

機関番号：54502  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20791218  
 研究課題名（和文） 側頭骨中の音波伝搬シミュレーション  
 —超音波補聴器の最適化設計のために—  
 研究課題名（英文） Simulation of Soundwave Propagation in Temporal Bone for the  
 Optimal Design of the Hearing Aid using Bone-Conducted Ultrasound  
 研究代表者  
 長谷 芳樹 (NAGATANI YOSHIKI)  
 神戸市立工業高等専門学校 電子工学科 講師  
 研究者番号：60448769

研究成果の概要（和文）：現在、最重度難聴者のための骨導超音波補聴器の開発が進められている。本研究課題では補聴器の最適化設計を目指して、微細構造を持つ固体中の超音波伝搬のシミュレーションをおこない、実測値との良い一致を確認した。また、世界で初めて構築した人体全体を包含する3次元音響モデルは、医工学・臨床分野などへの応用が期待される。さらに、読唇を併用した場合の骨導超音波補聴器の明瞭度などについての検討をおこなうなど、実用化に向けたデータを収集した。

研究成果の概要（英文）：New hearing aid system using bone-conducted ultrasound has been developed for hearing-impaired people. In this study, targeting on the optimal design of the device, precise simulation of ultrasound propagation in medium with microstructure was performed; as a result, good agreement with measured data was confirmed. The world's first 3-D acoustic model of whole human body created in this study is expected to play important roles in medical engineering and clinical field. Moreover, some required data for practical usage of hearing aid were measured, including the intelligibility of the device under the condition with lip reading.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・耳鼻咽喉科学

キーワード：骨導超音波補聴器・超音波伝搬シミュレーション・3次元音響人体モデル

#### 1. 研究開始当初の背景

可聴音が全く聞こえない最重度難聴者であっても、超音波を語音で振幅変調すると語音が弁別できる場合がある。この現象を用いた補聴システム（骨導超音波補聴器）の開発が進められているが、いまだその知覚部位や聴取メカニズムは解明されていない。

より良い骨導超音波補聴器の開発のため

には、骨導超音波の伝搬および知覚メカニズムの理解が必須である。細井らや阪口らにより、頭部に超音波刺激を提示した際の頭部内の音圧分布のシミュレーションによる検討などが行われていたが、定性的な検討に留まっており、その詳細な解明には至っていなかった。

## 2. 研究の目的

近年の計算機の著しい進歩によって、より精密なモデルを用いた数値シミュレーションが可能となってきた。これらの社会的・工学的背景を総合して鑑み、極めて複雑な形状を持つ人体内部の音波伝搬についての精密なシミュレーションが可能になれば、骨導超音波補聴器の最適設計のために新たな重要な知見が得られるものと考えられ、難聴者のQOL向上に大きく貢献できるものと期待された。

## 3. 研究の方法

本研究で対象としている側頭骨内部には聴覚器官および平衡器官が収められている。また、神経・血管・耳管のための孔も数多く空いており、側頭骨は頭蓋骨中で最も複雑な構造を持つ。従って、超音波伝搬シミュレーションのためのモデル構築が非常に困難であることが予想された。

シミュレーションシステムの良否を判断するためには実測による確認作業が必要であるが、実際の側頭骨の試料を得てその実測をおこなうことは不可能であった。このため、まず、本研究とは別に研究代表者のグループで微細構造体を対象に進めていた研究（海綿骨と呼ばれる非常に複雑な構造を持つ媒質のモデルを作成し、そのシミュレーションをおこなっていた）から得られる知見を、側頭骨シミュレーションに生かすこととした。

また、人体内の超音波伝搬の概要を把握するため、人体全体の3次元モデルを作成した。人体全体を包含するために充分高い解像度の確保が困難であり、側頭骨周辺の詳細なモデルは実現できないが、人体内部の伝搬の様子を解析または可視化することで、医工学分野・臨床分野などで幅広い応用が期待される。

さらに、この検討と並行して、骨導超音波補聴器を用いた聴取実験や脳磁図による計測などをおこない、実用性の検討や聴取メカニズムの解明を進めた。この検討では、実際の補聴器装用を想定し、読唇を併用した場合の明瞭度の評価や、音声の長短がどの程度まで識別できるかなどについて詳細な検討をおこなった。

