

文部科学省
海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム

「コバルトリッチクラストの厚さの高精度計測技術の開発」

平成20年度中間報告

東京大学生産技術研究所
浦 環

目次

1. 研究運営委員会等の構成
2. 全体計画
3. 平成20年度計画
4. 研究の進捗状況

参考資料

添付資料1

添付資料2

1. 研究運営委員会等の構成

業務参加者（東京大学）

・浦 環	生産技術研究所教授	研究総括
・浅田 昭	生産技術研究所教授	研究総括補佐
・巻 俊宏	生産技術研究所助教	ボトムスキマプローブの概念設計
・Thornton, Blair	生産技術研究所特任助教	CRC 厚測定送受波素子アレイ装置の開発
・能勢 義昭	生産技術研究所特任研究員	CRC 厚測定送受波素子アレイ装置の開発
・杉松 治美	生産技術研究所特任研究員	CRC 厚測定送受波素子アレイ装置の開発
・坂巻 隆	生産技術研究所技術専門職員	ボトムスキマプローブの概念設計
・中谷 武志	日本学術振興会特別研究員	ボトムスキマプローブの概念設計
・Painumgal, Unnikrishnan	生産技術研究所技術補佐員	ボトムスキマプローブの概念設計
・Sangekar, Mehul	生産技術研究所技術補佐員	ボトムスキマプローブの概念設計
・玉木 賢策	大学院工学系研究科	CRC 等海底地質構造研究

業務協力者

・飯笹 幸吉	(独) 産業技術総合研究所グループリーダー	運営委員会委員
・渡辺 好章	同志社大学教授	運営委員会委員
・山崎 哲生	大阪府立大学教授	運営委員会委員
・高川 真一	(社) 日本深海技術協会専務理事	ボトムスキマプローブの概念設計
・海法 俊光	スターリングエンジン普及協会	CRC 厚測定送受波素子アレイ装置の開発

事務担当

・久保池大輔	文部科学省研究開発局企画調査係長
・岡野 孝之	生産技術研究所経理課企画チーム主任
・彌富有希子	生産技術研究所経理課執行チーム

注 CRC:Cobalt Rich Crust(コバルトリッチクラスト)

2. 全体計画

2. 1 業務の目的

現代産業に欠かせないコバルトや白金を含むコバルトリッチクラストは、日本近海の深海底に賦存している。この貴重な深海底金属資源を我が国の経済活動に利用可能にするためには、その正確な賦存量を広範囲にわたり計測できる技術の実現が求められる。

しかし従来のコバルトリッチクラストの調査は有人潜水艇やROVによるもので狭い範囲の計測しか行われていない。コバルトリッチクラストの正確な賦存量を測定するには鉱床全体を十分な密度で計測する必要がある。このためには連続的に、または連続した点状にコバルトリッチクラストの厚さを正確に計測できるセンサと、これを搭載して至近距離で海底直上を航走し、あるいは着底・離底を繰り返すことができる搬送体による深海底探査システムが必要である。

本研究はその基礎を構築することを目的とする。

2008年度、東京大学では、主としてコバルトリッチクラストの厚測定装置の開発のために、コバルトリッチクラストの音響特性を計測して、最適なコバルトリッチクラスト厚計測技術を確立して、コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置の設計をおこなう。また、コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置を搭載して AUV に追従しつつ低高度あるいは着底してコバルトリッチクラスト厚の観測をおこなうためのボトムスキマー・プローブの概念設計をおこなう。

2. 2 当該年度における成果の目標及び業務の方法

① プロジェクトの総合推進

今年度の主たる業務は、最適なコバルトリッチクラスト厚計測技術の確立とコバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置の設計およびボトムスキマー自走式プローブの概念設計である。プロジェクト全体を円滑に推進するために、主たる業務について総合的に検討するための研究代表者、分担者、協力者からなる研究推進会議を開催し、展開に資する技術開発のための研究情報交換をおこない研究計画を練る。特に音響センサ開発とボトムスキマー開発に関わる技術の密なる情報交換およびその総合が求められる。

