

改造水素エンジン船外機の開発と無負荷時の特性

江副 覚^{†1}, 高橋昂大², 古川英典³, 伊澤瑞夫¹, 岩井好朗⁴

Development of Remade Hydrogen Out-board Combustion Engine and the Characteristics in no-Load Operating Conditions

Satoru Ezoe^{†1}, Kodai Takahashi², Hidenori Furukawa³, Mizuo Izawa¹ and Yoshiro Iwai⁴

Abstract : The unanticipated price fluctuations of fuels induced by economical oil supply situations have pressed the management of the fishery industry of our country. Also, the environmental problems from global warming or exhausting CO₂ gas have pressed it. Therefore, fishery industry has strongly required to the development of alternative clean fuels that take the place of a fossil fuels. In the alternative fuels, hydrogen has attracted attention as one of an ultimate clean energy resource with recycling and reproducible characters. Because the water would be only exhausted when the hydrogen burns. The hydrogen could be produced from the processes of bio-mass, the natural energy of solar or wind power, reforming gases, sub-productions, etc., that include the hydrogen element.

It was carried out in this study to attempt stable promotion in fishery industry by developing the hydrogen gas combustion engine for fishing boat and by preventing the changes in ocean environment induced by global warming. The conventional out-board gasoline engine was remade to hydrogen combustion engine that was capable of burning the hydrogen gas alternating to gasoline fuel. The remade hydrogen engine could reduce the alternating cost rather than hydrogen engine newly designed and produced would equip. It would contribute to solve the problems of environmental and/or the alternate fuel in an industrial field of the fishery.

This paper presents the results of the basic performance of remade hydrogen engine, the character of exhaust gas, the cost of hydrogen gas, etc.

Key words : Hydrogen, Global warming, Alternate fuel, Hydrogen project, Fossil fuels

はじめに

現在, わが国の水産業には, 地球温暖化に代表される環境問題と水産経営を圧迫している燃油高騰の問題がある¹⁾。そのため, 石油系燃料に代わるクリーンな代替燃料の開発が求められている²⁾。水素は燃焼させても水しか発生しない究極のクリーンエネルギーとして, また再生可能な循環型のエネルギーとして注目を集めている³⁾。著者らは, ク

リーンエネルギー応用の世界的な現状と水素エンジン漁船の開発に関しての概要をまとめた⁴⁾。

漁船漁業における温暖化防止とクリーンで再生可能な代替燃料の開発により水産業の安定的な振興を図るため, 水素を燃料とする漁船の開発に着手した。その中で, できるだけ初期投資を軽減して導入を促進するため, 新規開発ではなく, 漁船に使用されている既存の4サイクル2気筒ガソリンエンジン船外機(公称出力20PS)を, 水素ガスを

2008年12月15日受付. Received December 15, 2008.

1 水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

2 太陽日酸株式会社 (Taiyo Nippon Sanso Co. Ltd., Toyo-Bldg., 1-3-26, Koyama, Shinagawa-ku, Tokyo 142-8558, Japan)

3 水産大学校水産学研究所 (Graduate School of National Fisheries University)

4 岩井商事株式会社 (Iwai Trading Co. Ltd., 2-2-7 Yamamotodori, Chuo-ku, Kobe 650-0003, Japan)

† 別刷り請求先 (Corresponding author) : ezoe@fish-u.ac.jp

燃料として使用できるように改造した。そして、それらの基本的な性能について実験した⁵⁾ので報告する。得られた結果は、馬力等の仕様が異なる漁船用エンジンの水素化に応用可能で、改造の基本的な手法を確立するのに意義がある。

