

解説



音響と情報

2. 超音波計測†

蜂屋弘之†† 上羽貞行†††

1. はじめに

超音波とは一般には可聴範囲の音の周波数の上限を越えた音と一般には定義されている。しかし、計測という立場からは、より高い周波数を使った計測技術の延長として可聴域の音波が用いられていると考えることができ、聴くことが目的でない音波は周波数に関係なく“超音波”として扱うことが多い。実際の計測においては、一般に周波数が高いほど減衰が大きいから、対象と目的に応じて数十 Hz（たとえば広域海洋計測）から数 GHz（超音波顕微鏡など）までの広範な周波数が用いられている。

このような計測を目的として考えたとき超音波には以下の特徴がある。

1. 電磁波と比較して伝搬速度が小さい。

空中で 340 m/s、水中では 1500 m/s、金属中で数千 m/s と電磁波に比べ 5 桁程度の差があるため、伝搬時間計測などが容易である。しかし、この点は逆に単位時間あたりの情報伝達量が少ないこととなり欠点ともなっている。

2. 波長の短い波動を比較的容易に扱うことができる。

電磁波と比較して、周波数が同一なら格段に波長の短い波動を利用できるので高精度な測定が可能となる。たとえば、数 GHz の周波数を扱う超音波顕微鏡では分解能が μm 程度となる。

3. 超音波を伝搬させる伝搬媒質が多様で、特に電磁波が苦手とする液体、固体中での伝搬能力が高い。

空中でも道路における車両の検知・計数、河川

やダム水位計、積雪計などの応用があるが、現在の超音波の計測的応用の大きな柱は、海洋計測への利用、非破壊検査への利用、医用診断への利用である。ここでは数多くの応用例の中から特徴的な例について概説する。

2. 広域海洋計測(海洋音響トモグラフィ)

海中を伝搬する音波は海洋の物理的情報をその中に含んでいる。海洋の物理的性質が音響信号に対してどのような影響を与えるのかが明確に理解できれば、逆に音響信号から海洋の情報を引き出すことができる。このような考えから、Munk と Wunsch は音波伝搬を利用して海洋変動の分布を得る海洋音響トモグラフィを提案した¹⁾。

2.1 海洋における長距離音波伝搬

海中の音速は、温度・圧力・塩分濃度によって変化する。塩分濃度はある海域内ではほぼ一定と考えてよいので、温度・圧力のみを考慮すればよい。圧力が一定であれば温度が高いほど音速は大きい。温度が一定であれば圧力が高いほど音速は大きい。海水の温度は表層から下層に向かって低下し、一方、圧力は増加する。これら二つの効果で、音速鉛直分布は深度方向に音速極小層をもつことになる。中緯度地方では、水深 1000 m 付近で音速が最小となり、海底深度が数千 m の海域ではこの音速最小となる深度を中心として音波が屈折しながら、遠距離まで安定に音波を伝搬させることができる。図-1 に音速分布の一例とそのとき一組の送受波器間を伝搬する音波伝搬経路の一部を示す。このような音波伝搬を利用して、海洋変動の広域観測が行われる。

従来の海洋観測では m 個の測定点から m 個の点観測値が得られる。しかし、海洋中に s 個の送波器と r 個の受波器を設置し、音波を送受波器間に伝搬させれば、水平方向に計 $r \times s$ 個の経路が存在し、従来の点観測に比べ、非常に広い範

† Ultrasonic Measurement Application by Hiroyuki HACHIYA (Dept. of Information and Computer Sciences, Faculty of Engineering, Chiba University) and Sadayuki UEHA (Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology).

