

200Hz 低周波音源の開発

新家 富雄^{*1} 土屋 利雄^{*2} 網谷 泰孝^{*2}
中埜 岩男^{*1} 中西 俊之^{*1} 吉川 隆^{*3}
鎌田 弘志^{*3}

海洋科学技術センターは、1,000km 四方の海洋の水温・流向などの立体構造を、低周波の音波を用いてリアルタイムで観測することが可能な海洋音響トモグラフィシステムの開発を実施している。トモグラフィシステムの実現において、音波を1,000km 伝搬させる性能を有する音源が不可欠である。従来から使用されている共鳴管形音源を利用すると形状が極めて大型化し、音響的にも十分な性能を得られなくなることが危惧されている。このため、大出力で小型の低周波音源が望まれていた。

そこで、平成2年度において当センターは、日本鋼管及び沖電気工業と共同で超磁歪材料（希土類合金）を開発し、この材料を駆動材に使用した低周波音源（200 Hz）を開発した。音源の本体は小型・軽量であり、共鳴管形音源に比べ帯域が広く、送波力も大きいものとなった。本稿では、この音源の概要と試験結果について報告する。

キーワード：低周波音源，海洋音響トモグラフィ，希土類合金

Development of a 200Hz Low Frequency Sound Projector

Tomio SHINKE^{*4} Toshio TSUCHIYA^{*5} Yasutaka AMITANI^{*5}
Iwao NAKANO^{*4} Toshiyuki NAKANISHI^{*4}
Takashi YOSHIKAWA^{*6} Hiroshi KAMATA^{*6}

JAMSTEC has been developing an Ocean Acoustic Tomography System whose objective is to measure real time 3-dimensional temperature and current velocity in

* 1 海洋研究部
* 2 深海開発技術部
* 3 沖電気工業株式会社
* 4 Ocean Research Department
* 5 Deep Sea Technology Department
* 6 OKI Electric Industry Co.,Ltd.

an area of 10^6 km^2 ($10^3 \times 10^3 \text{ km}$) using low frequency sound techniques. For the realization of this system, we need a sound projector with a capacity of 1000km sound transmission. However, conventional resonator sound projector are large in size and are not adequate for our purpose. A high power and low frequency small sound projector is needed.

JAMSTEC, NKK, and Oki Electric Industry Co. have developed a super magnetostriction material (rare earth alloy) for their 1990 research project. Using this material, they developed low frequency (200Hz) sound projector. The main body of the sound projector is small and light-weight. The sound projector has a wider frequency band width and has more high sound power than resonator sound projector.

In this paper, we present a summary of the low frequency sound projector system and its development process. We also show the results of performance tests.

Key words : Low frequency sound projector, Ocean acoustic tomography, Rare earth alloy

1 はじめに

海洋科学技術センターは、約 1,000km 四方の海洋の水温・流向などの立体構造を低周波の音波

を用いてリアルタイムで観測する技術として、海洋音響トモグラフィシステムの開発を実施している(図1)。平成元年度には、Webb社製の400

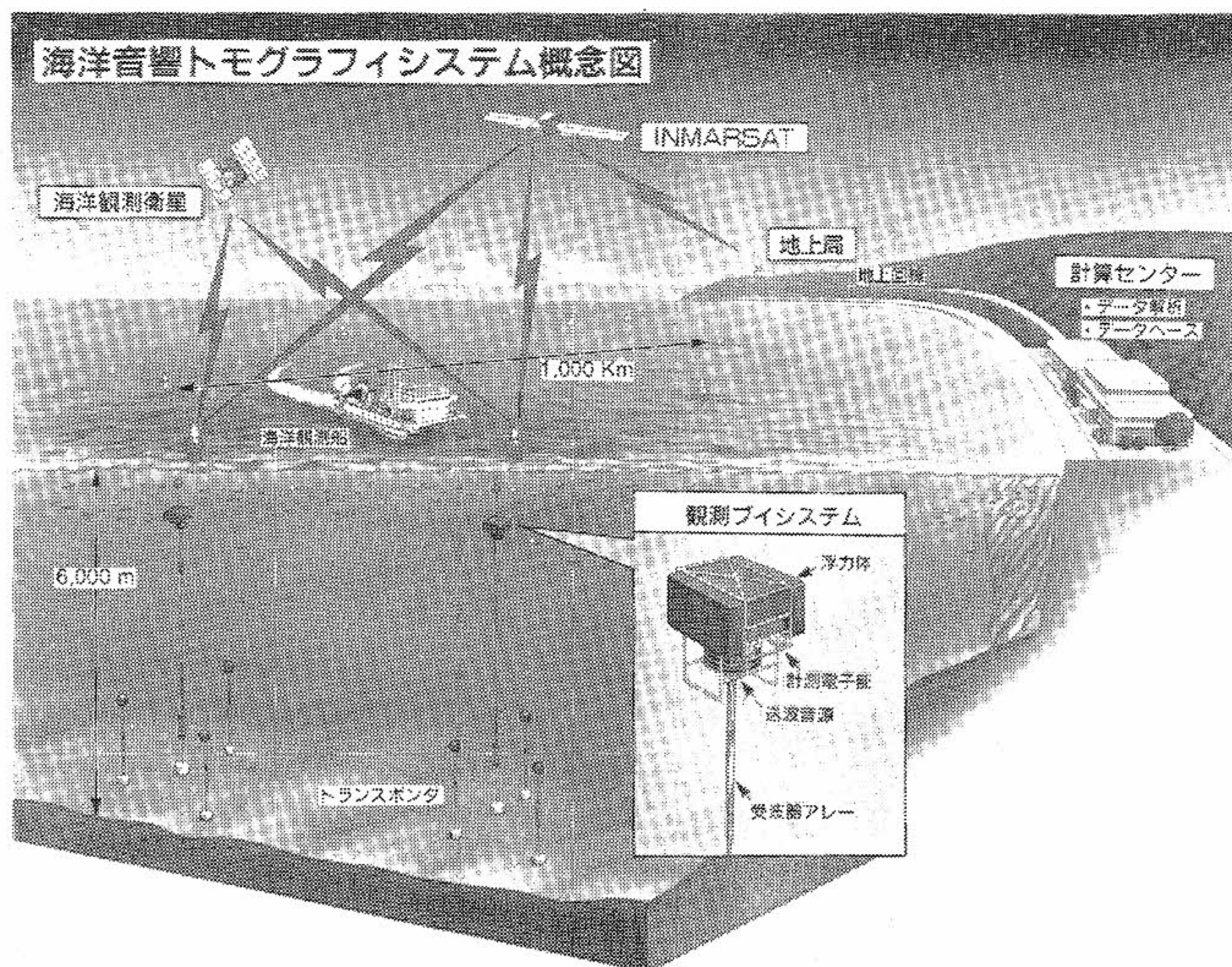


図1 海洋音響トモグラフィシステム概念図

Fig. 1 Concept diagram of ocean acoustic tomography system

Hzパイプ音源¹⁾による300kmの音波伝搬実験に成功した。この成果を受けて、1,000km四方の観測に不可欠な大出力の200Hz低周波音源が望まれた。しかし、検討の結果従来からの共鳴管型音源を利用すると形状が極めて大型化し、音響的にも十分な性能が得られなくなることが分かった。

そこで当センターと、日本鋼管及び沖電気工業の3者は、新しい駆動材として有力な超磁歪材料（希土類合金）の開発を行なった。この希土類合金は、従来使用されている圧電セラミックスに比べ低ヤング率、高歪率を有した材料であり、それを用いるとスチフネスが小さく変位量の大きな低周波、大出力の音源が実現できる可能性がある²⁾。われわれは、この希土類合金を用いた駆動ユニット（アクチュエーター）を開発し、平成2年度には、そのユニットを4個連結した音源を試作した³⁾⁴⁾。さらに、この成果を受けて、実用機を目指して、より低周波でより大出力の音源の開発を行ったので報告する（写真1）。

