



Title	電気伝導率測定による木部形成状況の非破壊的診断
Author(s)	今川, 一志; IMAGAWA, Hitoshi
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 43(3), 767-782
Issue Date	1986-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21189
Type	departmental bulletin paper
File Information	43(3)_P767-782.pdf



電気伝導率測定による木部形成 状況の非破壊的診断*

今川 一志**

Nondestructive Estimation of the States of Xylem
Formation by Electrical Conductivity Measurements*

By

Hitoshi IMAGAWA**

要 旨

カラマツ (*Larix kaempferi*) の樹幹で電気伝導率 (EC) を測定し、その部位の木部形成の状況を比較、検討した。その結果、電気伝導率は形成層細胞、拡大中の細胞、未木化の細胞などの細胞数と正の直線関係にあることがわかった。本研究は、木部形成の程度を非破壊的に診断することの可能性を示すものと考えられる。

キーワード： カラマツ、木部形成、電気伝導率、細胞数、非破壊的診断。

緒 言

樹木の肥大生長の大半は木部細胞 (カラマツの場合は仮道管) の継続的な集積、すなわち形成層で新たに生産された細胞の累積によって達成される。そのため、古くから木部形成に関しては多くの関心が寄せられ、特に林木育種などのような実際の分野では、その定量的経過 (細胞数や幅の増加経過) が注目されてきた。このような定量的経過を追求するための手段は幾つか考察され、実際に用いられている。たとえば、樹幹から小試料を定期的に採取し、顕微鏡観察を行なう打ち抜き法 (今川 1985)、極めて簡便な刺針法 (WOLTER 1968)、極く最近では電氣的刺激法 (IMAGAWA・ISHIDA 1983) などがある。しかしながら、このように幾つかの手段はあるものの、いずれの場合にも最終的には樹幹から試料を採取しなければならず、樹幹

* 1986年2月25日受理 Received February 25, 1986.

本研究の概要は第35回日本木材学会 (1985年4月東京) にて発表された。

** 北海道大学農学部木材理学講座

Laboratory of Wood Physics, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, N9, W9, Kitaku, Sapporo, Japan.

に損傷を与えることになり、林業的な見地からは十分な方法とは言い難い。それゆえ、樹幹を傷つけずに、木部形成の経過を定量的に知ることができれば、それは非常に有益な手段になりうると考えられる。

一方、樹幹の電気抵抗を測定して、その樹木の生理学的状況の指標としようとした試みは幾つか報告されている (COLE・JENSEN 1979)。特に、市販の携帯用電気抵抗計である“シゴメーター (Shigometer)”を用いた電気生理学的研究が広範に進められている。なお、この抵抗計の原理は SKUTT ら (1972)、TATTAR ら (1972) が提唱し、SHIGO と BERRY (1975) が実用化したものである。この抵抗計を用い、多くの研究がなされているが、BLANCHARD と CARTER (1980)、MILLER-JONE ら (1977)、NEWBANKS と TATTAR (1977)、SHORTLE (1982)、SYLVIA と TATTAR (1978)、TATTAR (1976)、WARD (1984)、WARGO と SKUTT (1977) らは樹木の種々の生理的状況との関係を追求している。また、CARTER と BLANCHARD (1978)、COLE (1980)、COLE と JENSEN (1979)、KILE ら (1982) らは電気抵抗と師部の厚さとの関係を追求した。特に興味深いのは、BLANCHARD ら (1983)、DIXON ら (1979)、KILE ら (1982)、KOSTKA と SHERALD (1982)、PIENE ら (1984)、SHORTLE ら (1977)、SMITH ら (1976)、DAVIS ら (1979) らの研究で、電気抵抗値と樹木の生長あるいは活性度との関係を研究したものである。なお、シゴメーター以前の電気生理学的研究については、FENSON (1966)、GLERUM と ZAULA (1973)、TATTAR と BLANCHARD (1976) らが紹介している。我国においては、黒田と勝屋 (1983) が初めてシゴメーターを使い、カラマツの根株心腐れの診断についての予備的研究を行なったが、十分な成果は得られなかったようである。また、IMAGAWA と ISHIDA (1982) は電気抵抗値と分化中の細胞数との間には負の相関のあることを見ている。

以上に述べてきたように、電気的な手法は多くの可能性を持っていると期待されるが、そのなかでも、樹木の生長あるいは活性度の指標 (すなわち、形成層活動の程度の指標) としての可能性は非常に注目に値しよう。電気的な手法によれば、その測定はほとんど樹幹を損傷することがない点からも林業などの実際的分野において多大の関心が寄せられるであろう。しかしながら、上述したこれまでの研究では、その測定値 (電気抵抗値) が樹体内部の何を示しているのか具体的に明らかにはなっていない。そこで、本研究では、そのような測定値の意味するものを確認することを目的とする。すなわち、これまでの研究結果から考えて、当年生の新生されたばかりの細胞が大きく影響していると推定されるので、その点について研究を進める。なお、ここでは、従来の電気抵抗の替りにその逆数の関係にある電気伝導率を測定する。

実験方法

電気伝導率の測定は3本の成熟カラマツ樹幹で行なわれた。その3本は北海道大学農学部実験苗畑に植栽されていた約25年生のもので、平均樹高は10m、平均胸高直径は25cmであった。伝導率測定は1984年の6月13日、7月20日、9月20日の3回行ない、毎回各供試木

の4方位(東西南北)で測定した (Fig. 1)。伝導率の測定は市販の液体導電率計 (横河電機製作所, モデルCS-51)で行なった。ただし電極部の一部は改良し, 新たに電極針を取り着けた。(Fig. 2)。電極針はステンレス針 (直径1.0 mm) で, 両者の間隔は1 cmとした。その電極針