② コバルトリッチクラストの厚さの高精度計測技術の開発

a 本業務に関するコバルトリッチクラストの正確な賦存量を測定できるコバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置を開発することを目的として、コバルトリッチクラストの音響特性の計測試験をおこない、最適な計測技術を開発して、コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置の設計をおこなう。

b 本業務に関して開発する新しい音響計測センサ装置等を搭載して AUV に追従しコバルトリッチクラストの厚測定をおこなうためのボトムスキマー自走式プローブの概念設計をおこなう。

③ 研究推進会議および運営委員会の実施

プロジェクト全体を円滑に運営していくために、海底鉱物資源探査技術のエキスパートから成る運営委員会の開催等をおこない、緊密な共同研究体制のもとに研究を進めていく。特に、プロジェクト全体の進捗状況

を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて国外の調査など、プロジェクトの推進に資する提言をおこなう。

プロジェクトで得られた成果については、積極的に公表し、今後の展開に資する。

2. 3 文部科学省からの実施にあたっての留意事項

○研究の進捗状況についての評価を毎年度適切に行い、公募要件の達成が困難であると判断される場合には研究開発を中止する等、成果を見据えた工程管理を適時・適切に行うこと。

○(独)海洋研究開発機構や(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構などの関係機関と調整を行い、研究開発を進めること。

○研究実施体制（サブ課題の設定による役割分担や責任の所在の明確化）を示すこと。

○開発された装置が資源調査において汎用的なものとなるよう検討すること。

○実用化・国産化に向けて、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構との連帯を視野に入れ、関係機関と調整を図り研究を行うこと。

○実際のコバルトリッチ鉱床域での地形に対応できること。

3. 平成20年度計画

「コバルトリッチクラスト厚計測技術」は以下の二つの技術に分離される。

「コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置の設計」

「ボトムスキマー自走式プローブの概念設計」

3. 1 コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置の設計

コバルトリッチクラストは薄い層状に分布しているので、その賦存量を正確に知るためにはコバルトリッチクラストの厚さを高い分解能で計測する必要があり高い周波数の音波により測定する必要がある。しかしコバルトリッチクラストの音響インピーダンスは高く、あまり高い周波数ではコバルトリッチクラスト内に進入できないので、最適の周波数では100kHzである。

さらにコバルトリッチクラスト底からの反射波は微弱であるに対し表面からの反射波は非常に強いものとなり、ビーム幅が広ければ表面反射は時間幅を持ち、コバルトリッチクラスト底からの反射波をマスキングしてしまう。

また、ボトムスキマー自走式プローブに搭載するには小型であることが必要であり、アレイ大きさは制限される。

このような要求・制限に対し高周波で送信して、非線形効果によってコバルトリッチクラスト透過率の良い100kHzの2次波のシャープなビームを形成し、送信素子の裏側にはりつけた高感度な100kHzの素子により受信する専用のプローブ、「CRC厚さ測定用送受2層構造パラメトリックフォーカスプローブ」を開発する。

3. 2 ボトムスキマー自走式プローブの概念設計

コバルトリッチクラスト厚測定には「コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置」を搭載して海底に接近して航走し、または着底して計測する必要があるが長距離を航走できる巡航型AUVでは運動性能は期待できず海底から数十m以内に接近しての航走はできない。有人潜航艇やROVでは海底に接近し、着底することも可能であるが移動能力は低く探査できるのは局地に限られる。このように海底の広い範囲でコバルトリッチクラスト厚を精密に測定するには巡航型AUVから分離して海底近くで行動する自走式プローブが必要である。

すなわち、ボトムスキマー自走式プローブはこの目的に応ずるものであり、

- 1) 「コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置」を搭載し、作動することが可能であること。
- 2) 「コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置」によりコバルトリッチクラスト厚測定を行うために必要な運用ができること。

具体的には

- 3) 海底に接近して航走し、または着底できること。また安全性を確保できること。
- 4) 広範囲を十分な密度でコバルトリッチクラスト厚測定を行うに必要な航続距離・時間を有すること。

