

ジンベエザメの行動追跡を目的とした発信機装着用曳航体の流体力特性

誌名	水産工学
ISSN	09167617
著者	塩出, 大輔 深谷, 陽介 胡, 夫祥 東海, 正 中畑, 勝見 中野, 秀樹
巻/号	45巻3号
掲載ページ	p. 187-193
発行年月	2009年2月

【研究論文】

ジンベエザメの行動追跡を目的とした
発信機装着用曳航体の流体力特性

塩出大輔^{1*}・深谷陽介¹・胡夫祥¹
東海正¹・中畑勝見²・中野秀樹³

Hydrodynamic Characteristics of Towing Buoy with Transmitting
Tags for Satellite Tracking of Whale Shark *Rhincodon typus*

Daisuke SHIODE^{1*}, Yosuke FUKAYA¹, Fuxiang HU¹, Tadashi TOKAI¹,
Katsumi NAKAHATA² and Hideki NAKANO³

Abstract

Flume tank experiments were performed to examine the fluid characteristics of the towing buoy in which the transmitter was installed to track movement of whale shark. The improved-type buoy is made of syntactic foam with high pressure-tightness and buoyancy, and has a streamline shape with the dimension of 48cm long in total, 4cm and 6cm in maximum width and height, compared with the conventional buoy of 39cm long and 12cm in maximum width. The towing drag, lateral force, lifting force, and pitching moment of their buoys were measured with a six-component balance at attack angles ranging from -30° to 30° , and at current speeds ranging from 40 to 140cm/s. Coefficient of each force, moment, and pressure center were also obtained. The drag coefficient of the improved-type buoy was below 0.1 within the attack angle range between $\pm 10^\circ$, which is smaller than that of the conventional type at any attack angle. Coefficient of pitching moment of improved-type buoy within the attack angle range between $\pm 10^\circ$ was quite small, and larger than that of the conventional type. The conventional buoy has its pressure center in the anterior of the body, which causes unstable posture in towing. In contrast, the improved-type buoy has a pressure center in the posterior. Therefore, its posture in towing is stabilized around the attack angle of -5° when the wire-attachment position is determined in the anterior of the buoy, taking the gravity center of the body and transmitter into consideration.

1. はじめに

ジンベエザメ *Rhincodon typus* は、全長20mにも達する世界最大の魚類である。本種は、プランクトン食の大型板鰓類の一種であるものの、他にも甲殻類、魚卵、群れをなす表層性浮魚類や比較的大型の魚類まで補食する^{1),2)}。

本種の資源動向や保護政策に対する関心は非常に高く^{3),4)}、対象漁業による漁獲の影響の受けやすさや再生産率の低さ等を理由として、本種は1997年にIUCN（国際自然保護連合）において危急種に指定され、またCITES（絶滅のおそれのある野生動植物の種の国際取引に関する条約）では2002年に附属書IIに掲載された。

2008年5月29日受付，2008年8月25日受理

Key word : whale shark, behavioral tracking, transmitting tags, towing buoy, hydrodynamics

キーワード : 曳航体, 流体力特性, 浮力, 圧力中心, ジンベエザメ, 行動追跡, 発信機

¹ Department of marine biosciences, Faculty of Marine Science, Tokyo University of Marine Science and Technology, Konan 4-5-7, Minato, Tokyo 108-8477, Japan (東京海洋大学海洋科学部海洋生物資源学科 〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

² Kagoshima City Aquarium, Shinmachi 3-1, Honko, Kagoshima, Kagoshima 892-0814, Japan (かごしま水族館 〒892-0814 鹿児島県鹿児島市本港新町3番地1)

³ National Research Institute of Far Seas Fisheries, Orido 5-7-1, Shimizu, Shizuoka, Shizuoka 424-8633, Japan (遠洋水産研究所 〒424-8633 静岡県静岡市清水区折戸5-7-1)

