船体動揺と海底 echo 音圧の変動—I

柴田恵司*・西ノ首英之*・天下井清**

Vibration of Echo Amplitude from Sea-Bed due to Ship's Motion—I

K. Shibata*, H. Nishinokubi* and K. Amagai**

Abstract

On an echo survey under streaming, the echo amplitude from sea-bed showed some variations. HASLETT [1] reported that the observed variation of echo amplitude may be attributed, mainly, to:

- (a) the geometric effects of the beam patterns, due to rolling and pitching,
- (b) the variation in coupling between the transducers and the water, and,
- (c) variations in the reflectivity of sea bed.

It is interesting to note the variation of echo amplitude from seabed due to ship's motion. Some field observations for this study were made with an echo-sounder operating at a frequency of 200 kHz on board the bull trawler, Tokai-Mar, No. 1, on a steady course of beam wind at a speed of 4 m per min near the Socotra Rock in the East Sea in October 20th 1968. The sea-bed was very flat and consisted, mainly, of fine sand. Recording of the echo, pitching angle of the trawler and also rolling angle were made on a magnetic tape recorder (TEAC, R-200). Individual echoes and angles of pitching and rolling corresponding in time to the respective echo were later analyzed for 700 series of the data in the laboratory.

We found on the results that there were hardly direct relation between the echo amplitude and ship's motions but also with some relationship on the phase consideration.

緒 言

音響測深を行ないながら航走する場合、平坦な海底からの超音波 echo 音圧は、特に荒天において著しい変動を示す。HASLETT [1] は連続した海底 echo の振幅の分布から、1) ビームパターンの効果の船体縦横動揺（最大横揺れ角 $\pm(10^\circ \pm 2^\circ)$ 、最大縦揺れ角 $\pm(5^\circ \pm 1^\circ)$ ）による変動に起因することが大きく又、2) 送受波器と海水との境界条件の変動にも影響されると結論している。

これらの点を以西底曳漁船について明らかにするため、1968年10月中旬、大洋漁業株式会社長崎支社所属の第一東海丸（197.1 GT）に乗船し、東支那海スコトラロック附近漁場において、8

* 長崎大学水産学部（長崎市文教町 1-14）

** 北海道大学水産学部（函館市港町 3 丁目 1-1）

ノットで航走中 200kHz 音響測深機による 海底 echo 音圧と船体動揺角の連続同時記録を行ない、この間における連続した 700 回の海底 echo 振幅とこれに時間的に対応する船体動揺角との関係について解析を行ない二、三の知見を得た

1. 測定の方法

本測定において、200 kHz 音響測深機 (NTL-750) の受波信号は 800 Hz に変調され、船体動揺角発信器 (TRB-8B) からの信号と同時に磁気記録機 (R-200) に記録され、研究室において解析を行なった。

測定中の諸条件は次の通りである。

- 1) 第一東海丸, GT: 197.1 トン, L: 32.2m
B: 7.0m, D: 3.35m, d_m : 2.85m
- 2) 海況その他, 右舷正横から風力 5、船速約 8 ノット, 水深: 40m
- 3) 音響測深機, 周波数: 200kHz, 発射回数: 毎秒 8 回

海底 echo の信号振幅は 110 m volt~180 m volt と測定されたが、本解析においては各測定値を最大値 180 m volt で除したものをそれぞれの相対音圧 (E) として取扱うこととした。

2. 船体動揺

船体動揺角の頻度分布は図 1 に示す通りであり、この図において縦軸は頻度 (%) を示し、横軸に振幅を示す。なお横揺れ角の場合は左舷傾斜を (-)、右舷傾斜を (+) とし、又縦揺れ角の場合は船首上昇時を (+)、船首下降時を (-) として表示した。船体動揺のパワースペクトラムを図 2 に示す。この図から本実験中における横波を受けて航走中の本船の動揺周期は横揺れで 7.5 秒、縦揺れで 12.9 秒であることがわかる。船体運動解析に用いた資料は記録から、読取り時間間隔 5 秒で読取った 600 個の資料である。

図 1 船体動揺角の度数分布

図 2 船体動揺角のパワースペクトラ

3. 考 察

測定を行なった海底は深度 40m の平坦な海底であり、海中における超音波の伝播時間は 5.3m sec であり、船体動揺の周期に較べ著しく小さいから、超音波が伝播する時間内における動揺角の変動は無視出来ると考え、又海底は一樣な底質であると考えられるので、海底の反射損失の変動も無視出来ると考えた。そこで海底 echo が得られた瞬間における船体動揺角 (φ, θ) を読取り (度単位), 700組の資料, E_i, φ_i, θ_i ($i=1.2\cdots\cdots 700$) を得た。尚この範囲では縦揺れ角 φ は $0\sim -5^\circ$ (常に (-) のみ), 横揺れ角 θ は約 $\pm 10^\circ$ であつた。この資料群について各種の統計的解析を行なった。

