

「なつしま」のプロペラ雑音計測結果 及び新母船への適用

佐野 正 *1 中西俊之 *1 高川真一 *1
網谷泰孝 *1 野沢和男 *2 高須順三 *2

6500m潜水調査船支援母船（新母船）の建造にあたり、技術的最重要課題は6500m以上の距離で潜水船や曳航式無人探査機の測位、水中通信、測深等を十分に実施できるところまで低雑音化を図ることである。

プロペラ雑音は水中放射雑音の主要因であるが、低雑音化のための方法は十分確立されていないうえ、有用な実船データも極めて少ないのが現状である。

そこで、新母船のプロペラ雑音低減化の方法を検討するため、同型の2軸可変ピッチプロペラ（CPP）船である「なつしま」を用いてプロペラ雑音の系統的な実船計測を実施した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

(1)プロペラ雑音は、キャビテーションの発生と密接に関係しており、プロペラ翼角と回転数の最適な組合せにより低雑音化を図ることができる。

(2)船底に取付ける音響機器受波器へのプロペラ雑音の伝搬減衰はほぼ球面拡散に よっている。

Propeller Noise Measurement of NATSUSHIMA and Its Application to New Support Vessel

Tadashi SANO*3, Toshiyuki NAKANISHI*3, Shinich TAKAGAWA*3
Yasutaka AMITANI*3, Kazuo NOZAWA*4, Junzoh TAKASU*4

The most important technical item is to achieve low noise control for the JAMSTEC support vessel for 6500 m deep research submersible in order to make effective use of its acoustic system, which consists of positioning, telephone, telemetry, echo sounder, etc.

The propeller is one of the principal noise sources, but satisfactory techniques to decrease propeller noise have not yet been established. Therefore, in this study systematical measurements were made to determine, the relation of noise vs combination of propeller rotation speed and blade angle for the vessel NATSUSHIMA, which is similar to the new support vessel.

*1 深海開発技術部

*2 川崎重工業（株）

*3 Deep Sea Technology Department

*4 Kawasaki Heavy Industries

The results are as follows;

(1) The propeller noise is closely related to propeller cavitation, and it is possible to decrease this noise by a proper combination of propeller rotation speed and blade angle.

(2) Noise reduction from a propeller to the location of transducers installed under the hull conforms to the spherical spreading law.

1. まえがき

昭和62年度から建造に着手している6500 m潜水調査船支援母船（以下「新母船」という）は、潜水船や曳航式無人探査機に対する測位、水中通話及び精密測深等、音響機器の有効使用という観点から、同種船である2000 m潜水調査船「しんかい2000」の支援母船「なつしま」より更に厳しい低雑音化が要求される。

特に、プロペラ雑音は水中放射雑音の主要因とされており、新母船の場合、潜水船の潜航支援、10,000 m級無人探査機の曳航、マルチナロービーム音響測深装置による海底地形調査等様々な運航モードが考えられ、それぞれのモードでプロペラ負荷状態も異なる。従って、新母船に搭載される音響機器がそれぞれの運航モードで十分機能を発揮できるよう低雑音化対策（低雑音プロペラの設計及び低雑音オペレーション）を実施する必要がある。

一方、これらの検討には実船のプロペラ雑音データに基づく指針が必要であるが、これらに関するデータが極めて少なく、また確立された推定方法もないのが現状である。

そこで、新母船のプロペラ雑音予測及びプロペラ雑音低減化の方法をさぐるため、同じ2軸CPP船である「なつしま」を用いて昭和61年8月相模湾でプロペラ雑音計測を系統的に実施した。

本報告は、この計測結果の概要を述べると共に、これらの新母船への適用について考察を加えたものである。

2. 計測要領

(1) 計測船主要目

計測船の主要目を表1に示す。

(2) 計測時の状況

計測海域及び海象等を表2に示す。

(3) 計測ケース

計測は、プロペラ単独の雑音特性を把握するため主に片軸定速航走で、プロペラの回転数、翼角を種々変化させて行った他、両軸航走、及び停船時の中立翼角での計測も実施した。

また、プロペラ雑音以外の種々の雑音をチェックするため、主機停止及び主機起動／クラッチ脱（プロペラ遊転）における雑音計測も実施した。

計測ケースを表3に示す。

表1 計測船主要目

Table 1 Principal particular of NATSUSHIMA

項 目	要 目	(参考) 新 母 船
船 名	「なつしま」	-----
L _{PP}	60 (m)	95 (m)
B	13 (m)	16 (m)
D	6.3 (m)	7.3 (m)
d	3.55 (m)	4.5 (m)
総トン数	約1550トン (旧トン数)	約4500トン (新トン数)
主 機 関	2基×850 ps (減速機付ディーゼル機関)	2基×3000 ps (同 左)
プロペラ	2基×可変ピッチプロペラ (直径2.3 m)	同 左 (直径約3.0 m)

表2 計測時の状況
Table 2 Condition of measurement

計測実施日	計測海域	海 象 等				
		気候	気温	風浪階級	うねり	風力
S. 61. 8. 18(月)	相模湾初島沖	曇	28.5° C	2	2	3
S. 61. 8. 19(火)	同 上	曇	26° C	1	2	2

表3 計測ケース
Table 3 Measured cases

区 分	状 態	ケース	船 速 (ノット)	主 機 (rpm)	プ ロ ペ ラ		計 測 日	備 考
					回転数 (rpm)	翼 角 (度)		
A	暗雑音(1)	A	0	両舷停止	—	—	8/18	
B	暗雑音(2)	B-1	0	左舷：900	クラッチ脱	—	8/18, 8/19	
		B-2	0	左舷：700	クラッチ脱	—	8/18, 8/19	
		B-3	0	両舷：900	クラッチ脱	—	8/19	
		B-4	0	両舷：700	クラッチ脱	—	8/19	
D 1	片軸航走	D 1-1	4	左舷：900	左舷：220	9	8/19	
		D 1-2	4ノットから漸減	左舷：900	クラッチ脱 (遊転)	中 立	8/19	01-1に続いて実施
		D 1-3	4	左舷：700	左舷：172	14	8/19	
		D 1-4	4	左舷：900	左舷：107	25	8/19	
		D 1-5	5	左舷：900	左舷：220	13	8/19	
		D 1-6	5ノットから漸減	左舷：900	クラッチ脱 (遊転)	中 立	8/19	01-5に続いて実施
		D 1-7	5	左舷：700	左舷：172	18	8/19	
		D 1-9	5.6	左舷：900	左舷：220	16	8/19	
		D 1-10	5.6ノットから漸減	左舷：900	クラッチ脱 (遊転)	中 立	8/19	01-9に続いて実施
		D 1-11	5.7	左舷：700	左舷：172	21	8/19	
D 2	両軸航走	D 2-1	5	両舷：900	両舷：220	8	8/19	
		D 2-2	5	両舷：700	両舷：172	11	8/19	
		D 2-3	5	両舷：900	両舷：107	19	8/19	
E	中立翼角	E-1	0	左舷：900	左舷：220	中 立	8/18	
		E-2	0	左舷：700	左舷：172	中 立	8/18	
		E-3	0	左舷：700	左舷：84	中 立	8/18	

(4) 計測項目及び系統

主な計測項目を表4に、計測系統図を図1に、またプロペラ雑音計測位置を図2に示す。なお、水中マイクロホン(PN-1及びPN-2)は、舷側に固定した整流ひれ付治具の先端に取付けた。その取付状況を写真1に、また航走計測中の取付治具の状況を写真2に示す。

(5) 計測時の補機の運転状況

プロペラ雑音計測時は、計測及び運航に必要最少限の主補機のみ運転することとしたほか、計測中は不要な作業又は不要な乗組員の移動も禁止してできるだけプロペラ雑音以外の雑音が入らないように計測を実施した。

計測時の主要補機の運転状況を表5に示す。

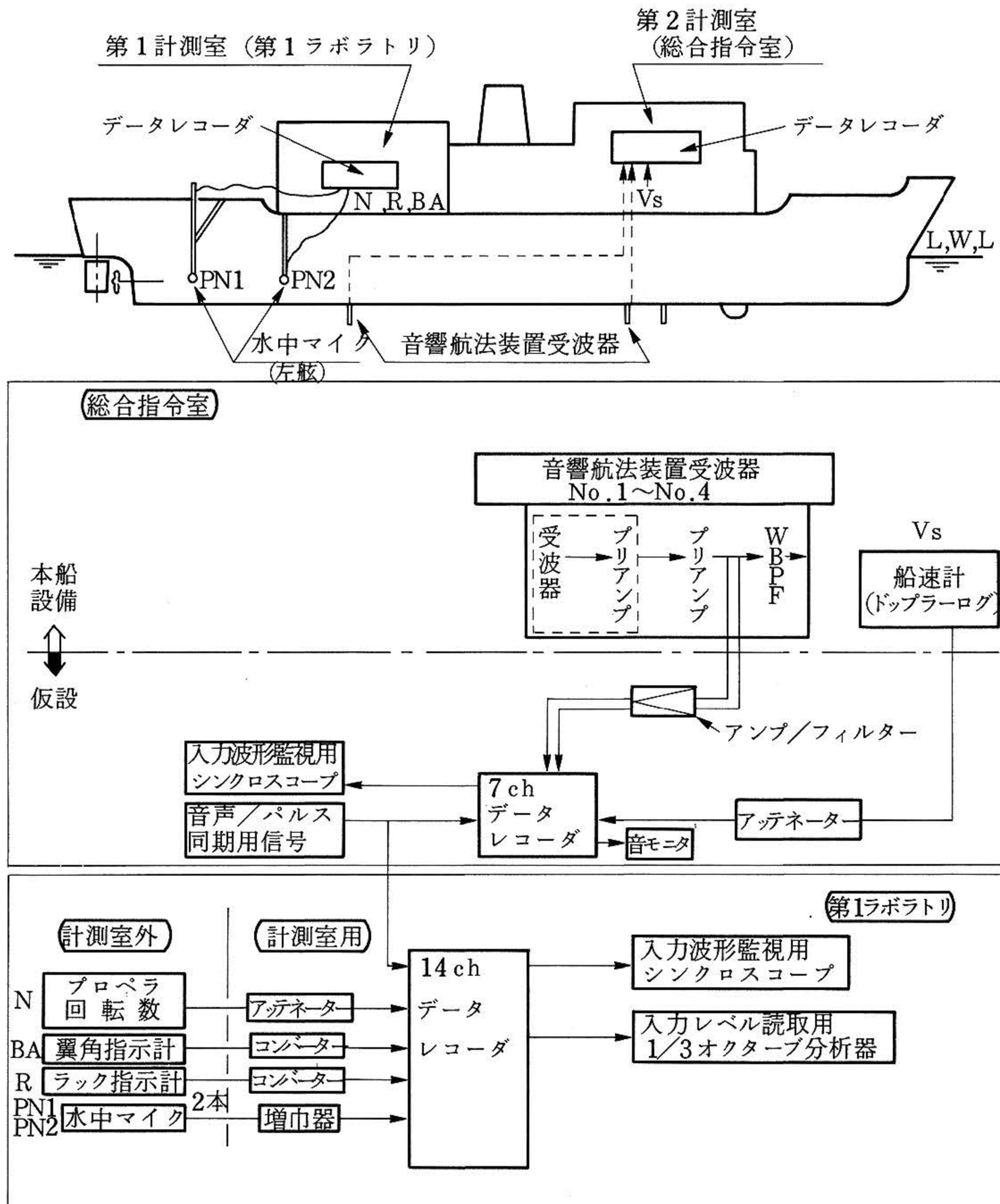


図1 計測系統図

Fig.1 Diagram of measured System

表 4 計測項目
Table 4 Measured item

計 測 項 目	計 測 方 法	備 考
プロペラ雑音	(1)水中マイクロホン2ヶ所 (PN-1, PN-2) (2)音響航法装置受波器 (NYD 1～4)	仮設 無指向性マイクロホンを使用。 「なつしま」装備品の受波器アレイ のうちの1個の素子を使用した。 指向性を図 15 に示す。
プロペラ回転数	プロペラ回転計	「なつしま」装備品
C P P 翼角	翼角指示計	〃
機関ラック値	ラック指示計	〃
船 速	船速計	〃
そ の 他 ① 海象、気象データ ② 船の位置 ③ 補機の運転状況 ④ その他の特記事項 も同時に記録した。		

