音響インテンシティ計測法を利用した ディーゼル発電装置の音響パワー計測*

馬場 宣裕** ・ 古作 康幸**
城戸口 秀典*** ・ 鎌田 実****

Sound Power Measurement of Diesel Generator Unit by Sound Intensity Technology

By Baba Nobuhiro, Kosaku Yasuyuki, Kidoguchi Hidenori, Kamata Minoru

The phenomena of ship noise is so complex that it doesn't known clearly as yet how to control it. One of the main goals to research the ship noise is to predict the noise levels in the accommodation space at the design stage. The techniques necessary for solving this problem are divided roughly into two parts, one is to estimate the power generated by noise source and the other is to simulate the transmission path of the noise energy.

SEA (Statistical Energy Analysis) is the most effective method for the latter and our Society has the computer program to execute such simulation using SEA method. But regarding the former, there is no theoretical method to estimate the noise power and we only have a few unreliable data obtained from experiments. The method to measure the sound intensity is lately put into practical use and it makes possible to estimate the noise power more accurately than before. We try to apply this method to measure the noise power generated by diesel generator unit. In this paper we discuss the method and the results of the measurement.

1. はじめに

近年、一段と強まる労働環境改善への動きおよび客船の建造ブームなどから、船舶騒音への関心が高まりつつある。船舶騒音に関しては種々の側面から検討が行われているが、なかでも技術的、経済的に重要なのが建造時点での騒音レベルの予測である。予測手法には実績データに基づいたヤンセン法や理論的な枠組みを基礎とした統計的エネルギー解析法（以下SEA法と略す）が用いられることが多く、海事協会でもSEA法に基づいた予測プログラムを使用している¹⁾²⁾。

SEA法では、音源のエネルギーを境界条件として伝搬状態を推定することが可能となるが、実用上幾つかの問題点がある。第一の点は、SEA法は理論的な伝搬モデルを基礎としているが、部材の内部損失

係数や部材間の結合損失係数には、理論解析や実験などの他の方法で得られる結果を用いる。従って、その予測精度は使用する特性値に左右される。

予測計算に必要な音源の発生エネルギーに関する精度良い推定値が得られないことが第二の問題点である。一般に音源の音響パワーは無響室などの適当な環境のもとで計測されることが多く、船舶の場合計測環境を実現するのは容易ではない。従って、SEA計算モデルの計算対象区画の境界で、振動および音圧レベルを与えて予測計算を行う便宜的手法を用いることになる。付与する値としては同型船などの実績値に基づくものが通例で、予測システムとしては不完全なものとならざるを得ない。

音源計測に各方面で用いられることが多くなったインテンシティ計測を適用すれば、船舶での騒音源の特性を従来より詳しく解明することが可能となるが、船舶の騒音源に適用した報告例は少ない。筆者らは船舶用ディーゼル発電装置を対象として音響インテンシティ計測を実施する機会を得た。以下、計測方法の概要および結果に関して報告する。

*原稿受付 平成4年1月30日

月例講演（平成3年10月8日）

**正会員 財日本海事協会技術研究所（東京都三鷹市新川6-20-1）

****正会員 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）

2. 計測の概要

2.1 音響インテンシティ計測の基礎

音響インテンシティ I は、単位面積を通過する音響パワーで定義されるベクトル量で、式(1)の関係を満たす。

$$I = \frac{\text{音響パワー}}{\text{面積}} = \frac{\text{エネルギー}}{\text{面積} \times \text{時間}} \quad \dots\dots(1)$$

$$= \frac{\text{力}}{\text{面積}} \times \frac{\text{距離}}{\text{時間}} = \text{音圧} \times \text{粒子速度}$$

粒子速度を求めるには、オイラーの式

$$p \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial n}$$

から (p は空気密度)

$$u = - \frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial n} dt$$

とし、式(2)のように x 方向成分を考える。

$$u_x = - \frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt = - \frac{1}{\rho} \int \frac{\Delta p}{\Delta x} dt \quad \dots\dots(2)$$

図1のように Δr だけ離れた2点で音圧 p_1 , p_2 を計測すると式(2)の u_x は

$$u_x = - \frac{1}{\Delta r \rho} \int_{-\infty}^t (p_2 - p_1) dt \quad \dots\dots(3)$$

のように表される。2点の平均音圧 $p = (p_1 + p_2)/2$ および式(1)、式(3)から x 方向のインテンシティ I_x は式(4)ようになる。

$$I_x(t) = p(t) \cdot u_x(t) \quad \dots\dots(4)$$

$$= \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2\rho\Delta r} \int_{-\infty}^t (p_2(\tau) - p_1(\tau)) d\tau$$

一般には式(4)の瞬間インテンシティの時間平均として得られる式(5)の値を用いる。

$$\overline{I_x(t)} = \frac{1}{2\rho\Delta r} \left[\overline{p_1 \int p_2 - p_1} \int p_1 + p_2 \int p_2 - p_2 \int p_1 \right]$$

$$= \frac{1}{\rho\Delta r} \left[\overline{p_1 \int p_2} \right] \quad \dots\dots(5)$$

