

音響推定におけるツノナシオキアミの 遊泳姿勢に関する研究

宮下和士*・青木一郎*・稲垣 正*

Orientation of Isada Krill (*Euphausia pacifica*) in Relation to Acoustical Observation

Kazushi MIYASHITA,* Ichiro AOKI* and Tadashi INAGAKI*

Abstract

In this paper, we examined tilting behavior of isada krill (*Euphausia pacifica*) in an aquarium and obtained the results as follow.

- (1) Three swimming patterns were observed ; keeping balance in an fixed angle, lowering and raising its head slowly and repeatedly, and sharp fluctuations of pitch angle.
- (2) When the number of individuals in an aquarium increased, the contact between individuals increased and fluctuations of pitch angle became sharp.
- (3) Krill's mean pitch angles were 30.4° (total) and 36.9° (hovering).
- (4) There was a negative relationship between pitch angle and swimming speed ; $y = -5.8x + 31.5$ ($r = -0.42$, $p < 0.01$), where, x is swimming speed (cm/sec) and y is pitch angle in degree.
- (5) Difference of mean pitch angle between isada krill and Antarctic krill was suggested to be due to the difference in body form between the two species.
- (6) The reduced TS averaged for the pitch angle which were derived from the straight cylinder model (STANTON, 1988) when $L/\lambda = 1$ were -52.1dB (total) and -57.3dB (hovering).

1. はじめに

海洋に広く分布しているプランクトン、マイクロネクトンは、魚類等の餌生物として生態系の重要な部分を占めると共に、その資源変動は海洋環境変動の指標となる可能性をもつ。これらの生物の時空間分布や生態を広域かつ連続的に観測する手段として、魚群探知機などの水中音響機器を用いることの重要性が増してきている。

音響的手法を用いた小型生物の量推定およびサイズ推定に関する研究が、GREENLAW (1979) や稲垣 (1992) らによって報告されているが、対象生物が小型のため、さまざまな問題が提起されている。

小型生物の音響学的特徴として、そのサイズが測定周波数の波長に比べ小さいので、レーラー散乱や共振散乱を含むこと、および音響散乱エネルギーも小さい

こと、があげられる。さらに、これらの小型生物は、音響機器の分解能に比べて高密度に分布しているため、単体としての識別が困難であり、ターゲットストレングス (TS) の直接推定を著しく困難にしている。また、小型生物に限らず散乱体のTSは、その姿勢によって大きく変化することが知られている。従って、これらの生物量を音響的手法を用いて推定するためには、季節、時間帯、姿勢等の生態情報と共に、自然に近い状態でのTSの測定が不可欠である。

ツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* は、北太平洋の亜寒帯および移行帯水域において高い現存量を示し、魚類や鯨類の餌生物として生態系の重要な部分を担っている。本種は、毎年春先になると三陸沿岸に多く分布し、養殖用餌料や遊漁のまき餌用として漁獲されているが、魚類の資源管理や漁況予測のために、これらの生物の現存量を推定することは意義深い。

本研究は、ツノナシオキアミの遊泳行動を実験水槽で観察することにより、遊泳姿勢を解明することを目

1995年3月24日受理

* 東京大学海洋研究所 Ocean Research Institute, University of Tokyo, Nakano, Tokyo 164, Japan.

的とした。オキアミ個体の水平面に対するピッチ角は、TSに重要な影響を及ぼすものである。現在までに、KILS (1981) や ENDO (1993) が、ナンキョクオキアミのピッチ角を計測しているが、ツノナシオキアミのピッチ角計測は、ENDO (1989) が行ったのみである。本研究では、水槽内におけるツノナシオキアミのピッチ角を実際に測定し、ナンキョクオキアミの値と比較した。

2. 材料および方法

採集方法と体長組成

実験は、1994年4月12日～19日に東京大学海洋研究所大槌臨海センターで行った。実験に使用したオキアミは、曳網漁船を用いて採集した。採集場所は、大船渡沖と釜石沖で、いずれもトスロンバケツ (20L) に約300個体ずつ入れ、保存状態を良くするためにエアレーションを行った。漁船が岸壁に着いた後、直ちに実験室の蓄養水槽に移し、エアレーションも引き続き行った。水槽内の海水は水温を監視しながら頻繁に交換し、実験時の水温は、12.8℃から13.8℃の範囲にあった。