等が要求される。

この目的を達成するため、想定される各種方式を詳細に比較検討し、最適案を得る。

4. これまでの研究の進捗状況

4. 1 コバルトリッチクラストの音響特性の計測

コバルトリッチクラストの厚さを非接触で測定するには、低高度からコバルトリッチクラストに音響ビームを当て、コバルトリッチクラストの表面反射と岩との接触面での反射の時間差から計算する方法が考えられる。添付資料1、2に(株) ジャパンプローブで行ったコバルトリッチクラストの音響特性計測実験の結果をまとめ、(株) 本多電子と共同開発した200kHz音響プローブの厚さ計測実験、1000kHz音響プローブでのチャープ信号を用いた実験と斜め入射実験結果を示す。試験の詳細については添付資料2に「CRCの音響特性と厚さ計測一次試験結果報告：詳細」を参照。

4. 2 コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置の設計

コバルトリッチクラスト厚さ測定用送受2層構造パラメトリックフォーカスプローブの設計を完了し2月中旬に完成する予定である。詳細は参考資料「コバルトリッチクラスト厚さ測定用送受2層構造パラメトリックフォーカスプローブの開発」に示す。

4. 3 ボットムスキマー自走式プローブの概念設計

ボットムスキマー自走式プローブについて検討した結果に基づき、三井造船(株)と2回の打ち合わせを行い、基本性能に対する要求をまとめた。

2009年2月に行われる「ハイパードルフィン」調査航海での取得データ(コバルトリッチクラスト鉱床域での海底凹凸、堆積物、流速等)、及び「コバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置」設計の進捗に基づき最終案を2009年3月までに決定する。

現在までに確認している基本仕様(案)は下記のとおりである。

- (ア) 最大潜航深度 2000m
- (イ) 最大速力 4kts
航走速力 3kts
- (ウ) 最大航続時間 8時間/3kts
- (エ) 極力小型、軽量とする
目標 全長 2m以内
空中重量 200kg以下
- (オ) 推進器はベクトルスラスト方式とし、2基を胴体中央部、両側に配置する。
- (カ) バラスト15kgを搭載し、水中では5kgの負浮力とする。
翼により揚力を発生し負浮力を相殺する。
浮上時はバラストを投下して最大10kgの浮力を得る。
- (キ) 一回の航走において100点以上でのコバルトリッチクラスト厚測定を行う。

100m間隔の測定により面積1km²の賦存量を計測できる。

(ク) 繰り返して海底に着底し、離底でき、着底した状態でコバルトリッチクラスト厚測定送受波素子アレイ装置のセンサを50cm移動して計測する。

運用構想は下記のとおりである。

(ア) r2D4と合体した形で着水する

(イ) 海中潜入後、分離し、以降、r2D4を追尾して行動する。

航法はr2D4に依存し、ボトムスキマー自体は航法センサを持たない。

その他の装置・機能も極力簡略化し小型・軽量化を図る

(ウ) 障害物回避はボトムスキマー自体による近距離探査とr2D4による遠距離探査により行う。

(エ) 海底への着底・離底はVTOL方式とするかSTOL方式にするか検討・比較する。

4.4 実海域でのコバルトリッチクラストの表面性状の調査およびサンプリング

2009年2月8日Saipan発2月24日JAMSTEC着の「なつしま」航海(首席:浦辺徹郎東京大学大学院教授)に本研究計画の研究者が乗船し、ROV「ハイパードルフィン」を利用して、

- ・コバルトリッチクラストを資源として開発するための鉱石の各種パラメタの計測

- ・クラストの海底環境(物理的賦存状態および周辺の流れ、表面の平坦度など)の計測

をおこなう予定である。そのために各種センサ類の製作、調整、取り付けなどの準備をおこなっている。

コバルトリッチクラスト厚さ測定用送受パラメトリックフォーカスプローブの開発

高周波で送信して、低周波で受信する必要があるため、コバルトリッチクラスト（以下 CRC と書く）の厚さを測定するには送信振動子と受信振動子を送受 2 層構造にはりつけた専用のプローブを開発する。

