

# 高周波数の弾性波探査手法の新しい分野への適用

榎原淳一\* (JFE シビル), 毛利栄征 (農村工学研),  
竹内睦雄 (元 農村工学研), 杉山昌夫 (元 JFE シビル)

## Applications of high frequency P-wave exploration method to the new field

Junichi Sakakibara (JFE-C), Yoshiyuki Mohri (NIRE),  
Mutsuo Takeuchi (former NIRE), Masao Sugiyama (former JFE-C)

**Abstract:** We have applied high frequency P-wave exploration method, which was developed for underground survey, to the new field. In this paper, we show some experimental results, which are “monitoring the model foundation on the shaking table”, “inspecting outer damage of buried pipe from the inside”, “investigating inside of dam body” and “diagnosing inside decay in the standing tree”.

### 1. はじめに

構造物の維持補修、埋立て地や斜面の防災管理などにおいて、非破壊で内部を可視化する物理探査は重要な手法である。例えば、Fig.1 に示すように、ボーリング調査では把握することが難しい、地盤の不陸による基礎杭の杭長不足といった問題を可視化により解決することができる。ボーリングなどの破壊による直接的な手法に対して、物理探査は間接的な手法であるため、「可視化による分かりやすさ」という利点があるものの、「設計に必要な精度と計測結果の精度が一致しない場合がある」こと、「計測結果に対するユーザーの解釈が必要な場合がある」といった欠点(楠, 1997)もある。

JFE シビルと農村工学研究所は数年前から高周波数の弾性波を用いた地盤可視化技術の農業関連分野への適用について共同で検討を重ねてきた。本文はこの地盤可視化技術の概要と新しい分野への適用について報告するものである。

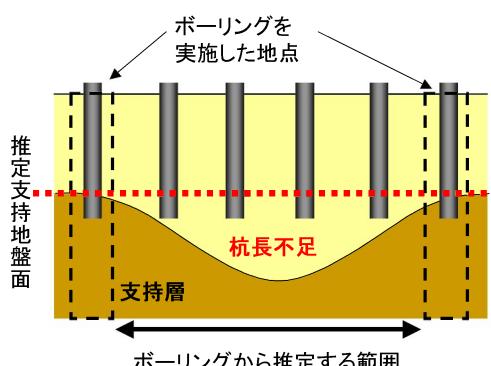


Fig. 1. 地盤の不陸による杭長不足

### 2. 高周波数の弾性波による地盤探査技術

JFE シビル(当時は川崎製鉄)はマイアミ大学と共同して、海洋調査などで用いられていた音響波と呼ばれる周波数域の弾性波を用いた探査手法を陸上での地盤調査に適用することに成功した(例えば Yamamoto et al., 1994)。その後、計測機器の小型化や

実証実験を重ね、基礎構造物の支持地盤調査への適用を確立してきた(例えば、榎原, 2007)。

本手法は高精度で広範囲の調査を行うことに特長があり、地表構造物の制約を受ける都市部での調査や広範囲の調査が必要な場合に、2 本の計測孔間の地盤断面を可視化情報として提供することができる。Fig.2 に計測システムの概要を示す。Fig.3 は従来の地盤探査手法を計測範囲と計測分解能の観点から整理して示したものであるが、従来のボーリング調査や地震探査の計測範囲と分解能は、図中に黒枠で示す「設計に必要な精度と実用的な計測範囲」の領域から若干離れていることが分る。例えば構造物の設計に必要な 1m 程度の分解能を得るためには、地盤中の弾性波速度が 2km/s の場合、発振周波数は 2kHz 以上が必要となる。一方、物体内部を伝播する波は、式(1)と式(2)に示すように、「発振周波数の指數関数」に比例した割合で減衰するため、周波数の高い弾性波を用いた場合には実用的な計測距離を得ることができないという問題があった。榎原(2007)が示すように、本手法では疑似ランダム波を発振波として用いることでこの問題を解決している。Fig.4 に疑似ランダム波の波形例を示す。連続波を用いることで周波数制御を可能とし、相関関数の計算結果である受信波形から初動走時と初動振幅を得ることができる。得られた受信波形は相関関数計算前の受信記録と比較して極めて高い信号/ノイズ比を持つため(例えば波数 4,095 で 62 千倍)、地盤中での減衰が激しく通常では受振波形を読取ることが出来ないキロヘルツオーダーの音響波を用いた計測を行うことができる。

$$A = \frac{1}{r} A_0 e^{-\alpha r} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\pi \cdot f}{V \cdot Q} \quad (2)$$