漁船用水素エンジンの開発と異常燃焼の改善

既存ガソリンエンジンの水素エンジン化

エンジンの燃料をガソリンから水素ガスに変更し、空気と水素の混合ガスを爆発膨張させて出力を得るため、既存のガソリン燃料ラインを廃止し、新たに水素ガスラインを

装着した。Table 1 に従来の、すなわち改造前の船外機の仕様を示す。

またFig. 1 に船外機の水素供給システムと水素流量制御システムを示す。初期の改造の段階では、従来の船外機としての使用状況に近い状態、すなわちエンジンの出力を制御するアクセルに相当するスロットルグリップ（以後、スロットルと略称する）に連動したエンコーダでスロットルの回転角を検出し、水素の流量を制御できるように演算・制御装置を試作した。

Table 1 . Specification of outboard gasoline engine

| | |
|-------------------|---|
| Model | 4 cycle 2 cylinder engine |
| Output | 14.7 kW (20 PS)/6000 rpm |
| Bore×Stroke | 59×64 mm |
| Method of exhaust | Exhaust in water (Exhaust by propeller boss) |
| Method of cooling | Water cooling |
| Compression ratio | 9.2 : 1 |

初期水素エンジン船外機の海上走航試験結果

前節ではじめて改造に成功した水素エンジン（以後、第1段階水素エンジンと呼ぶ）の実用化に向けての可能性を把握するため国土交通省や小型船舶検査機構の許可を得て海上走航試験を行った。

従来のエンジンを水素化したのは初めてだったので、海上での走航試験の前に国土交通省検査官の立ち会いの下、陸上で基礎的な性能試験を行った。この試験で第1段階水素エンジンは、海上走航に耐えられる性能がほぼ確認されたので、水産大学校所有のK-1艇に搭載して、試験船として海上走航試験に備えた。燃料の水素ガスは、14.7MPaの充填圧力で容量10ℓの鉄製容器に水素ガスが約1.5m³充填

