	119255	152	.000
	残差	28228	36	784		
	合計	147483	37			
2	回帰	118944	1	118944	150	.000
	残差	28539	36	793		
	合計	147483	37			
3	回帰	122792	2	61396	87	.000
	残差	24691	35	705		
	合計	147483	37			
4	回帰	118944	1	118944	150	.000
	残差	28539	36	793		
	合計	147483	37			
5	回帰	122792	2	61396	87	.000
	残差	24691	35	705		
	合計	147483	37			

多重回帰から得られた係数によるモデル 1,2,4 の葉面積推定式は以下となった。

モデル 1 $LA=24.596 \times \text{断面積} - 25.237$

モデル 2 $LA=117.881 \times \text{枝縦径} - 246.657$

モデル 4 $LA=471.525 \times \text{断面二次半径} - 246.657$

モデル 1 の切片の影響が最も小さく変数の値を受けやすいことが分かり、断面積の正確な測定が必要であることが分かった。一方、モデル 2, 4 は断面二次半径、枝縦径それぞれが小さな値となるトマトの生長初期段階では正確な推定値を得られないことも考えられる。そのため、生長段階に応じた推定式の使い分けも検討していく必要がある。

1.3.3 個葉面積推定値と実測値の比較

次に各推定式での葉面積推定値と実測値の比較を図 1-17,1-18,1-19 に示す。

実測値として用いたデータは推定式の決定に用いたものと同様であるため、クロスバリデーションは行えていない。

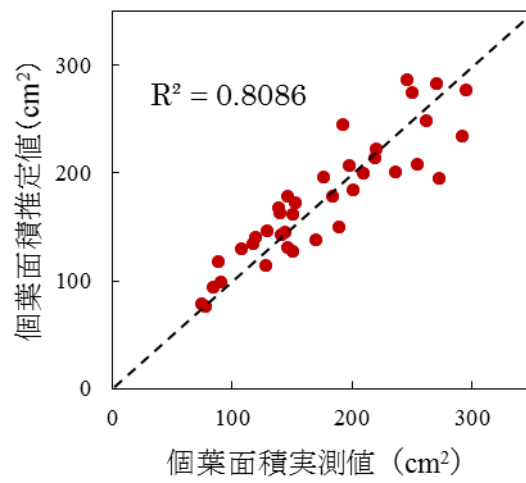


図 1-17 モデル 1 の個葉面積推定値と実測値比較

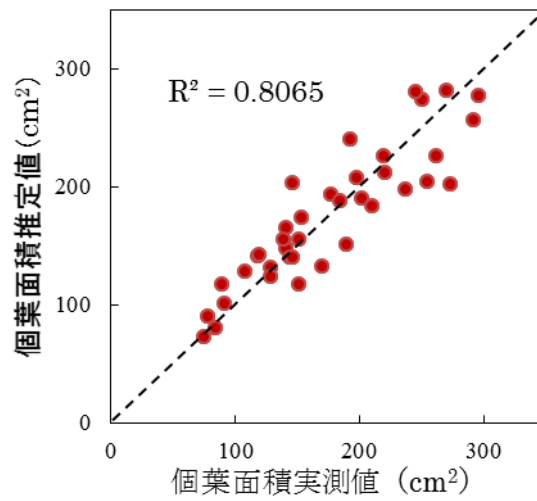


図 1-18 モデル 2 の個葉面積推定値と実測値比較

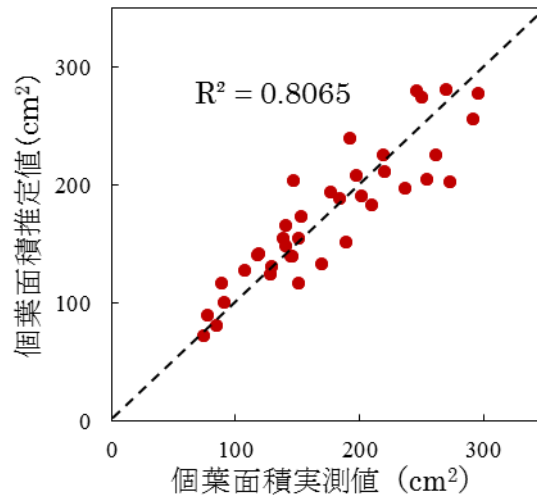


図 1-19 モデル 4 の個葉面積推定値と実測値比較

各モデルは実測値と近い値を得ることができ、個葉面積推定が可能であることが分かった。これらの結果は個葉面積の小さな値で $R=1$ に近い値を示していたが、葉面積が大きくなるとバラつきが大きくなっている。そのため、多重回帰の結果で述べたように生長段階に応じて推定式を使い分ける、または LAI 推定に最適な生長段階の葉の段位を特定していく必要がある。

第 2 章 枝の機械的パラメータと葉面積の関係

2.1 概要

第一章では大玉トマトを用いて枝パラメータと葉面積との関係を明らかにした。この章ではミニトマトを用いて 1 章と同様の実験を行い、品種による違いを明らかにする。

また、個葉面積と全葉面積、各枝の機械的パラメータと全葉面積との関係を明らかにするため、全葉面積と各葉位の枝パラメータ・個葉面積について解析を行った。

2.2 材料と方法

2.2.1 材料

実験には三重大学附帯施設農場で栽培したミニトマト“サンチェリーピュア”を用いた。サンプリングは 2017 年 12 月 5 日から 21 日の間で行った。本実験では 1 章の結果を踏まえ、葉の生長段階による葉面積推定への影響を調査するため、トマト株の上から 14 葉を供試し、全 8 株、測定した。本実験では供試した最も上の葉から順に、第 1 葉から第 14 葉と呼ぶ。サンプルは第 16 葉付近で切断し、切り口を水につけて圃場から実験室へ運んで測定した。また、第 1 葉の上に 2 葉存在するが、葉が非常に小さいため実験からは除外した。

2.2.2 実験・解析方法

実験器具と実験方法は第 1 章と同様である。正規性検定についても同様である。

・相関分析

1 章の内容に加え、正規性検定で棄却された項目もスピアマンのノンパラメトリック検定を行った。

・全葉面積と各葉位の個葉面積・枝パラメータの相関

個葉面積・枝パラメータを用いた全葉面積・LAI の推定の可能性を調査するため、全葉面積と各葉位の個葉面積・枝パラメータの相関分析を行った。葉位のサンプル数は各 8 であるためスピアマンのノンパラメトリック検定を行った。

2.3 結果・考察

2.3.1 正規性検定・相関分析

正規性検定の結果を表 2-1 に示す。有意確率 0.05 以上であれば測定項目が正規分布していることが認められる。葉面積とほとんどの枝の機械的パラメータに関して正規性が認められた。しかし、生体重、乾物重、枝縦方向の断面二次モーメントと枝横方向の最大応力には正規性が認められなかった。

表 2-1 正規性検定結果

		有意確率
長さ		.200*
全体生体重		.010
全体乾物重		.000
個葉面積		.051
断面積		.200*
縦方向	枝径	.200*
	I	.026
	E	.200*
	断面二次半径	.200*
	最大応力	.200*
	EI	.200*
	横方向	
枝径	.077	
I	.200*	
E	.200*	
断面二次半径	.077	
最大応力	.012	
EI	.200*	