* Tel : 81-3-5463-0477, Fax : 81-3-5463-0399, Email : shiode@kaiyodai.ac.jp

ジンベエザメは全世界の熱帯および温帯に分布し、沿岸から外洋まで広く回遊すると考えられている^{5)~10)}。しかし、本種の詳細な分布域、移動回遊の距離や経路、生息深度については不明な点が多い。そのため、移動経路や分布に関する詳細な知見が必要とされている。近年、海洋動物の移動経路把握を目的として、アルゴス衛星システムを利用した衛星電波発信機による行動追跡が盛んに行われている。我が国では、(独)水産総合研究センターにより希少大型サメ類の回遊追跡試験が実施され、ジンベエザメもその対象種の一つとして、アルゴス衛星システムを用いた移動追跡が試みられている¹¹⁾。海洋動物の行動追跡に使用される衛星電波発信機は、そのアンテナ部が空中に露出した際に信号を発信する。そのため、鯨類や海亀類等を対象とした場合には、呼吸等で空中に露出する部位に発信機が直接装着される場合が多い。一方、既往の知見から、ジンベエザメは海面付近の水面下を緩やかな速度で遊泳する機会が多いと考えられてきた^{6),7)}。そのため、本種の行動追跡を行う場合には、その魚体に発信機を直接装着するのではなく、アンテナ部を海表面に露出するのに十分な浮力をもつ曳航体に発信機を装着し、ワイヤーを介してジンベエザメに曳航させる形で実施する方法が考えられる^{8),9),12)}。この方法では、曳航体の抵抗と浮力の力学的バランスと、ワイヤーの長さとの関係により、ジンベエザメがワイヤー長よりも浅い水深か海面付近を遊泳している場合に発信機が海面に浮上して、信号を発信する機会を得ることができる。

(独)水産総合研究センターによる回遊追跡試験が開始された2003年では、既往の知見¹²⁾を参考に設計された曳航体 (Fig.1, 以後、従来型) が使用されていた¹³⁾。従来型の曳航体は、本体の最大幅12cm、長さ39cmであり、曳航時の姿勢を安定させると同時に、上向きの揚力を発生させて強制的に海面への浮上を促すことを目的としたリップが装着されていた。ワイヤー長は15~20mであり、ジンベエザメが潜水してワイヤー長と同程度か、それよ

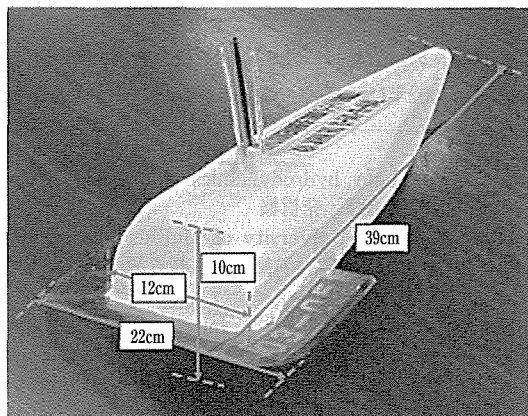


Fig.1 The towing buoy (conventional type)

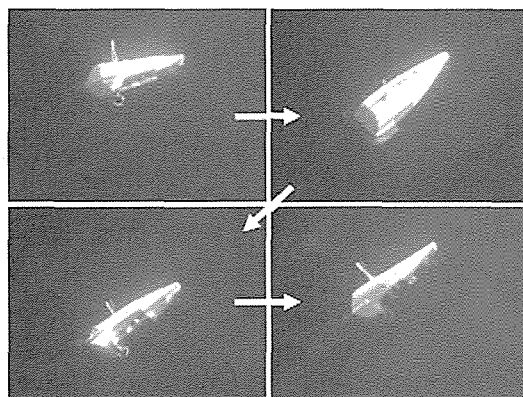


Fig.2 Coning motion of the conventional type buoy in towing. (Current speed=1.0kt, time interval=0.3s)

りも深い層を遊泳するような状況では、曳航体は海中を曳航されることになる。予備実験として東京海洋大学の大型回流水槽において流水下での曳航姿勢を観察したところ、前面のリップによる揚力は期待されるほど発生せず、流速が25cm/sより速くなるにしたがって安定姿勢を保てずに8字を描くように激しく振れ回るなど、従来型の曳航姿勢は極めて不安定であることが分かった (Fig.2)。ジンベエザメが曳航体を曳航して遊泳した状況では、曳航体の抵抗がジンベエザメのワイヤー接合部にかかるため、過大な抵抗が加わるとジンベエザメへの負荷はもちろんのこと、ワイヤーを接合した魚体部位の切除やワイヤーの切断が起こる危険性もあると考えられる。また、曳航体の姿勢が不安定で激しく振れ回ると、張力の変化にともなう振動がワイヤーに伝わることで疲労破壊につながる。これらのことから、曳航抵抗は極力小さく、曳航体の姿勢を安定させることが望ましい。さらに、曳航中に安定的な姿勢が保持されることは、ワイヤーの絡みの防止などにもつながる。このように、発信機装着用曳航体に求められる条件として、曳航姿勢を安定させることと、曳航抵抗を極力小さくすることがあげられる。また、ジンベエザメが海面付近を緩やかな速度で遊泳している際に発信機のアンテナ部が海表面に露出すればよいことから、曳航体の海面への浮上は主としてその浮力のみでよいと考えられる。以上の諸条件を考慮して、Fig.3に示す新しい曳航体 (以後、改良型と呼ぶ) が開発され、ジンベエザメの追跡に使用されている¹³⁾。

