生物が付着したホタテ養殖用浮子およびロープの 流水抵抗について^{*1,2}

山本勝太郎, 平石智徳, 小島隆人

(1989年5月15日受付)

Drags of a Float and a Rope Encrusted with Marine Organisms in Scallop Culture

Katsutaro Yamamoto,^{*3} Tomonori Hiraishi,^{*3} and Takahito Kojima^{*4}

A study was conducted to determine the drag coefficients of float and rope presently used in scallop culture facilities. The drag forces of a polyethylene spherical float (30 cm in diameter) and a polypropylene three-strand laid rope (24 mm in diameter), with different encrusted conditions of marine organisms, were measured in an experimental flow tank.

The experimental results were drawn in C_D - R_e diagrams (C_D : drag-coefficient, R_e : Reynolds number). The average value of C_D was 0.75 for the floats encrusted with barnacles, blue mussels and plumed worms in $3.5 \times 10^4 < R_e < 10^5$, and C_D was 0.52 for the float scraped off marine organisms from the surface in $3.5 \times 10^4 < R_e < 8 \times 10^4$. For the rope when set normal to the flow, C_D was 1.4 for the rope with amphipods and skeleton shrimps, and C_D was 1.8 for the new rope without organisms in $2 \times 10^3 < R_e < 10^4$.

ホタテ養殖施設を構成する養殖籠、浮子、ロープにムラサキイガイ、フジツボ、コンブ等の生物が付着するとその水中重量が増加するだけでなく、これらの流水抵抗も増加する。前報¹⁾では、このうち養殖籠に生物が付着した場合の流水抵抗について報告した。本報では、同じく生物が付着した浮子およびロープの流水抵抗を測定し、ホタテ養殖施設にかかる潮流力を算定するのに必要なこれらの抗力係数を求めることを目的とする。

材 料 と 方 法

供試体 流水抵抗の測定に供した浮子を Fig. 1 に示す。浮子はいずれも通称ハイゼックスフロート 10 号玉 (直径 30 cm) と呼ばれているポリエチレン製の球形浮子で、下方に 2 つの取手が耳状に付いたものである。図の浮子 A, B, C は函館市近郊の渡島当別地先の水深約 30 m の場所に設置されているホタテ養殖施設で中間浮子として実際に使用していたものである。浮子 A は全面にフジツボが付着しており、その平均殻高は約 7 mm であった。浮子 B は、フジツボのほかにエラコ、ムラサキ

イガイが部分的に付着したもので、浮子 C はフジツボが付着、取手のところにムラサキイガイがダンゴ状に付着したものである。浮子 D は、生物付着が極端に多い場合を想定し浮子の全表面にムラサキイガイを接着剤 (アロンアルファ) で接着させたもので、ムラサキイガイを接着した後の浮子の見掛けの直径は約 40 cm であった。浮子 E は浮子 B の付着生物を削り落としたもの、浮子 F は新品の浮子でその取手を切り落としたものである。

またロープは、ホタテ養殖施設の幹綱として一般的に使用されているポリプロピレンの 3 子撚ロープ、直径 24 mm である。ロープ A は、前報¹⁾での養殖籠と同じように、前述した施設に冬期の 3 カ月半海中垂下したものであり、ワレカラ、ヨコエビなどの小型の端脚類が多数付着している。ロープ B は新品の未使用ロープである。

実験方法 流水抵抗の測定には前報¹⁾と同じく北海道大学水産学部の大型回流水槽を使用した。水槽は幅 2 m、深さ 1.2 m、直線水路部 14 m である。水深を 1 m とし、浮子をその中心部の水深が 0.35 m となるように鉄製の 20 kg ブロックに 1 mm のステンレスワイヤーで連結し

^{*1} 養殖施設の安全設計に関する研究—2. (Studies on the Optimum Designs of the Marine Culture Facilities—2).

^{*2} 昭和 63 年度日本水産学会秋季大会 (清水) において口頭発表した。

^{*3} 北海道大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate 041, Japan).

^{*4} 日本大学農獣医学部 (College of Agriculture and Veterinary Medicine, Nihon University, Tokyo 154, Japan).

Fig. 1. Encrusted conditions of marine organisms on the polyethylene floats (30 cm in diameter) and the polypropylene three-strand ropes (24 mm in diameter) used for drag force measurements. Float A, B, C were used by a scallop culturist. Float A covered with barnacles all over the surface; Float B covered partially with barnacles, blue mussels and plumed worms; Float C covered partially with barnacles and blue mussels; Float D adhered artificially with blue mussels all over the surface, 40 cm in the average diameter including the shell height; Float E scraped off marine organisms from the surface; Float F is a new float cut off ears; Rope A covered with amphipods and skeleton shrimps, 3.5 months after left in the sea; Rope B is a new rope.