†† 千葉大学工学部情報工学科

††† 東京工業大学精密工学研究所

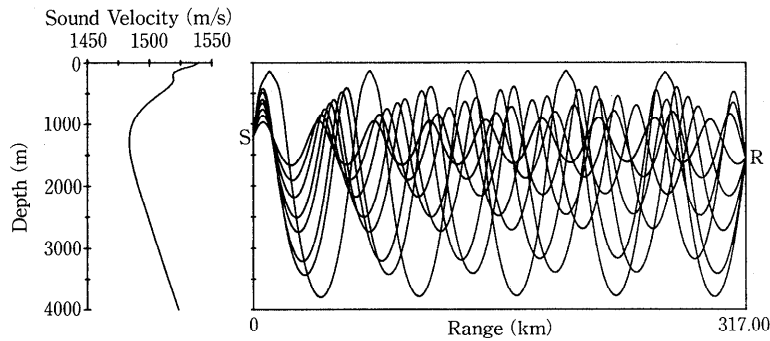


図-1 海洋中の長距離音波伝搬

図の情報を得ることができる。さらに、音源・受波器対を含む垂直面内には ρ 個の分解可能な音波伝搬経路がある。深度数千 m、距離数百 km の海洋伝搬では、分離できる音波伝搬経路は通常 10 程度である。これらの経路は別々の垂直軌道を持ち、かつ音源と受波器の深度を適当に調整すると、海面から海底付近まで音波が通過するようにでき、深度方向の情報も得られる。また、この方法は空間的に積分された情報を測定するので、音波伝搬経路上の微小な変動が平均化され、中規模の変動のみが抽出される利点もある。海洋音響トモグラフィでは、主に音波伝搬時間が計測され、このデータより音速分布が求められ、温度分布・流速構造の推定が行われる。

2.2 伝搬時間からの音速分布推定

音速分布を $c_0(\mathbf{r})$ とする。ここで、 \mathbf{r} は位置ベクトルである。ある一対の送受波器間を経路 Γ_0 に沿って伝搬する音線の伝搬時間 T_0 は

$$T_0 = \int_{\Gamma_0} \frac{ds}{c_0(\mathbf{r})} \tag{1}$$

ds は Γ 上の線ベクトルを表す。

時刻 t のとき、音速分布が

$$c(\mathbf{r}, t) = c_0(\mathbf{r}) + \delta c(\mathbf{r}, t) \tag{2}$$

に変化したとき経路 Γ_0 は Γ_1 に変化し、伝搬時間 T_1 は

$$T_1 = \int_{\Gamma_1} \frac{ds}{c(\mathbf{r}, t)} \tag{3}$$

T_1 は次式のように展開できる。

$$T_1 = \int_{\Gamma_1} \frac{ds}{c_0} \left[1 - \frac{\delta c}{c_0} + \left(\frac{\delta c}{c_0} \right)^2 - \dots \right] \tag{4}$$

音速変動 δc が海洋の平均的な音速値 c_0 より十分に小さいとすると、高次の項を無視することができ、音速変動 δc と伝搬時間変動 δT との間には次の線形近似が成り立つ。

$$\delta T = T_1 - T_0 \tag{5}$$

$$\approx - \int_{\Gamma_0} \frac{\delta c}{c_0^2(\mathbf{r})} ds \tag{6}$$

2.3 中規模海洋構造計測例

米国のトモグラフィグループにより、1981年春バーミューダ島の近くで最初の海洋音響トモグラフィ実験が行われ、海洋中の中規模渦を長期連続観測できることが示された^{2),3)}。計測結果の一例を図-2に示す。2カ月間の計測結果であり、700 m 層の音速分布である。両端の図は直接船により観測した結果である。等音速線は 1 m/s ごとに描かれている。水塊の挙動が追跡されている。その後もいくつかの実験、検討が行われ、日本も含めた実用的な計測システムの構成が検討されている^{6),5)}。さらに、最近では地球温暖化の問題に関連し数千 km の長距離を伝搬する音波の伝搬時間を長期連続的に計測し $m^{\circ}C/年$ 程度の海洋のわずかな平均水温変化を観測しようという試みもあり興味深い⁷⁾。

3. 海洋調査手法

3.1 水産資源調査

水産は水中音響技術を広範囲に利用しており、ほとんどすべての漁船は魚群探知機やソナーなどの音響機器を搭載している。これらの音響機器は、漁業を大幅に合理化したが、近年では取るだけでなく、漁業資源の正確な把握による資源の有効利用ないしは資源管理が叫ばれている。このような観点から、水産音響技術は、単なる漁撈用技術にとどまらず、水産資源調査や海洋生物の生態の調査研究用技術へと大きく発展している。

