

精密機器による樹木診断の現状と課題

山田 利博

(東京大学千葉演習林教授)



1 はじめに

衰退したり、腐朽が入ったりした樹木に対し治療などの対策を立てるには、正確な診断が前提となる。肉眼や簡単な器具でもある程度の診断は可能であるが、比較のための数値を得たり、腐朽の範囲や程度を視覚的に示したりするには相応の機器が必要になる。ここではこうした機器を精密機器と呼ぶことにする。

Mattheck の VTA (Visual Tree Assessment) で体系化されている腐朽診断 (危険度診断) では、まずは目視あるいは鋼棒や木槌のような簡単な器具で衰退や腐朽の程度のあたりをつけ、次に精密診断を要すると判定されたものについて精密機器で腐朽の程度や範囲を数値あるいは画像として得ることで客観的な診断を可能としている。もちろん古木、名木など貴重な樹木については最初から精密機器の使用を含む診断がなされることになる。高価な精密診断機器はこのように一つの体系の中に位置づけて使わ

れるべきものである。

以下、精密診断機器の概要として、生理機能診断と腐朽診断について使われている機器、利用可能な機器を測定方法毎に測定原理や特徴、問題点を解説する。特徴や問題点には測定原理そのものに由来するものと製品化の段階 (ハードとソフトの両面で) に存在するものとがあり、両者は区別する必要がある。なお、それぞれの測定法で類似の製品がいくつもある場合も代表的な製品の紹介にとどめた。

2 生理機能低下、樹勢衰退の診断

温度 (高低温) や土壤養水分 (養分、過湿、乾燥) の不適、根腐れ、病害虫、老化など、なんらかの原因で樹勢が衰退すると様々な生理機能に障害が現れ、光合成や蒸散が低下する。主要な生理機能の診断法を表 1 に示すが、こうした機能の低下を検知して数値化できる精密診断機器は研究用に多数開発され、手法的にもほとんど確立されているといってい

表1 立木の主な生理機能の診断法

機能	測定量	製品例あるいは一般名	説明
光合成機能	光合成量	LI - 6400	実際の光合成量を測定
	クロロフィル量	SPAD、クロロフィルメータ	光合成のポテンシャルを測定
	クロロフィル蛍光	miniPAM	光合成効率を測定
水分生理機能	蒸散量	ポロメータ	蒸散量を測定
	蒸散流速	ヒートパルスほか	蒸散流速を測定
	水ポテンシャル	プレッシャーチャンバ、サイクロメータ	水ストレスの程度を測定
	アコースティックエミッション	-	エンボリズム/キャビテーション (水切れ) の発生を検出
水分生理機能 (間接的)	樹体 (樹冠、樹幹) 温度	サーモグラフィ (サーマルカメラ)、放射温度計	蒸散低下に伴う温度上昇を測定
	幹の収縮 (周囲長の変化)	ひずみゲージ、デンドロメータ	樹体内水分減少による収縮を測定

*製品としては他にもあるが代表的なものを示した。

い。ただし、数値レベルは樹種や状況で大幅に変わり必ずしも単純に比較できないため、簡便な測定で樹勢衰退を判定するのが困難な指標もある。以下で紹介するどの診断機器でも生理機能の低下は検知できるが、それができてはなにも原因であるのかの判定には至らない。また、機器診断で明らかに異常な数値が得られた時点では、葉色などで目視でも異常が感知できる場合が多い。こうしたことから実際の診断に使われている例は多くない。

(1) 光合成機能

光合成は種々のストレス（水ストレスその他の非生物的ストレス、病害などの生物的ストレス）や老化によって低下する。光合成機能を知るには、光合成量そのもの、光合成のポテンシャルであるクロロフィル量、光合成効率の一種であるクロロフィル蛍光を測定する方法があるが、測定原理は省略する。いずれも測定自体は簡便にできるが、LI-6400（図1）



図1 光合成蒸散測定システムLI-6400
写真提供：(株)メイワフォーシス



図2 クロロフィル蛍光測定装置miniPAM
写真提供：ナモト貿易(株)

