

超音波パルス法による土の物理性の計測

小山 修 平*

Ultrasonic Pulsating Method for Measuring Physical Properties of Soils.

Shuhei KOYAMA

Faculty of Agriculture, University of Osaka Prefecture

I はじめに

土(土壤)の物理的性質を計測するには様々な方法がある。近年、建設材料及び構造物の非破壊検査(NDTと略称されている)に代表される超音波パルス法が、広い意味における土の物理性(工学的も含める)を把握するために利用され始めている。超音波現象に関する最初の認識は、イタリアの生物学者スパンツァーニ(1729~1799)が、こうもりの特殊能力、(暗やみでも障害物に当らずに飛ぶことができること)を発見したことに始まるとされている¹⁾。しかしながら、最初の実用的な超音波装置は1921年頃に出現し、音響測探機であったと言われている²⁾。とくに第二次大戦中及び1945年以降超音波技術とその利用は急激に進歩した。一般に超音波とは、個人差はあるが、可聴音(約20Hz~20KHz)外の高周波数の音といえよう。

さて、土の物理性を計測するための最も身近な超音波装置という「超音波水分計」及び「超音波を利用した土粒子の分散」などが考えられる。しかし、ここでは、土中の水分も含め、土の間ギャク、密度及び構造などの広い意味における土の物理性を把握するために超音波パルス法の適用を考えてみる。

II 超音波計測について

一口に超音波計測といっても用途、目的によってかなり異なっている。一般に、超音波を通信的に応用することにより、種々の物質の物性(音波物性)を知ることができる。

表一¹⁾は超音波の応用分類を示したものであるが、通信的な応用とは超音波を信号として利用することである²⁾。

さて、超音波は、波自体、連続波とパルス波とに分類される。そして代表的な物性計測システムには、1)透過法、2)反射法、3)共振法、4)可視式探傷、5)超音波ホログラフィーなどがある¹⁾³⁾が、ここでは、最も簡単かつ有用なシステムとして主に1)について説明す

表一-1 超音波の応用例¹⁾

分 類	応 用 例
通 信 的 応 用 (信号として利用)	水中ソーナー、探測機、探傷器、流速・流量計、粘度計、応力分布の計測、通信機、フィルター、パルス診断(医学的応用)、物性研究など
動 力 的 応 用 (エネルギーとして利用)	洗浄、乳化、アルミニウムのハンダづけ、孔あけ・切削、鋳造、集じん細菌・ビールの破壊、手術、治療など

る。すでに述べたように1)透過法は、コンクリート用NDTとして広く利用されており、すでにかなり普及しているといえよう。筆者は、超音波パルス透過法により主に粘性土に関する広い意味における物理性を計測してきた⁴⁾。その計測システムは図一⁴⁾に示すとおりであるが、超音波による計測は一種の動的試験法であるのであまり大きな出力(エネルギー)を持った超音波を用いることは、土の状態を変化させてしまう場合(動力的応用の対象となる)もあり、注意する必要がある。しかしながら、室内で土供試体を対象として一般にコンクリート用のNDT装置を利用する限りは、ほとんど問題にならない。また、透過力の面からもほぼ妥当であると考えられる。なお、超音波発振子の重量、形状及び寸法などについては、十分考慮し、土供試体に静的変形を与えないようなものにするか、何らかの工夫が必要である。

さて、一般に超音波は音波である限り、縦波(P波)を用いることになるが、最近、横波(S波)の超音波も用いられるようになってきた。しかし、取扱い易さ及び経費の点から考えると縦波の超音波発振子の方が有利である。つぎに超音波を取扱う上で大切なことは、超音波の振動数(周波数)である。筆者の経験からいえば、土に対しては20~500KHz程度の振動数が適当ではないかと考えられる。一般に金属及び高分子材料の物性計測に