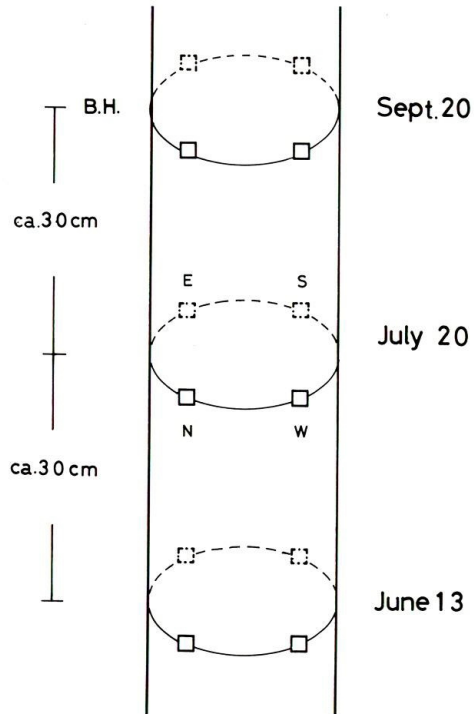


Fig.1. Schematic diagram of the sites of EC measurements and collections.

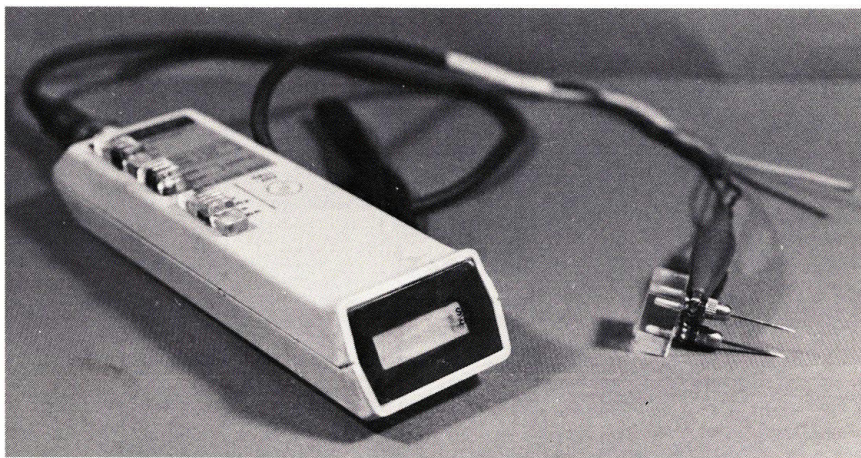


Fig.2. Photograph of the EC meter connected with stainless-steel needle electrodes.

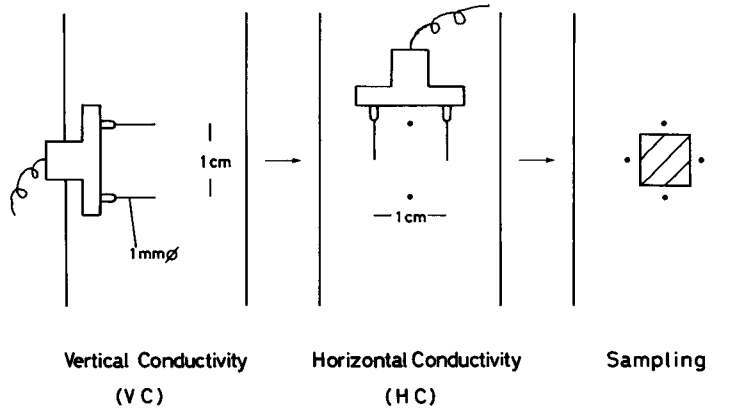


Fig.3. Schematic diagram of the experimental method of EC measurement and collection.

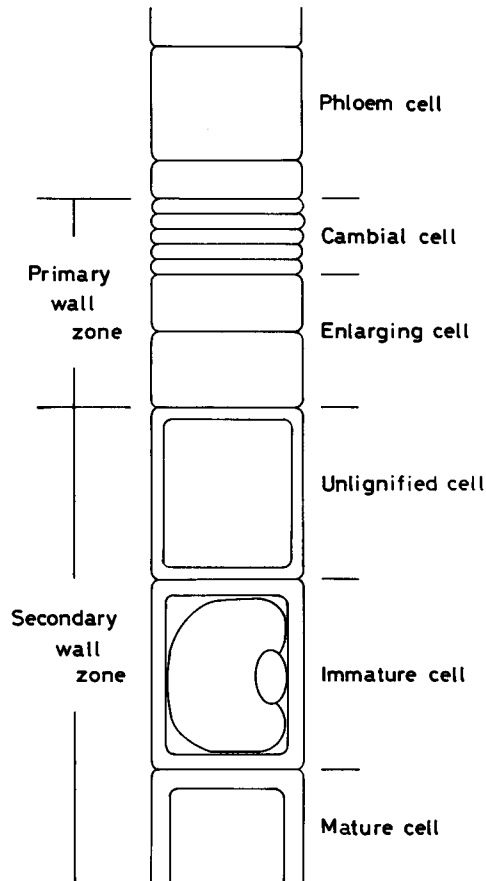


Fig.4. Schematic diagram of the definition of the various cells in the current growth layer.

を外樹皮表面から樹幹表面に直角に十分深く挿入し、同一部位の樹軸方向と水平方向の伝導率を測定し、両者の平均値をその部位の伝導率とした (Fig. 3)。

伝導率の測定後、直ちに測定部位から、師部と形成層と木部とを含む約 1 cm 角の試料を打ち抜き、FAA 液で固定し、常法通りセロイジンで包埋し、木口面切片を作成した。切片はサフラニンとファストグリーンの 2 重染色を行ない、検鏡した。形成層を含む当年生部の細胞につき、それぞれの形態学的特徴から以下のように分類し、それぞれの細胞数を測定した (Fig. 4)。すなわち、最も扁平な細胞を形成層細胞 (C) とし、その樹皮側にあり、半径径の拡大したものを師部細胞 (P) とした。また、木部側の細胞は複屈折の差違により 1 次壁帯と 2 次壁帯に大別した。さらに 1 次壁帯中の細胞を半径径の相違から形成層細胞と拡大中の細胞 (E) に分けた。また、2 次壁帯中の細胞は、サフラニン染色を示さないものを未木化の細胞 (U)、木化は始まっているがその内腔に原形質を保持しているものを未成熟細胞 (I)、原形質を消失してしまったものを成熟細胞 (M) とした。各切片において、10 半径方向細胞列につき、これら各種の細胞の数を測定し、その平均値をその試料の細胞数とした。これら各種の細胞の数、あるいはそれらの小計や総数と、その部位での伝導率との相関を求め、伝導率が意味しているものを知ろうとした。