のような光合成量や miniPAM（図2）のようなクロロフィル蛍光測定用の機器は高価である。クロロフィル量測定器（SPAD、クロロフィルメータなど）には現場用の比較的安価なものがある。

(2) 水分生理機能

種々のストレスによる衰退や水ストレスそのものによって蒸散量の低下、蒸散流速の低下、水ポテンシャル（木部圧ポテンシャル）の低下、通道組織内の水切れ（エンボリズム、キャビテーション）が生じる。蒸散量は光合成蒸散測定装置やポロメータで測ることができる。蒸散流速は熱収支法を用いたサップフローシステム（図3）や蒸散流の一部に温度を加えて高温部の移動をみるヒートパルス法で測定される。水ポテンシャルは葉部に外部から圧力をかけ軸の切り口から樹液が出てくる圧力を測るプレッシャーチャンバ Pressure chamber（図4）や、サイクロメータ Cyclometer（露点計）によって測定できる。単に水ポテンシャルを測るだけでなく、プレッシャーチャンバではP-V（pressure-volume）法によって水分生理特性を調べる方法もある。通導組織の水切れはアコースティックエミッション Acoustic



図3 サップフローシステム
写真提供 (株)メイワフォーシス



図4 プレッシャーチャンバ（携帯型と据置型）
左写真提供：(株)メイワフォーシス

emission によって検出することができるが、専用の製品はない。

(3) 間接的な水分生理機能測定

蒸散が低下すると葉（樹冠）や樹幹の温度が上昇する。この温度上昇を検知するものには、画像が得られるサーモグラフ Thermograph（サーマルカメラ）や単に一点の温度を測定する放射温度計がある。温度の測定なので日射の影響を受けやすく、また比較対象と同じ条件下で測定することがシビアに要求される。

水ストレス下で樹体内の水分が減少することで幹が収縮するが、これはデンドロメータ Dendrometer（バネ式やひずみ式がある）、ひずみゲージ Strain gauge を用いて測定することができる。ただし器具を長時間設置しておかなくてはならない。

3 腐朽、危険度の診断

腐朽の進行による倒木や衰退の危険性の診断は樹木医の機器診断の大半を占め、多種多様な手法、専用の機器が開発されている（表2）。腐朽や空洞の範囲や程度を数値で表すもの、さらに進んで範囲を2次元、3次元の画像で示したり面積を求めたりできるものがある。Bartlett や Mattheck などの危険度の基準が公表されてから、そうした基準に対応した

数値を得られる機器が求められるようになり開発が進んでいる。ただし、高機能の機器は高価であり測定にも時間がかかることから、VTA の手順に沿った目視による診断の重要性、簡単な機器や器具の意義は変わらない。精密診断機器としてわが国で実際の診断のデータが蓄積されている製品は、レジストグラフ、インパルスハンマー、ピカス、ドクターウッズ、ツリーガンマーといったところである。実用的な簡易 CT 化は音波を用いた機器が先行しており、放射線（X 線、 γ 線）、レーダーといった他の測定法では以前から本格的な CT 化が試みられているものの実用的な機器の開発には至っていない。その他に本格的な CT である MRI があるが、苗木の診断のみで野外での立木診断の実用化はできていない。

(1) 機械的強度測定

機械的な強度を測定する方法としては、試料を採取して強度を測定する機器、貫入抵抗を測定する機器、表面の腐朽では棒や釘を打ち込む機器が利用可能である。こうした測定法は針や刃を材内に入れていかなければならないためどうしても非破壊検査法となる。しかし、実際の強度を反映していることが最大の強みであり、非破壊検査法を補完するために使用されることもある。