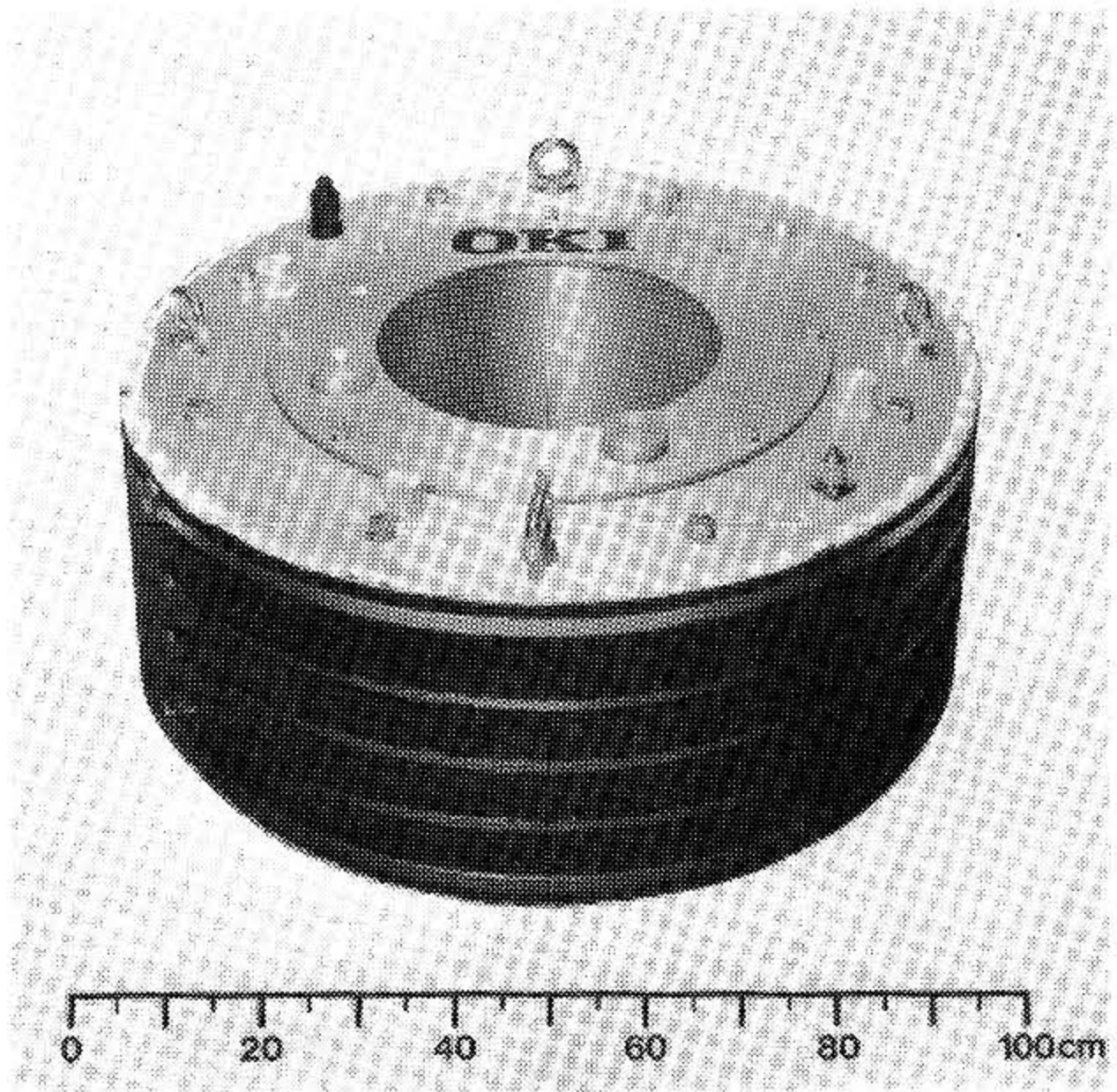


写真1 200Hz低周波音源
Photo 1 200Hz low frequency sound projector

2 音源の開発
表1に、周波数200Hzにおける従来型の共鳴管型、油圧型及び希土類合金を使用した変形バレル型（設計値）音源の性能の比較を示す。
油圧型は共振系以外の機構部分が付加されるために非常に重量が増大する。また共鳴管型は、そ

表1 音源方式の比較
Table 1 Comparison of sound projector

方式	油圧型	共鳴管型	変形ランジュバン型
駆動素子材料	油	セラミックス	希土類合金
共振周波数 (Hz)	250	259	220
帯域幅 (Hz)	90	7	80
Q値	2.8	37	3.9
最大出力音圧 (dB)	214	175	192
電力（最大音圧時） (kw)	15	0.2	0.9
寸法 (mm)	φ500×700	φ220×1100	φ950×400
重量 (kg)	900	180	410
メーカー	Hydracoustic Inc. 米国	沖電気	設計値

の特性上周波数帯域が狭く送信できる情報量が少ないという問題があり、効率的に符号化信号を送信するのは困難である。これらのことをトモグラフィ研究会等で検討した結果、希土類合金を用いた変形バレル型方式によつて200Hz用音源を開発することにした。

2.1 希土類合金の特性
大出力の低周波音源を作るには、その駆動材として低ヤング率で高歪を有することが不可欠な条件となる。しかし、駆動素子として従来から用いられてきたアルフェロ、ニッケル、PZT（ジルコン酸チタン酸鉛系磁器）などは、この条件に必ずしも適合せず、トモグラフィ用の低周波大出力音源の駆動材として使用することは困難であることが予想された。

そこで、この条件に適合する材料として、米国

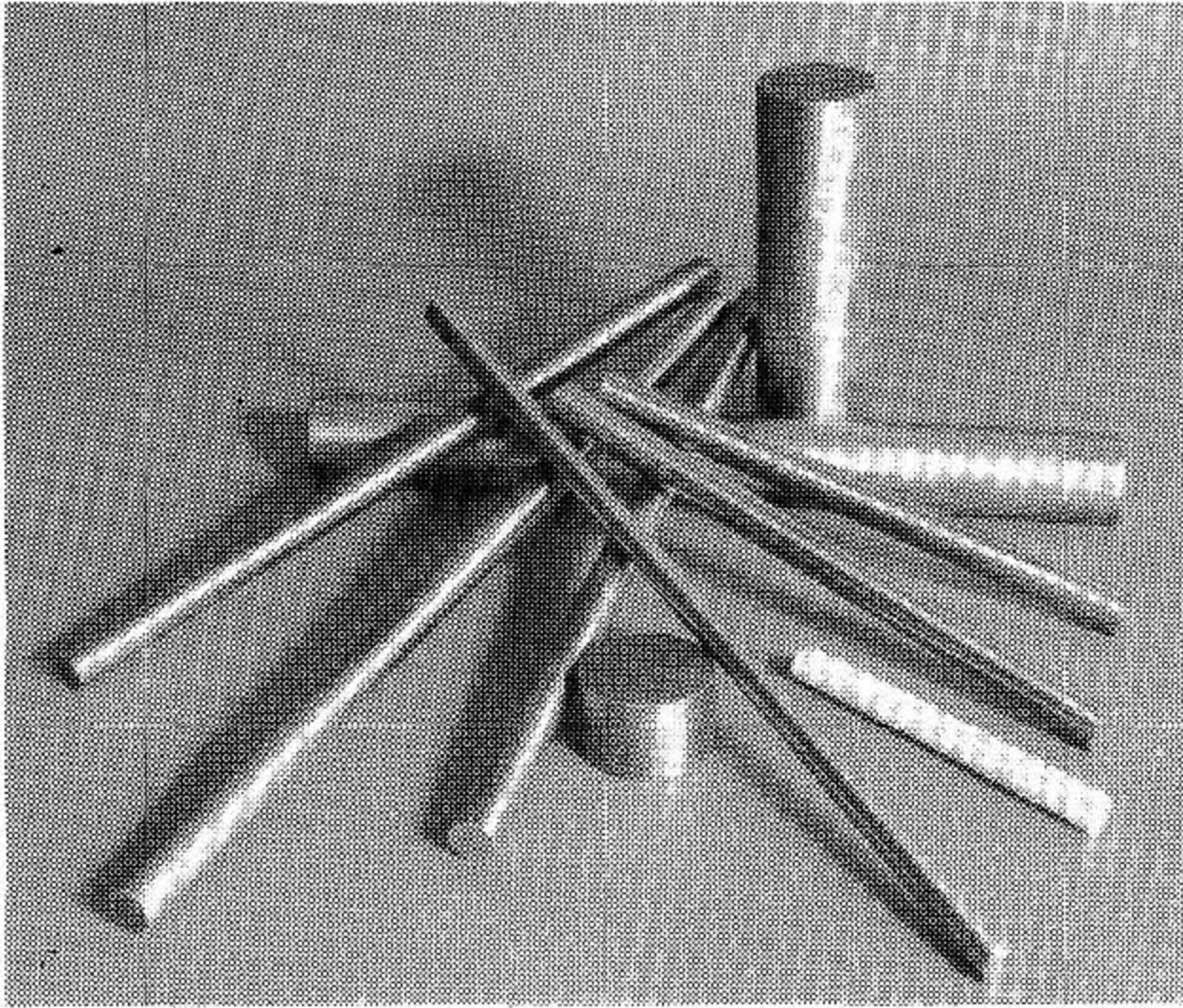


写真2 希土類合金
Photo 2 Rare earth alloy

で研究がされてきた希土類を用いた超磁歪素子、すなわち Terfenol-D（テルビウム，ディスプロシウム，鉄の合金）が有望であることが分かったので³⁾，当センターでは，日本鋼管，沖電気工業との共同研究でこの合金を開発した（写真2）。表2に開発した希土類合金，PZT，ニッケルの素子の諸性能の比較を示す。また，図2にそれぞれの材料の歪特性の比較を示す。これらのことを考え合わせ，この希土類合金を低周波大出力用の駆動材として利用することにした。

表2 材料定数の比較
Table 2 Comparison of material number

項 目	希土類合金	セラミック(PZT)	ニッケル
密度 10^3kg/m^3	9.25	7.49	9.0
ヤング率 10^{10}N/m^2	2.5~3.5	7.5	22.5
電気抵抗 $\mu\Omega\text{cm}$	60	—	660
歪み量 ppm	1500~2000	200*	40
エネルギー密度 J/m^3	14000~25000	930	30
結合係数 %	70~75	65	30