本研究では、発信機装着用曳航体としての改良型の有効性を検証する目的で、従来型を比較対象として改良型の流体抵抗、揚力、圧力中心などの流体力学的特性を水槽実験により詳細に調べ、さらに姿勢の安定性について考察した。

2. 材料と方法

東京海洋大学の大型回流水槽 (観測部の長さ9.0m×

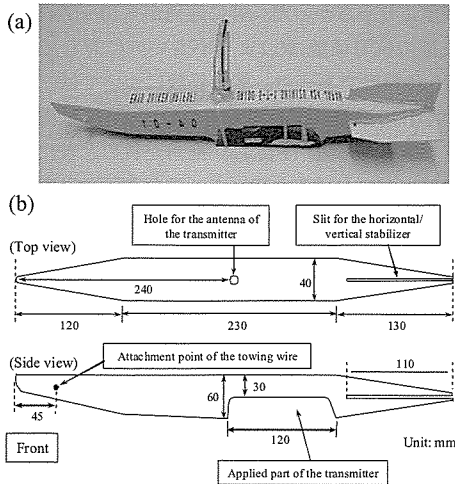


Fig.3 A picture (a) and plan of the main body (b) of the improved towing buoy.

幅2.2m×高さ1.95m(標準水深1.6m)において実験を行った。実験時の水温は約26℃であった。実験に用いた改良型曳航体をFig.3(a, b)に示す。この曳航体は、調査密度の調整により、高強度、高浮力が得られるシンタクティックフォームで製作されている。改良型は、全長48cm、幅4cm、高さ6cmであり、曳航抵抗の減少と若干の揚力発生を期待して、前面下部は斜めに切除され、後方が細くなる滑らかな流線型の形状になっている。また、後端部には尾翼を装着するための隙間が空けられている。アルゴス発信機(テロニクス社製ST20-A1010)を装着した状態での改良型曳航体の浮力は180gfであった。一方、2003年の行動追跡に使用された従来型(Fig.1)は、全長39cm、幅12cmであり、発信機装着時の浮力は600gfであった。従来型の前端部には、本体よりも幅広である最大幅22cmのリップが前端部から突き出す形で装着されている。改良型では、前方の両側面に装着した2本のペンネントを介してワイヤーに接続されるのに対して、従来型では前方下部にワイヤーが直接に接続された。

曳航体に作用する流体力の計測には、回頭機構付き六分力検力計(㈱電子工業製)を用いた。改良型では、後部両側面に沿わせて本体を挟み込むように2枚の金具を装着し、その左側面に装着した金具の後端部に支持棒(直径16mm、長さ36cm)を垂直に取り付け、支持棒の上端を六分力検力計に接続した(Fig.4)。一方、従来型の測定では、曳航体の側面に支持棒(直径16mm、長さ36cm)を取り付けて行った。実験時の支持棒にかかる流体抵抗を低減するために、その外側を流線型の鞘で覆った。ジンベエザメの海面付近における想定遊泳速度(50~100cm/s)^{9),12)}を勘案して、流速を改良型では7段階(40, 50, 60, 80, 100, 120, 140cm/s)に、また従来型

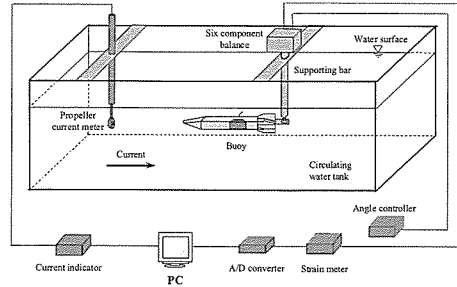


Fig.4 Schematic diagram for measuring in the flume tank.

