根の研究(Root Research) 12 (3) : 119-123 (2003)

短　報

Root Research 根の研究

立体に含まれる線分長推定法の検討及び茶樹細根調査における応用

小 野 亮太郎

熊本県農業研究センター　球磨農業研究所

要　旨：土壌中に存在する植物の根の長さを求めるために，土壌断面に現れた根の細根数から総細根長を推定する方法について検討を行った．ある立体中に不規則的に存在する線分の長さの合計Rは，立体の体積をＶ，測定断面の面積をＳ，測定断面に線分が交わる交点の数をｎとすると，Ｒ＝２ｎＶ／Ｓで求められる．この式を用い圃場における茶樹の細根について，圃場の断面調査根数と，掘り取り調査による実測根長の比較を行った．

キーワード：細根，根長，断面，長さ，茶樹

Examination of presuming method of the length of the line contained in a space, and the application in investigation of tea plant rootlet : Ryotaro ONO (*Kumamoto prefectural agricultural research center Kuma agricultural research institute*)

Abstract: We evaluated a method of estimating the total length of roots in a space from the number of the cut ends of roots appearing on the soil profile, to estimate the length of plant roots in soil. The total length of the segments randomly distributed in a space, R, is shown by R = 2nV/S; where, V is the volume of the space, S the surface area of the space and n the number of surface crossing of the lines. The total length of the fine roots of tea plants in the field was estimated using this formulas, and was compared with the root length actually measured after dug out. By using this method, the root length could be estimated with a high accuracy.

Keyword: fine root, root length, soil profile,length,tea plant

緒　言

土壌中の根の長さを求めるためには，掘り取り，根の洗い出し，根長測定と調査に多大な時間と労力を必要とする．このため根に関する研究報告例は比較的少ない．一方，圃場における細根の分布状況を簡易に調査する方法として，著者らは改良トレンチ法の報告を行った（小野ら，1994）．この調査法は，圃場断面に現れた細根の数をマス状に数えることにより，根の洗い出し選別などの労力を少なくした，比較的簡易に分布状況を調査する方法であるが，根量の定量化ができない欠点があった．

そこで，断面細根数から細根長を推計する計算式の検討を行い，圃場調査での断面細根数（改良トレンチ法）から推定した推定細根長と，掘り取り調査（ブロック法）による実測細根長との比較を行った．

材料と方法

圃場における根系調査は，供試品種に'やぶきた'を用い，2000 年 12 月５日に熊本県農業研究センター茶業研究所内圃場（赤黄色土壌：阿蘇火山砕屑物風化土壌）の幼木園(1998 年３月植)で行った．

改良トレンチ法と実測根量の比較を行うために，茶園３カ所を畦方向と垂直に，パワーショベルで深さ１ｍ，幅 1.8m程度掘り，改良トレンチ法とブロック法で調査を行った．

改良トレンチ法は，幅 120cm，深さ 30cm の断面を軽く水洗いし，５cm 四方の升目中の露出した細根数を計測した．

ブロック法は，改良トレンチ法で調査を行った断面について，奥行き 15cm，縦横 15cm のブロックを掘り取り，細根を選別後根長を調査した．根長の測定にはニューマン法を用いた．

結　果

１．立体に含まれる線分長を求める計算式の検討

平面中に存在する任意の線分長は，ニューマン法（Newman,E.,I.,1966）を用いることにより求めることができる．立体についてもこの考えを応用して，推定方法が可能ではないかと考え，検討を行った．

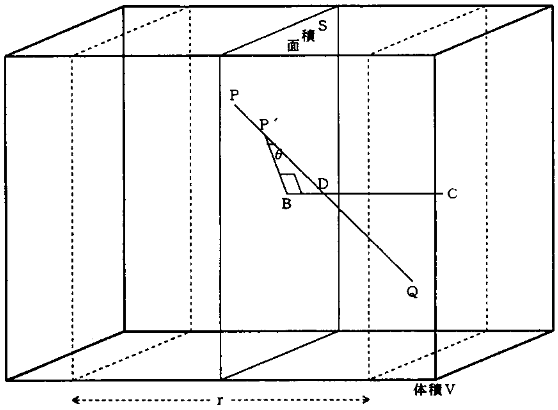
任意の形で体積がＶの立体中に任意に存在す

2003 年 4 月 14 日受付　2003 年 9 月 8 日受理

＊連絡先　〒868-0422　熊本県球磨郡あさぎり町上北 2248-16　熊本県農業研究センター　球磨農業研究所
Fax:0966-45-2944　E-mail:ono-r@pref.kumamoto.lg.jp