て水槽中央部に沈めた。検力計には三分力計を使用し、この検力計の真下に取り付けた直径 12 mm の支持棒と浮子を 0.6 mm ステンレスワイヤーで繋いだ。流速計は浮子の後方約 1 m のところに浮子の真後ろより少し横にずらして浮子と同じ水深になるように設置した。三分力計の測定値から支持棒の流水抵抗力を差し引いた値を浮子の抗力とした。ロープの抗力測定には三分力計 2 個を並列に配置し、これの真下に取り付けた支持棒にロープを流れに対して直角に張り渡し、水深 0.35 m のところに沈めた。この時の流速計の位置はロープの後方約 2 m の水槽中央部である。ロープの長さは 100 cm と 50 cm としその測定値の差から支持棒および試料端の影響を除いたロープの抗力を求めた。流速はその指示値を直読して測定流速とした。流速は 0.15~0.90 m/s の範

囲。実験時の水温は浮子 A, B, C の時が 11.0°C, 浮子 D, E, F およびロープが 4.0°C である。測定装置の配置を Fig. 2 に示す。

結果と考察

生物付着状態 Fig. 1 の浮子 A, B, C を見てわかるように実際に使用されている中間浮子の付着生物量はそれほど多くはない。これは漁業者が、毎日あるいは少なくとも一週間に一回ぐらいは施設を見回って浮子の掃除をするようにしているのと、それができない場合には予備の浮子（陸上で掃除したもの）と交換するためである。従って、ごく普通に手入れをしながら施設を使用している場合の中間浮子の生物付着状態は浮子 A, B, C 程度のものであると考えてよく、浮子 D のようにムラサキ

Fig. 2. Arrangement of experimental apparatus in the measurements of float and rope drag forces. A is the side view in drag measurement for float and B the top view in drag measurement for rope. ①, test float; ②, three component load cell; ③, 12 mm circular rod; ④, 0.6 mm stainless wire; ⑤, 1 mm stainless wire; ⑥, flow speed meter; ⑦, test rope.

イガイが浮子表面にびっしりと付着するのは余程手入れの悪い場合である。

Fig. 3 は実際の施設の幹綱の写真である。このように幹綱には大型の生物の付着はなく非常にきれいな状態である。ホタテ養殖の作業船には、Fig. 4 に示すような特別の滑車（テボよけローラと呼ばれている）が左舷側の前と後ろに一個ずつ取り付けられており、この滑車に幹綱を掛けて船を移動させながら作業を行なう。このため幹綱はローラの上を滑らされ掃除されたと同じ状態になるものと思われる。今回は、この実際に施設で使用されている幹綱を入手することが出来なかったので、先に述べたように、この施設に新品のロープを3ヵ月半垂下したものの流水抵抗を測定することとした。

流水抵抗 Fig. 5 は、測定した浮子の抗力と流速との関係を両対数グラフで示したものである。抗力は、ムラサキイガイを全表面に接着した浮子 D が最も大きく、次いで浮子 B、浮子 A、浮子 C の順となっており、付着生物を削り落とした浮子 E が最も小さい。また取手を切り落とした浮子 F の抗力は浮子 E より幾分小さくなった。いずれも、抗力は低流速域では流速の2乗に比例しているが、0.5 m/s あたりから下へずれる傾向を示した。

同様に、ロープについて示したのが Fig. 6 である。上の曲線が長さ 100 cm、真中が 50 cm の結果である。こ

Fig. 3. Encrusted condition of the main rope in scallop culture.

Fig. 4. A scallop boat equipped with a guide roller ("Tebo-yoke rōrā" in Japanese) along her port stern. One more roller of the same type was equipped along her port bow. A main rope was passed on to the two rollers in the culture works.

の2つの曲線の差をとって支持棒およびロープ端の影響を取り除いたのが下の曲線である。ロープの抗力係数はこの下の曲線から求めた。またロープ A と B とを比較するとロープ B の新品ロープの方が抗力は大きくなる結果を得た。

抗力係数とレイノルズ数 次式²⁾によって浮子とロープの抗力係数 C_D とレイノルズ数 Re を求めた。

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad (1)$$

$$Re = \frac{dU}{\nu} \quad (2)$$

ここに、 D は測定によって得られた抗力、 ρ は流体の密度、 U は流速、 S は供試体の流れに垂直な射影面積、 d は供試体の代表長さ、 ν は流体の動粘性係数である。計

Fig. 5. Relationship between the drag force of floats and the flow speeds.

算に使用した d , S の値は、浮子 D については接着したムラサキガイの分だけ直径が増加したものととして d に見掛けの直径 40 cm を使い、その他は実際の計算に便利のように規格寸法に基づく値を使用した。動粘性係数は測定時の水温から水の物理定数表³⁾の値を使用した。