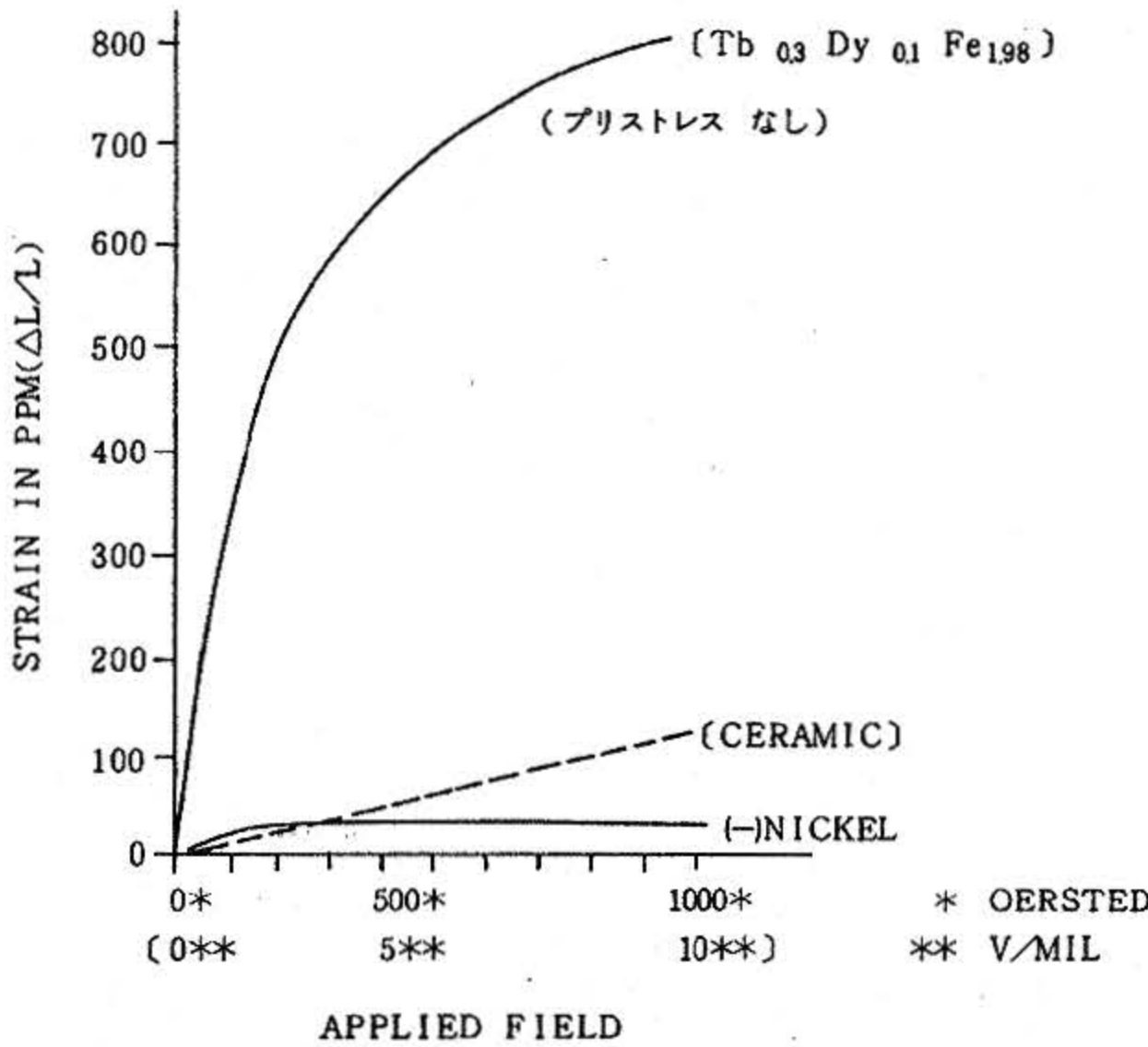


図2 磁歪特性の比較
Fig. 2 Comparison of magnetostriction characteristic

2.2 駆動ユニットの開発

希土類合金の静磁歪特性を図3に示す。図3は磁歪材の軸方向の圧縮荷重を加えた場合と，何も荷重を加えなかった場合の磁歪量を示している。この図からも分かるようにより大きな圧縮荷重を加えるほど，高い飽和歪を得ることができる。そのため実際駆動ユニットとして用いる際には，プ