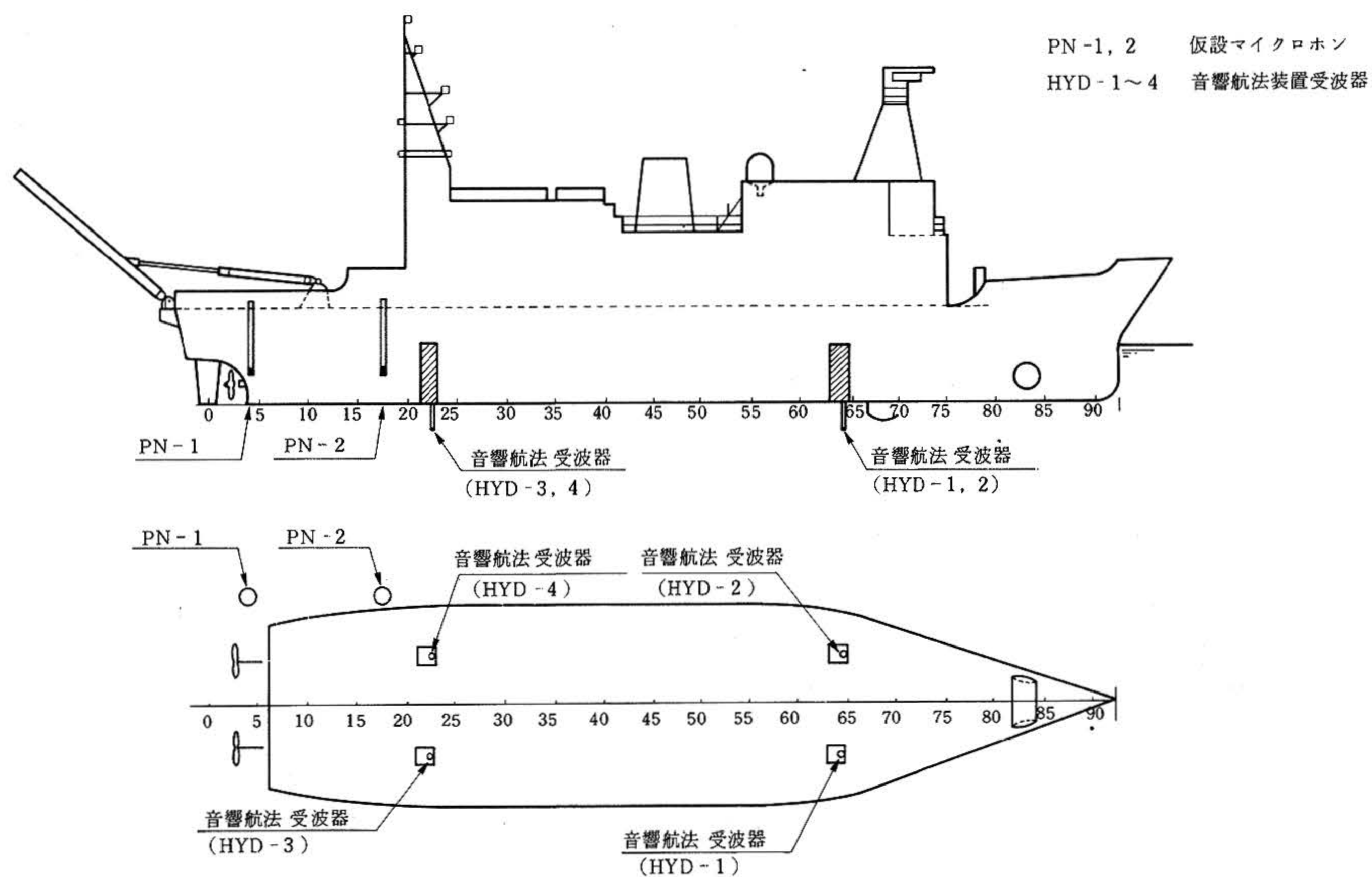


図 2 プロペラ雑音計測位置図
Fig.2 Location of hydrophone measured propeller noise

表5 主要補機運転状態一覧表
Table 5 Operating Condition of installed equipments in NATSUSHIMA

補 機 名 称	設 置 場 所	区 分				
		A	B	D1	D2	E
右舷主機関	機 関 室	×	B-1 B-2 × B-3 B-4 ○	×	○	×
左舷主機関	"	×	○	○	○	○
NO. 1 主発電機	"	×	×	×	×	×
NO. 2 主発電機	"	○	○	○	○	○
補助発電機	"	×	×	×	×	×
補助ボイラ	"	○	○	○	○	○
NO. 1 冷却海水ポンプ	"	×	○	○	○	○
NO. 1 冷却清水ポンプ	機関室第2甲板	○	○	○	○	○
NO. 1 海水サービスポンプ	機関室	○	○	○	○	○
冷房冷凍機冷却水ポンプ	"	×	○	○	○	○
温水循環ポンプ	機関室第2甲板	○	○	○	○	○
機関室通風機	エンジンケーシング	○	○	○	○	○
軸路通風機	格納庫ダクト内	○	○	○	○	○
造水装置	機関室第2甲板	×	×	×	×	×
造水装置用エゼクタポンプ	機関室	×	×	×	×	×
燃料油清浄機	機関室第2甲板	×	×	×	×	×
潤滑油清浄機	機関室	×	×	×	×	×
左舷No1 CPP LOサービスポンプ	軸 室	○	○	○	○	○
右舷No1 CPP LOサービスポンプ	"	×	B-1 B-2 × B-3 B-4 ○	×	○	×
操舵機用油圧ポンプ	操舵室	×	○	○	○	○
バウスラスト及び油圧ポンプ	バウスラスト室	×	×	×	×	×
飲料水ポンプ	空調機室	○	○	○	○	○
エアコンユニット (ファンのみ)	"	○	○	○	○	○
エアコンユニット (冷房)	"	×	○	○	○	○
NO. 2 糧食用冷凍機	"	○	○	○	○	○
サイドスキャゾナー用ウィンチ油圧ポンプユニット	操舵室	×	×	×	×	×
備 考 : ○印 運 転						
×印 停 止						

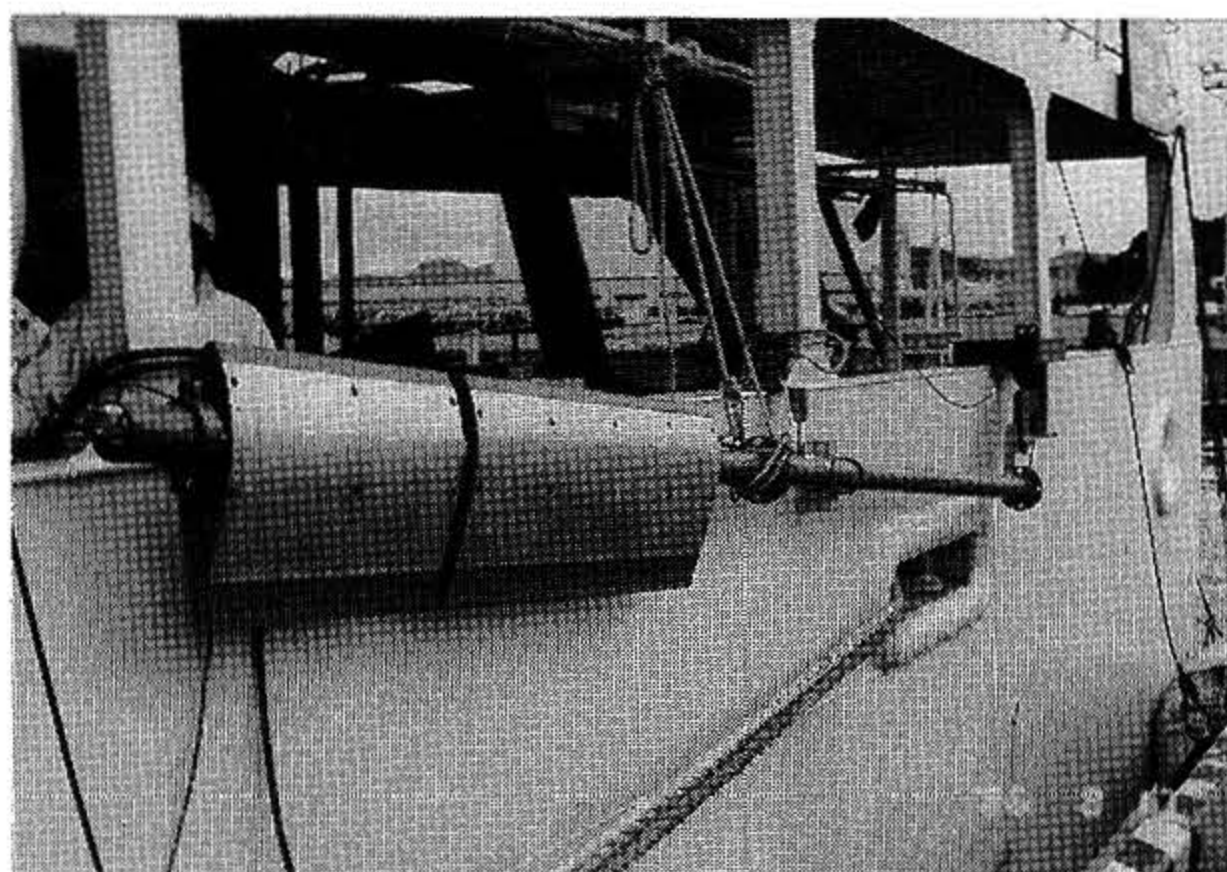


写真1 水中マイクロホン取付治具 (PN-1)
Photo.1 Jig for fitting out hydrophone (PN-1)



写真2 航走時の水中マイクロホン取付治具 (PN-1)
Photo.2 Jig condition for hydrophone at measurement (PN-1)

3. 分 析

計測データはすべてデータレコーダに収録し、陸上に持ち帰った後以下の要領で分析を行った。

(1) 分析系統

分析装置及び系統を図3に示す。

(2) 分析要領

(a) 狭帯域分析

分析方式 : FFT
分析幅 : $\Delta f = 10 \text{ Hz}$
ウィンドウ : ハニング
アベレーシング : 8
周波数帯域 : $2 \text{ kHz} \sim 20 \text{ kHz}$
(2 kHz 以下はフィルタでカット)

