

# 熱発生率とシリンダヘッド振動加速度による漁船機関のトルクリッチ診断法に関する考察

津田 稔\*<sup>1</sup>・太田博光\*<sup>1</sup>・下川伸也\*<sup>2</sup>・前田和幸\*<sup>1</sup>

## An Investigation of Diagnosis Methods for the Torque Rich Condition of Marine Diesel Engines Using the Heat Release Rate and Vibration Acceleration

Minoru Tsuda\*<sup>1</sup>, Hiromitsu Ohta\*<sup>1</sup>, Shin-ya Shimokawa\*<sup>2</sup>, and Kazuyuki Maeda\*<sup>1</sup>

This study describes diagnosis methods for the torque rich condition of marine diesel engines. Diagnosis of the torque rich condition of marine diesel engines was carried out using the generally used performance data, heat release rate and the vibration acceleration of the cylinder head. The results obtained from the investigation are as follows: (1) It is difficult to observe the torque rich condition of marine diesel engines in detail using the boost air pressure, fuel oil consumption or exhaust gas temperature. (2) The torque rich condition of marine diesel engines can be observed in greater detail using the heat release rate. (3) By monitoring the vibration acceleration of the cylinder head, the torque rich condition of marine diesel engines can be observed conveniently and accurately.

Key words : Fishing Boat, Engine Monitoring, Torque Rich Condition, Combustion Analysis, Vibration Acceleration

### 1 まえがき

漁船における機関損傷事故は、海難審判庁裁決録<sup>1)</sup>によると、平成8年～平成12年に発生した機関損傷事故525件のうちの約72%を占めており、早急にこれを低減する具体的方法を検討する必要がある。これらの機関損傷事故は、機関の不適切な運転や、メンテナンス不良により発生していることが多い<sup>2)</sup>。漁船が港と漁場間を航行する際、機関を常用出力（負荷率75%）における回転数で運転していても、船体の汚れや強風、波浪等により、機関が舶用特性を超えた範囲で運転されることがあり、このような機関の運転状態をトルクリッチと呼んでいる。さらに底曳き網漁船等においては曳網時にこの傾向が強く、機関に設計時における運転点よりも大きな負荷がかかるため機関トラブルの原因となる。現在、漁船等で行われているディーゼル機関の状態監視はシリンダ内圧力、排気温度などの管理である

が、シリンダ内圧力を測定するにはシリンダヘッドの加工が必要なことと、圧力センサーも高価であることから小型漁船への適用は困難である。排気温度の管理は比較的容易であるが機関の運転状況や給気温度も考慮する必要がある。

本研究では漁船機関の運転状態を連続的に監視することにより未然に機関損傷事故を防止するために、機関のトルクリッチ状態を検出するとともに、それを診断する方法を明らかにすることを目的として、まず、機関が1回の燃焼時に受ける熱負荷を示す熱発生率<sup>3,4)</sup>を用いて、トルクリッチ運転時における燃焼解析を行った。次に、トルクリッチの状態における給気圧力、燃料消費量、排気温度などの機関の運転データを用いてこれを検知する方法について検討した。さらに、トルクリッチ状態を連続的かつ簡易に検出する方法として、単1の加速度ピックアップを機関のシリンダヘッド表面に装着し、得られた振動加速度を基にデータの解析を行った。

2006年3月6日受付。Received March 6, 2006.

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

\*2 水産大学校海洋生産管理学科 (Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University)

## 2 実験装置と方法

実験装置には、水産大学校の内燃機関実験・実習室に設置された出力103kW、回転数2400rpmの漁船用小型高速4サイクルディーゼル機関を用いた。Fig. 1に供試機関の写真を示し、Table 1にその主要目を示す。

