

原著論文

機関過給圧を利用した 沿岸漁船の燃料消費計測法の開発

長谷川勝男*

Development of fuel consumption measurement method
for coastal fishing boats using engine boost pressure

Katsuo HASEGAWA

Fuel-saving in fishing boats is urgently needed to reduce fuel costs and CO₂ emissions for prevention of global warming. One effective fuel-saving measure is cruising at economic speed. Thus, it is necessary to evaluate the actual fuel consumption rate of fishing boat engines. In this study, I developed a new measurement method to estimate the fuel consumption rate from boost pressure of supercharged engines. Engine bench tests were performed with a Yanmar 4CH-ST engine. Consequently, the fuel consumption rate could be estimated as a function of boost pressure only, regardless of engine speed and torque. Therefore, the fuel consumption rate for each fishing boat can be estimated using the relationship between boost pressure and fuel consumption derived from engine performance test data at factories. This measurement system was tested on a coastal fishing boat. The result showed that the monthly total fuel consumption estimated by this method was 5–11% higher than the actual refueling amount. These values were considered acceptable accuracy for applications such as determining the economic speed of fishing boats.

キーワード：漁船機関, 過給圧, 燃料消費, 底びき網漁船

2020年5月26日受付 2021年5月28日受理

日本各地では多種多様な漁業が営まれており、漁船の燃油消費に係るエネルギー使用構造は、その漁法や漁船規模などの条件により様々である(長谷川 2010)。燃油価格の推移を見ると、平成 20 年夏には最高値を記録し、漁業種によっては経費に占める燃油費の割合が 30～40% となり、漁業者の自助努力も限界に達したことから、全国的な一斉休漁が実施された。直後に原油価格は反落したものの、それ以降も燃油価格は乱高下を繰り返しながら高止まりの状態に現在に至っている(水産庁 2020)。急激な燃油価格高騰による漁業経営への影響を緩和するための施策として、セーフティーネット構築事

業が平成 22 年度から開始され、多数の漁業者が参加している。漁船漁業においては、燃油依存体質から脱却した漁業経営の安定が求められる。また、地球温暖化防止の観点からも CO₂ 排出量を削減する省エネルギー型の漁業生産構造への転換が急務である。

漁船の省エネルギー方策の一つに、航走時の減速運転が有効とされる(水産工学研究所・開発調査センター 2013)。船舶は、速力の増加に伴って推進抵抗が急激に増大するため、ある船速以上では、機関出力を増加させても船速の伸びは極僅かとなる。従って、燃料消費(=出力とほぼ比例)を抑えるためにも、経済速力の航走が

* 水産研究・教育機構 水産技術研究所 環境・応用部門 水産工学部
〒314-0408 茨城県神栖市波崎 7620-7

Fisheries Engineering Division, Environment and Fisheries Applied Techniques Research Department, Fisheries Technology Institute, Japan
Fisheries Research and Education Agency, Hasaki 7620-7, Kamisu-shi, Ibaraki 314-0408, Japan
khase@fra.affrc.go.jp

望まれる。操船者に燃料消費の実態をリアルタイムで提供することで、燃油の節約（経済速力の指向）へ意識が働くものと期待される。このようなソフト面からの省エネルギー方策として、著者らは、燃油流量計を用いて燃料消費の見える化装置の開発・普及に取り組んできた（長谷川ら 2013, 溝口ら 2015）。また、燃油流量計を用いない燃費の見える化として、機関回転数と給気圧の計測値と等燃費曲線を用いて燃料消費を算出する見える化装置が製品化されている（田口 2015）。しかし、本製品は適用対象が特定の機関に限定されており、沿岸漁船への広範囲な普及を考慮すると、より簡便な燃料消費の算定手法の開発が必要である。

本研究では、沿岸漁船に搭載されるディーゼル機関を対象に、過給圧（給気圧）から燃料消費を推定する手法を開発した。従来の燃油流量計を使用する手法では、燃油タンクと機関の循環ラインに流量計を設置して燃料消費を計測してきた（図 1）。しかし、機関室が狭隘な沿岸漁船では、機械類の点検整備など作業性の面から機関室に燃油流量計を設置するスペースの確保が困難な場合もあった。また、漁船の燃油タンクには汚れや沈殿物が

多く、これらが流量計の可動部やフィルタを閉塞させ機関停止に至る恐れがあることから、定期的な流量計の点検整備が必要であった。そこで、メンテナンスフリーで長期使用が可能な計測システムとして、本研究では、機関の過給圧から燃料消費を算定する手法を検討した。