(b) 1/3 オクターブバンド分析

分析方式 : FFT結果の積分
周波数帯域 : 中心周波数 $4 \text{ kHz} \sim 20 \text{ kHz}$

(c) 単 位

プロペラ雑音 : $0 \text{ dB re } 1 \mu \text{ Pa RMS}$

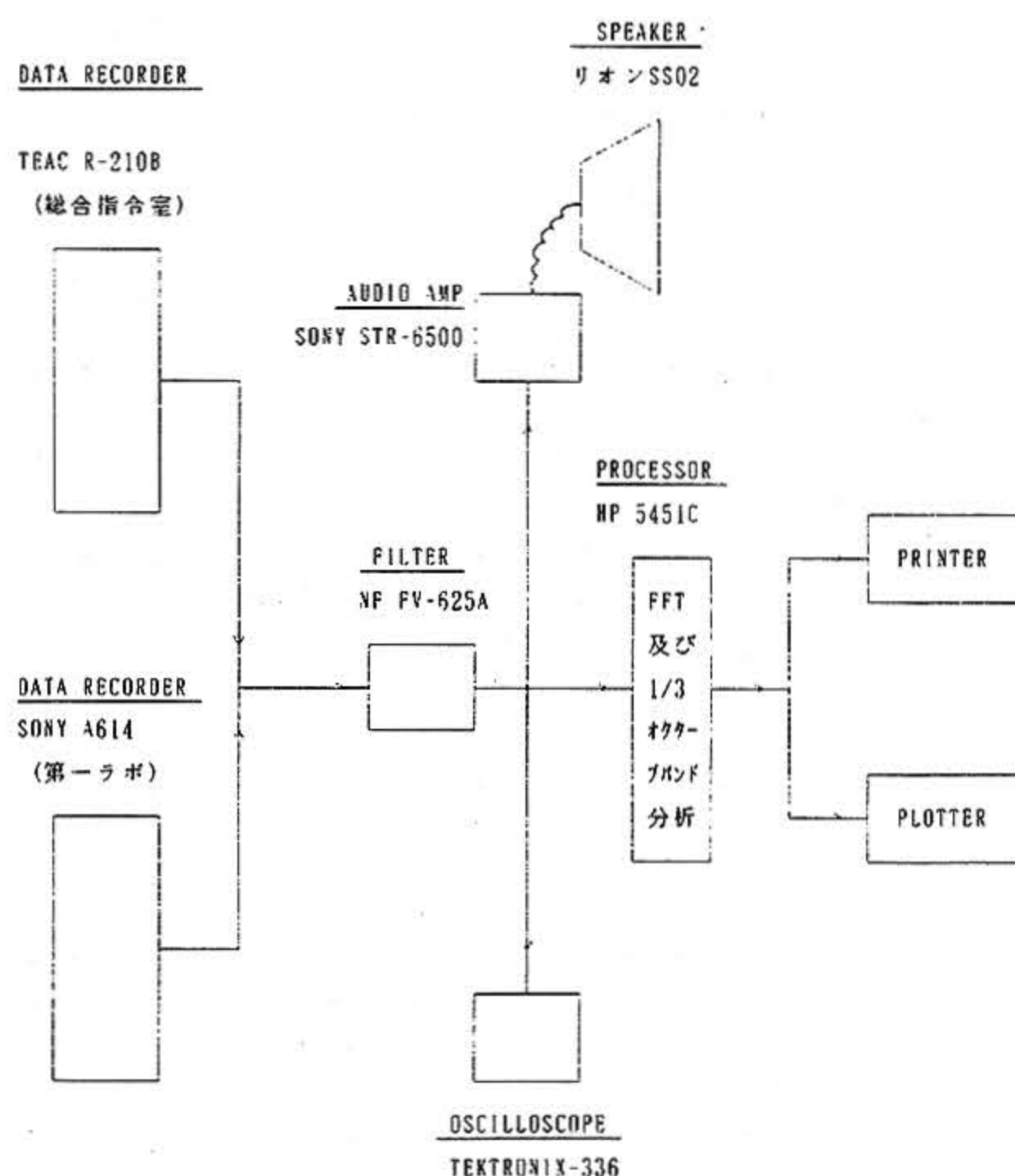


図3 分析系統図

Fig.3 Diagram of analysis system

4. 計測結果

中立翼角（停船時）及び定常航走時のプロペラ水中雑音の計測結果を以下に示す。

なお、本文及び図表中で E900, P220, BA0°等は、E：主機回転数、P：プロペラ回転数、BA：プロペラ翼角（BA0°は中立翼角）を示す。

(1) 中立翼角時のプロペラ雑音と暗雑音

停船時のプロペラ雑音に対する暗雑音として主機停止（ケースA）及び主機起動、クラッチ脱（ケースB）のケースについて計測を行い、中立翼角による船体停止時のプロペラ雑音と比較した。

図4には中立翼角でプロペラ回転数が最も高いケースE-1（E900, P220）のプロペラ雑音と、ケースA（E0, P0）及びケースB-1（E900, P0）の暗雑音について、水中マイクロホンPN-1の入力雑音スペクトラムを比較して示す。また、図5にはプロペラ回転数が最も低いケ

ースE-3（E700, P84）とケースA（E0, P0）及びケースB-2（E700, P0）の入力雑音スペクトラムとを比較して示す。これらによれば、プロペラ回転数の高いケースはプロペラ雑音が大きく、暗雑音に対し十分S/Nがとれているが、プロペラ回転数が低いケースではプロペラ雑音が小さく、暗雑音、特に主機の固体伝搬雑音とのレベル差が小さくなる。このようにプロペラ荷重が小さい場合の計測値については、暗雑音とのS/Nが十分とれているかどうか注意する必要がある。

なお、本書では今回の計測各ケースの分析において、暗雑音のレベル補正は行っていない。

(2) 定常航走時のプロペラ雑音とフローノイズ

表3の計測ケースに従って、片軸及び両軸航走時のプロペラ水中雑音を計測した。なお、航走時のプロペラ雑音計測結果には(1)項に示した船速0

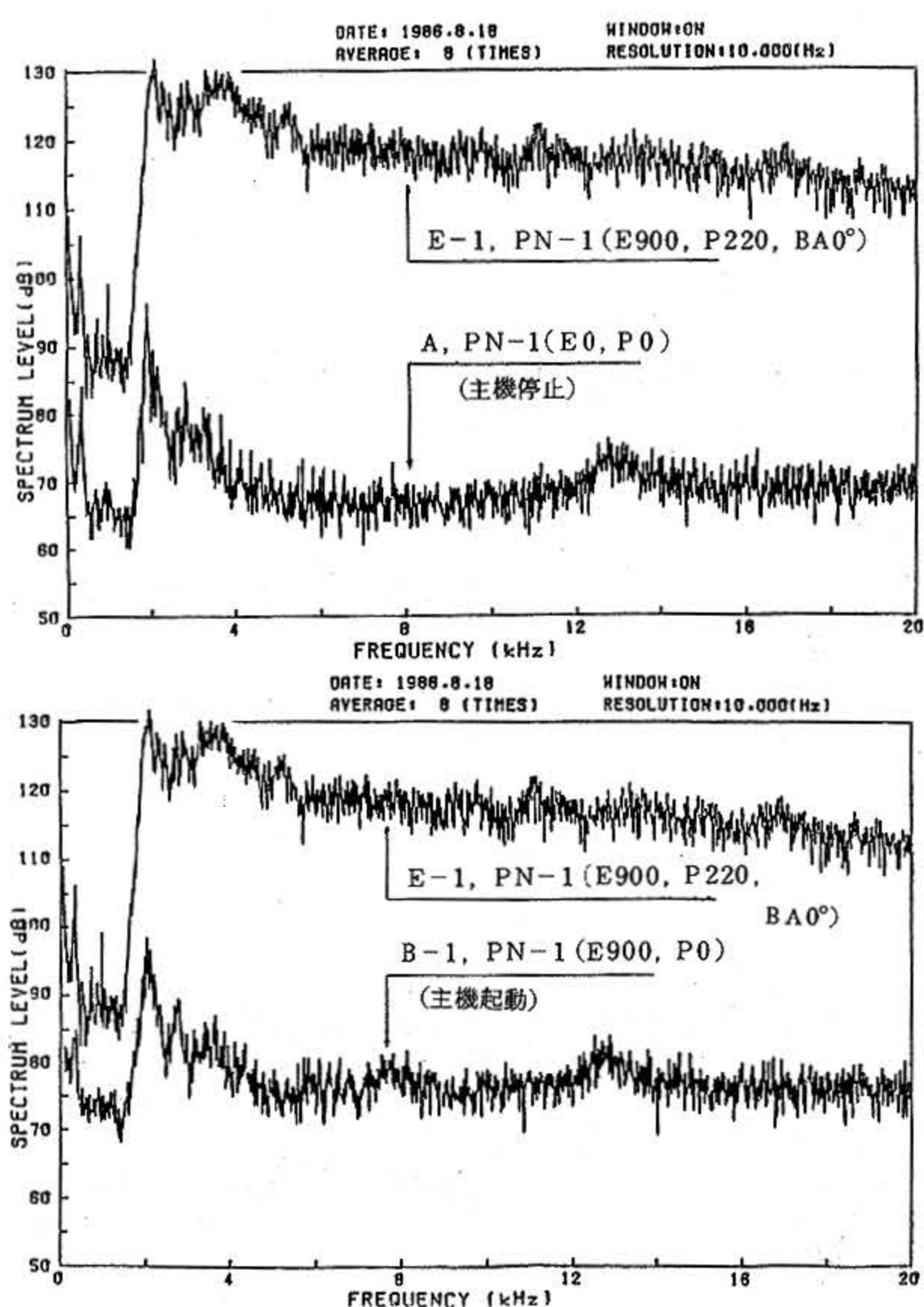


図4 停船時の暗雑音（その1，主機900回転）
Fig.4 Back ground noise at Ship stoppage
(No.1, Main engine 900 rpm)

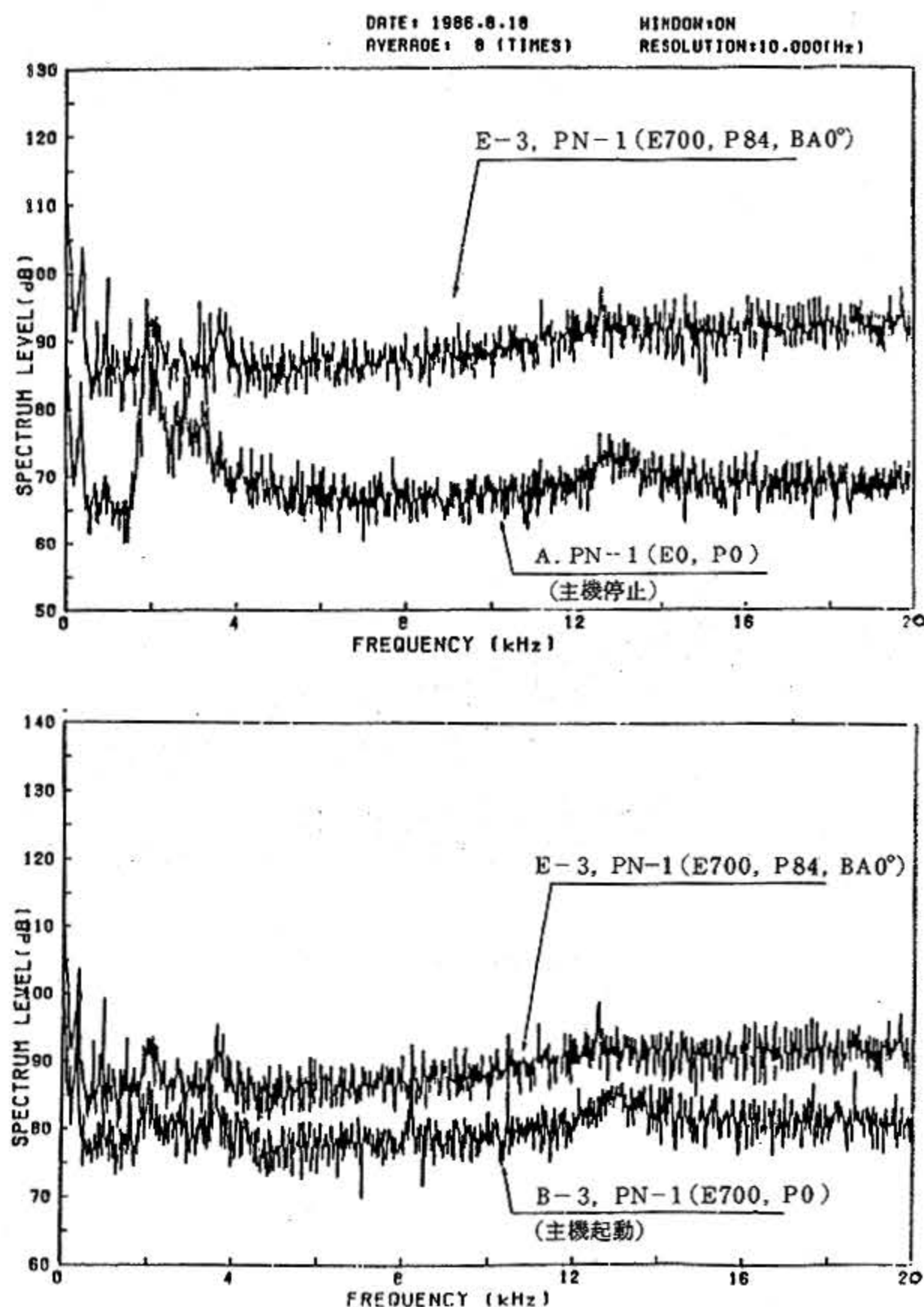


図5 停船時の暗雑音（その2，主機700回転）
Fig.5 Back ground noise at ship stoppage
(No.2, Main engine 700 rpm)

の場合の暗雑音の他に船体のフローノイズや水流によって水中マイノロホン取付用治具に生ずる雑音が重畳されている。これらをチェックし、プロペラ水中雑音の計測精度を確認するために、それぞれ片軸4ノット、5ノット及び約6ノットの場合について、図6に示すように、