## 4. 研究成果

微細構造を持つ媒質（具体的には海綿骨モデルを用いた）を対象に、3次元モデルの構築とシミュレーションをおこない、実測との

比較検討をおこなった。まず、ウシ、ウマ、ブタなどの大腿骨などから海綿骨部分を削りだし、X線マイクロCT画像を撮影した。この画像をもとに3次元モデルを構築し、3次元弾性FDTD（finite-difference time-domain）法により超音波伝搬のシミュレーションをおこなった。シミュレーションソフトウェアは研究代表者らによって開発された。この結果、2波分離現象なども含めてシミュレーション結果は実測と非常に良く一致することが確認され（例：図1）、モデル構築や計算条件の決定などを含めたシミュレーションシステム全体の妥当性が確かめられた。これにより、本システムを用いれば、側頭骨のような複雑な構造を持つ部位であっても、信頼性の高いシミュレーションがおこなえるものと期待される。

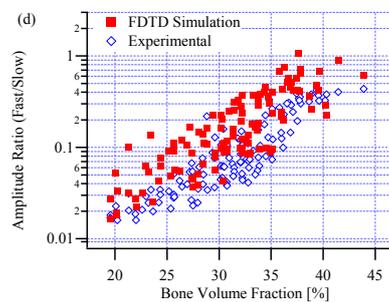


図1: 多孔性媒質(海綿骨)の媒質密度と、媒質内を伝搬した超音波パルスの振幅比(2つに分離した波の振幅比)の関係。シミュレーションと実測で非常に良い一致が確認できた。

また、この成果に付随して多数の知見が得られた。たとえば、海綿骨の密度が、その内部を伝搬する超音波パルスの速度や振幅と高い相関があること、配向方向によって伝搬の様相が大きく異なることなどが明確に観測および可視化された。これにより、骨粗鬆症診断装置などの設計にも非常に有用な知見が得られた。さらに、従来は受波波形に対して主に時間領域（時刻や振幅など）のみで解析がおこなわれていたが、新たにウェーブレット変換を用いた解析手法を提案し、得られた指標が骨密度と非常に高い相関を示すことを証明した。この指標では、海綿骨のような多孔性を持つ媒質内で散乱された超音波パルスが明確に観測されている（図2）。この現象は従来より予測はされていたが、本研究によりはじめて定量的な指標として提案された。この手法は海綿骨のみならず、網目構造やネットワーク構造、多孔質構造を持つ媒質に適用可能であると考えられる。今後、側頭骨のような複雑な媒質内の超音波伝搬を検討する上で、きわめて有用な知見であると考えている。

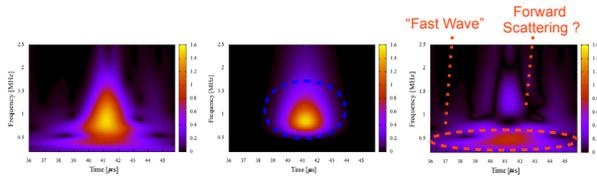


図2: 超音波パルスの受波波形のウェーブレット変換結果例と、関数フィッティングの例。「元信号(左)=ガウス関数(中)+残差(右)」となるようにフィッティングした。残差(右図)の下部に見える成分が前方散乱波である。多孔性媒質などではこのような成分が観測される可能性が高い。

以上の検討は人体のミクロな部分の伝搬を観測するためのものであるが、人体内のマクロな超音波伝搬の概要も把握するため、人体全体の3次元モデルを作成した。報告者の知る限り、人体全体を包含する3次元音響モデルの構築は世界初である。ただし、人体全体を包含するために解像度に技術的制約があった(2mm角)ために側頭骨周辺などのモデルは詳細には表現できていないが、例えば体表面から照射した音波が体内を伝搬する様子が明確に可視化できた(図3)。この成果をさらに進めることで、超音波補聴器の最適化設計に留まらず、超音波画像診断装置の動作推定や若い医師のトレーニングなどの臨床応用、リハビリテーション支援システムの構築など、幅広い応用が期待される。

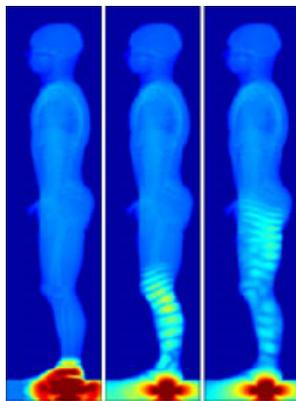


図3: 人体の3次元モデル。ここに示した図は、歩行を想定して踵の下からパルス上の音波を照射したときの例。膝の部分で音響管(音を伝搬させる管)のような挙動が見られる。