[ $A$  受振音圧、 $A_0$  発振音圧、 $r$  伝播距離、 $f$  発振周波数、 $V$  伝播速度、 $Q$  Q 値]

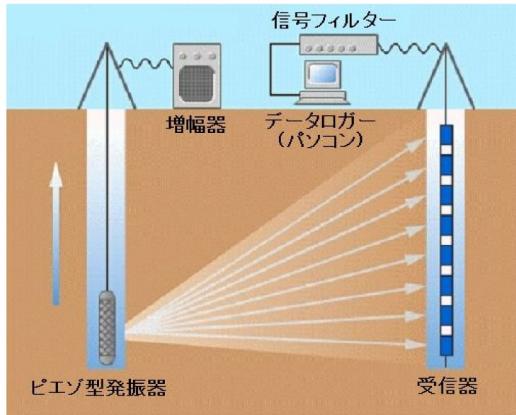


Fig. 2. 計測システム

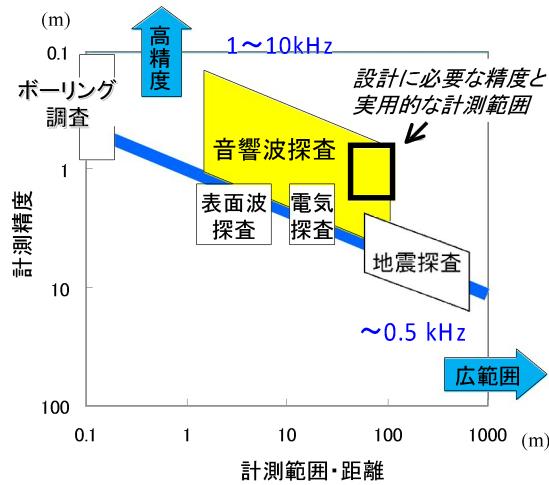


Fig. 3. 計測範囲と計測分解能の関係

Fig. 5 に比国マニラ港の桟橋建設基礎支持地盤調査(上図)に適用した例として速度分布図(下図)を示す。図中には3本の土質柱状図とN値を併せて示してある。地盤中の音速は1,700m/s~1,800m/sであり、ボーリング柱状図との比較から音速1,770m/sの部分に粘土層と砂礫層の境界があることが分った。同図から発振孔付近では砂礫層はGL.-40m程度にあるが受振孔側に向かうに従って砂礫層の上面の深度が浅くなっている。受振孔付近ではGL.-30mの深度にあることが分る。この傾向は土質柱状図とボーリングによる標準貫入試験の結果(N値)とも一致していた。調査結果の検証を行うため、調査後に施工した基礎杭の打設記録と比較を行った。図中に基礎杭の単位長さ当たりの打撃回数を実線で示しているが、白丸で囲んだ打撃回数の増加が始まる深度と速度分布図から得られる粘土層と砂礫層の境界が良く一致しており、本手法によって得られた支持地盤面の位置が正しいことが分る。