*有意水準の下限

正規性が認められた項目と個葉面積との相関解析の結果を表 2-2 に、正規性が認められなかった項目と個葉面積との結果を表 2-3 に示す。全てのパラメータと個葉面積間に相関が認められた。高い相関を得たものは個葉長さ、生体重、縦方向最大応力・EI、横方向最大応力・EI であり、相関係数の最大は個葉長さの 0.86 であった。第 1 章の大玉トマトを用いた結果と比較すると枝の機械的パラメータと個葉面積との相関は低くなった。この原因として 1 章で測定した個葉面積の平均は 175.3cm² であり、今回測定した個葉面積の平均は 372.8 cm² と生長段階が大きく異なっていることが考えられる。また、1.3.4 で述べたように個葉面積が大きくなると枝パラメータとの相関が悪くなる傾向が見られたため、次に個葉の生長段階を統一した場合の相関について調査した。

表 2-2 個葉面積と各項目のパラメトリック検定結果

個葉長さ	断面積	縦方向					横方向					
		枝径	断面二次半径	E	最大応力	EI	枝径	断面二次半径	E	I	EI	
相関係数	.860**	.572**	.544**	.544**	.474**	.721**	.715**	.588**	.588**	.491**	.554**	.744**

**相関係数は 1% 水準で有意

表 2-3 個葉面積と各項目のノンパラメトリック検定結果

	全体生体重	全体乾物重	縦方向I	横方向最大応力
相関係数	.780**	.574**	.547**	.704**

**相関係数は 1% 水準で有意

2.3.2 生長段階ごとの解析

2.3.1 の結果より、1 章で供試した大玉トマトの個葉面積の平均値以下の個葉と平均値以上の個葉を用いて再び正規性検定・相関解析を行った。解析には第 1 葉から第 5 葉までの個葉 (a 群) と第 6 葉から第 14 葉までの個葉 (b 群) の 2 群を用いた。表 2-4 に a 群の結果、表 2-5 に b 群の正規性検定結果を示す。a 群は個葉長さ・生体重・乾物重を除いた項目に正規性が認められた。b 群は乾物重を除いた項目に正規性が認められた。次に正規性が認められた項目について相関解析を行った。

表 2-4 a 群各測定項目の正規性検定結果

		有意確率
	長さ	.042
	全体生体重	.048
	全体乾物重	.000
	個葉面積	.200*
	断面積	.200*
縦方向	枝径	.200*
	I	.135
	E	.200*
	断面二次半径	.200*
	最大応力	.200*
	EI	.200*
	枝径	.200*
横方向	I	.200*
	E	.200*
	断面二次半径	.200*
	最大応力	.200
	EI	.198*

*有意水準の下限

表 2-5 b 群各測定項目の正規性検定結果

		有意確率
長さ		.200*
全体生体重		.101
全体乾物重		.000
個葉面積		.200*
断面積		.200*
縦方向	枝径	.200*
	I	.200*
	E	.200*
	断面二次半径	.200*
	最大応力	.200*
	EI	.163*
横方向	枝径	.200*
	I	.200*
	E	.200*
	断面二次半径	.200*
	最大応力	.110
	EI	.200*

*有意水準の下限

a 群の相関解析の結果を表 2-6 に b 群の結果を表 2-7 に示す. a 群は個葉面積と枝パラメータの相関係数が高く, 最も高かったものが枝縦方向の EI で 0.895 であった. b 群は a 群と比較して相関係数が低く, 最も高いもので個葉長さの 0.666, 枝パラメータでは横方向の枝径・断面二次半径で 0.515 であった. この結果から, 生長初期から中期にあたる個葉は枝パラメータを用いて個葉面積推定が可能であるが, 生長後期では個葉面積の推定が困難になることが分かった. また, 大玉トマトでは断面積が最も大きな相関を得たが, ミニトマトでは曲げ剛性 (EI) が最大となっており, 品種によって個葉面積の推定の指標が異なることが明らかになった.

表 2-6 a 群の個葉面積と各項目の相関解析結果

個葉長さ	断面積	縦方向						横方向						
		枝径	断面二次半径	E	I	最大応力	EI	枝径	断面二次半径	E	I	最大応力	EI	
相関係数	.819**	.834**	.800**	.800**	.662**	.795**	.891**	.895**	.828**	.828**	.651**	.823**	.852**	.878**

**相関係数は 1% 水準で有意

表 2-7 b 群の個葉面積と各項目の相関解析結果

個葉長さ	断面積	縦方向						横方向						
		枝径	断面二次半径	E	I	最大応力	EI	枝径	断面二次半径	E	I	最大応力	EI	
相関係数	.666**	.503**	.465**	.465**	-0.321	.497**	.265*	.304*	.515**	.515**	-0.307	.511**	.361*	.376**

**相関係数は 1% 水準で有意

2.3.3 生長による葉の密度の変化

生長によって枝パラメータと個葉面積の相関が悪くなる原因を、葉の展開がピークを迎え、生長が葉の厚さに移行していることであると考へ、葉の密度の変化の検討を行った。以下に葉位別の個葉面積平均値と葉位別個葉面積あたりの乾物重平均値を示す。

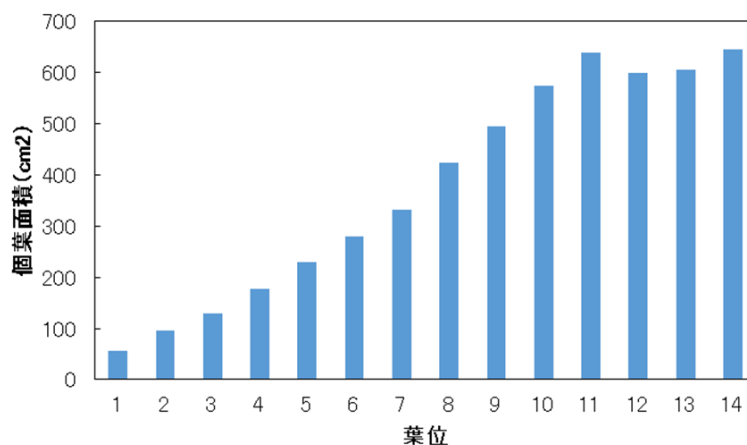


図 2-1 葉位別の個葉面積平均値

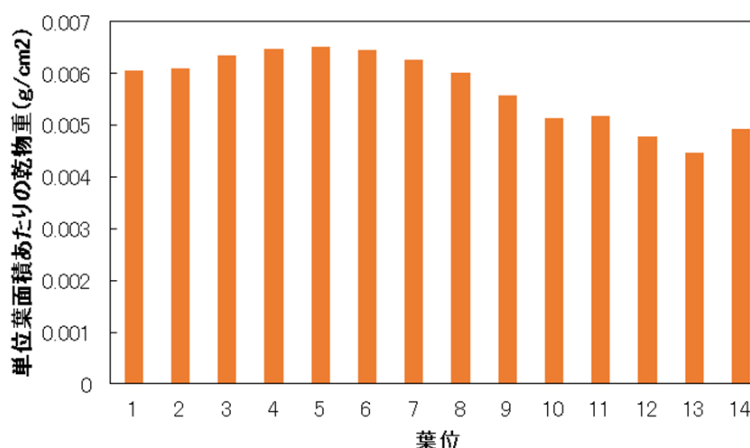


図 2-2 葉位別個葉面積あたりの乾物重平均値

個葉面積は生長に伴い増加し、第 11 葉でピークになることが分かった。密度は第 5 葉でピーク、以降は生長に伴い低下する傾向が見られた。これは予想に反した結果ではあったが、光を多く受け、生長が必要である上層の葉の細胞密度が高くなっているとも考えられる。また、葉の密度変化は、枝パラメータと個葉面積の相関を低下させる一因であると推察される。

