

フィルタバンク法による骨を伝播するガイド波の 速度分散特性の評価

Estimation of guided wave's dispersion in bone specimens using filter bank technique

○鎌田正洋*, 齊藤玄敏*
○Masahiro Kamada*, Hiroyuki Saito*

*弘前大学
*Hirosaki University

キーワード：ガイド波(Guided wave), アレイ信号処理(Array signal processing),
フィルタバンク(Filter bank), 速度分散(dispersion), センブランス解析(Semblance analysis)

連絡先：〒036-8561 青森県弘前市文京町3番地 弘前大学大学院 理工学研究科 齊藤研究室
齊藤玄敏, Tel/Fax: (0172)-39-3694, E-mail: saitoh@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

近年, わが国の平均寿命の伸びや生活習慣の変化より, 骨粗鬆症の患者数は増加傾向にある^[1]. 骨粗鬆症を患うと日常生活程度の負荷によって骨折を引き起こすことがあり, 高齢者の寝たきり生活につながる. 骨粗鬆症の予防に大切なことは早期の健診である. そこで, 骨密度検査が従来よりも簡便に行えるようになることで多くの方に検査を行えるようになれば, 骨粗鬆症によって苦しむ人々の数を減らすことが可能になるかもしれない.

従来の音波による骨密度検査法は踵骨にパルス透過させることにより, 骨内伝播速度(SOS)や骨内減衰量(BUA)を計測し, それらの値を指標として骨密度を推定している. しかし, 実体波(P波とS波)は高密度域を選択的に伝播するため, 骨密度が低下し

ている部分を正確にとらえることは難しく, 臨床分野での評価基準は放射線法に依存している. 一方, 非破壊検査に使用されてきたガイド波は物理境界で形成された導波路に沿って伝播し, 境界から1波長程度の深さの力学的性質を反映しているため, 骨密度の評価に利用できる可能性がある. ただし, ガイド波には速度分散があるため, これを正確に測るにはアレイ計測が必要で, 測定部位はセンサアレイが展開できる部位に変更する必要がある.

本研究は, 人の脛骨を対象としたガイド波のアレイ計測による超音波骨密度計測法の開発を目的としている. この実現のために, 本報告では, 金属製丸棒を用いて, その表面を伝播するガイド波を計測し, その計測データに対してフィルタバンクを用いて周波数解析を行い, 試料の速度分散特性

を評価する．また，算出した理論速度分散曲線と比較し，周波数センブランスの解析結果と理論値との誤差評価を行うことで試料の P 波・S 波速度を推定し，金属の物性値に近い値を評価できているのかを考察する．そして，金属と同様の評価方法で動物骨の速度パラメータを推定する．

2. ガイド波の理論速度分散曲線

中実丸棒状の固体導波路におけるガイド波の特性方程式は円筒座標系の波動方程式と境界条件から式(1)の 3 行 3 列の行列式として与えられる²⁾．式(1)から理論分散曲線を求め，その結果を基に本研究に適した条件(周波数成分・モード)を定める．

$$|D| = \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{11} = n^2 - 1 - a^2 k_0^2 (x-1) \\ d_{12} = n^2 - 1 - a^2 k_0^2 (2x-1) \\ d_{13} = 2(n^2 - 1) [\gamma_n(k_d a) - n] - a^2 k_0^2 (2x-1) \\ d_{21} = \gamma_n(k_d a) - n - 1, \quad d_{22} = \gamma_n(k_t a) - n - 1 \\ d_{23} = 2n^2 - 2 [\gamma_n(k_t a) - n] - a^2 k_0^2 (2x-1) \\ d_{31} = \gamma_n(k_d a) - n \\ d_{32} = -(x-1) [\gamma_n(k_t a) - n], \quad d_{33} = n^2 \\ \gamma_n(ka) = \frac{ka J_{n-1}(ka)}{J_n(ka)} \\ x = \frac{1}{2} \frac{c_p^2}{c_t^2} \end{array} \right.$$

n : 0(L mode), 1(F mode), a : 丸棒の半径
 $J_n(x)$: ベッセル関数, k_t : S 波の波数
 k_d : P 波の波数, k_0 : ガイド波の波数
 c_t : S 波速度, c_p : ガイド波の位相速度

