

## 連載ミニレビュー

### 作物の形態研究法：マクロからミクロまで 仮想植物の作成

#### 1. 構造間の連結および位置情報の記述方法と3次元デジタイザによる形状計測

渡邊朋也

(中央農業総合研究センター)

作物形態の3次元構造と個々の器官の機能・生長をコンピュータ上に再現する Functional-structural plant models (FSPMs) の研究が盛んになってきつつある (Godin and Sinoquet 2005). われわれは3次元デジタイザを用いて複数のイネ個体の葉の生長, 角度の経時的変化を測定し, その結果にもとづいてコンピュータグラフィックス技術を利用した3次元形態生長モデル「仮想稲 virtual rice」を作成した (Watanabe ら 2005). ここでは仮想植物作成のためのトポロジカルな情報の取り扱いならびに3次元デジタイザによる形態計測例について紹介する.

#### 1. Plant mapping と Structure coding

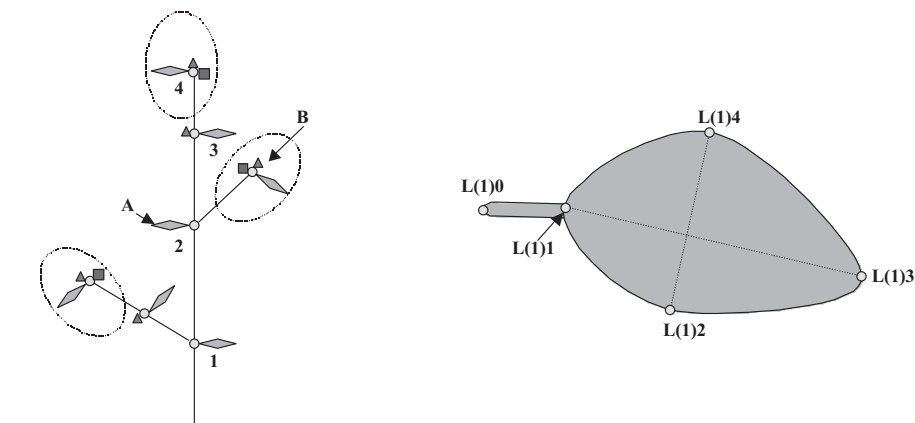
植物体を形作る基本構造 (葉, 茎, 果実など) の理解には, 形態的特徴とともに, 各構造間の連結や枝分かれの情報も重要である. plant mapping は植物体の全体あるいは一部の構造を, 個々の器官のトポロジカルな関係のみに注目して表現する手法である (Hanan and Room 1997). いま葉を L, 頂芽を A, 側芽を B, 枝分かれ構造を [ ] とし, 第1図左のモデル植物の構造を文字列で表すことを試みる. 主となる茎の各節を単位とすると, それぞれの節上にある構造は

- 1 L[L[A]L[B]A]
- 2 L[L[B]A]
- 3 L[A]
- 4 L[B]A

と書き表すことができる.

この例の場合, ひとつの節に直接1枚の葉がつき, 同じ節から新しい枝が伸びている. そのパターンはそれぞれの枝の節でも同じで, L[B]A という単位が繰り返し現れる「基本構造 (モジュール)」となっている (第1図左の楕円の中, plant mapping のゴシック部分). このように植物体の3次元構造を2次的に展開することにより, 枝分かれパターンを推測し生長規則を探し出すことが可能となる. また, この記述方法は誰が行っても同じ結果となるので, 品種による分枝の特徴を示す場合や, 植物体の一部にのみある処理を施した際の位置の記述, あるいは本来あるべき構造の欠失推定など, さまざまな場面で有効である.