インテンシティの計測に当たっては誤差を少なくす

図1 インテンシティの計測位置

るために種々の注意が必要となる³⁾⁴⁾。

2.2 計測及び分析機器

計測および解析に使用した機器を表1に示す。1～5が音響インテンシティ計測用、6～9が計測環境を評価する目的で行った残響時間計測用の機器である。計測時間の制限から同時分析が困難なためいったん計測信号を記録した。記録にはDAT方式のデータレコーダを使用した。事前に10kHz以下の周波数領域でチャンネル間の位相誤差が殆どの周波数領域で0.1°以下(高周波域の一部で最大で0.4°程度)であることを確認した。2.1で触れた2点の音圧計測点の距離 Δr (実際には2個のマイクロフォンの間隔)は12mmとした。詳細は省くが、100～5kHzの周波数領域で、1dB以内の誤差でインテンシティの測定が可能となる³⁾⁴⁾ (3.1(5)参照)。

表1 計測・解析機器

No.	名称	製作所	型式
1	インテンシティ・プローブ	Brüel&Kjær	3519
2	較正器	Brüel&Kjær	3541
3	アンプ	松寶機器	ME3251B
4	データレコーダー	T E A C	RD101T
5	周波数分析器	Brüel&Kjær	2133
6	マイクロフォン	Brüel&Kjær	4133
7	較正器	Brüel&Kjær	4230
8	プリアンプ	KUDELSKI	QJPA
9	テープレコーダー	KUDELSKI	NAGRA VI-SJ

2.3 計測対象

表2に示した3種類のディーゼル発電装置を計測の対象とした。DG-Aは実船の機関室に搭載後の完成状態で計測した。他の音源の影響を少なくする目的で、バラストポンプ、LOポンプ、および船内照明に負荷を限定し、約40%負荷の状態で運転した。運転したポンプによる音はディーゼル発電機に比べ小さく影響は殆どないと思われる。DG-BおよびDG-Cは製造工場での作業が行われていない状態で計測を行った。表2の寸法L, B, Hは発電装置外形の最大値の概略値である。

2.4 計測点の位置

インテンシティの計測を行う場合、計測面でプローブを一定速度で移動させながら連続的に計測する方法と、一定間隔で計測を行う方法がある。計測対象が大きいため後者の方法を採用した。表3に計測点に関する概要を示す。便宜的にディーゼル機関側を前面、発電機側を後面とした。

計測点の総数は、一点につき20秒間計測するとし

表 2 計測対象発電装置

	主要目		大きさ (最大)			稼働状態	
	回転数 (rpm)	出力 (kW)	L (mm)	B (mm)	H (mm)	計測 場所	負荷 (%)
DG-A	900	441.3	4,400	1,500	2,300	機関室	40
DG-B	720	441.3	3,600	1,500	2,300	工場	75
DG-C	720	661.95	5,300	1,800	2,900	工場	75

表 3 計測点および計測面

	計測点数			計測面の大きさ		計測時間 (時間)
	上面	前・後面	左・右側面	L×B×H	メッシュ寸法	
DG-A	17×6=102	6×8=48	17×8=136	5,110×1,920×2,400	300×300	7
DG-B	12×5=60	5×6=30	12×6=72	5,200×2,000×2,500	400×400	3.5
DG-C	14×6=84	6×7=42	14×7=98	6,000×2,400×3,000	400×400	4.5

前面：機関側、後面：発電機側

て計測に使える時間を勘案して決定した。計測点の位置を正確に割り出すためアルミの型材で枠を組み、一定間隔でゴム紐を張ってメッシュ状にし、各メッシュの中央で計測した。但し、排気管の周辺では一部位置をずらした場合や、計測が行えなかったケースもあった。表 3 の寸法 L×B×H は枠の大きさを示している。

音源と計測点の距離は、表 2 の発電装置外形と表 3 の枠の寸法を比較すると近接しているように思われるが、表 2 の寸法は最大値を示しており、大部分の計測点で 50 cm 以上ある。音源の近傍の near field では音場の乱れが大きいとされている。near field の領域を波長の 4 / 1 程度、音速を 340 m / 秒とすると、170 Hz 以上の音では音源の表面から 50

cm 以上離れた領域は far field とみなせる。どちらの音場で計測しても、目的の音源パワーの測定は可能であるが、near field では計測間隔を狭める必要がある。計測前に妥当な計測間隔が不明だったので原則として far field で計測を行うこととした。

3. 計測結果および考察

3.1 音響パワー 表 4 に計測したインテンシティと対応した区画の面積との積の総和として得られた音響パワーを示す。解析はデジタルフィルタにより 1 / 3 オクターブバンド毎のスペクトルを求めたが、本稿ではすべて 1 / 1 オクターブバンドの値にまとめて議論している。2.2 に触れたように、

