

音波の非線形性を利用した多変量解析による伝搬媒質の判別

神奈川大・工 土屋健伸 遠藤信行

はじめに

現在、医療診断で用いられる超音波診断装置は、パルス状の波形を放射し、物体から反射されたパルスの方角と到達時間により体内の組織境界を知るパルス反射法を用いて情報を得ている。しかしこの方法では臓器の外形しか捉えられないので、医師の経験的な判断によって、臓器の疾患の有無などの診断を行っている。そこで、超音波診断装置からの反射エコー信号を解析することによって内部の情報を得られれば、診断率を向上できると考えられる。しかし、生体軟部組織は水分を多く含んでおり、音速などの音響的特性の差異は非常に小さい。一方、有限振幅音波は伝搬過程で波形が歪むという非線形性を持っている。この非線形性は音波伝搬媒質の物理的特性により決まると考えられているので、非線形性をパラメータとして判別に用いれば、生体組織の質的診断を行う事ができると考えられる。

そこで本研究では、多変量解析を用いて生体組織のような音響的特性の似た音波伝搬媒質の判別を、高調波の発生の割合の違いにより行う。解析方法として主成分分析を用いた。また、同時にそれぞれの媒質がどの程度判別可能であるかを知るため、判別分析を用いた解析も行った。さらに、音響的特性の似た音波伝搬媒質同士を混合した媒質においても測定を行い、どの程度識別することが可能であるか検討を行なった。

有限振幅音波の歪みと吸収

有限振幅音波は、媒質の伝搬に伴って波形が歪み、正弦音波は鋸歯状波に近づく¹⁾。これは波の1波長の間の各部分の伝搬速度が異なるためであって、粒子速度の大きい部分が小さい部分よりも速く伝わるために生ずる現象である。鋸歯状波の前面では粒子速度や圧力の勾配が大きくなるが、一方で粘性（体積粘性

を含む）や熱伝導はこれを小さくする働きをし、非線形効果と粘性、熱伝導との兼ね合いで波形の歪が決まる。

また、有限振幅音波の吸収は、無限小振幅の場合に比べて二つの原因で増加する。一つは粒子速度や温度の勾配が増すために生ずる音のエネルギーの減少（真の吸収）で、もう一つは波形が正弦波から鋸歯状波に移行するために基本波成分が減り、高調波成分が増すための見かけの吸収である。粘性や熱伝導の小さい（真の吸収の小さい）媒質のほうが波形の歪みが大きいので、見かけの吸収の増加は大きくなる。

一般に非線形パラメータ B/A は、基本周波数の音圧を δp_1 、第2高調波の音圧を δp_2 とすると、

$$\frac{\delta p_2}{\delta p_1} = \left(\frac{B}{A} + 2 \right) \frac{\omega}{8\alpha\rho_0 c_0^3} (1 - e^{-2\alpha}) \delta p_1$$

と表すことができる。ここで、 δp_2 は距離が増すにつれて増加するが、音の吸収により、ある距離で δp_1 、 δp_2 は減少する。つまり、この値を距離の関数として求めれば同じ B/A 値でも吸収の違いから媒質の判別ができるのではないかと考えた。

多変量解析

多変量解析とは、多数の変量を対象として、その変量を集約しながら、特徴の把握やその変量の相関関係の分析を行うための統計的な手法の総称であり、データに含まれる興味深い構造を見出すことを目的としている。つまり、それら多数の事象や要因の多次元的測定から、

- (1) 事象の簡潔な記述と情報の縮約によりその多次元構造を明らかにする。
- (2) 事象の背後にある潜在的因子を探索し、その次元の意味を明らかにする。
- (3) 事象を規定する複雑に絡み合った要因の査定を行う。