材料と方法

漁業調整規則で厳しい出力制限が課せられる漁船には、無過給のディーゼル機関の搭載例があるものの、沿岸漁船の多くは、排気タービン過給機を装備した高速高出力型のディーゼル機関が搭載されている。過給機関では、排気ガスで駆動するタービンと同軸上のコンプレッサーによって吸入空気を圧縮した後、空気冷却器を経由して燃焼室に給気される。漁船機関の高出力化に伴って、燃焼に必要な量の空気を燃焼室に供給するために、排気タービン過給機と空気冷却器の装備が不可欠である。本研究では、機関出力に密接に関係する過給圧と燃料消費の関係式を導出して、過給圧から燃料消費を算定した。なお、機関の燃料消費は瞬時値 (L/h) を表し、燃料消費量は積算値 (L) と定義する。

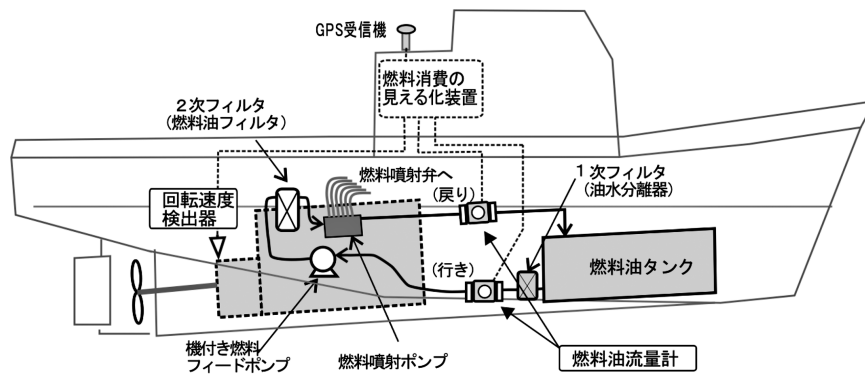


図 1. 燃油流量計を用いた燃料消費計測法

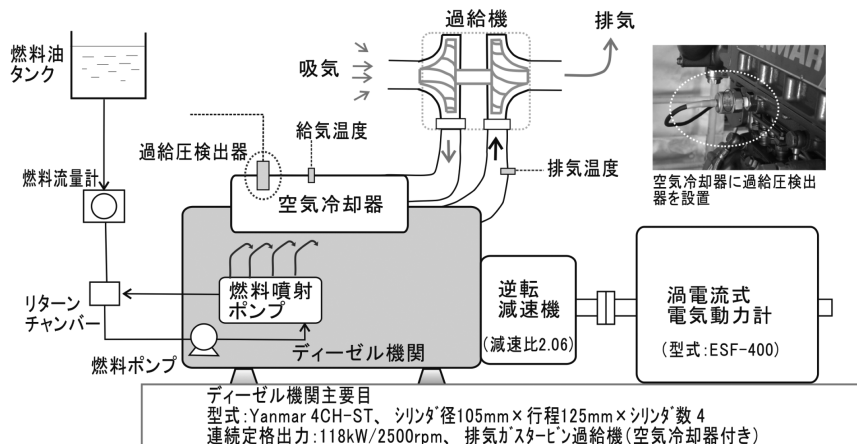


図 2. 機関実験装置

陸上試験 水産技術研究所神栖庁舎機械実験棟の機関実験装置を用いて、機関出力、過給圧および燃料消費の関係調べた(図2)。実験機関は、過給機・空気冷却器付きのヤンマー製4気筒ディーゼル機関(定格118kW/2500rpm)である。機関出力軸は、減速機を介して動力吸収装置(渦電流式の電気動力計)に接続され、機関回転数と動力計の吸収トルクをそれぞれ独立に変更することで任意の出力が設定可能である(長谷川ら1995)。

一般に船舶のプロペラ軸出力は、船速のほぼ3乗に比例して増大することから、推進用機関は機関回転数の3乗に比例する出力特性(船用3乗カーブ)のもとで機関性能が評価される。一方、漁船の特殊性として、底びき網漁船の曳網時のように3乗カーブから逸脱した負荷条件(例えば低回転・高トルク)で機関が運用される場合もある。これらを考慮して、機関出力($kW \propto \text{回転数} \times \text{トルク}$)を回転数の3乗に比例させた3乗カーブの条件を基本とし、これに加えて回転数を固定してトルクを変更する実験を行った。燃料には軽油を使用した。設定した運転負荷条件を図3に示す。トルクは定格出力時を100%として示した。実験では、機関回転数(rpm)、吸