表 4 音響パワーの計測結果

		単位: dB (基準値 10 ⁻¹² W)											
		オクターブバンド中心周波数 (Hz)								オーバーオール			
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	A特性	平坦	L* ¹⁾
DG -A	上面	74.8	93.1	98.3	100.7	104.3	100.6	96.0	89.5	88.4	105.0	108.0	107.9
	前面	-80.8	81.8	90.7	97.1	102.8	100.6	94.6	86.3	76.5	104.2	106.0	106.0
	後面	81.2	88.6	93.2	97.0	96.4	95.7	88.0	80.2	76.4	98.7	102.2	102.0
	左側面	95.8	97.4	101.2	102.4	104.9	104.0	98.4	90.6	87.9	107.3	110.2	109.8
	右側面	98.2	-84.5	-88.4	99.0	103.0	102.5	95.8	87.9	82.9	105.4	107.5	106.9
	全体	100.2	99.1	103.5	106.7	110.1	108.4	102.6	95.0	92.0	111.9	114.5	114.2
DG -B	上面	96.8	95.2	97.0	99.0	103.7	100.5	98.0	96.0	97.3	105.6	108.2	107.6
	前面	90.9	88.6	95.0	95.8	100.6	100.0	97.6	89.9	83.6	103.9	105.7	105.5
	後面	94.1	94.6	93.5	93.1	93.7	91.1	88.1	85.5	84.7	96.0	101.6	99.5
	左側面	99.0	-91.3	99.7	100.4	103.1	103.0	100.6	96.5	96.7	107.2	109.2	108.8
	右側面	98.9	99.4	100.2	100.1	103.1	102.1	99.3	94.1	90.9	106.2	109.3	108.4
	全体	103.8	101.5	104.8	105.4	108.9	107.7	105.1	100.9	100.7	112.0	114.6	113.9
DG -C	上面	101.7	-98.0	98.9	98.9	104.1	103.9	99.2	98.9	101.3	107.6	109.6	109.1
	前面	89.3	97.7	96.8	96.3	98.7	98.8	94.7	89.0	85.4	102.2	105.4	104.4
	後面	96.2	98.6	97.3	94.3	96.0	97.7	92.6	90.2	91.8	100.7	105.1	103.2
	左側面	107.9	102.9	103.5	100.7	105.2	106.2	102.1	98.8	102.4	109.5	113.3	111.2
	右側面	111.0	105.3	102.6	101.7	104.4	105.6	101.1	96.2	93.8	108.6	114.4	110.5
	全体	113.2	107.8	107.7	106.1	109.9	110.6	106.3	103.3	105.5	113.9	118.1	115.8

前面：機関側、後面：発電機側

1) L* は 125Hz から 4kHz までの間のオーバーオール値 (平坦) を示す。
負の値はインテンシティの向きが内側、即ち発電装置に向いていることを示す。

マイクロフォンの間隔 Δr を 12 mm としたので、100～5 kHz 以外での計測値の信頼度は保証されないが参考値として含めた。また表中の L^* は 125 Hz オクターブバンドから 4 kHz オクターブバンド間のオーバーオール値である（以下同様）。図 2 には音響パワーのオーバーオール値の分布を示す。

(1) 音響パワー計測値の特徴 表 4 には幾つの特徴が見られる。3 機種に共通して 500 および 1 kHz オクターブバンドの値が大きく、低周波数域および高周波数域で値が小さくなる“かまぼこ型”の周波数特性となっている。但し、この“かまぼこ型”特性は DG-A で最も顕著で、DG-B、DG-C の順で特性が減少している。DG-C でオーバーオール値が最大値の差に比較して大きくなるのはこの周波数特性に起因している。

DG-A と DG-B は機関回転数、計測環境、負荷に差があるにも拘らず（表 2）、オーバーオール値は殆ど同じである。但し、周波数特性は DG-B の方が平坦である。

左右面、上面、前後面の順に音響パワーが小さくなり、何れも左面が最大、後面が最小となっている。これは各面の面積を考えれば当然のことで、また発電機側の後面の値が小さいのも当然である。

計測した 3 事例だけでは明確な結論を導くことはできず、観測されたデータも、機種や計測環境の差から偶然生じた結果であることも考えられる。しかし、以下のような推測は可能であり、今後の追加検証の過程で妥当性を検討する必要がある。

- ・音響インテンシティ計測により環境に左右されることなく音響パワーを評価することが可能である。
- ・音響パワーに対する負荷および回転数の影響は

図 2 音響パワー計測値の分布（オーバーオール）

本稿のデータからは明確でない。但し、DG-B と DG-C の比較から出力とは正の相関関係にあることが予測され、従って DG-A と DG-B の比較とも併せて回転数とは負の相関関係にあることが予想される。

- ・出力が増加するとバンド単位のパワーの最大値に大きな変化がないが、低域および高域の周波数領域で値が大きくなり、その結果オーバーオール値が大きくなる。

(2) 実績値との比較 式(6)に示す、ディーゼル発電装置の音響パワーの推定に関する松原の式¹⁾を用いて求めた実績値と計測値の比較を表 5 および図 3 に示した。式(6)で PWL がオーバーオール値を、 PWL' が各バンド毎の値である。式(6)の実績値を求めるには実際の出力 PS が必要となる。表 2 に示したように DG-A は 40 %、DG-B および DG-C は 75 % の負荷で運転を行った。運転時の実際の出力を求めるには種々のデータが必要となる。ここでは便宜的に定格出力に負荷の率を乗じた値を用いた。

$$PWL = 60 + 10 \log(3.2 \times PS \times rpm)$$

$$PWL' = PWL + 10 \log(Fcv) \quad \dots\dots(6)$$

PS : 実際の出力 (PS)

rpm : 定格回転数 (rpm)

Fcv : 各周波数バンド変換値 (表 6)

表 5 によれば、3 機種とも大分部のバンドで実績値の方が大きく、その差は L^* の値で 3.5～5.6 dB となっている。この原因としては、計測方法の違いや発電装置の低騒音化等が考えられるが、詳細は未検討である。但し、DG-A では全周波数領域で実績値の方が大きいのに対して、DG-C では低域および高域の領域で差が減少し一部大小関係が逆転している。この傾向は DG-B の高周波数領域でも見られ

