

## ダイズの根系構造のパイプモデル適合性とその範囲\*

田中典幸・三原 実\*\*・有馬 進・原田二郎

(佐賀大学農学部)

1993年7月28日受理

**要 旨:** ダイズの根系構造のパイプモデル適合性とその範囲について、異なる地下水位(35, 80, 60 と 80 cm 変動)あるいは作土の深さ(5, 10, 20, 40, 60, 90 cm)下で生育させたダイズの根系を対象として検討した。その結果、ダイズ根系の形態、分布および量は様々に変化した。しかし、細根重の積算値と太い根の根重は、層位や処理の種類にかかわらず直線関係を示し、また、直径約 0.25 mm 以上の根では直径階級と直径階級別根長は負の直線関係を示した。したがって、根系はパイプモデルにほぼ一致する構造であることが確認された。一方、“仮想パイプ”を考案して詳細に検討した結果、ダイズの根系のパイプモデルへの適合限界は、直径階級約 1 mm 以上の太い根までであり、約 1 mm 未満の細根はモデルから予想される量より著しく多いことが明らかになった。

**キーワード:** 根径, 根系, 作土深, ダイズ, 地下水位, パイプモデル。

**Applicable Range of the Pipe Model to the Structure of Soybean (*Glycine max* Merr.) Root System:** Noriyuki TANAKA, Minoru MIHARA\*\*, Susumu ARIMA and Jiro HARADA (*Faculty of Agriculture, Saga University, Honjō, Saga 840, Japan*)

**Abstract:** The applicability of the pipe model to the structure of soybean (*Glycine max* Merr.) root system grown under various underground water levels or depths of plow sole were investigated. The form, distribution and quantity of root systems changed with the growth conditions. However, cumulative root dry weight of thin roots showed a linear regression with dry weight of thick roots irrespective of soil layer or treatment. Also, in the case of roots whose diameter was over 0.25 mm, negative linear regression was seen between the diameter classes and their cumulative length. Therefore, the structure of the root system was considered to correspond to the pipe model. Meanwhile, as a result of further detailed analyses by using the “Ideal pipe” concept that we have introduced, the range of the soybean root system to which the pipe model is applicable is more than about 1 mm in diameter. The length of thin roots whose diameter are less than about 1 mm was considerably larger than that predicted by the model.

**Key words:** *Glycine max* Merr., Pipe model, Plow sole depth, Root diameter, Root system, Soybean, Underground water level.

ダイズをはじめ作物の根系の形態は、土壌など種々の条件によって著しく変異することが知られている<sup>1)</sup>。しかも、ダイズ根系では、主根や分枝根の基部が肥大するため<sup>2)</sup>、根系構造の変化を主根、側根などの個々の根の長さや直径、分枝様式などの形質を総合することでは把握することが困難である。著者らは、前報<sup>3)</sup>において、このようなダイズの根系構造に樹木の茎葉部を対象として提案されたパイプモデル<sup>2,3)</sup>を適用することにより、その量のある程度まで推定しうることを明らかにした。しかし、上記の点を考慮すると、パイプモデルによるダイズの根系構造の総合的な把握の可能性については、なお、様々に変異した根系を用いてその一般性の検討を重ねる必要がある。

本研究では、ダイズを地下水位あるいは作土の深さの異なる条件下で栽培した。根系の形態変化をパイプモデルと関係した種々の量を用いて解析するこ

とによって、ダイズの根系構造のモデルへの適合性とその範囲について検討した。

### 材料と方法

#### 1. 地下水位の違いと根系構造

塩化ビニール製の無底枠ポット (5 cm×35 cm×100 cm 高) に 1 cm の網目の篩でふるった水田土壌 (軽埴土) を充填した。肥料は全量を元肥とし、1 ポット当り苦土石灰 3 g, 窒素 0.1 g, リン酸とカリ 0.3 g ずつを全層に施用した。1987 年 7 月 28 日に品種フクユタカを 1 ポット当り 3 個体、株間 10 cm として播種した。その際、発芽を斉一にするために、1 ポット当り 0.5 リットルずつ灌水した。地下水位は、各ポットを佐賀大学農学部網室内に設置した鉄製水槽に入れて調節した。ポットの土壌表面から水位面までの距離を 35 cm (高水位)、80 cm (低水位) に保った区、および 10 日おきに 60 cm と 80 cm に変化させた変動区を設けた。また、1 日おきに 1 ポット当り 2 リットルを灌水した区 (灌水区) を設けた。

