新しい樹木腐朽検出法「振動共振法」の開発

小久保　亮

はじめに

近年台風等による街路，公園の樹木の倒伏が多く，人や車，建築物に被害を及ぼす危険性が高まっています。しかし，倒伏の原因の一つである幹の腐朽は，外観からだけでは把握できないこともあるため，発見は容易ではありません。腐朽診断の一方法として放射線で幹内の状況を画像化する装置も実用化されていますが，高価で手軽に使用できない欠点があります。そこで，林業試験場では，樹木を加振させて幹内に生じた共振（共振とは振動する物体に外部から固有振動数（物体に固有な物性を表す）に近い振動が加わった時，固有振動数に同期して振動が大きくなること）の周波数を測定することで，幹内部の「腐朽の有無」を手軽に把握する診断装置を実用化しました（脇田 2018）。この診断装置実現に先立ち，当場では新しい樹木腐朽検出法「振動共振法」（小久保・桜井 2009，小久保 2020，2023）を開発しました。ここでは，「振動共振法」のしくみについて紹介します。

従来法と新しい測定法「振動共振法」との関係について

従来法（横打撃共振法）ではハンマーで横打撃することにより発生した一つの共振から，その共振周波数を測定することで，腐朽診断をします。それに対して，「振動共振法」は，円周上の一点を加振器で振動させ，受振器で振動を捉え，音響解析装置により発生した複数の共振周波数を測定する方法です（小久保・桜井 2009，小久保 2020，2023）。幹をハンマーで打撃する従来法と異なり，「振動共振法」は 広い周波数の範囲（50～20000 Hz）で加振させるので，一番低い共振周波数（A）および A の倍数を持つ共振周波数（B，C，D）が発生します。この複数の共振周波数の測定により詳細に幹内の腐朽等の内部欠陥の情報を得ることができます（図-1）。

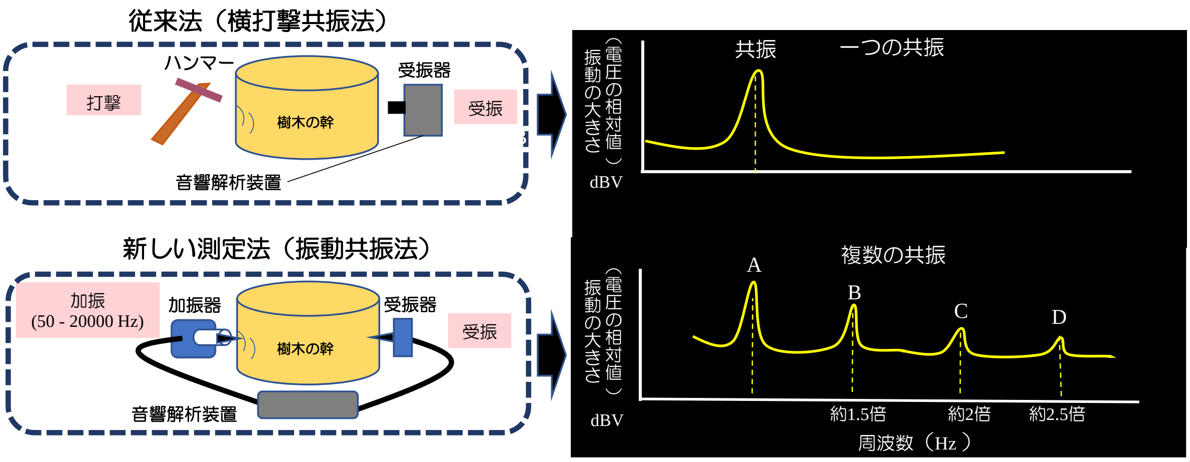


図-1　従来法および「振動共振法」の模式図

同一の幹の共振周波数を従来法および「振動共振法」の 2 種類の方法で測定した結果を図-2 に示します。樹種はシラカンバを用い，直径の異なる 3 種類の丸太（径 33 cm，　38 cm，　56 cm）で測定しました。いずれの太さでも，「振動共振法」で測定した最も周波数が低い共振周波数と，従来法で測定し