Fig.1 は鉄製丸棒(P 波速度 : 5950[m/s], S 波速度 : 3240[m/s], 半径 0.015[m])を想定し³⁾, 式(1)からガイド波の位相速度を周波数の関数として求めた結果である．200[kHz]以上の高周波では高次モードが重畳し，各モードの同定が難しくなる．よって本研究では周波数成分 200[kHz]以下で評価を行い，縦波モードとたわみ波モードを評価対象とする．高周波数領域では，たわみ波 1 次モードと縦波 1 次モードはレイリー波の速度に，それ以外の高次モードでは S 波音速に漸近することがわかる．さらに縦波 1 次モードの低周波数の極限では棒の縦振動速度 (5120[m/s])に近づく．ガイド波の理論速度分散曲線は，後述する周波数センブランス解析の結果を用いる速度パラメータの推定に使用する．

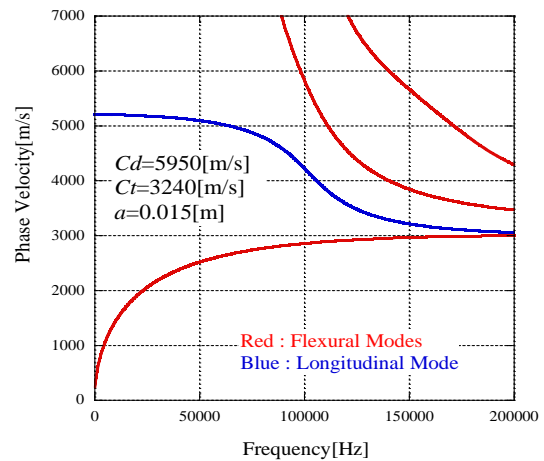


Fig.1 理論速度分散曲線

3. ガイド波計測実験

本研究では鉄製中実丸棒(Fig.2)とウシ大腿骨(Fig.3)を試料としてガイド波の計測を行った．寸法はそれぞれ，直径 30[mm] / 長さ 500[mm], 直径 45.61[mm] / 長さ 376[mm] である．

Fig.4にガイド波の計測実験の様子を示す。ファンクションジェネレータで電圧 5[V], パルス幅 10[μ s]の方形パルス波を発生させ, パワーアンプで電圧を 20 倍に増幅する. これをトランスデューサで電気信号を超音波に変換し, 試料の長手方向に対して垂直に送信する. Fig.5 はセンサの取り付け位置を示している. 反射波の影響を考慮し, 送信点を試料端から 10[cm]離し, そこから鉄製丸棒では 10[cm]離したところに, ウシ大腿骨では 5[cm]離れたところに受信点を設けた. また, 高周波ノイズとアンチエイリアシング対策としてカットオフ周波数 200[kHz]のローパスフィルタでろ波した. 本研究ではアレイ信号処理を用いて速度解析を行うために, センサのオフセット距離を 1[cm]ずつ増やし, 計 6 点で波形を取得した. Fig.6, Fig.7 に鉄製中実丸棒とウシ大腿骨で取得した計測波形を示す.



Fig.4 ガイド波計測実験の様子

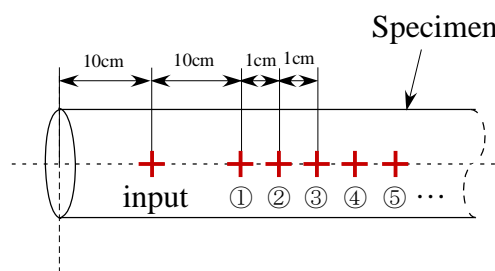


Fig.5 センサの取り付け位置(鉄製丸棒)