る長さｒの線をＰＱとする．またこの立体を任意に切った断面の面積をＳとする．（第１図は作図を容易にするため，直方体にしており，断面はある面と平行にしている．任意の立体，断面についても同様の理論が成り立つ．）

線ＰＱの中点をＤとし，点Ｄから断面Ｓに下ろした垂線について，断面Ｓとの交点をＢ，ＢＤの延長線上でＢからの距離ｒ／２の点をＣとする．また線ＰＱ又はその延長線と断面Ｓが交わる点をＰ′とし，線ＰＱと断面Ｓが作る角∠ＤＰ′Ｂをθとする．



第１図　体積Ｖの立体中において面積Ｓの面と交わる線分ＰＱの模式図

長さｒの線ＰＱが断面Ｓと交わるためには，中点Ｄが断面Ｓからの距離ｒ／２の範囲内にある必要があり，中点Ｄが断面Ｓからの距離ｒ／２の範囲内に存在する確率は，

$$rS/V$$

となる．中点Ｄがこの範囲内にある場合，線ＰＱと断面Ｓが交差するためには，中点Ｄが直線ＢＣ上の

$$BD \leqq (r/2)\ |\sin\theta|$$

の範囲に存在する必要がある．中点Ｄが直線ＢＣ上のこの範囲内にある確率は，

$$(r/2)\ |\sin\theta| / (r/2) = |\sin\theta|$$

となる．つまり，中点Ｄが断面Ｓからの距離ｒ／２の範囲内にある場合，線ＰＱと断面Ｓが交差する確率は，すべてのθ値における｜ｓｉｎθ｜の平均値で求めることができる．

直線ＰＱと平面Ｓが交わる場合，直線と平面の交点Ｐ′は点Ｂを中心に半径ＢＰ′の円を描く．言い換えると△ＤＰ′ＢはＢＤを軸に∠θを維持しながら平面Ｓ上を回転する．

｜ｓｉｎθ｜の平均値を求めるために，Σ｜ｓｉｎθ｜を求める場合，それぞれの｜ｓｉｎθ｜は半径ＢＰ′の円を描く自由を持つことになる．したがって，｜ｓｉｎθ｜と２π｜ｃｏｓθ｜の積を，θが０から２πの範囲について積分をすることによりΣ｜ｓｉｎθ｜を求めることができる．

$$\Sigma|\sin\theta| = \int_0^{2\pi} 2\pi\,|\cos\theta|\,|\sin\theta|\,d\theta = 2\pi$$

｜ｓｉｎθ｜の平均値は，

$$\Sigma|\sin\theta| / \Sigma\theta$$

Σθは球の表面の軌跡を描くため，

$$\Sigma\theta = 4\pi$$

したがって，｜ｓｉｎθ｜の平均値は，

$$2\pi / 4\pi = 1/2$$

となる．

中点Ｄが断面Ｓからの距離ｒ／２の範囲内にある確率は，

$$rS/V$$

であるため，直線ＰＱが断面Ｓと交わる確率は

$$(1/2)\ (rS/V) = rS/2V$$

となる．

したがって，長さｒの線と断面Ｓとの交点の数ｎは，

$$n = rS/2V$$

したがって，求める長さｒは，

$$r = 2nV/S$$

で求まり，複数あるｒの合計値Ｒは，

$$R = 2nV/S$$

となる．

２．計算式Ｒ＝２ｎＶ／Ｓの検証

計算式の検証を行うためには，任意の立体中に，長さのわかっている線分を不規則的に配置し，任意の断面と線分が交わる交点の数を数えなければならない．しかし，立体中に線分を配置するのは困難な実験であるため，パソコンを用いて，架空の立体を想定し，その立体中に存在する架空の線分と断面が交差する交点の数を数える方法で検証を行った．

面と交わるかどうかには，以下のような条件式を設定した．

線分ＰＱの座標を　Ｐ（ｘｎ，ｙｎ，ｚｎ）-Ｑ（Ｘｎ，Ｙｎ，Ｚｎ）

架空の立体を直方体（$0 <= x < 10$，$0 <= y < 10$，$0 <= z < 10$）とし，点Ｐ，点Ｑの座標をそれぞれ直方体の範囲内にランダムに設定し，線分ＰＱを数本から数十本の範囲で不規則的に設定した．従って，線分ＰＱは直方体からはみ出すことのない設定になっており，長さは不規則となる．