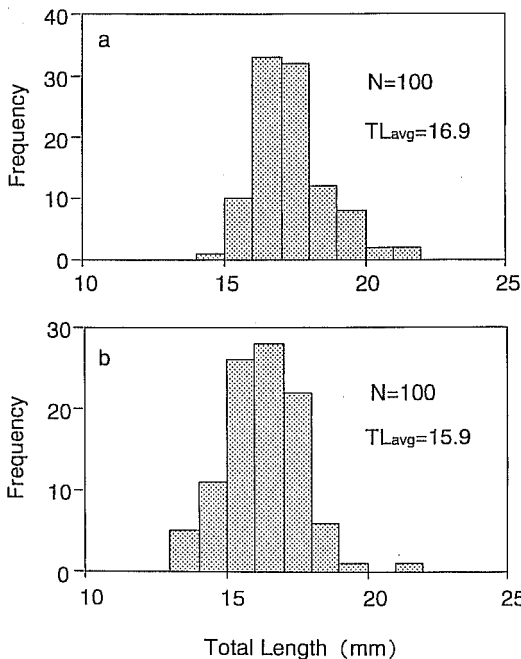


Fig. 1. Total length (TL) distribution of *Euphausia pacifica* collected off Kamaishi (a) and Ofunato (b) by the trawl net.

採集したオキアミから、海域別は無作為に100個体抽出して体長を測定した。体長として全長 (TL) を用い、額角の先端から尾の先端までの長さとした。大船渡沖でとれたオキアミは、平均体長が15.9mm、釜石沖でとれたオキアミの平均体長は16.9mmで、大きな差はなかった (Fig. 1)、実験には両者を混ぜて使用した。

測定方法

遊泳姿勢を測定するために、ビデオカメラを水槽の正面に設置した。水槽は透明アクリル水槽 (60×30×35cm) で、ビデオ撮影時、採集したオキアミを入れ、1時間ほど放置してその環境に順応させた。さらに、光ができるだけ入らないように暗幕で観測面以外を被い、水槽の上部から白熱灯 (30ワット) を照射した。また、光量子計を水槽の左側面付近に設置し光量を測定したが、測定時は $0.29 \sim 0.77 \times 10^{15}$ (quanta/sec/cm²) の光量であった。

遊泳姿勢の測定は、水槽背面中央部に描いた方形枠 (10×15cm) に入ったオキアミがその枠から出るまでの間、1秒毎にオキアミの個体の位置と姿勢を読み取った。遊泳速度が比較的速い個体 (5cm/sec以上) に関しては、0.5秒毎に測定を実施した。また、映像から個体の大きさと傾きを精密に読み取ることができるよう水槽の方形枠内に一辺5mmの方眼目盛を書き入れた。解析時は特に、横から見てオキアミの両目が重なって見える個体のみを用いた。水槽に入れるオキアミの個体数は、20, 30, 50, 70個体の4通りで実験した。実験時間は30分から1時間であった。

ピッチ角の算出および処理方法

Fig. 2のように方形枠に入ったオキアミの尾の先端を座標の原点 (0, 0) とし、第一触角の先端の座標を (a, b) とし、方眼目盛と定規を用いて a, b を測定し、次式からピッチ角 θ を算出した。