図-3に資源調査方法を対象別に示す⁸⁾。個体推定では音響系の分解能を上げ、個々の魚からの反

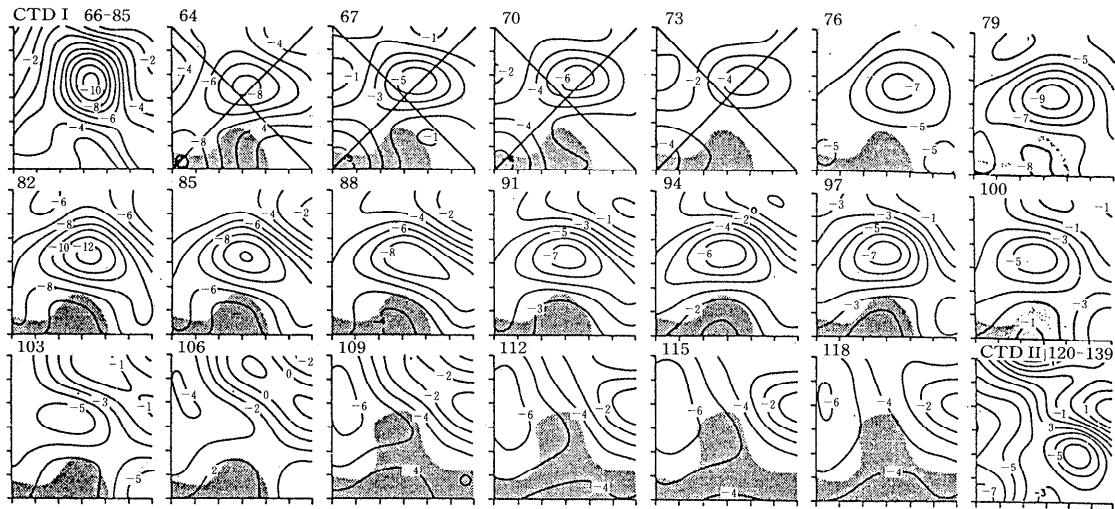


図-2 海洋音響トモグラフィ計測結果

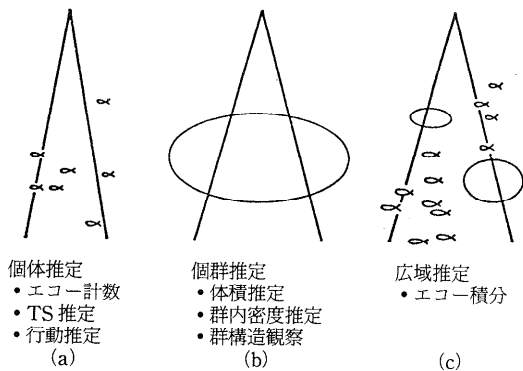


図-3 漁業資源調査法の分類

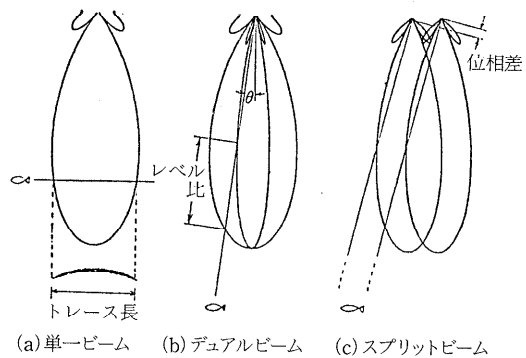


図-4 ターゲットストレングス測定の原理

射波を分離し、そのエコー強度、エコーの個数から分布密度、個々の魚体の強度反射率に相当するターゲットストレングスが求められる。個群推定ではある魚群を対象とした推定方法である。群内の散乱強度から群内密度を推定する。広域推定では複数回の速度により得られた多数の反射波を重ね合わせ広い水域全体の平均体積散乱強度または平均密度を求める。