### 3. 新しい分野への適用 (1) (模型土槽中の地盤の均一性評価)

筆者らは、計測寸法や計測環境の制約により既存の手法では計測を行うことが難しいと考えられる

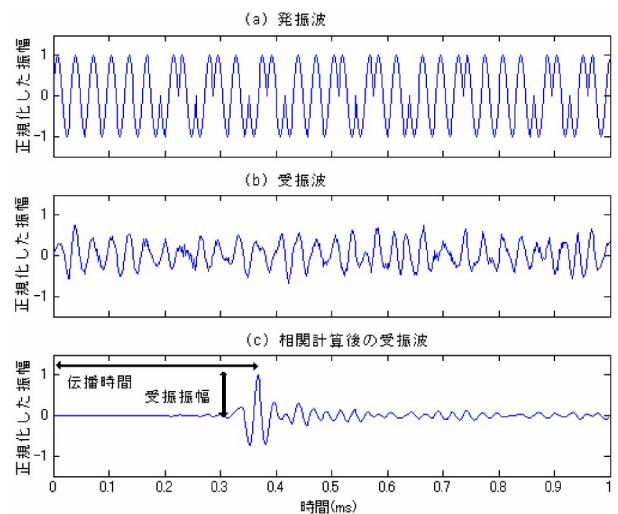


Fig. 4. 疑似ランダム波の例  
(a) 発振波, (b) 受振波, (c) 相関関数計算後の波形

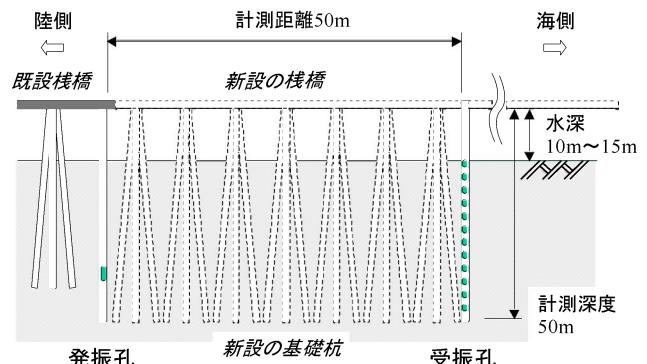


Fig. 5. 比国マニラ港における杭基礎支持地盤調査  
上図 計測レイアウト  
下図 計測結果(速度分布図)

分野、また、地盤調査とは全く異なった分野への適用についていくつか検討を重ねてきた。本文ではこれらの検討結果のうち、模型土槽の計測、導水管壁面と堤体内部の診断、樹木内部の診断について報告する。

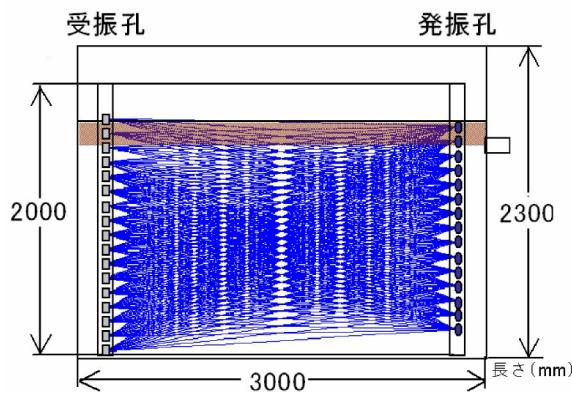


Fig. 6. 模型土槽内部の計測レイアウト  
(青線は波線を示す)

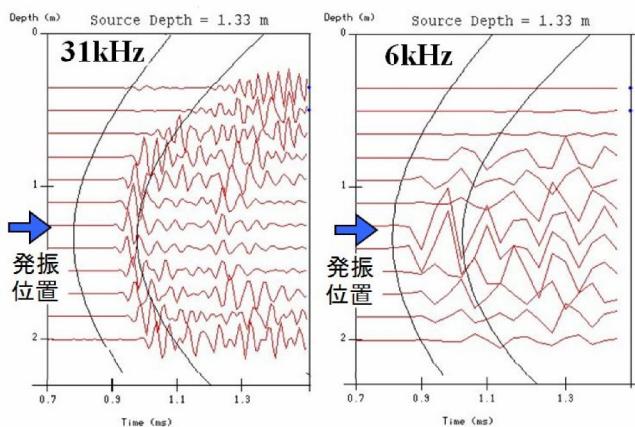


Fig. 7. 波形図の例  
(左 発振周波数 31kHz、右 発振周波数 6kHz)