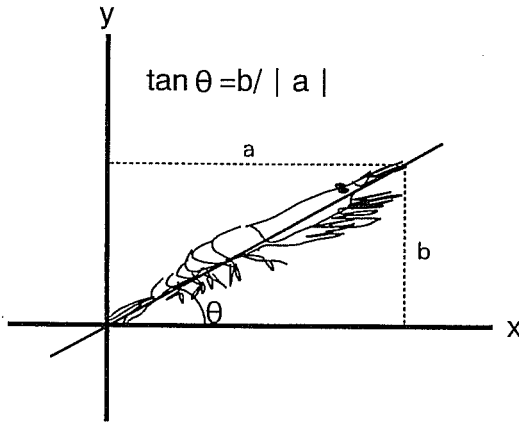
$$\tan \theta = b / |a| \quad (1)$$

ここで θ は水平方向に対するピッチ角であり、頭が上向きときに正、下向きときに負の値をとる。

求めた θ を個体別にまとめ、さらに個体別の平均 θ_{ind} を算出した。次に、1秒毎に求めた全データの一つにまとめ全体平均 θ_{avg} を求めると共に、頻度分布表を作成しその分布特性を検討した。

3. 結果

比較的長い間観察することのできた個体のピッチ角の時系列変化をプロットした (Fig. 3)。その結果、

Fig. 2. Calculation method of pitch angle (θ).

ホバリング状態における、2種類のピッチ角の変化パターンが認められた。一つは、ほぼ一定の角度で均衡を保つパターン (A)、もう一つは、頭が下がってくとまた起こすパターン (B) であり、これらはいずれも遊泳速度が小さい個体で観察された。一方、非ホバリング状態ではピッチ角の変動が大きく (C)、遊泳速度が大きかった。また、ピッチ角の変動は個体密度が高くなる程大きくなる傾向がみられた (Fig. 3)。観察で、個体同士の接触による遊泳姿勢の変動が確認されたので、これは個体間相互作用による影響であると思われる。

水槽内個体数 N_t を、20, 30, 50, 70 と増加させ、それぞれのピッチ角頻度分布を Fig. 4 に、平均ピッチ角を Table 1 に示した。個体数 N_t が 20 と 50 の場合は、平均ピッチ角 θ_{avg} が約 33° であり、 N_t が 30 と 70 の場合にはそれよりも小さく平均ピッチ角 θ_{avg} は約 23° であった。

次に、全データを統合し姿勢分布を求めた (Fig. 5)。全体の平均ピッチ角は、 $\theta_{avg} = 30.4^\circ$ となりこれは、ツノナシオキアミに関する ENDO (1989) の報告 ($\theta_{avg} = 35.5^\circ$) に近似した値を示した。また、ナンキョクオキアミに関する KILS (1981) の報告 ($\theta_{avg} = 45.3^\circ$) や、ENDO (1993) の報告 ($\theta_{avg} = 45.6^\circ$) よりも約 15° 小さかった。

次に、全体のピッチ角分布をホバリング状態と非ホバリング状態に分割した。その結果、ホバリング状態での平均ピッチ角は、 $\theta_{avg} = 36.9^\circ$ 、非ホバリング状態での平均ピッチ角は、 $\theta_{avg} = 15.0^\circ$ となった。本実験でのホバリング状態での平均ピッチ角もまた、ツノ