個体推定において個々の魚からのエコー強度 I は、

$$I = Kb^2 T \quad (7)$$

b は指向性関数と呼ばれ、音響ビームの方向の関数で方向による感度を示すものである。送受を同じ振動子で行うので b^2 となる。 T はターゲットストレングス (TS) と呼ばれる。 K は電気系と音響系の変換効率などを含む電気音響係数である。 K は既知であるが、そのままでは魚が音響

変換器に対してどの方向にいるか分からないので、指向性関数 b の値が不明となり、受波された信号からは魚体のターゲットストレングスが分からない。

このターゲットストレングスの推定のために、いくつかの方法が考えられてきた(図-4)。エコートレース法は、単一の音響ビームを用い、ビーム内を魚が移動するときに得られる一定レベル以上のエコートレースの長さから TS を求める方法である。この方法は、簡単ではあるが定量性が低く、最近ではデュアルビーム法、スプリットビーム法が使われている。前者では同一周波の音波の広がりが多い・狭い二つの音響ビームを用い、狭いビームで送波し、広・狭の両ビームで受波する。両者の受波強度比からビーム内の位置が分かる。一方、スプリットビーム法は受波時にビームを分割し、両者で得られるエコーの位相差から魚の方

向を検出する。スプリットビーム法の方が正確な推定が行えるが、デュアルビーム法の方が簡単である。ターゲットストレンジス T と体長 L (cm) との間には、デシベル表示でおおよそ

$$T = T_{cm} + 20 \log L \quad (8)$$

の関係がある。 T_{cm} は 1 cm あたりのターゲットストレンジスである。この関係を用いて魚の体長を推定することができる。

最近の計量漁探機は単体エコーを対象としたターゲットストレンジスなどを推定する個体推定と、広域でのエコー積分方式との両機能を合わせた総合計量漁探システムとなっており、定量性は従来と比較にならないほど向上し、各種水産資源調査に用いられている⁹⁾。

3.2 マルチナロービームソナーによる海底地形調査

音響による測深は船舶の船底あるいは舷側に装備された送受波器から音波を放射し、海底からの反射波を受波するまでの時間を計測することで行われる。分解能を高めるために必要以上に音響ビームを細くすると、海上を移動する船舶から測定が行われるため、海底からの反射波を良好に受波できなくなる。さらに、音響ビームを細くするため送受波器の開口を大きくする必要があり、装置の大型化を招いてしまう。

これらの問題を解決する手法としてクロスファンビームを用いた計測装置が 1970 年代半ばから登場し、従来の線の測量から面の測量を可能にした^{10), 11)}。

多数の送波器を一行に並べ、それぞれの送波器から同時に音響パルスを送波すると音波が干渉することで、送受波器列と直交する平面上に扇形のビームが形成される。そこで図-5 に示すように、船の進行方向に対して縦方向に一行の送波器群を、横方向に受波器群を配置する。

送波ビームは船の左右に広く前後に狭い扇形をし、受波ビームは左右が狭く前後が広い扇形をしている。この結果、送波用および受波用のファンビームの重なった部分に、指向幅の狭いペンシルビームが合成される。

ペンシル型ビームは指向特性が非常に鋭いので、船の動揺に対する正確な補正が必要である。送波では、船体の動揺をパーティカルジャイロ等で計測し、複数の送波器ごとに超音波の位相を電

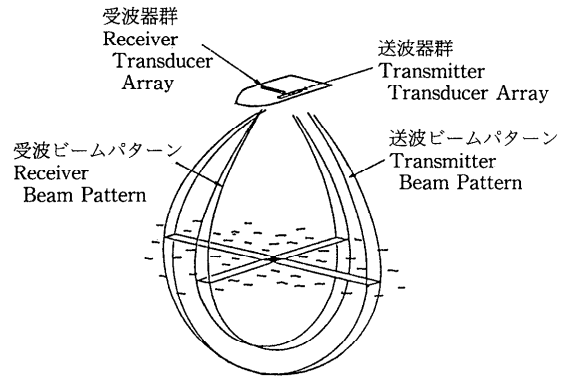


図-5 クロスファンビームによる測深

子的に変化させ、常に真下にビームが向くようにしている。一方、受波は複数の受波器により受波された信号を時間遅延をかけて信号位相を制御することにより一回の受波で複数方向の反射波を分離して検出する。こうして一度の送波で複数のビームによるスキャンを行うことができ精密な海底地形の調査が可能になった。