熱発生率は燃焼解析装置により指圧線図を採取し、150サイクルの平均値から算出した。給気圧力は過給機のブロワ側出口に取り付けた圧力センサーにより計測した。また、排気温度は過給機のタービン入口側に取り付けた温度センサーで計測し、燃料消費量は電子天びんを用いて燃料300gを消費する時間から算出した。振動加速度はFig. 1に示すように、3番シリンダのシリンダヘッド部分に装着した単1の加速度ピックアップを用いて計測した。計測時のサンプリング周波数は20.0kHz、1回の計測時間は約0.82sである。また、ローパスフィルタのカットオフ周波数は9.0kHzに設定した。

実験は、まず機関を船用特性上の負荷率10, 25, 50, 75, 100%に設定し、それぞれの運転状態における各部の状態を計測した。次にトルクリッチ状態における各部の状態を計測するために、回転数を船用特性上の負荷率75%の状態(2181rpm)に設定し、その状態で負荷率が79, 83, 87, 91, 95%になるようにトルクを設定し、同様の計測を行った。また、各負荷率においては、定期的に排気温度、過給機回転数、燃料消費量等を計測し、状態が安定していることを確認した。なお、実験時における実験室内の温度、湿度、大気圧力はそれぞれ約31℃、60%、1012hPaであった。実験には市販の軽油を用いた。

## 3 実験結果と考察

### 3.1 熱発生率の解析

Fig. 2に船用特性上の負荷率75%および100%における指圧線図と、船用特性上の負荷率75%における回転数において、機関の負荷率が87%以上のトルクリッチになった状態の指圧線図を示す。図において、着火時の圧力(上死点付近において圧力が急激に上昇する点の圧力)と最高圧力は負荷率の増加とともに上昇し、トルクリッチ状態の負荷率95%では、着火時の圧力、最高圧力ともに負荷率100%よりも低い値であるが、TDC後20deg.付近からの圧力線は負荷率100%とほぼ同じである。そこで、機関が1回の燃焼時に受ける熱負荷を示す熱発生率を用いて、トルクリッチ状態において機関が受ける熱負荷について検討した。

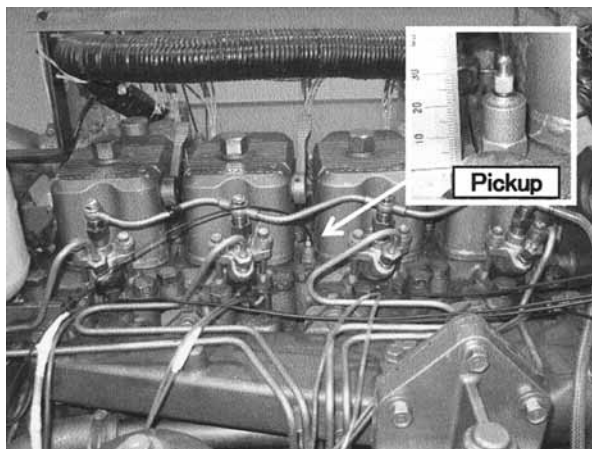


Fig. 1. Overview of the Test Engine.

Table 1. Specifications of the Test Engine

Engine Type : 4-stroke DI, Turbocharged		
Number of Cylinder		4
Cylinder Bore	mm	110
Piston Stroke	mm	125
Max. Power	kW	103
Engine Speed	rpm	2400
Max. Pme	MPa	1.1
Fuel Inj. Nozzle		5 × 0.32 mm

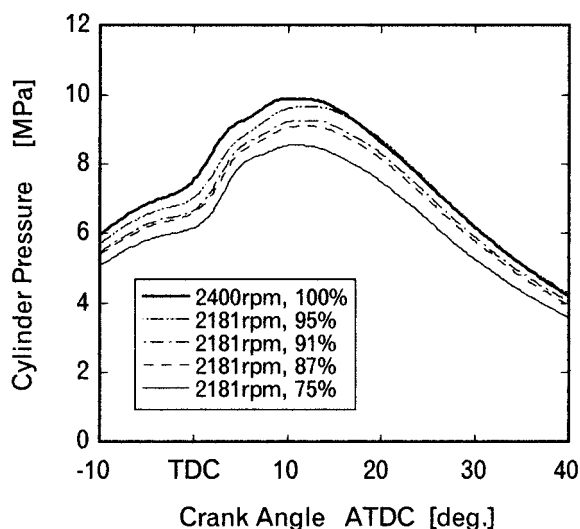


Fig. 2. Indicated diagram.