では6段階(40, 50, 60, 80, 100, 120cm/s)に、そして水平方向に対する上下の迎角を-30°から30°(上向きを正とする)まで5°間隔に13段階に変えた条件下で、曳航体に働く抗力(F_x)、横力(F_y)、揚力(F_z)および縦揺れモーメント(M_y)をサンプリング間隔20Hzで20秒間計測してその平均値を得た。解析に用いたモーメントは両曳航体とも前端周りのモーメントに変換した。このように計測された各流体力から、抗力係数(C_x)、横力係数(C_y)、揚力係数(C_z)、縦揺れモーメント係数(C_{my})と圧力中心係数(C_{pc})をそれぞれ(1)~(5)式により求めた。

$$C_x = \frac{F_x}{0.5\rho V^2 S} \quad \dots\dots(1)$$

$$C_y = \frac{F_y}{0.5\rho V^2 S} \quad \dots\dots(2)$$

$$C_z = \frac{F_z}{0.5\rho V^2 S} \quad \dots\dots(3)$$

$$C_{my} = \frac{M_y}{0.5\rho V^2 S c} \quad \dots\dots(4)$$

$$C_{pc} = \frac{d_c}{c} = \frac{C_{my}}{C_x \sin \alpha + C_z \cos \alpha} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 ρ は水の密度、 V は流速、 S は曳航体の側面積、 c は曳航体の全長、 α は迎角である。また、 d_c は曳航体前端から流体合力の作用位置(圧力中心)までの距離を表す。したがって、(5)式から求められた圧力中心係数 C_{pc} は、曳航体の全長に対して流体合力の作用位置を相対的に表した値である。

3. 結 果

抗力、横力、揚力、縦揺れモーメントの各測定値から、(1)~(4)式により求められた各流体力係数と、曳航体の全長を代表長さとするレイノルズ数との関係をFig.5に示す。同図より、改良型ではレイノルズ数が 2.2×10^5 以上、従来型ではレイノルズ数が 1.7×10^5 以上(両曳航体とも流速が約40cm/s以上)の範囲内で、各迎角における流体力係数は若干のばらつきが見られたものの、それぞれほぼ一定の値を示した。このことから、改良型および従

来型の両曳航体とも40cm/s以上の流速範囲における各流体力係数の平均値を迎角ごとに求め、これらの値を解析に用いた。

両曳航体の迎角と抗力係数の関係をFig.6に示す。両曳航体ともに、迎角の絶対値が大きくなるにしたがって抗力係数は大きくなるものの、迎角0°に対して抗力曲線は対称とはならず、やや負の迎角0~−5°の範囲内で最小となった。改良型の抗力係数は、全ての迎角におい

て従来型より小さかった。特に迎角が−10~5°の範囲内で改良型の抗力係数は0.1より小さいのに対して、従来型では0.15程度であった。横力係数については、従来型ではいずれの迎角においてもその値は±0.01未満の極めて小さな値であった (Fig.7)。迎角が負のときには負の値 (曳航方向における左側) を、迎角が正のときには正の値 (同右側) となるものの、その影響は小さいものと考えられる。一方、改良型では迎角が±15°の範囲では