4. 超音波顕微鏡による計測

超音波顕微鏡という言葉はかなり以前から存在していた。しかしながら空間的分解能が使用波長によって支配されるため、文字どおり超音波顕微鏡を実現するためには、波長のきわめて短い数百メガヘルツ以上の超高周波を発生する必要があった。1970 年代に至り、半導体エレクトロニクスと関連技術の進歩とあいまって超高周波超音波技術が確立され、1972 年にはレーザー走査型顕微鏡¹²⁾が提案され¹²⁾、1973 年には機械走査型顕微鏡¹³⁾が、また 1981 年には物質の音響特性を定量的に測定する専用装置として直線集束ビーム超音波顕微鏡が開発された¹⁴⁾。このように超音波顕微鏡は、物質のマイクロな部分の弾性的性質を (1) 定性的 2 次元画像として計測するいわゆる画像計測装置として使用される場合と、(2) 精密な定量的計測が可能な定量的計測装置として使用される場合がある。

4.1 レーザ走査型超音波顕微鏡による計測

図-6 に示すように、固体あるいは液体を介して試料の後方から超音波を照射すると、入射波面が試料によって空間的に変調され、この波面が試料の直後に配置された液体カップラーに到達する。液体カップラーの密度あるいは表面の凹凸

が、試料によって変調された超音波で空間的・時間的に変調されるので、この表面をレーザービームによって走査し、「光学でこ」とナイフエッジを用いることで像を得るのがレーザー走査超音波顕微鏡である¹⁵⁾。この方式は、もともと生体試料の情報を得る目的で開発されたもので、適用は比較的薄い試料に限られ、生体試料の他に薄い試料でもある集積回路の非破壊検査にも適用されている。この他、平らな試料の裏面を反射面として利用し、着目する部分に超音波を入射させる反射型もある。

4.2 機械走査型超音波顕微鏡の原理

図-7 に示すように圧電トランスデューサで発生した超音波の平面波を音響レンズにより球面波に変換し、カップラー（水）を介して試料表面に集束させると、固有音響インピーダンス（密度と音速の積）の関数として表される水と試料の反射

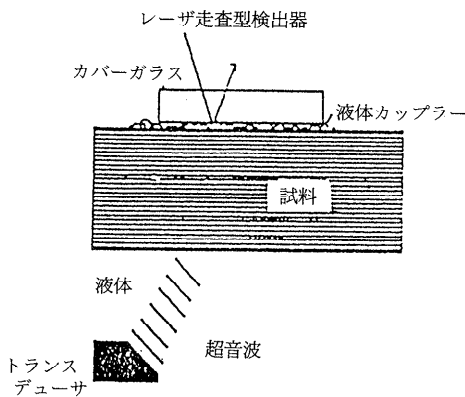


図-6 レーザ走査型超音波顕微鏡の構成

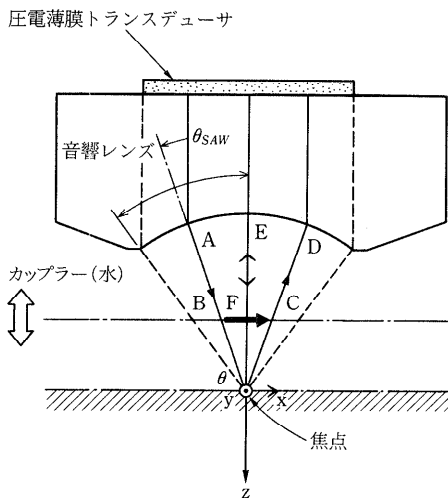


図-7 音響レンズ方式による集束超音波の発生

率に対応した反射波が得られる。この反射波は再び水、レンズを介して圧電トランスデューサに伝搬し、反射波の大きさに比例した電圧を発生する。したがって、図-8 のようなシステムを構成し、反射波の大きさに応じた輝度変調がかけられるモニタを、焦点の試料上の走査と同期して走査することにより、固有音響インピーダンスの分布に対応した超音波画像が得られることになる。この方式も生体の観察に利用されつつある。以上は反射波を利用している場合であるが、透過波も利用することができる。すなわち、試料が比較的薄い場合には、試料の反対側に、焦点を共有する受波用トランスデューサを配置し、透過波の振幅に同様な信号処理を行うことで透過型超音波顕微鏡が構成できる。