- ①：定常航走状態
- ②：①の計測直後、翼角を中立に戻した状態
- ③：更に、クラッチを脱としてプロペラを遊転させた状態

の3つの状態でプロペラ水中雑音を計測した。③にフローノイズの影響が入っているものとして、

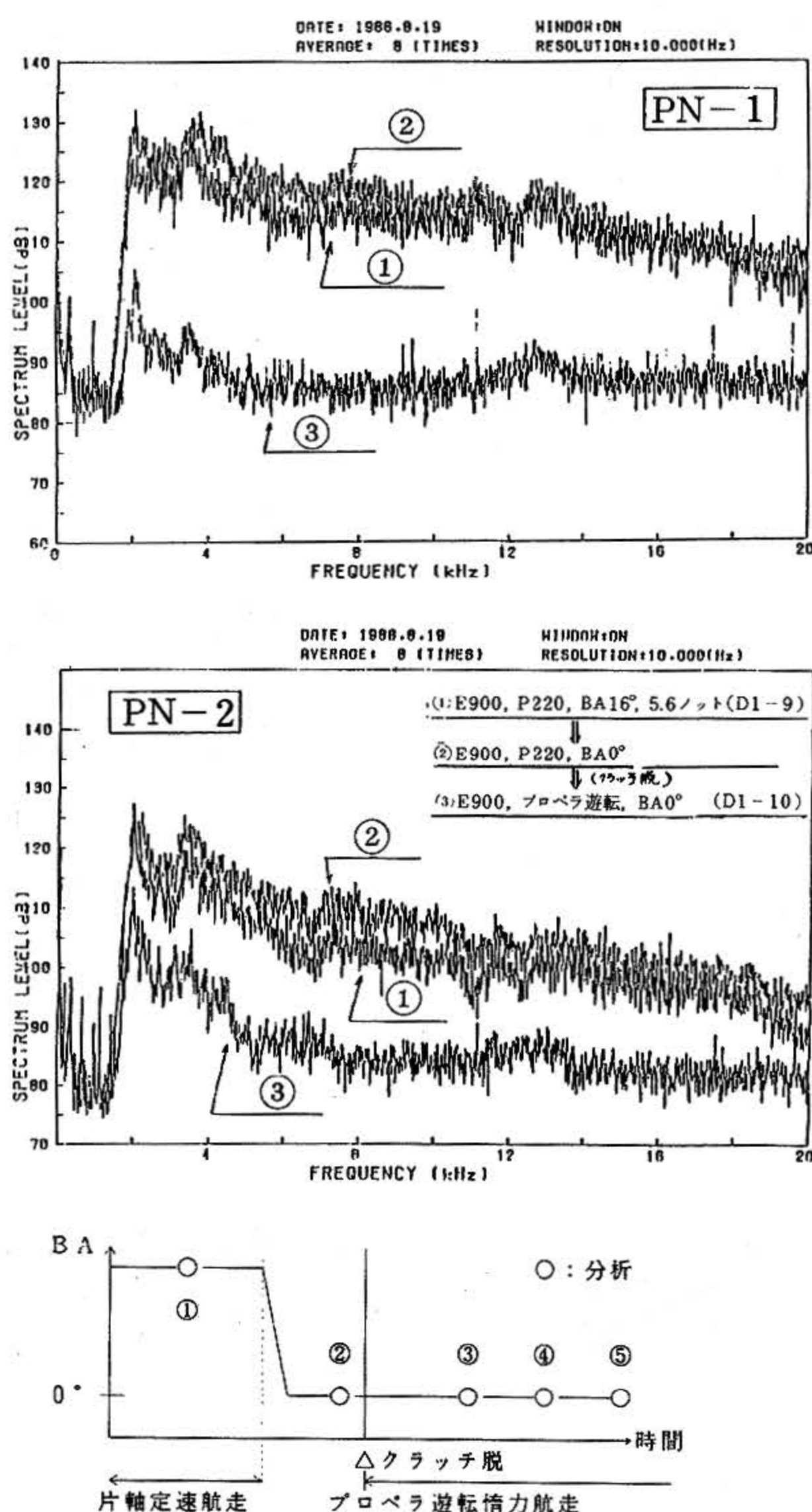


図6 航走時の暗雑音 (その1, 5.6ノット航走)
Fig.6 Back ground noise at cruising
(No.1, 5.6 kts)

①と③の雑音レベルを比較した。

図6に船速5.6ノットの場合を、図7に船速4ノットの場合を示す。また、図8には5.6ノット航走直後のフローノイズ(ケースD1-10)と停船時暗雑音(ケースA, ケースB-1)との比較を示す。図6~8によれば、以下のことがわかる。

- (a) 定速航走からクラッチ脱にしてプロペラ遊転航走とすると定速航走より雑音レベルが低下する。(図6及び図7参照)
- (b) PN-1とPN-2のプロペラ遊転航走時のスペクトラムパターン及びレベルは、船速が同じであればほぼ同じである。(図6及び図7の③参照)
- (c) プロペラ雑音を含んだ定速航走時や中立翼角時と、プロペラ遊転時のレベル差はPN-2よりPN-1の方が大きい。(図6及び図7の①及び②と③の差参照)

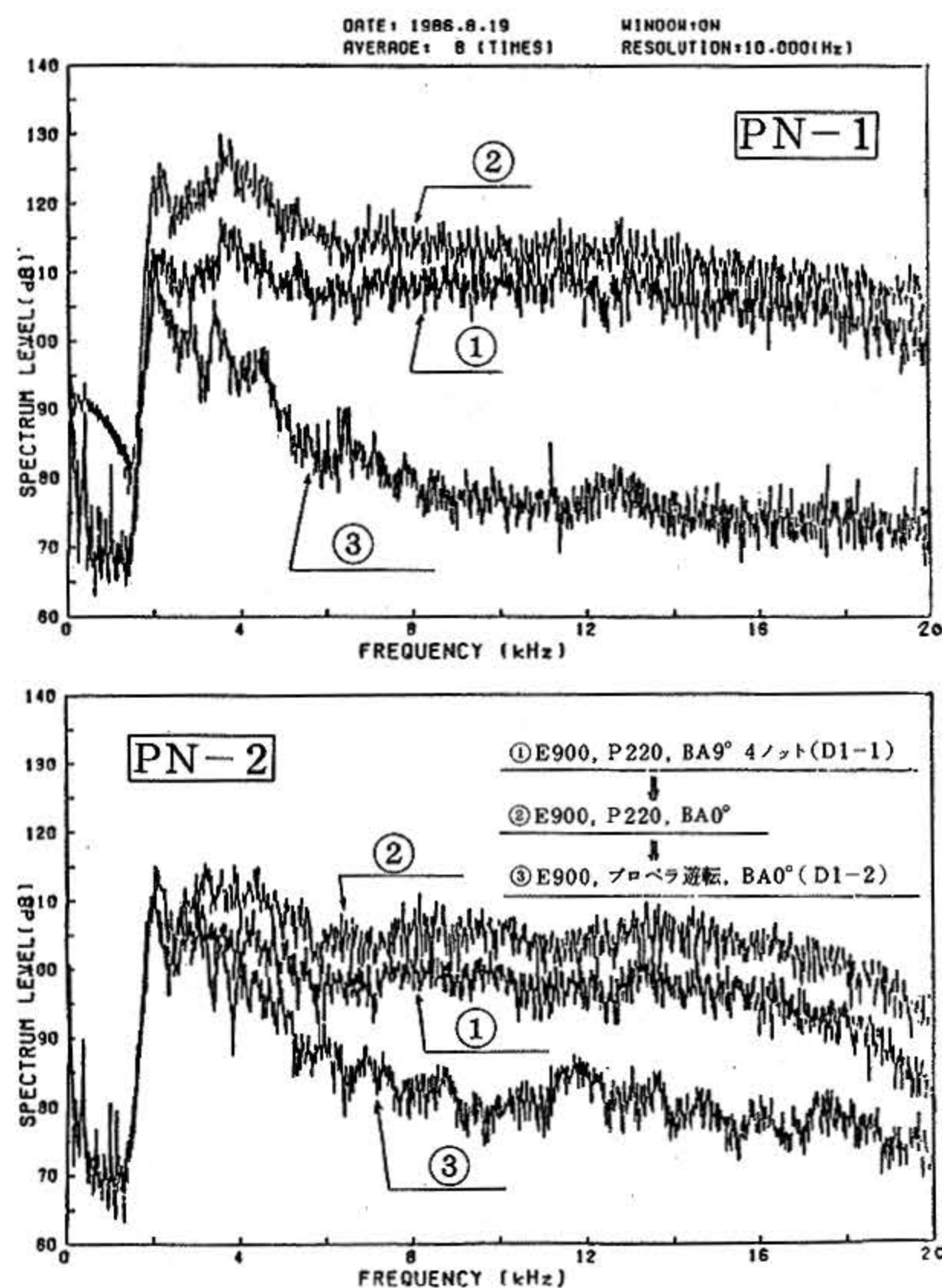


図7 航走時の暗雑音 (その2, 4ノット航走)
Fig.7 Back ground noise at cruising
(No.2, 4 kts)

以上の結果から、航走時のプロペラ雑音以外の雑音成分は、フローノイズ等のため、停船時の暗雑音よりレベルが高いものの（図8参照）、プロペラ近傍の仮設水中マイクロホン（PN-1, PN-2）の計測結果はプロペラ雑音が支配しており、定速航走時のプロペラ雑音はS/Nが十分あり、精度よく計測されている事がわかった。

なお、本書では計測各ケースの分析において航走時のプロペラ雑音以外の雑音に対する補正は行っていない。

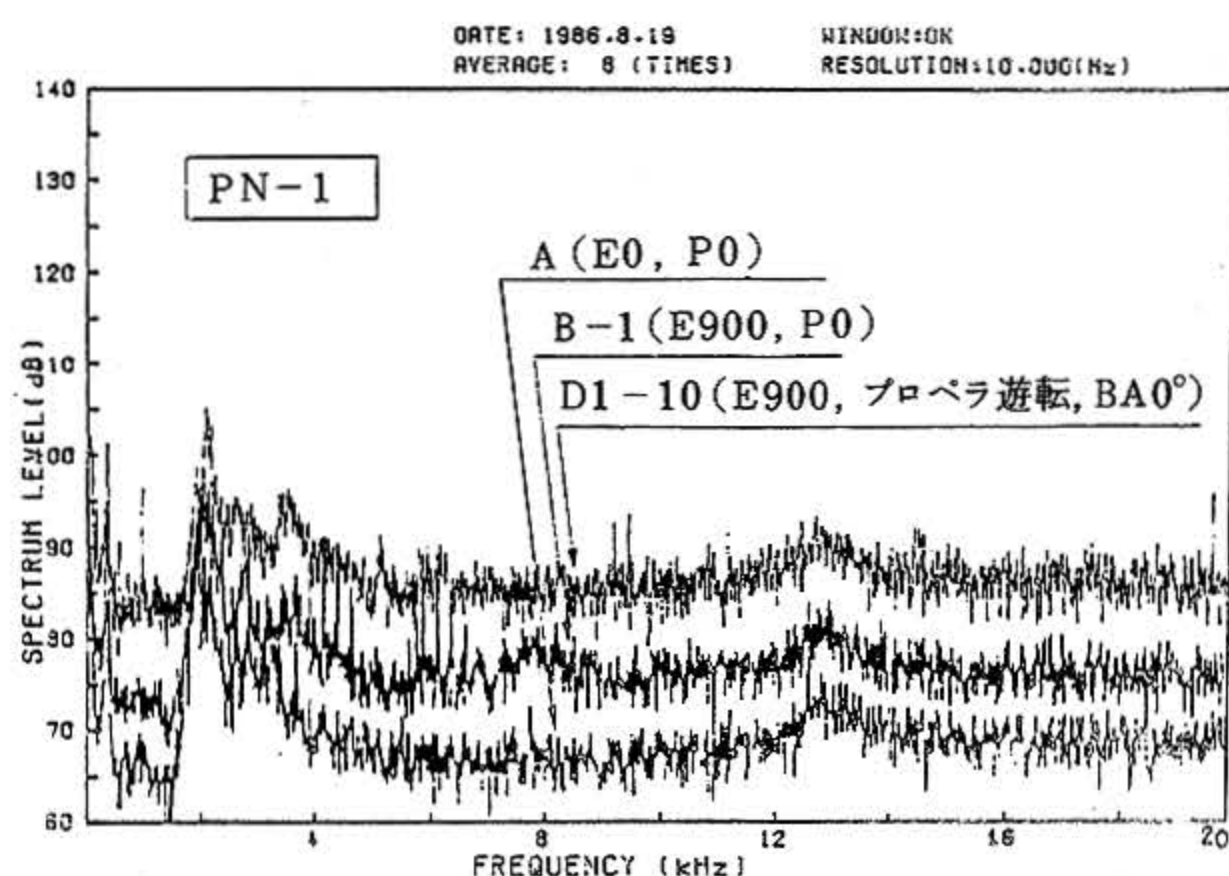


図8 停船時及び航走時の暗雑音比較
Fig.8 Comparison of back ground noise between at stoppage and at croising

5. 考 察

以下の本文及び図表中のプロペラ雑音レベルは、特記の他中心周波数 10 kHz の 1/3 オクターブバンドレベルで示す。

(1) 翼角及び回転数の組合せとプロペラ雑音との関係

図9にプロペラ回転数を一定として、翼角を中立翼角から増加させる事により、船速を0ノットから5.7ノットまで増加させた場合に発生するプロペラ雑音レベル（PN-1, PN-2）を示す（いずれも片軸定常航走時）。これによれば、船速の増加に伴いプロペラ推力は一樣に増加しているが、プロペラ雑音レベルの変化は一樣ではなく谷が生じている。すなわち、プロペラ回転数220 rpm（主機900 rpm）、172 rpm（主機700 rpm）共、翼角10～15°でプロペラ雑音が最小になり