* 大阪府立大学農学部

はMHz（メガヘルツ）の範囲の振動数を利用することが多いが、土供試体では減衰が大きく少々無理なようである。ほとんどの場合、送受振子は、各々互換性を有し、その材質は、以前は水晶振動子が主流であったが、こわれやすいこと、高価なこと及び出力が小さいことなどから、現在は、安価なチタン酸バリウム及びその改良型のジルコン・チタン酸鉛（PZT）などの利用が増加している。安定度の点からは、水晶が最もすぐれており、つぎにPZTということになる。図-1に示す通り、計測システムは決して複雑なものではないので自作も可能であろう。

供試体を対象にした超音波計測で最も重要な点は、いかにして一定の送受信状態にするかということである。そのために、供試体と送受振子の接合法が重要となるがそれにはつぎのような方法がよく用いられている。1) 横あるいは鉛直方向から定圧力で押しつける。2) 常温硬化型の接着剤を利用。3) 供試体中に発振子を埋める。4) 非硬化型の接着剤（例えば真空グリス）を利用、するなどが考えられる。1) の場合は、供試体の端面の状況がたいへん重要であり、定圧力を得ることは困難である。2) の場合は、供試体の状況によっては不可能な場合もある。4) の場合が最も簡単かつ有効な方法

と考えられるが、この場合、非硬化型の接着剤により接着が可能な大きさ及び重量の振動子を用いるか、あるいは1)との併用が望ましいと考えられる。軟弱な供試体には3)の方法が有効と考えられるが、筆者は試みたことがない。いずれの方法を用いるにしても、振動子と供試体の接合状態が計測結果を左右するといっても過言ではない。写真-1は、1)の場合の供試体と振動子のセット状況の一例を示している。

III 超音波の計測指標について

超音波を土の物理性計測に適用させるといっても、直接、土の物理的性質を計測できる訳ではなく、あくまで間接的に超音波指標と土の状態との関係を知ることをいうのである。

さて、超音波パルス透過法で求められる主な測定指標は、1) 伝バ速度（位相速度及び群速度）2) 振幅 3) パワースペクトル密度などである。この中で最も簡単に計測することができるものは1)と2)である。一般に超音波パルスの伝バ速度は群速度になると考えられているが、応答振動数がほぼ単一と判断される場合は、位相速度と考えてよからう。本来、物質が弾性体と仮定できるような場合には、分散性の波動伝バとはならず、単に境界の状況により分散性波動となり、位相速度及び群速度と波長（振動数）の関係が重要となってくる⁵⁾。土供試体の場合には、第1次近似として多孔質弾性体と仮定できるが、分散性波動となる主な原因は、境界状態（供試体の寸法及び形状など）だけでなく供試体の内部状態によっても生じる可能性がある。したがって、室内で供試体中の超音波パルス伝バ速度を計測するには、まず伝バ速度と供試体の寸法・形状などとの関係を十分把握しておかなければならない。振幅計測の場合は常に発振子と供試体の接合状態を一定にしておく必要があり極めて難しいことであるが、図-2に示すように、少なくとも初

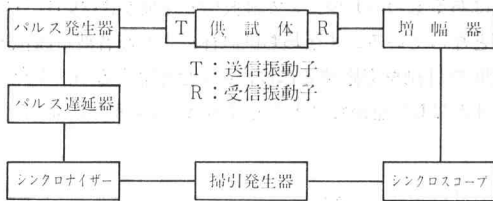


図-1 超音波パルス透過法による計測システム⁴⁾

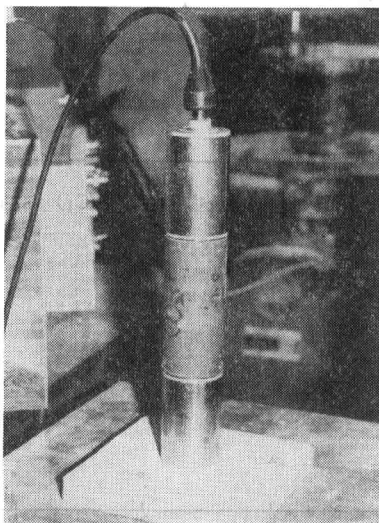
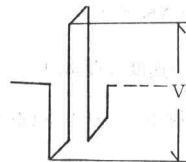