分枝を繰り返し高次構造を持つ植物体で, 同じ階層のある構造 (例えば主茎第5節から伸びた分枝の第3節に付着する葉) のサイズを複数個体で比較したり平均値を求める場合などは, 個々の器官の位置を一意的に識別する必要がある. この目的には structure coding が有効である (Hanan



第1図 植物体の構造の模式図 (左) と葉の位置コードの例 (右).  
植物模式図の丸は節, 菱形は葉, 三角は頂芽, 四角は側芽を示す.

and Room 1997). Structure coding では各構造 (structure) とその順番を Sn (n は数字), 節 (node) とその順番を Nn で表す. 葉 L や芽 A も同じ位置に複数存在する場合は, その順序を n で表す. また主茎, 主茎から発達する一次分枝, 一次分枝から発達する二次分枝といった各階層構造はコロンで区切られる. 例えば

S01N02 : S01L01

は主茎第 2 節に付着する第 1 番目の葉 (主茎の第 2 葉, 第 1 図左の A) をしめす. さらに主茎第 2 節から一次分枝が出現した場合, その先端の芽は

S01N02 : S02N01 : S01A01

となる (第 1 図左の B). この場合 2 番目の構造が S02 となっているのは, 主茎第 2 節についている葉をこの節の 1 番目の構造 S01 としたためである.

水稻では片山 (1951) による分げつ形成の研究により, 規則的な分げつパターンが発見されるとともに, 「同伸葉」と呼ばれるそれぞれの階層 (分げつ) 間の個葉の対応関係が明らかにされた. 片山の研究に用いられた分げつの位置と出現日を記録する方法 (同伸葉・同伸分げつ一覧表) は plant mapping の一種であり, 個々の分げつ・葉身の表記方法は structure coding となっており, 各分げつ・葉身の出現時期を書き込んだ表から全体の構造とその成長過程が把握できる. 筆者らも 3 次元形態計測に必要な plant mapping および structure coding の方法として片山の方法を踏襲し, 水稻の各葉身の出現日をそのトポロジカルな位置とともに記録し (第 2 図左), 各葉身には識別のため油性インクを用いて異なるマークを付けた. ちなみにこの記録方法を用いると, 高次構造になると同伸葉規則からはずれることがよく観察できる (第 2 図右).

Tillering and Leaf emergence table							Sowing date								Flower -ing date
Variety	Treatment						No.	Code							
Main Stem	4/0	5/0	6/0	7/0	8/0	9/0	10/0	11/0	12/0	13/0	14/0	15/0	16/0		
Primary tillers		1/2	2/2	3/2	4/2	5/2	6/2	7/2	8/2	9/2	10/2	11/2	12/2		
			1/3	2/3	3/3	4/3	5/3	6/3	7/3	8/3	9/3	10/3	11/3		
				1/4	2/4	3/4	4/4	5/4	6/4	7/4	8/4	9/4	10/4		
					1/5	2/5	3/5	4/5	5/5	6/5	7/5	8/5	9/5		
						1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6	7/6	8/6		
							1/7	2/7	3/7	4/7	5/7	6/7	7/7		
								1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8		
									1/9	2/9	3/9	4/9	5/9		
										1/10	2/10	3/10	4/10		
Secondary tillers	2nd pr	proph.		1/2p	2/2p	3/2p	4/2p	5/2p	6/2p	7/2p	8/2p	9/2p	10/2p		
		1st			1/21	2/21	3/21	4/21	5/21	6/21	7/21	8/21	9/21		
		2nd				1/22	2/22	3/22	4/22	5/22	6/22	7/22	8/22		

第 2 図 片山 (1951) の方法に準じた同伸葉・同伸分げつ記録表 (左図).

主茎, 分げつ茎の各葉位が同伸葉関係に併せて配置されており, 出葉日等を各セルに記録する.

主茎第 1 葉から出現する分げつに関する部分は省略してある.

右図は同伸葉を主茎葉位で揃えて, 出葉日を示した例 (品種 Namaga, ワグネルポットによる栽培).

M : 主茎, 2 ~ 4 : 主茎第 2 ~ 4 節から出現した 1 次分げつ, 2-1 および 3-1 : 2 次分げつ.

高次分げつになると同伸葉位置の出葉が早くなり, かつ最終葉位が増えることなどがわかる.