2.3.4 多重回帰分析による個葉面積推定式の決定

多重回帰分析による個葉面積推定式の決定を行った。手法は 1 章と同様である。a 群を 4 株ずつに分け、a1、a2 としそれぞれのデータを用いた。a1 の多重回帰の結果を以下に示す。それぞれのモデルに投入された変数は、1:枝縦方向の曲げ剛性 2:枝縦方向の

曲げ剛性と個葉長さとなっている。

表 2-8 a1-多重回帰による個葉面積推定式の要約

モデル	R	R ²	標準誤差	共線性の許容度
1	.828	.686	40.1	
2	.873	.763	36.0	.749

表 2-9 a1-各推定式の分散分析結果

モデル		平方和	自由度	平均平方	F	有意確率
1	回帰	56201	1	56201	35	.000
	残差	25681	16	1605		
	合計	81882	17			
2	回帰	62449	2	31224	24	.000
	残差	19433	15	1296		
	合計	81882	17			

多重回帰から得られた係数による a1 の各モデルの葉面積推定式は以下となった。

モデル 1 LA=0.028*縦方向曲げ剛性+70.745

モデル 2 LA=0.023*縦方向曲げ剛性+3.537*個葉長さ+1.614

モデル 1 は 0.686, モデル 2 は 0.763 とどちらも中程度の決定係数を得た。分散分析の結果から有意確率は 0.000 と有意な値を示しているが、標準誤差が 40.1 と 36.0 であることから第 1 葉など小さな個葉では推定値が実測値と大きくずれる可能性がある。個葉長さを測定することで決定係数の向上が可能ではあるが、現場での使用を考慮すると個葉長さを測定する手間は無視できないものであるため、状況に応じて使用するモデル式を変える必要があると考えられる。

次に a2 の多重回帰の結果を以下に示す。モデルに投入された変数は、1:枝縦方向の最大応力 2:枝縦方向の最大応力と個葉長さであった。

表 2-10 a2-多重回帰による個葉面積推定式の要約

モデル	R	R ²	標準誤差	共線性の許容度
3	.941	.885	24.7	
4	.966	.933	19.4	.196

表 2-11 a2-各推定式の分散分析結果

モデル		平方和	自由度	平均平方	F	有意確率
3	回帰	79855	1	79855	131	.000
	残差	10374	17	610		
	合計	90229	18			
4	回帰	84180	2	42090	111	.000
	残差	6049	16	378		
	合計	90229	18			

多重回帰から得られた係数による a2 の各モデルの葉面積推定式は以下となった。

モデル 3 LA=47.351*縦方向最大応力+45.32

モデル 4 LA=25.042*縦方向最大応力+5.724*個葉長さ-46.945

共線性の許容度が 0.196 と変数間の相関がみられるためモデル 4 は推定式として採用しない。モデル 3 は 0.885 高い決定係数であり、有意確率は 0.000 と有意な値を示していることから、a1 のモデル 1.2 より精度の高い推定式が得られた。しかし、a1 と a2 は共に同じ葉位の個葉を用いているため、同じ変数を投入した推定式を得られると考えていたため、予想に反した結果となった。この原因として考えられるのはサンプル数の不足または、トマト株の仕立て方法による個葉と枝の関係の変化などが考えられるため今後調査する必要があると分かった。

2.3.5 個葉面積推定値と実測値の比較

次に 2.3.3 で得た各推定式をもちいて葉面積推定値と実測値の比較をおこなった。a1 のデータを用いて得たモデル 1, 2 は a2 の実測値と比較を行い、a2 のデータを用いて得たモデル 3 は a1 の実測値と比較した。結果を図 2-1,2-2,2-3 に示す。

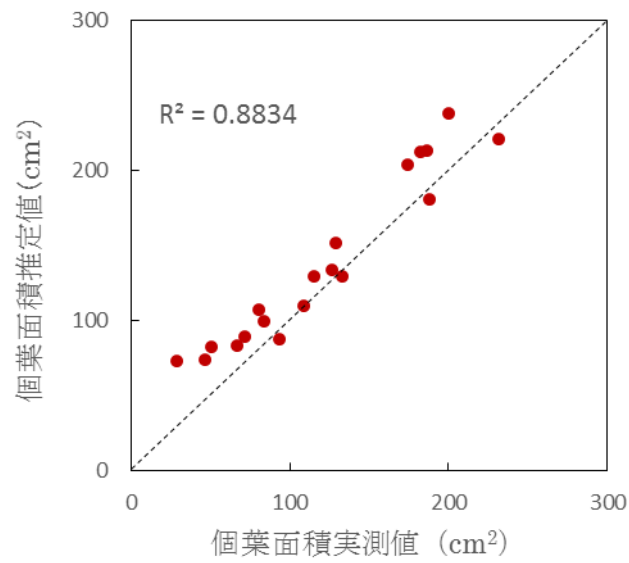


図 2-3 モデル 1 の個葉面積推定値と a2 実測値比較

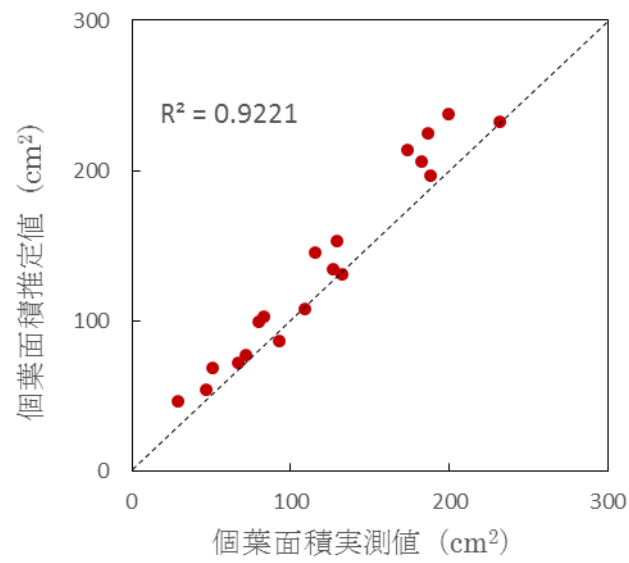


図 2-4 モデル 2 の個葉面積推定値と a2 実測値比較

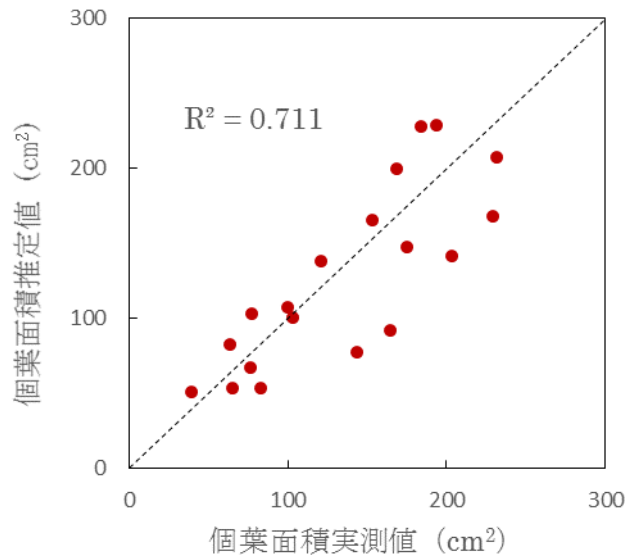


図 2-5 モデル 3 の個葉面積推定値と a1 実測値比較

モデル 1. 2 の推定値と a2 実測値の比較では高い精度での推定が可能であると分かった。個葉面積推定が可能であることが分かった。モデル 3 の推定値と a1 の比較では相関は見られたものの、実測値と大きな差がありことが分かった。この結果と 2.3.3 の結果から、a2 の個葉は a1 に比べると葉位は同じにも関わらず、個葉面積と枝パラメータの相関が高い個体であったと考えられる。しかし、a1 と a2 間の栽培方法に差はないことから、a2 の個葉面積と枝パラメータの相関が高くなった要因を調査していく必要がある。