(4) 未知のデータの分類と判別を行う。

(5) 質的データの数量化を行い、その多次元構造を明らかにする。

といった作業を行うための統計的手法と見なすことができる。

こういった多変量解析の手法の中で、主だった要因を抽出する事の出来る主成分分析と、未知のデータの分類を行う判別分析を用い、データの解析を行う。

○主成分分析

音波伝搬媒質の特徴を解析するために、本研究において主成分分析を行った。主成分分析の特徴は相関のある多くの変数の値を、少数個の合成変量(主成分)で表す方法である。この主成分の数を決める基準として累積寄与率が80%以上になった主成分まで考えることとする。ここで寄与率とは、各成分が元の情報をどの程度反映しているかを示す値であり、累積寄与率とは各主成分の寄与率を次々に合計したものである。そして、主成分分析の評価法として元の情報と各主成分との相関係数を表す因子負荷量について検討を行う。

○判別分析

測定した媒質が正しく分類されているか、また説明変量として与えた変量が判別に寄与しているか確認するために判別分析を行った。判別分析の特徴は、いくつかの変量についてグループごとに与えられたデータにより、各個体がどちらのグループに属するかを判別する方法である。判別のために各グループ間の判別関数として、マハラノビスの判別関数を用いた。そして、判別の結果から各変量が判別に寄与しているかどうかの検定を行う。検定にはウィルコックスの Λ 統計量を利用する。 Λ はグループ間の変動を表現する量で $0 \leq \Lambda \leq 1$ の値を取り、 Λ が0に近いほどグループ間に統計的な差があることを示す。

実験方法

本研究では、この有限振幅音波の伝搬特性を示す音速、および音源から5mmから115mmまで5mm間隔で基本周波数成分と第2高調波成

分の音圧と多変量解析の説明変量として音源からの距離10mm、60mm、110mmにおける波形歪み(基本周波数に対する第2高調波の音圧の大きさ)を観測し、これから媒質の特徴を見つけだすことを試みた。

本研究に用いた実験装置のブロック図をFig.1に示す。シンセサイザ(NF ELECTRONIC INSTRUMENTS, 1940)より60波長のバースト波を発生させる。シンセサイザからの高調波成分を遮断するため遮断周波数2.1MHzのロー・パス・フィルタを通過させる。これをパワーアンプ(THAMWAY, A57-1501)で増幅し、直径20mm、共振周波数2MHzのPZT送波器により発生させる。伝搬媒質を通過した音波を直径1mmのハイドロフォンにより受波した後、インピーダンス整合をとるためバッファアンプを介してスペクトラム・アナライザ(ADVANTEST, R3261A)で周波数分析を行い、マイクロコンピュータへ送り基本周波数に対する第2高調波の音圧の比を計算する。また、伝搬媒質の音速を測定するため、送波から受波までの時間をタイム・インターバル・カウンタ(STANFORD RESEARCH SYSTEMS, SR620)により測定する。水槽内は、温度調整器により保温され、測定温度は20°C、25°C、30°Cで行った。測定に用いた媒質は水、3%生理食塩水、メタノール、エタノール、n-プロパノール、卵黄、卵白、ひまし油、オリーブ油である。また、水とメタノールの混合媒質をメタノールの濃度0%, 25%, 50%, 75%, 100%において測定した。

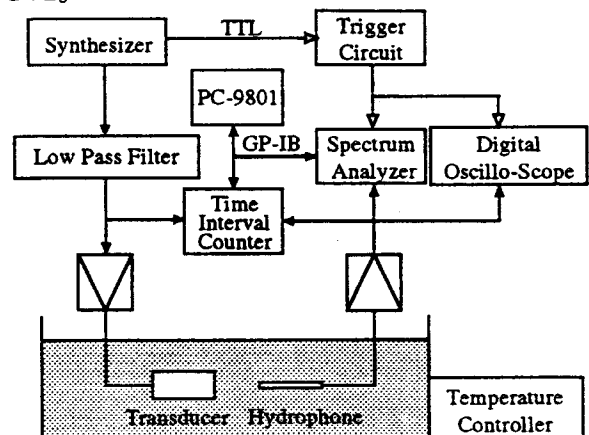


Fig.1 Schematic diagram of measuring system.