結 果

各供試木とも各種の細胞の数はそれぞれの季節の特徴を示し、成熟細胞の数も順調に増加した。したがって、各供試木とも、継続的な試料採取にもかかわらず、通常の木部形成が行なわれたものと考えられる。ただし、7 月の 1 号木の東側からの試料中には傷害樹脂道が顕著に発達しており、明らかに正常な木部形成とは考えられなかったため、ここでは除外した。なお、3 本の供試木の中では、3 号木の木部形成が最も活発であり、1 号木が最も不活発であった。この点は、樹冠の発達状態とも良く一致していた。

Table 1 は、全測定部位での樹軸、水平方向伝導率および平均値を示す。しかし、6 月の 3 号木の西側には強い直射日光があたり、その部位の温度は明らかに上昇していた。そのため、異常に高い伝導率が測定されたので、この試料についても除外した。同一の測定日、供試木であっても、部位によって測定値はかなり異なる。部位により伝導率はかなり変動を示すが、各供試木とも、6 月と 7 月はほぼ同じ程度の伝導率と言え、9 月は明らかに低い。また、供試木ごとに見ると、3 号木の伝導率は常に高く、1 号木は常に低い。この傾向は、上述した木部形成の程度によく対応している。各樹幹において、4 方位の伝導率を測定したが、それには明確な傾向は認められない。

さらに、全測定値について、樹軸方向の伝導率は水平方向のそれよりも常に高い。これは、構成細胞が樹軸方向に長いことに起因するであろう。なお、両者の間には極めて高い正相関 ($r=0.97$) があり、その直線回帰式は $Y=1.45 X-11.20$ であった (Fig. 5)。ただし、Y は

Table 1. Summary of vertical (V. C.), horizontal (H. C.) and average EC (A. C.).

	June, 13				July, 20				Sept. 20			
	N	W	S	E	N	W	S	E	N	W	S	E
V.C.	133*	77	104	160	149	115	100	(158)	68	74	73	79
H.C.	107	66	78	111	108	93	78	(116)	57	58	57	65
A.C.	120	72	91	135	128	104	89	(137)	62	66	65	72
					TREE-2							
V.C.	143	151	157	140	160	157	134	131	102	89	96	107
H.C.	106	103	121	100	107	99	99	100	74	74	69	84
A.C.	124	127	139	120	133	128	117	116	88	82	83	95
					TREE-3							
V.C.	182	(259)	159	121	178	178	179	169	146	123	107	99
H.C.	149	(150)	123	101	136	128	133	122	112	95	79	79
A.C.	166	(205)	141	111	157	153	156	145	129	109	93	89

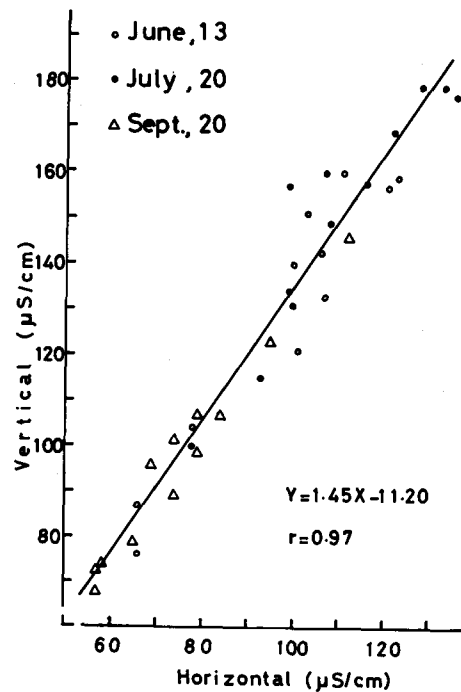
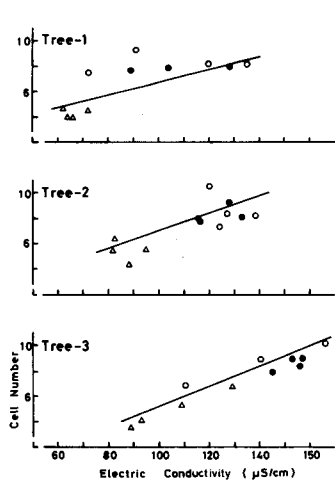
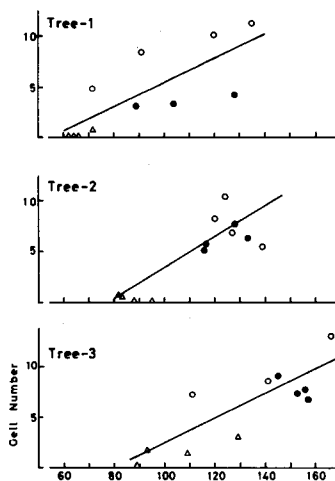
* ; $\mu\text{S}/\text{cm}$ 

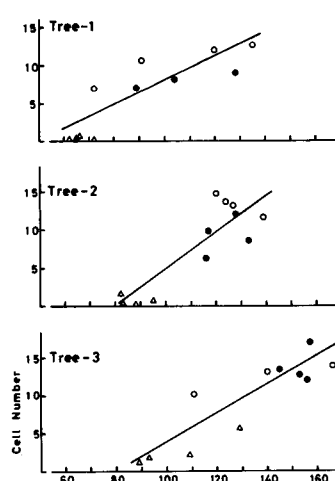
Fig.5. Relationship between vertical and horizontal EC.