2.3.5 全葉面積と各葉位の個葉面積・枝パラメータの相関

各葉位の機械的パラメータ・個葉面積と全葉面積との相関の結果は以下となった。

表 2-12 全葉面積と各葉位のパラメータとの相関解析結果

	1葉目	2葉目	3葉目	4葉目	5葉目	6葉目	7葉目	8葉目	9葉目	10葉目	11葉目	12葉目	13葉目	14葉目
個葉面積	.762*	.857**	.976**	.810*	.595	.429	.571	.357	.952**	.690	.714*	.690	.857*	.036
断面積	.738*	.357	.862**	.429	.095	.405	.190	.357	.524	.452	.143	.119	.314	-.036
枝径	.762*	.214	.857**	.643	-.095	.333	.452	.335	.476	.571	-.095	.048	.200	-.143
E	.762*	.214	.905**	.429	.095	.452	.238	.429	.476	.452	.071	.048	.200	-.036
I	-.214	.429	.214	.286	.095	-.048	-.643	-.214	-.476	-.548	-.238	-.286	-.829*	-.464
断面二次半径	.762*	.214	.857**	.643	-.095	.333	.452	.335	.476	.571	-.095	.048	.200	-.143
最大応力	.405	.595	.571	.719*	.190	.476	.238	.119	.119	-.071	-.333	.119	-.200	-.429
EI	.405	.524	.643	.643	.238	.167	.190	.119	.167	-.071	-.286	-.095	-.200	-.571
枝径	.619	.714*	.905**	.310	.180	.429	.071	.357	.524	.395	.347	.180	.314	-.036
E	.595	.571	.881**	.310	.024	.429	.071	.357	.524	.452	.214	.119	.314	-.036
I	-.200	.238	-.405	.405	.095	-.310	-.571	-.810*	-.452	-.786*	-.405	-.214	-.771	-.393
断面二次半径	.619	.714*	.905**	.310	.180	.429	.071	.357	.524	.395	.347	.180	.314	-.036
最大応力	.200	.762*	.571	.548	-.095	.310	-.238	.119	.214	-.143	-.357	.286	.029	-.750
EI	.200	.762*	.524	.548	.381	.262	-.143	.167	.119	-.310	-.286	-.214	-.200	-.750

全葉面積と最も相関の高い項目は第3葉の個葉面積であり、0.976と非常に高い相関係数を得た。また第3葉は断面積、枝縦方向の枝径・E・断面二次半径・EI、枝横方向の枝径・E・断面二次半径において相関係数が最大となっている。このことから第3葉の枝パラメータもしくは個葉面積を用いることで全葉面積・LAIの推定が可能であると分かった。次に他の葉位の相関係数を見てみると、第1葉から第4葉までは全葉面積と各項目間に相関が多く見られるが、第5葉以降では極端に相関が少なくなっていることが分かる。また、個葉面積が高い相関を得た第9葉・第11葉・第13葉においても、枝パラメータはほとんどの項目で相関を得られなかった。この結果から、個葉は生長初期で全葉面積との相関の最大を示した後、中程度の相関を推移することが分かり、1.3.2の結果も踏まえると生長後期の個葉の枝パラメータを用いた個葉面積・全葉面積の推定はできないことが分かった。これらよりミニトマトの全葉面積推定には、個葉面積と枝パラメータ間に高い相関があり、かつ全葉面積と個葉面積間に高い相関を示す第3葉が適している。

第3章 結言

本論文は、葉面積の増大に対する枝の支持機能増大を仮説とし、トマト栽培における簡易葉面積推定法開発を目的に、トマトの枝の機械的パラメータと個葉面積の関係を明らかにした。実験には第一章で大玉トマト“桃太郎ピース”を用い、第二章ではミニトマトを用いた。

第1章では枝の力学的パラメータと葉面積の関係を明らかにするために、大玉トマトの枝パラメータと葉面積との関係を統計的に評価した。実験により葉面積の増加による葉重の増加が枝パラメータ増加の要因となっていることが推測され、大玉トマトにおいては枝の断面積が葉面積推定の指標となる有効性を示した。葉面積推定値と実測値の比較では、個葉面積が大きくなるとばらつきが大きくなる傾向が見られ、生長段階による指標の変化、または推定が困難になる可能性が示唆された。

第2章ではミニトマトを用いて1章と同様の実験を行い、品種による差異を検証した。トマト株の上部14葉の葉面積、枝パラメータを計測し、実験項目は個葉面積と全計測項目の相関分析、1章の個葉面積の平均値に近い個葉群とそれより大きな個葉群に分けた場合の相関分析、個葉面積推定式を用いたクロスバリデーション、全葉面積と葉位ごとの個葉面積、全葉面積と葉位ごとの枝パラメータの相関分析である。実験より、個葉面積が大きな群では枝の力学的パラメータと個葉面積の相関は低く、葉の生長と共に枝パラメータを用いた個葉面積推定は困難になることが明らかになった。個葉面積と全枝パラメータとの相関分析の結果からは、個葉と枝パラメータの関係は品種によって異なる結果となったが、クロスバリデーションの結果からは品種ではなく、他の要因によって個葉と枝パラメータの関係が変化していると推察された。全葉面積の推定に関しては、第3葉の個葉面積が最も高い相関を得たこと、第3葉は枝パラメータと個葉面積の相関が高いことから、第3葉の枝パラメータを用いて個葉面積推定を行い、その個葉面積推定値から全葉面積推定が可能であることが示唆された。

第4章 今後の展望

本論文では個葉面積と枝パラメータの関係を明らかにすることを目的に実験を行ったが、サンプルによって最も相関の高い枝パラメータが異なり、安定した個葉面積推定式の決定が出来なかった。そのため、今後はトマト株の栽培条件間での差異を調査し、枝パラメータと個葉面積の関係を変化させる要因の特定を行っていく必要がある。

謝辞

本論文製作にあたり三重大学院生物資源学研究科共生環境学専攻 福島崇志准教授に謹んで感謝の意を申し上げます。福島先生には研究だけでなく、日々の生活、思想について多大なる御教授をしていただきました。本当にありがとうございます。また、有意義な御指導と御校閲を賜りました三重大学院生物資源学研究科 佐藤邦夫教授に心より御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、附設農場において供試作物であるトマトの栽培を行ってくださった生物資源学研究科生物圏生命科学専攻 長菅輝義准教授に謝意を表します。

