

魚体抗力の測定と抗力馬力

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	米盛, 亨
巻/号	47巻10号
掲載ページ	p. 1329-1334
発行年月	1981年10月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



魚体抗力の測定と抗力馬力^{*1,2}米 盛 亨^{*3}

(1981年5月18日受理)

Drag Measurements of Fish Body and Calculations of Drag Power

TOORU YONEMORI

In the previous paper, the author reported on a method to measure towing power of fish. It was found that a fish on which towing power measurement is being performed must overcome drag force as well as towing load.

In the present paper, methods for drag measurement were explained and the drag power was calculated. Then, towing power and drag power of a fish were combined together in a diagram. The diagram will be available not only for the estimation of maximum free swimming speed of fishes, but also for the reevaluation of validity of the drag measurements.

Through the measurement at relatively rapid stream in running water, live fishes showed rather higher drag than freshly killed fishes.

These drag increments were considered effect of mouth opening action and operation of fins to keep body stability. Moreover, in even a fins-amputated fish, it was observed that postures of twisting or bending body caused a higher drag.

前報¹⁾では魚の遊泳馬力のうち牽引馬力の測定について報告したが、本報では牽引馬力の測定に際して魚体に加わるもう一つの力である水の抵抗すなわち抗力の測定法および抗力馬力について述べる。

抗力は魚の自由遊泳時に魚体に作用する唯一の外力であり、この測定法については多くの実験が試みられているが未だにきめ手がない。また、GRAY,²⁾ BRETT,³⁾ GERO⁴⁾らは生魚が抗力低減のための何らかの機能を備えている、遊泳馬力を節約しているに違いないと主張しているがこれについても確証がない。遊泳魚体の抗力が判明すれば、その値と遊泳速度とより自由遊泳馬力は容易に計算できる。

従来の測定では魚体模型が多用されてきたが、著者は死魚と生魚を用いて種々の測定法を試みた。著者が魚体模型の使用を排したのは、(1) 生魚の抗力測定はかつて報告されていない。(2) 即殺直後の死魚体は生魚との性状(魚体表面の粘液や魚体の弾性等)に共通点が多い。(3) 魚体模型の製作には相当の日数と費用がかかる上に、実物との形状誤差の入り込むおそれがある等の理由による。本研究の抗力測定は流水中および静水中で行われた。

実験方法

流水中での測定 測定は鹿児島大学水産学部の大型回流水槽で行われたので供試魚は淡水魚に限られ、主としてティラピア *Sarotherodon mossambicus* を用い、コイ *Cyprinus carpio* を併用した。以下に述べる諸測定法は死魚にも適用できるが、特に生魚を念頭に置いたものである。

測定法 I ストレンゲージ、A、B で検出される張力は 2 ch. の記録計に同時記録され、A の張力から B の張力を減じた値を魚の抗力とした。

測定法 II 方法 I の欠点を除くためにゲージ B を紡錘型水没体に取り付けた。

測定法 III 方法 I、II の欠点を除き、被験体の振れ動きを抑制するために、A、B のストレンゲージを固定し、両ゲージに僅かな初期張力を与えるように張り合わせた。

測定法 IV Fig. 1~3 に見られる滑車の使用をとりやめ、2 本のてこ棒を用いて張り合わせた。このままでは両てこ棒の抗力がすべてゲージ A にかかるので、L₁、L₂ それぞれの抗力を打ち消す目的の補助てこ棒 L₁'、L₂' を Fig. 4 の詳細図のように組合わせた。

*1 魚の遊泳馬力に関する力学的研究—II(Dynamical Studies on the Swimming Power of Fish—II).

*2 本研究の概要は昭和 48 年度日本水産学会秋季大会で発表した。

*3 鹿児島大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Kagashima 890).

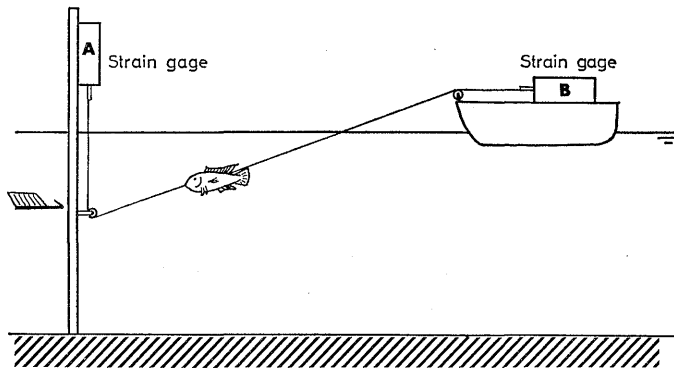


Fig. 1. Method I to measure drag force of fish.