た共振周波数の間に有意差はありませんでした（小久保 2023)。このことから，「振動共振法」で測定される最も周波数が低い共振周波数は従来法と同様の幹内の情報を表すと考えられます。

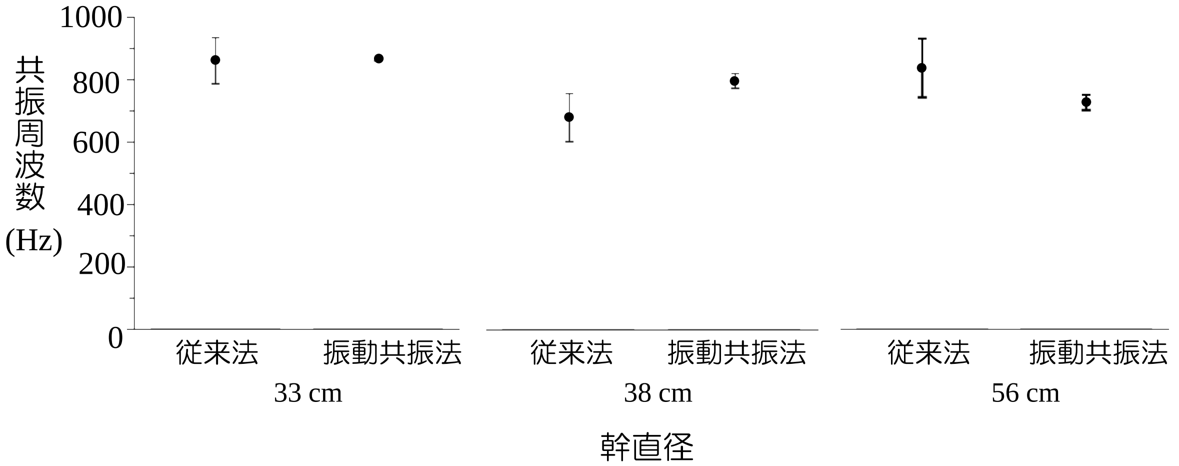


図-2　従来法 および「振動共振法」で測定したシラカンバの幹の共振周波数

従来法：「ぽん太，(株式会社ワールド測量設計)」を用い，DF 値（直径（cm）× 共振周波数（kHz)）を直径で割った共振周波数

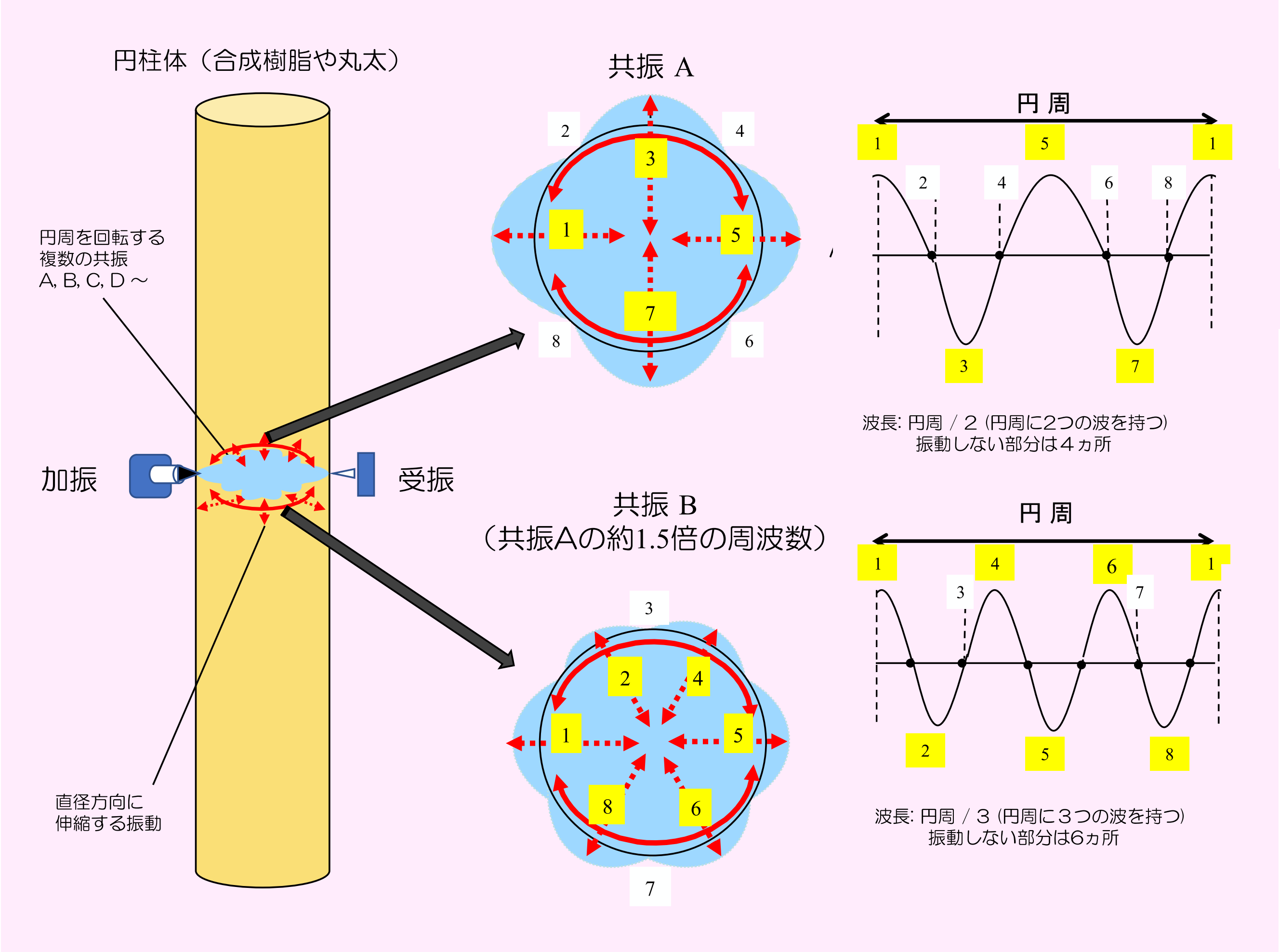
振動共振法：複数得られた共振のうち，最も周波数が低い共振の周波数

「振動共振法」による複数の共振から，円柱体内のより多くの部位の素材の物性の情報が得られる

次に振動の大きさが最も大きい共振 A と次に続く共振 B に着目して，振動様式の模式図を示します（図-3)。円柱体を側面から加振したときの波の振動様式のモデルは合成樹脂（Gladwell and Vijay 1975）や丸太（Axmon2002, 2004）で明らかになっています。合成樹脂や丸太の側面を加振した場合では，多くの重なった波が円柱体を振動させます。これらの波は円周の両側を回転して，円柱体の直径方向に伸縮する複数の共振周波数を生じます。