なお、熱発生率 ( $dQ/d\theta$ ) は、燃焼解析装置を用いて採取したクランク角度 1 deg. 毎のシリンダ圧力を用いて、式 (1) より算出した。また、機関が受ける熱負荷を示す熱発生量 (熱負荷) は、熱発生率の積算値より算出した。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} \left( V \frac{dp}{d\theta} + \kappa p \frac{dV}{d\theta} \right) [\text{J/deg.}] \quad (1)$$

$\kappa$  : 比熱比,  $p$  : シリンダ圧力,  $V$  : シリンダ容積,  
 $\theta$  : クランク角度

Fig. 3 にトルクリッチ運転を含む負荷率75%以上の運転状態における熱発生率と熱発生量の関係を示す。トルクリッチ状態における負荷率91%の熱負荷は負荷率100%とほぼ同じであり、トルクリッチ状態における負荷率95%においては、熱発生率、熱発生量ともに負荷率100%を大幅に上回っている。以後、熱発生率、熱発生量が船用特性上の負荷率100%を上回るトルクリッチ状態を危険なトルクリッチと呼ぶ。

このように、トルクリッチの状態を検討する場合、熱発生率を解析することにより、機関が受ける熱負荷の状態を明確にすることが可能となる。

### 3.2 機関の運転データの解析

機関のトルクリッチが原因となって発生する機関トラブルを未然に防止するには、危険なトルクリッチ状態を即座にセンサー等で検出する必要がある。通常、漁船の操縦盤には給気圧力計、排気温度計が設置されており、船によっては燃料消費量も計測可能である。よって、この3つの計測値を用いて危険なトルクリッチ状態を検出する方法について検討した。

Fig. 4 に負荷率と給気圧力の関係を示す。図中の●印は船用特性上における値を示し、その変化傾向を破線で示した。図に示すように負荷率の増加とともに給気圧力は増加している。また、トルクリッチ状態の負荷率91%は、前節で述べたように、危険なトルクリッチ状態である。しかし、このときの給気圧力の値は船用特性上の負荷率85%とほぼ同じである。すなわち、給気圧力の値から負荷率を推定すると85%だと誤認してしまう。また、負荷率100%における給気圧力の値で圧力上昇のアラームを設定した場合においても、危険なトルクリッチ状態を検出することはできない。

Fig. 5 に負荷率と燃料消費量の関係を示す。図において、Fig. 4 と同様に、危険なトルクリッチ状態の負荷率91%

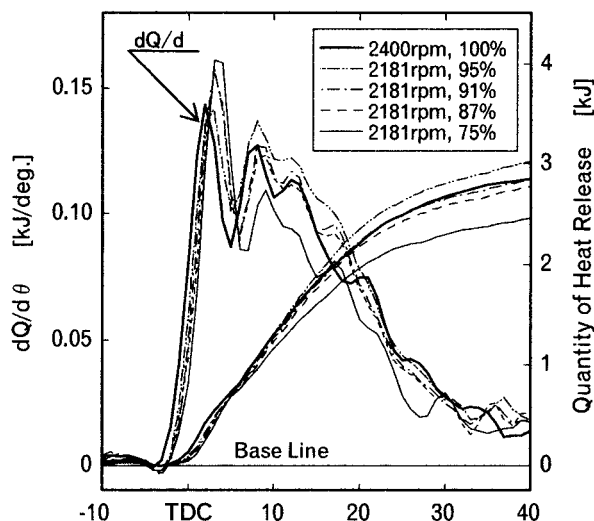


Fig. 3. Change in Quantity of Heat Release and Heat Release Rate with Engine Load.