本研究課題申請時の最終目的であった側頭骨の詳細なモデル作成およびシミュレーションについては、3次元モデルの作成および音波伝搬シミュレーションまで実現した(図4)。しかしながら、同一のサンプルを用いた実測値との照合ができていないためにシミュレーション結果との定量的比較をおこなうことができていない。現状では科学

的根拠に基づいた成果発表が困難であるため未発表であり、現在各方面の共同研究者と共に進めているところである。

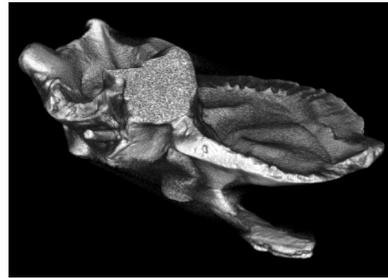


図4: 作成した側頭骨の3次元モデル。複雑な構造が確認できる。シミュレーションは実現し、実測値との照合を進めているところである。

さらに、シミュレーションなどの物理的手法とは別のアプローチとして、心理的手法により骨導超音波補聴器の実用化に向けた検討をおこなった。まず、話者の映像を呈示した条件下で骨導超音波音声の聴取実験をおこない、音声だけを呈示した場合の明瞭度と映像だけの場合の明瞭度の和よりも、音声と映像を同時に呈示した場合の方が有意に明瞭度が上がることを確認した。読唇を併用することにより単音節であってもかなり高い明瞭度が得られており、この結果は、実環境使用ではこれまで考えられていたよりも良い明瞭度が得られる可能性を示している。このことは、骨導超音波補聴器の実用化への強い期待を抱かせる。

また、MEG (Magnetoencephalography: 脳磁図)を用いた検討もおこなった。発話時間長を変えた単音節音声骨導超音波で呈示し、MEGから得られた波形を解析した結果、通常の気導での聴取とは振幅の飽和特性などにわずかに異なる傾向が見られた。このことは、骨導超音波の聴取メカニズムを解明する上で有用な知見となる。

以上のように、本研究課題では人体内の超音波伝搬や骨導超音波の聴取に焦点を当てて各種の検討を進めてきた。今後、具体的な実用化に向けてより詳細な検討を迅速に進めることで、超高齢社会におけるQOL向上に貢献できると考えている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