図 3 計測値と実績値の比較

表 5 音響パワーの計測値と実績値の比較

		単位: dB (基準値 10 ⁻¹² W)									
		オクターブバンド中心周波数 (Hz)								オーバーオール	
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	平坦
DG-A	計測値	100.2	99.1	103.5	106.7	110.1	108.4	102.6	95.0	92.0	114.5
	実績値	107.4	105.4	106.8	110.2	113.4	112.0	107.4	99.9	96.2	118.4
	差	7.2	6.3	3.3	3.5	3.3	3.6	4.8	4.9	4.2	3.9
DG-B	計測値	103.8	101.5	104.8	105.4	108.9	107.7	105.1	100.9	100.7	114.6
	実績値	109.2	107.1	108.6	111.9	115.2	113.8	109.2	101.6	97.9	120.2
	差	5.4	5.6	3.8	6.5	6.3	6.1	4.1	0.7	-2.8	5.6
DG-C	計測値	113.2	107.8	107.7	106.1	109.9	110.6	106.3	103.3	105.5	118.1
	実績値	110.9	108.9	110.4	113.7	117.0	115.5	110.9	103.4	99.7	121.9
	差	-2.3	1.1	2.7	7.6	7.1	4.9	4.6	0.1	-5.7	3.8

1) L* は 125Hz から 4kHz までの間のオーバーオール値 (平坦) を示す。

表 7 音響パワーの計測値と ISO 計測案の比較

		単位: dB (基準値 10 ⁻¹² W)			
		計測値	ISO 案 (10m) ³	松原の式に (15m) ³ による実績値	
DG-A	A 特性	111.9	112.8	114.5	—
	平坦	114.5	115.6	117.3	118.4
	L*	114.2	—	—	117.7
DG-B	A 特性	112.0	112.1	114.1	—
	平坦	114.6	114.3	116.3	120.2
	L*	113.9	—	—	119.5
DG-C	A 特性	113.9	113.4	116.2	—
	平坦	118.1	116.2	119.0	121.9
	L*	115.8	—	—	121.3

表 6 式(6)の Fcv の値

単位: ×10 ⁻²									
オクターブバンド中心周波数 (Hz)									
31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
8.0	5.0	7.0	15	32	23	8.0	1.4	0.6	

る。低周波数領域では計測精度の悪化が原因と考えられるが、高周波数領域に関しては新たなデータを待つ必要がある。

DG-A では低周波域を除けば各バンドで実績値と計測値との差が一定しているのに対して、DG-B および DG-C ではばらつきがあり且つ差も大きい。これは実績値を求めるための式(6)が実船の機関室での計測データに基づいていると考えれば解釈可能である。音響インテンシティを用いれば環境に左右されずに音響パワーの評価が可能なのは、機関室では据え付け部を通して船体構造に伝播した振動で床から発生する音が存在し、空気音のエネルギーが異なっているためと思われる。工場試験時に計測した DG-B および DG-C では、L* での差は殆ど同じで、各バンドの差も似た傾向を示している。

(3) ISO の音源計測案との比較 ISO で検討されている発電装置の音源計測案との比較を行った⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。ISO 案では A 特性の音源パワーは式(7)の L_{WA} で求められる。

$$L_{WA} = \bar{L}_{PA} + L_s \quad \dots\dots(7)$$

$$\bar{L}_{PA} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{PAi}} \right) - K_{2A}$$

L_{PAi}: 計測点 i での A 特性音圧レベル
K_{2A}: 環境に関する補正
n: 計測点の総数

$$L_s = 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right)$$

S: 計測面の面積 (単位: m²)
S₀: 1 m²

式(7)の環境補正項 K_{2A} は次の式(8)で求める。

$$K_{2A} = 10 \log \left(1 + \frac{4}{A/S} \right) \quad \dots\dots(8)$$

S: 計測面の面積 (単位: m²)

式(8)中の A は残響時間の計測を行っている場合は式(9)で、行っていない場合は(10)で求める。

$$A = 0.16(V/T) \quad \dots\dots(9)$$

V: 計測区画の容積 (単位: m³)

T: 残響時間 (単位: 秒)

$$A = \alpha \times S_v \quad \dots\dots(10)$$

α: 計測区画の周囲の壁の平均吸音率
S_v: 計測区画の周囲の壁の表面積 (単位: m²)

これらの式は A 特性に関する音響パワーを求めるものであるが、同様の手順で平坦な場合に関しても計算した結果を松原の式で求めた結果と共に表 7 に示す。但し、次の条件の下に計算した。

- ・計測点の数および位置は発電装置の大きさに従って、DG-A では ISO 案の点数が 15 の場合、DG-B では ISO 案の点数が 12 の場合、DG-C では ISO 案の点数が 19 の場合を用いた。但し、計測位置は完全に ISO 案には一致していない。近傍の計測点のデータを用いたが、分布が滑らかなので計算上大きな差はないと思われる。
- ・DG-A では残響時間の計測を行っていないので式(10)を用いて A を求めた。α に関しては ISO 3746 を参考にして 0.2 とした。
- ・DG-B および DG-C に関しては表 11 に示した残響時間の平均値を用いて式(9)から A を求めた。