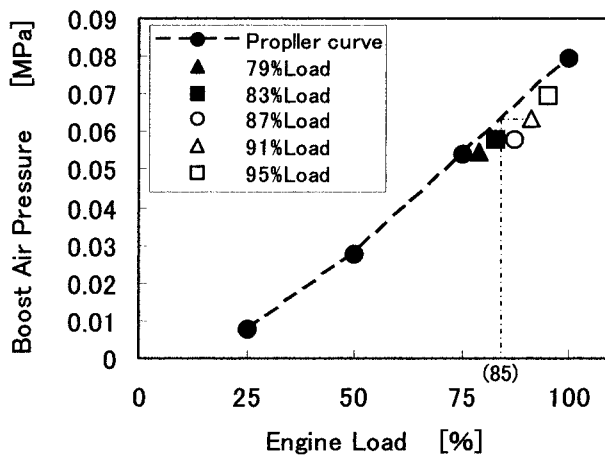


Fig. 4. Relationship between Engine Load and Boost Air Pressure.

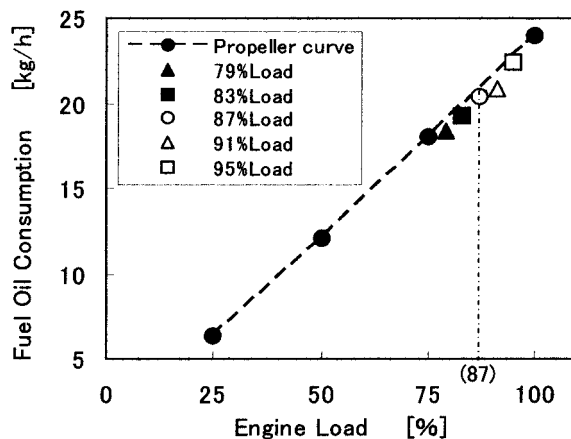


Fig. 5. Relationship between Engine Load and Fuel Oil Consumption.

での燃料消費量は、船用特性上の負荷率87%とほぼ同じになり、燃料消費量では検出できない。

Fig. 6 に負荷率と排気温度の関係を示す。図において、トルクリッチ状態の負荷率91%での排気温度は、船用特性上の負荷率94%とほぼ同じである。しかし、Fig. 3 で示したようにトルクリッチ状態の91%では、負荷率100%とほぼ同じ熱負荷が機関にかかっており、危険なトルクリッチ状態であるが、負荷率100%における排気温度で排気温度上昇のアラームを設定しても作動しない。これにより、機関各部の状態からトルクリッチ状態であると判断するための検出アラームの設定が難しい。

以上のことから、現在、漁船に一般的に装備されている計器では、危険なトルクリッチ状態を検出することは困難であることが分かる。

### 3.3 シリンダヘッド振動加速度の解析

機関から発生する振動を基にトルクリッチ状態を検出する手法を検討するために、単1の加速度ピックアップをシリンダヘッド部分に装着し、得られた振動加速度の時系列データを基に解析を行った。その解析方法としては3つの診断パラメータを用いた。まず、時系列データを確率密度分布に変換し無次元特徴パラメータの1つである式(2)の尖り度 $\beta$ を算出し診断パラメータとした。次に、時系列データをパワースペクトルに変換し式(3)に示す平均周波数 $f$ で整理を行い診断パラメータとした。さらに、時系列データにエンベロープ処理を施しパワースペクトルを求めるとピストンの往復に関連するピークスペクトルが強調される。この高さをピークスペクトル高さ比と定義し診断パラメータとして用いた。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(n-1) \sigma^4} \quad (2) \quad f = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot P(f_i)}{\sum_{i=1}^n P(f_i)} \cdot \frac{60}{N} \quad (3)$$

$x$ : 各振幅値における確率密度,  $\bar{x}$ : 平均値,  $n$ : 振幅の区分数,  $\sigma$ : 標準偏差,  $f$ : 周波数[Hz],  $P(f)$ : 周波数 $f$ におけるパワースペクトル,  $N$ : 機関回転数[rpm]