表2 立木の主な腐朽診断法とその特徴

タイプ	測定形態	木への傷害	製品例	特性	
機械的強度	採取試料強度	1 方向	フラクトメータ I、II	腐朽型の判定や強度の測定が可能	
	棒／釘の打ち込み	1 点	ピロディン	表層の腐朽のみ検出可能	
	貫入抵抗	1 方向	レジストグラフ、DmP	実際の強度を直接反映する	
電気抵抗（インピーダンス）	1 方向	半非破壊	シャイゴメータ、Vitalometer	腐朽部の電気抵抗低下を利用、含水率の影響あり 材変色部で電気抵抗が低下する樹種、腐朽部で電気抵抗が変わらない、あるいは高くなる樹種あり	
	簡易 CT	非破壊 (釘埋込あり)	Picus tree-tronic		
音波	共振周波数		横打撃共振法 (市販品を組みあわせて使用)	ストレス波の共振周波数を測定 含水率の影響あり	
	ストレス波伝達速度	1 方向	非破壊 (釘埋込あり)	インパルスハンマー、 Electronic hammer	伝達速度は密度や強度等により変わる 含水率の影響不明
		簡易 CT		ピカス、ARBOTOM	傷や腐朽部の形状による影響あり
音響波伝達速度	簡易 CT	非破壊 (ネジ埋込あり)	ドクターウッズ	基本的にはストレス波伝達速度測定と同じ 周波数を変えることで広範囲の直径に対応できる	
放射線／ 電磁波	γ 線透過度	2 方向	非破壊	ツリーガンマー（ γ 線 樹木腐朽診断器）	透過度は密度により変わり、含水率の影響あり 野外で簡便に使うには線量の制限で大径木には対応 しない
		CT		-（試験的）	
	レーダー（反射波）	1 方向／ 簡易 CT CT	非破壊	TreeRadar unit -（試験的）	含水率の影響あり

*製品としては他にもあるが代表的なものを示した。

① 採取試料強度

採取した試料でもって診断する機器にはフラクトメータ Fractometer (図5)がある。本器は成長錘のように試料を抜き取らないといけないが、試料破壊時の力と角度から破断強度や曲げモーメント(フラクトメータ I、II)、圧縮強度(フラクトメータ II)を測定でき、延性(軟腐、白色腐朽)か脆性(褐色腐朽)かといった腐朽の種類や程度の判定が可能であることが特徴である。

② 棒/釘の打ち込み

辺材腐朽のような表層あるいはごく浅い腐朽を検査するのに適しているが、心材腐朽など深い位置の腐朽は検出できない。安価で測定が極めて短時間で済むため目的によっては有効である。針を打ち込むピロディン Pyrodin などがある。

③ 貫入抵抗

プローブ(ドリルと書かれているが形状は錐である)で穿孔するときの抵抗を測定する方法で、非常に簡便で1点の測定は短時間で済む。また、数方向から測定することで断面上での腐朽や空洞のおおよその範囲や形状を把握することができる。また、斜めに差し込んで根や根株といった地下部を測定することも可能であるが、これはCT機器にはできない芸当である。

代表的な機器がレジストグラフ Resistograph (図

6)で、腐朽の精密診断機器としては最も普及し実用性の高い機器である。本器の技術的な問題点としては測定深さがあげられる。ドリル長さ15~50cmのモデルがあるが断面全体を調べるのは直径1mまでが限界である。DmP(デジタルマイクロプローブ Digital micro probe)も似た機器であるが長さの異なるプローブに交換することができる。また、プローブの長さは20~100cmでレジストグラフより大径木まで測定可能である。レジストグラフの利点としてはプローブを破損しにくいことがあげられる。

本法は測定深度をむやみに大きくすることは困難であるが実用的にそこそこの深さまで使えること、プローブはDmPで先端径1.7mm、軸径0.9mm、レジストグラフで先端径3mm、軸径1.5mmと細く診断対象木となるような樹木では貫入の傷害は実際上ほとんど問題にないこと、価格、簡便さから、CT化された機器との棲み分けは可能である。非破壊検査法が進歩しても補完するデータを得るために使われていくことと思われる。

(2) 電気抵抗(インピーダンス)