○ JUNE,13 TREE-1 $r=0.74^{**}$ $Y=0.05X+1.75$
 ● JULY,20 TREE-2 $r=0.77^{**}$ $Y=0.07X+0.01$
 ▲ SEPT.,20 TREE-3 $r=0.96^{**}$ $Y=0.08X-2.80$
 **: SIGNIFICANCE AT 1%,3%



○ JUNE,13 TREE-1 $r=0.77^{**}$ $Y=0.12X-6.55$
 ● JULY,20 TREE-2 $r=0.84^{*}$ $Y=0.15X-11.55$
 ▲ SEPT.,20 TREE-3 $r=0.84^{*}$ $Y=0.12X-9.52$
 **, *: SIGNIFICANCE AT 1%,3%



○ JUNE,13 TREE-1 $r=0.85^{*}$ $Y=0.16X-7.89$
 ● JULY,20 TREE-2 $r=0.87^{*}$ $Y=0.24X-19.21$
 ▲ SEPT.,20 TREE-3 $r=0.90^{*}$ $Y=0.19X-14.97$
 *: SIGNIFICANCE AT 1%

Fig.6. Relationship between EC and cambial cells.

Fig.7. Relationship between EC and enlarging cells.

Fig.8. Relationship between EC and unligified cells.

樹軸方向の、Xは水平方向の伝導率である。両者には、このような密接な関係があることがわかったので、測定はどちらか一方の測定だけで十分なのかも知れない。しかし、カラマツの巡回木理は相当に顕著であることは良く知られており、その程度を樹幹表面から知る手法は確立されていない。したがって、樹幹表面から細胞の真の配向方向を知ることはできない。それ故、樹幹表面での見かけ上の樹軸方向、それに対して直角の水平方向の2方向の測定を行ない、両者の平均値を用いる方が、測定部位の内部指標としての伝導率としては適当と考えられる。

各部位の平均伝導率が樹幹内部の何を示しているのかを明らかにするために、各種の細胞数との関係を求めてみた例が、Fig. 6, 7, 8である。Fig. 6は形成層細胞との、Fig. 7は拡大中の細胞との、Fig. 8は未木化の細胞との関係を示す。それぞれ供試木ごとに示され、また測定日も記されている。また、それぞれの伝導率との相関係数および回帰直線式も示されている。これらの例のようにして、各種の細胞あるいはそれらを組み合わせた場合の相関の程度を示す一覧表がTable 2である。

まず、各種の細胞ごとの関係をみると、各供試木とも、形成層細胞(C)、拡大中の細胞(E)、未木化の細胞(U)の3種の細胞と伝導率が高い正相関であることがわかる。特に、拡大中の細胞については各供試木とも非常に高い相関関係にある。一方、師部細胞(P)、未成熟細胞(I)、成熟細胞(M)については、正あるいは負の相関が見られ、その値も低い。それ故、これらの3種の細胞は伝導率にあまり影響をおよぼさず、形成層細胞、拡大中の細胞、未木化の細胞の3種が伝導率に大きく作用するものと考えられる。

Table 2. Summary of Simple Correlation Coefficients

		TREE			
		1	2	3	ALL
Average Conductivity	P+C+E+U+I+M	(-)	(-)	(-)	---
	P+C+E+U+I	+*	(+)	(+)	+*
$\frac{V.C.+H.C.}{2}$	C+E+U+I+M	(-)	(-)	(-)	(+)
	P+C+E+U	+++*	+	+++*	+++*
	C+E+U+I	+++*	(+)	++*	++*
	E+U+I+M	(-)	(-)	(-)	(-)
	P+C+E	+++*	(+)	++*	++*
	C+E+U	++*	++*	+++*	++*
	E+U+I	++*	(+)	++	+*
	U+I+M	(-)	--	(-)	(-)
	P+C	(+)	-	(-)	(+)
	C+E	+++*	++*	+++*	++*
	E+U	++*	++*	+++*	++*
	U+I	(+)	(+)	(+)	(+)
	I+M	(-)	-*	(-)	(-)
	P : Phloem cell	(-)	--*	(-)	(-)
C : Cambial cell	+	+	+++*	+*	
E : Enlarging cell	++*	++*	+++*	++*	
U : Unlignified cell	+	++*	++*	+*	
I : Immature cell	(+)	(-)	(+)	(-)	
M : Mature cell	(-)	--*	(-)	(-)	

+, ++, +++ : correlation coefficients $\geq 0.7, 0.8, 0.9$ respectively.

-, -- : correlation coefficients $\geq -0.7, -0.8$ respectively.

--- : no correlation.

(+), (-) : positive, negative correlation coefficients $< |0.7|$.

* : significance at 1% level.

光学顕微鏡観察だけによって、各種の細胞を分別したため、その識別が十分に客観性を有するかどうか多少の疑問が残る。また、形態学的見地からあえて詳細に分別したものの、分化の程度の極く近いものを区分することが本研究の目的にとって必要なかどうか問題のあるところかもしれない。それゆえ、各種の細胞を単独で取り扱うだけでは不十分であり、それらを組合せた場合についての検討も必要と思われる。

そのような点から、まず隣接する2種類の細胞を組合せ、伝導率との相関を求めてみた。その結果、形成層細胞と拡大中の細胞との小計(C+E)、さらには拡大中の細胞と未木化の細胞の小計(E+U)が共に伝導率と高い正相関を示した。特に、3号木では両者とも非常に高

い値(0.9以上)である。また、それ以外の組合せでは、正あるいは負の相関であるが、いずれもその値はかなり低い。さらに、3種類の細胞を組合せた場合には、これまでの結果から十分に予測されるように、形成層細胞と拡大中の細胞と未木化の細胞との小計(C+E+U)が伝導率と強い正相関関係を示している。それ以外の組合せでは、供試木により相関の程度はかなり異なり、明確な傾向を認めることはできない。また、成熟細胞を含む組合せの場合には、これまででもそうであったように負の相関が示されているが、その値はいずれも低く、伝導率に強く影響を与えているとは考えにくい。さらに、4種類以上を組合せた場合には、供試木によって相関係数が大きく異なり、共通的な関係を見出しにくい。以上の結果からみて、形成層細胞と拡大中の細胞と未木化の細胞が伝導率に大きく影響を与えられ、また上述したようにこれら3者を厳密な意味から識別することは不可能に近く、分化の程度の近似性からそれらをあえて分ける必要もないと思われる。それ故、伝導率に強く影響するのはこれら3種の細胞の総数であると考えらるべきであろう。