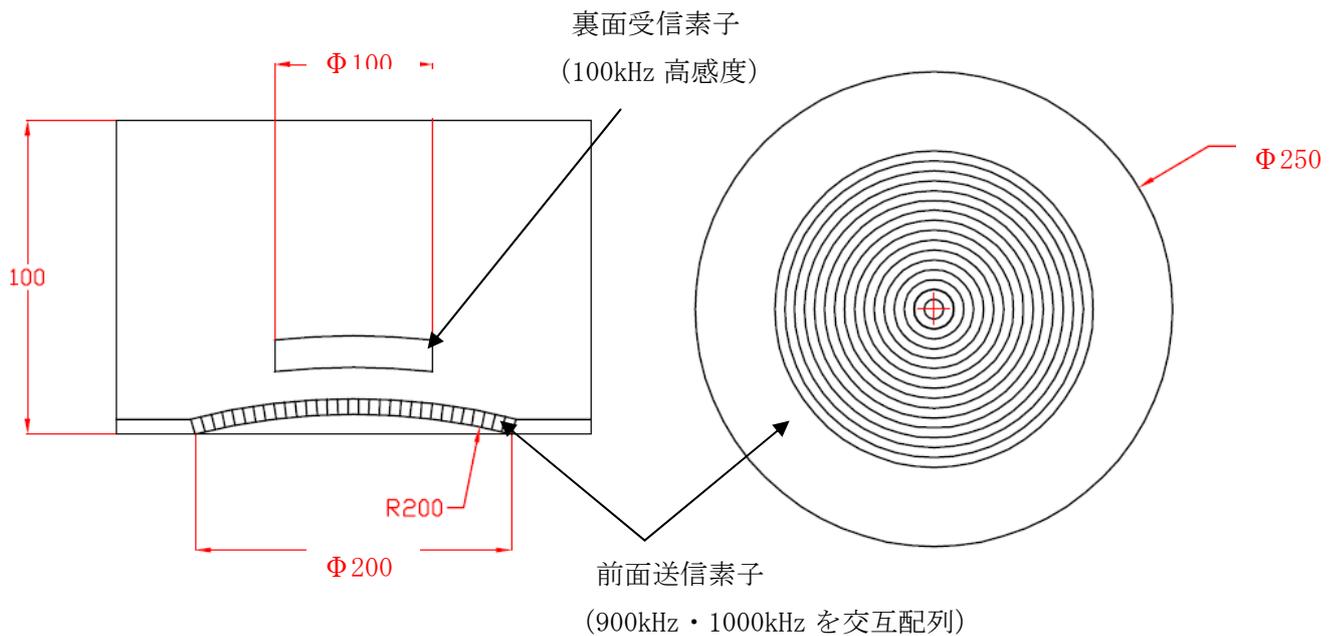


図 1：厚さ測定用送受フォーカスプローブ

細い低周波ビームを作るために、2つの異なる周波数の音波を送波すると、二つの波長の非線形伝搬のため、差の周波数の狭い2次ビームが発生する (Westervelt, 1963)。このようなパラメトリック音源を使えば、低周波でも、高周波と同じような狭いビームを作ることが可能であり、現在海底サブボトムプロファイリングで実用されている。しかし、従来のサブボトムパラメトリックソナーは、 $\sim 50\text{kHz}$ と $\sim 60\text{kHz}$ の1次波で、 $\sim 10\text{kHz}$ 前後の2次波で海底を透過する。 $\sim 10\text{kHz}$ だと CRC での波長が $\sim 30\text{cm}$ であるため、本研究で対象とする数 10mm の厚さを測定するのは不可能である。

本研究では CRC の厚さ測定には、送信側の素子はアニュラー状に 900kHz と 1000kHz の2チャンネルを交互配列し、2チャンネルを同時に送信する非線形効果によって CRC 透過率の良い 100kHz の2次波を透過させる。また、送信側の素子は球面〔凹面〕形状で 200mm に焦点を合わせる。CRC を透過した反射を受信するのに送信素子の裏側に高感度な 100kHz の素子を使う。本プローブ -50dB 程減衰した側面反射を測定する。この2次波の側面反射で数 10mm の分解能で CRC の厚さを測定する予定である。

1. 非線形効果

2つの異なる周波数の音波を送波すると、2つの1次波とは別に、原音となる差音、和音も含めた2次、3次のハーモニックが発生する。厚さ測定には最も低周波である差音を利用する。