材変色部や腐朽部ではK, Ca, Mgなどの陽イオンが集積し、電気抵抗値が低下する樹種が多い。この現象を利用し材内に孔をあけセンサーを差し込んで電気抵抗を測る半非破壊的な検査機器としてはシャイゴメータ Shigometer が知られている。また、孔



図5 フラクトメータII
中央目盛の手前に材のコアをはさんでいる

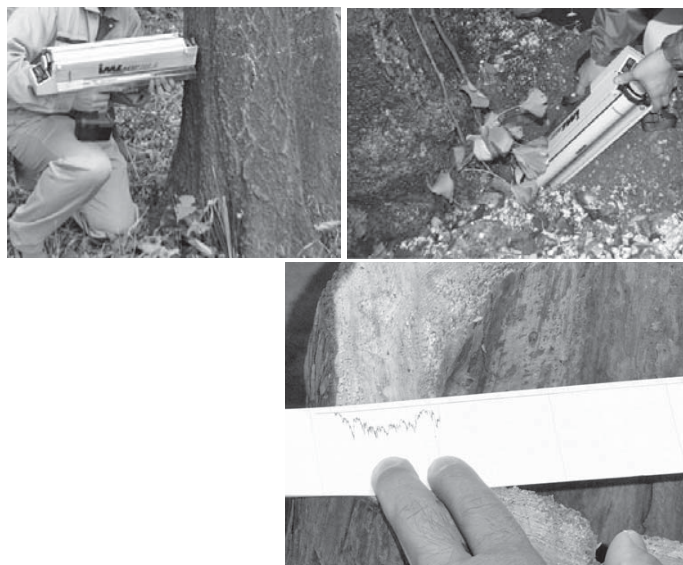


図6 レジストグラフ
右上: 斜めにして地下部の診断 右下: 診断結果

をあけることなく表面のセンサー間で電気抵抗を測定して内部を診断することもできる。こちらはセンサーを増やすことで簡易CTとすることが可能であり、Picus Treetricというピカス（後述）に付加したシステムが開発された。本法は電気抵抗を測定することから水分の影響を受ける。また陽イオンの集積や電気抵抗値の低下がみられない樹種もあり、そのような樹種では使えない。材変色と腐朽との区別がつかない樹種や腐朽程度もあり、実用的な診断法としては制約がある。

(3) 音波（ストレス波、音響波）

① 共振周波数

木槌による打診を進化させた方法と考えれば分かりやすい。腐朽が入ることで低下する共振周波数をFFTアナライザによって解析する横打撃共振法がある。打撃部を中心とする周囲の腐朽状況を総体として検知するため、腐朽の範囲や程度を個別に知ることができないこと、場合によっては打撃による損傷を与えることが問題点である。腐朽がないと分かっている場合には含水率（例えば心材含水率）の推定に用いることができる。逆にいえば、含水率の違いが腐朽診断に影響を及ぼすことになる。

② 音波（ストレス波、音響波）伝達速度

腐朽部や空洞では健全な材に比べて音速が低下したり、音波の伝達経路が迂回したりすることを利用して診断する方法である。空洞中では音波は空気中の音速 340m/s で伝わり材中（横方向で樹種、部位によって数百～2,000m/s 程度の範囲）よりはるかに遅く、また材から空洞、再び材へと伝わる間に著しく減衰する。進行した腐朽や空洞では迂回した信号の方が速かつ強いことから、大抵は迂回した信号の伝達速度を測定している。軸方向の音速の方が速いため腐朽や空洞を軸方向に迂回した信号が先に到達することもあり、誤差の一因となる。水中の音速は1,500m/sで各種の材の横方向の音速値の間に入る。そのため音波の伝達速度を利用する機器では水分の影響を受けにくい可能性があるが、どう影響するか実証されていないため今後の確認が必要であろう。