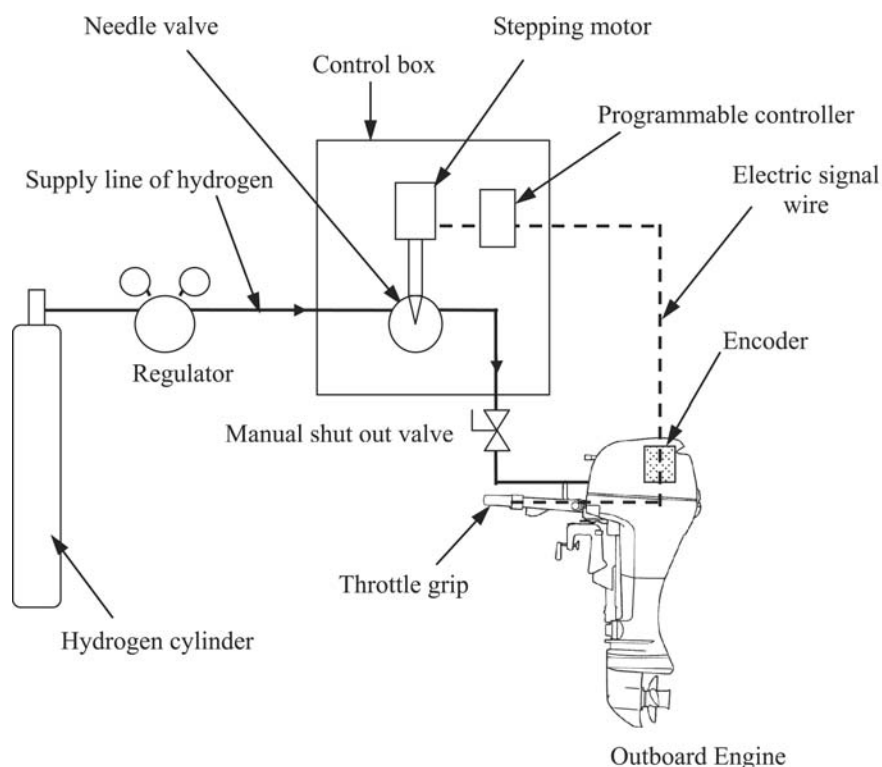


Fig. 1 . Hydrogen mass flow control system in early stage

されている水素ポンペを2本試験船の前部に搭載するとともに、水素ガスポンペの出口に近いところに減圧弁を設置し、吐出圧力を1 MPa以下に減圧してからエンジンに供給した。その状態で、実用化に向けて第1段階水素エンジン船外機の海上での性能確認試験を行った。その状態をFig. 2に示す。また、第1段階水素エンジン船外機の海上走航結果の概要をTable 2に示す。この第1段階水素エンジン船外機船の試験走航時に使用した水素ポンペ1本(1.5m³)あたり、平均船速が約6 knotで約20分間の航行が可能であった。

しかし、海上走航試験において船速を上げた時、波浪による負荷の変動でバックファイアによると思われる異常音が発生した。

水素エンジン船外機の改良

前述のように、第1段階水素エンジン船外機は海上試験走航時に波浪の影響によると考えられる異常燃焼が起こった。またその後の実験室内での運転性能確認試験中に不具合が生じた。そこで、その誘因の究明とそれに対する対応について以下に述べる。

(1) 水素流量制御系の異常

第1段階水素エンジン船外機の海上試験走航を終えた後、室内実験室にて始動しようとしたところ、スタータモータの回転は確認できるがエンジンが始動しないという不具合が生じた。エンジンを分解しその誘因を調べたと

ころ、エンジンが放出した熱によりスロットルの回転角を検出しているエンコーダが作動していないのがわかった。これはエンジンの熱が伝わり、エンコーダが加熱することによりその使用限度温度を超えたため故障したのと考えられた。そこで、故障したエンコーダを取り外し、水素流量を制御するのに手動開閉可能なプラグバルブを使用して調節することにした。Fig. 3にエンコーダと水素流量制御盤を取り外した水素配管図を示す。これにより、エンジンの出力をスロットルで調整できなくなったが、直接手動により水素流量が調整可能になり、安定して運転できるようになった(以後、このエンジンを第2段階水素エンジンと呼ぶ)。

(2) 水素エンジンCDIユニットの異常

さらにその後、第2段階水素エンジン船外機の水素消費量を測定する実験において、運転中に異常燃焼を起こしエンジンが停止した。再度エンジンを分解し原因を調べたところ、電子部品が多く使われているCDIユニット装置のエンジン側取付部の外壁プラスチックが融解しているのがわかった。この誘因は、エンジンの熱がCDIユニットに伝わり回路に不具合が生じたものと考えられた。

ガソリンエンジンの燃焼温度は、理論上では2000~2500℃なのに対し、水素の燃焼温度は3000℃にのぼるため、ガソリンエンジンよりも水素エンジンの方が運転中の温度が上昇し、それがCDIユニットに伝わり、長期に亘って高熱に曝されたためと考えられる。そこで、エンジン本体から



Fig. 2. Test cruising of small boat with hydrogen outboard engine

の伝熱を少なくするため、CDIユニットの取付部やボルト等の締付部からCDIユニット本体に熱が伝わるのを遮断した。すなわち、できるだけエンジンの熱の影響を小さくするため、CDIユニットとエンジン本体の間に断熱材の一種であるベークライトを挟んで取付ける構造にした。

この改良により、これ以降エンジンの動作不良は起こらなくなった（この第3段階水素エンジンは現在まで不具合なく運転が可能であるので、この第3段階水素エンジンを以後、水素エンジンと呼ぶ）。

改造水素エンジンの基本的な特性に関する実験と結果

水素燃料消費量測定

(1) 水素燃料消費量測定実験方法

Table 2. Experimental result of trial sea cruising of small boat by outboard hydrogen engine