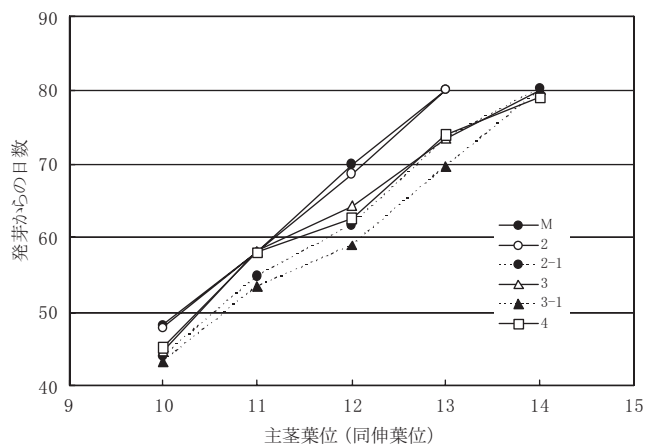
## 2. 3 次元デジタイザ

作物の群落構造測定には古くからさまざまな工夫がなされて (伊藤ら 1973 など), 近年では, 音波を利用する方式 (GTCO Freepoint 3D など, Hanan and Room 1997 ただし GTCO Calcomp 社の web サイトによると Freepoint 3D は製造中止になったようである) や磁力線方式 (Polhemus Fastrak など Sinoquet ら 1991, Shibayama 2001) の 3 次元デジタイザの他にも, 機械的な方法 (Takenaka ら 1998, Hirota and Nakano 2000) などが利用されている. ここでは筆者らが利用した 3 次元デジタイザとソフトウェア Floradig を用いた測定の概要を紹介する.

Floradig はデジタイザによって計測された 3 次元位置情報 (x, y, z) のコンピュータへの記録や計測結果から必要な情報を計算し, 植物形態を再現するためのソフトウェアで豪州クイーンズランド大学のサイトからフリーでダウンロードできる ([http://www.cpai.uq.edu.au/index.php?q=/services\\_and\\_software/digitising\\_software\\_download.php](http://www.cpai.uq.edu.au/index.php?q=/services_and_software/digitising_software_download.php)). 本ソフトは音波方式 Freepoint 3D, 磁力線方式 Fastrak に対応している.

筆者らは水稻をワグネルポットに栽培し, デジタイザによる計測はそのつど室内に持ち込んで行ったが, 野外の植物体, 群落の計測では, 風による攪乱を防ぐ工夫が必要となる. 植物体の方位を記録 (例えば, 長軸方向が真北を向いている枝あるいは葉をマーク) した後植物体を掘りとり, 室内で計測するなどの方法も用いられている.

磁力線方式デジタイザを利用する場合は, 発信器と測定物との距離, 位置によって精度や座標軸の正負が変化するので, デジタイザのマニュアルを参照するとともに, 測定空間上においた定規などの座標を測定し精度を確認してお



くといひ。

デジタイザ測定に先立って、鉛直と水平のリファレンスを入力する。鉛直方向は、錘をつけて鉛直に下げた紐の2点などを、水平方向は植物体を植えたワグネルポットの縁のポットの中心をはさんだ2点、あるいはマークを付けた枝とその180度反対方向などを用いる。鉛直方向のリファレンスは主茎の傾きを、水平方向のリファレンスは主茎についている葉あるいは分枝の水平方向の角度を計算するための参考としている。

植物により形態上の特徴、例えばひとつの節における枝の数、葉の形などは異なる。そこで測定対象の植物に応じた形態情報定義ファイルを作成する必要がある。定義ファイルは、一意的に決定される測定対象部位の位置コード (Structure code)、形態種類コード、測定点数から構成される。形態種類コードは器官の種類とそれぞれの測定点数を定義する。このとき同じ器官でもサイズによって、測定点数をかえることも可能である。例えば

L (0) → 小型の葉、測定点数3 (葉柄部含む)

L (1) → 大型の葉、測定点数5 (同上)

のように定義する。大型葉を示す L (1) を指定した場合は、第1図右のように

L (1) 0; x0, y0, z0 (葉柄基部)

L (1) 1; x1, y1, z1 (葉の基部)

L (1) 2; x2, y2, z2

L (1) 3; x3, y3, z3 (葉の頂点)