- ・計測区画の大きさは正確に把握するのは困難なので10m×10m×10m および15m×15m×15mのケースを仮定した。

表7によればISO案の場合の10mの区画を仮定したA特性の値と計測値の類似度が高いことが判る。

(4) 計測時のメッシュの大きさ 計測時に設定したメッシュの大きさの妥当性を検討するため、複数のメッシュからなるグループを考え、その要素の一つのメッシュのインテンシティ計測値を代表点としてそのグループの音響パワーを求めてみた。表8

表8 点数削減による音響パワーの試算 (DG-A)

削減率 ¹⁾ (%)	試算 数	オクターブバンド中心周波数 (Hz)										オーバーオール		
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	A特性	平均	L [*] 2)	L [*] 3)
100	—	100.2	99.1	103.5	108.7	110.1	108.4	102.6	95.0	92.0	111.9	114.5	114.2	
50.0	4	~1.5	~0.3	~0.3	~0.4	~0.3	~0.1	0.0	0.0	~0.1	~0.1	0.0	0.0	
		~1.7	~0.2	~0.3	~0.4	~0.2	~0.1	~0.1	~0.1	~0.2	~0.0	~0.1	~0.1	0.0
26.2	4	~4.3	~0.3	~0.3	~0.4	~0.2	~0.1	0.0	0.0	~0.1	~0.1	~0.2	~0.1	~0.1
		~2.7	~0.2	~0.5	~0.5	~0.4	~0.2	~0.1	~0.1	~0.2	~0.0	~0.1	~0.1	~0.1
19.1	6	~6.2	~2.2	~0.9	~0.8	~0.5	~0.3	~0.3	~0.2	~0.4	~0.3	~0.3	~0.2	~0.2
		~2.5	~1.1	~1.0	~0.6	~0.9	~0.4	~0.4	~0.2	~0.3	~0.2	~0.3	~0.3	~0.3
17.4	6	~8.2	~0.8	~0.4	~0.4	~0.5	~0.1	~0.1	~0.2	~0.3	~0.2	~0.3	~0.1	~0.1
		~3.7	~0.5	~0.6	~0.4	~0.4	~0.4	~0.1	~0.2	~0.3	~0.1	~0.3	~0.1	~0.1
12.8	9	~5.8	~2.9	~1.1	~0.7	~0.3	~0.4	~0.4	~0.2	~0.4	~0.3	~0.5	~0.3	~0.3
		~1.8	~1.1	~1.1	~0.7	~0.3	~0.7	~0.4	~1.0	~0.4	~0.3	~0.4	~0.3	~0.3
8.9	6	~11.3	~3.0	~1.5	~0.6	~0.8	~0.8	~0.4	~0.2	~0.7	~0.5	~0.6	~0.4	~0.4
		~2.2	~0.8	~0.7	~1.0	~0.0	~0.5	~0.4	~0.4	~0.5	~0.1	~0.0	~0.1	~0.1
6.4	5	~15.9	~2.3	~1.1	~0.6	~0.7	~0.2	~0.2	~0.5	~1.5	~0.3	~0.5	~0.4	~0.4
		~1.1	~0.3	~0.3	~0.3	~0.4	~0.4	~0.7	~0.9	~1.6	~0.4	~0.3	~0.4	~0.4

¹⁾「削減率」が100の行の値は計測データ全てを用いて求めた値である。他の行の値は100の行の値との差である。

²⁾「削減率」は、試算に用いた計測点数を全体の計測点数で除した割合である。

³⁾ L^{*} は125Hzから4k Hzまでの間のオーバーオール値 (平均) を示す。

図4 店数削減による音響パワー試算の比較

図5 リアクティビティ (上面)

図6 リアクティビティ (左側面)

図7 リアクティビティ (右側面)

図8 リアクティビティ (前面)

図9 リアクティビティ (後面)

にDG-Aに関する結果を示す。表中の「削減率」は、計算に使用した代表点のメッシュの総数と全メッシュの割合である。例えば、2つのメッシュをまとめてどちらか一つの計測値を用いて音響パワーを求めた場合、削減率は50%となる。次に「試算数」は、メッシュグループの代表点の選び方が一般には複数あるので、何通りの試算を行ったかを示す。例えば削減率が50%では、2つのメッシュをまとめるので左右のどちらを代表点に用いるかという選択と、上下のどちらを代表点とするかの選択の合計4通りの試算を行った。表中で、削減率が100%の一番上の行は省略をしない場合の音響パワーの値、以下の行は複数の試算を行った場合の差の範囲を示している。図4には、DG-A、DG-BおよびDG-Cの試算値の比較を示した。

表8および図4から計測値の信頼性が保証されない31.5および63Hzバンドの低周波数域(2.2)では差が大きいものの、それ以外では差が少なく代表点の数を減らしても差が大きくなる。L^{*}の値では、差が最も大きい削減率が6.4%の場合で±0.4 dB以内である。また同じL^{*}の値が、DG-Bの場合削減率が52.2~4.0%の範囲の差で-0.5~0.9 dB、

DG-C の場合削減率が 55.5～3.6 % の範囲で差が 0.3～1.4 dB である。従って計測の目的が音響パワーの評価だけならば、計測点数の大幅な削減が可能である。