Fig. 10はこれまでに得られた結論をより具体的に示すためのものである。すなわち、形成層細胞と拡大中の細胞と未木化の細胞との細胞総数と伝導率との関係を全試料について示したものである。同時に、測定日(試料採取日)の違いも示されている。全体的には、かなり高い正相関($r=0.82$)が得られ、また両者の関係は $Y=0.30X-13.14$ の直線関係である。したがって、この回帰直線式によれば、樹幹の任意の部位の伝導率を測定すれば、その部位のこれら3種の細胞の数を知ることができる。これら3種の細胞はいわゆる木部形成の現状を最も端

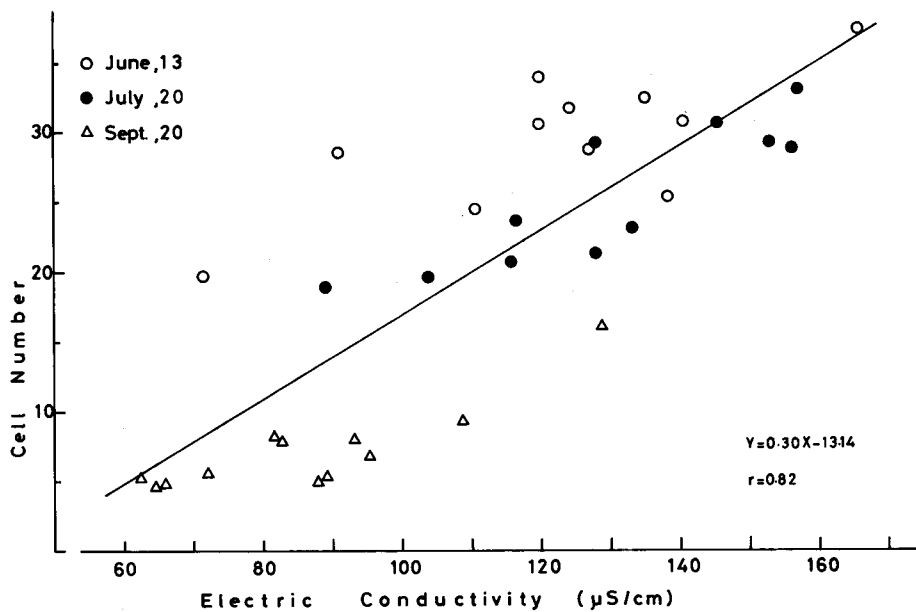


Fig.9. Relationship between EC and the subtotal of cambial, enlarging and unligified cells in all trees examined.

的に示すものと考えられるので、伝導率測定によって、その樹木の肥大生長の程度を推定する一つの指標が示されることになろう。ただし、9月の場合(△印)は、6、7月のものと幾分異なる傾向にあると見ることもできる。6月(○印)と7月(●印)のプロットは互いに混在しているにもかかわらず、9月のそれはそれらとは幾分離れている。すなわち、細胞数は少なく、伝導率も低く、6、7月とは分けて取り扱うべきかも知れない。測定時の気温は、6、7、9月がそれぞれ21、22、22°Cであり、ほとんど同じと見て差し支えなく、気温の影響は考えなくても良いと思われる。北海道のカラマツの場合、9月中旬にはその木部形成はほとんど終了間近である(今川1985)。それ故、休止期に近いことによる木部形成の質的变化、すなわちいわゆる季節的な影響のためであろう。

考 察

本研究の結果、伝導率が意味するものをある程度明らかにすることはできたが、研究は緒についたばかりであり、幾つかの問題点がある。以下では、それらについて若干の考察を進めることにする。

GLERUMとZAGULA(1973)はステンレス製の針を含め、材質の異なる4種の電極針を用いて電気抵抗を測定してみたが、材質による相違は認められなかったと報告している。また、シゴメーターを使った多くの研究でも、ステンレス製の電極針が用いられている。以上の研究例から、本研究でもステンレス製の電極針を使った。一方、KILEら(1982)やSHORTLEら(1972)やTATTARら(1972)はその先端部だけが非絶縁状態になっている特殊なステンレス製の電極針を使った。その結果、KILEらはそのような特殊な電極針に特別な有効性を見出せなかった。本研究の場合には、電極針は材中へできるだけ深く、しっかりと差し込んだので、その先端部は前年の年輪中へ達しており、そのような先端部だけが非絶縁である電極針を用いても意味がないと考えられる。それ故、本研究では絶縁部のない通常のステンレス針を用いた。しかしながら、電極針の全体が絶縁されていて、その極く限られた部分だけが非絶縁状態である針が得られ、その上そのような局所的な非絶縁部分の樹幹中での挿入速度が精密に制御され得るならば、樹幹内部の種々の組織ごとの詳細な伝導率を知ることができ、それは非常に貴重な知見を提供することになると考えられる。ただし、現在のところ、そのような特殊な電極や、精密な挿入装置は用いられていない。今後は、そのような電極針や装置の導入も必要であろう。本研究では、通常非絶縁性の針が用いられた。したがって、ここで得られた伝導率は主としてある程度の伝導性を有する幾つかの組織、すなわち形成層細胞と拡大中の細胞と未木化の細胞での各々の伝導率を総合したものが測定されたものと考えられるべきであろう。

文献によると、2つの電極針間の距離は、最低1 cm(KOSTKAとSHERALD 1982)から最大5 cm(DIXONら1978, WARGOとSKUTT 1975)で測定されている。電氣的測定に際しての影響因子の一つにその距離が挙げられている(FENSON 1966)。また、TATTERとBLAN-