リストレス用のロッド棒を介して圧縮応力を加える必要がある。

ここで用いた希土類合金は図4に示したような歪特性をもつため，磁歪曲線の中央部（200Oe近傍）に最適な磁気バイアスを与える必要がある。

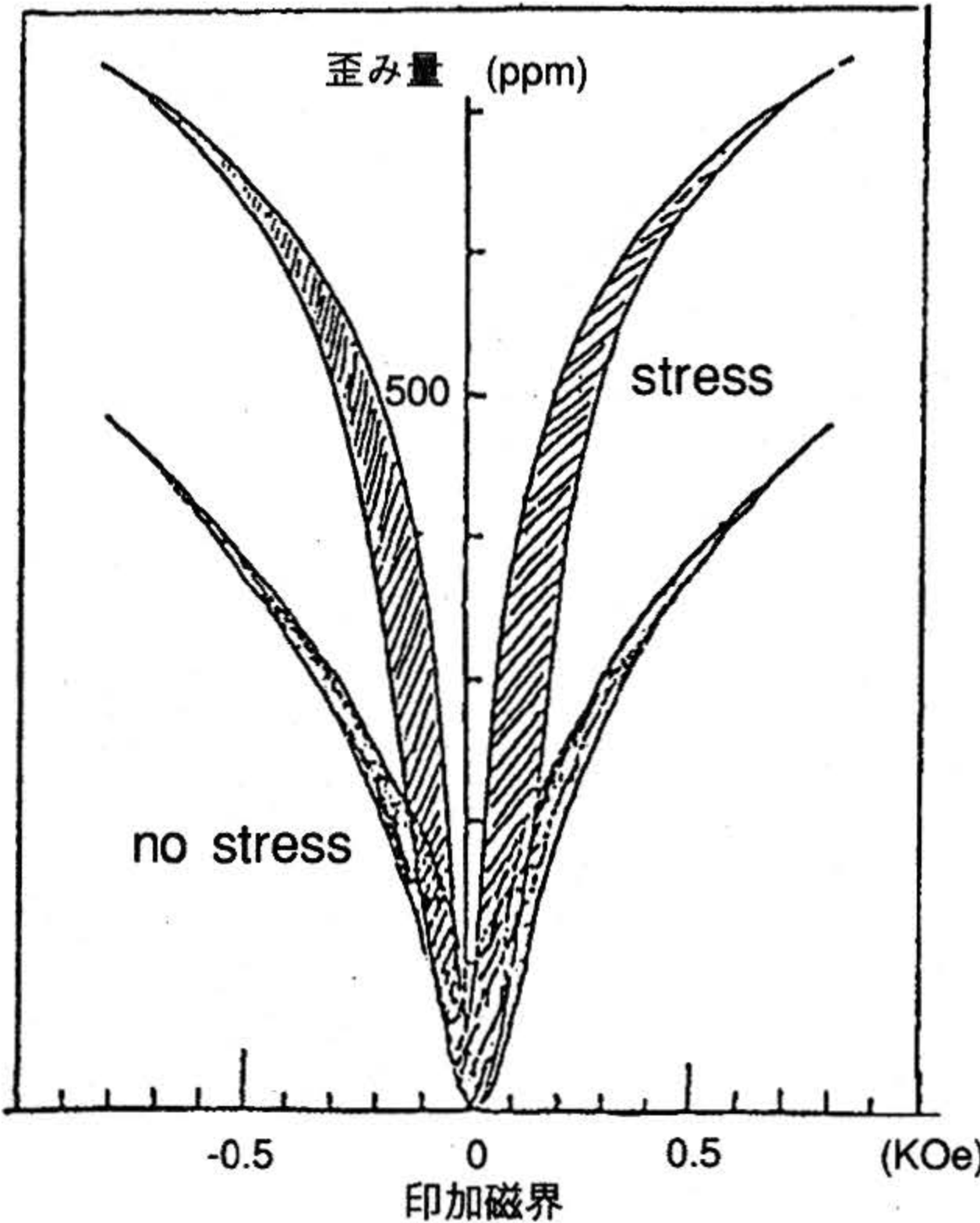


図3 希土類合金の静磁歪特性
Fig. 3 Magnetostriction of rare earth alloy

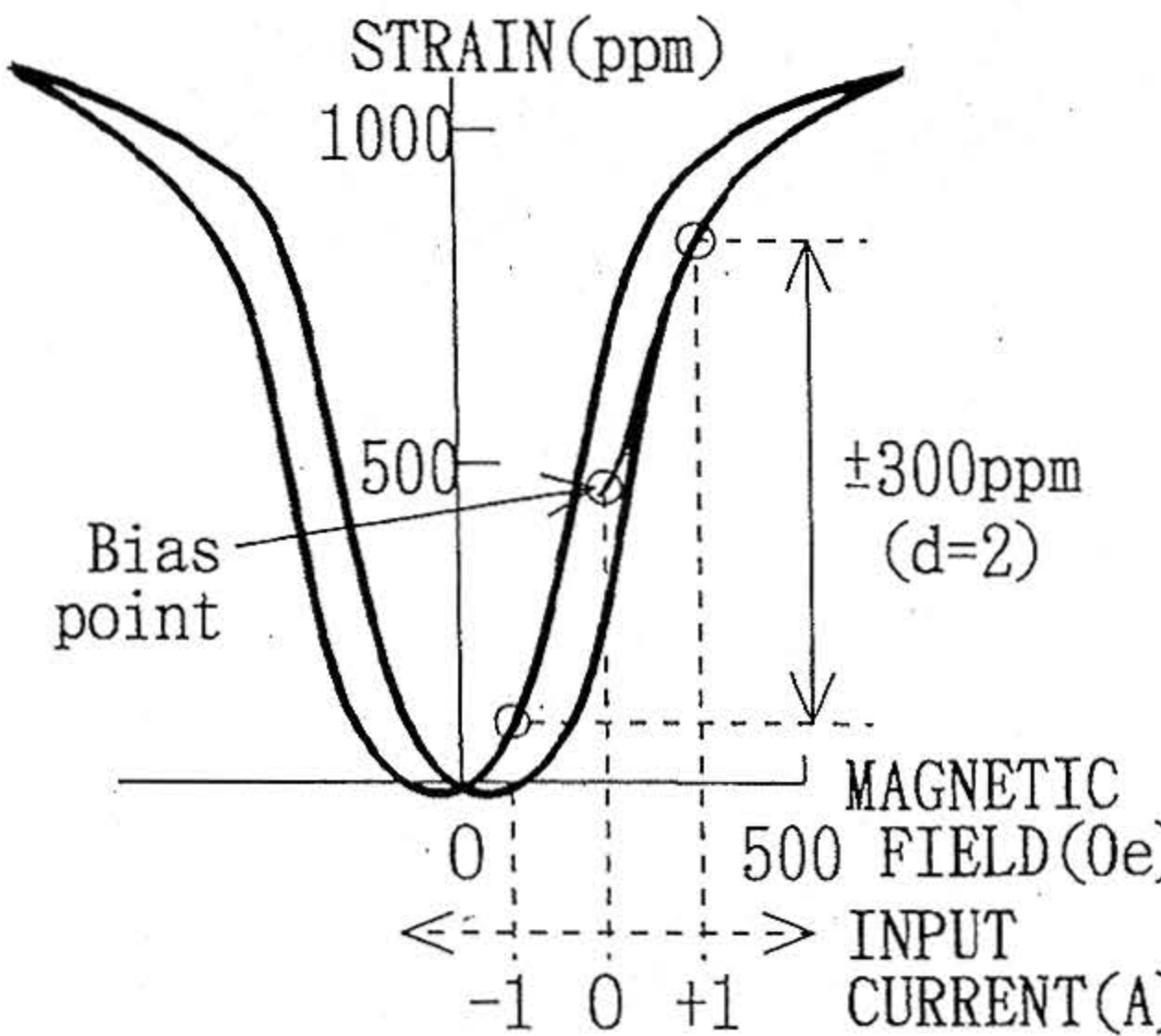


図4 駆動ユニットの静磁歪特性
Fig. 4 Magnetostriction curve of driving unit

ところが希土類合金は比透磁率が3と非常に小さいため、合金棒に様な深いバイアスを与えることは困難である。

そこで、永久磁石を対向させ、合金棒と永久磁石の間に軟鉄（SS41 綱）を挟んで磁束を集中させている。また、使用できる合金棒の長さもロッド内で磁場の分布が均一になる範囲で制限される。図5に今回使用した駆動ユニットの概観を示す。

この図のように、 $\phi 20\text{mm} \times l 120\text{mm}$ のロッド状超磁歪材料がソレノイドコイル内に挿入され、軟

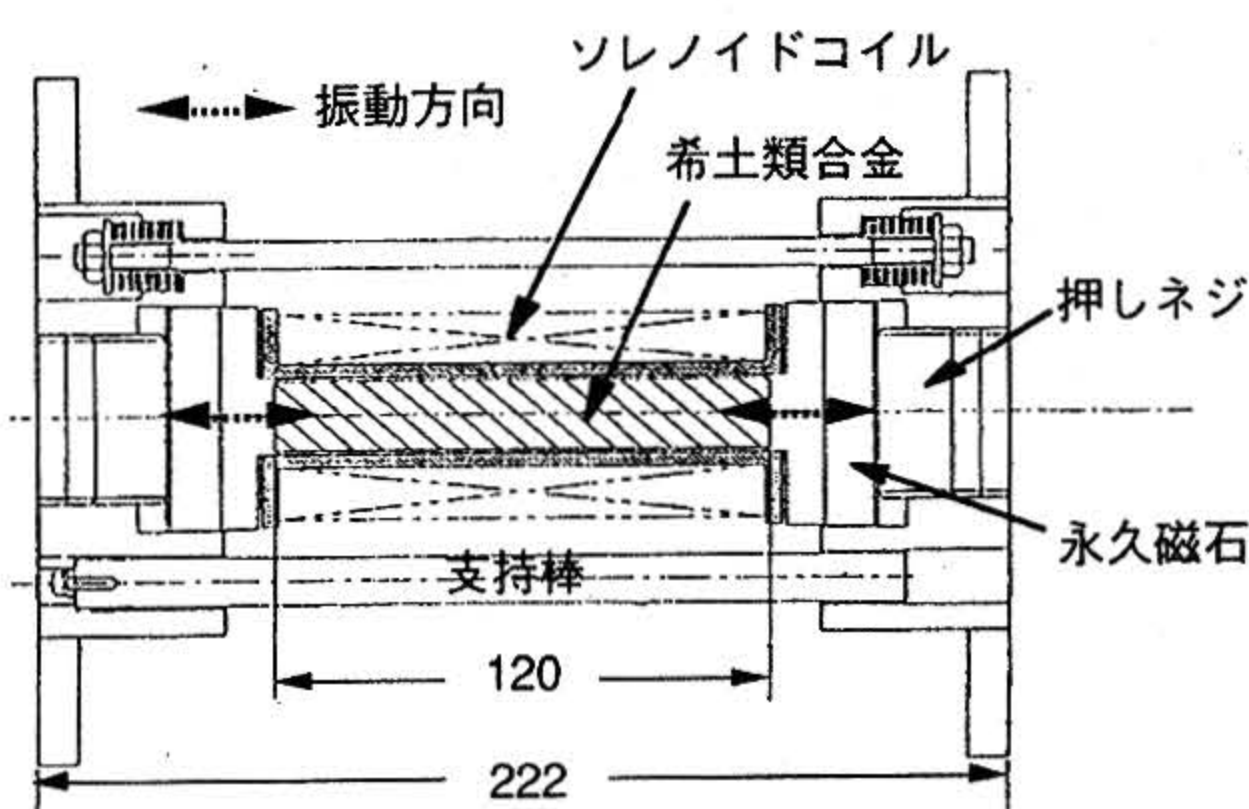


図5 駆動ユニットの構造
Fig. 5 Structure of driving unit

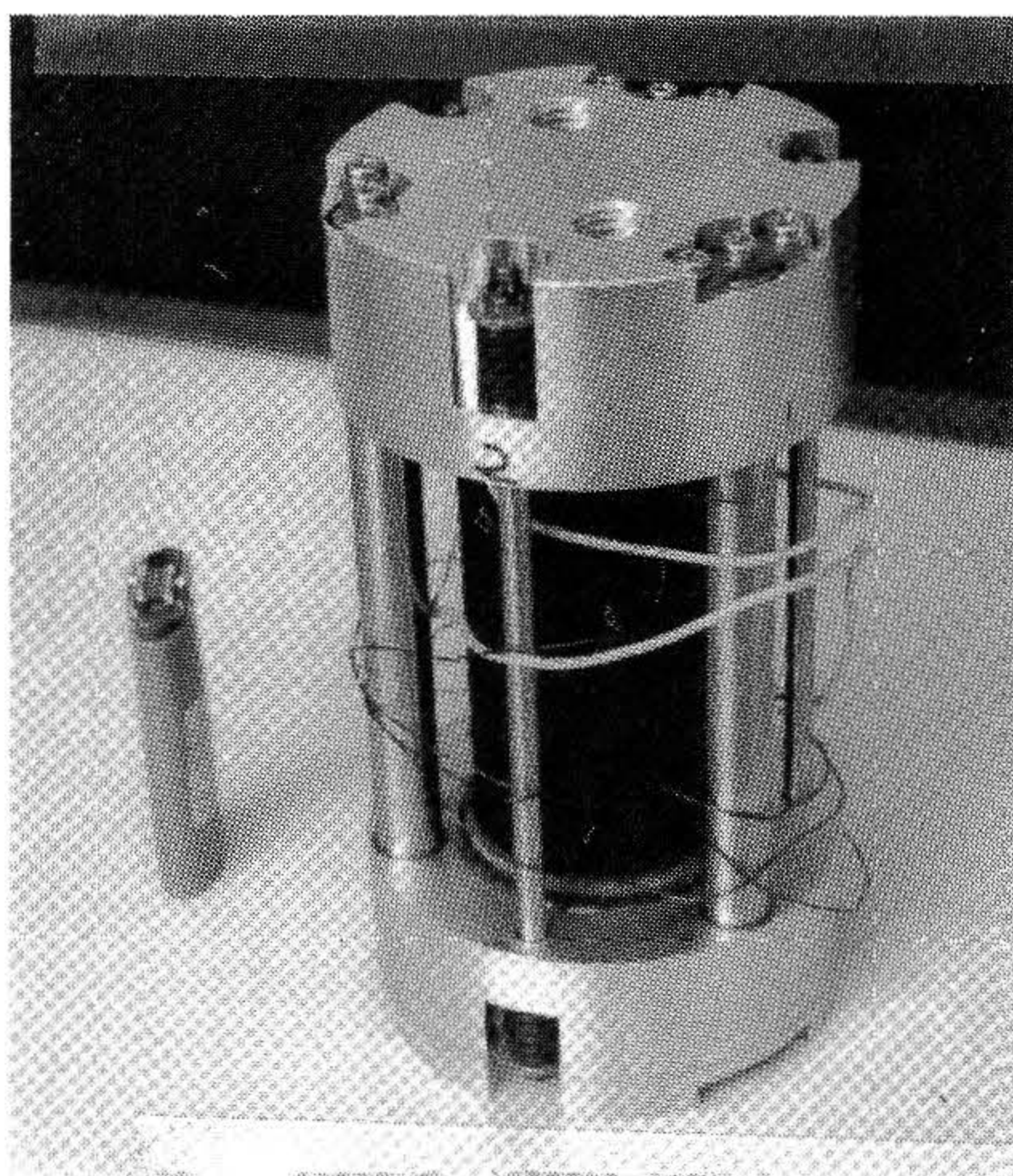


写真3 駆動ユニット
Photo 3 Driving unit

鉄、磁気バイアス用永久磁石を介し両端にフランジを設けた。そして3対のバネにより希土類合金にプリストレスを与えているが、このプリストレス値を微調整するためにフランジの中心に押振機構を設けた。