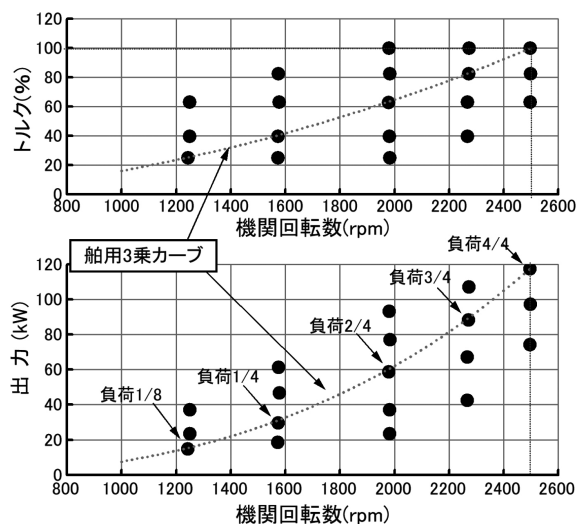


図3. 陸上試験の運転負荷条件

収トルク(Nm)、過給圧(kPa)、過給温度($^{\circ}C$)、排気温度($^{\circ}C$)、燃料流量(L/h)を計測した。過給圧の計測は、明陽電機(株)製・圧力発信器HTI-500KPと表示器HTTM-204を用いた。燃料流量は、(株)小野測器製・容積式流量検出器FP214により計測した。一連の実験から、種々の負荷条件における機関出力、過給圧および燃料消費の関係調べ、燃料消費を過給圧から算定する手法を検討した。

実船調査 上越漁業協同組合所属の小型底びき網漁船(FRP, 9.7トン)を調査対象として、主機関および補機関の燃料消費特性を調査した(写真1, 図4)。本船は、底びき網操業を主として吾智網の操業も行う。どちらの操業もかけ廻し式であり、網部分の交換のみで操業を切り換えることが可能である。搭載されている主機関および補機関とも過給機・空気冷却器が装備されている。本船の主機関(Yanmar 6AYB-WGT, 540kW/1938rpm)は推進に使用され、補機関(Yanmar 4CHP-WST, 128kW/2520rpm)は漁労ウインチの油圧および冷水機の動力源として使用される。揚網・揚網用の漁労ウインチは、補機関の回転数の変更により出力が調整される。両機関の燃料消費を計測するために、それぞれに過給圧検出器を設置し、これらの出力を10秒毎にデータ収録した。船位と船速はGPSロガーで10秒毎に収録した。計測期間は、平成30年5月1日から7月31日までの3ヶ月間とし、操業日別に本船の燃料消費実態を調査した。



写真1. 調査船対象漁船

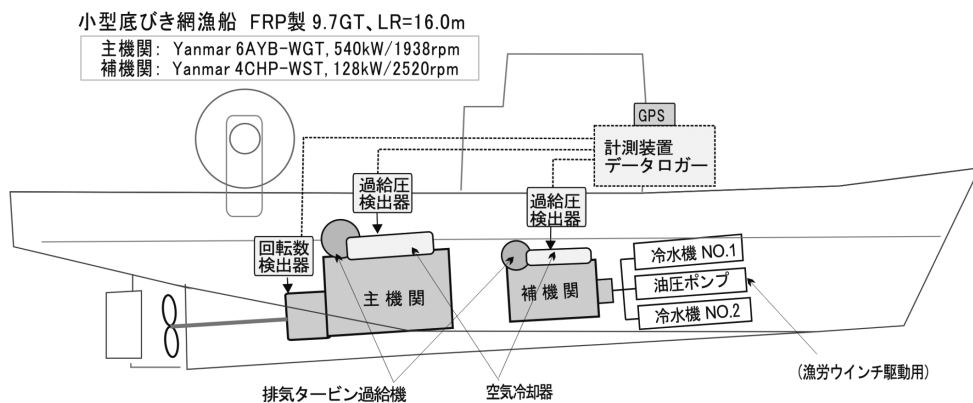


図4. 実船試験(過給圧利用の燃料消費計測装置を設置)