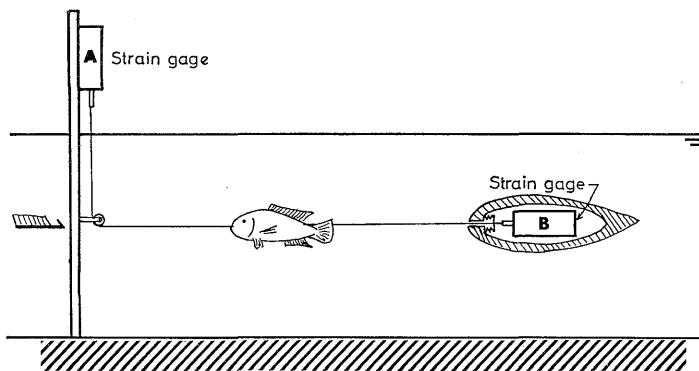


Fig. 2. Method II to measure drag force of fish.

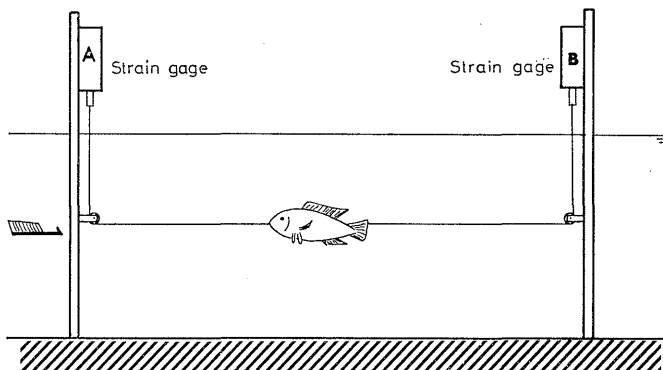


Fig. 3. Method III to measure drag force of fish.

静水中での測定 静水中では曳航式測定法をとらざるを得ないが、予備実験は船による曳航テストとして海上で行われた。さらに精度の高い測定を本学部所在の50m水泳プールでティラピアと養殖ハマチの死魚体を用いて行った。種々の抗力測定装置を使用したFig. 5は抗力測定専用の装置であり、Fig. 6は牽引馬力と抗力馬力の兼用測定装置として自作したものである。Fig. 5については説明の必要もないと思われるのでFig. 6について述べる。前報¹⁾で報告した馬力測定装置やFig. 5で

は、糸の張力検出にUT型ストレンゲージと滑車群の組合わせを採用したが、滑車の摩擦や糸のはずれなど不都合が多いので、Fig. 6においては小型のトルクメーター(共和電業製TP-10KCE型)を組込むことによって欠点をとり除いた。ベルトによってトルクメーターと連結されたモーターは、牽引馬力測定時には魚によって回転させられて発電機として機能する。その際に可変抵抗器の調節によって遊泳エネルギーを熱量に変換しながら、所要の発電制動を行うので錘に代る可変量の牽

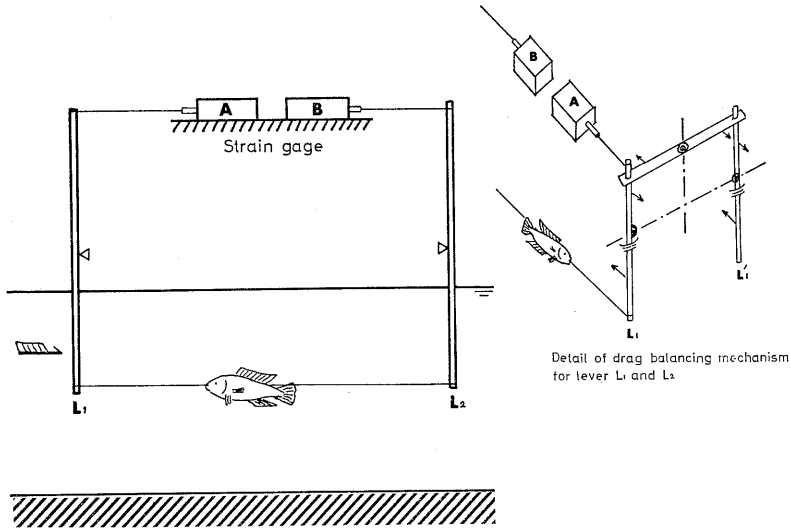


Fig. 4. Method IV to measure drag force of fish.

