

## 海底堆積物の音響モデル\*

木村正雄 (多孔体音響研究所)\*\*

43.30.Ma

海底堆積物の音波反射特性や海中音波伝搬特性などを利用して、海底堆積物の物理特性を求めるためには、海底堆積物の音響特性と物理特性の関係を求めておく必要がある。この海底堆積物は、その鉱物粒子の集合体である骨格が海水で満たされているので、いわゆる多孔性飽和媒質である。

海底堆積物を音響的にどう捉えるかは、海底における音響応用において、基本的に重要である。海底堆積物の音響モデルに関する研究を歴史的に概観してみる。最初は、海底堆積物を等価的に液体と考え、堆積物全体の密度と体積弾性率を与えた(流体モデル)。次に海底堆積物の剛性を加えた弾性体モデルを考えた。引き続き、縦波及び横波の減衰を考慮した粘弾性モデルに発展させた。更に海底堆積物のような多孔性飽和媒質に対して、粒子と堆積物の骨格が相対運動することを考慮した Biot モデルが提案された [1, 2]。Stoll は、この Biot モデルを最初に海底堆積物に適用し、更に骨格の弾性率を複素化することにより粒子間の摩擦による減衰を導入し、発展させた [3]。このモデルは Biot-Stoll モデルと呼ばれており、このモデルが最近まで、未固結海底堆積物の音響モデルとして多くの堆積物音響の研究者により用いられてきた。

しかしながら、この Biot-Stoll モデルでは、最近示されてきた室内及び現場での海底堆積物の大きな音速分散特性を説明することはできないことが明らかになってきた。これは、Biot-Stoll モデルにおいて、骨格の体積弾性率の周波数依存性を無視したことによるものであると考えられる。筆者は、この骨格の体積弾性率の周波数依存性を考慮した BIMGS モデル (A modified gap stiffness model incorporated into the Biot model) を開発し [4]、報告されてきた大きな音速分散特性を説

明できることを示してきた [5]。この BIMGS モデルは、Biot モデルに粒子間隙に存在する局所的流れによる音響緩和現象、すなわち間隙ステイフネスを組み込んだモデルである。

また、周波数が高くなると負の音速分散が生ずる場合があるが、これは堆積物内での多重散乱が原因であることを明らかにし、更に BIMGS モデルの適用周波数範囲を明らかにした [6]。海底堆積物の音響モデルに関する研究の歴史について、その概要を表-1 に示す。

約 30 年前に、筆者が Biot モデルの勉強を始めた頃、粒子の体積弾性率と骨格の体積弾性率の違いが理解できず、長い間悩んだことがあった。ようやくそれらの違いが理解できた後、骨格の体積弾性率は空気で飽和されたガラスビーズや砂の縦波音速及び横波音速を測定することにより求められると考えた。そこでまず空気で飽和された粒径の異なる 4 種類のガラスビーズ中の縦波音速を測定したところ、粒径が大きくなると、縦波音速が大きくなることが分かった。この結果は一般的に用いられている粒状体のための Hertz-Mindlin モデルでは説明できない。このモデルでは、同じ材質のガラスビーズで間隙率が同じであれば、縦波音速の粒径依存性はない。18 年位前に、アメリカ音響学会において、コロンビア大学の Stoll 先生にこのことを尋ねた。それは間隙率が違うはずだ。もう一度測定した方がよいとのことだった。再度、間隙率を測定したが、間隙率の違いはあまりなかった。悩みが解決しなかったので、今度は、テキサス大学の Chotiros 先生に同じ質問をした。それは粒子間の humidity が関係しているのではないかとのことだった。そこで試料を乾燥器で十分乾燥した後、縦波音速を測定した。乾燥後の測定結果は乾燥前の結果と同じであった。さんざん悩んだあげく、空気の影響を取り除くために、真空中で縦波音速の測定を行ったところ、粒径による音速

\* Acoustic models of marine sediments.