搭載機関の燃料消費推定 調査対象漁船に搭載されている機関の工場試験データを用いて、過給圧から燃料消費を算定する近似式を求めた。漁船機関メーカーは、製品出荷時に工場で性能試験を実施し、船用3乗カーブなどに従った運転条件（負荷1/4, 2/4, 3/4, 4/4）で、機関回転数、出力、過給圧、排気温度および燃料消費などを計測する。高速機関（定格回転数1500rpm以上）は、高速化を指向する半滑走型船型の漁船へ搭載されるため、3乗カーブに替わって2.5乗や2乗カーブに従った工場試験が実施される場合がある。本船に搭載されている主機関および補機関の工場試験は、それぞれ船用2.5乗カーブ、船用3乗カーブで実施されていた。なお、A重油使用の工場試験に対し、本船では軽油使用と油種が異なるが、容積換算の燃料消費(L/h)に及ぼす影響は2%程度であり(長谷川1995)、ここでは油種の影響は無視する。

燃料消費量推定値と給油量の比較 調査漁船は、漁業構造改革総合対策事業・上越地域プロジェクト「改革型漁船などの収益性改善の実証事業（沿岸漁業版）」対象船のため、毎月の給油量を記録している。本船は操業を終えて帰港の都度、燃油タンクに満杯まで軽油を給油している。この月別の給油量を実値として、本研究で推定した燃料消費量を比較し、過給圧から算定した燃料消費量の推定精度を検証した。

結果

陸上試験 機関実験装置において、船用3乗カーブに従って負荷1/8, 1/4, 2/4, 3/4, 4/4に対応するそれぞれ

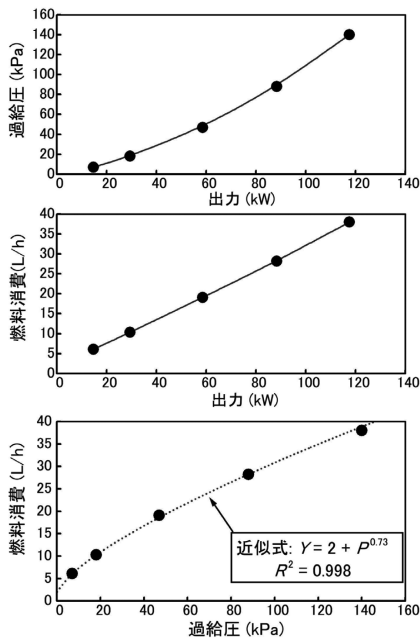


図5. 出力、過給圧と燃料消費の関係
(陸上試験、船用3乗カーブで試験)

れの回転数1250, 1575, 1984, 2271, 2500rpmのもとで、トルクを20~100%の範囲で変更して機関実験を行った(平成26年10月に実施、運転負荷条件は図3参照)。なお、試験時の吸気温度は18~24℃であった。

船用3乗カーブ上の出力に対する過給圧および燃料消費の関係を図5に示す。また、過給圧と燃料消費の関係を図5下段に示す。燃料消費は、過給圧の上昇とともに上に凸の曲線で増大した。船用3乗カーブに従った計測結果を基に、実験機関の過給圧 P (kPa)と燃料消費 Y (L/h)の関係を(1)式で近似した。

$$\text{実験機関: } Y = 2 + P^{0.73} \dots (1)$$

機関回転数を固定してトルクを変更した試験結果を図6に示す。過給圧に対する燃料消費は、機関回転数とトルク

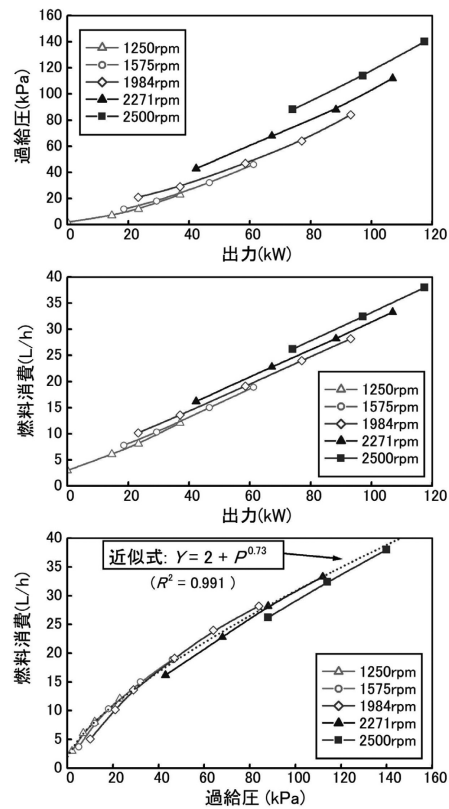


図6. 出力、過給圧と燃料消費の関係
(陸上試験、トルク変更試験)