Drag of each lever (L_1 and L_2) is canceled by means of balancing mechanism, thus, drag of fish body = tension ($A - B$).

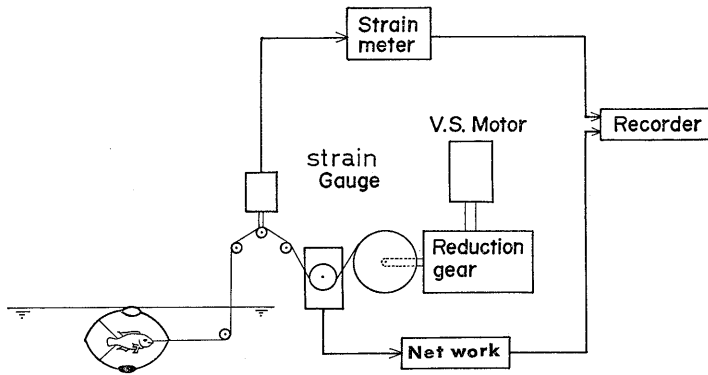


Fig. 5. Towing type apparatus to measure drag force of fish.

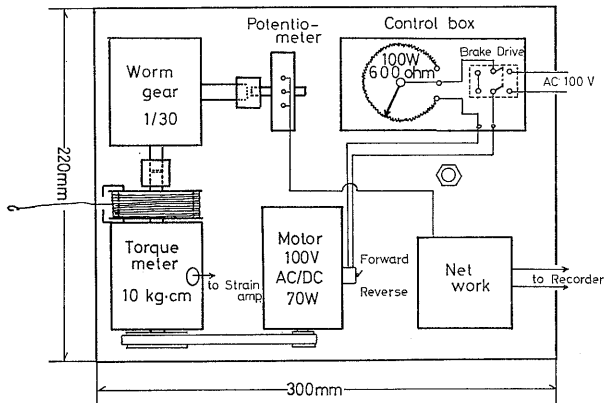


Fig. 6. Improved apparatus for a double use in the measurement of both towing power and drag force.

引負荷となる。一方、抗力測定時には AC 100 V をミンモーターに供給し、切換スイッチを操作して逆転させ、可変抵抗器の調節によって 0.3~3.0 m/s の任意速度で体重 1.5 kg のハマチを曳航することができる。

死魚体曳航の予備実験において、簡単な口掛け曳航では 1 m/s の速度になると魚体が振れ廻り、時には旋回運動を行うのでこれを防ぐ目的で Fig. 5 に示される魚体支持装置を作製した。これは直径 1.5 mm のピアノ線で輪を作り魚体を糸で張り合わせて鉛直に支持するものである。そのために、輪の上部には流線型のフロートを、下部には同じく鉛製のケースをとりつけてこの中に小鉛球を入れて支持装置を含めた魚体の浮力調整を行うようになっている。生魚の抗力測定に際して魚の前進行動や逃避行動による測定誤差を防ぐために、魚体を拘束する効果をもこの支持装置に期待した。

魚体抗力測定は 2 つの手順によって実施される。まず、魚をとりつけた支持装置を種々の速度で牽引して抗力を記録し、次に次持装置のみの抗力測定を行ってからそれぞれの抗力曲線を描き、両曲線の差を魚体抗力とした。こうして求めた魚体抗力値とその時の牽引速度より抗力馬力（自由遊泳馬力、遊泳必要馬力または有効馬力に等しい）を計算し、牽引馬力との関係について種々の考察を行った。

結果と考察

流水中での測定 測定法 I では水面に発生する波による模型船のピッチングと曳索の傾斜角度に起因する誤差が難点であった。そこで測定法 II ではゲージ B を紡錘型水没体の中に収めたが、浮力調整、水密法および導線の引き出しが困難であった。測定法 III では安定した記録が得られ、生魚の遊泳行動も観察できたが、最大の欠点は 2 個の水中滑車の摩擦に基づく感度低下にあった。