写真-1 セット状況の例

1. 発振子+受振子



2. 発振子+土供試体+受振子

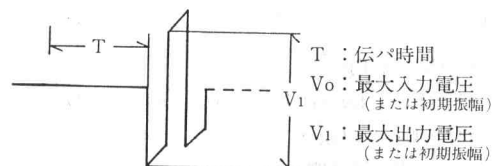


図-2 超音波伝バ波形モデル⁴⁾

期振幅及び最大振幅などを計測しておかなければならない。

次節には、超音波パルス伝バ速度を計測指標とした場合に計測上注意すべき点及び土供試体の内部状態計測例を示すことにする。

IV 土 壌 の 物 理 性 計 測 へ の 適 用 例

IV-1 超音波パルス伝バ速度に及ぼす供試体の寸法効果及び振動数の影響

超音波パルス縦波伝バ速度 C_1^* 及び横波伝バ速度 C_2^* に及ぼす供試体の寸法 (直径及び長さ) の変化の影響を検討するために基準供試体として様々な寸法のアルミニウム及び硬ポリエチレン樹脂の円柱を利用した。これらの実験結果の一例を図-3(a)及び図-3(b)に示す。図中の C_1 、 C_0 及び C_2 の値については表-2 に示す通りであ

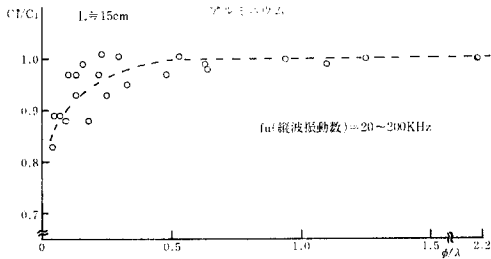


図-3(a) 縦波伝バ速度 (C_1^*/C_1) vs. ϕ/λ

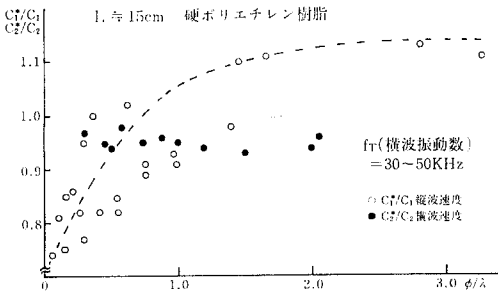


図-3(b) 縦波及び横波伝バ速度 (C_1^*/C_1 , C_2^*/C_2) vs. ϕ/λ

表-2 基準供試体中の伝バ速度 (理論値)

伝バ速度	アルミニウム ¹⁰⁾	硬ポリエチレン樹脂 ¹⁾
C_0 (m/s)*	5000	1755
C_1 **	6420	2209
C_2 ***	3040	1069

* : $C_0 = \sqrt{Eg/\rho}$

** : $C_1 = \sqrt{Eg/\rho} [(1-\mu)/(1+\mu)(1-2\mu)]$

*** : $C_2 = \sqrt{Gg/\rho}$
 $g = 980(\text{cm/s}^2)$

*1) : 実測値(1978)

表-3 基準供試体の物理的性質

項 目	アルミニウム	硬ポリエチレン樹脂
比 重 ρ	2.69*	0.96**
ヤング率 E	$7.2 \times 10^{10}(\text{kg/cm}^2)$	$3.0 \times 10^{10}(\text{kg/cm}^2)$
剛 性 率 G	$2.76 \times 10^{10}(\text{kg/cm}^2)$	$1.1 \times 10^{10}(\text{kg/cm}^2)$
ポアソン比 μ	0.304*	0.347**

*理科年表 (1975)¹⁰⁾ **実測値 (1978)