クをそれぞれ独立に変更する幅広い運転条件でも一つの曲線に収斂した。燃料消費は近似式(1)と高い相関が得られた($R^2=0.991$)。従って、トルクが幅広く変動する運転条件であっても、船用3乗カーブの結果から得られた(1)式を用いて燃料消費が算定可能と判断した。即ち、漁船搭載機関に対して、回転数固定でトルクを変動させた運転条件の計測データは不要であり、船用カーブ(実験機関では3乗カーブ)上の計測データから導出した近似式は、船用カーブから逸脱した負荷条件の燃料

消費の算定にも適用可能であることが示唆された。

$$\text{主機関: } Y_M = 4 + 6.5 \cdot P_M^{0.49} + 0.0000028 \cdot P_M^3 \quad \dots(2)$$

漁船の燃料消費推定

漁船機関の販売代理店から入手した工場試験データを用いて、調査対象漁船に搭載されている主機関と補機関の過給圧と燃料消費の関係式を導出した(図7)。主機関の燃料消費は、過給圧が100 kPa以下の範囲とそれ以上の範囲で傾向が異なることを考慮して、2つのべき乗項を組み合わせた近似式とした。近似式のy切片は、アイドリング時(過給圧0 kPa時)の燃料消費を4 L/hと仮定した。一方、補機関は、陸上試験機関とほぼ同様の近似式で表された。このクラスの機関は、アイドリング時の燃料消費は2 L/h前後であるためy切片は2とした。主機関および補機関の燃料消費 Y_M , Y_A (L/h) を、それぞれの過給圧 P_M , P_A (kPa) の関数として、以下の式で表した。

$$\text{補機関: } Y_A = 2 + 0.8 \cdot P_A^{0.75} \quad \dots(3)$$

操業時の燃料消費の計測

本船の主機関および補機関の燃料消費を近似式(2), (3)から算定した。平成30年5月16日操業の計測例を図8に示す。当日は、3時出港で底びき網を3回操業して一旦帰港し、漁獲物を陸揚げして再び漁場に向かい、吾智網操業を4回繰り返した後、14時過ぎに帰港した。図8に示す燃料消費は、主機関・補機関それぞれの過給圧から算定した推定値である。主機関の燃料消費は、17ノット航走時に約120 L/hであった。一方、補機関は揚網時の漁労ウインチ駆動に最大20 L/hの燃料消費であった。1日の燃料消費量は、主機関が425 L、補機関が50 Lと算定された。当日の航走距離は68.5海里(nautical mile, 以下 nm)であった。

漁船航走時の燃料消費特性

実船調査のうち、5月1日から5月18日までの計測データを用いて、航走時の主機関の燃料消費(過給圧から推定)について調査した。主機関回転数および船速に対する燃料消費を図9に示す。船速8~16ノットの範囲では、燃料消費は直線的に増大する傾向となった。船速18ノット航走時の燃料消費が120~140 L/hの範囲でばらつきが見られるのは、波浪や風向など気象・海象条件の影響と考えられた。航走距離当たりの燃料消費(L/nm)に換算すると、船速16ノット付近でピークを持つような特性となった。

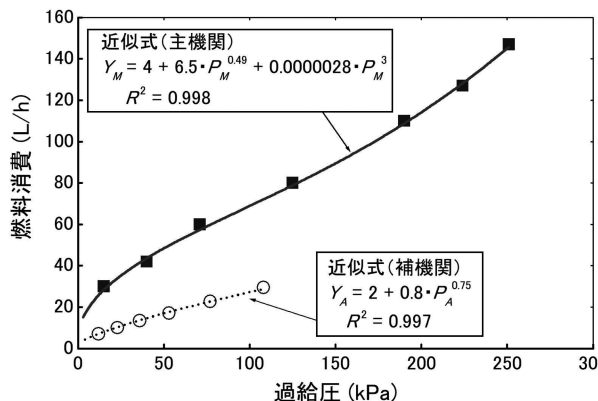


図7. 漁船搭載機関の過給圧と燃料消費の関係(工場試験データから導出)