3-1) 船体動揺角と海底 echo 音圧との関係

表1 各船体動揺角に対する海底相対音圧の分布と平均

$P_{0,1^\circ}$	E	$R_{0,1^\circ}$		$R_{2,3^\circ}$		$R_{4,5^\circ}$		$R_{6,7^\circ,8^\circ,10^\circ}$	
			%		%		%		%
	0.65	—	—	—	—	—	—	1	4.5
	0.70	—	—	—	—	1	1.6	—	—
	0.75	—	—	1	2.3	—	—	1	4.5
	0.80	3	6.8	4	9.3	2	4.9	1	4.5
	0.85	8	15.4	13	30.3	12	30.8	10	45.5
	0.90	28	53.8	17	39.5	18	46.1	7	31.8
	0.95	12	23.1	5	11.6	6	15.4	2	9.1
	1.00	1	1.9	3	7.0	—	—	—	—
		N=52		43		39		22	
		$\bar{E}=0.8750$		0.8599		0.8571		0.8341	$\bar{E}_{Pi}=0.8606$
$P_{2,3^\circ}$	0.65	1	1.0	—	—	—	—	2	2.9
	0.70	2	2.0	2	1.3	—	—	2	2.9
	0.75	1	1.0	7	4.6	4	4.2	3	4.3
	0.80	9	9.0	3	1.9	7	7.4	5	7.1
	0.85	22	22.6	31	20.3	15	15.8	13	18.6
	0.90	39	39.0	59	38.6	45	47.3	34	48.6
	0.95	20	20.0	41	26.8	21	22.2	10	14.3
	1.00	6	6.0	10	6.5	3	3.1	1	1.4
		N=100		153		95		70	
		$\bar{E}=0.8630$		0.8734		0.9676		0.8479	$\bar{E}_{Pi}=0.8653$
$P_{4,5^\circ}$	0.65	—	—	—	3.6	—	—	—	—
	0.70	1	2.1	1	3.6	—	—	—	—
	0.75	4	8.3	2	7.2	—	—	2	8.7
	0.80	1	2.1	2	7.2	3	11.1	1	4.3
	0.85	7	14.6	4	14.3	6	22.2	7	30.5
	0.90	22	45.3	12	42.9	9	33.4	8	34.2
	0.95	11	22.9	6	21.4	7	25.9	5	21.2
	1.00	2	4.2	—	—	2	7.4	—	—
		N=48		28		27		23	
		$\bar{E}=0.8646$		0.8646		0.8731		0.8533	$\bar{E}_{Pi}=0.8600$
		$\bar{E}_{Ri}=0.8665$		0.8672		0.8660		0.8463	$\bar{E}_{PR}=0.8633$

700 個の資料を 12 の動揺角度の組合せ即ち $(\theta_i=0^\circ\sim 1^\circ, \varphi_i=0^\circ\sim 1^\circ)$, $(\theta_i=0^\circ\sim 1^\circ, \varphi_i=2^\circ\sim 3^\circ)$, $(\theta_i=0^\circ\sim 1^\circ, \varphi_i=4^\circ\sim 5^\circ)$, $(\theta_i=2^\circ\sim 3^\circ, \varphi_i=0^\circ\sim 1^\circ)$, $(\theta_i=2^\circ\sim 3^\circ, \varphi_i=2^\circ\sim 3^\circ)$, ...
 …… , $(\theta_i=6^\circ\text{以上}, \varphi_i=4^\circ\sim 5^\circ)$ について, それぞれに対応する相対音圧 E_i を区分し, それぞれの群毎の出現頻度分布を求め表 1 に示す。この表で P_i は縦揺れ角, R_j は横揺れ角, E は海底 echo 相対音圧, $\bar{E}_{Pi}$ は P_i における E の平均, $\bar{E}_{Rj}$ は R_j における E の平均, $\bar{E}_{PR}$ は E の全平均である。この表から各群毎の海底 echo 相対音圧の平均値は動揺角との間に有意的な関係は認められなかつた。

尚, この階級別区分に先立つて横揺れの右および左揺れ角について相対音圧の平均 $\bar{E}$ を求めたが両者共 0.8500 と正しく一致したので, 動揺角階級別区分に際して, 横揺れ角は絶対値を用い又縦揺れ角は常に負 (船首が常に上がる) であつたからこれも絶対値を用いた。

一方船体動揺に従う超音波主軸の偏りを鉛直方向に対して α とすれば

$$\tan \alpha_i = \sqrt{\tan^2 \theta_i + \tan^2 \varphi_i}$$

ここで θ_i および φ_i は常に 10° より小さいから

$$\alpha_i = \sqrt{\theta_i^2 + \varphi_i^2}$$

そこで最大動揺角 $\theta_{max}=10^\circ$, $\varphi_{max}=5^\circ$ であるから, $\alpha_{max} \doteq 11.2^\circ$ となる。

平坦な海底に超音波が入射する場合, 海底 echo の最大値はビーム主軸上で得られる。又船体運動の周期に較べて, 音源と水深約 40m の海底との間を往復に要する超音波の伝播時間は著しく短いから, 1 回の海底 echo を得る間に振動子主軸は同一方向に保持されていたと近似的に考えることが出来る。すなわち, 海底 echo 強度の変化において振動子指向性を無視することが出来ると考えた。