しかし希土類合金はその機械的特性上非常に脆く、破壊しやすいため、それを防止する目的で、引っ張り破壊強度を小さくし、組立及び駆動において曲げ、振れ応力がかからないよう滑り軸受けに通したシャフト（支持棒）で、1軸方向に自由度を規制している⁴⁾（写真3）。

なお、製作した駆動ユニットを音源に組み込む場合には、ユニット性能の偏差を小さくしなければ音源が一体で振動せず、希土類合金自体に曲げ応力が加わることになるため、今回の駆動ユニットでは偏差5%以内に抑えた。

駆動ユニットの評価基準としては、静歪特性によるd定数（＝磁歪量「ppm」/印加磁界「Oe」）、インピーダンスによる共振周波数、動歪測定による変位量を対象としたが、材料そのものの特性にはまだ数%程度のバラツキがあるため、必ずしも3つの条件を一致させることは不可能であったが、製作する音源は駆動ユニットの共振周波数より十分低周波で用いるので、特にd定数を基準に評価した。

現在のところ、製作できる希土類合金材料の制限から、ユニット性能である平均のd定数、共振周波数、変位量はそれぞれ2.12 [ppm/Oe] (500e⁻⁶ ~ 4500e⁻⁶) 1572 [Hz], 20.5 [dB] (0dB// $\mu\text{m}/\text{A}$) となっている。なお駆動ユニットの重量は7.245 kg、電気機械変換効率は76%となった。

ユニット単体では、これ以上共振周波数を下げ、また出力を上げることも困難である。従って、このユニットを複数個組み合わせて、目的の周波数及び出力を得ることのできる音源の構造を検討し、それを製作することにした。

2.3 音響性能の決定

開発したユニットを使用して大出力の低周波音源を製作するために、ソーナー方程式⁵⁾を用いて1,000km伝搬に必要な送信レベルを決定した。

$$SL \geq TL + NL + DT - PG - AG \quad \dots\dots(1)$$

ここでSLは音源の送信レベル (dB:rel $\mu\text{Pa}/$

m), TL は伝搬損失 (dB), NL は雑音レベル (dB:rel $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hzm}}$), DT は探知域値 (dB), PG は信号処理利得 (dB:rels), そして AG はアレイゲイン (dB) である。

トモグラフィのシステムパラメーターとして, DT, PG 及び AG を次のように設定する。

DT=13.5dB ; PG=20.8dB ; AG=10dB。さらに, システムのマージンを 11.8dB とする。

次に, TL は以下の式で表わせられる⁶⁾。なお, r は伝搬距離 (km) であり, ここでは 1,000km である。

$$TL=20\log r+\alpha r10^{-3} \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

ここで α は海水の吸収減衰であり Thorp の式⁶⁾で以下のように表わされる。なお, f は送信周波数 (kHz) で, ここでは 0.2kHz である。

$$\alpha=\frac{0.11f^2}{1+f^2}+\frac{44f^2}{4100+f^2} \text{ (dB/km)} \quad \cdots(3)$$

(3) 式より TL は 122.6dB となる。なお, 200Hz における NL は 70dB⁷⁾ であり, (1) 式にこれらの値を代入すると SL は 187dB になる。従って, この値を送信レベルの目標性能として音源を製作した。

2.4 音源の構造^{4) 8)}

2.2 項で述べたとおり, 開発したユニットは希土類合金の制限から, 単体ではこれ以上共振周波数を下げることができない。そのため共振周波数を下げ, 大出力を得るために, 音源内でユニットをいくつか連結させる変形バレル型⁹⁾の送波器を製作することにした。

まず, 200Hz 音源を製作する前段階として, 図 6 に示す変形バレル型音源を試作した。駆動ユニット 4 体を図 6 のように 1/4 円弧のフロントマス 4 枚に結合させる構造をとった。これによりユニットの連結により系のスチフネスが下がり, 更にユニットの伸縮振動がフロントマスの径方向の呼吸振動に変換されるため, 媒質排除量が増大し, 低周波化・大出力化が可能となる。また, この方式では放射マスの大きさが自由に設定できるため, 付加マスの効果を利用することで更に低周波・大出力が可能となる。