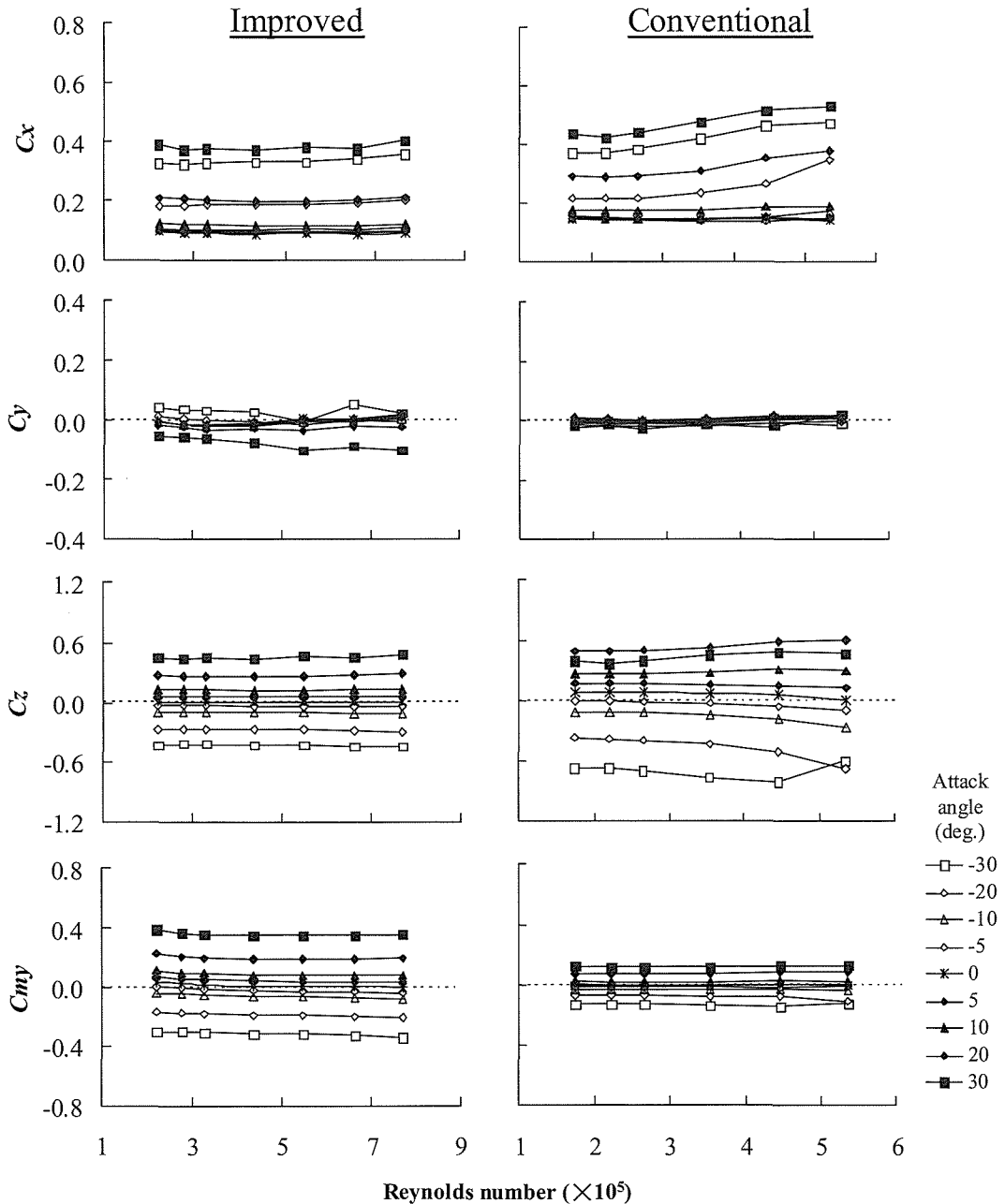


Fig.5 Relationship of drag coefficient, lateral force coefficient, lifting force coefficient and pitching moment coefficient to Reynolds number on both type buoys.

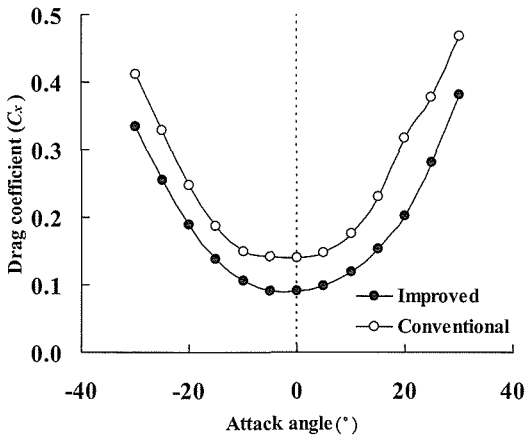


Fig.6 Drag coefficient of both type buoys in relation to attack angle.

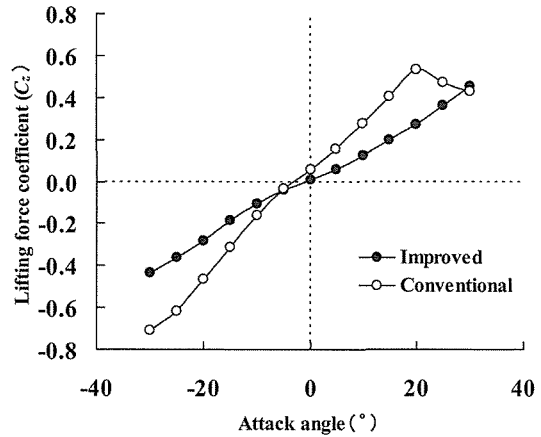


Fig.8 Lifting force coefficient of both type buoys in relation to attack angle.