面と線が交わるということは，線の両端の座標が面の両側に分かれているということである．

断面Ｓをｘ＝ｔとした場合，

（ｘｎ≦ｔ and ｔ＜Ｘｎ）or（Ｘｎ≦ｔ and

$t < xn$)

線分PQのそれぞれの座標（xn，yn，zn)，(Xn，Yn，Zn）がこの条件を満たす場合、線分PQは断面S（x＝t）と交差する．この交点の数をカウントし，交点の数nを求めた．交点の合計値を式に当てはめ，全線分PQの合計長の推定値を求めた．

ランダムな配置による誤差を少なくするために，断面の数を多くし，またx軸，y軸，z軸の各軸角度についてそれぞれ断面を取った．

一方，全線分の実の長さ合計値（計算値）は

$\Sigma\sqrt{((xn-Xn)^2+(yn-Yn)^2+(zn-Zn)^2)}$

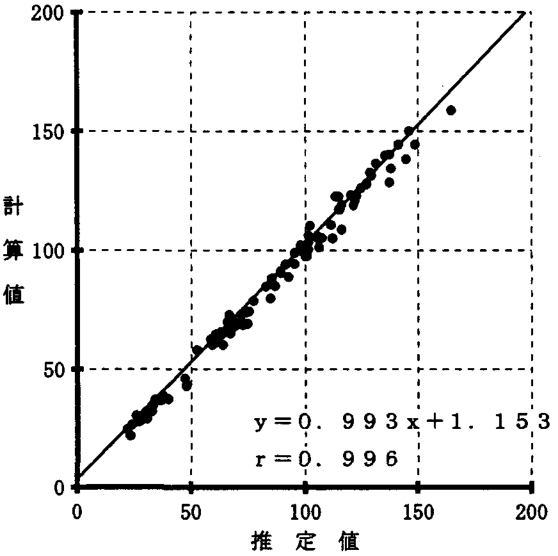
で求まる．

推定値と計算値との相関を求めた結果，回帰式と相関係数は

$y=0.993x+1.153$ ($r^2=0.992$)

（ただし断面はx軸，y軸，z軸それぞれについて，体積Vに対し均等間隔で 10 断面（x＝0，y＝0，z＝0 を含む)，線分PQは5本，10 本，15 本，20 本でそれぞれ 25 反復計算を行う．n＝100)

となった．また，推定値と計算値について，対応する２つの数値の有意差について検討した結果，５％の水準で有意差は認められなかった．



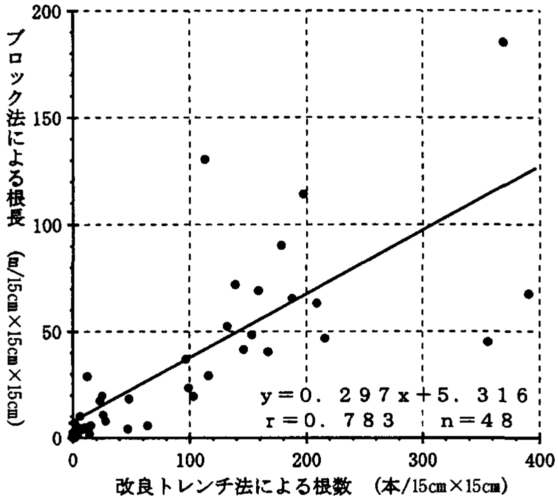
第２図　立体モデルにおける計算値と推定値の相関 (n=100)

３．圃場での根系調査

改良トレンチ法で測定した断面の根数と同じ位置をブロック法で切り取り調査した実測根長の結果を第３図に示した．

改良トレンチ法による断面根数と同じ部位におけるブロック法による実測根長の相関について検討した結果(第４図)，以下のとおり１％水準で相関が認められた．

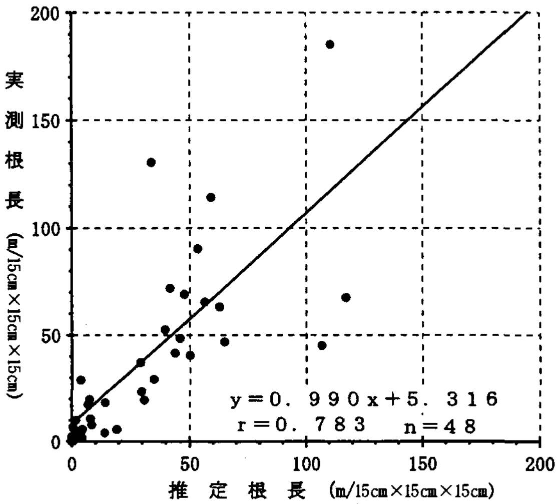
$y=0.297x+5.316$　$r^2=0.613^{**}$ (n=48)