共振周波数は物体に固有な物性を表すので，共振 A や共振 B の振動する部位から，それぞれ円柱体の断面の素材の物性の情報が得られます。その素材の物性の情報はかたさや密度で表せます。かたさや密度と関係するのは共振の伝達速度（円周を回る共振の速さ，図-3 参照）です。一般的に，共振の伝達速度は振動部位の$\sqrt{\frac{\text{かたさ}}{\text{密度}}}$と等しく，共振の伝達速度は共振周波数×波長（図-3 参照）で算出できます。もし振動する部位の素材が柔らかい，あるいは密度が大きい場合には，共振の伝達速度は小さくなります。逆に，振動する部位の素材が固い，あるいは密度が小さい場合には，共振の伝達速度は大きくなります。このように，複数の共振の伝達速度はそれぞれの振動する部位の素材の物性を反映します。しかし，共振 A や共振 B の振動する部位と振動しない部位は異なっています。円柱体断面での，共振 A が振動する部位は 1，3，5，7 で，共振 B が振動する部位は 1，2，4，5，6，8 です。すなわち，共振 A の伝達速度だけでは円柱体断面の素材の物性の一部の情報しか得られませんが，共振 A の伝達速度と共振 B の伝達速度の情報を合わせれば，1 回の測定で，円柱体の断面のより多くの部位の物性の情報が得られることがこのモデルより分かります。