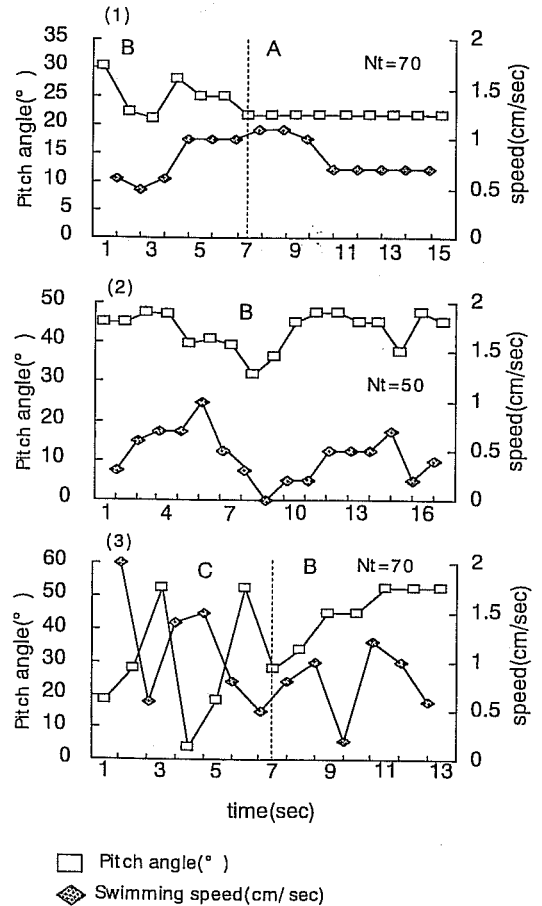


Fig. 3. Time pattern examples of pitch angle and swimming speed. Numbers of individuals in the tank (N_t) are 70 (1), 50 (2) and 70 (3). A: Keeping balance at an fixed angle, B: A krill lowers its head and raises it again, C: Sharp fluctuations of pitch angle.

ナシオキアミに関する ENDO (1989) の報告 ($\theta_{avg} = 40.7^\circ$) に近似した値を示し、KILS (1981, $\theta_{avg} = 55.0^\circ$) や ENDO (1993, $\theta_{avg} = 49.7^\circ$) のナンキョクオキアミの報告よりもそれぞれ、約 18° および約 13° 小さかった。以上のように、ツノナシオキアミのピッチ角はナンキョクオキアミに比べて小さいことが示された。

ピッチ角と遊泳速度の関係を示すために、最小 2 乗法を用いて直線回帰を行った。遊泳速度は、ピッチ角測定を行った際の連続した 2 点間の移動距離から求めた。Fig. 6 は、個体毎の平均 θ_{ind} と平均遊泳速度をプロットしたのもので、両者の相関係数は、 $r = -0.42$ となりピッチ角が遊泳速度に逆比例する傾向が認められ

た。すなわち、遊泳速度が0付近の個体は、頭を上げたホバリング状態にあり、遊泳速度が大きくなるにつれて姿勢が水平に近づくことを意味している。

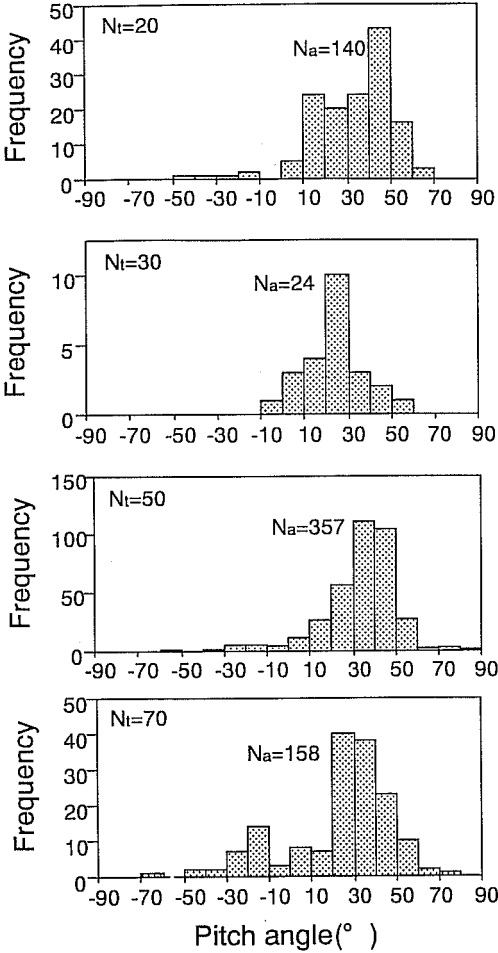


Fig. 4 Pitch angle distributions of krill at different numbers of individuals in the tank. N_t : Number of individuals in the tank, N_a : Number of measurements.