\* 一部は第 189 回講演会 (1990 年 4 月) において発表。

\*\* 現在は佐賀県庁。

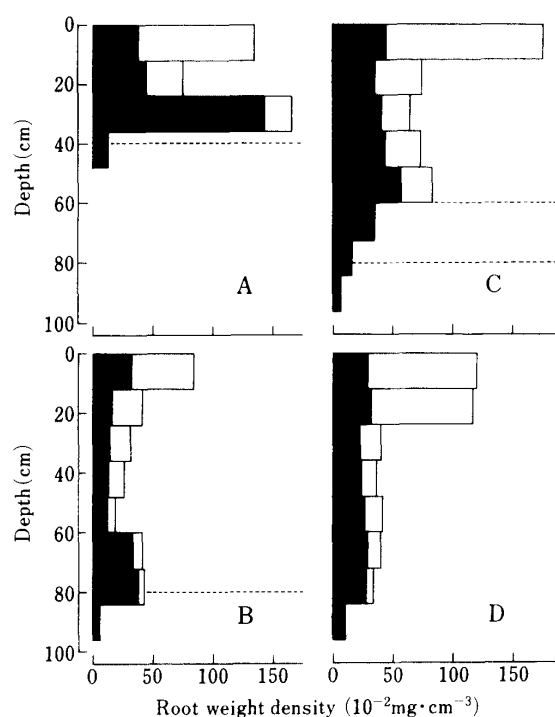


Fig. 1 Changes in the root weight density with soil depth.

A, high underground water level (35cm below soil surface);

B, low underground water level (80cm below soil surface);

C, underground water level adjusted every ten days at 60cm and 80cm depth;

D, control (irrigated every two days, 2 liter per pot);

□, thick roots whose diameter are over 0.5mm;

■, thin roots whose diameter are under 0.5mm.

....., underground water level.

なお、栽培は2連制で行った。

根系の調査は播種後50日目に行った。その際、根は地表から12cmごとの層別に採取し、根粒を取り外し、直径をノギスで計測して直径0.5mmを境に細い根と太い根に分類した後、根乾物重と根長を測定した。

根の平均直径を根重と根長から次式により層別に推定した。

$$D = 2\sqrt{RW/\rho/RL/\pi}$$

ここで、Dは根の平均直径(mm)、RWは根乾物重(mg)、 $\rho$ は根の比重( $0.03\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ :前報<sup>5)</sup>の原データより試算)、RLは根長(mm)とした。

## 2. 作土の深さと根系構造

佐賀大学農学部畑圃場において、心土をローラー

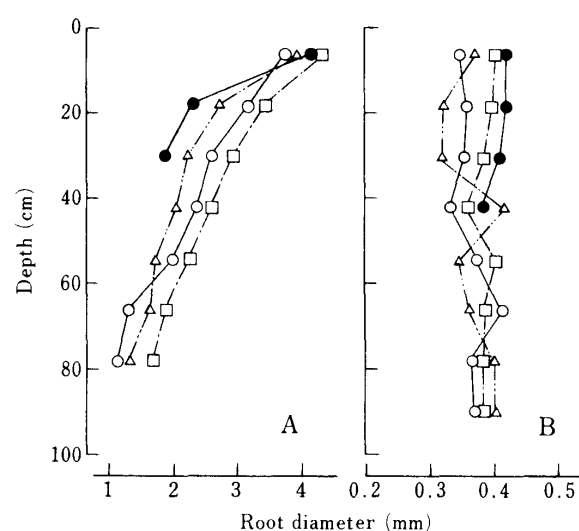


Fig. 2 Changes in mean value of root diameter with soil depth.

A, thick roots whose diameter are over 0.5mm;

B, thin roots whose diameter are under 0.5mm;

●, high underground water level (35cm below soil surface);

○, low underground water level (80cm below soil surface);

△, underground water level adjusted every ten days at 60cm and 80cm depth;

□, control (irrigated every two days, 2 liter per pot).