実験結果

Fig.2にメタノールと水についての距離変化

による基本周波数と第2高調波の音圧変化を示す。距離は5mmから115mmまで5mm間隔で測定した値である。メタノールは水に比べ距離の増加とともに基本波成分の減少が大きく第2高調波成分の増加が大きくなっており波形の歪みが大きい。つまり、音の吸収が大きいことが分かる。

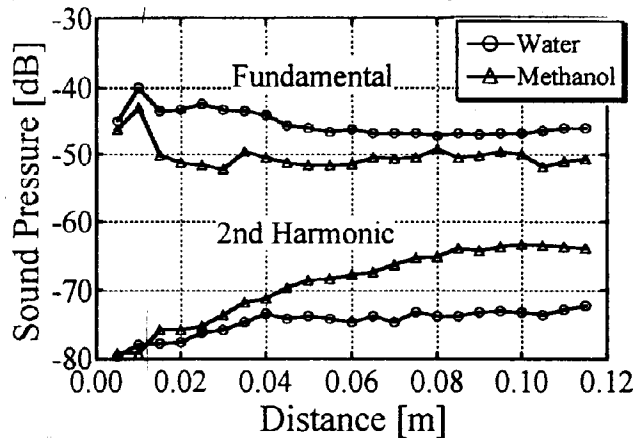


Fig.2 Measured axial pressure amplitudes of the fundamental and second harmonic in water and methanol at 25°C.

解析するために必要な説明変量を次のように与える。

x_1 : 音速

x_2 : 距離 10mm における f_2/f_1

x_3 : 距離 60mm における f_2/f_1

x_4 : 距離 110mm における f_2/f_1

ここで f_1 は基本周波数の音圧、 f_2 は第2高調波の音圧である。

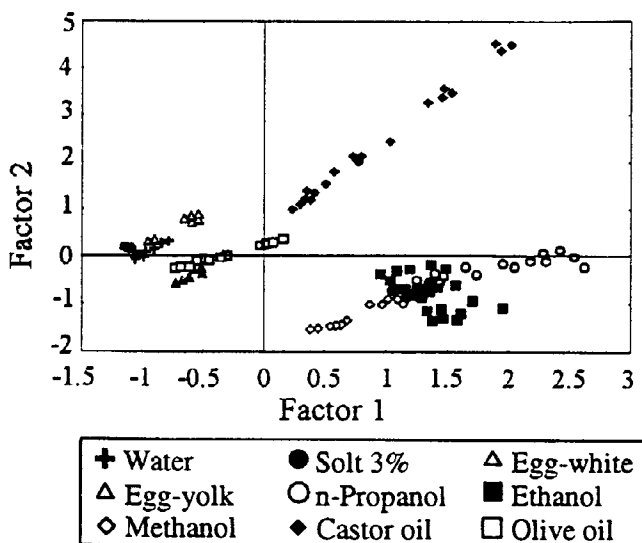


Fig.3 Principal components analysis.

主成分分析により得られた結果を Fig. 3 に示す。第1主成分及び第2主成分の寄与率はそれぞれ 58%、21%であり累積寄与率は 79%であり、第2主成分までで説明変数のほとんどの情報を表していることが分かる。また Table.1 に因子負荷量の値を示す。第1主成分は音の吸収の大きさを、第2主成分は粘性の大きさを表わしていると考えられる。また、音速が速く波形歪みの大きくなる方向を考えると、Fig. 3 において右上にいくほど B/A の値が大きくなることが分かる。

説明変数	Factor 1	Factor 2
x_1	-0.7107	0.6541
x_2	0.7165	0.2120
x_3	0.8975	-0.1137
x_4	0.6980	0.5945

Table.1 Factor loadings.