4. 考察

ピッチ角と個体密度

Fig. 4において、平均ピッチ角は $N_t=20$ と $N_t=50$ の

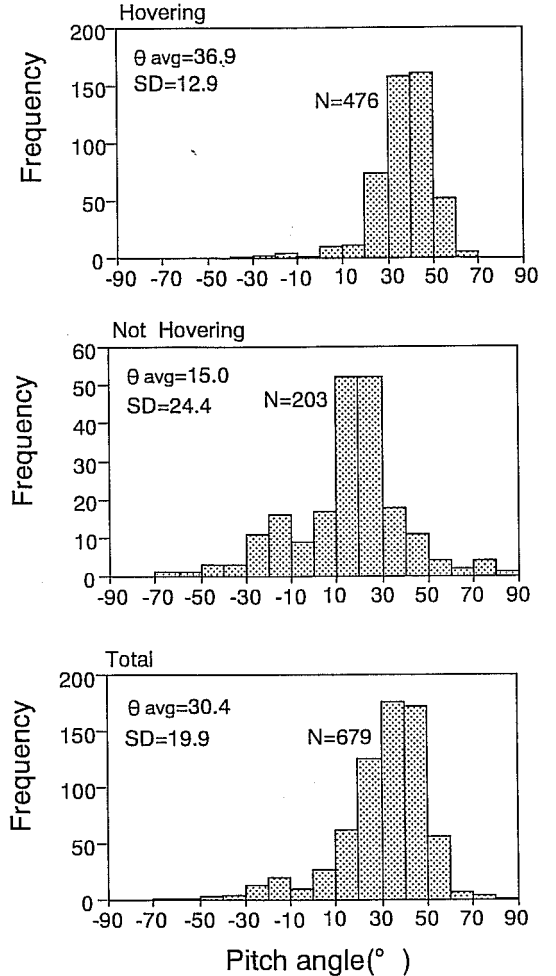


Fig. 5 Pitch angle distribution of krill when hovering, not hovering and pooled data.

Table. 1 Summary for pitch angle of isada krill in a tank.

Number of individuals in a tank (N_t)	Number of measured individuals (N_m)	Number of measurements (N_a)	Mean pitch angle (°)	Standard deviation SD (°)
20	12	140	33.0	18.3
30	6	24	23.8	12.4
50	24	357	33.4	17.0
70	20	158	22.6	25.1
Total 170	62	679	30.4	19.9

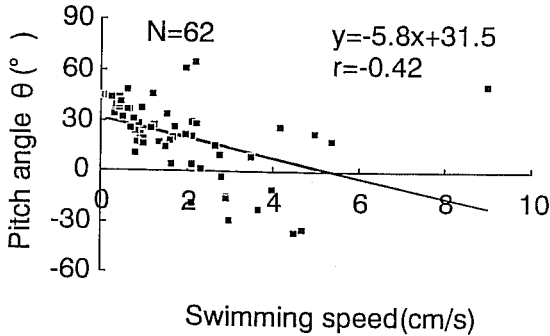


Fig. 6. Relation between pitch angle and swimming speed.

場合では、 $\theta_{avg} = 33^\circ$ 前後なのに対し、 $N_t = 30$ と $N_t = 70$ の場合では、 $\theta_{avg} = 23^\circ$ 前後とピッチ角が小さかった。これについて、 $N_t = 30$ の場合は、ホバリング状態の個体が少なく（6個体中2個体）、遊泳しているものが多いためだと考えられる。また、 $N_t = 70$ の場合はモードが2つあり、正のピッチ角のモードは $N_t = 20$ と $N_t = 50$ の場合とほぼ同じ位置にある。負のピッチ角のモードは、個体間の接触によって下向きに逃避した個体のものである。個体数が多い場合には個体間の接触の機会が増大し、ピッチ角が負になる逃避行動が多くなった結果と考えられる。そこで、ピッチ角が負の場合を除いて平均値を求めたところ、 $N_t = 20$ と $N_t = 50$ の値に近似した値を示した（ $\theta_{avg} = 32.7^\circ$ ）。

Kilsモデルを用いた遊泳姿勢の種間差の検討

次に、ナンキョクオキアミとツノナシオキアミとの間に遊泳姿勢の違いが現われた原因について検討した。原因としては、種による行動の違い、あるいは体型の違いが考えられる。特にホバリング状態は、力学的に平衡状態を保っていると考えられるので、体型による遊泳姿勢の違いが予想される。そこで、オキアミのホバリング時の遊泳姿勢は体型の違いにより生じると仮定して、Kilsモデルによるツノナシオキアミのピッチ角を算出した（Fig. 7）。ツノナシオキアミの重心（G）は、空中で針を側面から刺してバランスのとれたところに決定した。力の中心（M）は、体軸に対して第3腹脚を垂直に伸ばしたときの第3腹脚の外枝の中心に置き、力の中心（M）から体軸に対して引いた垂線が体軸と交わる点を（L）とした。使用したオキアミはホルマリン固定したもので、観察実験に使用したものである。その中から無作為に20個体抽出し、