滑車の軸受にステンレス製のミニチュアボールベアリングを用いても海中では錆びることが判明した。最終的にはテフロンで滑車を自作して改善したが完全とは言えなかった。

測定法 IV は滑車を全廃する目的でこ棒を使用し、すべての支点を水面上にもってきてボールベアリングを使用した。Fig. 4 の左に示した側面図のような簡単な構成では L_1, L_2 の水中部分の抗力は常にストレングージ A に作用することになり、A の検出する張力から魚体抗力を求めるためには、 L_1, L_2 の抗力を差引く必要が起る。そこで、 L_1, L_2 の抗力を打ち消すためにバランス用の補助でこ棒 L_1', L_2' をそれぞれ右側詳細図のように組み合わせることによって、魚体抗力を直接指示させることに成功した。なお、ゲージ B の使用目的は魚の前進行動の検出にある。

この測定法にはすべてのこ棒位置の流速が等しいという前提が要求されるので、大型回流水槽の流速分布は入念に修正された。

測定法 IV による魚体抗力の測定結果を Fig. 7 に示す。実験材料にはティラピア *Sarotherodon mossambicus* を用いたが、この魚は大きな鱗を持ち生魚では体の平衡を保つために対鱗の使用が目立つ。対鱗の使用は大きな抗力増加をもたらすので、本実験では完全魚および対鱗切除魚を対象とし、その抗力を生魚と死魚について測定した。

その結果、鱗の有無に関係なく低速域では死魚の抗力が大きい、ある流速を境に生魚の抗力が卓越するという逆転現象が見られた。このことは生魚の抗力は死魚のそれよりも小さい筈であるという GRAY の paradox の否定を示唆することにつながるが、それを明らかにするためにはさらに精密な測定が必要と思われる。本実験の高速域で生魚の抗力が死魚を上廻った理由には次のこと

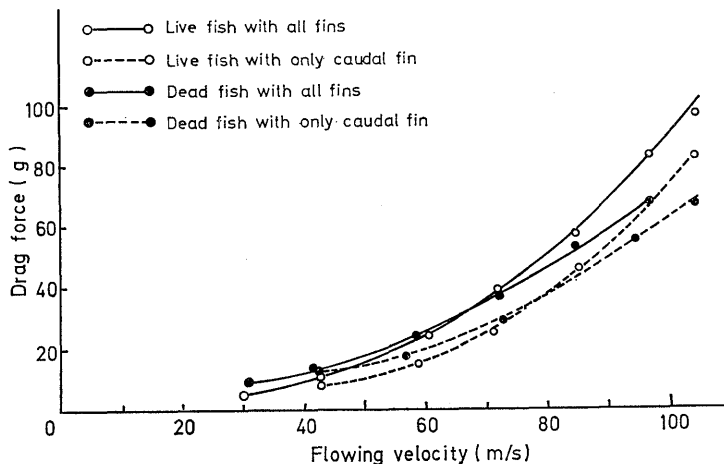


Fig. 6. Drag force of *S. mossambicus* (25.9 cm BL, 267 g BW) measured by method IV.

が考えられる。

(1) 鱗付生魚が高速時に体の平衡保持のため対鱗を使用することは前述したが、鱗無生魚は体をねじることによって姿勢の維持をはかる。(2) 90 cm/s 付近の流速中で口を全開すると約 20 g の抗力増加が見られる。

このように生魚の前後を拘束しての抗力測定結果は予想に反したが、口掛けだけの拘束では遊泳推進力の検出が不可能であり、生魚の抗力測定は極めて困難な課題である。

静水中での測定 ティラピアとハマチの死魚体を支持装置にセットして、50 m プールで曳航して求めた抗力曲線を Fig. 8 に示す。

ティラピアの抗力は Fig. 7 と大差なく、ハマチは体重の割に抗力が小である。ティラピアはハマチに比べて体型が悪く、大きな鱗が摩擦抵抗を増しているためと考えられる。

中速域におけるハマチの抗力が減少傾向を見せている理由は不明である。

牽引馬力と抗力馬力の合成 前報¹⁾ に述べた方法で馬力測定される魚からは牽引馬力だけが知られるが、このとき魚に要求される全遊泳馬力 P_T は牽引馬力と抗力馬力の和であって、