差音の周波数は以下のように求める：

$$f_s = f_0 - f_1$$

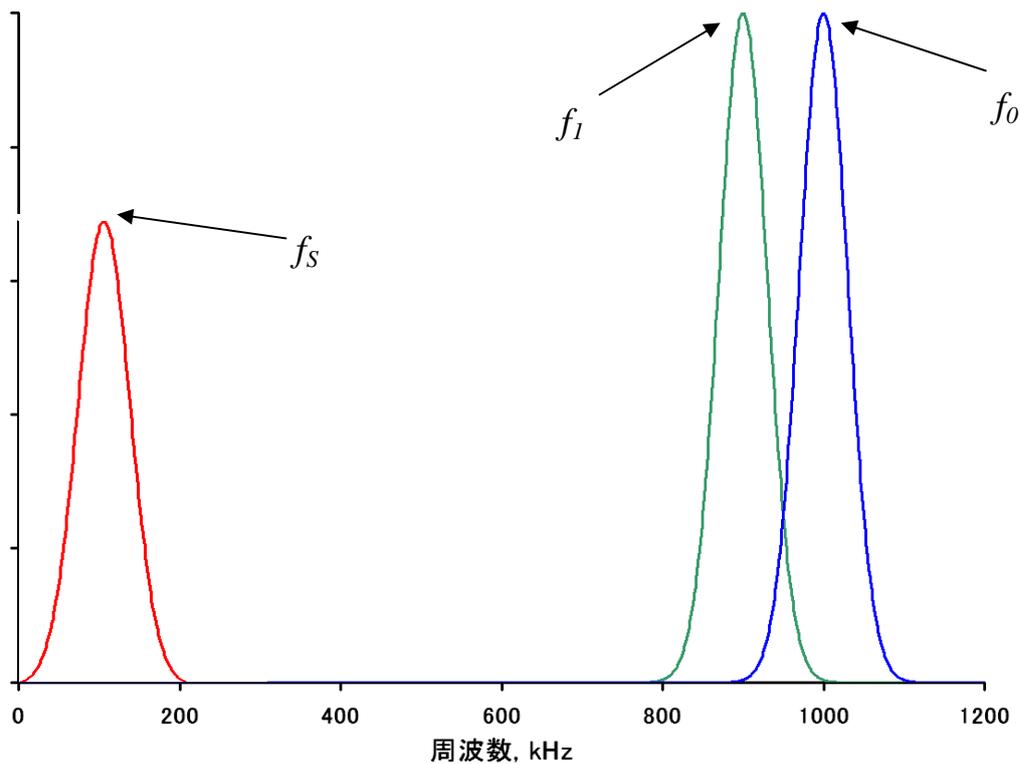
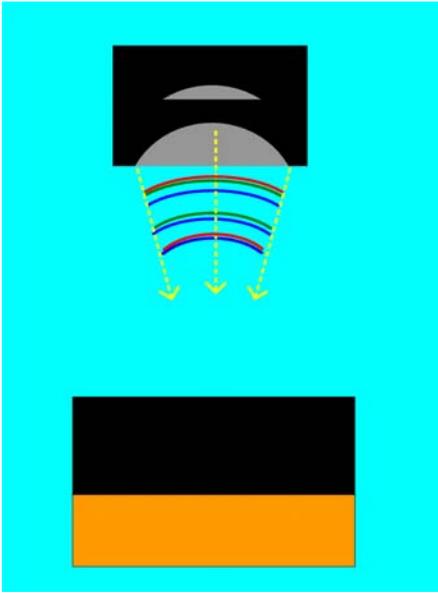


図 2：非線形効果による差音 2 次波の発生

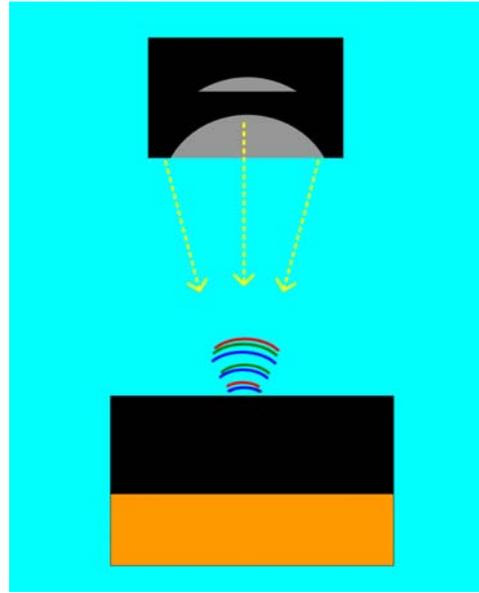
このようにパラメトリック音源の 2 次波を、低周波数なプローブを使うのとくらべたメリットを以下にまとめる：