(5) リアクティビティ リアクティビティ (reactivity) とは音場の状態を示す量で、インテンシティの計測値と音圧の差で求められ、一般にマイナスとなる。リアクティビティの絶対値が大きいほど音場に定在波の成分が多くなり、低周波域の計測精度が低下する。表 9 に各計測点でのリアクティビティを計測面毎に平均化した値を示す。また表 10 に 2 点の音圧計測点の間隔 Δr が 12mm の場合のリアクティビティ、計測系の位相誤差、計測精度 1 dB の限界周波数の関係を示す。またこれらの表の内容を各計測面毎に図 5～9 に示した。図中の右下がりの 3 本の直線は表 10 の下限の周波数を示しており、チャンネル間の位相差に応じて直線の左側で計測誤差が 1 dB 以内に収まる保証がないことを示す。

DG-A では全周波数域でリアクティビティが大きい。これは計測を機関室内で行った影響と思われる。

表 9 リアクティビティ (インテンシティレベル - 音圧レベル)

		オクターブバンド中心周波数 (Hz)										オーバーオール		
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	A特性	平均	L ⁽¹⁾	
DG-A	上面	-5.77	-6.46	-5.88	-3.98	-5.14	-5.02	-5.20	-4.98	-5.10	-4.77	-4.68	-4.50	
	前面	-9.84	-9.88	-10.38	-6.78	-5.10	-5.17	-4.97	-4.86	-6.02	-5.04	-5.81	-5.50	
	後面	-11.19	-11.32	-6.94	-4.31	-5.23	-4.55	-5.08	-4.80	-4.88	-4.74	-5.46	-4.89	
	左側面	-5.91	-6.94	-4.76	-5.35	-5.35	-4.99	-5.25	-4.60	-4.94	-4.97	-4.94	-4.81	
	右側面	-8.29	-12.30	-13.07	-8.18	-7.54	-7.47	-6.47	-6.21	-6.13	-7.21	-8.77	-8.15	
DG-B	上面	-3.29	-3.20	-2.42	-3.23	-3.40	-3.41	-3.91	-3.99	-4.65	-3.28	-3.16	-3.25	
	前面	0.56	-6.73	-3.49	-4.33	-3.04	-4.28	-4.51	-5.48	-6.30	-4.06	-3.76	-3.76	
	後面	2.42	-1.81	-1.96	-2.65	-3.44	-3.70	-4.15	-4.82	-5.26	-3.48	-2.00	-2.92	
	左側面	-2.57	-4.18	-3.34	-3.97	-4.05	-4.55	-5.08	-5.15	-6.19	-4.28	-4.00	-3.93	
	右側面	-1.20	-2.72	-3.60	-3.36	-3.87	-4.05	-4.44	-4.63	-4.88	-3.86	-3.15	-3.61	
DG-C	上面	-3.87	-6.69	-6.27	-4.68	-4.10	-4.63	-6.88	-7.02	-6.87	-4.82	-6.19	-4.98	
	前面	0.37	-5.05	-3.35	-3.34	-3.95	-4.77	-4.64	-5.99	-6.78	-4.37	-4.07	-4.04	
	後面	-2.29	-2.04	-3.20	-2.59	-3.59	-3.72	-4.25	-4.37	-4.69	-3.60	-2.88	-3.31	
	左側面	-1.79	-3.30	-3.61	-3.72	-3.70	-3.96	-4.13	-5.00	-6.72	-3.77	-3.16	-3.63	
	右側面	-1.95	-4.63	-5.10	-4.89	-4.36	-4.76	-5.16	-6.00	-6.18	-4.66	-4.01	-4.53	

前面：機関側、後面：発電機側

1) L は 125Hz から 4kHz までのオーバーオール値 (平均) を示す。

表10 精度 1dB 以内となる下限周波数 (マイクロフォン間隔 12mm)

リアクティビティ指標 (dB)	計測系のチャンネル間位相差		
	0.1°	0.2°	0.3°
0	40	80	125
-3	80	160	250
-6	160	320	500
-10	400	800	1.25k

単位: Hz

れ、特に低周波数領域で大きいことから低周波数の計測値は誤差を含んでいる可能性が大きい。500 Hz バンド以上では、右側面で値が僅かに大きいものの他は -6 dB 以内なので精度上は問題ない。右側面との前面の値が大きいのは機関室の壁が近かった影響を受けていると考えられる。また、低域での値が大きいのは発電装置の据え付け部分から船体構造に伝播した振動の影響と思われるが (3.1(2)), 未検討である。

DG-B では高周波域を除いてリアクティビティは -4 dB 以内で、特に低域では小さいので計測精度は良いと見なせる。DG-C では上面と右側面のリアクティビティが DG-B に比べて大きい。右側面は隣接した試験台に別の発電装置が組まれていたためと思われるが、上面に関しては不明である。

これらの結果から計測環境としては船内より製造工場の方が条件が良いといえる。

(6) 残響時間 DG-B と DG-C に関しては、音場の特徴を把握するために従来から用いられている残響時間の計測を行った。計測方法は、競技用のスターターピストルを音源として、ディーゼル発電装置の四隅で外向きに衝撃音を発生させて 2 回計測した。表 11 に、 T_{60} (60 dB 減衰時間) を示す。「計測位置」に例えば「前面、右側面」とあるのは、前面と右側面の交わる角で計測したことを示す。分析器で T_{30} (30 dB 減衰時間) を求めて T_{60} に換算した。リアクティビティと残響時間の傾向を比較するため、A 特性のオーバーオール値に関して図 10 に DG-B、図 11 に DG-C の結果を示す。