液状化を対象とした飽和地盤の振動性状と入力振動の関係を明らかにしようとする場合には、地盤全体の飽和度とともに密度などの物理的な性状の均一性の確保が重要であるが、模型土槽が鋼製であることや実地盤に比べて発振点と受振点の距離が遙かに小さいことなどから土槽内部を可視化することは大変に難しかった。毛利ほか(2003)は振動台上に設置した模型土槽を用いた液状化実験において、土槽内部の砂地盤の均一性評価手法に本手法を適用した。Fig.6 は毛利らが用いた土槽の外観と計測レイアウトである。孔間距離は 2.67m、計測深度は 2.00m、試料として日光珪砂 3 号であった。Fig.7 に発振周波数 31kHz と 6kHz の受振波形の例を比較し

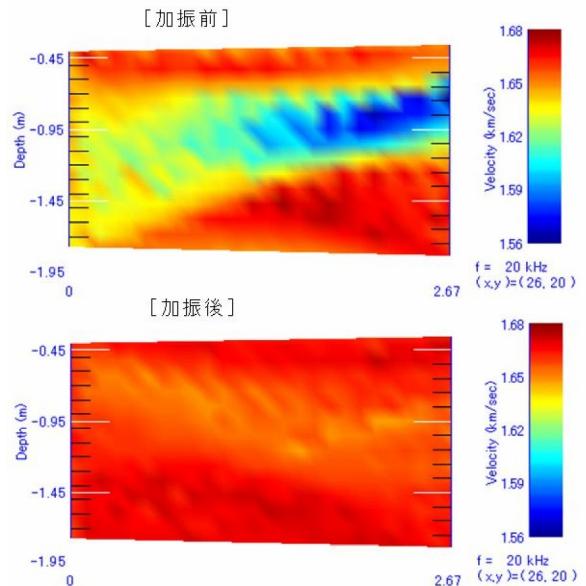


Fig. 8. 速度分布図(上 加振前、下 加振後)

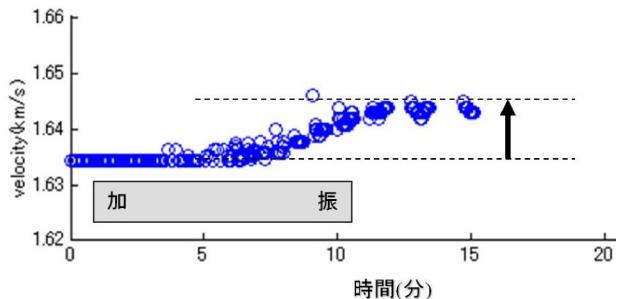


Fig. 9. 加振中の速度変化  
(発振点 深度 1.00m・受振点 深度 1.00m)

て示す。31kHz の場合には比較的均等に音が伝播しているのに対して、6kHz の場合には発振位置の正面の受振器に卓越して音が伝播していること、31kHz の波長(5cm)は 6kHz の波長(25cm)よりも短いため細かい地盤性状の変化の読み取りが可能であることが分かる。

Fig.8 に加振前後における計測結果の速度分布図を示す。加振前には低速度層を中心部に持つ 3 層構造を示していたが、加振後にはこの構造が消失し全体的に音速 1.66km/s～1.68km/s を示している。別途計測した模型地盤の相対密度は低速度を示す中央部で約 20%、加振前の高速度を示す部分や加振後は約 80% を示しており、Fig.8 の計測結果と良い相関が認められる。

毛利らは加振中の砂の挙動を連続的に把握し、土槽内部の状態をアニメーションのように出力するための予備実験も実施した。加振中の土槽は大きなノイズを発生させているため、通常は音を用いた計測を行うことは困難である。この予備実験ではノイズフィルターと疑似ランダム波の排他性によるノイズ除去効果を確認するため、加振 1 分前から深度 1.00m の発振点と受振点間の計測を 10 秒間隔で連続して行い、その後 10 分間の加振中、加振停止後 5