翼角がそれより小さくても、大きくても雑音が漸増する。計測した翼角の範囲では翼角の変化によりプロペラ近傍の雑音が約20 dBも変化することがわかった。

次に、船速が一定（すなわちプロペラ推力が一定）となるように、翼角とプロペラ回転数の組合せを変化させた場合のプロペラ雑音レベル（PN-1）の変化を音圧の実効値に換算して比較したものを図10に示す。

これらによれば、

- 同一船速であっても翼角とプロペラ回転数の組合せにより、雑音レベルが変化する。
- プロペラ推力が高い片軸高船速（ $V_s=5.6$ ノット）では翼角大／プロペラ回転数小なる程雑音レベルが大となる。
- 片軸低船速（ $V_s=4$ ノット）では翼角が大であっても、小であっても雑音レベルが大であり、中程度の翼角（ $BA=10^\circ\sim 15^\circ$ 付近）で雑音レベルが最小となる。
- プロペラ推力が上記(b), (c)より更に低い両軸航走（ $V_s=5$ ノット）では翼角小／プロペラ回転数大なる程雑音レベルが大となる。
- 中立翼角時では船速が零にも拘らず、雑音レベルはかなり大で、プロペラ回転数の増加に伴い増加する。

ことなどがわかり、プロペラ発生雑音レベルがプロペラ翼角と回転数の選び方に大きく依存し、雑音レベル低減にそれらの選定が極めて重要であることが分かった。

プロペラ雑音は主にキャビテーションに基づくものであり、上記の現象はプロペラ先端付近の翼素への流入迎角の方向によって決まるプロペラキャビテーションの種類（翼素の正面から流入すればバックキャビテーション、背面から流入すればフェースキャビテーション）とその大きさに基づく事がプロペラ理論からも考察できる。この考えによれば、各船速毎（すなわち、プロペラ推力毎）に、水流がちょうど翼素の先端から流入することになる翼角と、プロペラ回転数の組合せが存在し、この領域では、キャビテーションが最小となる。この領域より翼角大なる領域では、バックキャビテーションが発生し、翼角大なる程（図10の左上）キャビテーションが大きくなる。一方、こ

の領域より翼角小なる領域ではフェースキャビテーションが発生し、翼角小なる程（図10の右下部）キャビテーションが大きくなる。

すなわち、比較的高船速（プロペラ推力大）では、翼角小／プロペラ回転数大という組合せの方が、一方、比較的低船速（プロペラ推力小）では、翼角大／プロペラ回転数小という組合せの方が、それぞれ逆の組合せよりプロペラキャビテーシ

ンを低く抑制できることが分かる。

(2) プロペラ雑音の音響航法装置への伝搬特性

雑音の伝搬損失は拡散、吸収、散乱、透過等が考えられる。ここでは取扱を簡単にするため、最も支配的と思われる拡散のみを取り上げ、仮設の水中マイクロホン（PN-1, PN-2）及び音響航法装置の相対位置関係から、距離減衰を計算し、計測値との比較を試みた。計算の仮定は次の

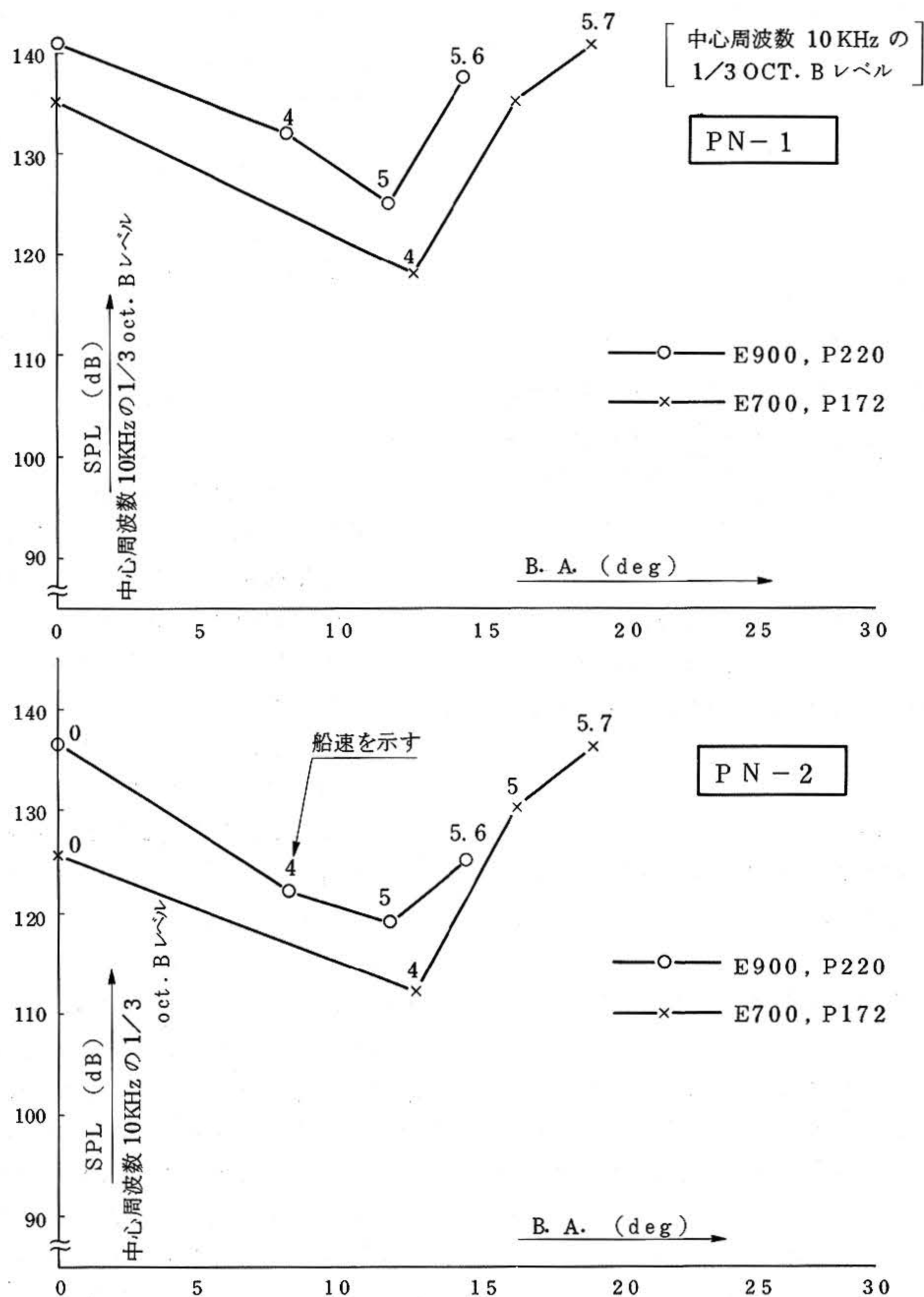


図9 プロペラ翼角とプロペラ雑音との関係

Fig.9 Relation between blade angle and propeller noise

とおりとする。

- (a) プロペラ雑音は主にTip付近のキャビテーションとみなし、円環状に分散した位相ランダムな音源の集合体と仮定する。
- (b) この円環音源は指向性がなく球面拡散する。
- (c) 水面、船体の反射等の影響は考えない。
- (d) 片軸航走の場合のみ考える。

上記の仮定のもとに、音源から任意の位置の音圧レベルを求める式は下式のようにになる。

(付録参照)

$$SPL = PWL + 10 \log \frac{1}{2R} + 10 \log \frac{1}{\sqrt{(\xi^2 + \zeta^2 + 1)^2 - 4\zeta^2}} \dots (1)$$

ここに、SPL ; 任意位置での音圧レベル
PWL ; 音源出力レベル

R ; 円環音源の半径 (≡プロペラ半径) $R = 1.15 \text{ m}$

ξ ; X/R

ζ ; Y/R

X ; 音源から船首方向距離

Y ; 音源中心から舷側方向距離

仮設水中マイクロホンの位置では、 $R = 1.15 \text{ m}$ 、 $Y = 4.5 \text{ m}$ を上式に代入すれば、

$$SPL = PWL - 3.6 - 5 \log [(16.3 + \xi^2)^2 - 61.3] \dots (2)$$

一方、No.2, 4 音響航法装置受波器 (HYD-2, HYD-4) はほぼ左舷プロペラ軸上にあるものとし、 $R = 1.15 \text{ m}$ 、 $Y = 0 \text{ m}$ を上式に代入すれば、

$$SPL = PWL - 3.6 - 10 \log (\xi^2 + 1) \dots (3)$$

となる。

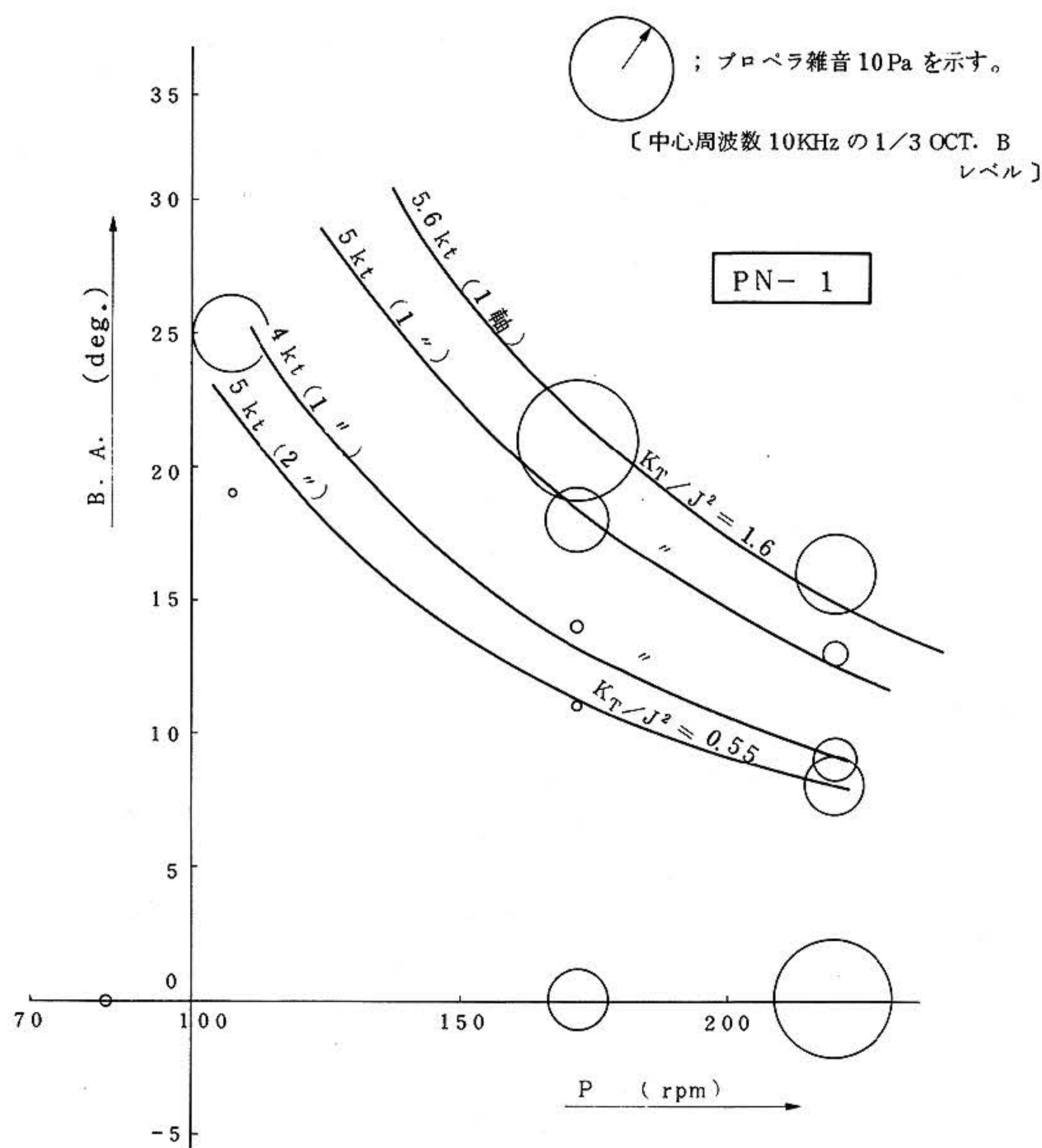


図10 プロペラ回転数及び翼角の組合せとプロペラ雑音との関係

Fig.10 Relation between propeller noise and combination of propeller rotation and blade angle

図11は、仮設水中マイクロホン及び音響航法装置受波器（HYD-1～4）位置での音圧レベルをプロペラ音源からの距離に対して表示している。これによれば下記のことになる。

- (a) プロペラに最も近いPN-1の音圧が最も高く、プロペラからの距離が大きくなるに従い音圧が低下する。
- (b) PN-2とHYD-3, 4はプロペラからの距離があまり異ならないにもかかわらず、HYD-3, 4の音圧がかなり低下する。これは距離減衰による他に音響航法装置受波器の指向性によるものと考えられる。