4.3 機械走査方式による弾性定数の測定

図-7 で試料の観察表面をレンズの焦点位置より音響レンズ側へずらすと、トランスデューサの出力は、焦点からのズレ(-Z)に対応して図-9 のように変動する。これは、開口角の広い音響レンズから放射される点線で囲まれた範囲にある超音波ビームのうち、表面波を効率的に励振できる

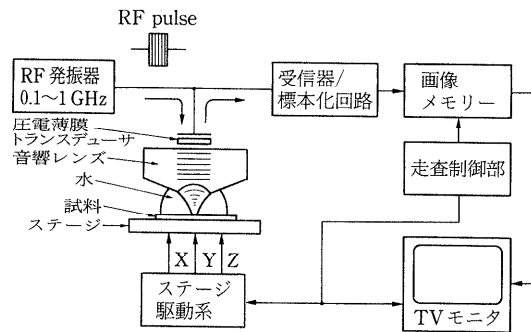


図-8 機械走査型超音波顕微鏡の構成

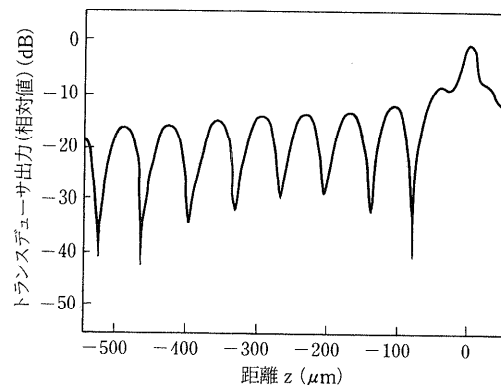


図-9 V(z) 曲線の一例

角度 θ_{SAW} の超音波ビーム AB が試料表面 BC を伝搬した後カップラーの水中へ再放射され、音響レンズを介して圧電トランスデューサに到達した信号と EF のように試料表面から直接反射してきた信号が互いに干渉することによって生じている¹⁰⁾。この曲線は $V(z)$ 曲線と呼ばれており、干渉パターンのピッチ Δz および振幅の減衰係数 α_0 が、それぞれ試料およびカップラーの音速 V_{SAW} , V_w および減衰係数 α , α_w と (9) 式および (10) 式で表される関係を持っているので、カップラーの音速と減衰係数が既知であると、試料の表面波の音速と減衰係数が測定できることになる¹⁰⁾。

$$V_{SAW} = V_w [1 - (1 - V_w 2f \Delta z)^2]^{-1/2} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{V_{SAW}}{2\pi f} \cdot \frac{\alpha_0 \cos \theta_{SAW} + 2\alpha_w}{2 \sin \theta_{SAW}} \quad (10)$$

ただし、 f は超音波の周波数である。

超音波顕微鏡による映像を得る場合には図-6 のような点集束型ビームの系が用いられるが、試料の弾性定数の異方性を測定する場合には、直線状に集束するビームが用いられ¹⁰⁾、SN 比の点で有利であり、表面波素子用素材の特性を測定するのに力を発揮している。