Fig. 7 に回転数2181rpm, 負荷率75%における加速度ピックアップの時系列データを示す。図中には衝撃的な振動が周期的に現れており、振幅が大きなもののは燃焼の周期である。一方、燃焼周期の1/4の振幅の小さなものはピストン往復の周期である。Fig. 8 (a), (b) に回転数を2181rpmの一定とした場合における負荷率10%および75%の時系列データの確率密度分布(図中ではP. D. F.と略)を示す。

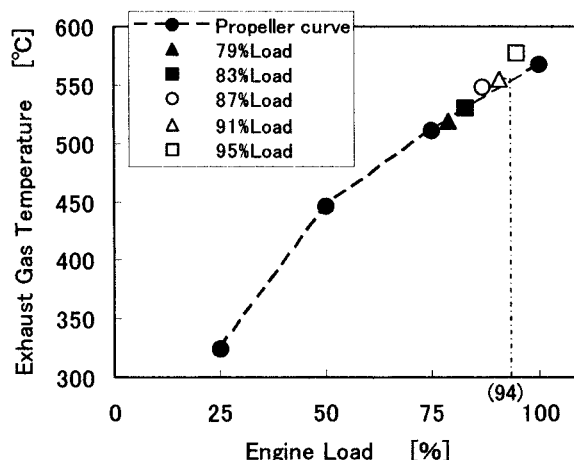


Fig. 6. Relationship between Engine Load and Exhaust Gas Temperature.

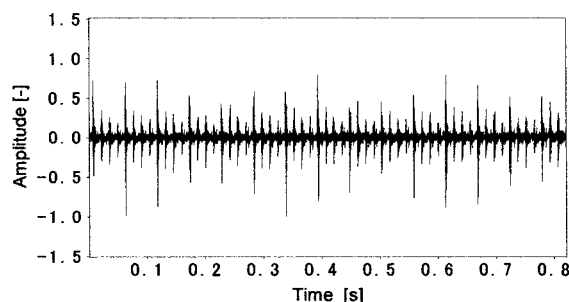
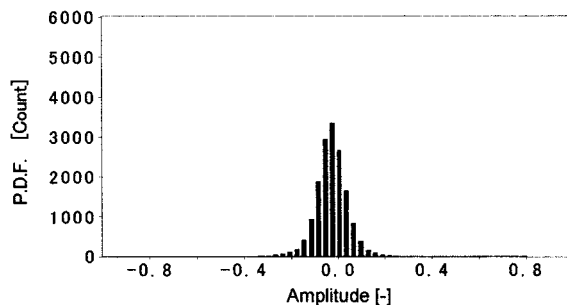
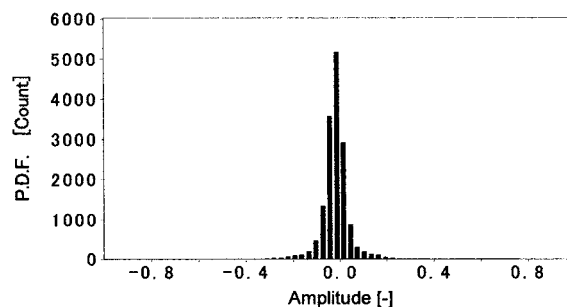


Fig. 7. Time Series at 75% Load of 2181rpm.



(a) 10% Load of 2181rpm



(b) 75% Load of 2181rpm

Fig. 8. Probability Density Function of Time Series.

図において、原点付近の密度が高くこの付近にノイズ成分が多く集中していることが分かる。また、負荷が増加すると燃焼成分、ピストン往復成分よりもノイズ成分が増加する傾向があることが分かる。このことから確率密度分布の特徴を反映させることのできる尖り度を算出し解析を行った。

Fig. 9 に時系列データのパワースペクトルを示す。供試機関の固有振動数とその高調波成分である周波数約1.7 kHz, 4.5kHzおよび8.0kHzが現れていると思われる。本研究ではこれらを基に平均周波数を算出した。

Fig.10にエンベロープ処理された時系列データのパワースペクトルを示す。ピストン往復および燃焼に関連する周波数成分が現れている。本研究におけるピークスペクトル高さ比は、強度の最も強いピストン往復の基本周波数成分のピーク値に着目し算出しており、その値はピストンの加速度を表している。