得られた C_D - R_e 線図を Fig. 7 に示す。浮子 A, B, C, D の C_D は R_e が 10^5 ぐらいまではほぼ一定で、浮

子 D で 0.97, 浮子 B で 0.87, 浮子 A で 0.73, 浮子 C で 0.65 ぐらいとなっており、 R_e が 10^5 を過ぎると小さくなり、浮子 A, C では再び上昇する傾向が見られた。付着生物を削り落とした浮子 E では R_e が 8×10^4 ぐらいまでは C_D は 0.52 ぐらいであるが、この R_e を過ぎると C_D の値は急に減少し、 R_e が 1.5×10^5 で 0.3 まで下がり、ここからまた上向きに転じる。取手を切り落したほぼ球と見なせる浮子 F の結果も C_D の値は幾分小さくなるが浮子 E とほとんど同じ傾向を示す。図中の鎖線は良く知られている球の抗力係数²⁾である。浮子 F の C_D は R_e が 8×10^4 まではこの曲線に近い値をとる。ただし浮子 F の C_D が急に減少しはじめる R_e がこの曲線よりかなり低いほうへずれていることから、浮子 A, B, C, D も含めて測定に供した浮子の C_D が R_e の 10^5 あたりから減少しはじめる原因は生物付着による表面の粗さによると言うよりも実験水槽中の流れが流速 0.5 m/s を越えると急に乱れが強くなるためであると考えられる。

またロープでは、図から明らかなように、 R_e が $3 \times 10^3 \sim 10^4$ までは C_D はほぼ一定でロープ A で 1.4, ロープ B で 1.8 となり、3 カ月半海中垂下したもののほうが未使用ロープよりも C_D は小さくなった。この理由は、ワレカラ、ヨコエビなどの小型の生物がロープのストラッドとストランドの間に付着することによってこの谷間を埋め、全体として凹凸の少ない表面になるためと考えられる。また R_e が 10^4 あたりから C_D が減少しているのは浮子の時と同じ理由によるものと思われる。図中の一点鎖線は、宮崎⁴⁾が風洞実験および水槽実験によって求めたビニロンロープ（通称クレモナロープ）の実験曲線であるが、ロープ A はこの曲線とほぼ一致する結果となった。元良⁵⁾は直径の異なる塩化ビニルパイプを港

Fig. 6. Relationship between the drag force of ropes and the flow speeds.

Fig. 7. Drag-coefficients versus Reynolds number.

湾内に異なる期間吊り下げて生物（主にフジツボ）を付着させた供試体を静水中で曳航して抗力を測定し、 R_e が 10^4 あたりで C_D が急に減少すること、また相対粗度（付着生物の平均厚さ/パイプの直径）が大きい程 C_D も大きくなることを見出している。本実験で得られたロープの C_D はこの元良の実験結果とその傾向が良く一致しており、流れの乱れと生物付着による相対粗度が C_D に同じ効果を与えることを示している。木村⁶⁾は直径の異なる2種類の塩化ビニールパイプにフジツボを付着させた供試体を回流水槽で実験し C_D と R_e との関係を求め、 $2 \times 10^4 < R_e < 5 \times 10^4$ の範囲で、フジツボの付着量や R_e には関係なく C_D がほぼ1.1となる結果を得、このことから流れに直角に張られたフジツボの付着したロープの C_D も1.1として良いとしている。この木村の結果には C_D が急に減少するところは現われておらず、本実験および元良の結果とは異なっている。

従来、ホタテ養殖施設の設計においては、浮子の抗力係数を0.5、流れに直角に張られたロープの抗力係数を1.0として流水抵抗力を算定する⁷⁾のが普通であるが、本実験の結果からすると、ごく普通の状態で使用されているホタテ養殖施設では中間浮子の抗力係数を0.75、幹綱ロープの抗力係数を1.4程度とするのが妥当であると言える。ただし、本実験あるいは元良の実験結果に見られるように流れの乱れによって急に C_D が減少する R_e の範囲があるから、現場での海水の流れの乱れの程度によ

ってはもっと C_D の値を小さくしても良いことも考えられる。このため設計流速における現場の流れの状態を把握するために標準球を使って現場での抗力を測定し実験水槽での結果と比較することを検討中である。

終わりに、本研究を進めるのに当たりご指導頂いた北海道大学水産学部前教授佐藤 修博士、同教授梨本勝昭博士に謝意を表する。またホタテ養殖施設に試験体を垂下することを快諾された渡島県別漁業協同組合に謝意を表する。本研究は昭和62年度北海道科学研究費補助金に依った事を最後に付記し関係各位に謝意を表する。

文 献

- 1) 山本勝太郎, 平石智徳, 小島隆人: 日水誌, **54**, 1913-1918 (1988).
- 2) 伊藤英覚: 水工学便覧 (沼知福三朗, 本間 仁監修), 森北出版, 東京, 1966, pp. 134-141.
- 3) 井田富夫: 水工学便覧 (沼知福三朗, 本間 仁監修), 森北出版, 東京, 1966, pp. 2-3.
- 4) 宮崎芳夫: 東水大研報, **50**, 105-110 (1964).
- 5) 元良誠三: 海洋の生物過程 (元良誠三編), 厚生社厚生閣, 東京, 1984, pp. 348-349.
- 6) 木村晴保: 日水誌, **51**, 549-555 (1985).
- 7) 上北征男: 水産土木事例と計算法 (II) (出口利祐, 中村 充監修), 日本水産資源保護協会, 東京, 1980, pp. 122-132.