(1) Yoshiki NAGATANI, Katsunori MIZUNO, Takashi SAEKI, Mami MATSUKAWA, Takefumi

- SAKAGUCHI, and Hiroshi HOSOI, "Propagation of Fast and Slow Waves in Cancellous Bone: Comparative Study of Simulation and Experiment," *Acoustical Science and Technology*, Vol. 30, No. 4 (2009) pp.257-264. 【査読あり】
- (2) 長谷芳樹・橘亮輔・阪口剛史・細井裕司, "親密度別単語理解度試験用音声データセット (FW03) 単音節音声のラウドネス校正," *日本音響学会誌* 第64巻11号 (2008) pp.647-649. 【査読あり】
- (3) Yoshiki NAGATANI, Katsunori MIZUNO, Takashi SAEKI, Mami MATSUKAWA, Takefumi SAKAGUCHI, and Hiroshi HOSOI, "Numerical and Experimental Study on the Wave Attenuation in Bone - FDTD Simulation of Ultrasound Propagation in Cancellous Bone -, " *Ultrasonics* 48 (2008) pp.607-612. 【査読あり】
- (4) Katsunori Mizuno, Yoshiki Nagatani, Keisuke Yamashita, and Mami Matsukawa, "Propagation of two longitudinal waves in a cancellous bone with the closed pore boundary," *JASA Express Letters* (2011). [accepted] 【査読あり】
- (5) Katsunori Mizuno, Keisuke Yamashita, Yoshiki Nagatani, and Mami Matsukawa, "Effect of boundary condition on the two wave propagation in cancellous bone," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 50 (2011). [in press] 【査読あり】
- (6) Tadao Okayasu, Tadashi Nishimura, Akinori Yamashita, Seiji Nakagawa, Yoshiki Nagatani, Shuichi Yanai, Yuka Uratani, and Hiroshi Hosoi, "Duration-dependent growth of N1m for speech-modulated bone-conducted ultrasound," *Neuroscience Letters*, 495 (2011) pp.72-76. 【査読あり】
- (7) Akihiko Tsuda, Yuka Nagamine, Reiko Watanabe, Yoshiki Nagatani, Noriyuki Ishii, and Takuzo Aida, "Spectroscopic visualization of sound-induced liquid vibrations using a supramolecular nanofibre," *Nature Chemistry* 2 (2010) pp.977-983. 【査読あり】
- (8) Sho HASEGAWA, Yoshiki NAGATANI, Katsunori MIZUNO, and Mami MATSUKAWA, "Wavelet Transform Analysis of Ultrasonic Wave Propagation in Cancellous Bone," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 49 (2010) 07HF28. 【査読あり】
- (9) Akinori YAMASHITA, Tadashi NISHIMURA, Yoshiki NAGATANI, Takefumi SAKAGUCHI, Tadao OKAYASU, Shuichi YANAI, and Hiroshi HOSOI, "The effect of visual information in speech signals by bone-conducted ultrasound," *NeuroReport*, Vol.21(2) (2010) pp.119-122. 【査読あり】
- (10) Akinori Yamashita, Tadashi Nishimura, Yoshiki Nagatani, Tadao Okayasu, Toshizo Koizumi, Takefumi Sakaguchi and Hiroshi Hosoi, "Comparison between Bone-Conducted Ultrasound and Audible Sound in Speech Recognition," *Acta Oto-Laryngologica*, Vol. 129, No. s562 (2009) pp.34-39. 【査読あり】
- [学会発表] (計 24 件)
- (1) Yoshiki NAGATANI and Sho HASEGAWA, "Computational Investigation of Generation Mechanism of Fast Wave in Cancellous Bone," *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol.31 (2010) pp.559-560.
- (2) 長谷芳樹, "海綿骨中の超音波伝搬シミュレーション技術," *Jpn. J. Med. Ultrasonics*, Vol.37 Supplement (2010) p.S181. [invited]
- (3) Yoshiki NAGATANI, Mami MATSUKAWA, and Katsunori MIZUNO, "Effects of Structural Anisotropy on the Two-wave Phenomena in Cancellous Bone - Numerical and Experimental Study -, " *Abstract Book of IEEE International Ultrasonic Symposium 2009* (2009) pp.457-458.
- (4) 長谷芳樹・佐伯崇・松川真美, "海綿骨中の超音波伝搬における骨梁配向方向の影響 ~シミュレーションによる検討~, " *日本骨形態計測学会雑誌* 第19巻第1号 (2009) S94.
- (5) 長谷芳樹・細川篤・阪口剛史・松川真美・渡辺好章, "“デジタル人体弾性モデル”を用いた体内音波伝搬シミュレーションの試み," 第56回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 (2009) p.470.
- (6) 長谷芳樹・松川真美, "人体の3次元デジタル弾性モデルの構築 ~体内の音波伝搬シミュレーション~, " *日本音響学会関西支部 第11回若手研究者交流研究発表会 発表資料集* (2008) p.2.
- (7) Yoshiki NAGATANI, Atsushi HOSOKAWA, Takefumi SAKAGUCHI, Mami MATSUKAWA, and Yoshiaki WATANABE, "Introduction of “Digital Elastic Model of Human Body” for 3-D FDTD Simulation - Elastic Wave Propagation in Human Body -, " *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol.29 (2008) pp.471-472.
- (8) Yoshiki NAGATANI, Takashi SAEKI, Mami MATSUKAWA, Takefumi SAKAGUCHI, and Hiroshi HOSOI, "Effects of elastic properties on the wave propagation in cancellous bones - a simulation study -, " *Acoustics'08 - Abstract* (2008) pp.3512-3513.
- (9) Yoshiki Nagatani, Takefumi Sakaguchi, and Hiroshi Hosoi, "Evaluation of acoustic environments using deteriorated speech sound," *Acoustics'08 - Proceedings* (2008) pp.1249-1253.
- (10) Yoshiki NAGATANI, Takefumi SAKAGUCHI, Akinori YAMASHITA, and Hiroshi HOSOI, "An evaluation method of acoustic environments using distorted speech sounds," *The 12th JAPAN-KOREA Joint Meeting of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery - Abstract* (2008) p.227.
- (11) 山下圭祐・水野勝紀・長谷芳樹・松川真美, "