次に、伝搬損失の程度を、計測値と理論式（(2)又は(3)式）とで比較するために図12（中心周波数6.3, 10, 16 kHz 1/3オクターブバンド）にPN-1に対するPN-2のプロペラ雑音の減衰の程度を示す。これらによれば、計測値は多少バラツキがあるものの、周波数によらず平均的には(2)式による距離減衰（7.9 dB）と同程度の減衰を示している。

また、図13（中心周波数6.3, 10, 16 kHz 1/3オクターブバンド）にHYD-4に対するHYD-2のプロペラ雑音の減衰の程度を示す。

これらによれば、プロペラ雑音レベルが低く暗雑音とのS/N上問題があると考えられるケースを除き、(3)式による距離減衰（9.7 dB）に対し中心周波数16 kHzの1/3オクターブバンドでは、計測値と非常によく一致している。

一方、16 kHzより低い周波数では周波数が低くなるに従い(3)式の球面拡散による距離減衰より減衰の度合いが若干大きくなる。

次に、プロペラ音源との距離がほぼ等しいPN-2とHYD-4のプロペラ雑音を比較して図14に示す（中心周波数10 kHzの1/3オクターブバンドの場合）。これによればPN-2に対するHYD-4のプロペラ雑音は(2)又は、(3)式による距離減衰（1.8 dB）より更に、5～15 dB低く、これは、音響航法装置受波器の指向性（図15）による低下とほぼ同程度の値である。

音響航法装置受波器の指向性を示す図15によれば、真下の受波性能に対し真横付近（1素子ビーム中心から70°～90°の範囲でみると）からの受波性能は7～18 dB低下する。

以上の結果から、下記のことと言える。

- (a) プロペラ雑音の伝搬損失は、プロペラのごく近傍では船体周辺においても球面拡散と仮

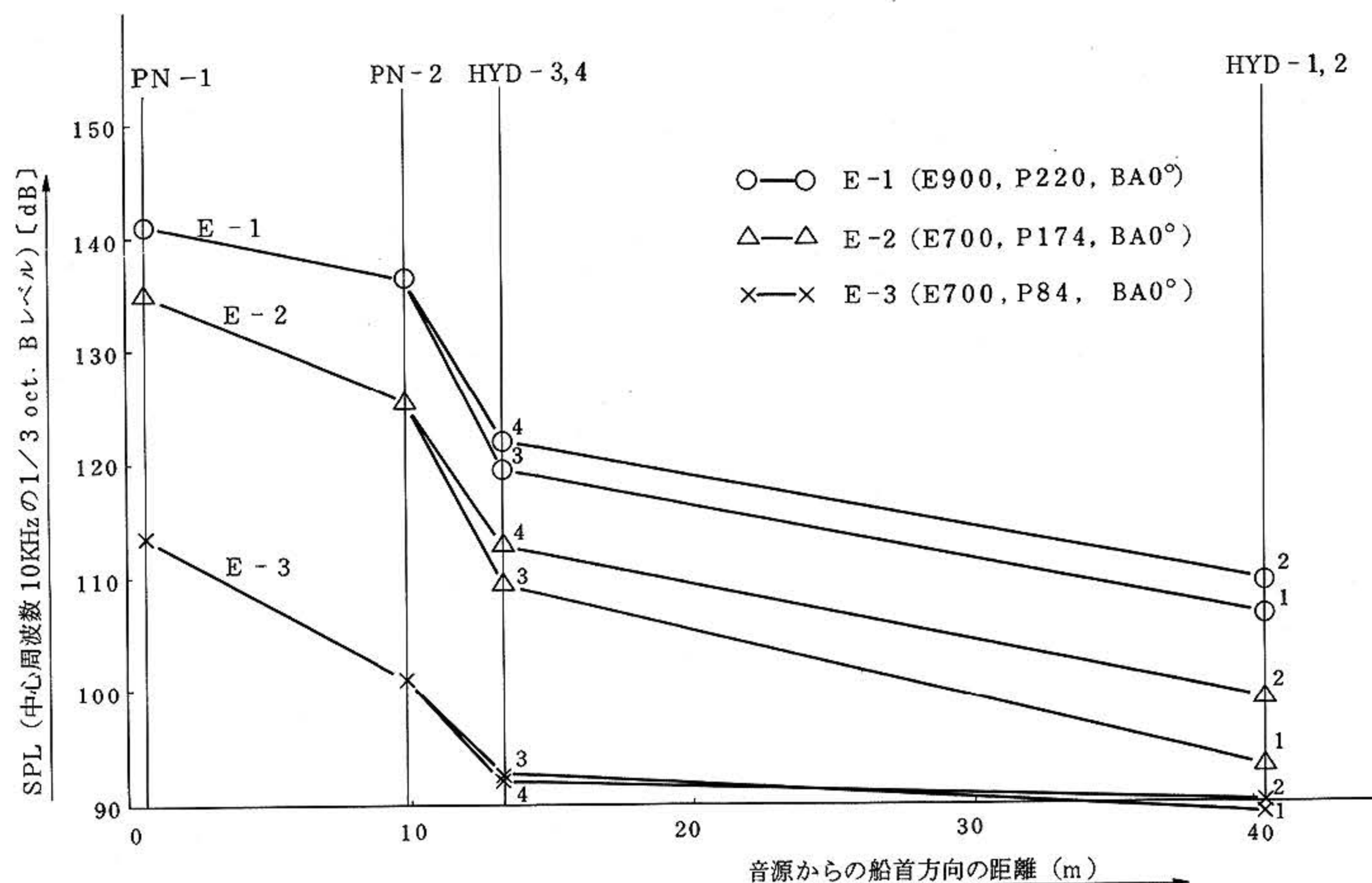


図11 音源からの距離に対する各受波器の雑音レベル

Fig.11 Transmission loss from noise source to hydrophone

定した値にほぼ一致する。

- (b) 「なつしま」の船首部の音響航法装置受波器(プロペラからの距離約39m)と船尾部の音響航法装置受波器(プロペラからの距離13m)間のプロペラ雑音の伝搬損失に周波数依存性がみられ球面拡散と仮定した距離減衰に対し、