分間の合計 16 分間の計測を行った。Fig.9 にこの結果として初動波の速度変化を示す。加振開始の約 6 分後に速度が増加し、加振終了後も 2 分間は速度上昇が継続している点が興味深い。今後は連続計測を行うための発振点と受振点を増やし、模型地盤が加振により変形、移動していく様子をアニメーションとして可視化すべく開発を進めていく予定である。

#### 4. 新しい分野への適用 (2)

##### (埋設管の外壁健全性評価)

農業用の導水管など地中埋設管は地下水などの影響により外壁から徐々に浸食を受け、管からの漏水、地盤の浸食、最終的には管の破壊や地表陥没などの被害を引き起こす可能性がある。しかし、土中に埋設された管の外部点検のために開削工事を行うことは莫大な費用が必要で現実的には困難である。管の内部から点検する手法として打音による手法が提案されているが、水中で使用できないため管内を排水状態にする必要があり、また、点の調査であるため管の損傷の位置や大きさを特定することに課題がある。そこで本手法を用いて面的な調査を行うことにより、管内を排水状態にすることなく損傷の位置や広さを点検することを検討した。本検討における課題は、管の面的な調査を行うこと、管内部から管外部の損傷を把握することの 2 点であった。なお、本手法で使用しているセンサー類はもともと水中で使用しているため、水で満たされた管内での計測は特に支障がない。

まず、立体的な構造をしている管の壁面を計測する原理を Fig.10 に示す。管の両端に発振点と受振点を設置し、それぞれの発振点から起震した波を受振

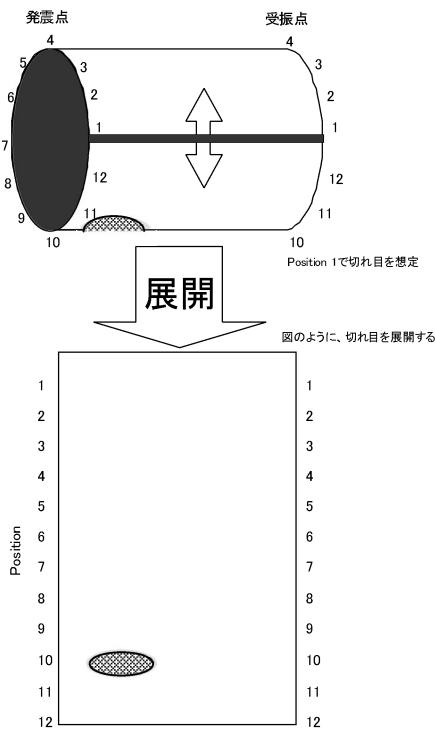


Fig. 10. 导水管の面的調査の原理

点で受振する。波は曲面に沿って伝播すると考えられるため、同図で示すように管を切り開いた状態で逆解析を行い速度と減衰率分布を計算することができる。実証実験を行うために、発振・受振センサーと壁面の接触が一定となるような改良を行った。また、実験には実際に埋設されていた導水管(Fig.11)を用いたが、外部の腐食の位置と大きさを外観検査で確認し計測結果と比較した。計測結果として速度分布を Fig.12 に示す。同図には外観検査から得られた腐食部の位置を点線で示してあるが、このすぐ脇に明らかな低速度部分が確認された。現段階では腐食部分における低速度の理由を解明できていないが、別の実験では肉厚減における音圧の変化(減衰率の増加)を確認しており、速度分布と減衰率分布を用いた腐食部の把握が可能であると考えている。今後は、腐食部における音の伝播の周波数特性と、管内を計測するためのロボット化について検討を行っていきたいと考えている。