次に判別分析により得られた結果を Table. 2 に示す。 Δ 統計量は $\Delta=0.0025$ となりグループ間には統計的有意差があることが分かる。また、説明変量として与えた変量が判別に寄与しているか確認を行った。その結果、音速が最も寄与していることが分かった。そして、波形歪みは単独ではあまり寄与していないが全て含めると判別率が音速のみに比べ、78%から 93%まで向上することが確認できた。Fig. 4 において、3%生理食塩水や卵白の判別率が落ちているが、いずれも水分 90%以上でかなり水に近い性質を持っている為だと思われる。しかしながら、非線形パラメータ B/A の値が 10 前後であるアルコール類及びひまし油は分類されていることが分かる。

次に水とメタノールを混合した場合の判別分析による結果を Table. 3 に示す。この時、25%の判別率が落ちている。これは、Table. 2 における 3%生理食塩水や卵白と同じように、25%の混合ではまだ水に近い性質を持っている点と、またこの混合媒質では非線形パラメータは濃度に対して線形でなく 10%から 30%で最小値をとるため、水、メタノールのどちらの特性とも違っている点に判別の誤りが生じたと考えられる。だが、0%、50%、75%、100%の正答率

	正答率(%)	Wat.	Sal.	E-w.	E-y.	n-P.	Eth.	Met.	Cas.	Oli.	Total
Water	100.0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	30
Salt 3%	66.7	10	20	0	0	0	0	0	0	0	30
Egg-white	70.0	0	9	21	0	0	0	0	0	0	30
Egg-yolk	100.0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	30
n-Propanol	100.0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	30
Ethanol	100.0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	30
Methanol	100.0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	30
Castor oil	100.0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	30
olive oil	100.0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	30
Total	93.0	40	29	21	30	30	30	30	30	30	270

Table.2 Discriminant analysis.

	正答率(%)	Water	25%	50%	75%	Methanol
Water	100.0	43	0	0	0	0
25%	97.6	0	41	1	0	0
50%	100.0	0	0	30	0	0
75%	100.0	0	0	0	30	0
Methanol	100.0	0	0	0	0	30
Total	99.4	43	41	31	30	30

Table.3 Discriminant analysis of mixed media.

は100%であるので、メタノールと水の判別は可能であると言える。

5. 結言 生体組織のように音響的特性の似た音波伝搬媒質を、高調波の発生の大きさの違いにより判別を行う研究について述べてきた。すなわち、伝搬距離が変化した場合の第2次高調波の発生量と音速を計測することで、物理的特性の差異が少ない媒質を判別することを行なった。このことから音波伝搬媒質ごとの音速や距離による波形歪み、あるいは伝搬減衰量から、主成分分析法を用いることにより、音の吸収や粘性（体積粘性）といった物理量を知ることができ、これにより媒質の判別が可能であることが確認できた。また、判別分析により媒質の判別率が93%と高い値を示しており、説明変量として与えたデータは判別に有効であることが確認できた。さらに、従来から非線形性を表現するのに非線形パラメータB/Aを利用してきたが、B/Aの値が近い媒質においても主成分分析を用いて新しい変

数を考えることにより判別可能であることが分かった。

本研究では、説明変量を4変量で行なったが、距離による波形歪み (f_2/f_1) の数を増やしたり、他パラメータ（例えば粘性や熱伝導）を説明変量に加えることで音波伝搬媒質の特徴を知ることが可能であると考えられる。

[参考文献]

- 1) 実吉、菊池、熊本 “超音波技術便覧”
- 2) 朝比奈、遠藤 “混合媒質の非線形パラメータ” 日本音響学会論文集 955-956 (1988.3)
- 3) R. T. Beyer “Nonlinear Acoustics” 60-157, 1974 Novel Ship System Command
- 4) 木下 “多変量解析入門” (株) 東京図書
- 5) 柳井 “多変量データ解析法” 朝倉書店
- 6) 中村、松井、塩川 “SH-SAWセンサによる水の判別とその評価” 日本音響学会論文集 2-2-6 (1994.9)
- 7) 成田、遠藤 “非線形効果による音波伝搬媒質の判別” 日超医講演論文集、64-212