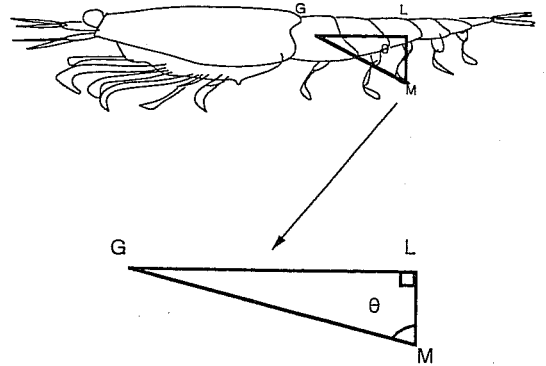


Fig. 7. Calculation method of pitch angle in the state of hovering based on Kils' (1981) model. G: Center of mass, M: Center of force, L: Point where the line from the point M intersects at right angles to the body axis, θ : Pitch angle.

GL, LM, GMの長さを顕微鏡で拡大し、画像解析装置から読み取った。GMはホバリング時における重力の方向であり、Fig. 7の θ はホバリング時のピッチ角になる。従ってこのピッチ角は、 $\tan \theta = GL/LM$ で求まる。その結果、平均ピッチ角 $\theta_{avg} = 41.9^\circ$ （SD=5.7°）となり、本実験で得たホバリング時の平均ピッチ角（ $\theta_{avg} = 36.9^\circ$ ）と、ENDO (1989) の報告（ $\theta_{avg} = 40.7^\circ$ ）に近似した値を示した。この結果は、ホバリング時のツノナシオキアミとナンキョクオキアミのピッチ角の違いが、ツノナシオキアミとナンキョクオキアミとの間の体型の違いを反映していることを示している。

ピッチ角とTSモデル

オキアミの姿勢を考慮にいたれた音響散乱モデルとして、ストレートシリンダーモデル（STANTON, 1988）と回転楕円体モデル（FURUSAWA, 1988）がある。本論文では、オキアミの形状を円柱形とみなしたストレートシリンダーモデルを使用して、 $L/\lambda = 1$ （L: 体長、 λ : 波長）のときの L^2 （単位はm）で基準化したTS（以降基準化TS）を求めた（Fig. 8）。その結果、ツノナシオキアミのピッチ角が 30.4° （全体の平均）、 36.9° （ホバリング時の平均）のときにそれぞれ -87.4dB 、 -65.6dB となった。ホバリング時、すなわちピッチ角が大きい方のTSの値が大きくなったのは、Fig. 8からもわかるように 30° 前後のTSの落ち込みがあるためである。また、ナンキョクオキアミ（ENDO, 1993）の平均ピッチ角の 45.6° と、ホバリング時のピッチ角 49.7°

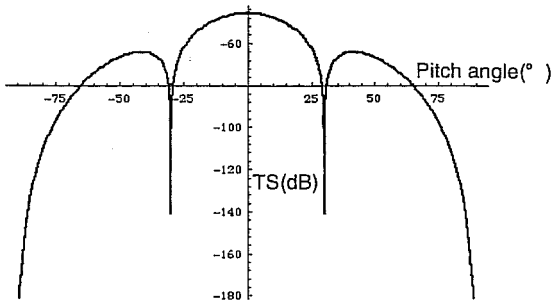


Fig. 8. Back scattering pattern of straight cylinder model (STANTON, 1988) when $L/\lambda = 1$. Positive pitch angle means head up, negative head down and 0° horizontal. TS: Normalized target strength.