第４図　ブロック法と改良トレンチ法の比較

改良トレンチ法による断面細根数からR＝2nV／S（ただし線分の長さの合計R，立体の体積V，測定断面の面積S，測定断面に線分が交わる交点の数n）の式を用い，推定根長を求め，ブロック法による実測根長との相関について検討した結果以下の回帰式が得られ，相関係数は１％水準であった．

$y=0.990x+5.316$　$r^2=0.613^{**}$ (n=48)



第５図　ブロック法による実測根長と改良トレンチ法による推定根長の比較

この結果，回帰係数は 0.990 となり，推定根長と実測根長はほぼ１：１となった．

考　察

地下部の根量を定量的に測定する手法としては，ブロック法で乾物重を測定する方法が多く

用いられているが，根の洗い出しに多大な労力を要する点が難点であり，反復調査が困難である．根系は地下部において非常にばらつきの有る分布をしているため，圃場群落における地下部根群の分布状況を調査する場合，調査は可能な限り反復調査を行わなければ，代表できる数値を得ることは困難である．

改良トレンチ法を用いた圃場断面調査は，トレンチ（塹壕）を掘ることに多くの労力を必要とするが，トレンチさえ掘ることができれば、断面における断根数の調査は比較的容易に行える．このため，断面を数度削りなおすことにより，断面根数のデータを数多く調査することができる．また改良トレンチ法は，土壌断面における部位別の根群分布状況，ばらつき状況，偏り状況を数値的に把握できる方法である．

立体に不規則的に含まれる線分の長さを求める式，Ｒ＝２ｎＶ／Ｓは，線分が方向性に偏りが無く，立体中に配置されていることが前提であり，確率により長さの推定を行うものである．また，この式はモデルとしてランダムに配置された直線で説明を行ったが，曲線でも可能である．なぜならば，曲線は非常に短い直線の集合体と見なすことができるからである．

この式は，立体中に存在する線分の長さを，直線，曲線を問わず，確率により長さを求めるものであるが，確率を用いる以上，精度，誤差の点で問題が残されている．モデル式では直線と平面が交差する確率を高めるために，平面数を数多く，また３次元の各方向から平面を取り計算を行った結果，高い精度が得られた．しかし，実際の圃場調査ではこのような調査は不可

(cm) 60　50　40　30　20　10　▼0（畝の中央）10　20　30　40　50　60

–	–		1	9	22	25	36	40	73	46	24	6	23	29	36	32	56	27	12	19	37	20	–
		12	23	20	20	10	48	82	62	53	24	24	10	9	25	35	61	45	9	6	25	31	16
		3	1	1	19	25	39	51	20	59	30	26	22	10	15	35	74	35	35	28	11	21	17
				4	4	18	21	8		12	15	9	8	6			12	33	22	8			4
											1												
																			1				
																			3				
																			6	3			

(cm) 60　50　40　30　20　10　▼0（畝の中央）10　20　30　40　50　60

根長(m) 5.77 根数(本) 15	根長(m) 29.25 根数(本) 116	根長(m) 45.09 根数(本) 356	根長(m) 67.54 根数(本) 391	根長(m) 69.11 根数(本) 159	根長(m) 185.14 根数(本) 369	根長(m) 46.80 根数(本) 216	根長(m) 90.33 根数(本) 178
根長(m) 0.31 根数(本) 0	根長(m) 4.08 根数(本) 8	根長(m) 4.13 根数(本) 47	根長(m) 7.87 根数(本) 28	根長(m) 17.42 根数(本) 23	根長(m) 28.92 根数(本) 12	根長(m) 5.70 根数(本) 64	根長(m) 1.35 根数(本) 4

(cm) 60　50　40　30　20　10　▼0（畝の中央）10　20　30　40　50　60

根長(m) 19.80 根数(本) 25	根長(m) 48.48 根数(本) 153	根長(m) 52.51 根数(本) 132	根長(m) 41.60 根数(本) 146	根長(m) 114.25 根数(本) 197	根長(m) 65.46 根数(本) 188	根長(m) 63.17 根数(本) 209	根長(m) 19.55 根数(本) 103
根長(m) 0.99 根数(本) 0	根長(m) 4.35 根数(本) 13	根長(m) 2.82 根数(本) 3	根長(m) 0.94 根数(本) 0	根長(m) 4.61 根数(本) 5	根長(m) 0.85 根数(本) 0	根長(m) 0.44 根数(本) 0	根長(m) 1.37 根数(本) 0