性能試験の結果, この音源は共振周波数 700Hz,

送波出力 188dB となった。この結果を基に 200 Hz 音源を設計した。製作した 200Hz 音源の概観を図 7 に示す。

200Hz 音源では駆動ユニットを 8 体に増やし,

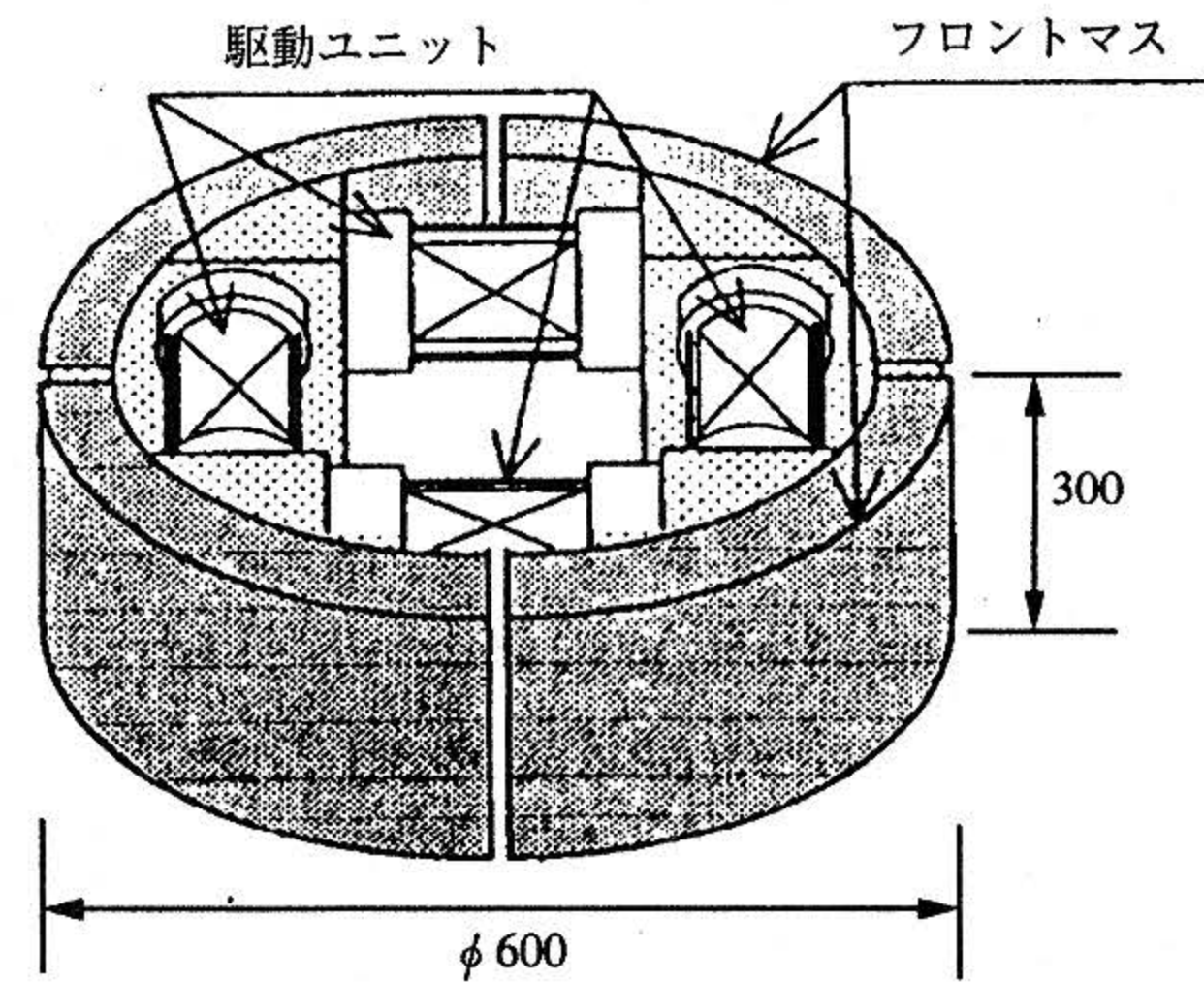


図 6 試作した (700Hz) 音源の構造
Fig. 6 Structure of experimental (700Hz) sound projector

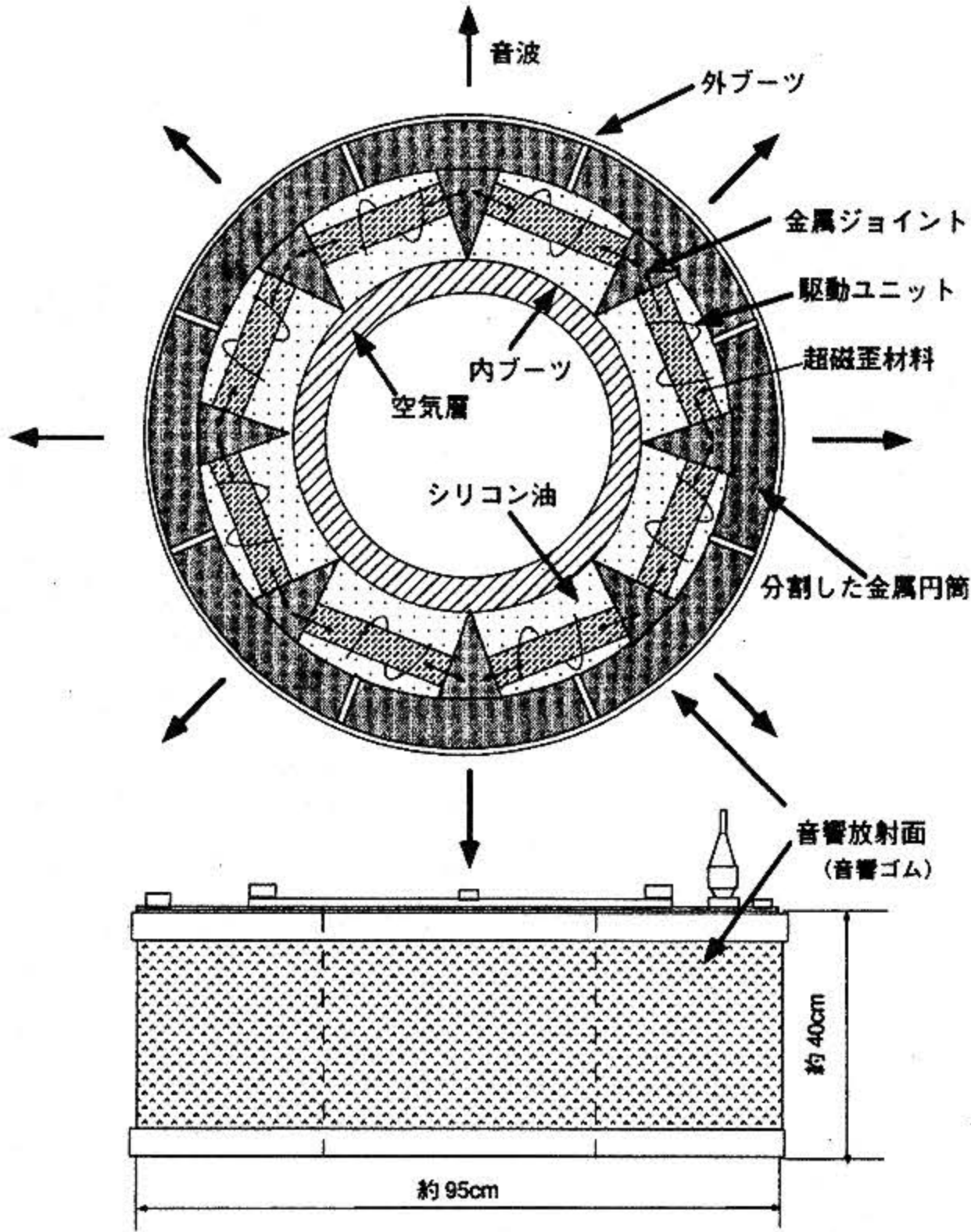
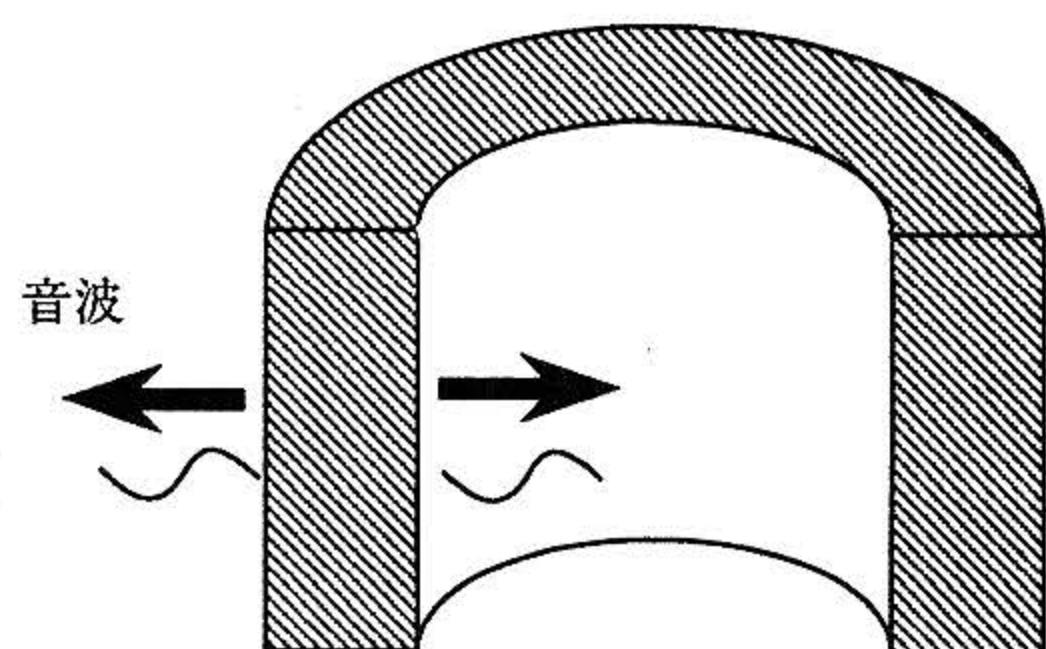


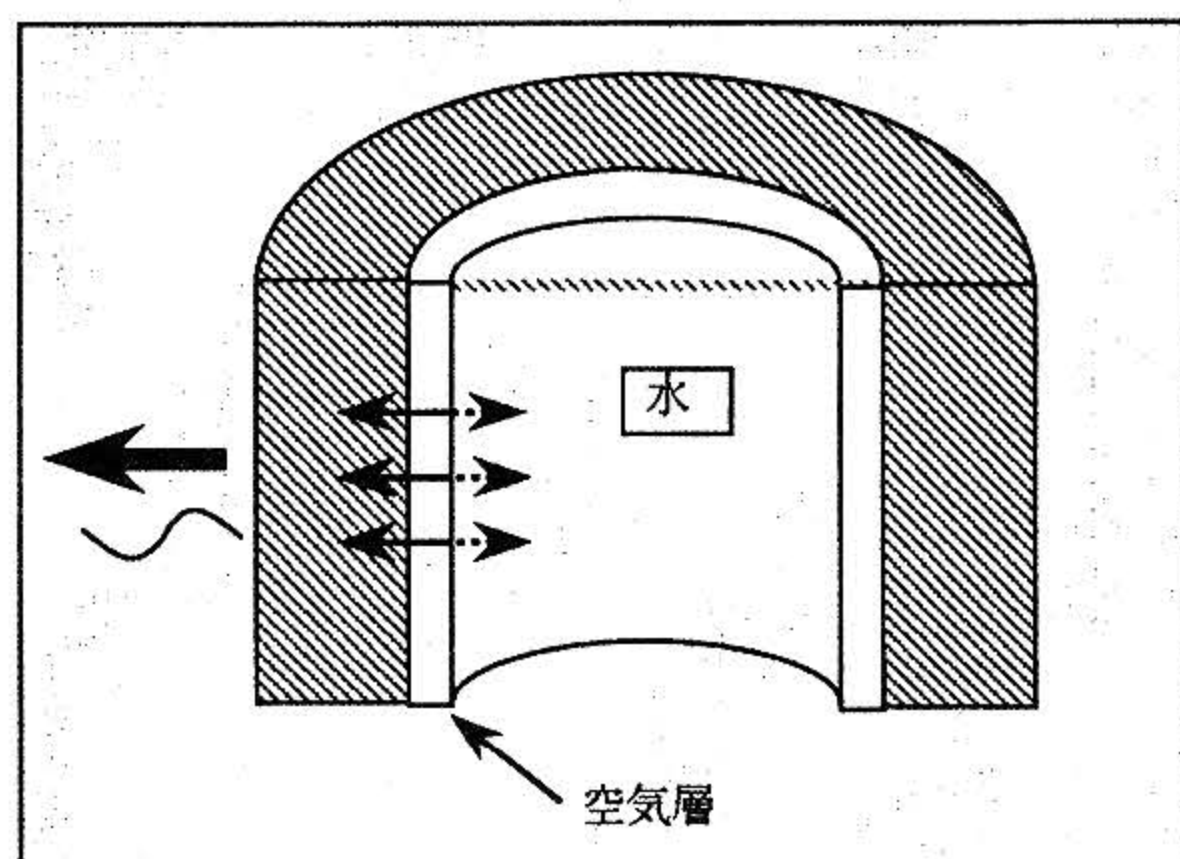
図 7 開発した 200Hz 低周波音源の構造
Fig. 7 Structure of developing 200Hz low frequency sound projector

それらをジョイントによって連結させる方式とした。ジョイント部には円周を放射状に8等分割された音響放射用のフロントマス（金属円筒）を付加されることとなり、全体として系のスチフネスが下がる。