を用いて計算すると、基準化TSはそれぞれ -64.9dB 、 -66.5dB となり、両者にほとんど差はなかった。これは、Fig. 8からもわかるように指向性の安定した角度範囲にあるためである。以上から、TSの指向性が急激に変化するピッチ角付近ではTSの変動が大きく、従って、ピッチ角の分布がオキアミ群からの音響散乱に大きく効いてくることがわかる。

そこで、実験で得たツノナシオキアミのピッチ角の分布特性を正規分布の確率密度関数で表わし (FOOTE, 1980), $L/\lambda = 1$ のときのストレートシリンダーモデルのピッチ角特性との積和を計算して、姿勢に対する基準化TSの平均を求めた。その結果、平均ピッチ角が 30.4° (全体) で平均TSが -52.1dB 、平均ピッチ角が 36.9° (ホバリング) のときに平均TSが -57.3dB となった。

Fig. 8によると、ツノナシオキアミの最大TSはピッチ角 0° の水平方向にあるときで、 -45.8dB である。この背方向最大TSと上で求めたピッチ角に関して平均化したTSの差は、全平均では 6.3dB 、ホバリング時で 11.5dB であった。このTSの差は資源量にしてそれぞれ4倍、14倍に相当するので、資源量推定に大きな影響を与えることになる。従って、資源量調査を行うにあたってはそれぞれの姿勢分布に応じたTSを与えることが望ましく、ピッチ角を条件別に精密に測定する意義は大きい。しかし、場合によってはピッチ角の変動のためTSの変動が大きくなり、音響による計測が必ずしも適当でないケースもでてくるであろう。

ナンキョクオキアミの遊泳姿勢に関してはKILS (1981) やENDO (1993) が報告しているが、ツノナシ

オキアミについてはENDO (1989) が昼夜別ピッチ角分布に関して報告しているのみである。本研究は、音響的観点からツノナシオキアミの遊泳姿勢に関する遊泳速度および個体密度の影響を調べた最初の論文である。一方で、KRISTENSEN and DALEN (1986) は、自然状態下でのオキアミ類の平均ピッチ角は、 -9.8° であると報告しているが、これはオキアミが下向きの鉛直移動しているときのものである。この様に水槽内での実験値とまったく異なる場合があるのは、野外では日周鉛直移動、摂餌などの活動に伴い遊泳姿勢が大きく変化しうることを示している。したがって、今後さらに様々な条件下での遊泳姿勢の精密測定を行うと共に、自然状態下での姿勢分布を求めることがオキアミの音響計測にとって重要である。

5. 謝 辞

本研究を進めるにあたり、ツノナシオキアミの採集にご協力をいただいた東京大学海洋研究所大槌臨海センターの盛田孝一氏ならびにセンター職員の方々に厚くお礼申し上げます。また、観察を進めるにあたり、ご助言をいただいた東京大学海洋研究所の寺崎誠教授に厚くお礼申し上げます。

文 献

- ENDO, Y. (1989) Swim angles of *Euphausia pacifica* (ABSTRACT). Proc. NIPR Symp. Polar Biol., 2, 219.
- ENDO, Y. (1993) Orientation of Antarctic krill in an aquarium. Nippon Suisan Gakkaishi, 59, 465-468.
- FOOTE, K.G. (1980) Averaging of fish target strength functions. J. Acoust. Soc. Am., 67, 504-515.
- FURUSAWA, M. (1988) Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 9, 13-24.
- GREENLAW, C.F. (1979) Acoustical estimation of zooplankton populations. Limnol. Oceanogr., 24, 226-242.
- 稲垣 正 (1992) 超音波散乱層の音響リモートセンシングに関する基礎的研究。東京大学学位論文。
- KILS, U. (1981) Swimming behaviour, swimming performance and energy balance of Antarctic krill *Euphausia superba*. BIOMASS Sci. Ser., 3, 1-122.
- KRISTENSEN, A. and J. Dalen (1986) Acoustic estimation of size distribution and abundance of zooplankton. J. Acoust. Soc. Am., 80, 601-611.
- STANTON T. K. (1988) Sound scattering by cylinders of finite length. I. Fluid cylinders. J. Acoust. Soc. Am., 83, 55-63.