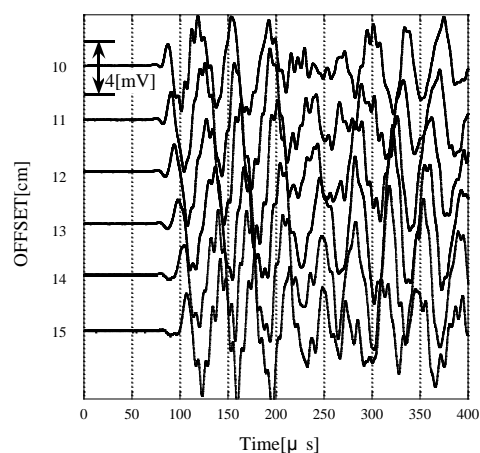


Fig.6 鉄製中実丸棒の計測波形

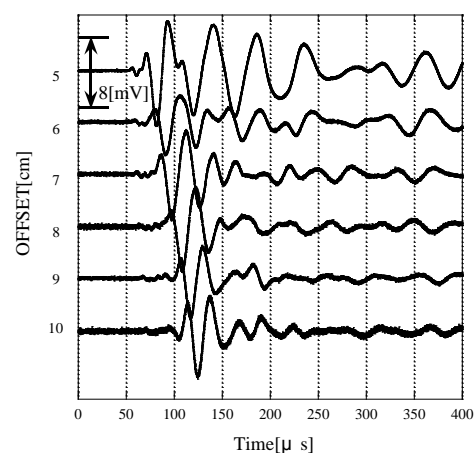


Fig.7 ウシ大腿骨の計測波形



Fig.2 鉄製中実丸棒



Fig.3 ウシ大腿骨

4. フィルタバンク法による速度解析

4.1 フィルタバンク法

フィルタバンク法とは、計測波形データに対して、中心周波数が一定間隔の複数のバンドパスフィルタ群を用意し、これにより波形データをろ波し、複数の周波数帯域の波形データ群を作成する方法である。このフィルタバンクを用いることで分散性の波形データを非分散性の波形データとして扱うことができ、センブランス解析のような非分散速度解析においても、周波数 - 位相速度の関係を評価できる⁴⁾。Fig.8 にフィルタバンクの概念について示す。

フィルタバンクに組み込むバンドパスフィルタとして用いるガウシアンフィルタの設計手順を示す⁵⁾。

- (1) 高速フーリエ変換を行うために、計測波形に適切な数のゼロを挿入すること(ゼロ挿入)によって、データ長を2の指数に広げる。また、本研究では必要な周波数分解能を確保するために、データ長を16384(2¹⁴)[point]に設定した。
- (2) 計測波形に対して高速フーリエ変換した後に、フィルタの中心周波数を設定し、窓関数としてガウス関数 $H_n(\omega)$ を用いる(式(2))。ここで、 ω_n は中心周波数、 α 、 β はガウス関数の減衰率を表すパラメータ(式(3))、 $BAND$ は相対バンド幅、 $\omega_{l,n}$ と $\omega_{u,n}$ はそれぞれ下限周波数と上限周波数を示している(式(4)、(5))。
- (3) 計測波形のスペクトルに対して、設定したガウス関数を窓関数としてかけ、得られたスペクトルを逆フーリエ変換することで、設定した中心周波数付近の成分を抽出した波形が得られる。

それぞれの処理手順について Fig.9 に示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} H_n(\omega) = e^{-\alpha \left(\frac{\omega - \omega_n}{\omega_n} \right)^2} \\ \text{for } \omega_{u,n} \leq \omega \leq \omega_{l,n} \\ H_n(\omega) = 0 \\ \text{for } \omega < \omega_{u,n} \text{ or } \omega > \omega_{l,n} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\alpha = \beta / BAND^2 \quad (3)$$

$$\omega_{u,n} = (1 + BAND) \cdot \omega_n \quad (4)$$

$$\omega_{l,n} = (1 - BAND) \cdot \omega_n \quad (5)$$

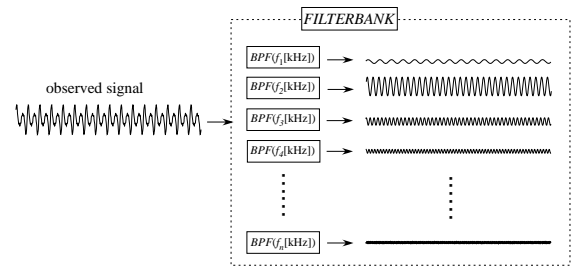


Fig.8 フィルタバンクの概念

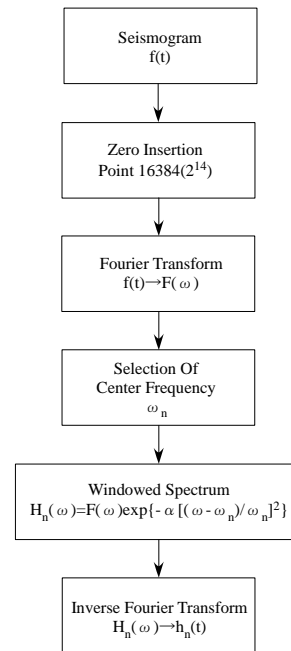


Fig.9 ガウシアンフィルタの処理手順

4.2 周波数センプランス

周波数センプランスはアレイ計測で得られた波形データのフィルタバンクを利用し、周波数ごとの波形データ群に対し位相速度をパラメータとして、時間軸で波形を移動させながら、相関を求める方法である。周波数と位相速度に対するセンプランス値の関係から速度分散特性の評価することが可能である。センプランス値は式(6)で表された計算パラメータのスロウネス p と計算開始時刻 τ を変化させて、その値を求める。Fig.10 にセンプランス解析の概念を示す。

$$S = \frac{\sum_{t=\tau+pz}^{\tau+pz_0+T} \left(\sum_{k=0}^{N-1} x(t, z_k) \right)^2}{N \sum_{t=\tau+pz}^{\tau+pz_0+T} \sum_{k=0}^{N-1} x(t, z_k)^2} \quad (6)$$