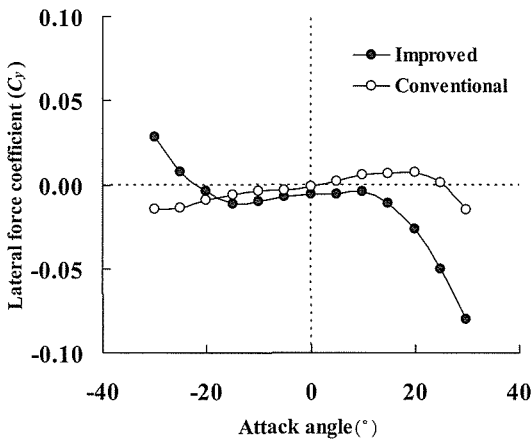


Fig.7 Lateral force coefficient of both type buoys in relation to attack angle.

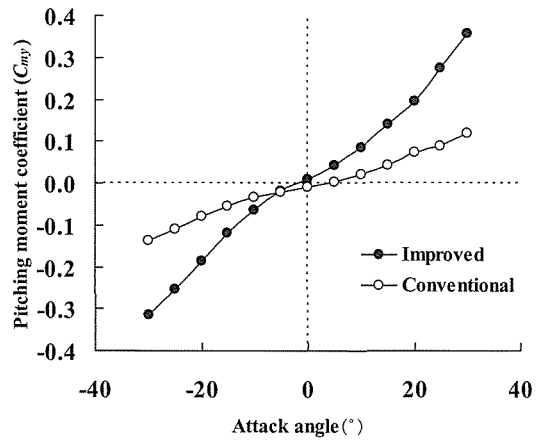


Fig.9 Pitching moment coefficient of both type buoys in relation to attack angle.

横力係数は絶対値で0.01未満であったが、迎角が15°以上では急激に減少し、逆に-20°以下では急激に増加して正の値となっている。これは、曳航体が体軸に対して精確に左右対称となっていないために生じた現象と考えられ、曳航体が上下方向に大きな迎角を持った際に横方向に移動しようとするを示している。また、迎角0°でもわずかに負の横力係数がみられる。このことから改良型は、力が釣り合う位置としてわずかに曳航方向から左側に寄りながら曳航されることになる。

両曳航体の迎角に対する揚力係数と縦揺れモーメント係数との関係をそれぞれFig.8とFig.9に示す。揚力係数は上向きが正の値を、また縦揺れモーメント係数は、曳航体の前端が上方向に回転する方向を正とする。揚力係数は迎角の増加とともに概ね増加する傾向が見られた (Fig.8)。改良型の揚力係数は迎角20°を超えても増加する傾向にあり、計測範囲の最大迎角30°で0.45であったのに対して、従来型では迎角20°で最大の揚力係数0.53を示した。特に、迎角0°付近では、改良型では揚力

係数がほぼ0であったのに対して、従来型では0.1未満の小さな値を示した。また、迎角が正の時、つまり曳航体の先端が上向きの時には、従来型が改良型よりも大きな揚力係数を持つ。従来型においては、迎角が20°を超えて失速した。これは、その形状や、前端に装着されたリップの反り角度によるものと考えられた。縦揺れモーメント係数は迎角の増加とともに大きくなる傾向を示した (Fig.9)。つまり、曳航体の前端が上向きの姿勢の場合では上向きに、前端が下向きの場合では下向きに回転しようとする力が働くことになる。縦揺れモーメント係数の値は、迎角-5°でほぼ同値であったが、従来型で-0.14~0.12、改良型で-0.32~0.36であり、同じ設定迎角範囲における縦揺れモーメント係数の変化幅は改良型の方が大きかった。しかし、迎角が小さな-10°から10°の範囲では、両曳航体とも縦揺れモーメント係数は±0.05未満と極めて小さかった。