で締め固め、その上部に高さの異なる木枠(0.9m×3.5m)を設置して作土深が5, 10, 20, 40, 60, および90cmとなるように作土を再充填した。肥料は全量元肥として10a当たり苦土石灰50kg, 窒素2kg, リン酸とカリ各5kg相当量を作土の上層約5cmに施用した。1989年6月20日に品種フユタカを株間50cmとして播種し、1区当たり7株を1本立てで栽培した。

根系は、8月30日から9月9日までの10日間に、作土表面から心土10cmの深さまでを採取した。調査は各区2個体について行った。直径階級別の根長は、直径1mm未満の細根では、ルートスキャナーで測定した全細根長を実体顕微鏡を用いて測定(各区300から900の無作為抽出試料について測定)した直径階級ごとの観測頻度に基づいて比例配分して算出した。また、直径1mm以上の太い根では、長さ5cmごとの断片に切断し、各断片の中央部の直径をノギスで測定して直径階級別根長を求めた。その場合、ノギスによる測定値は予め求めておいた関係式に従って実体顕微鏡の測定値に合わせて補正し

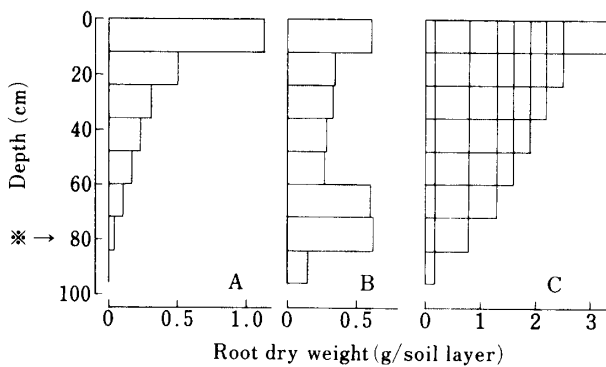


Fig. 3 Distribution of root dry weight of thick roots(A) and thin roots(B) in various soil layers, and cumulative root dry weight of thin roots from bottom layer(C). An example of low underground water level (80cm). ※→, underground water level. Diameter of thick roots are over 0.5mm; diameter of thin roots are under 0.5mm.

た。各個体の直径階級別根長は細根および太い根の長さを合計して求めた。なお、直径階級は増分を 0.1 mm とした。

## 結果と考察

### 1. 地下水位の違いと根系構造

#### (1) 根系の層別分布

根重密度は、いずれの区においても表層で高く、第2層以下の層で減少した。しかし、低水位区、高水位区および変動区では、地下水位面の直上の1ないし2層で再び高くなった(第1図)。なお、層別の根長密度の分布は、第1図の黒抜き部分で示した直径 0.5 mm 未満の細根の乾物重の分布とほぼ一致した。直径が 0.5 mm 以上の太い根の平均直径(第2図)は下層ほど減少し、とくに高水位区において急激に細くなる傾向がみられた。直径 0.5 mm 未満の細根の平均直径は処理および土層によって変動したが、その変動に一定の傾向は認められなかった。

#### (2) 根系の基本構造

直径 0.5 mm 以上の太い根の根重(第3図, A)と直径 0.5 mm 未満の細根重(第3図, B)の層別分布には明確な関係は見いだせなかった。しかし、層ごとに再下層から当該の層までの細根重を積算した値(第3図, C)を 0.5 mm 以上の太い根の根重の推移(第3図, A)と比較してみると、両者は類似した傾向を示した。そこで、全ての処理区を一括して両者の関係を検討した結果、細根重を最下層から積算した値と太い根の根重との間には、表層を除いて、処