S : センプランス値, T : ウィンドウ幅
 τ : 計算開始時刻, $p=1/v$: スロウネス
 v : 位相速度, t : 時間, z_k : 伝播距離
 x : 信号データ, N : 波形数

4.3 速度解析の結果

Fig.11, 12 は鉄製丸棒(Fig.6), ウシ大腿骨(Fig.7)の計測波形データを用いた周波数センプランスの計算結果を示す。Fig.11, 12とも低周波数領域では、たわみ波 1 次モードが、高周波数になるとカットオフ周波数を持つたわみ波高次モードが見られ、2 章で算出した理論速度分散曲線のような分布になっている。しかし、鉄製丸棒の 120[kHz] 付近のピークはたわみ波 2 次モードと縦波 1 次モードが重畳していると考えられるため、この周波数帯域の取り扱いに注意する必要がある。また、20[kHz]以下の低周波数

帯域では、センプランス値のコンタ図が安定していない。これはセンプランス解析の速度方向の分解能が十分でないことが要因であると考えられる。

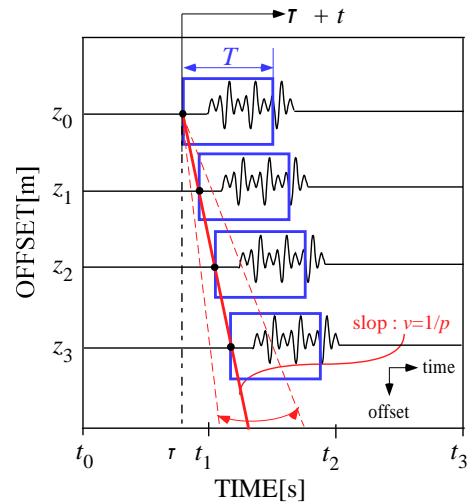


Fig.10 センプランス解析の概念図

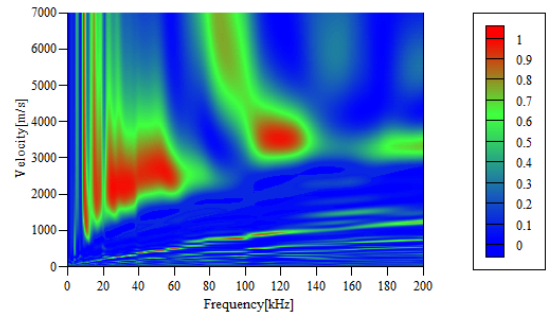


Fig.11 周波数センプランス解析の計算結果(鉄製丸棒)

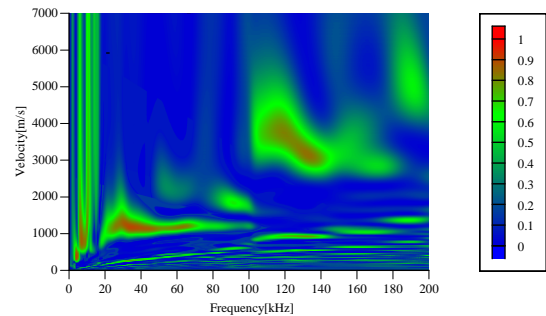


Fig.12 周波数センプランス解析の計算結果(ウシ大腿骨)

Table.1 実体波速度の推定値と標準値²⁾
(鉄製丸棒)

	Estimated Value	chronological science tables	Elasticity Wave Velocity
v_p [m/s]	6360	5950(6.89[%])	6050(5.12[%])
v_s [m/s]	3090	3240(4.62[%])	
Density[g/cm ³]		7.86	7.80

5. 実体波速度の推定

理論速度分散曲線を利用して周波数センブリランスの解析結果から実体波の位相速度を推定する。まず、周波数センブリランス解析の結果からたわみ波モードと縦波モードのピーク位置を追跡し、それらの位相速度を抽出した。次に、理論分散曲線との位相速度の残差が最小になるように理論分散曲線の速度パラメータを変化させて、P波とS波速度の値を推定した。Fig.13, 14に周波数センブリランス解析(Fig.11, Fig.12)のピーク位置を抽出した結果を示す。