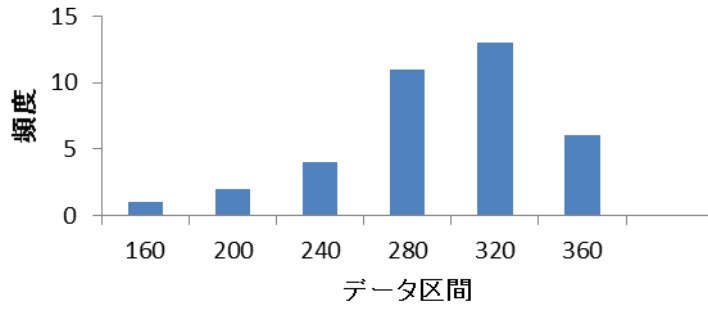
参考文献

- 宍戸良洋(1991)：『トマトにおける葉の光合成，転流・分配の経時的変化と果実肥大に対する葉位別寄与度』．園学雑，59(4)，771－779
- 斉藤岳士(2006)：『塩ストレス，栽植密度ならびに果房直下の側枝が NFT 栽培トマトの収量および糖度に及ぼす影響』．園学研，5(4)，415-419
- 細井徳夫(2001)：『養液耕による施設栽培長段トマト個体群の収量に最適な葉面積指数に関する研究』．野菜・茶葉試験場研究報告，16，329-349
- 加藤良明：『キャベツセル成型苗の力学的特性の把握—品種・セルトレイの違いによる生長の差異とセル成型苗生長モデルの提案』．平成 20 年度卒業論文
- 宮川敏男（1986）：『だいず葉面積の簡易測定法』．農業技術，41（8），359－361.
- 池田英男（2009）：『高生産性オランダトマト栽培の発展に見る環境・栽培技術』
- 津川兵衛，佳山良正（1981）：『クズの乾物生産ならびに葉面積の拡大に関する研究』．日草誌，27（3），272－276.