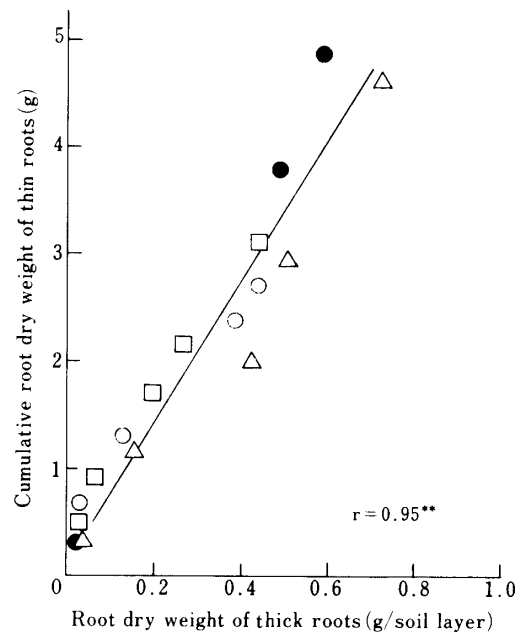


Fig. 4 Relationship between the dry weight of thick roots of a given soil layer and cumulative dry weights of thin roots from bottom layer to the layer.

Symbols are the same as Fig. 2.

理区にかかわらず高い正の相関関係が認められた(第4図)。この事実は根系がパイプモデルに当てはまる構造をもっていることを示唆していると考えられる。すなわち、直径 0.5 mm 以上の太い根が主根および2次根の基部に相当し、太い根が各土層を貫通してそれぞれの土層で直径 0.5 mm 未満の細根を分枝していると想定し、根の密度が一定と仮定すると、上記の関係が得られることになる。したがって、いずれの処理区においても根系構造はパイプモデルに当てはまると考えられる。

### 2. 作土の深さと根系構造

#### (1) 根系の生育

1個体当たりの根乾物重は作土が 60 cm の区で最高となり、平均根重密度は作土の深い区で低かった。また、根の乾物重 1 g 当たりの根長 (L/D 比) は 40 cm 区で最高となった。主根の形態をみると、主根の直径は基部から根端に向かって減少したが、減少の程度は作土の深い区ほど小さかった。

#### (2) 根の直径別根長

1個体の根系について、根を直径の増分 0.1 mm ごとに分級し、直径階級とその階級に属する根の長さとの関係を両対数グラフに図示した(第5図)。その結果、いずれの処理区でも直径階級の中央値が 0.2 mm ないし 0.3 mm の細根の長さが最大となっ

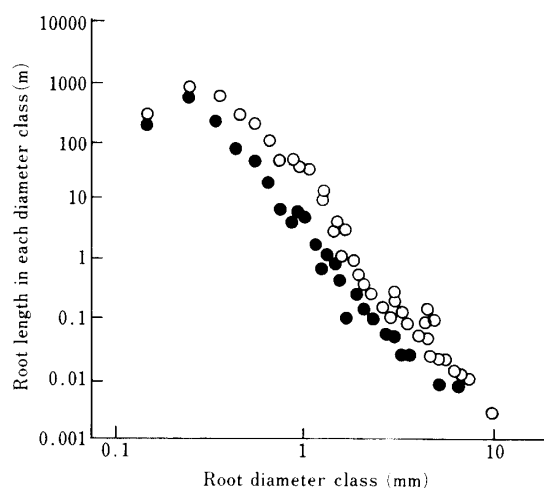


Fig. 5 Changes in root length with root diameter class.

○, plow sole depth is 90cm;  
●, plow sole depth is 5cm.

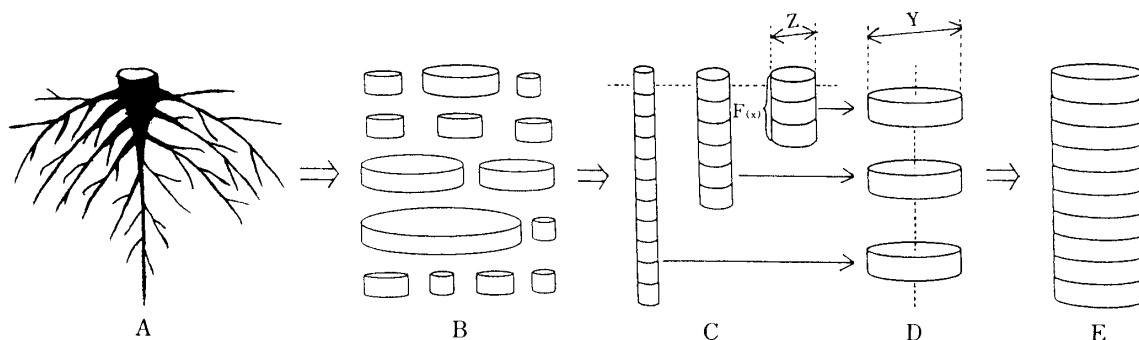


Fig. 6 Process of constructing the "Ideal pipe" of a root system.