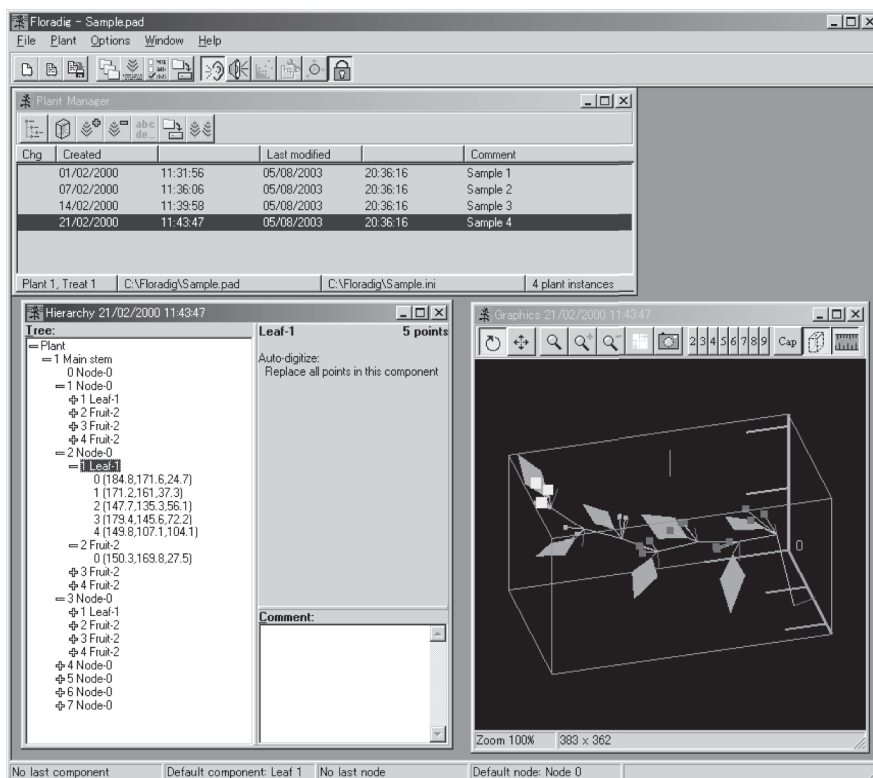
L (1) 4; x4, y4, z4

の5点をこの葉に対する位置情報としてコンピュータ内に保存する。定義ファイル作成の詳細は Floradig のマニュアルを参照していただきたい。

測定は基本的には各節を単位とし、まず主茎の節の位置を記録し、次に主茎に付着する構造を記録する。主茎に分枝がある場合は、分枝の節ごとに主茎で行った順序を繰り返す。測定結果はコンピュータの画面に出力されるので、画面を見ながら測定結果に異常がないかリアルタイムでチェックできる。また Floradig では同じ個体を経時的に複数回測定した場合、それらの結果をひとつのファイルとして記録可能である (第3図)。

イネ科植物の場合には節が外部から確認できないことが多い。そこで便宜的に、ひとつの茎の葉鞘葉身は単一の節から出ているとして structure code を定義してから測定を行うなどの工夫が必要であった。

各器官の長さ、面積、角度などは、各測定点の位置情報と定義ファイルから求められ、ユーザが登録した測定個体番号や測定日、さらに structure code などと共に出力される (第4図)。複数の個体を測定した場合、データファイルを市販の表計算ソフトやデータベースソフトに読み込み structure code を参照して同じ次位・節位の構造ごとに集計し、必要な統計処理を行う。測定結果の例として、第5図にデジタイザで測定した水稻主茎葉身の傾斜角度 (測定部位については第5図左参照) の葉位別変化を示した。このようにして計測された形態情報を組み込んだ仮想植物については、次稿で紹介する。