参 考 文 献

- 1) Munk, W. and Wunsch, C.: Ocean Acoustic Tomography: A Scheme for Large Scale Monitoring, Deep-Sea Res. 26, 123-161 (1979).
- 2) The Ocean Tomography Group: A Demonstration of Ocean Acoustic Tomography, Nature, 229, pp. 121-125, Sep. (1982).
- 3) Cornuelli, B., Wunsch, C., Behringer, D. Bird-sall, T., Brown, M., Heinmiller, R., Knox, R., Metzger, K., Munk, W., Spiesberger, J., Spindel, R., Webb, D. and Worcester, P.: Tomographic Maps of the Ocean Mesoscale. Part 1: Pure Acoustics, J. Phys. Oceanogr. 15, pp. 133-152 (1985).
- 4) Spiesberger, J. L.: Ocean Acoustic Tomography: Travel Time Biases, J. Acoust. Soc. of Am., 77, pp. 83-100 (1985).
- 5) Hachiya, H., Ohtsuki, S. and Okujima, M.: An Estimation Method of Vertical Sound Speed Profile in Mid-Deep Water Using Multipath Propagation, Jpn. J. Appl. Phys., 26, [Suppl. 26 -1] pp. 73-75 (1987).
- 6) 中埜岩男, 中村敏明, 藤森英俊, 松下 勝, 賀谷彰夫: 621 km 音波伝搬データによる水温分布の推定, 海洋音響学会平成 6 年度講演論文集, pp. 75-76 (1994).
- 7) Munk, W., and Forbes, A. M. G.: Global Ocean Warming: An acoustic measure?, J.

- Phys. Oceanogr. 19, pp. 1765-1778 (1989).
- 8) 古澤昌彦: 漁業資源の音響調査, 音響学会誌, 43, pp. 431-437 (1994).
- 9) 大久保輝, 今井健一, 倉都健治, 古澤昌彦, 高尾芳三: 新型計量魚探システムの開発, 海洋音響学会平成 6 年度講演論文集, pp. 67-70 (1994).
- 10) Renard, V. and Allenou, J-P.: SEA BEAM, Multi-Beam Echo-Sounding in "Jean Charcot", Int. Hydrogr. Rev. LVI(1), pp. 35-67 (1979).
- 11) 大塚 清, 松本 剛: マルチナロービーム音響測深機 (シービーム) による海底地形調査, 日本音響学会誌, 47, pp. 51-56 (1991).
- 12) Korpel, A., Kessler, L. W. and Palermo, P. R.: Acoustic Microscope Operating at 100 MH, Nature, Vol. 232, No. 5306, pp. 110-111 (1972).
- 13) Lemons, R. A. and Quate, C. F.: A Scanning Acoustic Microscopy, 1973 IEEE Ultrasonics Symp. Proc., pp. 18-20 (1973).
- 14) Kushibiki, J., Ohkubo, A. and Cyubachi, N.: Linearly Focused Acoustic Beams for Acoustic Microscopy, Electron. Lett., Vol. 17, pp. 520-522 (1981).
- 15) Kessler, L. W. et al.: Practical High Resolution Acoustic Microscopy, "Acoustical Holography", ed. by G. Wade, Academic Press, New York, pp. 51-57 (1973).
- 16) Kushibiki, J. et al.: Theoretical Analysis of $V(z)$ Curves Measured by Acoustic Line-Focus Beam, 1982 IEEE Ultrasonics Symp. Proc., pp. 637-640 (1983).

(平成 6 年 7 月 14 日受付)



蜂屋 弘之

昭和 55 年東京工業大学電気電子工学科卒業。昭和 57 年同大学院修士課程修了。同年同大助手。平成 6 年千葉大学助教授。工学博士, 医学博士。現在, 波動情報処理, 超音波応用計測の研究に従事。昭和 62 年音響学会栗屋学術奨励賞, 平成 5 年超音波医学会論文賞受賞。音響学会, 海洋音響各会, 超音波医学会, 電子情報通信学会等各会員。



上羽 貞行

昭和 40 年名古屋工業大学電気工学科卒業。昭和 45 年東京工業大学大学院博士課程修了。同年同大助手。昭和 55 年同助教授。平成 4 年教授。工学博士。現在, 超音波アクチュエータ, 振動モード制御等の研究に従事。昭和 51 年度応物学会光学論文賞, 昭和 59 年度音響学会佐藤論文賞受賞。応物学会, 音響学会, 電子情報通信学会, 超音波医学会等各会員。