表 9 と表 11 を比較すると、DG-B と DG-C に関して傾向が一致していることがわかる。即ち、DG-C の方がリアクティビティが大きく、また残響時間も長い。また、図 10 および図 11 から、左右面お

表11 残響時間 (T_{60})

計測位置 (角)	No.	オクターブバンド中心周波数 (Hz)						オーバーオール	
		250	500	1k	2k	4k	8k	A特性	平均
DG-B	前面、右側面	1	1.31	0.961	0.985	1.10	1.03	0.749	1.06
	右側面	2	1.29	—	0.989	1.09	1.02	0.733	1.02
	後面、左側面	1	—	—	0.891	1.12	0.977	0.734	1.02
	左側面	2	—	—	0.912	1.11	1.03	0.797	1.06
DG-C	後面、左側面	1	1.21	0.729	0.692	0.891	0.888	0.628	0.844
	左側面	2	—	0.877	0.705	0.978	0.866	0.623	0.842
	後面、右側面	1	0.883	0.750	0.728	0.858	0.791	0.586	0.788
	右側面	2	0.885	—	0.800	0.904	0.771	0.624	0.816
DG-D	前面、右側面	1	—	—	1.93	1.62	1.25	0.743	1.53
	右側面	2	—	—	1.96	1.61	1.23	0.738	1.48
	後面、左側面	1	—	—	1.90	1.48	1.16	0.716	1.39
	左側面	2	1.15	—	1.93	1.47	1.17	0.719	1.38
DG-E	後面、左側面	1	—	—	1.19	1.52	1.22	0.893	1.50
	左側面	2	1.53	1.21	1.51	1.25	0.938	0.660	1.16
	後面、右側面	1	1.60	1.39	1.68	1.29	1.03	0.623	1.17
	右側面	2	—	—	1.62	1.31	1.04	0.588	1.22

前面：機関側、後面：発電機側

図10 リアクティビティと残響時間
 T_{60} の比較 (DG-B の場合)

図11 リアクティビティと残響時間
 T_{60} の比較 (DG-C の場合)

図12 インテンシティ分布
(DG-A, 左側面, L^*)

図13 インテンシティ分布
(DG-B, 左側面, L^*)

図14 インテンシティ分布
(DG-C, 左側面, L^*)

よび前後面の比較でリアクティビティと残響時間の傾向が一致している。各オクターブバンドでの比較では、DG-B では前後面の傾向が一致するケースが13に対して反するケースが1、左右面では傾向が一致するケースが10に対して反するケースが3となる。またDG-Cでは前後面の傾向が一致するケースが13に対して反するケースが1、左右面では傾向が一致するケースが13に対して反するケースが1となる。これらの結果からリアクティビティと残響時間には、予想されたことではあるが、関連性があることが示された。但し、定量的な関係を導けるかどうかを判断するには、新たなデータを加えて詳細な検討を行う必要がある。

3.2 インテンシティの分析 音源探査、即ちディーゼル発電装置のどの部位からどの程度の騒音が発生しているかを把握するには、インテンシティの分布を分析することが必要となる。しかし、2.4でも触れたように、効率的に音響パワーを評価するために、本計測では far field で行った。従って、音源探査を行うのに適したデータかどうかは不明で、ここでは全体の傾向をつかむための参考データとして触れる。

図12にDG-Aの左側面の L^* の分布、図13にDG-Bの左側面の L^* の分布、および図14に示したDG-Cの左側面の L^* の分布を示す。これらの図から機関側が主要音源であることが判る。3機種分布を比較すると、DG-Aでは他に比較して位置から

エネルギーが放出されていることが判る。他の面でも同じ傾向を示していて、据え付け部分を通して伝播した固体音(3.1(2))の影響を示すものと解釈することもできる。また左側面以外の計測面を含めて分布の乱れが少なく、「計測点数を減少しても音響パワーの評価の精度はそれほど悪化しない」という3.1(4)での検討結果を裏付けている。

4. ま と め

ディーゼル発電装置の音響パワーを音響インテンシティ法を用いて計測した3例の結果から以下の知見が得られた。

- ・3例の音響インテンシティ計測結果から求めた音響パワーには、周波数特性を含めて極端な差はない。従って、用いた計測方法に関する妥当性は実証されたと言える。但し、音響パワーの計測値の妥当性を判断するためには新たな試行が必要であろう。
- ・本稿で求めた音響パワーは経験式から求めた実績値に比較して、機関室内で計測した1例で3.5 dB (100～5 kHzのオクターブバンド間での平均値)、工場試運転時に計測した2例で各々5.6, 5.5 dB (同) 小さい。また機関室の場合は、実績値と似た周波数特性を示している。
- ・LSOの発電機の音源パワー計測案に従って求めた値は計測値との差が少ない。但し、補正量

の算出には注意する必要がある。

- ・計測目的を音響パワーの評価に限定すると、far field 領域に計測面を設定すれば、計測点の間隔を本稿で用いた 300~400 mm の 10 倍程度のままで広げても誤差は 1 dB 程度に収まる。これはインテンシティの分布が滑らかであることによる。
- ・リアクティヴィティの結果から、実船の機関室は残響が大きく低周波数領域で計測誤差が大きいと思われる。従って、工場運転時での計測の方が精度上は望ましいが、据え付け部分から伝播する振動による床から放射される空気音が存在するならば、得られた結果の実用性も勘案して十分検討する必要がある。