CHARD (1976) によれば、電氣的測定の比較は同一の距離で行なう必要がある。それゆえ、本研究では、その距離を 1 cm に固定して測定した。ただし、この 1 cm の距離が本研究の目的に最適であるのかどうかの検討は行なっていない。今後は、種々の距離についても測定を行い、最適な距離を求める必要があろう。なお、予備的ではあるが、早野 (1984) はアカエゾマツについて、生長期の或る時点での伝導率と、その測定部位のその生長期間の木部形成幅との間には密な関係のあるらしいことを報告している。もしも、そのような関係が確認される場合には、1 cm という短い距離では、電極針の挿入による傷害組織の発達が考えられ (WOLTER 1968)、その後の木部形成が影響されるので、そのような目的のためには、もっと大きな距離の方が適当かも知れない。

本研究の場合、形成層細胞を含む当年生の細胞は、形態的な特徴に基づいて識別され、分別された。しかしながら、形成層細胞とそれに隣接している拡大を始めたばかりの細胞を確実に分別でき得るのかどうか大きな疑問が残る。その識別は、それらの細胞の半径径の相違に注目し、接線方向により扁平な細胞を形成層細胞とした。それ故、その分別はかなり相対的な面を有していること、さらには顕微鏡試料の作成中の寸度変化を否定し得ないことなどの点が考えられ、ここで数えられた各種の細胞の個々の数については慎重に取り扱わねばならない。したがって、各種の細胞を単独で検討するだけでなく、それらを組合せた小計についても取り扱い、むしろ後者の方を重要視することにした。一方、1次壁帯 (形成層細胞と拡大中の細胞) と2次壁帯 (未木化の細胞と未成熟の細胞と成熟細胞) との識別は、複屈折の相違に基づけば容易である (今川 1985)。また、2次壁帯中の細胞は比較的容易に3つに分別できた。未木化の細胞は2次壁帯中の細胞で、サフラニンによって染色されなかったものとした。ただし、さらに詳細な識別には紫外線顕微鏡を用いなければならない (今川ら 1976)。未成熟細胞はその内腔中に原形質を有しているものとした。FAA で固定したため、原形質分離が生じ易く、その確認は容易であった (IMAGAWA・ISHIDA 1981)。ただし、細胞の成熟にともなう原形質の消失過程が十分には解明されていないので、原形質の存否で分化中の細胞を区別するのが適当かどうか問題は残る。例えば、同一の半径方向細胞裂中であっても、木部側の細胞から規則的に原形質が消失して行かない場合も認められたので、この未成熟細胞の取り扱い方は今後十分な検討が必要であろう。このような問題点があったとしても、内腔中に原形質が保持されていると言うことは、その細胞はまだ生きていると見なして差し支えないと思われる。したがって、形成層細胞から未成熟細胞までの4種の細胞は生きていると考えることができる。しかしながら、未成熟細胞以外の3種の細胞だけが伝導率と強い関係を示した。これは、未成熟細胞の場合の原形質はいまだ保持されてはいるものの、それが消失過程にあるために、それ以外の生きている細胞の原形質とは質的な相違を有しているためかも知れない。あるいは2次壁の沈着の程度の相違についても考慮する必要があるのかも知れない。2次壁の沈着量を明らかにするには、セロイジン包埋では不十分であり、今後はエポキシ包埋を行ない、少なくとも 1~3 μm 厚の薄切

片法を試みる必要があろう (IMAGAWA・ISHIDA 1981)。

顕微鏡試料の作成中に生じたであろう各細胞の寸度変化を避けるために、本研究では細胞数についてのみ取り扱った。FENSON (1966), CARTER と BLANCHARD (1978), TATTAR と BLANCHARD (1976) らによれば、電気的測定の場合には生体試料の断面積も一つの影響因子である。それ故、各種の細胞、特に形成層細胞とそれ以外の細胞の半径径はかなり異なる点を考えると、ここで用いた細胞数よりも、半径幅の方が断面積に該当するのは明らかである。したがって、伝導率との関係を追求するには、各種の細胞の総半径幅を用いる方が適切であると考えられる。しかしながら、実際問題として、顕微鏡試料の作成処理中を通して、採取試料の本来の状態を維持することは非常に難しい。そのためには、電顕試料の作成法などの特別な処理法を試みる必要があるであろう。

樹幹中を流れる電流の通路については幾つかの説がある。CARTER と BLANCHARD (1978) はコルク形成層—師部—形成層、SHORTLE ら (1977) は木部と樹皮の接触部、TATTER と BLANCHARD (1976) は形成層領域、WARGO と SKUTT (1975) は形成層帯または木部の最外部であると言っている。換言すれば、低い電気抵抗あるいは高い電気伝導率は上述の組織部に由来すると言える。ただし、これらの説にもかかわらず、多くの電気生理学的研究においては、組織学的ないしは細胞学的に確証を得ていない。本研究では、伝導率と細胞数との高い相関の結果から、形成層細胞と拡大中の細胞と未木化の細胞とからなる部分が電流の主たる通路として機能すると推定した。上述したように、細胞数の代わりに半径幅が用いられるならば、さらに明確な結論が得られるものと期待される。