インパルスハンマー Impulse hammer（図7）

樹幹の両側に一對のセンサーをセットして一方を

ハンマーで叩き、ストレス波伝達速度を測定する。比較的安価で短時間に多数の診断ができる利点があるが、樹体内の音速は健全木でも樹種や成長状態、部位によって異なるため、結果の判定には健全木を含む同一樹種の多数のデータを比較することが必要である。断面内での腐朽や空洞の範囲や形状を把握することはできないので、簡便に使えるが他の精密診断機器が利用できる場合には使われる頻度は少なくなっている。ただ、ピカスのような機器のベースになった意義は大きい。

ピカス Picus（図8）

多数のセンサーを樹幹周囲にセットし、ハンマーで叩いた各センサー間のストレス波伝達速度を測って簡易CTで表示する。断面での最大密度を基準に表示するため、インパルスハンマーと異なり対照木を必要としない。測定可能最小直径は20cmだが、大径木に強くセンサー数を増やすことで最大直径は5mまで対応できる。製品化の成熟度が高く、インピーダンスを測定するセンサーを併用することもできる。複数断面を測定することで簡易3次元表示も可能である。ARBOTOMも似た機器でやはり3次



図7 インパルスハンマー 右下枠：ハンマー部分



図8 ピカス 左：センサー、中：ハンマー、右：診断画面

元表示ができる。

ドクターウッズ Dr. Woos (図9)

樹幹周囲にセンサーをセットし、発振した音響波の伝達速度から腐朽や空洞の断面形状を計算するものでピカスと同じような特性をもつ。さらに、波形の工夫で精度を高めるとともに、発振周波数を変えることで計測手法と精度を制御し径の異なる樹木に適した対応をしている。

ピカスもドクターウッズも線状（特に折れ曲がった線状）の傷や空洞を幅の広いものと誤認する傾向がある。これは音波の伝達速度の測定という原理上の問題であり、診断にはその特性を考慮する必要がある。

(4) 放射線、電磁波

音波と異なりセンサーを対象に密着させる必要が

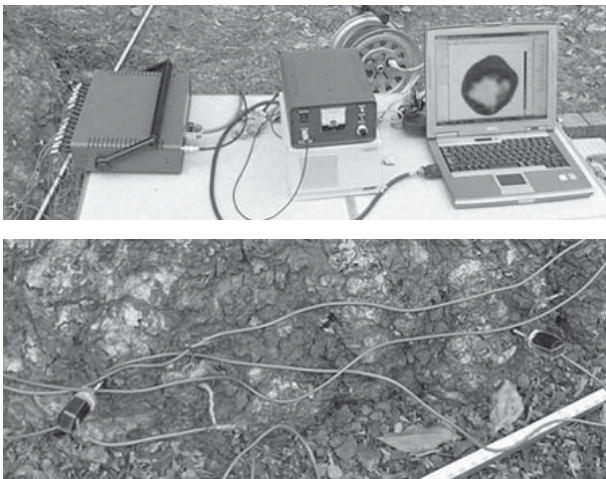


図9 ドクターウッズ 下:センサー

ないため完全な非破壊検査が可能である。

① 放射線

腐朽や空洞があると放射線の透過度が高くなることを利用して診断するもので、X線やγ線が使われる。本格的なCTも可能であり試験的な測定が行われたが、コストや様々なサイズの木に対応するのが困難なことから実用化されていない。X線の方が解像度の高い明瞭な像が得られるが大がかりな機器になることや被爆の問題があるのに対し、セシウム137 (^{137}Cs) やコバルト60 (^{60}Co) を線源とするγ線は資格がなくても使用できる線量で診断が可能のため以前から簡易診断が試みられてきた。透過度という誤差の少ない指標を用いるが水分の影響は避けられない。

ツリーガンマー (γ線腐朽診断器、図10)

街路樹など中径木までを対象に設計され、その目的内でバランスがとれている。原理的には大径木にも対応できるが製品の最大測定直径は1.5mである。樹幹を2方向からスキャンし、その測定結果を合わせて診断する。2方向からの測定という制約を理解して結果を解釈する必要がある。診断画面では腐朽は楕円で近似されるが、表示される腐朽の形状だけでなく2方向のグラフを読むことで詳細な診断ができる。