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| Type of hydrogen cylinder | 10 ℓ (1.5 m ³) |
| Hydrogen pressure in cylinder | 14.7 MPa |
| Hydrogen supply pressure | 0.08~0.09 MPa |
| Trial max speed | 6 knot |
| Cruise time | 20 min/cylinder |
| Trip per unit mass hydrogen | 2.4 km/m ³ |

[1 knot = 1.852 km/h]

水素の消費量は市販の精密水素流量計で計測できるが、研究室には備えられていなかったため、水素ボンベ圧力とエンジン停止後記録した水素ボンベ圧力との差を体積に置き換えることで推算した。エンジン回転数における水素エンジン船外機の回転数と水素燃料消費量の相関関係を調べた。

使用したボンベは、14.7MPaで7 m³の水素が充填されているため、1 MPa消費すると約0.48m³の水素を消費したと推定できる。今回の実験では、1000rpm~5000rpmの範囲で、1000rpmごとの回転数において25分間連続運転を行い各回転数でそれぞれ2回ずつ計測して平均し、水素燃料消費量を推定した。

(2) 水素燃料消費量実験結果

Fig. 4 に、無負荷運転時におけるエンジンの各回転数における水素エンジン船外機の水素燃料消費量を推算した結果を示す。この推算結果から、エンジン回転数と水素消費量が直線的に比例していることがわかった。

排出ガスのNO_x濃度と燃焼に供されるO₂濃度の測定

水素エンジンは、燃焼しても水しか排出しないので、温暖化ガスの一種である二酸化炭素を排出しない。しかし、水素の燃焼には空気中の酸素を使用するので、シリンダ内で高温になった空気中の窒素が酸素と化学反応を起こして窒素酸化物（NO_x）が生成されるので、これが排気管から排出される可能性は否定できない⁶⁾。水素エンジンの欠点の一つは、このNO_xを排出する可能性があることである。

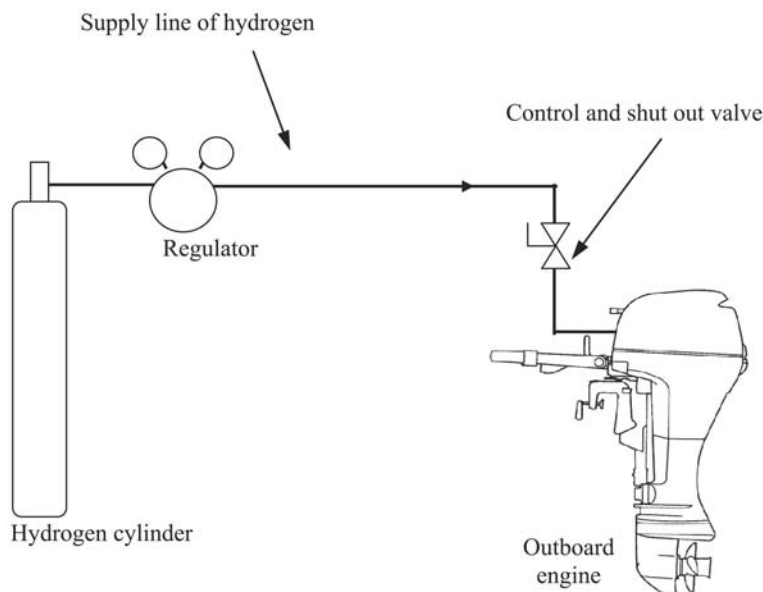


Fig. 3. Flow rate control system and piping diagram of hydrogen after upgrade

陸上交通機関では、平成10～11年では0.30g/km、平成19年では0.15g/kmと、NO_xの排出規制は年々厳しくなっている⁷⁾。日本の船舶分野においては、明確な数値規制は未だないが、今回試作した水素エンジンがどの程度NO_xを発生するか、EPA（アメリカ環境保護庁）が定めた2008年の最終規制値をクリアしている水素エンジン船外機と同型のガソリンエンジン船外機を比較してみた。また、同時に酸素濃度を測定することにより、実際に水素と酸素がどの程度の割合で燃焼しているか、空燃比を算出し、希薄燃焼なのか、燃料過多なのかを調べた。