本研究で得られた結果から判断して、高い伝導率を示した細胞はいわゆる生きている細胞であり、それには豊富な原形質が保持されている。なお、師部細胞も光合成産物の通路となることから、一応は生きている細胞と見なすこともできるが、それが成熟した時には本来の原形質はまったく変質してしまう。したがって、ここで言う生きている細胞には該当しない。BLANCHARD ら (1983), PIENE ら (1984), SHORTLE ら (1977) はそのような生きている組織を化学分析した。SHORTLE らによれば、電気抵抗はイオン濃度、特にカリウムイオンに依存しており、さらにカリウムは若くて、活発に生長している領域に集中している。イオン化傾向の高いカリウムが抵抗値に強く影響することは十分に考えられる。BLANCHARD らは興味深かつ魅力的な説を述べている。すなわち、形成層帯中の細胞原形質には豊富なカリウムが含まれており、そこへ電極針を挿入すると細胞は破壊され、そのカリウムイオンは“apoplastic solution”中へ放出され、その結果電気抵抗が減少するとしている。ただし、この“apoplastic solution”の実体は判然とはしない。さらに、彼らは、たとえ個々の細胞のカリウム濃度が同じであっても、その細胞の集まり方(幅)が大きければ、電極針との接触面積が大きくなる筈であり、それ故形成層帯の幅が大きくなる程、電気抵抗(伝導率)は低く(高く)なると考えている。事実、本研究では、伝導率は細胞数に比例した。本研究で得られた結果は BLANCHARD らの説に

従えば、或る程度は説明し得るが、さらに明確に解明するには、一層の精密な実験が必要であろう。

電気抵抗の季節的変動については、DAVISら (1979) が *Acer rubrum*, *Quercus rubra*, *Pinus strobus* で、NEWBANKSとTATTAR (1977) が *Acer saccharum* で、KILE (1982) が *Eucalyptus obliqua*, *E. globulus* subsp. *bicostata*, *E. viminalis* でそれぞれ研究し、ほぼ同じような季節的傾向を示している。NEWBANKSとTATTARによれば、電気抵抗は休止期中は高く、6月中旬までの春季は徐々に低下し、初夏と盛夏中はほぼ一定の値を保ち、8月中旬から晩秋にかけて増加していく。アカエゾマツの電気伝導率の場合も、抵抗値とは逆の関係にあるが、同様の傾向を示している(早野 1984)。したがって、電気抵抗あるいは伝導率の季節的変動傾向は、木部形成のそれとよく対応していると見ることができる(今川 1985)。すなわち木部形成の季節的経過は電気抵抗のそれとは負の関係にあり、一方伝導率は正の関係にある。このような同調的な関係から考えても、電気伝導率は木部形成の状況を反映しているとする本研究の結論は支持されるものと考えられる。

DIXONら (1978), FENSON (1966), NEWBANKSとTATTAR (1977), SKUTTら (1972) らが指摘しているように、電気抵抗は気温の上昇と共に低下することは良く知られている。この点から、SHORTLEら (1977) は電氣的測定は生長期中の暖かい日に限って行なうべきであると述べている。なぜなら、そのような天候の場合には気温の変動は少ないと考えられるからであり、そのような日に測定した値についてのみ比較されるべきであるとしている。一方、そのような気温の影響を除くために、温度補正を行なった研究も幾つかある。例えば、PIENEら (1984) は測定された抵抗値を 15°C の場合に補正して研究した。また、DAVISら (1979) や早野 (1984) も適宜温度補正を行ない各値を比較、検討した。ただし、本研究では、KOSTKAとSHERALD (1982) の場合と同様に温度補正を行わずに研究を進めた。なぜなら、3回の測定日の気温(それぞれ 21, 22, 22°C) はほとんど同じであり、また最も重要なことは適当な補正法が見出されなかったからである。ただし、測定回数が多い場合やより詳細な研究を行なうような場合には温度補正が是非とも必要であり、信頼のおける補正法を早急に開発しなければならないと考えられる。

これまでに進められて来た電気生理学的研究の多くは、シゴメーターの開発に見られるように、電気抵抗を測定することによっていた。その結果として、ほとんどの場合、抵抗値と対象とする生理学的現象とは負の関係にあることが多かった。その上、その関係を図式化しようとする、その多くは双曲線状の曲線として示され、定量的に示すことは容易ではなかった。例えば、BLANCHARDら (1983), CARTERとBLANCHARD (1978), COLEとJENSEN (1978), IMAGAWAとISHIDA (1982), PIENEら (1984), TATTARら (1972), WARD (1984), WARGOとSKUTT (1975) らは双曲線状の曲線として結果を示している。一方、本研究では抵抗値とは逆数の関係にある伝導率を指標としたため、伝導率と細胞数とは直線的な関係として示され、

したがってその回帰直線式も容易に求められ、両者の関係を定量的に示すことは簡単にできた。これらの点を考えると、電気生理学的研究において、伝導率測定法は非常に有効な手法と見なすことができると考えられる。

結 論

カラマツ樹幹の電気伝導率はその測定部位の形成層細胞、拡大中の細胞、未木化の細胞の3種類の細胞の総数と密接な正の相関関係にあることが示唆された。この手法には本研究だけでは不十分な点が残つてあるが、そのなかで、細胞数に替わって細胞幅の点からの検討が最も重要であるように思われ、その点は今後の研究に待ちたい。その他にも未解決な点はあるものの、伝導率の測定は非常に簡単であり、樹幹の損傷もほとんどなく、その結果を定量的に容易に示し得る点など多くの利点を有していると考えられる。したがって、この伝導率法が十分に確立されれば、樹木の木部形成の状況を非破壊的に知ることが可能になり、林木育種などの実際的な分野にも大きく貢献することが期待できる。