(cm) 60　50　40　30　20　10　▼0（畝の中央）10　20　30　40　50　60

根長(m) 0.00 根数(本) 0	根長(m) 10.06 根数(本) 6	根長(m) 37.10 根数(本) 97	根長(m) 40.41 根数(本) 167	根長(m) 71.94 根数(本) 139	根長(m) 130.45 根数(本) 113	根長(m) 23.54 根数(本) 99	根長(m) 18.35 根数(本) 48
根長(m) 0.00 根数(本) 0	根長(m) 0.32 根数(本) 0	根長(m) 2.47 根数(本) 0	根長(m) 1.88 根数(本) 14	根長(m) 10.75 根数(本) 26	根長(m) 6.49 根数(本) 2	根長(m) 4.93 根数(本) 10	根長(m) 0.23 根数(本) 2

第３図　改良トレンチ法の調査例と茶園における茶樹細根（白色根）の分布調査
・３ヵ所の断面について調査．
・１段目（改良トレンチ法）と２段目の図は，同一場所での調査結果を表す．
・上段はブロック法による総細根長，下段は改良トレンチ法による断面根数．
・根長は 15 cm × 15 cm × 15 cmブロック土塊中の総細根長．
・根数は改良トレンチ法による 15 cm × 15 cm範囲の総細根数．
・調査日：2000 年 12 月 5 日

能である．１断面の交点のみから全体の長さを推定する場合，誤差が大きくなる事が予想されるため，推定精度は低くなる．また，この式で推定困難なパターンとして，線分が一方方向にのみ偏って並んでいるような場合や，部分的に群落をつくるような配置をする場合は誤差が大きくなる事が考えられる．このため，これらも含めて調査方法と推定値の誤差については今後さらに検討する必要がある．推定精度を高めることは，限りなく測定断面数を多くすることで可能となるが，労力，圃場条件の上で限界がある．

ブロック法による部位別調査は，切り取ったブロックサンプル内の根長は正確に調査できるが，そのブロック内の根長を，圃場レベルで平均的な代表値として見なす場合，圃場における根長の真の値に対し，推定値となる．

本手法は，一土壌断面により圃場全体の根長を推定する方法であり，限りなく小さな（断面において微分化された）ブロック法と見なすことができる．また，第５図で実測根長と推定根長がほぼ１：１になったことは，精度は落ちるが，この式を用いて断根数から根長が推定可能なことを示しているものと考えられる．

土壌断面における断根数と土壌中の根長に相関がある場合，相関式を用いて断根数を根長に変換することも可能と考えるが，数値の裏付けができない．本式を用いることにより，点の数を長さに変換することが可能となる．ただし，土壌中に存在する細根の根長と断面根数に相関がないか，極端に相関が低い場合には正しい根長を推定することはできない．

この点については，今後どの程度の調査方法であれば信頼できるデータが得られるかについての検討が必要である．

以上より，本手法は，圃場においてばらつきのある分布をする根系の根長調査において，ブロック法に比べ精度の点で問題が残されているが，調査方法が簡易であるという利点があり，反復調査回数を増やすことで，比較的少ない労力で根長の推定ができる調査方法と思われる．

今回用いた立体中の線分長を求める式は，どのような形の立体でも適用できるため，体積さえ測定できれば，球状や様々な形の立体中に含まれる線分長を求めることが可能である．このため，根の調査以外にも立体にランダムに含まれる物質の長さを推定調査することに利用できるものと思われる．

謝　辞

本研究，投稿に当たって助言をいただきました，九州沖縄農業研究センター山下正隆博士，資料提供，助言をいただきました野菜茶業研究所茶業研究部佐波哲次氏，松尾喜義氏に感謝とお礼を申し上げます．また，不備の多かった本投稿を丁寧に審査助言していただいた編集委員の方々に深く感謝申し上げます．

引用文献

Newman,E.,I.,1966.A Method for estimating the total length of root in a sample.J.Appl.Ecol.3:139-145.

小野亮太郎,渡辺利通 1994.改良トレンチ法による茶樹細根の分布パターンの観察.茶研報 79:15-18.