- 海綿骨における高速波の特徴的な屈折について  
～ 高速波と低速波の伝搬イメージング ～,"  
電子情報通信学会技術研究報告 (超音波),  
US2011-02 (2011) pp.33-37.
- (12) Katsunori Mizuno, Keisuke Yamashita, Yoshiki Nagatani and Mami Matsukawa, "Ultrasonics wave propagation in cancellous part of swine metacarpal bone," Proceedings of Symposium on Ultrasonics Electronics, Vol.31 (2010) pp.273-274.
- (13) 岡安唯・西村忠己・山下哲範・中川誠司・吉田悠加・柳井修一・長谷芳樹・細井裕司,"骨導超音波語音の母音刺激長に対するミスマッチフィールド," Audiology Japan Vol.53 No.5 (2010) pp.77-78.
- (14) Akinori Yamashita, Tadashi Nishimura, Yoshiki Nagatani, Takefumi Sakaguchi, Tadao Okayasu, and Hiroshi Hosoi, "Speech Recognition for Bone-Conducted Ultrasound," The Association for Research in Otolaryngology, Abstracts Vol.33 (2010) p.322.
- (15) Tadao Okayasu, Tadashi Nishimura, Akinori Yamashita, Yanai Shuichi, Seiji Nakagawa, Yuka Uratani, Yoshiki Nagatani, Hiroshi Hosoi, "Temporal-integration mechanism of bone-conducted ultrasonic speech sound," The Association for Research in Otolaryngology, Abstracts Vol.33 (2010) p.277.
- (16) Hiroki Somyia, Katsunori Mizuno, Tomohiro Kubo, Mami Matsukawa, Takahiko Otani, and Yoshiki Nagatani, "The effect of three dimensional trabecular frame structure on the fast wave velocity in bovine cancellous bone," Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.30 (2009) pp.583-584.
- (17) 山下哲範・西村忠己・長谷芳樹・岡安唯・阪口剛史・柳井修一・細井裕司,"骨導超音波の母音弁別能," Audiology Japan Vol.52 No.5 (2009) pp.409-410.
- (18) 岡安唯・西村忠己・山下哲範・柳井修一・中川誠司・吉田悠加・長谷芳樹・細井裕司,"骨導超音波語音の母音の長さに対する脳磁界反応," Audiology Japan Vol.52 No.5 (2009) pp.379-380.
- (19) Takaaki Koizumi, Kazufumi Yamamoto, Yoshiki Nagatani, Hiroki Soumiya, Takashi Saeki, Yuichiro Yaoi, and Mami Matsukawa, "Propagation of ultrasonic longitudinal wave in the cancellous bone covered by the subchondral bone of bovine femur," Proceedings of IEEE Ultrasonic Symposium 2008 (2008) pp.146-149.
- (20) Takashi SAEKI, Tomohiro KUBO, Mami MATSUKAWA, and Yoshiki NAGATANI, "The effect of soft tissue on the ultrasonic wave propagation in cancellous bone," Proceedings of Symposium on Ultrasonics Electronics, Vol.29 (2008) pp.467-468.
- (21) 山下哲範、西村忠己、長谷芳樹、阪口剛史、岡安唯、柳井修一、細井裕司,"視覚情報が骨

- 導超音波の語音聴力に与える影響," Audiology Japan Vol.51 No.5 (2008) pp.157-158.
- (22) 佐伯崇・長谷芳樹・松川真美,"海綿骨中の縦波超音波伝搬 ～ 軟組織の影響 ～," 電子情報通信学会技術研究報告 (超音波), US2008-23 (2008) pp.5-9.
- (23) Takashi Saeki, Masahiro Emura, Katsunori Mizuno, Mami Matsukawa, and Yoshiki Nagatani, "Effects of bone marrow on the ultrasonic propagation in the cancellous bone - Comparative study on experiment and simulation," Acoustics'08 - Abstract (2008) No. 2380.
- (24) Mami MATSUKAWA, Katsunori Mizuno, and Yoshiki Nagatani, "The fast wave propagation in bovine cancellous bone - experiments and simulation," Acoustics'08 - Proceedings (2008) pp.3587-3592.

[図書] (計1件)

- (1) Pascal Laugier, Guillaume Haiat (Eds.) *et al.*, "Bone Quantitative Ultrasound," Springer (2011) (pp.291-318 執筆担当)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://ultrasonics.jp/nagatani/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷 芳樹 (NAGATANI YOSHIKI)

神戸市立工業高等専門学校 電子工学科  
講師

研究者番号 : 60448769

### (2) 研究分担者

(なし)

### (3) 連携研究者

(なし)