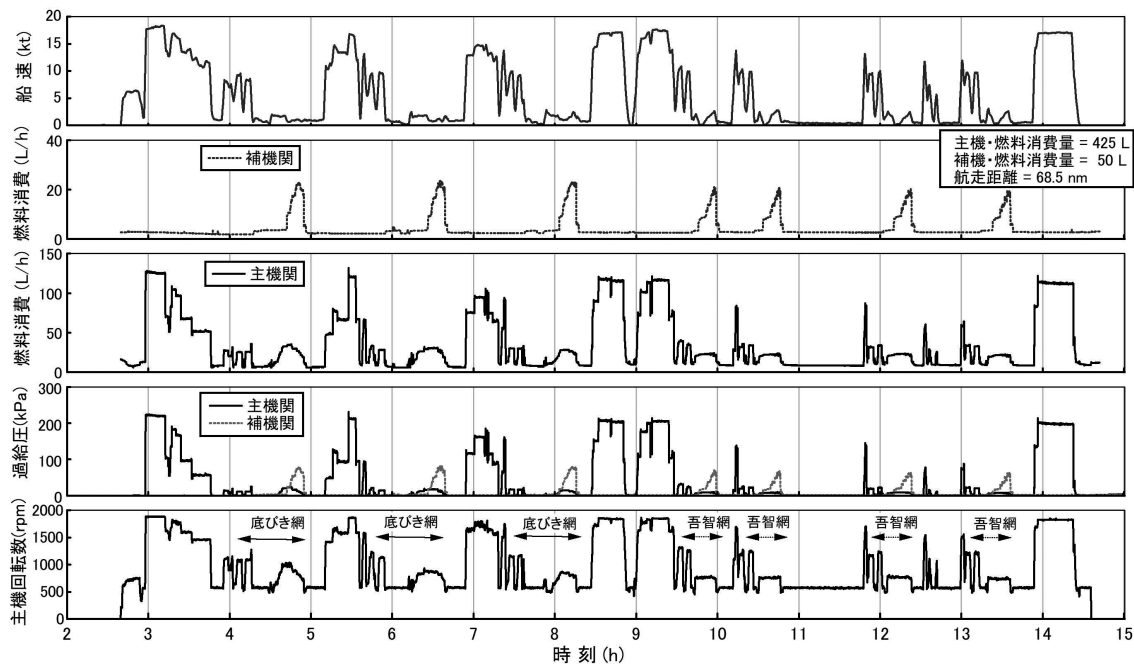


図8. 実船調査の一例(平成30年5月16日操業)