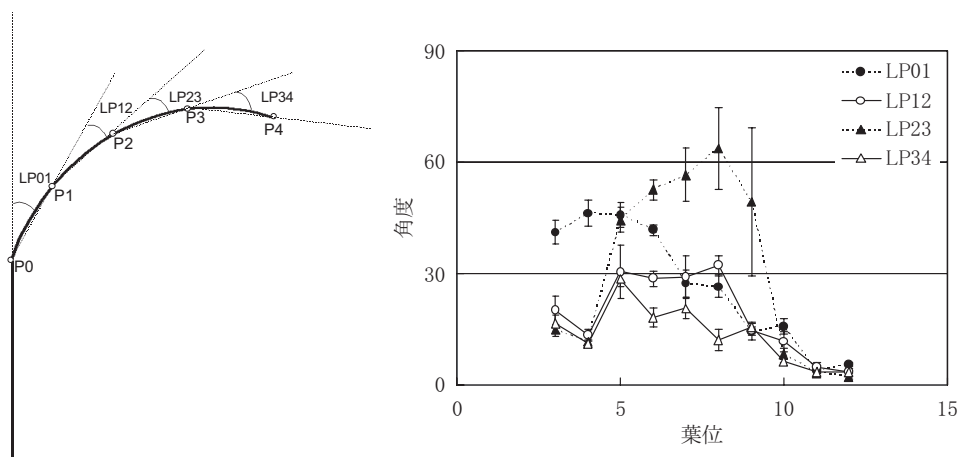


第3図 Floradig による計測結果の表示例。

Plant,Treatment,Date,Structure,Component,Type,Level,Label,Value,Comments  
 Plant 1, Treat 1,21/02/2000,S01N01;N,0,1,Length,120.77  
 Plant 1, Treat 1,21/02/2000,S01N01;N,0,1,Phyllo,-84.50  
 Plant 1, Treat 1,21/02/2000,S01N01:S01L00;L,1,2,Leaf Length,92.60  
 Plant 1, Treat 1,21/02/2000,S01N01:S01L00;L,1,2,Leaf Width,36.00  
 Plant 1, Treat 1,21/02/2000,S01N02;N,0,1,Length,55.19  
 Plant 1, Treat 1,21/02/2000,S01N02;N,0,1,Phyllo,-160.43  
 Plant 1, Treat 1,21/02/2000,S01N02:S01L00;L,1,2,Leaf Length,88.46  
 Plant 1, Treat 1,21/02/2000,S01N02:S01L00;L,1,2,Leaf Width,37.02

地面から第1節までの長さ  
 第1葉の水平方向角度  
 第1葉葉身長  
 第1葉最大葉幅  
 第1-2節間長  
 第1-2葉間の水平方向角度  
 第2葉身長  
 第2葉最大葉幅

第4図 Floradig によって計測された値の出力例。説明文は筆者が付け加えた。



第5図 3次元デジタイザで計測した水稻主茎葉身の傾斜角度 (右)。

左図の垂直線が葉鞘、葉身基部P0から等間隔に先端P4までの中肋上の5点をデジタイザで記録し、それぞれの傾斜角度を計算した。

## 引用文献

- Godin, C. and H. Sinoquet 2005. Functional-structural plant modelling. *New Phytologist* 166 : 705–708.
- Hanan, J.S. and P.M. Room 1997 Practical aspects of virtual plant research. In M.T. Michalewicz ed. *Plants to ecosystems. Advances in Computational Life Sciences*. CSIRO, Melbourne. 28–44.
- Hirota, O. and Y. Nakano 2000. Modeling of a soybean canopy structure by the approximation of a leaflet into an ellipsoid for estimating direct solar radiation environment. *Plant Prod. Sci.* 3 : 67–74.
- 伊藤綾子・宇田川武俊・内嶋善兵衛 1973. 作物群落の計量植物学的研究 第2報 品種・生育段階による水稻群落構造の変化. *日本作物学会紀事* 42 : 334–342.
- 片山佃 1951. 稲・麦の分けつ研究—稲・麦の分けつ秩序に関する研究—. 養賢堂. 東京. 1–117.
- Shibayama, M. 2001. Estimation of leaf area and leaf inclination distribution of perennial ryegrass, tall fescue, and white clover canopies using an electromagnetic 3-D digitizer. *Grassland Science* 47 : 303–306.
- Sinoquet, H., B. Mouliat and R. Bonhomme 1991. Estimating the three-dimensional geometry of a maize crop as an input of radiation models: comparison between three-dimensional digitizing and plant profiles. *Agricultural and Forest Meteorology* 55 : 233–249.
- Takenaka, A., Y. Inui and A. Osawa 1998. Measurement of three-dimensional structure of plants with a simple device and estimation of light capture of individual leaves. *Functional Ecology* 12 : 159–165.
- Watanabe, T., J.S. Hanan, P.M. Room, T. Hasegawa, H. Nakagawa and W. Takahashi 2005. Rice morphogenesis and plant architecture: measurement, specification and the reconstruction of structural development by 3D architectural modelling. *Annals of Botany* 95 : 1131–1143.