るが、 C_1 : 半無限媒体中の縦波伝バ速度、 C_0 : 棒中の縦波伝バ速度及び C_2 : 半無限及び棒中の横波伝バ速度を表わしている。また、使用した基準供試体の基本的性質は表-3に示す。図-3(a)、図-3(b)から分るように伝バ速度 C_1^* は ϕ/λ (ϕ : 供試体直径、 λ : 伝バ波長) の増加に伴い比較的急激に増加し、 $\phi/\lambda \geq 1 \sim 2$ で C_1^* が一定値に近づいて行く。この一定値とは、縦波のときは半無限媒体中の縦波伝バ速度 C_1 に一致するようである。横波の場合は、 ϕ/λ の変化にほとんど影響されていない。以上の図では、横軸に ϕ/λ ととり、伝バ速度と供試体直径及び波長 (振動数) の関係となっているが、さらに具体的に伝バ速度に及ぼす供試体の寸法効果を知るには、横軸に L/ϕ (L : 供試体長さ) をとるべきであろう。この図の一例を図-4(a)及び図-4(b)に示す。ややバラツキはあるものの $L/\phi \leq 2$ で縦波伝バ速度 C_1^* は C_1 に近い値となっている。すなわち供試体により超音波縦波伝バ速度の計測を実施するには、 ϕ/λ を考慮するか、 $L/\phi \leq 2$ または L/ϕ をかなり大きくすれば、 C_1 または C_0 とし

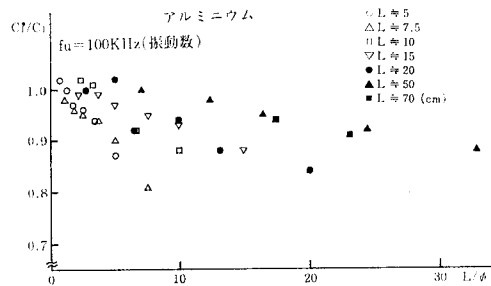


図-4(a) 縦波伝バ速度 (C_1^*/C_1) vs. L/ϕ

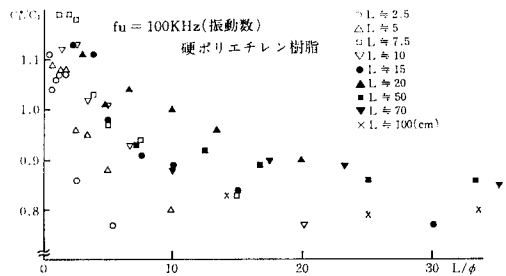


図-4(b) 縦波伝バ速度 (C_1^*/C_1) vs. L/ϕ

て計測できると考えられる。ただ、土供試体では $L = 5 \sim 10\text{cm}$ 及び $\phi = 2.5 \sim 10\text{cm}$ 程度が適当であるので、 $L/\phi = 1 \sim 2$ の場合がよいだろう。 $L/\phi = 2$ というのは土供試体では標準供試体に一致しており、他の工学的試験を実施する上にも極めて都合がよい。上記の計測結果例は、有名なPochhammer (1876) 及びChree (1889) の理論的解析結果⁶⁾とは異なっている。(彼らの理論では縦波伝バ速度が ϕ/λ の増加に伴い減少する。)しかし、Khazin ら⁷⁾ (1975) の ϕ/λ による縦波伝バ速度の分類、Tu⁸⁾ ら (1955) の鋼、アルミニウム棒などの実験結果及び緒方⁹⁾ (1977) のアルミニウム棒中の縦波速度の実験結果などとはよく類似している。また、最近、多谷¹⁰⁾ (1976) によって理論的かつ実験的に Pochhammer らの理論の欠点・誤りが指摘されている。なお、図-5は、土供試体を用いた伝バ速度への寸法効果を調べた例であるが、寸法(供試体直径及び長さ)を大きく変えることができないので、その影響の程度は明らかではない。いずれにせよ、伝バ速度が複雑に変化するような場合は避けるべきであり、超音波パルス透過法(20KHz以上の振動数)で使用する供試体は、前述の標準寸法のものならば、常に半無限媒体中の伝バ速度に一致していると考えてよいだろう。ただし、伝バ波長が土粒子に何らかの影響を及ぼす可能性が残されており、極端に短い波長を使用することは避けるべきである。