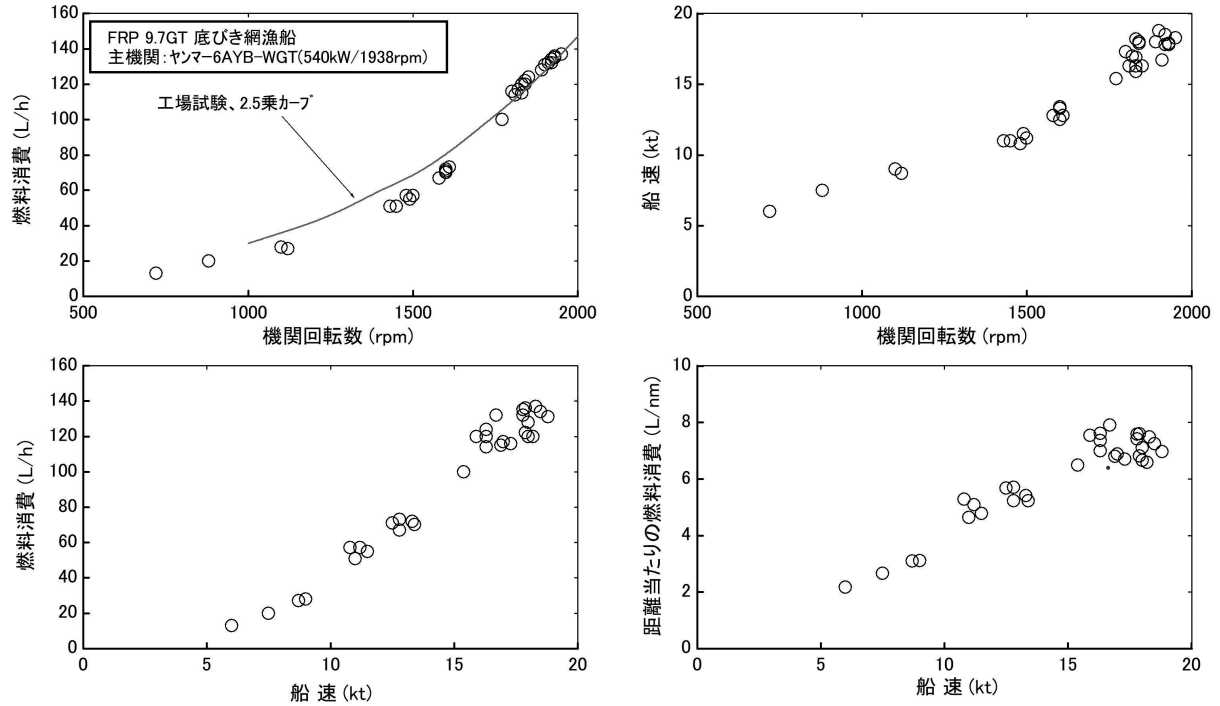


図9. 漁船搭載主機関の燃料消費特性

航走距離と燃料消費量の関係 操業1日当たりの航走距離と燃料消費量の関係を図10に示す。航走距離はGPSロガーから算出した。燃料消費量(L/day)は、過給圧から算定した燃料消費を積分し、主機関と補機関の合算値を示す。当地区では、底びき網が禁漁の7～8月は、もっぱら吾智網操業を行い、5～6月は底びき網を主として

吾智網も操業する。漁法の違いが燃料消費量に影響を及ぼす可能性を考慮して、図10では5・6月と7月に区分してデータをプロットした。航走距離の増大に伴って燃料消費量は、ほぼ直線的に増大する傾向となった。また、5・6月と7月の比較から、漁期の違いによる顕著な差は観察されなかった。

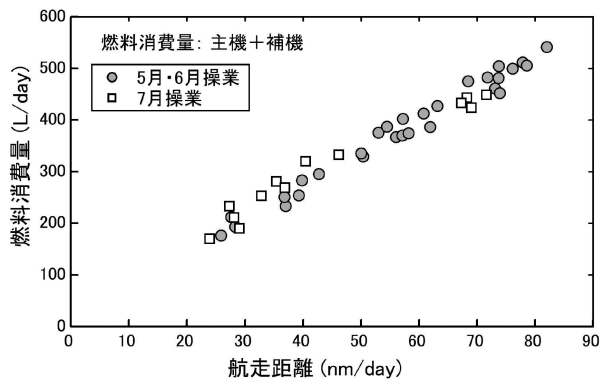


図10. 航走距離と燃料消費量の関係

推定した燃料消費量と給油量の比較 主機関、補機関の値を合算した月別の燃料消費量と月別給油量を表1に示す。過給圧から近似式を用いて算定した燃料消費量をA、実際の給油量をBとしてA/Bを計算すると、5～11%ほどAが大きくなった。即ち、過給圧からの推定法は、燃料消費量を過大評価する結果となった。

考 察

本研究で提案した機関の過給圧から燃料消費を算定する手法は、ディーゼル機関の給気口空気冷却部に圧力検出器を装着する簡便な施工で実現可能である。これまで、

表1. 過給圧から算定した燃料消費量と給油量の比較

	操業日数 (day)	過給圧から算定した燃料消費量(L/month)		給油量(L/month)		A/B (%)
		主機関	補機関	A:合計	B	
H30年5月	15	5,566	633	6,189	5,865	105.5
H30年6月	14	4,299	498	4,797	4,516	106.2
H30年7月	13	3,395	620	4,015	3,605	111.4

燃料消費の計測に活用されてきた燃油流量計では、燃油タンクに汚れや沈殿物が多い場合、これらが流量計に通油されるとゴミの噛みこみやフィルタ閉塞などの不具合が生じる恐れがあった。実際、著者はA重油使用の漁船で燃油タンク内のスラッジ（沈殿物）により燃油流量計で詰まりが発生し、機関停止に至ったトラブルを経験した。流量計装備から3年経過時の出来事であり、定期的な分解整備を怠ったことも原因の一つと考えられた。これらの反省の上に、長期使用でも不具合が生じない燃料消費計測手法が必要と考え、過給圧検出による燃料消費計測システムを検討した。