16 kHz 程度で計算値と非常によく一致する一方、それ以下の周波数では周波数が低くなるに従い伝搬損失の度合いがそれより若干大きくなる。

- (c) 音響航法装置受波器へ入力されるプロペラ雑音は、その指向性の影響を受ける。

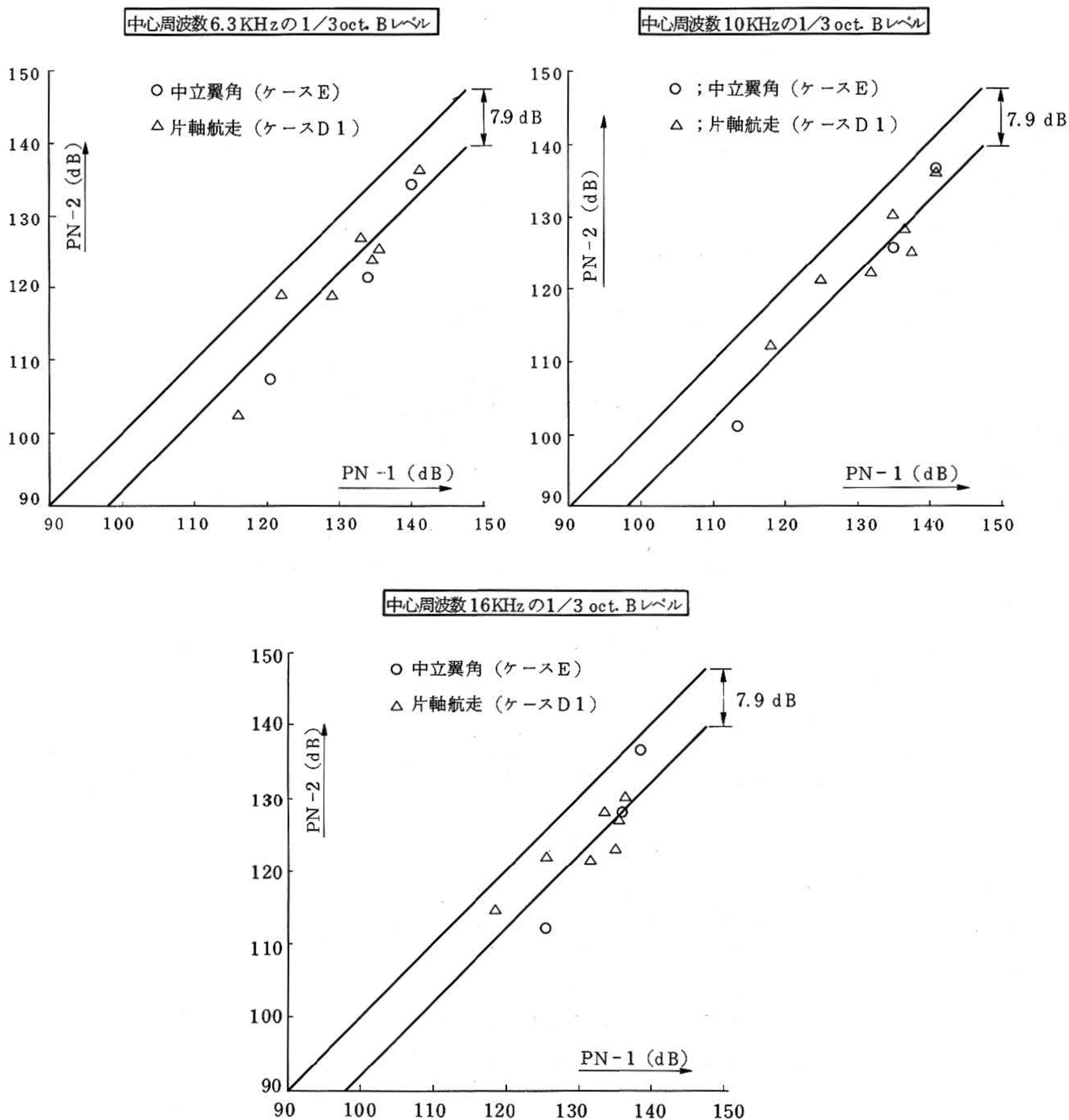


図12 PN-1 に対する PN-2 の雑音減衰
Fig.12 Transmission loss from PN-1 to PN-2

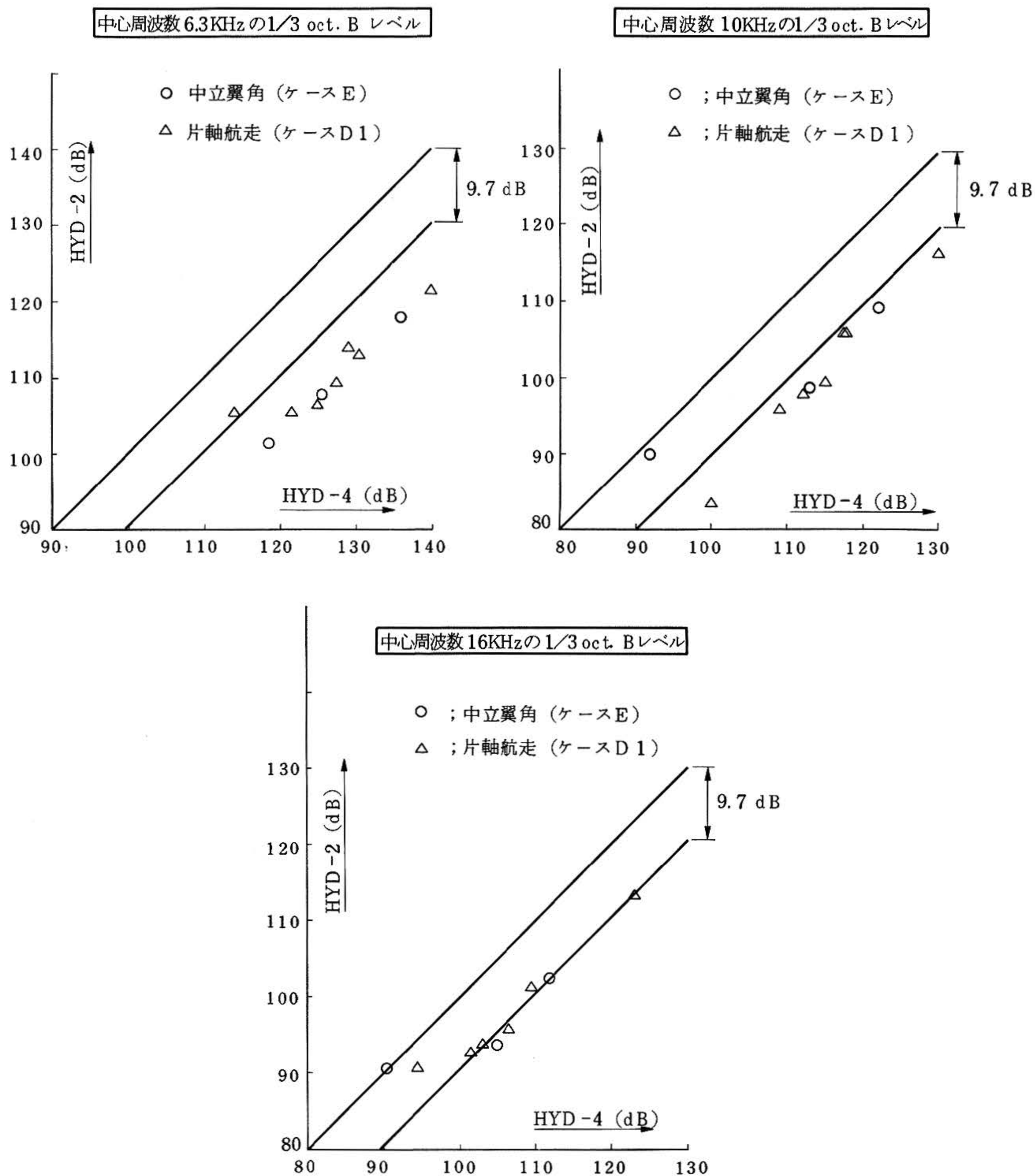


図13 HYD-4に対するHYD-2の雑音減衰
Fig.13 Transmission loss from HYD-4 to HYD-2

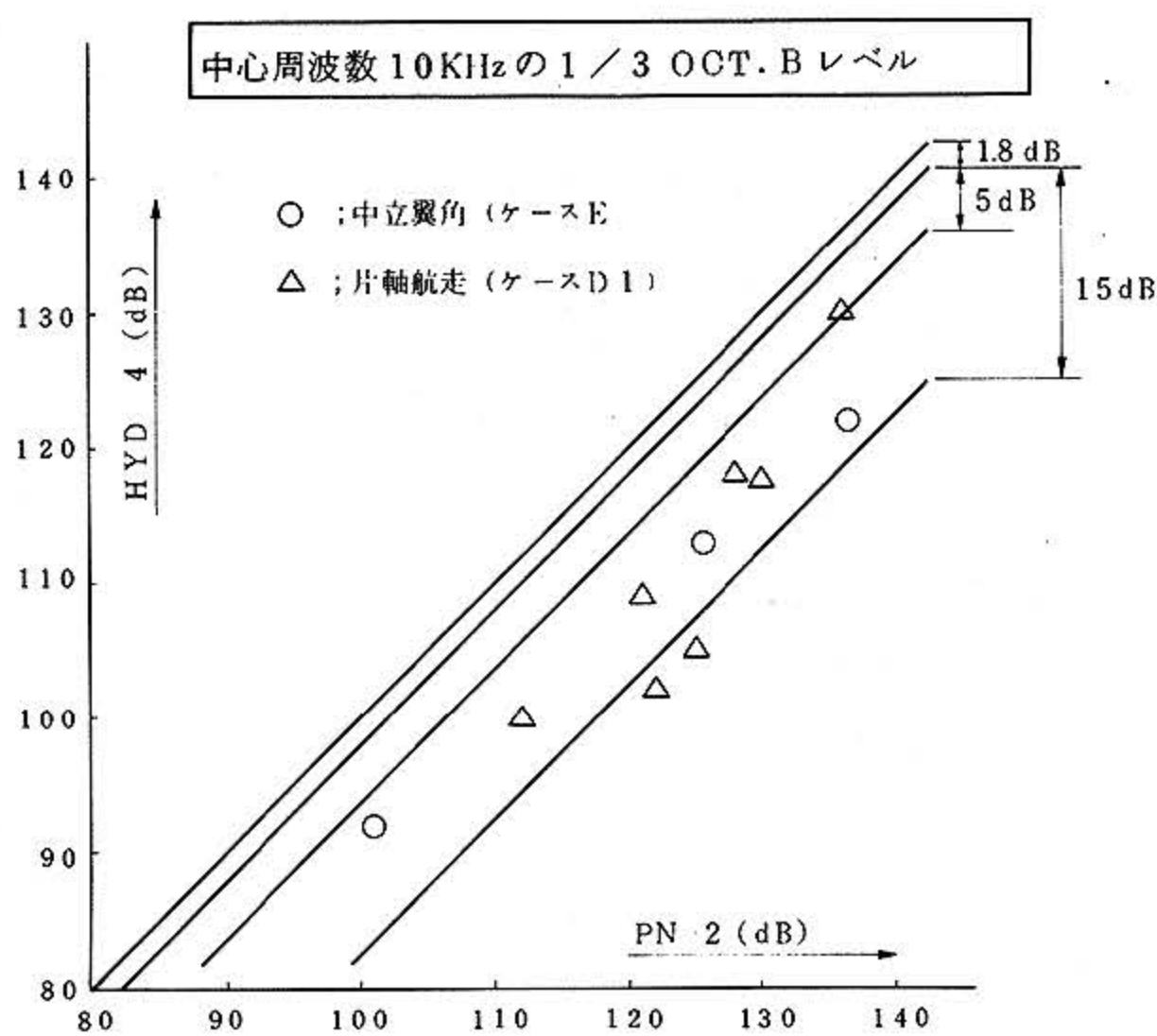


図14 PN-2に対するHYD-4の雑音減衰
Fig.14 Transmission loss from PN-2 to HYD-4

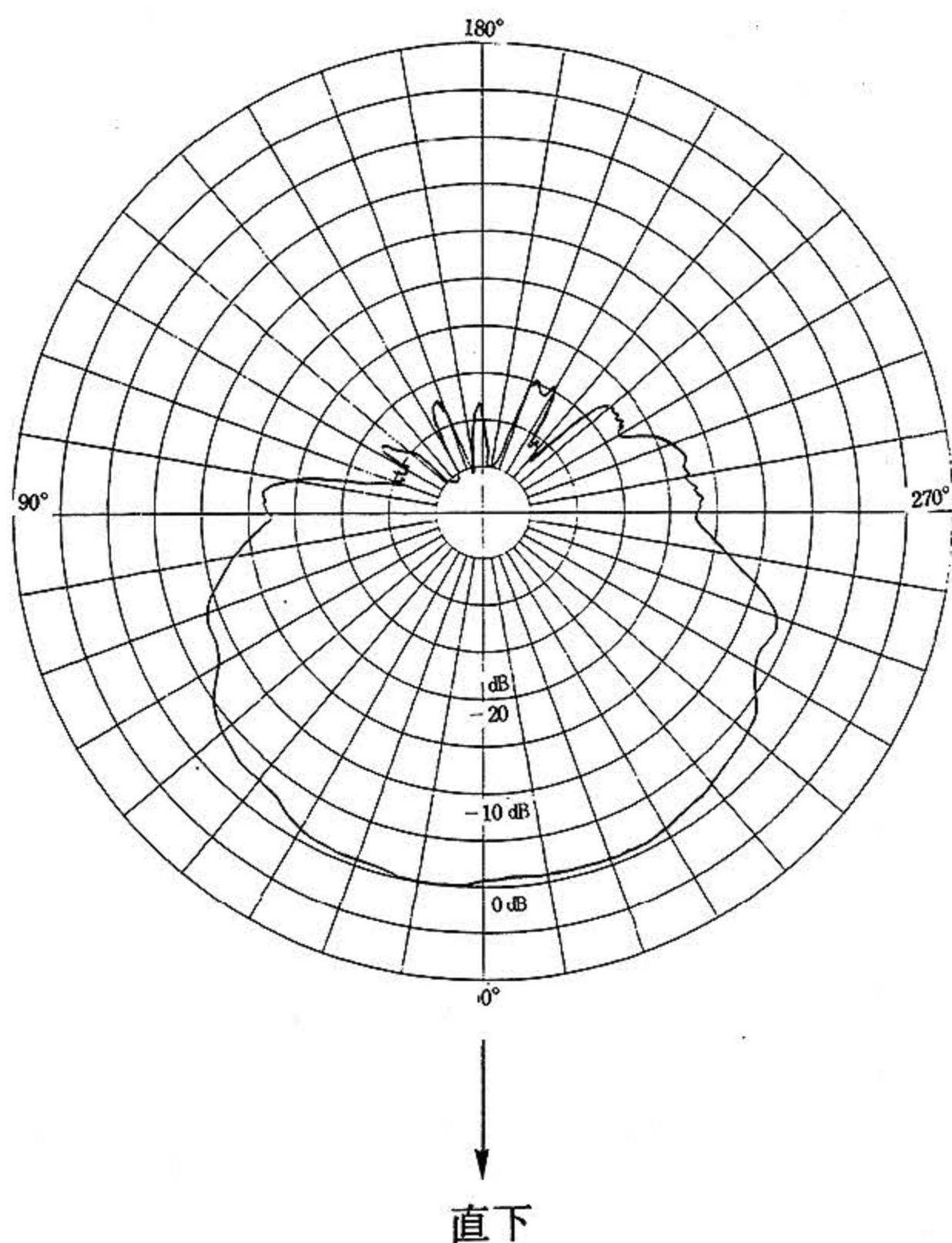


図15 「なつしま」音響航法装置受波器の指向性
Fig.15 Directivity of transducer (receiver) of NATSUSHIMA ANS.

6. 新母船への適用

今回、「なつしま」によるプロペラ雑音計測結果を新母船のプロペラ雑音の予測及び低減対策に以下のごとく活用できると考える。

(1) CPP船の場合、プロペラ回転数と翼角の選定により、プロペラ雑音を低減することができる。特に新母船の場合、水中放射雑音を低減する必要がある運航モードとして、比較的低馬力の海上静穏時の6500 m潜水調査船支援時から、比較的高馬力の荒天下の10,000 m級無人探査機オペレーション時まで幅広くあり、それぞれのモードにおいてプロペラ雑音が、所要のレベル以下に収まるよう、①プロペラ回転数と翼角が選択できるような推進システムとし、②プロペラキャビテーション理論に基づくキャビテーション最少となるプロペラ回転数と翼角の組合せで運用できるよう計画する。

(2) 今回の「なつしま」によるプロペラ雑音計測結果を利用し、更に「なつしま」及び「新母船」の模型プロペラによるキャビテーション試験を実施することにより新母船のプロペラ雑音レベルを予測することができる。

(3) プロペラ雑音は、船体周辺でもほぼ球面拡散による減衰がみられると考えておけば雑音予測上安全側となり、実用上差し支えない。

(4) 音響機器の受波器に指向性を持たせることによりプロペラ雑音等受波器の真横からくる雑音入力レベルを低下させることが期待できる。

7. あとがき

船舶の水中放射雑音の主要因であるプロペラ雑音を系統的に把握するため「なつしま」を用いて実船計測を行い、非常に有益なデータを得ることができた。

本書に示す成果を新母船の低雑音化に役立てていく所存である。

(原稿受理 1987年12月14日)

付録 プロペラキャビテーションノイズの
音源形状の仮定及び任意点での音圧
レベル

1. プロペラキャビテーションノイズの音源形状
の仮定

プロペラノイズは主としてキャビテーションに
基づく。

キャビテーションの発生順序としては、通常ま
ず Tip Vortex Cavitation が発生し、その後
プロペラ荷重度の増大とともに、Back Sheet
Cavitation が発生し、翼根 (Root) に向かっ
て発達する。

新母船の潜航支援時は、比較的低速でしかもプ
ロペラ荷重度が小さい運航モードであるためキャ
ビテーションの発生領域はTip 付近に限られると
考えられる。従って、このような運航モードでの
プロペラ雑音の音源分布は大略プロペラの半径R
の円環と考えるのが妥当であろう。

一方、Tip 付近に発生するキャビテーションは
プロペラ半径Rの円環上一様ではない。しかしな
がらプロペラ雑音 (キャビテーションノイズ) は、
複数の翼のそれぞれの先端で発生した気泡が、翼
にひきつられながら円環上に分布し、それらの気
泡がランダムにつぶれる時に発生する音が、支配
的であるため、ここでは円環上に一様に分布した
位相ランダムな点音源の集合体との仮定を設けた。
(付図1)

なお、このような仮定を設けることにより音源
の積分が線積分となり、プロペラ中心軸からずれ
た点 (たとえばPN-1, PN-2) での音圧の
計算が容易に行えるという利点が生ずる。