Fig. 11. 実験に用いた導水管

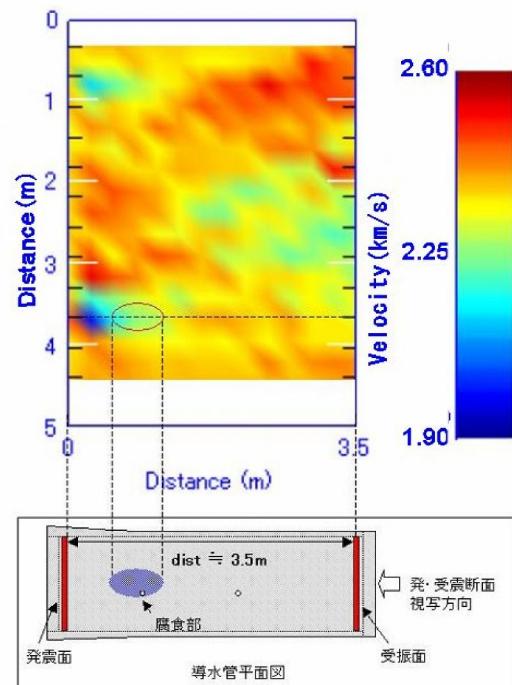


Fig. 12. 模型土槽内部の計測レイアウト

## 5. 新しい分野への適用 (3)

### (堤体のすべり面の評価)

ため池や河川堤防の決壊は重大な災害を引き起こすため、台風や地震後の点検のみならず日常的な点検は重要である。また、Fig.13 に示すように、すべり面の程度を正確に把握し、部分的な補修または全体的な補修を選択することは効率的な補修を行う上で重要なことである。筆者らは本手法をこのような堤体内部の調査に適用するために、不飽和地盤における音の伝播状況および地表での発振と受振方法の検討を行った。

前述したように、本手法は水中での使用を前提としているため、不飽和な地盤における計測は困難であると考えられていた。また、センサーを地表付近に配置することも課題の一つであった。そこで、ま

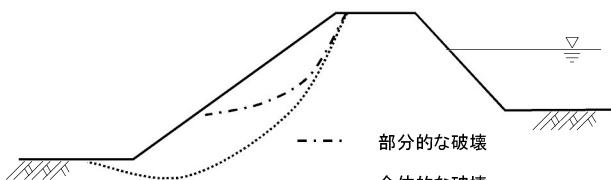


Fig. 13. 堤体におけるすべり面



Fig. 14. 実験の様子(黒矢印にセンサーを配置)

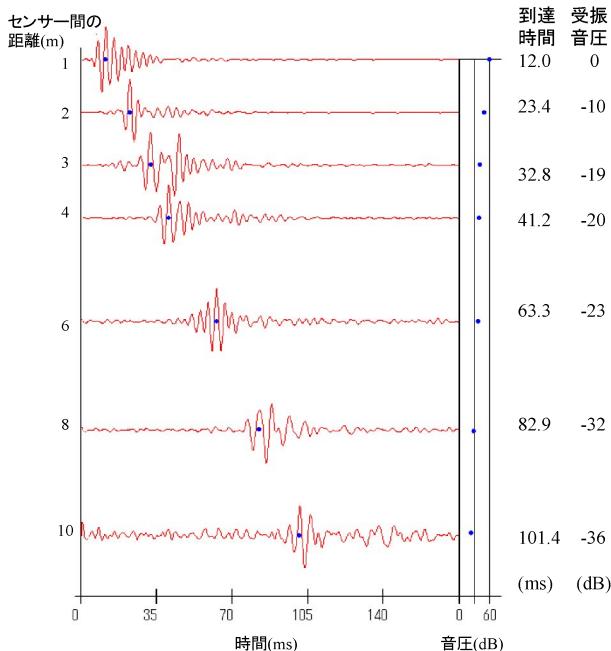


Fig. 15. 不飽和地盤における計測結果  
(個別波形で振幅を正規化してある)

ず、水圧を介して地中への音の発振と受振を行うセンサーを地表で用いることを検討し、深さ 50cm 程度の計測孔に泥水をため、センサーを孔壁に押付けることで発振と受振を行うことに成功した。この方法を用いて不飽和地盤における音の伝播性能の検証を行った。発振周波数は 250Hz、500Hz、1000Hz、センサー間距離は 1m から 12m であった。Fig.14、Fig.15 に実験の様子と実験結果として発振周波数 500Hz の時の受振波形をそれぞれ示す。なお、センサー間距離が 12m の場合には音の伝播は確認できなかった。同図から地盤中の伝播速度が約 100m/s であること、センサー間距離が 10m 離れると音圧が -36dB も減衰したことが分る。第 2 章の式(1)と式(2)は、音の減衰は周波数に比例、速度に反比例して指數関数的に増加することを示しているが、本実験で得られた伝播速度 100m/s は飽和地盤における音速 1,500m/s に対して遙かに大きな減衰を受けていることが分る。本実験では、発振・受振方法を工夫することで不飽和地盤でも計測が可能であることを示せたが、今後はさらにエネルギーの大きな震源を用いた効率的な起震を検討していきたいと考えている。