本法は、機関メーカーが実施した機種毎の工場試験データをもとに、燃料消費を過給圧のみの関数とする推定式を導出し、漁船搭載機関の燃料消費を算定する新たな手法のため、その推定精度の確認が必要であった。実船調査から検証した月毎の燃料消費量は、実際の給油量に対して5～11%大きな値となった。この誤差は、船速と燃料消費の関係など漁船の航走特性の概略評価には許容範囲と考えられるが、精度向上が課題として残る。過給圧から間接的に燃料消費を算定する本手法は、過給圧自体の変動要因が燃料消費の算定に影響を及ぼす可能性がある。漁船では、機関室内から吸入空気を取り込むため室内が負圧になり易いことや、汚れによる過給機の経年劣化などが、過給圧の変動要因になると推測される。

実船調査で算定した燃料消費量と給油量の違いは、5.5%（5月）、6.2%（6月）とほぼ同等であったが、7月は11.4%と乖離が拡大した。その理由の一つとして、機関室内の空気温度が影響していると考えられる。狭い室内で機関を高出力で連続運転すれば、室内温度は50～60℃にまで上昇するものと推測される。過給され高温となった吸気は、空気冷却器で海水冷却されるが、その冷却性能は海水温度に依存する。特に7月には気温と海水温が上昇するため、給気温度は5月、6月よりも高くなる。同一の機関出力（＝同一の燃料消費）に対して、7月の過給圧は5月、6月よりも高くなっているものと考えられる。このことは、真の燃料消費は、図7に示す燃料消費のカーブよりも右側にスライドしたカーブになることを意味する。このことが、7月の燃料消費量が過大評価された主要因と考えられる。本手法の精度向上に向けて、気温の影響に着目して、冬季～夏季を通じた検証が必要となる。

漁船航走時の船速と主機関の燃料消費の特性（図9）の把握は、経済速力の指向など省エネルギー化の参考となる。以下に造船学の観点から考察を加える。船舶航走時には、船速の増加に伴って造波抵抗が急激に増大す

る。造波抵抗（ \propto 造波抵抗係数・船体浸水表面積・船速²）の指標である造波抵抗係数は、フルード数（ $Fn=v/(gLWL)^{0.5}$ 、 v :船速、 g :重力加速度、 LWL :水線長）が0.3以上で増大傾向を示し、0.4付近から抵抗の壁と呼ばれる急激な立ち上がりを経て、0.5付近でピークを持った後、徐々に低下する（池田2006）。本船（ $LWL=17$ m）では船速12.5ノットが $Fn=0.5$ に相当する。図9では16ノット（ $Fn=0.64$ ）付近から燃料消費の増加が鈍っており、距離当たりの燃料消費（L/nm）はこの船速以上でピークを持った後、若干の低減傾向も示す。従って、16ノット以上で造波抵抗係数のピークから減退した抵抗領域となり、船首がやや上がった姿勢、即ち半滑走の状態では航走しているものと推測する。このように漁船航走時の燃料消費を把握することで、造船学的な船体抵抗特性と関連付けた検証も可能となる。

謝 辞

実船調査の実施にあたり、多大なご協力を頂いた上越漁業協同組合および新潟県農林水産部水産課の関係各位に感謝いたします。また、漁船搭載機関（ヤンマー製）の工場試験データを提供頂いたことに謝意を表する。

文 献

- 長谷川勝男（1995）漁船用高速ディーゼル機関の排気ガス特性（軽油、A重油による比較）. 漁船, **317**, 84-93.
- 長谷川勝男（2010）わが国における漁船の燃油使用量とCO₂排出量の試算. 水産技術, **2**, 111-121.
- 長谷川勝男・高橋秀行・小田健一（1995）漁船用高速機関の性能試験と排気計測. 水産工学研究所技報（漁船工学）, **15**, 1-8.
- 長谷川勝男・溝口弘康・伏島一平（2013）漁船の見える化装置の開発と普及. アクアネット, **16**, 60-64.
- 池田良徳（2006）造波抵抗の軽減, 図解雑学船のしくみ, ナツメ出版, 東京, 1-231.
- 溝口弘泰・長谷川勝男・小田健一（2015）漁船漁業の省エネルギー化に向けた「見える化」装置の開発と運用試験. 水産技術, **8**, 9-17.
- 水産庁（2020）A重油及び原油価格の推移（令和2年5月7日）. <https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/net/attach/pdf/index-56.pdf>, 2020年5月12日.
- 水産工学研究所・開発調査センター（2013）漁船漁業の省エネルギーに向けて, 1-46.
- 田口雅則（2015）「燃費の見える化」エコ運転推進装置スマートクルージングアシスト. 海洋水産エンジニアリング, **120**, 89-94.