② レーダー

電波を照射し反射波の時間差から目標物の位置や形状を知る方法である。周波数を変えることで測定

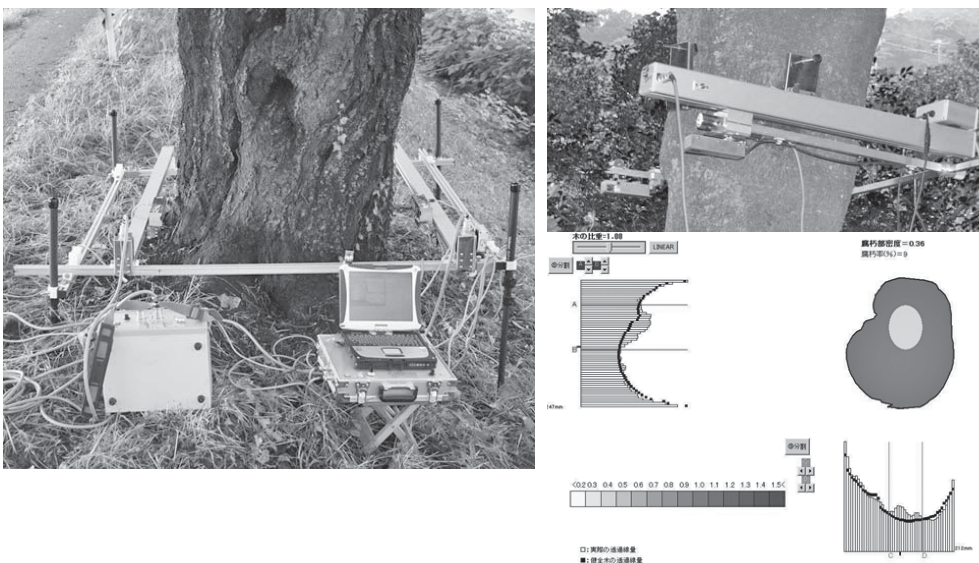


図10 ツリーガンマー 左:150cmモデル(写真 飯塚康雄氏)、右上:60cmモデル、右下:診断画面

範囲（透過性）と精度のどちらを優先するかを選択することができる。明瞭な反射波が帰ってくれば解像度が高いが、微弱な反射波を解析しなければならぬ実際の診断ではまだ精度的に十分でなく、また水分の影響を受ける。わが国ではまだほとんど導入されていない。樹幹縦方向のスキャン、ジオレーダーとして根の分布探知に加え、樹幹断面の簡易 CT としても使える TRU (TreeRadar unit) という便利なシステムがある。

4 おわりに

腐朽診断では、打診法が横打撃共振法に、インパルスハンマーがピカスに進化するというように、測定原理が同じでも測定方法や信号の処理方法によって質的に異なる情報を引き出すことができるようになってきた。ソフト的にはまだまだ進化し測定が自動化されるようになると思われる。しかし、結果を正確に解釈するには測定原理と計算方法を理解している必要があ

る。最新の簡易 CT 機器で健全部、腐朽部、空洞を描き分けている場合も測定値で分けられているだけで、実際を反映しているとは限らない。加えて、辺心材、材変色部、腐朽部の密度や含水率といった特性を樹種毎に知っていないと正確な診断はできない。機器の開発とともにこうした情報を蓄積し、測定結果と実際の腐朽や空洞との比較例を積み重ねていくことが必要である。また、複数の手法を組み合わせることで診断がより正確になる。例えば非破壊検査法とレジストグラフを併用することは効果的であり、ピカスでストレス波とインピーダンスを併用できるようになったことも歓迎できる。

樹木医制度が発足したときからは考えられないほど腐朽診断機器は進歩した。今後もメーカー、樹木医、研究者の連携で機器の開発とともに診断のノウハウが蓄積されていくことを期待したい。

キーワード：精密機器、樹木診断、生理機能診断、腐朽（危険度）診断、半非破壊検査、非破壊検査