(1) NO_x濃度とO₂濃度の測定方法

水素エンジンから排出されるNO_x濃度とO₂濃度の測定には、S社製の化学発光式酸化窒素・酸素分析計を使用した。水素エンジン船外機と水素エンジンと同型のガソリンエンジン船外機を、エンジン回転数2000rpm～4000rpmの範囲において、それぞれ1000rpmごとの回転数で各エンジンの排気ガスから排出されるNO_x濃度とO₂濃度の計測を行った。

また、NO_xの排出が確認されたガソリンエンジンにおいては、エンジン排気バルブ直後の排気ガスと水中排気された排気ガスにおいて測定値に違いが出る可能性があったので、水中で排気された排気ガスのNO_x濃度の測定も行った。これは水中排気された窒素酸化物が水と反応して硝酸塩が生成する可能性があり、そのためNO_x濃度が変化するのでないかと考えられたからである。

(2) NO_x濃度とO₂濃度測定結果

Fig. 5 に、それぞれの排気ガスのNO_x濃度と測定したエンジン各回転数の関係を示す。図中の◆印が水素エンジンの場合で、□と■印がガソリンエンジンの場合である。この中で、□印は通常の水中排気の場合を示し、■印は空中排気の場合を示す。

水素エンジンから排出された排気ガスに含まれるNO_x

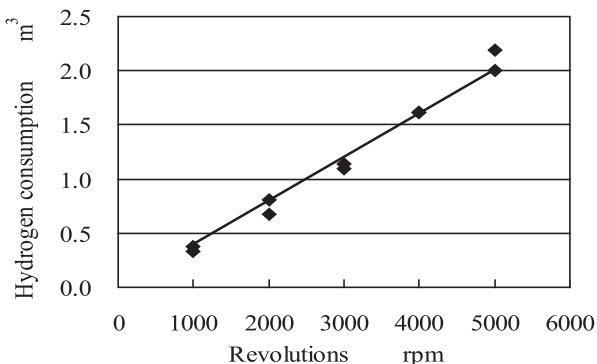


Fig. 4. Changes in consumption of hydrogen gas

濃度は、2000～4000rpm中のどの回転数においても1ppmでほとんど変化はなかった。これは、測定に使用した計測器の測定下限と同じであったので、実際はこれ以下の数値と考えられる。これに対し、ガソリンエンジンでは、エンジン回転数が増加するにつれNO_x濃度も増加していることがわかる。4000rpmにおいては、103ppmと、水素エンジン船外機の約100倍以上の値を示した。

また、排気管から排出されるNO_x濃度が多かったガソリンエンジンの場合、水中排気された排気ガスに含まれるNO_x濃度は、空中排気されたNO_x濃度とほぼ同じ濃度であった。したがって、水中排気されても窒素酸化物(NO_x)は水にほとんど溶解していないことがわかった。

次に排気ガスに含まれるO₂濃度と測定したエンジン各回転数をFig. 6 に示す。図中の◆印が水素エンジンの場合で、■印がガソリンエンジンの場合である。

水素エンジン船外機においては、どの回転数においても約16%の酸素が残留ガスとして排気ガス中に含まれていることがわかった。しかし、ガソリンエンジン船外機においては、どの回転数においてもほぼ0.1%前後と排気ガス中にほとんど酸素が含まれていないことがわかった。