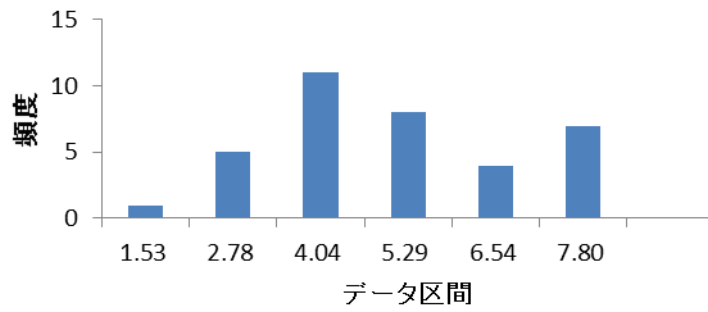
付録

・第1章の測定データの各ヒストグラム

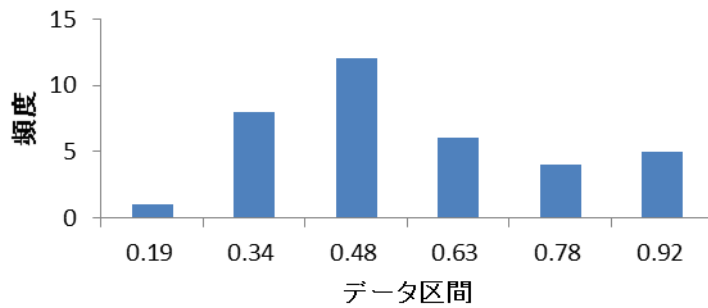
個葉長さ



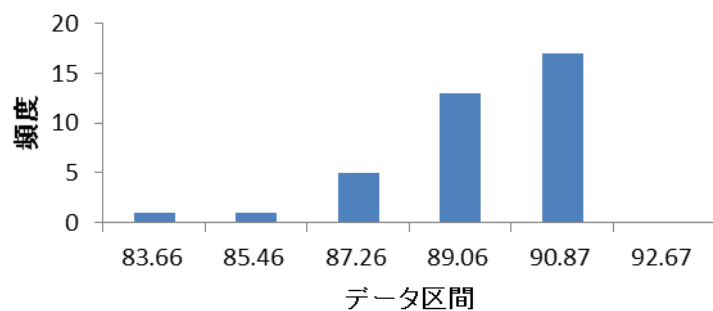
生体重



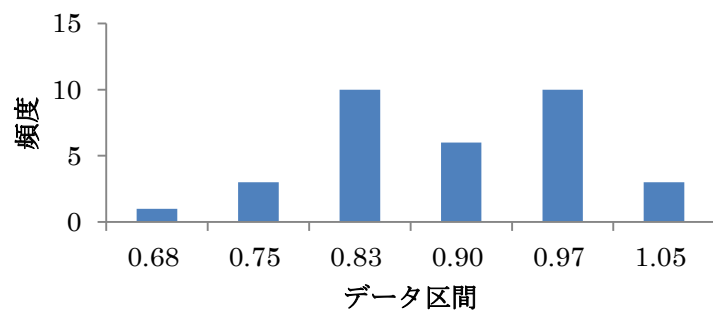
乾物重



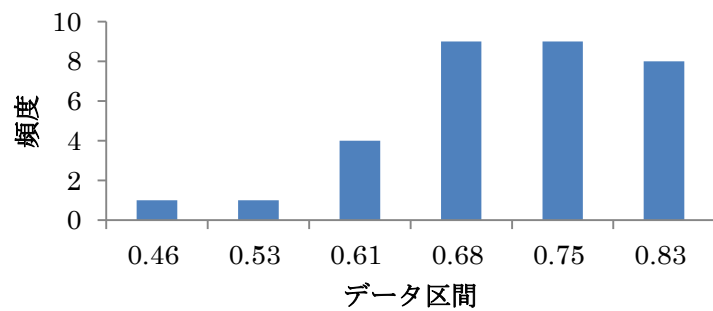
含水率



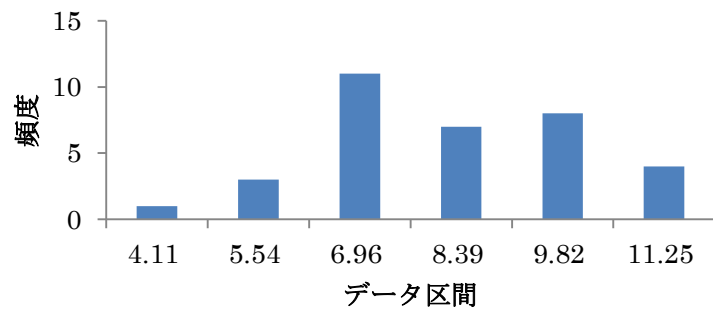
縦方向断面二次半径



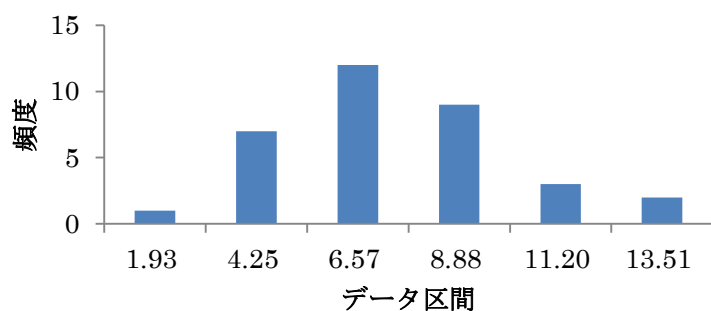
横方向断面二次半径



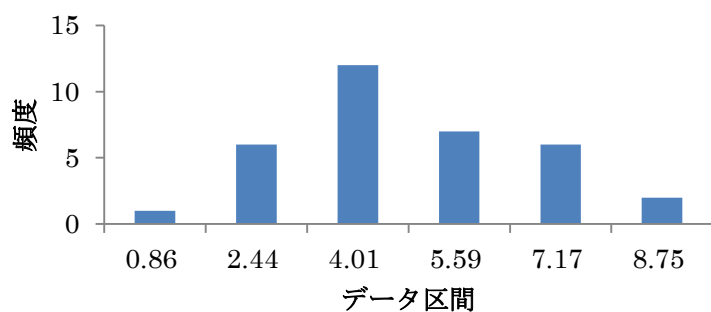
断面積



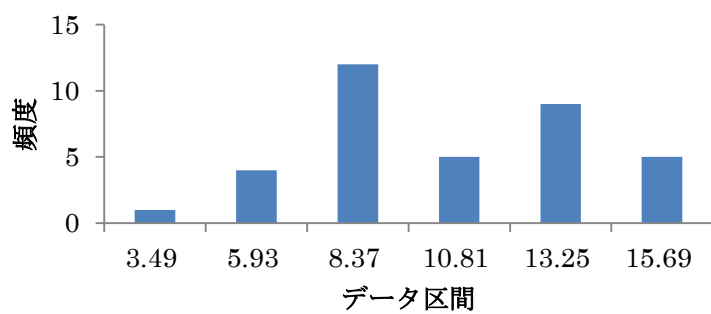
縦方向 I



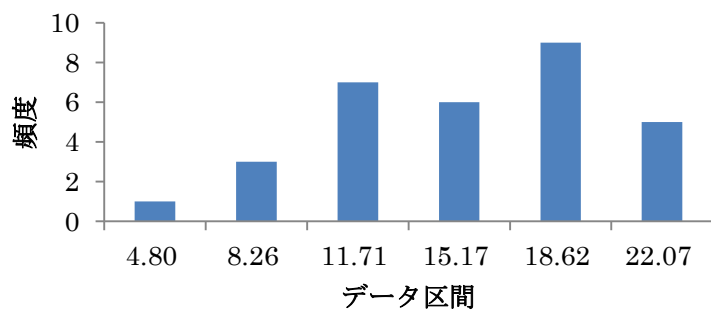
横方向 I



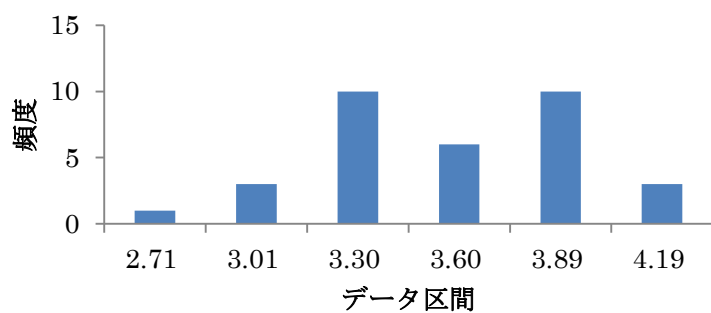
縦方向 E



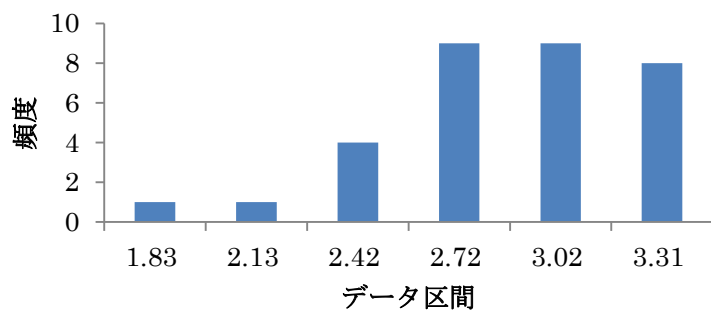