以上のように音響インテンシティを利用した音響パワーの評価を試みてその可能性を示すことが出来たが、次のような課題がある。

- ・得られた音響パワーの検証が必要である。しかし、正確な音響パワーは知ることが出来ないため間接的な方法に頼らざるを得ない。例えば、同一計測環境の状態で音響エネルギーが既知の基準音源を対象とした計測を実施する方法などが考えられる。
- ・計測方法の妥当性を検討する必要がある。例えば、低周波数領域での計測精度を検討するため、2 点の音圧計測点間隔を本稿での 12mm より大きくして計測を行う必要がある。また、計測点の位置のズレに対する誤差を検討する必要がある。
- ・同一対象を異なった環境、例えば製造工場と機関室で計測し結果を比較する事で、環境の差による計測結果の誤差が評価できる。特に、実船の機関室の場合に発電装置の据え付け部分を伝播した振動により床から放射される音の影響を評価する必要がある。更に、音響パワーの検証に対しても参考データとなる。
- ・音響パワーに関連する種々のパラメーター（回転数、負荷など）の影響を把握する必要がある。
- ・詳細な音源探査を行うためには、環境に応じて計測方法を検討する必要がある。それには基礎的なモデルによる検討が必要である。

SEA 法による騒音予測手法をシステムとして完全なものにするためには、種々の音源に関して空気

音のみならず固体音のエネルギー伝播状態を把握する必要がある。音響インテンシティによる音源パワー計測を種々の機器に対して実施すると共に、固体音のエネルギー評価に関しても振動インテンシティの適用の可能性を検討してゆきたい。

最後に計測を実施するに当たり多大な御協力をいただいた、宇佐美宣章氏を始めとする波止浜造船株式会社、楊村道広氏を始めとするヤンマーディーゼル株式会社、および吉井冬樹氏を始めとするダイハツディーゼル株式会社の関係各位に謝意を表します。また、計測作業に当たり日本海事協会技術研究所の佐々木千一氏他数名の助力を得た。

参考文献

- 1) 日本海事協会, 船舶騒音防止指針, (1982)
- 2) 田代他, 日本造船学会論文集, 150, (1981), p.449.
- 3) Gade, S. . Br el&Kjær Technical Review No.3-1982. p.3.
- 4) Gade, S. . Br el&Kjær Technical Review No.4-1982. p.3.
- 5) ISO/TC 70/SC 2 N 327, "Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets-Part 10: Measurement of airborne noise-Enveloping surface method"
- 6) ISO 3744," Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources-Engineering methods for free-field conditions over a reflecting plane" .1981.
- 7) ISO 3745," Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources-Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms" ,1977.
- 8) ISO 3745,"Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources-Survey method,1979.

〔質 疑 応 答〕

質問者 日立造船㈱ 池松安廣

〔質問〕 松原の式の導入にあたって、そのベースとなるデータの対象の機関回転数はどれくらいの幅（種類）にあるか。（どんな回転数のエンジンのデータをもとに導入された式か）。

ディーゼルエンジン出力は回転数の約 3 乗に比例するため、一般にディーゼルエンジンの発生する音響パワーは回転数の 3 乗に近いものと思われるが、松原の式では異なる表現となっている。

一般に船用 D/G は 720~900rpm のものが多く、

付表1 計測体操機種の回転数
および馬力の比

	回転数 (rpm)	馬力 (PS)	負荷 (%)	比		
				(回転数) ^{2~3}	負荷	全体
DG-A	900	600	40	1.56~1.95	0.53	0.83~1.04
DG-B	720	600	75	1	1	1
DG-C	720	900	75	1	1.5	1.5

付表2 計測値および実績値の比較

	計測値			松原の式	
	A-Weighted	Linear	L*	Linear	L*
DG-A	0.98	0.98	1.07	0.66	0.66
DG-B	1	1	1	1	1
DG-C	1.55	2.24	1.55	1.48	1.51

この範囲であれば、ディーゼルエンジンPWL（出力）～rpmの一般関係式のごく特殊域にあり、その限定付で松原の式の妥当性があるとも理解される。

この点から、松原の式導入の対象エンジンの回転数（D/Gとしての定格回転数）種類を質問するものです。

〔回答〕 松原の式がどのようなデータをもとにして導かれたのかは筆者らは把握していません。また、「出力馬力が回転数の3乗に比例する」ことは、

一般に発電機駆動用のディーゼル機関は一定回転で運転しているため異なる機種の間で比較する場合に適用することになり、同時に馬力の差も考慮する必要がありますと考えられます。松原の式に回転数のパラメーターとともに馬力のパラメーターも含まれているのはそれを表現するためと思われます。なお、ダイハツディーゼル株式会社の吉井冬樹氏からも「音響パワーは回転数の2～3乗に比例し、かつ出力に比例するのではないか」とのコメントがありました。本稿の表2から回転数および出力の比を求めると、付表1のようになります。また、本稿の表4の計測結果および表7の松原の式による値をDG-Bを基準として比較すると、付表2のようになります。従って、計測値にはご指摘のような傾向が見られますが、計測例が少ないため最終的な判断はできません。一方、松原の式による値ではDG-BとDG-Cの関係は同じ傾向を示していますが、DG-Aに関しては異なっています。これは本稿の3.1(2)で触れたように松原の式が実船の機関室でのデータをもとにしているとすれば説明できます。以上の点も含めて今後機会がある毎に計測を実施して検討を加えてゆきたいと思います。