曳航体が曳航時に振れ回り運動等を起こすことなく安定した姿勢を保つためには、曳航体の圧力中心の位置と

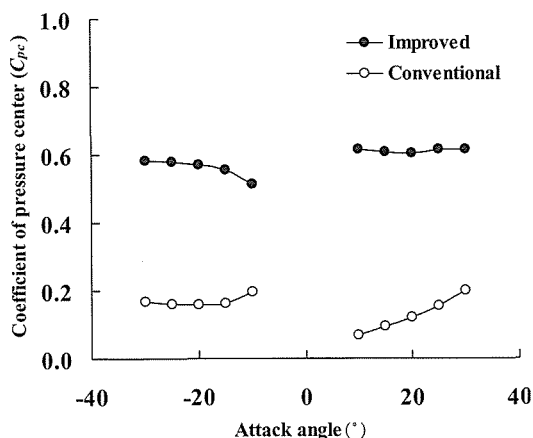


Fig.10 Coefficient of pressure center of both type buoys in relation to attack angle.

重心、そして曳航ワイヤーの取り付け位置との関係が重要となる。(5)式より求められた両曳航体の圧力中心と迎角の関係をFig.10に示す。ここでは、六分力検力計の計測値が誤差範囲となる -5° と 5° の測定結果を除外して表示した。従来型の圧力中心は、迎角が負の場合に約0.2ではほぼ一定であり、迎角が正の場合には迎角の増加に伴って増加した。しかし、いずれの迎角においてもその値は0.2以下であり、圧力中心は比較的曳航体の前端に近いところにあった。一方、改良型の圧力中心は、迎角が -10° 、 -5° で若干の減少は見られたものの、全ての迎角において約0.6ではほぼ一定であった。つまり、圧力中心は曳航体の中央部に埋め込まれる発信機の中央付近に存在した。

4. 考 察

従来型と改良型の抗力係数は、迎角が 0° ～ -5° 内ではそれぞれ0.15と0.1付近にあり、ほぼ最小に近い値であったことから (Fig.6)、水平に近い角度で曳航される場合には、曳航抵抗が小さいことがわかる。そして、改良型の迎角 -15° から 10° の抗力係数は、従来型の最小抗力係数よりも小さい。また、改良型の流れに対する投影面積は従来型に比べて小さく、この迎角範囲においては、改良型の抵抗は従来型の4割程度であった。

迎角を変化させた場合の抗力係数は、迎角の正負で非対称であった。これは、発信機やアンテナの有無に加えて、両曳航体の上面と下面で形状が若干異なることによるものと考えられた。特に、曳航体の前端下部は、改良型では斜めに切除されており、また従来型ではリップの前端がやや上向きであり、曳航体がやや下向きの迎角である場合にリップの投影面積が最小となったことも原因の一つと考えられる。

いずれの迎角においても、横力係数の値は他の流体力係数に比べて極めて小さかった (Fig.7)。このことから、

曳航時に左右方向への揺れや振り回りを起こす力は小さいといえる。改良型において、迎角が $\pm 20^\circ$ 以上で横力が変化するの、製作された曳航体の形状や尾翼の装着角度における若干のズレなどにより発生したものと考えられた。曳航体が迎角を持つのは、ジンベエザメが潜水して海中を曳航される場合であり、迎角が $\pm 20^\circ$ を超えるほど大きくなるときは、ジンベエザメが海中深くで急浮上もしくは急潜行する場合である。そのような状況下では、ワイヤーの絡みなどの問題も懸念されるものの、その際に生じる横力は信号発信の可否には大きな影響を与えないものと考えられる。

同一迎角における揚力係数の絶対値は、従来型の方が大きかったことから (Fig.8)、従来型の方がより大きな揚力あるいは潜行力を得ることができる。しかし、海中での曳航時の安定性を重視し、またジンベエザメが海面付近で緩やかに遊泳しており、曳航体はその浮力によって海面に位置しているような状況下で信号が確実に発信されればよいと考えるならば、この特性は従来型の利点とは言えないと考えられる。また、曳航時の迎角が水平に近ければ、改良型においても縦揺れモーメントは小さく抑えられる (Fig.9)。