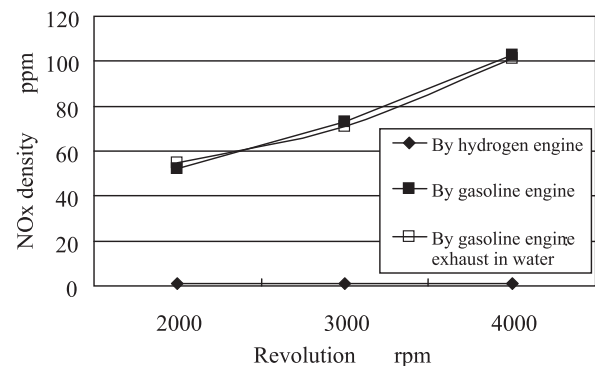


Fig. 5. Exhaust NO_x gas after combustion

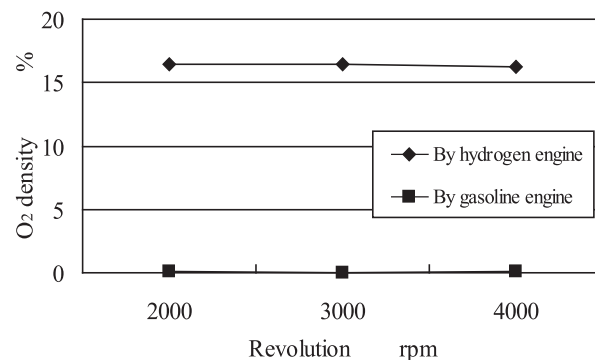


Fig. 6. Exhaust O₂ gas after combustion

考 察

水素燃料消費量と排気ガスに含まれるO₂濃度

本研究で改造した水素エンジン船外機の水素燃料消費量は、Fig. 4 よりエンジン回転数が1000~5000rpmにおいては回転数に比例することが推定できた。このグラフより単位時間 (min), 単位排気量 (cm³), エンジン1000回転あたり, [m³ / (cm³·min·1000rpm)] の水素を消費していることがわかった。これより、水素エンジン船外機が消費する水素量は

$$\text{水素消費量} = e \times t \times r \times 4.60 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

で求められる。ただし、

e : 総排気量 [cm³],

t : 運転時間 [min],

r : エンジン回転数 [1000rpm]

とする。

これはエンジン回転数が多くなればなるほど吸気する空気量と、シリンダ内で混合気が爆発、燃焼する回数が増加するからであると考えられる。1分間に吸気する混合気量は、

$$\text{総排気量 (cm}^3\text{)} \times \text{回転数 (rpm)} \times \frac{2}{\text{ストローク数}} \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]} \quad (2)$$

で示される。式(2)の値は吸排気効率が100%の時の理論値であり、実際のエンジンにおける吸気量は自然吸気の場合、理論値より減少する。1000rpmの時を例に挙げると、式(2)より1分間に吸気する混合気量は0.175m³となる。このときの水素消費量は0.36m³であるが、エンジンは25分間運転したので、1分間における水素消費量に換算すると0.0144m³となり、よって吸入空気量は0.1606m³となる。

このときの水素エンジン船外機の空燃比は、

$$\text{空燃比} = \frac{\text{吸入空気重量}}{\text{吸入燃料重量}} \quad (3)$$

で表される⁸⁾ため、吸入空気と吸入燃料(水素ガス)の体積を重量に変換する必要がある。エンジン回転数が1000rpmの時、1分間の吸入空気量は0.1606m³、水素消費量は0.0144m³なので、重量に変換し空燃比を考えると159.75となる。同様にして求めた1分間の2000~5000rpmにおける吸入空気量、水素消費量、空燃比も含めてTable 3に示す。すべての回転数における空燃費を平均した値は148.9で希薄燃焼の値を示していることがわかった。

水素が安定して燃焼できる燃焼可能な空燃比は、理論空燃比に近い34から超希薄燃焼の150までで、水素は幅広い

範囲の空燃比で燃焼できる。算出した空燃比は、見かけ上、この上限に近い超希薄空燃比の数値を示しているが、吸気率が100%と仮定した時の場合で実際に吸入された空気の重量を測定したものではない。したがって算出した空気重量と吸入された空気重量との間には若干の誤差がある可能性がある。また排気ガス中の残留酸素量の測定結果より、仮にこれだけ多量の空気が吸引されたとしても水素の燃焼に実際に使用された空気量は一部が利用され、他は未利用のまま排出されていると考えられる。