\*\* Masao Kimura (Poro-Acoustics Laboratory, Shizuoka 424-0911) e-mail: mk45@nifty.com

の変化は小さく、その結果は Hertz-Mindlin モデルでほぼ説明できることが示された [4]。以上のことより、粒子間の空隙に存在する空気の弾性により、縦波音速に粒径依存性が生じたと考えられた。そこで前述したように、筆者は Murphy らが発表した空隙スティフネスモデルを修正し、そのモデルを Biot モデルに組み込んだ BIMGS モデルを開発した [4]。このモデルを用いることにより、縦波及び横波の音速分散及び減衰の周波数特性の測定結果がよく説明できることを示してきた [5-7]。

これまでの音響モデルに関する研究では、単一粒径の海底堆積物を対象とすることが多かった。しかしながら実際の海底堆積物の場合、粒径分布を持っている。粒径分布を持っている場合の Biot モデルについては、Yamamoto らがすでに開発している。今後、粒径を持っている場合の BIMGS モデルの開発が望まれている。

Biot モデルや BIMGS モデルを用いる場合に必要となる 13 の物理パラメータについての考察も重要である。この物理パラメータの中で、音速及び減衰係数に影響を与える透水係数とねじれ率は、粒径、空隙率などにより決定されるが、いまだ実用的な関係式は得られていない。透水係数については、Kozeny-Carman の式がよく用いられている。この式中の係数  $k_0$  の値は球形の場合 5 であるが、粒子が球形以外の場合は明らかになっていない。また、ねじれ率については、Berryman の式がよく用いられている。この式中の係数  $r$  の値は球形の場合 0.5 であるが、球形以外の場合は明らかになっていない。

海底堆積物の音響研究では、室内及び現場での音速分散、減衰係数の周波数特性、海水と海底堆積物境界における反射特性、及び粒子の粒径分布、空隙率、透水係数、ねじれ率などの物理データなどが基本的に必要であるが、これらのデータの蓄積はいまだ十分ではない。今後、これらの

表-1 海底堆積物の音響モデル研究の歴史

1911	Wood	Wood モデル
1948	Urlick	懸濁液モデル
1951	Gassmann	Gassmann モデル
1956	Biot	Biot モデル
1961	Geetsma and Smit	多孔固体の音響特性
1970	Stoll	Biot-Stoll モデル
1974	Hamilton	粘弾性モデル
1979	Hovem and Ingram	飽和砂の粘性減衰
1980	Plona	第 2 種縦波の観測
1983	Yamamoto	多孔海底の音響特性
1985	Ogushwitz	Biot モデルの応用
1993	Dvorkin <i>et al.</i>	BISQ モデル
2000	Buckingham	Grain shearing モデル
2004	Chotiros and Isakson	BICSQS モデル
2006	Kimura	BIMGS モデル

データの積み重ねが重要であると思われる。それらのデータに基づき、更に新しい海底堆積物の音響モデルの開発が望まれる。

#### 文 献

- [1] M.A. Biot, "Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range," *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 168-178 (1956).
- [2] M.A. Biot, "Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range," *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 179-191 (1956).
- [3] R.D. Stoll, "Wave attenuation in saturated sediments," *J. Acoust. Soc. Am.*, 47, 1440-1447 (1970).
- [4] M. Kimura, "Frame bulk modulus of porous granular marine sediments," *J. Acoust. Soc. Am.*, 120, 699-710 (2006).
- [5] M. Kimura, "Experimental validation and applications of a modified gap stiffness model for granular marine sediments," *J. Acoust. Soc. Am.*, 123, 2542-2552 (2008).
- [6] M. Kimura, "Velocity dispersion and attenuation in granular marine sediments: Comparison of measurements with predictions using acoustic models," *J. Acoust. Soc. Am.*, 129, 3544-3561 (2011).
- [7] M. Kimura, "Shear wave speed dispersion and attenuation in granular marine sediments," *J. Acoust. Soc. Am.*, 134, 144-155 (2013).