文 献

- BLANCHARD, R.O.; CARTER, J. K.: Electrical resistance measurement to detect Dutch elm disease prior to symptom expression. *Can. J. For. Res.* 10: 111-114 (1980).
- BLANCHARD, R. O.; SHORTLE, W. C.; DAVIS, W.: Mechanism relating cambial electrical resistance to periodic growth rate of balsam fir. *ibid.* 13: 472-480 (1983)
- CARTER, J. K.; BLANCHARD, R. O.: Electrical resistance to phloem width in red maple. *ibid.* 8: 90-93 (1978)
- COLE, D. M.: Within-stand comparisons of inner bark electrical resistance in lodgepole pine-The bark moisture factor. *For. Sci.* 26: 309-312 (1980)
- COLE, D. M.; JENSEN, C. E.: Estimating phloem thickness in lodgepole pine stands using electrical resistance measurements. *Can. J. For. Res.* 10: 102-106 (1979)
- DAVIS, W.; SHIGO, A. L.; WEYRICK, R.: Seasonal changes in electrical resistance of inner bark in red oak, red maple, and eastern white pine. *For. Sci.* 25: 282-286 (1979)
- DIXSON, M. A.; THOMPSON, R. G.; FENSON, D.S.: Electrical resistance measurements of water potential in avocado and white spruce. *ibid.* 8: 73-80 (1978)
- FENSON, D. S.: On measuring electrical resistance in situ in higher plants. *Can. J. Plant Sci.* 46: 169-175 (1966)
- GLERUM, C.; ZAZULA, R.: Influence of various electrodes and tissues on the electrical impedance of woody stems. *ibid.* 53: 385-389 (1973)
- 早野三郎: 北海道大学農学部林産学科木材理学講座卒業論文. (1985)
- 今川一志: 樹木の木部形成、特にその季節的経過に関する研究. *北大演研報* 42: 149-178 (1985)
- 今川一志; 深沢和三; 石田茂雄: カラマツ (*Larix leptolepis* GORD.) 仮道管の木化経過に関する研究. *同上* 33: 127-138 (1976)
- IMAGAWA, H.; ISHIDA, S.: An observation of the cambial cells in *Larix leptolepis* by semi-ultrathin sections. *Res. Bull. Exp. For. Hokkaido Univ.* 38: 45-54 (1981)
- IMAGAWA, H.; ISHIDA, S.: Preliminary experiment of relationship between electrical resistance and

- state of cells in *Pinus luchuensis*. *ibid.* 39: 127-136 (1982)
- IMAGAWA, H.; ISHIDA, S.: New marking method by electrical stimulation for studying xylem formation. III Identification of the influenced tracheids. *ibid.* 40: 397-408 (1983)
- KILE, G. A.; KELLAS, J. D.; JARRETT, R. G.: Factors influencing electrical resistance in stems of *Eucalyptus obliqua*, *E. globulus* subsp. *bicostata* and *E. viminalis*. *Aust. For. Res.* 12: 129-138 (1982)
- KOSTKA, S.; SHERALD, J. L.: An evaluation of resistance as a measure of vigor in eastern white pine. *Can. J. For. Res.* 12: 463-467 (1982)
- 黒田吉雄; 勝屋敬三: シゴメーターによるカラマツの根株心腐れの診断に関する基礎資料. 筑波大農技演報 1号: 17-20 (1983)
- MILLER-JONES, D. N.; Houston, D. R.; Preece, T. F.: The use of electrical resistance measurements to detect watermark disease of cricket bat willow. *Plant Dis. Repr.* 61: 268-272 (1977)
- NEWBANKS, D.; TATTAR, T. A.: The relationship between electrical resistance and severity of decline symptoms in *Acer saccharum*. *Can. J. For. Res.* 7: 469-475 (1977)
- PIENE, H.; THOMPSON, R. G.; McISAAC, J. E.; FENSON, D. S.: Electrical resistance measurements on young balsam fir trees in relation to specific volume increment, foliar biomass, and ion content of bark and wood. *ibid.* 14: 177-180 (1984)
- SHIGO, A. L.; BERRY, P.: A new tool for detecting decay associated with *Fomes annosus* in *Pinus resinosa*. *Plant Dis. Repr.* 59: 739-742 (1975)
- SHORTLE, W. C.: Decaying Douglas-fir wood: Ionization associated with resistance to a pulsed electric current. *Wood Sci.* 15: 29-32 (1982)
- SHORTLE, W. C.; SHIGO, A. L.; BERRY, P.; ABUSAMRA, J.: Electrical resistance in tree cambium zone: Relationship to rates of growth and wound closure. *For. Sci.* 23: 326-329 (1977)
- SKUTT, H. R.; SHIGO, A. L.; LESSARD, R. A.: Detection of discolored and decayed wood in living trees using a pulsed electric current. *Can. J. For. Res.* 2: 54-56 (1972)
- SMITH, D. E.; SHIGO, A. L.; SAFFORD, L. O.; BLANCHARD, R.: Resistance to a pulsed electrical current reveal differences between nonreleased, released, and released-fertilized paper birch trees. *For. Sci.* 22: 471-472 (1976)
- SYLVIA, D. M.; TATTAR, T. A.: Electrical resistance properties of tree tissues in cankers incited by *Endothia parasitica* and *Nectria galligena*. *Can. J. For. Res.* 8: 162-167 (1978)
- TATTAR, T. A.: Use of electrical resistance to detect *Verticillium* wilt in Norway and sugar maple. *ibid.* 6: 499-503 (1976)
- TATTAR, T. A.; BLANCHARD, R. O.: Electrophysiological research in plant pathology. *Ann. Rev. Phytopatholgy* 14: 309-325 (1976)
- TATTAR, T. A.; SHIGO, A. L.; CHASE, T.: Relationship between the degree of resistance to a pulsed electric current and wood in progressive stages of discoloration and decay in living trees. *Can. J. For. Res.* 2: 236-243 (1972)
- WARD, J. C.: Influence of wetwood on pulsed-current resistances in lumber before and during kiln-drying. *Wood Fiber Sci.* 16: 598-617 (1984)
- WARGO, P. M.; SKUTT, H. R.: Resistance to pulsed current: An indicator of stress in forest trees. *Can. J. For. Res.* 5: 557-561 (1975)
- WOLTER, K. E.: A new method for marking xylem growth. *For. Sci.* 14: 102-104 (1968)

Summary

Electrical conductivity (EC) was measured in stems of Japanese larch, *Larix kaempferi*. The states of xylem formation in the positions measured was morphologically and cytologically examined, and the cell numbers of the current growth layers including cambial cells were counted.

The relationships between the EC and the cell numbers were investigated. As a result, the cambial, the enlarging and the unlignified cells indicated positive linear correlations to the EC, individually or together. In this study, therefore, the possibility for nondestructive estimation of xylem formation was suggested.