2. プロペラ雑音の任意点での音圧レベル

円環上の要素Qから球面拡散すると、P点の音
の強さ (dI) は下式となる。(付図2)

$$dI = \frac{W \cdot R \cdot d\theta}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- dI: 要素Qの音源によるP点での音の強さ
- W: 音源の音響出力
- R: 円環の半径 (= プロペラの半径)
- θ : 要素Qの円環上の角度
- r: QとPの距離

$$\begin{aligned} r^2 &= X^2 + (Y - R \cos \theta)^2 + R^2 \sin^2 \theta \\ &= X^2 + Y^2 + R^2 - 2YR \cos \theta \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

(1)式を円環全周で積分すると、P点におけるプ
ロペラ雑音の強さが求まる。

$$I = \frac{WR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{X^2 + Y^2 + R^2 - 2YR \cos \theta} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで} \quad A &= X^2 + Y^2 + R^2 \\ B &= -2YR \end{aligned}$$

とすれば(3)式は

$$I = \frac{WR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{A + B \cos \theta} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

$A > |B|$ の場合、すなわち

$$X^2 + Y^2 + R^2 - 2YR = X^2 + (Y - R)^2 > 0$$

であるため定積分公式より

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{A + B \cos \theta} &= 2 \int_0^{\pi} \frac{d\theta}{A + B \cos \theta} \\ &= \frac{2\pi}{A^2 - B^2} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

従って、(3)式は

$$\begin{aligned} I &= \frac{W \cdot R}{4\pi} \cdot 2\pi \frac{1}{(X^2 + Y^2 + R^2)^2 - 4Y^2 R^2} \\ &= \frac{W}{2R} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\frac{X^2}{R^2} + \frac{Y^2}{R^2} + 1)^2 - 4(\frac{Y}{R})^2}} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

となる。

$$\text{ここで} \quad \xi = \frac{X}{R} \quad \zeta = \frac{Y}{R} \quad \text{とすれば,}$$

$$I = \frac{W}{2R} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\xi^2 + \zeta^2 + 1)^2 - 4\zeta^2}} \dots\dots\dots (7)$$

となり、 $SPL = 20 \log P/P_0 = 10 \log I/I_0$
であるから

任意点での音圧レベルは

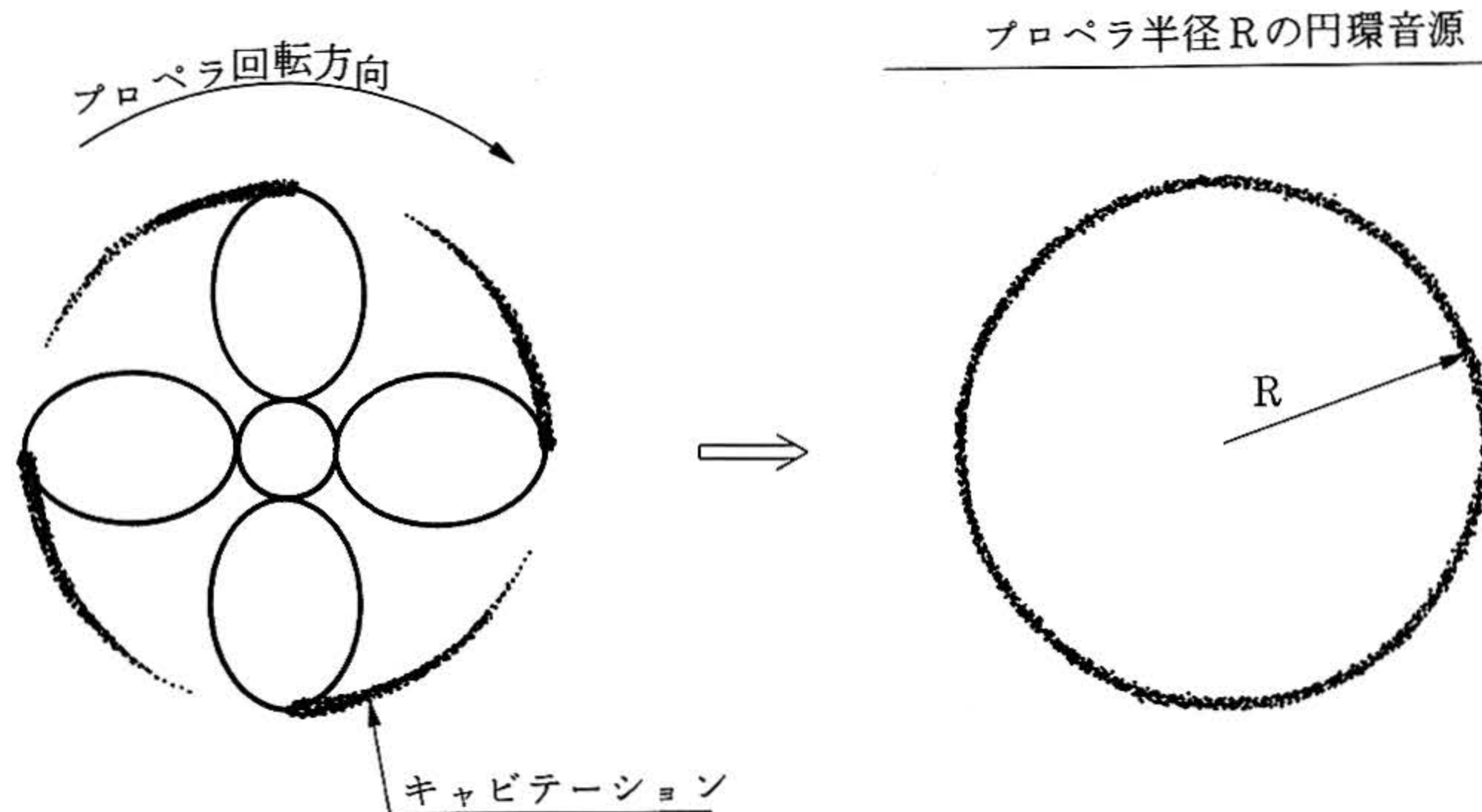
$$\begin{aligned} SPL &= 10 \log \frac{W}{I_0} + 10 \log \frac{1}{2R} \\ &\quad + 10 \log \frac{1}{\sqrt{(\xi^2 + \zeta^2 + 1)^2 - 4\zeta^2}} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

と表せ

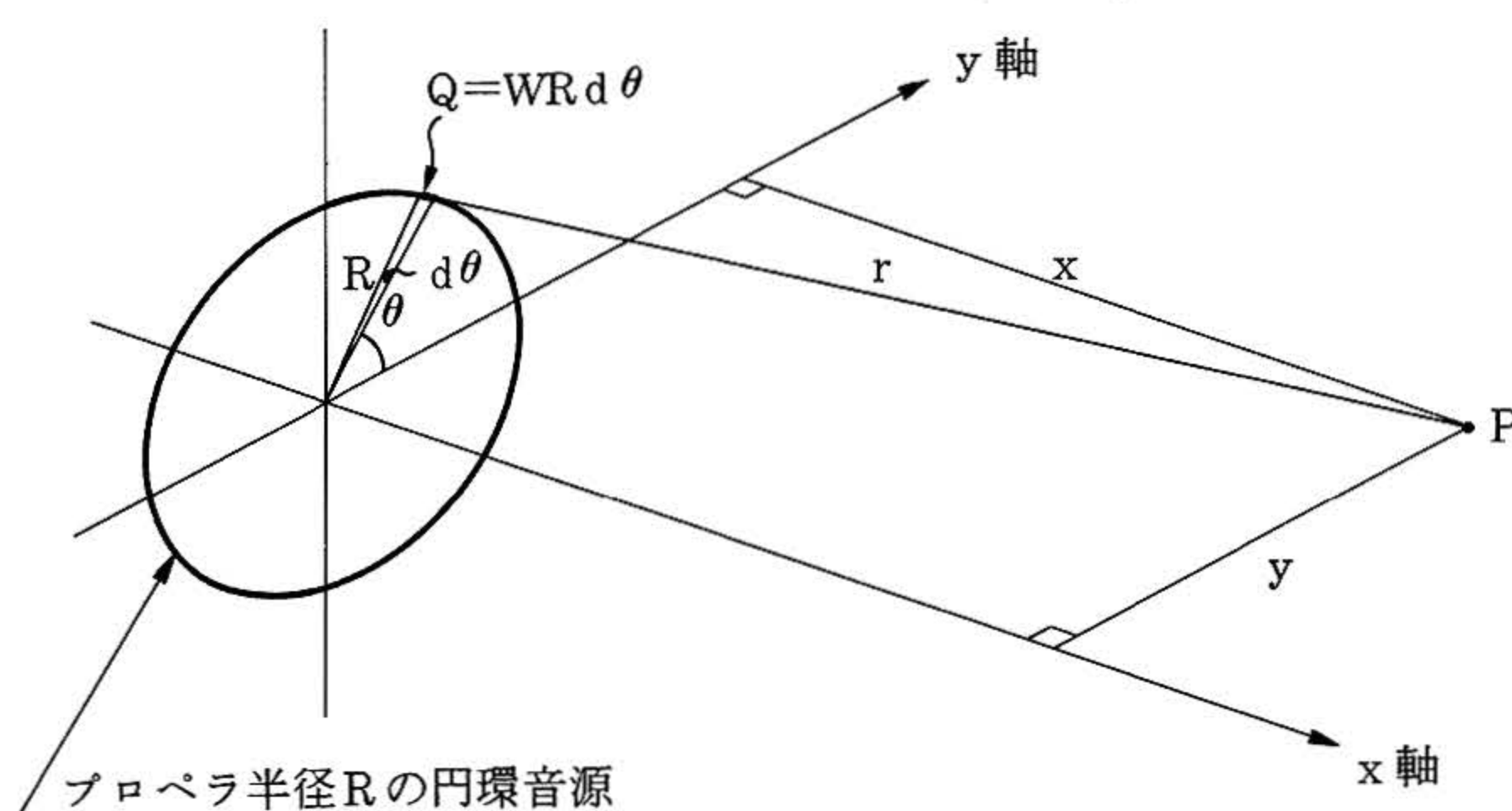
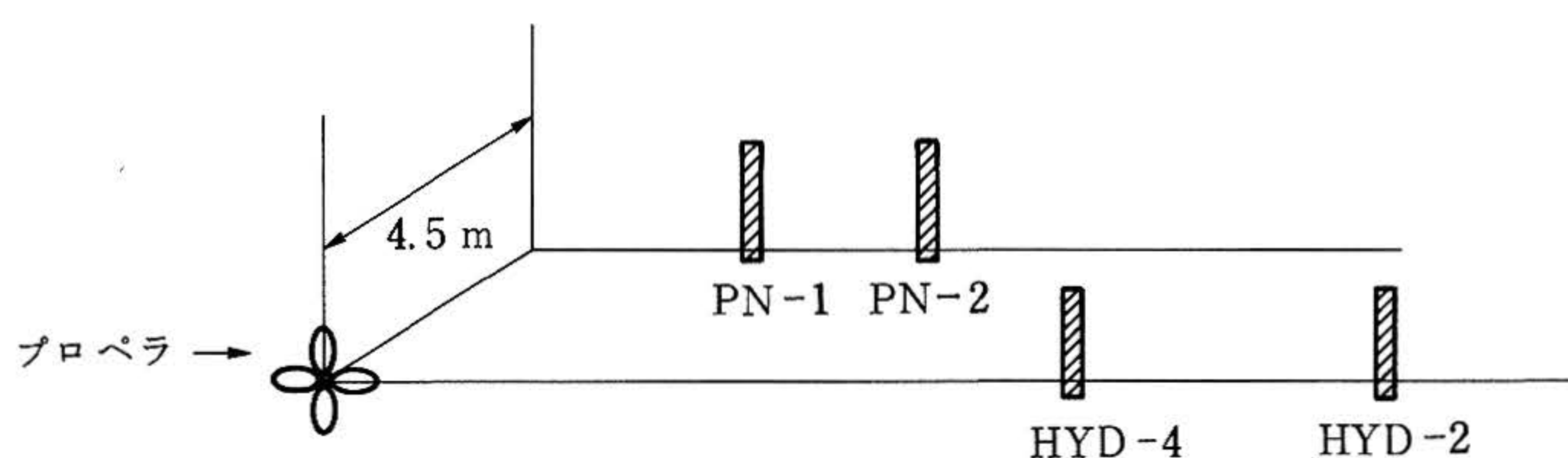
$$10 \log \frac{W}{I_0} = PWL \text{ であるから(8)式は,}$$

$$\begin{aligned} SPL &= PWL + 10 \log \frac{1}{2R} \\ &\quad + 10 \log \frac{1}{\sqrt{(\xi^2 + \zeta^2 + 1)^2 - 4\zeta^2}} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となる。



付図1 プロペラ雑音の音源形状
 Supp.1 Shape of propeller noise source



付図2 プロペラ音源と受波器との関係
 Supp.2 Geometrical relation between propeller noise source and hydrophone