- 音源寸法が小さい
- 指向角が狭い
- 原音が広帯域となり、距離方向の分解能が良い
- サイドローブを大幅に低減できる

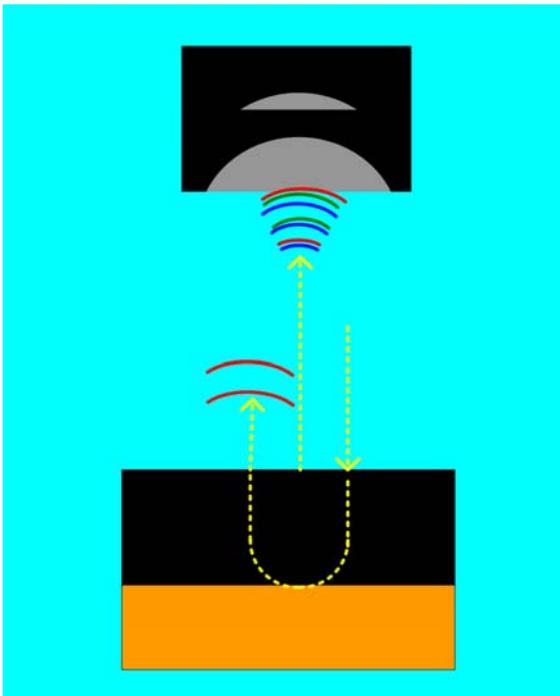
パラメトリック変換効率のため、2 次波音圧は 40 dB 程低下するが、これは焦点で 250dB ぐらいの音圧を出力すると考える。



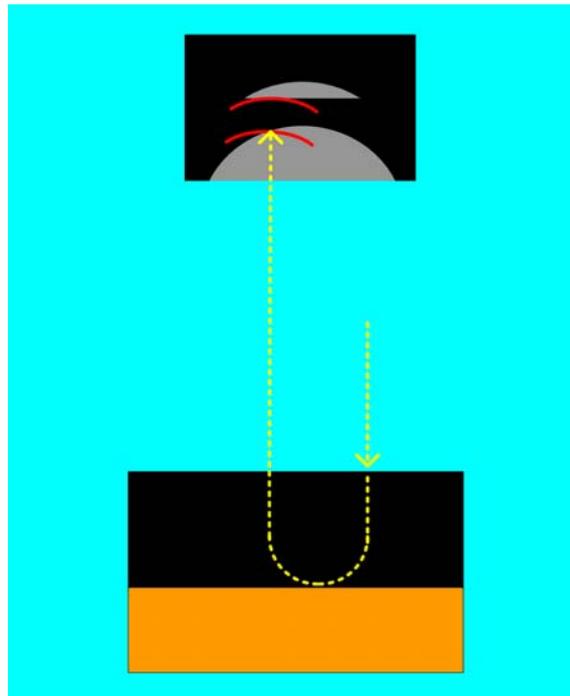
900kHz と 1000kHz の 2 チャンネルを同時に送信し、100kHz 差音を発生させる。



凹面形状によるビームフォーカシングでターゲットに強い音圧変化を与える



100kHz の低周波成分のみ CRC を透過し、CRC の側面で反射する



100kHz の高感度プローブ(2層目)で測定し、表面反射との時間差で厚さを測定する。

2. プローブの設計

2月中旬に完成する予定であるCRC厚さ測定用送受2層構造パラメトリックフォーカスプローブの詳細を以下にまとめる。

形状：200mmの球面〔凹面〕形状の2層構造（2ch（表面）、（受信1ch：（裏面））

送信側

焦点距離：200mm、

半径：100mm、

アレイ間隔：R200mmの球面〔凹面〕形状で、アニューラー状に160分割

中心周波数：950kHz（ch1に900kHz，ch2に1000kHzを一つおきに接続）

周波数帯域：±20から25%（-6dB）、：±50%（-60dB以下）、

出力：焦点にて最大250dB

ダンピング性能：（0.01m/1500秒）において-60dB以下の残響に抑える。

サイドローブ：-55dB以下

受信側

半径：50mm

中心周波数：100kHz

周波数帯域：±25%（-6dB）

以上