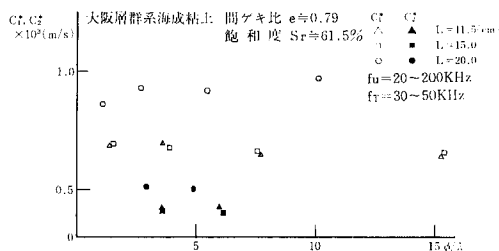


図-5 縦波及び横波伝バ速度 (C_1^*, C_2^*) vs. ϕ/λ

IV-2 超音波パルス縦波及び横波伝バ速度と土の状態の計測例⁴⁾

実験に用いた供試土は、主に大阪層群系の粘性土で統一分類ではMLまたはCLに属している。土の状態を表わす代表的な指標としては含水比及び間ゲキ比の変化である。さて、縦波及び横波伝バ速度と含水比、水膜厚さ(間ゲキ比一定)及び間ゲキ比(含水比または飽和度一定)などの関係を調べた例を図-6、図-7、図-8、図-9に示す。これらの図に関する詳細な考察は、すでに他で述べたものもあり、ここでは総括的に述べることにする。本例の供試土中の伝バ速度と含水比及び間ゲキ比の関係は必ずしも一定ではなく、全く特異な変化を示す場合があることが分った。これらは、ほんの一例にす

ぎないが、何らかの計測器として超音波を利用するにはこの点を十分考慮してキャリブレーションを実施する必要がある。振幅を指標とする場合にも同様の配慮が必要であろう。しかし、物性計測の面から考えれば、波動

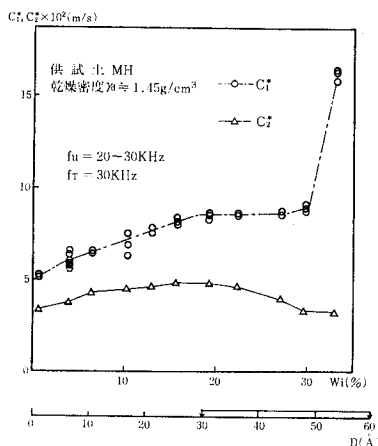


図-6 縦波及び横波伝バ速度 (C_1^*, C_2^*) vs. 初期含水比(W_i)及び等価水膜厚さ(D)⁴⁾

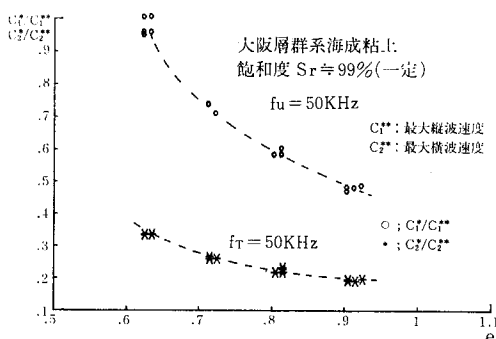


図-7 縦波及び波横波伝バ速度 (C_1^*/C_1^{**} , C_2^*/C_2^{**}) vs. 初期間ゲキ比(e)

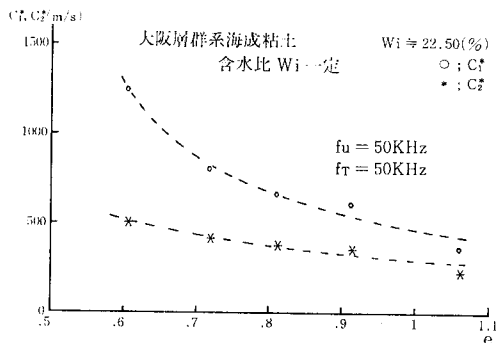
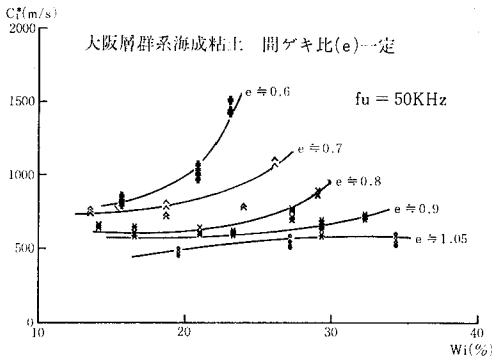