ここで，腐朽の検出のしくみについて説明します。健全な幹は共振 A と共振 B の振動部位の素材の物性の情報が等しく，腐朽した幹では共振 A と共振 B の振動部位の素材の物性の情報が異なります。従来法では共振 A の共振周波数しか測定できませんが，「振動共振法」では共振 A と共振 B の振動部位の両方の共振周波数が測定でき，従来法より幹内のより多くの部位の腐朽等の内部欠陥の情報が得られま

す。またこの時，もし，かたさも密度も等しい理想的な円柱体なら，複数の共振のそれぞれの伝達速度は円柱体のどこの部位でも同じであり，伝達速度のばらつきが限りなく 0 に近づくはずです。



図–3 共振 A および共振 B の振動様式の模式図

：円周を回る共振（この速さが伝達速度）
：直径方向に伸縮する振動
：振動する部位　□：振動しない部位

「振動共振法」を用いた測定器の精度

そこで，「振動共振法」を用いた装置の精度の確認のため，均一な 2 種類の直径（10 cm および 15 cm）のアクリル製の円柱体で測定しました。実際の測定の結果，アクリル円柱体では共振の伝達速度はばらつきが 0.9 ～ 1.7 %であり（表–1），理論値と実測値がほぼ同一であり，「振動共振法」を用いた本測定器は共振測定に十分な精度であると考えられます。さらに「振動共振法」を用いて，生きている樹木において腐朽等の内部欠陥のあるなしでどのような違いが出るか確かめました。組織が生きている健全な生丸太と腐朽した生丸太（イヌエンジュ）を比較して調べたところ，腐朽した生丸太の共振の伝達速度のばらつきは健全な生丸太より約 3.5 倍大きく，腐朽により，生丸太の内部でかたさや密度などの物性にばらつきが生じていることを示唆します（表–2）。以上のように，「振動共振法」を用いて複数の共振を検出することで，腐朽等の内部欠陥を非破壊的に検出できます。

表−1 アクリル円柱体を用いた測定器の精度の確認

直 径 (cm)	共振の伝達速度のばらつき（%）
10 cm	0.9
15 cm	1.7

長さ 50 cm のアクリル円柱体の底面をスポンジにはさんで，床に立て，円柱体の側面を 50〜20000 Hz で加振し，共振を解析（n = 6）

表−2 「振動共振法」を用いたイヌエンジュ生丸太の共振の伝達速度のばらつき

種 類	共振の伝達速度のばらつき（%）
健 全	7.6
腐 朽	26.9

長さ 250 cm，直径（10〜18 cm）の生丸太 12 本（健全 6 本，腐朽 6 本）をスポンジ上に置き，幹の側面を 50〜10000 Hz で加振し，共振を解析

現在，当場ではこの「振動共振法」を応用，発展させて，樹木の腐朽診断装置を実用化し，市販しています。「振動共振法」では円柱体の素材の物性のばらつきを検出できるので，腐朽診断装置における腐朽診断への利用だけでなく，幹の内部の弾性率や密度などの特性を非破壊的に把握する技術開発への展開が期待できます。

（森林環境部　環境グループ）

参考文献

・Axmon J, Hansson M, Sörnmo L (2002) Modal analysis of living spruce using a combined Prony and DFT multichannel method for detection of internal decay. Mechanical Systems and Signal Processing 16: 561–-584

・Axmon J, Hansson M, Sörnmo L (2004) Experimental study on the possibility of detecting internal decay in standing *Picea abies* by blind impact response analysis. Forestry 77: 179-–192

・Gladwell GML, Vijay DK (1975) Natural frequencies of free finite-length circular cylinders. Journal of Sound and Vibration 42: 387-–397

・小久保亮・桜井直樹 (2009)「振動共振法」を用いた共振ピークと音速による樹幹の内部腐朽検出法の開発 第 120 回日本森林学会大会講演集，E06

・小久保亮 (2020) 加振した樹幹に伝わる共振の伝達速度の通年変化. 北方森林学会 68：17-19

・小久保亮 (2023) 振動共振測定装置を用いた 5 樹種の幹の共振に与える幹周の影響.樹木医学研究 27 (2): 103-110

・脇田陽一 (2018) 音を使った「非破壊型樹木内部腐朽診断装置」の開発. 農業電化 71 (6): 1-3