A soybean root system (A) is divided into segments of unit length (B). Segments are classified according to their diameter (C) and ideal disks (D) the volume of which correspond to those of root diameter classes are assumed. "Ideal pipe" (E) is constructed by piling up ideal disks according to their root diameter class.

Diameter of ideal disk (Y) is calculated as follows;  $(Y) = \sqrt{f(x)} \times (Z)$ ;  $\sqrt{f(x)}$ , cumulative root length in a root diameter class; (Z), the mode of root diameter class.

た。また、これより太い直径階級の根では、直径階級と階級別根長との間に有意で高い負の直線回帰関係が認められた。この直線の回帰式の回帰係数 (A) は -3.02 から -4.15 の間の値を示し (第1表), 根系が単純なパイプモデルに一致する場合に想定される -2 よりやや低い値を示した。また、回帰定数 (B) は作土の深い区の根系ほど高い値を示した。以上のことから、作土深によって根系の形態が変化しても、直径が約 0.25 mm 以上の根についてはパイプモデルが当てはまると考えられる。しかし、実際の根系は回帰係数からみると単純なパイプモデルに適合する場合よりも細根の割合が高い構造となっていることが明らかになった。

Table 1. Parameters indicating in the relation between diameter classes and the length of roots belonging to them.

Plow sole depth (cm)	A	B	Correlation coefficient
5	-3.23 bc	0.21	-0.96**
10	-3.21 c	0.32	-0.96**
20	-3.02 c	0.34	-0.96**
40	-4.15 a	0.44	-0.96**
60	-3.88 a	0.77	-0.97**
90	-3.78 ab	0.79	-0.97**

$\text{Log}(\text{root length, m}) = A \times \text{Log}(\text{root diameter, mm}) + B$

Pitch of root diameter class increase is 0.1 mm. Diameter of roots used for these calculation were more than 0.25 mm.

Figures followed by a different letter are significantly different at 5% level. \*\*, significant at 1% level.

### (3) “仮想パイプ” による構造の解析

パイプの集合としてみた場合の根系構造を理解しやすくするために、上記の結果をもとに根系の“仮想パイプ”を試作した (第6図)。すなわち、依田<sup>6)</sup>が示唆したように、まず、根系を一定の長さ (本研究では 0.1 mm) の根の短材に切断し、それらを直径階級別に分けたと想定した (第6図, B)。次いで、同じ直径階級に属するすべての短材の数とその平均直径から直径階級別の根の総体積を求め (第6図, C)、さらに、これと同体積で、高さが直径階級の増分に相当する円盤を仮想した (第6図, D)。仮想円盤の直径 Y は、各直径階級の中央値 Z とその階級に属する根の根長  $f(x)$  により次式