鉄製丸棒では、周波数センブリランス解析の結果から実体波の速度推定に使用するモードを周波数帯域 25~74[kHz]の範囲をたわみ波 1 次モードに、75~99[kHz]、176~200[kHz]の範囲をたわみ波 2 次モードに、105~125[kHz]の範囲を縦波 1 次モードとした。最小二乗法の残差が最小になる速度パラメータは $v_p=6360$ [m/s]、 $v_s=3090$ [m/s] となった(Table.1)。また、ウシ大腿骨では評価するモードはたわみ波 1 次モードのみ(16~100[kHz])とした。他のモードを速度推定に使用しないのは現段階で高周波数の高次モードが同定できないためである。最小二乗法による速度推定結果は $v_p=3450$ [m/s]、 $v_s=1250$ [m/s] となった。なお、Fig.13, 14に最小二乗法で求めた鉄製丸棒とウシ大腿骨の速度パラメータを用いた理論分散曲線も

あわせて示している。

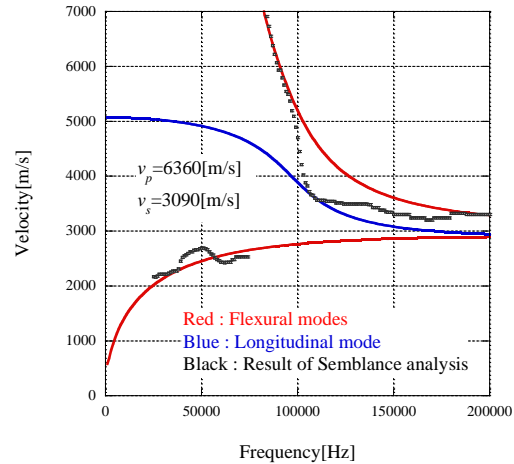


Fig.13 ガイド波の位相速度抽出の結果と理論分散曲線 (鉄製丸棒)

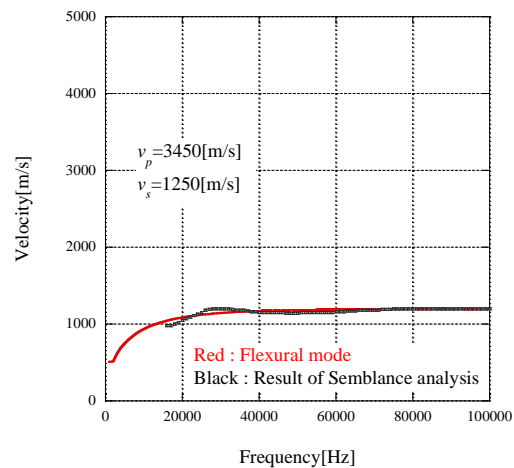


Fig.14 ガイド波の位相速度抽出の結果と理論分散曲線 (ウシ大腿骨)

6. まとめ

本研究ではフィルタバンクを用いた速度解析から速度分散特性を評価した。鉄製中実丸棒のP波とS波速度の推定値は一般的な鉄の実体波速度の7[%]以内の相対誤差に収まっている。したがって、この方法で実体波速度の推定が可能であるといえる。また、ウシ大腿骨の実体波速度の推定も可能といってよい。ただし、試料を中実丸棒と仮定した結果であり、実際の骨の断面は厳

密には円形とはいえない。また、骨の内部構造も一様ではなく、さまざまな力学的性質や伝播特性をもった骨細胞の集合体であることや骨の表面を覆う皮膚の影響などを考慮する必要がある。

本研究を通じて、速度解析に用いたセンブランス法は速度分解能に若干の問題があることもわかった。同じ周波数で速度の異なるモードが重畳している場合、周波数センブランス解析の結果には理論曲線との乖離が見られた。今後、速度分解能の良いとされる最尤推定法(MLM)⁶⁾を利用した速度分散特性の評価を行い、比較検討を行う予定である。

sonic velocity logging , Geophysics, **51-3**,
780/787(1986)

参考文献

- 1) Dr Ambrish Mithal , Dr Vibha Dhingra , Dr Edith Lau : The Asian Audit Epidemiology , costs and burden of osteoporosis in Asia 2009 , International Osteoporosis Foundation , 30/32(2009)
- 2) Martin Redwood : Mechanical Waveguides , the propagation of acoustic and ultrasonic waves in fluids and solids with boundaries , 135/150(1960)
- 3) 丸善株式会社 : 理科年表平成 22 年 , 422/423, 丸善株式会社(2010)
- 4) Rama Rao V.N., M. Nafi Toksoz : Dispersive Wave Analysis-Method and Applications , Massachusetts Institute of Technology
- 5) A. Dziewonski, S. Bloch, M. Landisman : A technique for the analysis of transient seismic signals , Bulletin of the Seismological Society of America , 427/444(1969)
- 6) Kai Hsu, Arthur B. Baggeroer : Application of the maximum-likelihood method (MLM) for