## 6. 新しい分野への適用 (4)

### (樹木内部の空洞診断)

我が国で最初の街路樹が植えられたのは 1867 年と言われており、それから 140 年を経過した後、街路樹の総本数は 670 万本にもなっている(2002 年国交省統計)。これらの樹木は経年劣化から内部に空洞や腐朽が発生しているものが多く、台風の通過後には街路樹の倒壊による車両や家屋、さらには人的被害も発生しており社会的な問題ともなっている。樹木の空洞・腐朽調査を行う既存技術としては、貫入抵抗を計測するレジストグラフがあるが、計測は針の通った一方向でのみなされているにすぎず、残りの大半を推定するしかないため、十分な調査が行えていない。この課題を解決し樹木内部の正確な空洞診断を行うため、榎原ほか(2007)は本手法を樹木内部診断に適用し、非破壊樹木内部診断システムの開発に成功した。

本システムでは医者の CT スキャンと同じように樹木の周囲にセンサーを設置して計測を行う。樹木内部に腐朽や空洞が存在する場合には、内部を伝播する波が空洞にさえぎられ迂回するため、結果として見かけの伝播速度は低下する(Fig.16)。一方、街路樹の直径は大きくても 1m 以下のものがほとんどであるため、正確な計測を行うためには適切な波長を用いる必要がある。例えば、直径 0.6m の樹木内部において 5cm 程度の空洞を検知するためには、波長が 10cm 以下となるように発振周波数を 20kHz 以上に設定する必要がある。榎原ほか(2006)は樹木に設置するための専用センサーと高周波数対応の増幅器、全自动で計測解析を行うためのソフトウェアを開発し実証実験を行った。Fig.17 は空洞のないユリ

の木の切株を用いて、人工的に空洞を広げながら計測した結果を比較して示しているが、空洞が大きくなると低速度を示す部分が多くなっており、空洞の大きさに対応した結果が得られていることが分る。Fig.18は直径 0.6m 程度のニセアカシアの立木(伐採前の生きている状態)の断面計測を行った後、計測断面を伐採して結果比較を行ったものである。計測結果と伐採後の断面写真において空洞の有無や大きさ、位置が良く一致していることが分る。Fig.19は神戸市内のケヤキの大木の外観と断面計測結果を示しているが、直径が 1.7m を超えるためこれまで

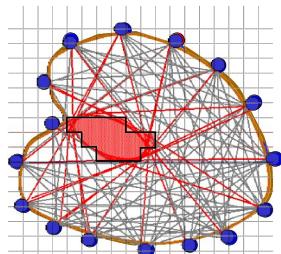


Fig. 16. 樹木診断器の計測原理

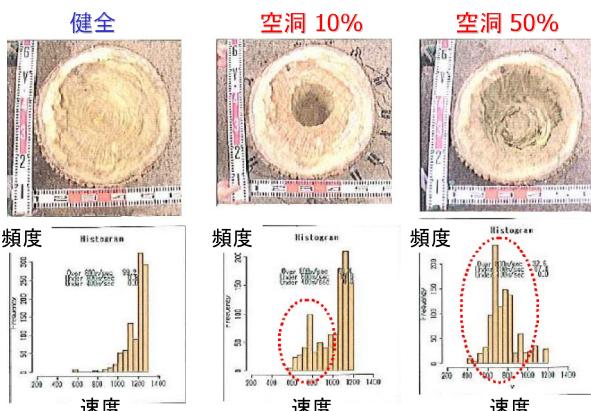


Fig. 17. ユリの木の空洞率と解析結果の比較  
(空洞が大きくなると低速度部分が増加する)