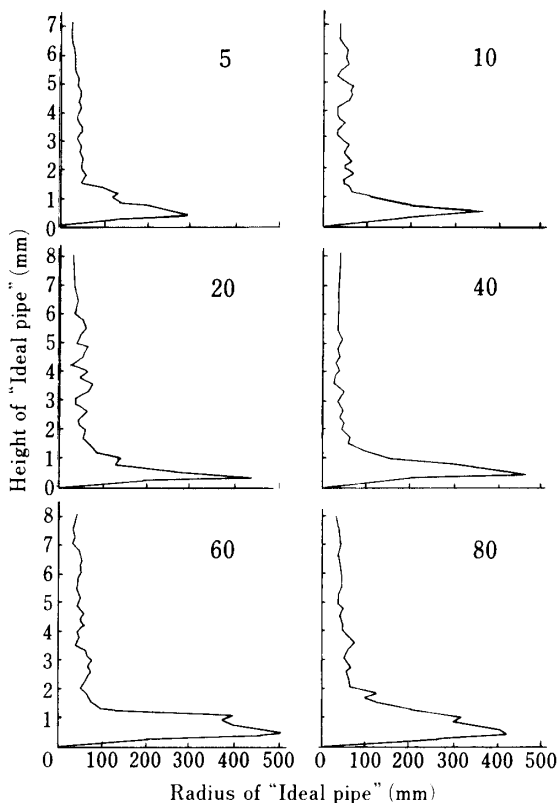


Fig. 7 Changes in radius with height of "Ideal pipe" in 6 soybean root systems grown under various plow sole depth. Numerals in each diagram show the plow sole depth (cm).

$$Y = \sqrt{f(x)} \times Z$$

から導いた。仮想パイプは各直径階級ごとの仮想円盤を細い直径階級から順に積み上げて作成した（第6図, E）。その場合、根系がパイプモデルに完全に当てはまるならば、各直径階級の仮想円盤の直径が等しくなり、仮想パイプは円筒形となるはずである。しかし、各処理区の根系について作成した仮想パイプの高さ（直径階級）と半径との関係を検討した結果（第7図）、いずれの場合にも下部の仮想円盤が著しく大きい形となった。すなわち、実際の根系は、作土の深さにかかわらず直径が約1 mm以上の根では単純なパイプモデルとほとんど一致した構造となっているが、直径が約1 mm未満の細根ではその長さが単純なパイプモデルから想定される量より著しく多くなっていることが明らかになった。

### 3. 結論

以上の検討の結果、ダイズ根系は、生育条件によってその分布と形態が様々に変化したにもかかわらず、パイプモデルにほぼ一致する構造を示した。こ

の点で本研究の結果は前報<sup>5)</sup>の結論を確認するものであった。しかし、本研究では直径階級の増分を0.1 mmと前報より小さくして詳細に検討してみた。その場合には、直径階級と直径階級別根長の関係の回帰係数が-2よりかなり小さくなり、“仮想パイプ”では直径階級約1 mm未満の細根部の半径が著しく大きくなった。このことから、ダイズ根系におけるパイプモデルの適用限界は、直径約1 mm以上の範囲の比較的太い根までであり、それ以下の細根部（若い根）ではパイプモデルに適合しないことが明らかになった。このようにダイズ根系ではパイプモデルとの適合性に限界が存在することの原因は明らかでない。しかし、現在のところ考えられる3つの可能性を挙げておきたい。その第1は、直径の異なる根では木部と皮層部の占める割合が異なることの影響がそれである。皮層部分を除去して木部あるいは導管部のみについて検討すれば、根系はパイプモデルとより一致した構造を示す可能性が考えられる。第2は、根系を構成する根はその直径によって機能的に分化しており、直径が約1 mm以上の部分は主として養水分の通導の、以下の部分は吸収の機能に適応した構造を示しているとも考えられる。また、その場合、第3の可能性として、単に、直径が約1 mm以下の個々の細根は肥大を開始するまでの伸長量が比較的大きく、当該直径階級の根長を大としているに過ぎないという可能性も考えられる。いずれの可能性もダイズ根系の構造と機能の問題に関係しており、今後の検討を要する興味深い点である。

### 引用文献

1. Russell, R.S. 1977. Plant Root Systems; Their Function and Interaction with the Soil. McGraw-Hill, London. 143—237.
2. Shinozaki, K., K. Yoda, K. Hozumi and T. Kira 1964. A quantitative analysis of plant form—the pipe model theory—I Basic analysis. Jpn. J. Ecol. 14: 97—105.
3. ———, ———, ——— and ——— 1964. ———. II Further evidence of the theory and its application in forest ecology. Jpn. J. Ecol. 14: 133—139.
4. 田中典幸 1977. マメ科作物の根群形成に関する研究. 佐賀大学農学彙報 43: 1—82.
5. 田中典幸・窪田文武・有馬 進・田口光浩 1990. ダイズにおける根系の量的解析. 日作紀 59: 270—276.
6. 依田恭二 1977. 森林の生態学. 築地書館, 東京. 48—56.