排気ガスに含まれるNO_x濃度

今回改造した水素エンジンは、内燃機関であるので窒素酸化物が生成されることが考えられる。すなわち、水素エンジンでは水素ガスを燃料として燃焼させるので理論的には水しか排出されないが、空気中に含まれる窒素が高温で空気中の酸素と燃焼するとNO_xが生成される。しかし、Fig. 5 からわかるように2000~4000rpmにおいて、水素エンジンからNO_xはほとんど排出されることがわかった。この要因は明確ではないが、水素エンジンでは水素の燃焼熱が高いが、水素は高速で燃焼されるのと、燃焼後に再生された水による冷却と過剰吸入空気による冷却効果によりNO_xの生成が少なかったことが考えられる。

これに対しガソリンエンジン船外機は、エンジン回転数を上げるにつれNO_x濃度が増加した。また、ガソリンエンジン船外機の水中排気による排気ガスのNO_x濃度も測定したが、水中排気と空中排気とで排出されるNO_x濃度に大きな違いはなかった。これにより、水中に排気された排気ガスに含まれるNO_xは、水と反応して硝酸塩になっていないと判断できた。また、水中排気によるNO_x濃度の減少はほとんど望めないことがわかった。

水素エンジンでは、排気ガスからほとんどNO_xが排出されず環境に優しいことがわかったが、無負荷時の結果なので、そのまま一般的な使用状態に適用できない。しかし、この結果は負荷がかかった場合の傾向をある程度予測できるものと考えられる。

Table 3. Air-fuel ratio of outboard hydrogen engine

| Revolutions | Intake air mass | Hydrogen consumption | Air-fuel ratio |
|-------------|---------------------|----------------------|----------------|
| rpm | m ³ /min | m ³ /min | |
| 1000 | 0.16 | 0.014 | 159.9 |
| 2000 | 0.32 | 0.030 | 155.2 |
| 3000 | 0.48 | 0.045 | 153.7 |
| 4000 | 0.64 | 0.065 | 140.6 |
| 5000 | 0.79 | 0.084 | 135.0 |

水素エンジンとガソリンエンジンの燃料消費量の比較

燃料が水素の場合とガソリンの場合の発生熱量による動力の比較を試みた。ガソリンの発生熱量は34.6MJ/ℓであるのに対して、水素1m³の発生熱量は12.8MJ/m³ (273K, 1013hPa) である⁹⁾。発生熱量をそろえると、一般的にガソリン1リットルが水素ガス2～3m³に相当すると言われている。したがって同じ排気量の水素エンジンでは、出力がガソリンエンジンのほぼ半分になるといわれている。吸入空気量一定とした場合の水素エンジンとガソリンエンジンの燃料が完全燃焼したときの燃料消費量及び発生熱量を比較した。エンジンの吸入空気量が不確定なので、ガソリンエンジンと水素エンジンの一般的な燃料消費量と発生熱量を、吸入空気量を同一にして推定した。吸入空気量は(3)式より算出できる。ただし、ここで水素が完全燃焼したときの水素エンジンの空燃比は34.2とし、ガソリンエンジンの空燃比は14.6とした。

吸入空気重量を1gとしたときの水素エンジンの燃料消費重量を体積になおすと、標準状態において 3.25×10^{-2} gとなる。水素の持つ熱量は12.8MJ/Nm³であるから吸入空気重量が1gのときの完全燃焼した水素エンジンが持つ熱量は、 4.16×10^{-3} MJであると推定される。これに対し、ガソリンエンジンの燃料消費重量を体積に換算すると、 9.38×10^{-5} ℓとなる。ガソリンの持つ熱量は32.5MJ/ℓであるから吸入空気重量1gが完全燃焼したときのガソリンエンジンが持つ熱量は 3.25×10^{-3} MJであると推定できる。