$$P_T = (T + R) \times V / (75 \times 10^3) \text{ ps となる。}$$

この式で、 $T(\text{g})$: 牽引力, $R(\text{g})$: 抗力
 $V(\text{cm/s})$: 遊泳速度 である。

P_T を求めるためには牽引馬力測定に供された魚が次

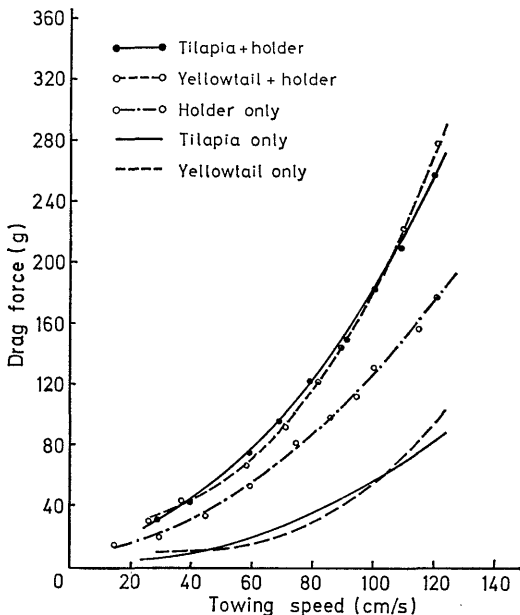


Fig. 8. Dead drag of fishes measured by the towing method.

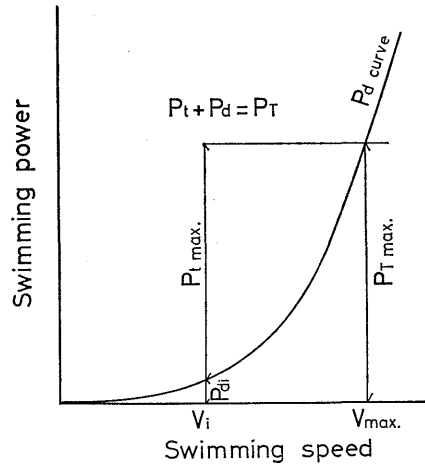


Fig. 9. Procedure to estimate max. free swimming speed from towing power and drag power. P_d curve is drawn from drag measurements.

- P_{di} : Drag power at V_i
- $P_{t \text{ max}}$: Max. towing power
- $P_{T \text{ max}}$: Max. total swimming power
- V_i : Swimming speed at which $P_{t \text{ max}}$ is produced
- V_{max} : Max. expected speed in a free swimming

の段階で抗力試験を受けるが、前述の入念な抗力試験によっても測定値が遊泳魚体の真の抗力を示すか否かは疑問である。

従って、この値の採用に不安は残るが魚の推進力を測定する方法がないので、これを抗力に置き換えて考えているのが現状である。本研究では牽引馬力を中心に論じているがこれも推進力=牽引力という発想から、とにかく推進力を測定にのせて真の遊泳馬力を追究する手段の一つである。ところが、魚が前進すると抗力も加わるのでこれの処遇の手順について次に述べる。Fig. 9において、 P_d 曲線は死魚の曳航試験より求めた抗力をもとにして画いた抗力馬力曲線である。つまり $P_d = R \times V / (75 \times 10^3) \text{ ps}$ であり、抗力曲線がほぼ速度の2乗曲線であるから P_d 曲線は速度の3乗曲線に近くなる。

牽引馬力の測定に当たってある速度 V_i で最大牽引馬力 $P_{t \text{ max}}$ を発生したとき、 V_i より垂線を立てて P_d 曲線の上方に $P_{t \text{ max}}$ をとると、 $P_{t \text{ max}} + P_{di} = P_{T \text{ max}}$ はその魚の発生した全遊泳馬力である。従って、この $P_{T \text{ max}}$ を水平移動して P_d 曲線との交点より速度軸に垂線を下すと、その足 V_{max} はその魚の到達しうる最高自由遊泳速度となる。結局、 V_{max} においては牽引馬力 P_t は必要でなく全馬力が抗力にうちかつために消費される。

牽引馬力測定に際して魚が全力遊泳すれば V は牽引荷重の大きさによって定まるから、牽引荷重を大きく選ぶと V が低下して P_T に占める P_t の割合を高めるこ

とになり有利に見える。しかし、 V の低下は P_i, P_a, P_T の急速な減少をもたらし、 $V=0$ ではすべての馬力がゼロに収斂する。従って、牽引荷重をどの程度に選ぶかという問題は、牽引馬力を用いて魚の遊泳能力を表現する上で極めて大切な力学的条件である。この点は続報において論議したい。

文 献

- 1) 米盛 亨: 日本誌, **44**, 127-130 (1978).
- 2) J. GRAY: *J. Exp. Biol.*, **13**, 192-199 (1936).
- 3) J. R. BRETT: *Trans. R. Soc. Can.*, **1**, 441-547 (1963).
- 4) D. R. GERO: *Am. Mus. Noviet.*, **1601**, 1-32 (1952).