次に超音波ビーム主軸の方向が変動すれば音源から海底までの距離が変る。すなわち, 音軸と鉛直方向との狭角を α とすれば, 深度 h なる海底までの距離 $h' = h \sec \alpha$ であり, $\alpha_{max} \doteq 11^\circ$ であつたから,

$$\left(\frac{h_{max}}{h}\right)^2 = \sec^2 \alpha_{max} = 1.038 (0.07dB)$$

と極めて小さいから, 本実験においては伝播距離の変動は海底 echo 相対音圧の変化に関して無視出来ると考えた。

一方, 測定を行なつた海域の底土の採取は行なわれなかつたので, 正確には言い得ないが, 海図によれば $f.S$, 又は SM である。今底土の比重を 1.8 と仮定すれば, 次の RAYLEIGH の式〔2〕

$$\frac{I_r}{I_i} = \left[\frac{m \sin \theta_1 - (n^2 - \cos^2 \theta)^{1/2}}{m \sin \theta_1 + (n^2 - \cos^2 \theta)^{1/2}} \right]^2$$

に, $m = \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1.8$, $n = \frac{5}{7} = 0.7142$ 〔2〕を代入して海底への grazing 角 (θ_1) が 90° および $90^\circ - 11^\circ = 79^\circ$ の場合について海底の反射損失を求めると約 $-7.3 \sim -7 dB$ となり, 船体動揺に伴う海底への入射角の変動 $0^\circ \sim 11^\circ$ の範囲では海底 echo 音圧に顕著な変化を生ずるとは考えられない。尚この点については充分な実験的裏付けに乏しいから更に実験的に検討する必要があると考える。

3-2) 時間ずれを考慮した船体動揺角と海底 echo 相対音圧との関係

前節において海底 echo 音圧と船体動揺角の関係を同一時間において考慮し, 両者の間に明らかな相関関係を認めることが出来なかつた。そこで, 船首において発生した気泡群が船の進行に伴つて実際に振動子下面を通過するまでには若干の時間を必要とすると考え海底 echo 相対音圧

図3 海底echo, 相対音圧と縦揺れ角との相対係数

E_{i+j} ($i=1, 2, 3, \dots, 700$, $j=0, 1, 2, \dots, 100$, $\Delta t=1/8$ 秒) と縦揺れ角 φ_i との相互相関関係を試算し、図3に示す。この図の縦軸は相関係数、横軸は時間ずれを示す。又上下端の線は $\alpha=0.05$ における F の値から逆算して求めた相関係数の信頼限界を示す。この図によれば、 $j=0\sim34$ ($0\sim4.25$ 秒) および $60\sim87$ ($7.5\sim11$ 秒) において負の相関、 $j=35\sim60$ ($4.725\sim7.5$ 秒) において正の相関を示すが、全体的に5%の危険率で有意性を認められる相関は $j=13$ (1.6 秒) の負相関の場合のみであった。又正相関は $j=44$ (5.5 秒) が有意性の限界にやや近い値を示した。

一方、振動子は船橋直下船首より7.5mに鉛直下方に向けて取付けてあり〔8〕、船速は約8ノットであったから、船首で生じた気泡が振動子下面を通過するまで約2秒 ($j=16$) を要するであろう。

この図において、例えば、echo 相対音圧は縦揺れ角が最大のときからそれぞれ1.6秒後に最小値が、5.5秒後に最大値が出現することを示す。言い換えると縦揺れ角が最大のときから1.6秒、および5.5秒後にそれぞれ最小値、最大値が出現することを示している。

船底を通過する気泡層の分布は船体の縦揺れ周期、波の出合い周期によって変ると考えられるからこの図から簡単に結論することは出来ないが、このような動揺角との位相関係は今後更に究明されるべき課題であろうと考える。

結 論

本計画において、資料の一部が実験計画その他に若干の不備があつたので、十分な解析を行なえなかつたが、以上解析した結果についてまとめると、

1. 本実験の範囲では HASLETT の場合と異なり海底 echo 音圧は船体動揺との間に直接的な相関は認められなかつた。
2. 船体縦揺れ角と海底 echo 音圧の間に位相差を有する相関関係がわずかに認められた。

出来るだけ近い機会において、同様な計測を行ない、以上の諸点について更に明らかにしたい。

尚、本研究に当り種々御援助を賜った大洋漁業 KK、長崎支社橋本芳房氏並びに第一東海丸乗組各位に深謝する。

引用文献

- [1] HASLETT, R. W. G. : J. Brit. Instu. of Radio Engineers, (1961) 22, p33—44.
- [2] URICK, R. J. : Principles of Underwater Sound for Engineers (Book) McGraw Hill (1967),
p. 116, p. 191, p. 244.
- [3] 内田浩一：漁船, (1968), 155, p. 94. 96.