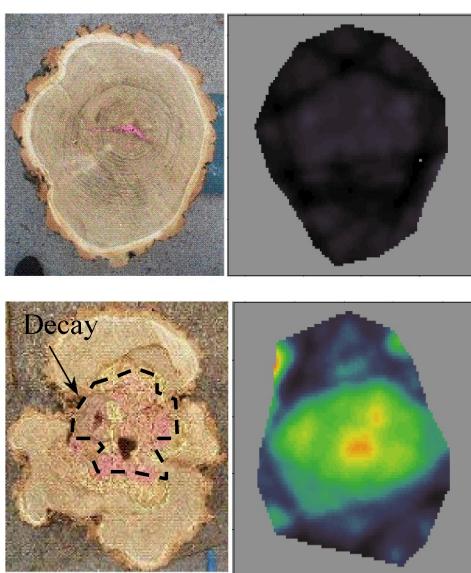


Fig. 18. 立木による実証実験の結果  
(上 空洞・腐朽無し、下 空洞・腐朽率 20%)

は十分な対処がなされていなかった。本システムにより中央付近の空洞を把握できたため適切な保全処置を講じることが出来た。

現在、立木の計測サンプル数は 400 本以上を越えており、樹種(固さ)による結果の違いなどを整理した後、新しい樹木内部診断器とし世の中に広めて行く予定である。また、本システムは樹木だけでなくコンクリート製の電柱や寺社などの木柱内部の把握にも適用可するべく検討を続けている。

## 6. まとめ

高周波数の弾性波による地盤調査手法を新しい分野に適用するための検討を行ってきた。模型土槽内部の計測や樹木内部空洞診断などはすでに実用段階にあるが、導水管外部の壁面調査や堤体内部の調査などさらに検討が必要なものもある。今後もさらに新しい適用を目指して開発を進めていきたいと考えている。

## 謝辞

これらの実験実施に協力を頂いた富重健一、田中真人(JFE シビル)、実験に対する貴重なアドバイスを頂いた山本教授(米国マイアミ大学)に感謝する。

## 参考文献

- 楠健一郎(1997)：物理探査法の地盤工学における課題と提言，土と基礎，45-9，19-22
- Yamamoto, T., Nye, T., Kuru, M., (1994): Porosity, permeability, shear strength: Crosswell tomography below an iron foundry, Geophysics, 5-10, 1530-1541
- 榎原淳一 (2007): 音響トモグラフィを用いた高精度地盤探査, 土と基礎, 55-11, 17-19.
- 毛利栄征、榎原淳一、山本督夫(2003)：音響透水トモグラフィによる大型模型地盤の均一性の可視化、第 4 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 125-128
- 榎原淳一、山添直也、中井堅(2007)：音響波を用いた樹木内部診断機の開発, 第 118 回日本森林学会大会論文集, B14
- 榎原淳一、田中真人、田近久和(2006)：音響トモグラフィを用いた構造物設備診断技術, JFE 技報, N0.11, 50-55

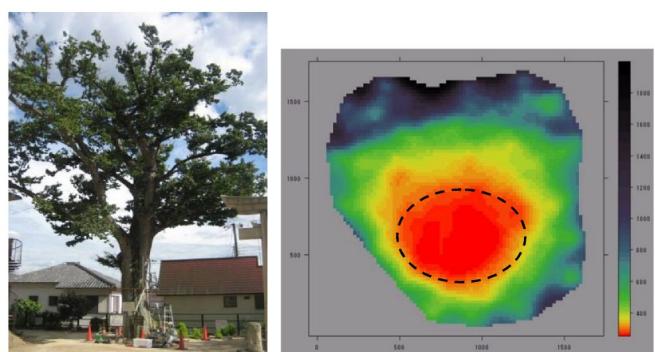


Fig. 19. 立木の計測結果  
(直径 1.7m のけやき(上)とその計測結果(下))