一方、圧力中心係数は、改良型ではほぼ一定で0.6程度であったのに対して、従来型では0.2以下であった (Fig.10)。従来型の圧力中心はリップの基部付近に位置し、ワイヤー取り付け位置 (前端から0.25c) よりも前方にあった。そのため、従来型では曳航状態が安定せず、Fig.2に示したような挙動を示したのと考えられた^{14),15)}。一方、改良型の圧力中心はアルゴス発信機本体の埋込部付近に位置し、ワイヤー取り付け位置 (前端から0.10c) よりも後方に位置した。そして、回流水槽において水中での曳航姿勢を確認したところ、想定遊泳速度 (50～100cm/s) の範囲ではもちろんのこと、150cm/s程度の速い流速下においても迎角 -5° 程度で安定した姿勢が得られた。このように、曳航時の姿勢の安定性においては圧力中心の位置とワイヤー取り付け位置の関係が非常に重要であり、この点で改良型では安定的な姿勢が得られるものと考えられた。そして、改良型を用いた行動追跡において実際に位置データが取得されていることから¹⁶⁾、ジンベエザメが海面付近を緩やかな速度で遊泳している際に信号を発信させる点で改良型は十分な性能を有していると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり貴重な助言をいただいた日本NUSの皆様、模型や実物の曳航体を製作していただいた(有)ダイビングベルの鈴木栄氏をはじめ、(独)水産総合研究センター・希少大型サメ類の回遊追跡試験に関わる皆様に感謝の意を表す。本研究は、(独)水産総合研究

センターによる大型海洋動物の衛星追跡調査「希少大型サメ類の回遊追跡試験」委託事業の一環として行われた。

参 考 文 献

- 1) L.J.V. Compagno : Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. *FAO Species Catalogue for Fishery Purposes* No.1, Vol.2. FAO, Rome, 2001.
- 2) J.D. Stevens : Whale shark (*Rhincodon typus*) biology and ecology : A review of the primary literature. *Fish. Res.*, 84 : 4-9, 2007.
- 3) 内田詮三 : 日本の希少な野生水生生物に関する基礎資料 (II) 3. ジンベエザメ. 日本水産資源保護協会編, 日本水産資源保護協会, 東京, pp.146-153, 1995.
- 4) 松田裕之・矢原徹一・石井信夫・金子与止男編 : ワシントン条約附属書掲載基準と水産資源の持続可能な利用. 自然資源保全協会, 東京, pp.226-228, 2004.
- 5) R.A. Martin : A review of behavioral ecology of whale sharks (*Rhincodon typus*), *Fish. Res.*, 84 : 10-16, 2007.
- 6) 中野秀樹 : ジンベエザメ. 国際漁業資源の現況. 水産庁・水産総合研究センター, pp.101, 2006.
- 7) E. Clark : Whale sharks. *National Geographic*, 182 (6) : 120-138, 1992.
- 8) A. Gifford, L.J.V. Compagno, M. Levine, A. Antoniou : Satellite tracking of whale sharks using tethered tags, *Fish. Res.*, 84 : 17-24, 2007.
- 9) H.H. Hsu, S.J. Joung, Y.Y. Liao, K.M. Liu : Satellite tracking of juvenile whale sharks, *Rhincodon typus*, in the Northwestern Pacific, *Fish. Res.*, 84 : 25-31, 2007.
- 10) 岩崎行伸 : 西部太平洋カツオ漁場におけるジンベエザメの分布と二, 三の生活環境条件について. 東海大学海洋学部紀要, 4 : 37-51, 1970.
- 11) 岩崎俊秀 : 水研センター交付金プロジェクト研究「大型海洋動物の衛星追跡とその技術開発」. 独立行政法人水産総合研究センター研究開発情報 遠洋リサーチ&トピックス, 2 : 5-6, 2006.
- 12) S.A. Eckert and B.S. Stewart : Telemetry and satellite tracking of whale sharks, *Rhincodon typus*, in the sea of Cortez, Mexico, and the North Pacific Ocean. *Env. Biol. Fish.*, 60 : 299-308, 2001.
- 13) 松永浩昌 : ジンベエザメの回遊を探る衛星追跡. 第2回日本バイオロギング研究会シンポジウム講演要旨集, pp.14-15, 2006.
- 14) 胡 夫祥・大関芳沖・東海 正・松田 皎 : 稚魚採集網用湾曲V型デプレッサーの流体力特性. 日水誌, 66 : 846-851, 2000.
- 15) 臺田 望・稲田博史・胡 夫祥・酒井拓宏 : クランクベイトルアーの流体力特性に及ぼすリップ縦横比の影響. 日水誌, 68 : 843-851, 2002.
- 16) 松永浩昌 : 希少大型サメ類 (ジンベエザメ) の衛星追跡試験3〜アルゴス発信器による追跡結果〜平成18年度日本水産学会大会講演要旨集, p.77, 2006.