図-8 縦波及び横波伝バ速度 (C_1^*, C_2^*) vs. 初期間ゲキ比(e)



図一9 縦波伝バ速度 (C_1^*) vs. 初期含水比 (W_i)

の特異な変化にこそ物質の内部構造を知る手がかりがあると考えられる。さて、間接的ではあるが、土構造に関連した土の性質を検討するには、縦波だけでなく横波伝バ速度を利用すべきである。その理由は、横波が土中水分を伝バしにくく、土の骨格構造中を伝わり、縦波は水中でも伝わるという波の基本的な特性によるものである。図一6には、一例として締めめ粘性土中の縦波及び横波伝バ速度と土粒子のまわりの水分状態（水膜厚さで考える）の変化の関係を示す。土の構造変化は簡単に捉えられるようなものではないが、弾性体（固体）及び粘弾性体中の縦波及び横波伝バ特性を利用して土中水分の質的变化を類推することができるかもしれない。さらに、他の計測指標（例えば振幅とかスペクトル密度の変化など）を加えて、土の物理性を波動減衰（伝バ）特性の変化として捉えることにより、超音波パルス法による物性計測の範囲が拡大すると考えられる。

V お わ り に

ここでは、超音波パルスを利用した土の物理性計測のほんの一端を示したにすぎない。どちらかといえば筆者は、土壌物理計測に関しては経験が乏しいので、必ずしも適切な計測例であるとはいえないが、広い意味での土の物性計測における超音波パルスの利用を示すことができたと思う。

超音波パルス透過法は、X線、RIなどを用いる物性

計測法に比較して、はるかに簡単かつ気軽に利用できるし、装置自体、伝バ速度とか振幅を測る程度ならば極めて簡単である。また、近年、以前の水晶振動子に比べ安価でかつ安定度も高いPZT振動子が入手できるようになってきており、土壌物理の分野においても、大いに超音波計測が実施されるべきであろう。とくにマイクロコンピュータを利用したデジタル処理及び波形解析により、さらに高度な超音波パルス計測を実施することができるものと思われる。ただ、超音波は単なる通信的な応用であっても交番荷重を供試体に与える計測法であるので、時間効果（長時間計測時の問題）については考慮する必要がある。なお、超音波及びその計測の応用に関する詳細な解説は文献1～3を参照されたい。

最後になりましたが、ここに示しましたいくつかの研究例に関し、当研究室の中谷三男教授ならびに桑原孝雄助教授から貴重なご教示を頂きました。記して識意を表します。

引用文献

- 1) 例えば Donald R. Griffin: コウモリと超音波, 能本乙彦訳, 現代の科学37, 河出書房新社, pp.32~(1970).
- 2) 藤森聡雄: やさしい超音波の応用 増補改訂版, 産報, pp.1~36, pp.134~150 (1976).
- 3) L. Filipcynski et al.: Ultrasonic Methods of Testing Materials, Butterworths, pp.1~92 (1966).
- 4) 小山修平他3名: 主として土の動弾性定数に及ぼす土中水分の影響について, 農土論集70, pp.27~38 (1977).
- 5) Y.C. ファン: 固体の力学/理論 初版第2刷, 大橋義夫他訳, 培風館, pp.332~338 (1971).
- 6) H. Kolsky: Stress Waves in Solids, Dover, pp.54~86 (1963)
- 7) B. G. Khazin et al.: The Use of Ultrasound to estimate of Frozen Soils During Working, Soil Mechanics and Foundation Engineering Translated from Russian, pp.122~125 (1975)
- 8) 緒方義弘他1名: 棒状岩石試験片の音速測定法に関する一考察, 第4回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.7~12 (1973).
- 9) T. Taya: Tensor Wave Theory in Solid Elastic Body of Three Dimension, part 9. The Technology Reports of the Tohoku University, Vol.41, No.2, pp.387~445 (1976).
- 10) 東京天文台編纂: 理科年表, 物理化学, 物78~79 (1975).

[1980.5.8.受稿]