横方向 E



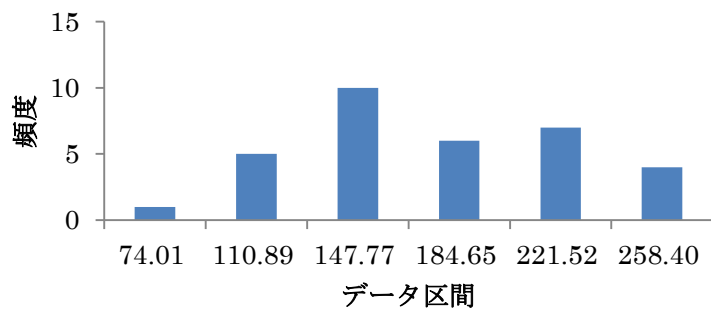
枝縦径



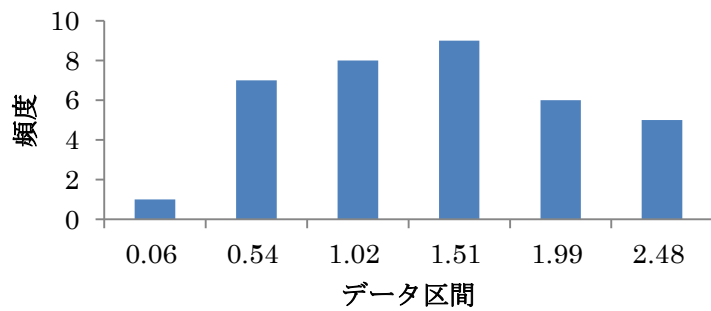
枝横径



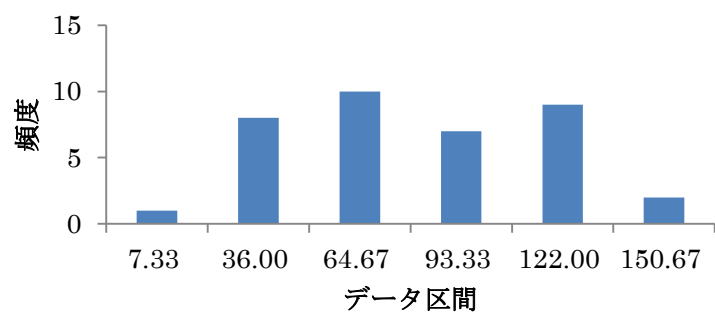
葉面積



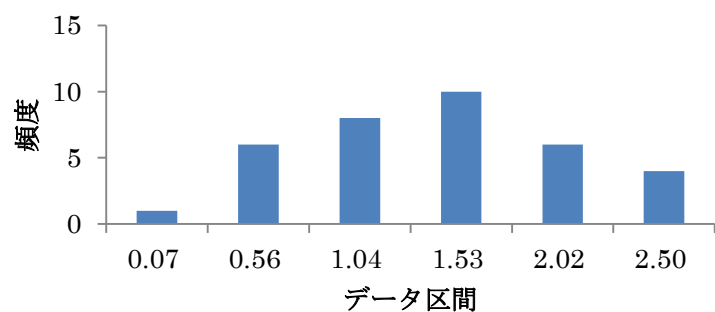
縦方向最大応力



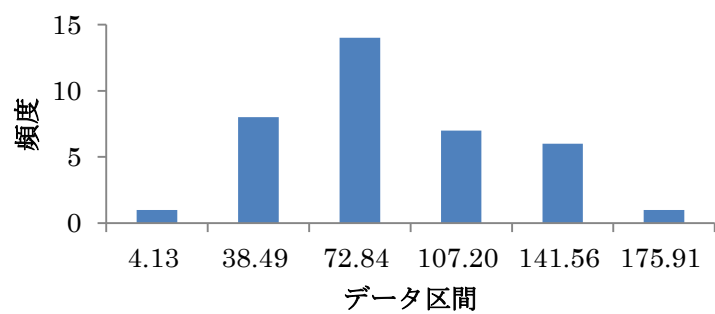
縦方向 EI



横方向最大応力

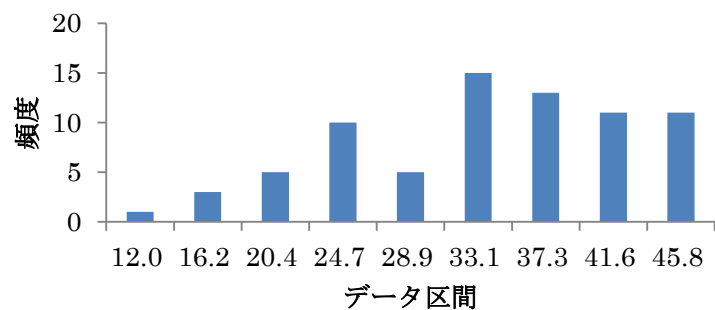


横方向 EI

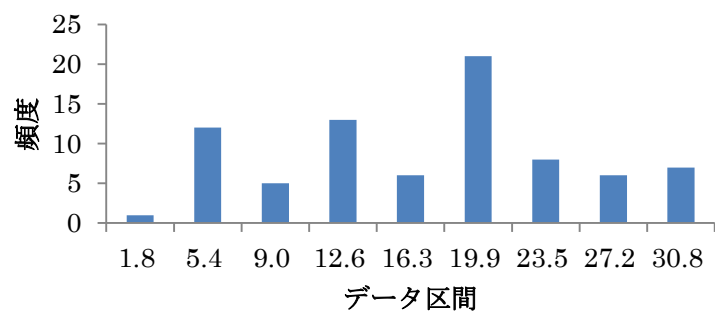


・第2章の各測定データのヒストグラム

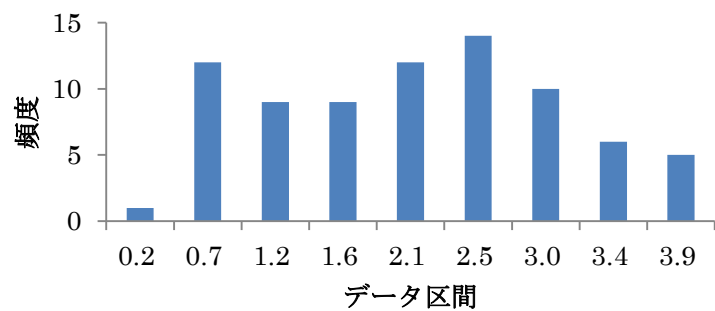
個葉長さ



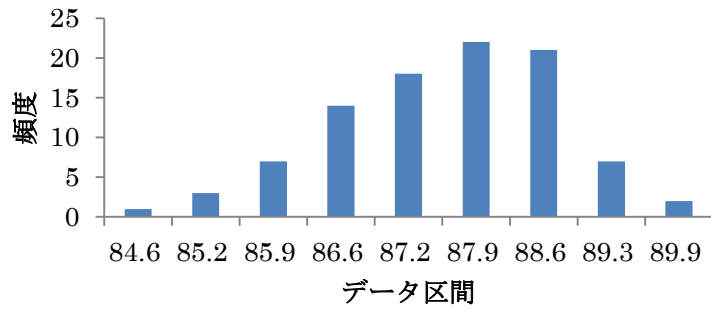
生体重



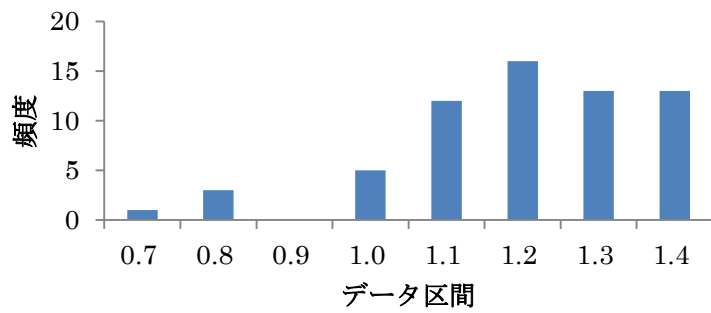
乾燥重



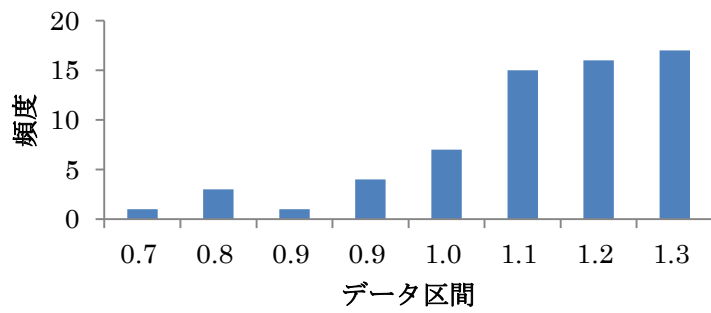