また今回実験に使用した水素エンジンは空燃費が148.89であったため、吸入空気重量が1gのときの水素エンジン船外機が持つ熱量は 9.55×10^{-4} MJであると推定できる。

以上のことより、吸入空気重量を同じにした場合、完全燃焼した水素エンジンが発生する熱量は、ガソリンエンジンが発生する熱量の約1.3倍になることが予測できる。しかし、改造水素エンジンが発生する熱量は、ガソリンエンジンの約0.3倍でしかない。つまり現在の水素エンジンが発生するエネルギーを効率的に動力に結びつけ、ガソリンエンジンと同程度の出力にするには、過給器を付加するか、燃焼サイクルを工夫するか、等の何らかの工夫が必要であることがわかった。

まとめ

本研究では、漁船漁業における温暖化防止とクリーンで再生可能な代替燃料の開発により水産業の安定的な振興を図るため、水素を燃料とする漁船の開発を行った。その中

で、できるだけ初期投資を軽減して導入を促進するため、新規開発ではなく漁船に使用されているガソリンエンジン船外機を、水素ガスを燃料として使用できるように改造し、漁船への応用の可能性や水素エンジンの基本的な性能等について実験した。以下にその結果を整理して示す。

- (1) 従来ガソリンエンジン船外機のキャブレターを水素吸気管に取り替え、水素燃料を使用可能にする水素エンジンに改造し、海上での試験走航を行い、水素エンジン漁船の実用化が可能であることがわかった。
- (2) 実験室内で、水素供給系統の見直しやCDIユニットの取付法の改良等を行い、改造水素エンジンの異常燃焼を解消した。
- (3) 無負荷時ではあるが、1000rpmから5000rpmの回転数における改造水素エンジン船外機の水素消費量を測定した。
- (4) また、無負荷時における空燃比を求め、水素エンジンの燃費推定に有益な燃料消費量を示した。
- (5) さらに、無負荷時の排気ガス中のNO_x濃度を測定し、水素エンジンでは排気ガス中のNO_x濃度は1ppm程度であることを示した。これは、同じ条件で運転したガソリンを燃料とする従来船外機から排出されるNO_x濃度より大幅に少ないことがわかった。
- (6) これらの結果より、水素エンジンは、クリーンで環境にやさしいエンジンであることがわかった。

謝辞

本研究の推進にあたり、多大なご協力とご助言を賜りました独立行政法人水産大学校海洋機械工学科中村誠准教授、津田稔講師、ならびに海洋生産管理学科川崎潤二講師に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省：地球温暖化の影響 資料集. 4-7 (2007)
- 2) 三重県：新エネルギービジョン 資料編. 資1-9 (2004)
- 3) 大和総研：新規産業レポート 水素で走る新世代のクリーン自動車 燃料電池車・水素エンジン車の課題と展望. 1 (2008)
- 4) 江副覚, 高橋昂大：クリーンエネルギー利活用の現状と水素エンジン漁船開発の背景. 水大校研報, 56, 377-388 (2008)

- 5) 江副覚, 高橋昂大: 小型漁船用水素ガスエンジンの試作. 日本機械学会九州支部講演論文集, No. 088-1, 317-318 (2008)
- 6) 長尾不二夫: 内燃機関講義, 上巻, 養賢堂, pp.168-172 (1967)
- 7) 関東運輸局保安・環境課: 自動車NOX・PM法, 東京 (2002)
- 8) 藤沢英也, 小林久徳, 小川王幸, 棚橋敏雄: 新電子制御ガソリン噴射. 山海堂, pp.4 (1993)
- 9) JHFCホームページ:
<http://www.jemai.or.jp/JEMAIDYNAMIC/data/current/detailobj-4121-attachment.pdf>