この音源は最大水深 2,000m で使用するので、振動面の内外で静水圧のバランスを保たなければならない。そのため、駆動部分の周りには音響透過性のよいシリコンオイルを満たし、内ブーツと外ブーツにより水密を保つ必要がある。しかし、図8に示すように、このままで使用すると音源は内ブーツの内側からと外ブーツの外側から、それぞれ逆位相の音波を出力するため、互いに干渉し合い出力音圧が低下してしまう結果となる。そこで、内ブーツの内側に剛壁を設ければ逆相の音波が抑えられることになるが、それではシリコンオイル入りスチフネスが支配的となり、共振周波数



※ 振動面の裏から逆相の音ができる



※ 逆相の音を出さずに
内壁からの反射を使う

図8 空気層の概念図

Fig. 8 Concept diagram of air layer

が上がってしまう。このことが、音源全体のスチフネスが駆動部分のスチフネスによって決定される構造となる。これらの問題を解決するために、内ブーツのさらに内側に空気層を設ける構造とした。図7中、最内側の斜線部分は金属壁で仕切られた空気層を示している。この部分に圧力補償装置より圧縮空気を供給して水圧バランスを保っている（写真4）。

図9に圧力補償装置の系統を示す。この図の中央に示すチャンバが水圧と内圧との差圧に反応することにより、機械的に保圧弁と減圧弁を開閉させる。海水圧の方が高い場合には、チャンバが保圧弁を開きガスボンベから空気層内に圧力（高圧ガス）を供給する。また、空気層内圧が高い場合には、チャンバが減圧弁を開き空気層から余剰圧力（ガス）を放出する。これらの動作は均圧になるまで行なう。

この装置には容量2リットルのゴム製バッファが取り付けられており、これにより 6kg/cm^2 (100 m 程度の深度変化) の差圧を吸収することができ、ガス消費量を軽減することが可能になった。

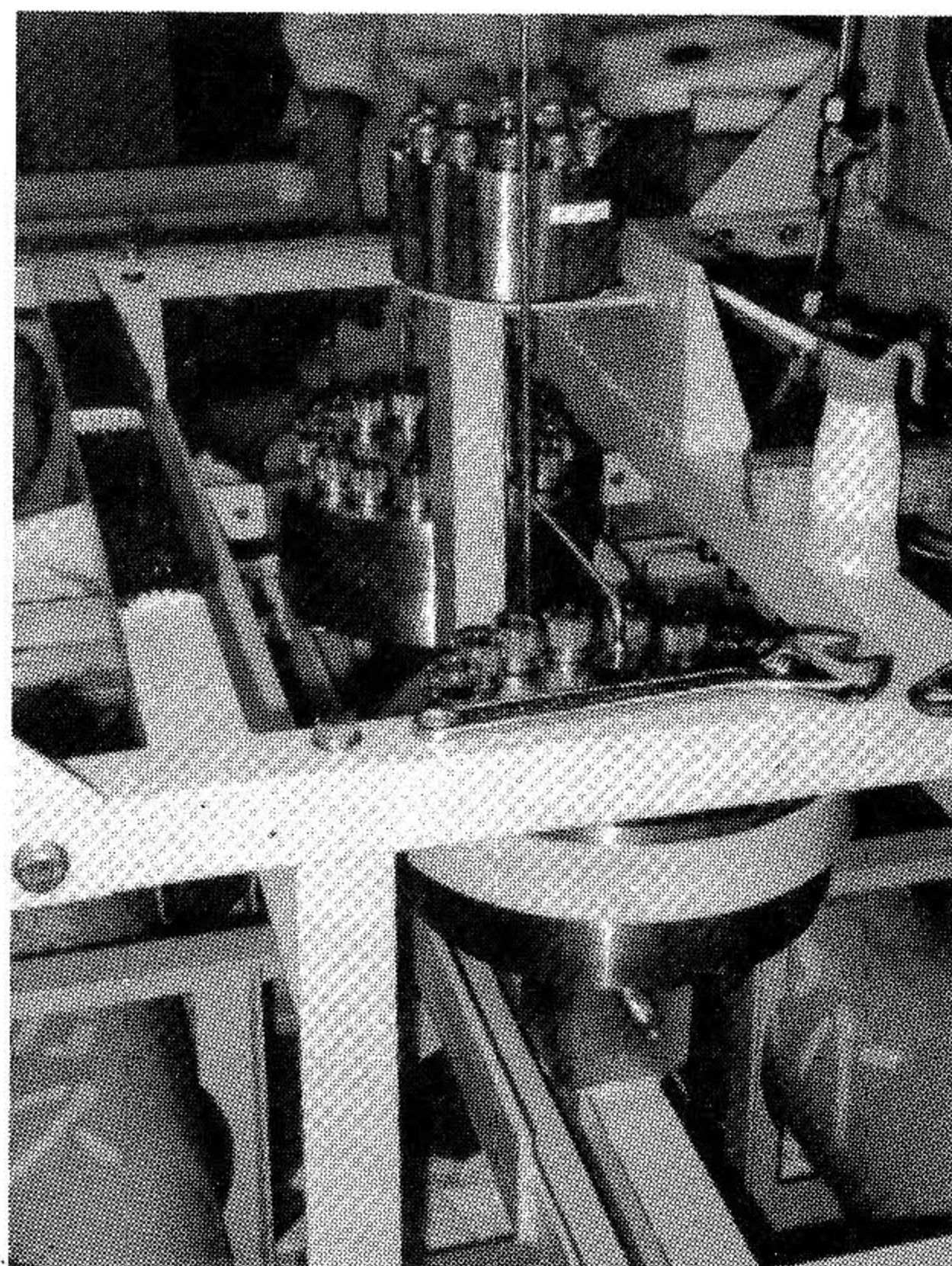


写真4 圧力補償装置

Photo 4 Pressure compensater

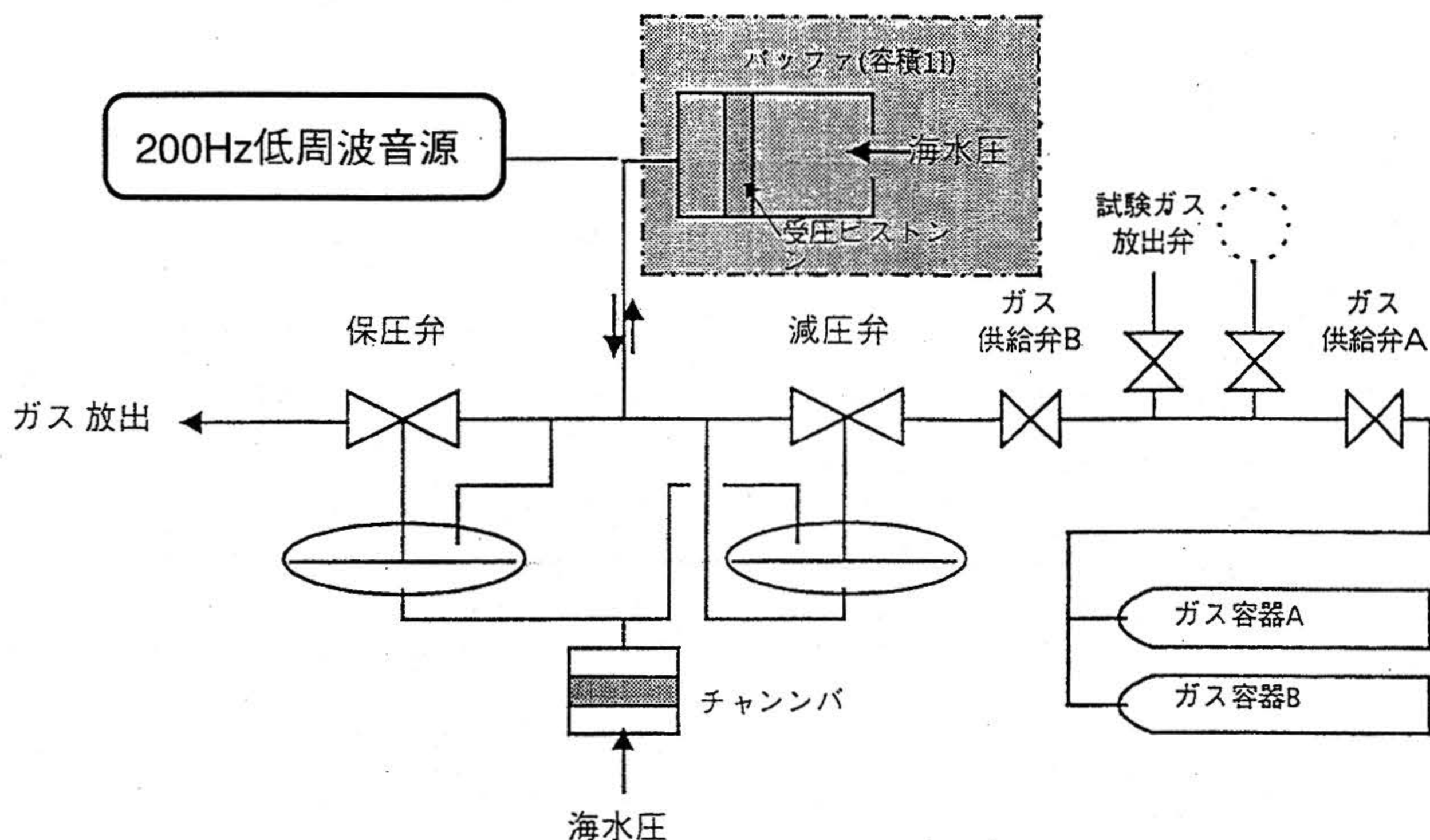


図9 圧力補償装置の概念図

Fig. 9 Concept diagram of pressure compensater

3 音源の性能確認試験結果

製作した音源を評価するために、まず圧力補償装置を取付けて水圧の圧力依存度を調べた。試験は沼津市三津浜沖にて、水深 30m, 50m, 100m において行なった。図 10 に水深 100m での送波音圧感度を比較校正法により測定した結果を示す。この図のように音源の共振周波数は 236Hz, 帯域幅 60Hz であった。この周波数が高くなった原因としては、これ以上の大きさの音響ゴムブーツの製造が不可能であったため、フロントマスが設計値まで大きくできなかったと考えられる。