含水率



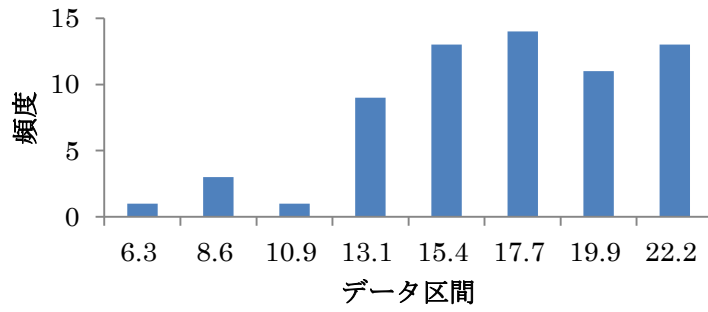
縦方向断面二次半径



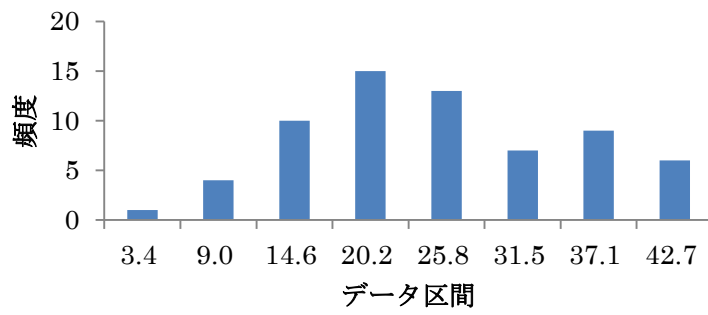
横方向断面二次半径



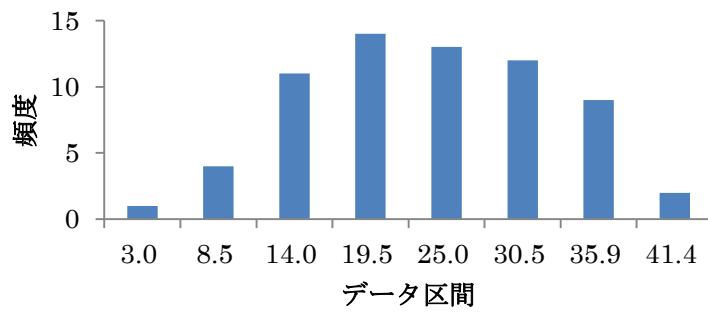
断面積



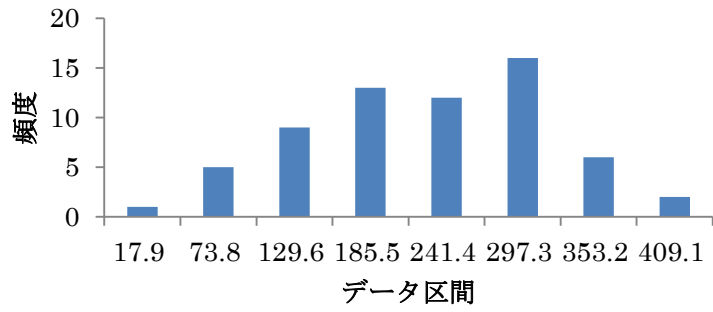
縦方向 I



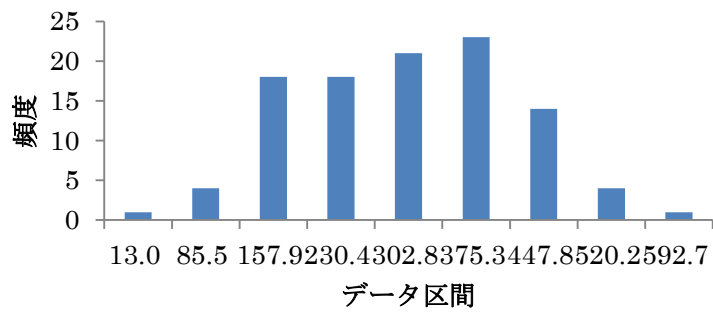
横方向 I



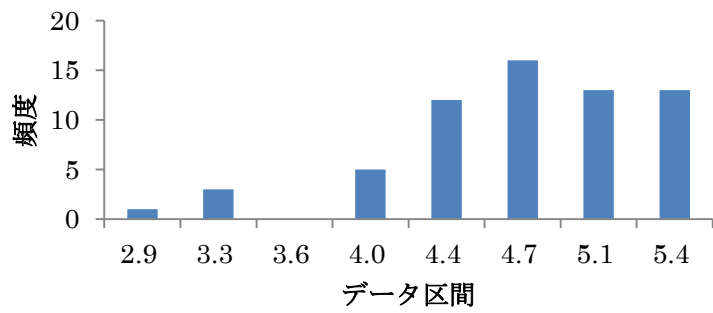
縦方向 E



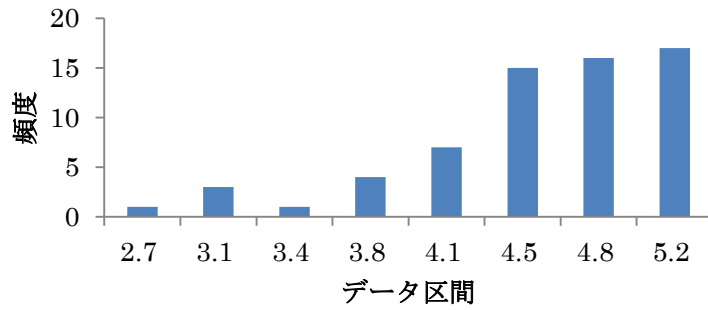
横方向 E



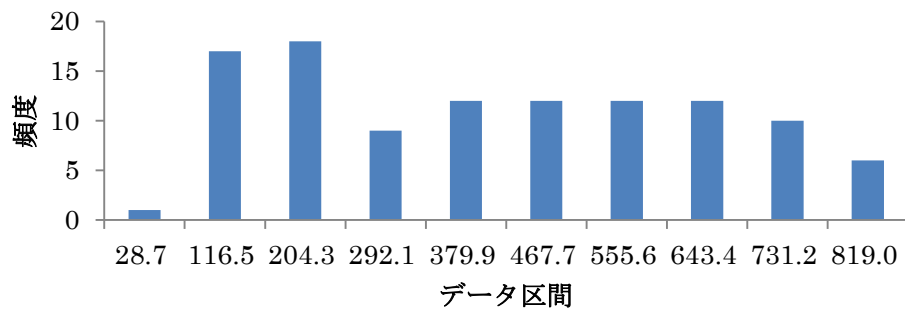
枝縦径



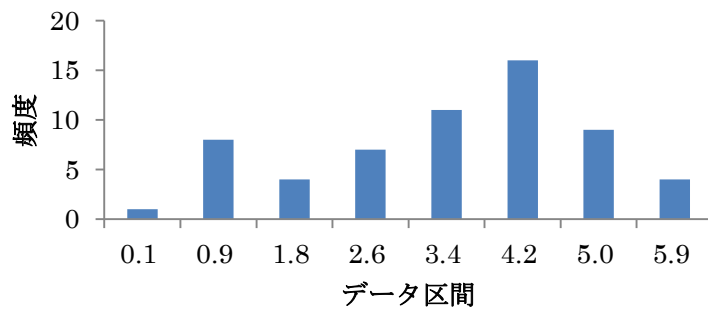
枝横径



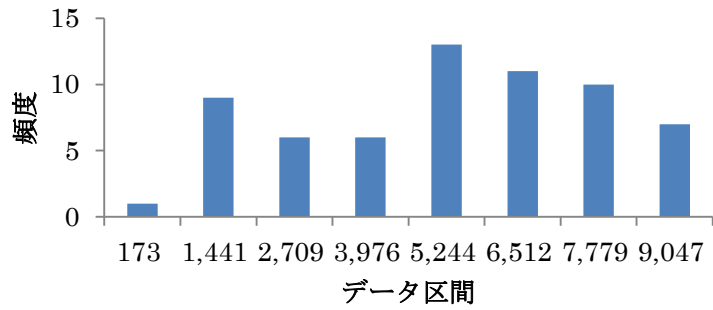
葉面積



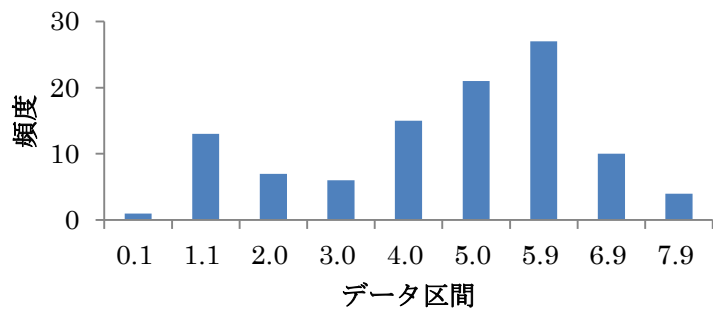
縦方向最大応力



縦方向 EI



横方向最大応力



横方向曲げ剛性