図 11 に共振周波数における入力電圧に対する出力音圧の測定結果を示す。図中矢印で示す点が 190.5dB であり、この時の入力電力は 468W であった。この結果から、実際に定格最大入力電力 900 W を入力すると 193dB を確保できることは十分に予想される。さらに、実海域における水深 2,000m での動作確認を行い、同様の音響出力が得ることができ、正常に作動していることを確認した。

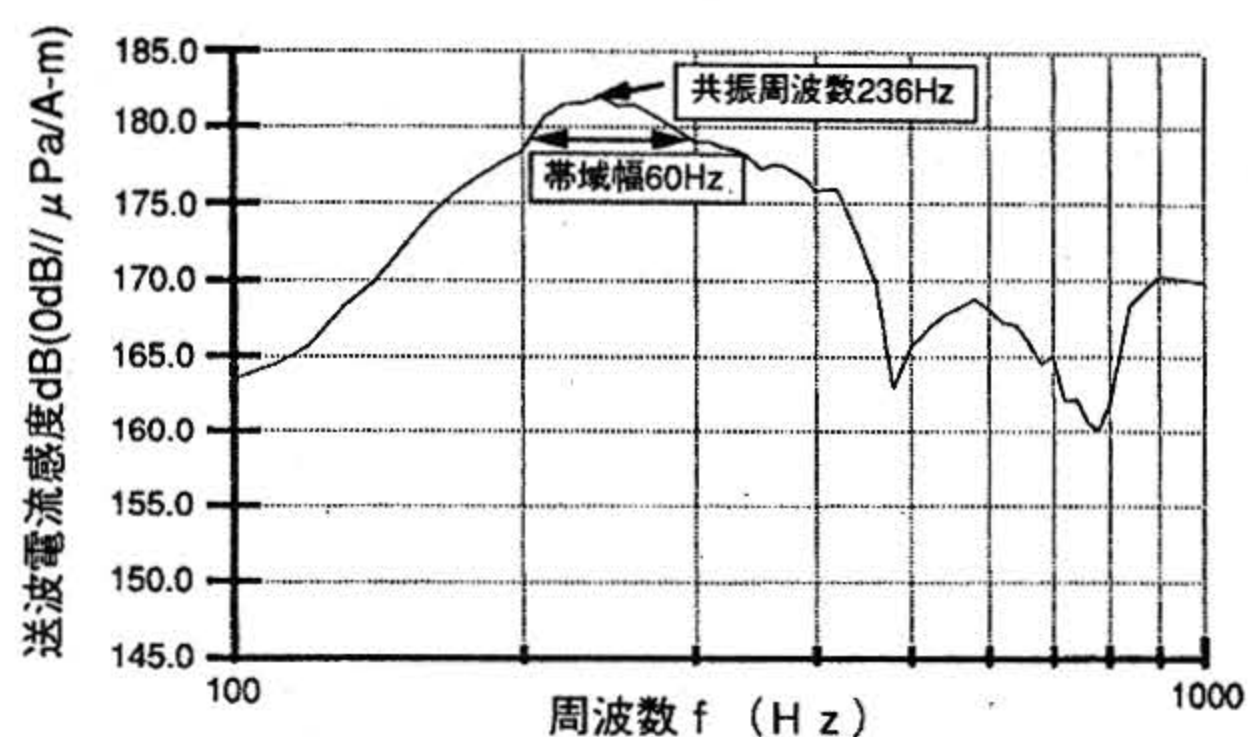


図10 送波電流感度

Fig.10 Transmitting current response

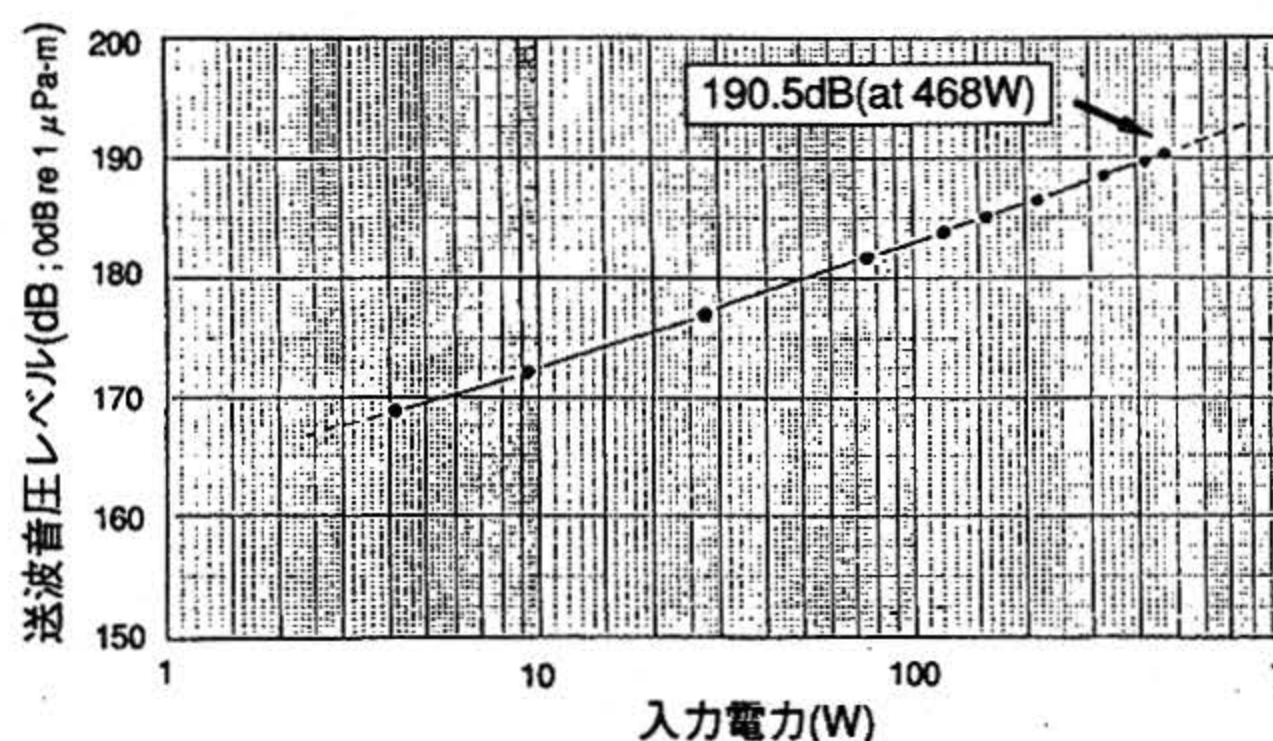


図11 共振周波数における出力測定

Fig11 Measurement of sound pressure at resonance frequency

4 おわりに

この結果により、希土類合金を用いた低周波音源が、海洋音響トモグラフィ用音源として利用できる目途をつけることができた。

今後、この音源を中核とするシステムの構築を行ない、平成7年度までに実用的な海洋観測システムを完成させる予定である。

謝 辞

海上実験において多大なる協力をいただいた海洋調査船「かいよう」の、湯川 修船長はじめ乗組員各位、適切な指導をいただいた海洋音響トモグラフィ研究会の委員の方々、及び駆動材の開発において、ご協力頂いた日本鋼管(株)の関係者各位に深謝します。

参考文献

- 1) 網谷泰孝・土屋利雄・越智 寛：Webb社製海洋音響トモグラフィトランシーバースシステムについて、海洋科学技術センター試験研究報告，28，47-55.(1992)
- 2) 吉川 隆・小林圭一・中西俊之・村上勝彦：レアアース材を用いた低周波送波器，第5回海洋音響研究会講演論文集，p61-64.(1989)
- 3) 小林忠彦・佐橋政司：超磁歪材料とその音響応用，電子通信学会技術報告，p51-56.(1991)

- 4) 河守章好・吉川 隆・和泉 仁・鎌田弘志・中埜岩男・土屋利雄・網谷泰孝・中西俊之：超磁歪材料を用いた呼吸振動音源，平成4年秋季日本音響学会研究発表会講論集，p1149-1150.(1992)
- 5) R.J.ユーリック著，土屋明訳・西村 實監修：“ソナー方程式”.p18-31./水中音響の原理，共立出版(1978)
- 6) R.J.ユーリック著，土屋明訳・西村 實監修：“海洋における音波伝搬：伝搬損失1”.p99-144./水中音響の原理，共立出版(1978)
- 7) R.J.ユーリック著，土屋明訳・西村 實監修：“海洋における背景雑音：周囲雑音レベル” p193-225./水中音響の原理，共立出版(1978)
- 8) 新家富雄・土屋利雄・網谷泰孝・越智 寛・中埜岩男・中西俊之：200Hz音源の開発，海洋科学技術センター研究報告会要旨集，18，164-166.(1992)
- 9) 吉川 隆・河守章好・和泉 仁・鎌田弘志：積層圧電子を用いた低周波バレル型音源，平成4年春季日本音響学会研究発表会講論集，p1049-1050.(1992)

(原稿受理：1992年11月4日)