Fig.11に負荷率と尖り度の関係を示す。同一の負荷率では回転数が増加するにつれて尖り度は減少する傾向が現れており、ピストンの往復および燃焼に関連する周期成分の加速度増加による影響と考えられる。負荷率50%以下において回転数一定の場合では、負荷率が増加すると尖り度も増加する傾向が現れておりノイズ成分増加が原因と考えられる。しかし、回転数2181rpm, 2400rpmにおける条件では、負荷率50%以上ではわずかながら減少する傾向が現れている。また、船用特性上においては、負荷率の増加とともに尖り度は減少し、トルクリッチ状態においては、負荷率75%より増加した後、減少する傾向がある。このことから、負荷率75%付近において尖り度が増加する領域においてトルクリッチ状態へと変化すると考えられる。

Fig.12に負荷率と平均周波数の関係を示す。同一負荷率では回転数が増加するにつれて平均周波数は減少することから低周波領域の強度が増す傾向があるようである。一方、同一回転数においては負荷率が増加すると平均周波数は増加するが、これは高周波領域の強度が増す傾向があるからである。また、船用特性上においては、負荷率の増加とともに平均周波数は減少し、トルクリッチ状態においては、増加する傾向がある。このことから、負荷率75%付近において平均周波数が増加する領域においてトルクリッチ状態へと変化すると考えられる。

Fig.13に常用出力として用いられる負荷率75%における回転数2181rpmの場合の、負荷率とピークスペクトル高さ比の関係を示す。負荷率の増加につれてピークスペクトル高さ比は増加し、トルクリッチ状態である79%以降は減少

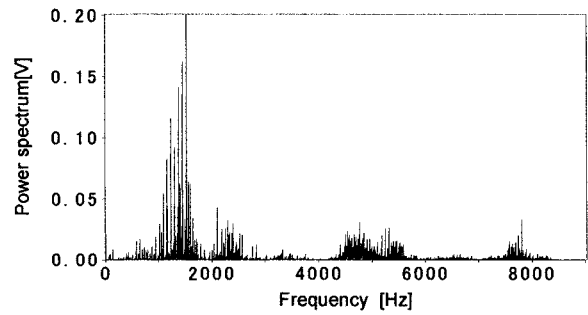


Fig. 9 . Power Spectrum at 75% Load of 2181rpm.

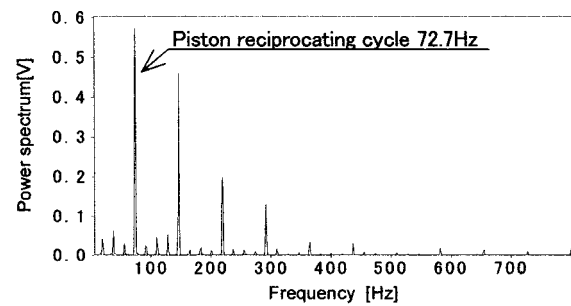


Fig.10. Enveloped Spectrum at 75% Load of 2181rpm.

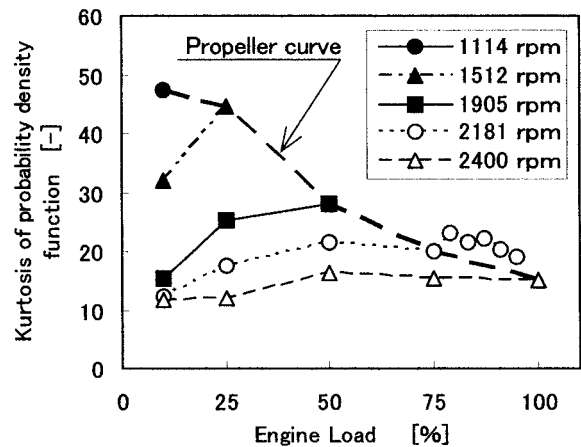


Fig.11. Kurtosis of Probability Density Function.

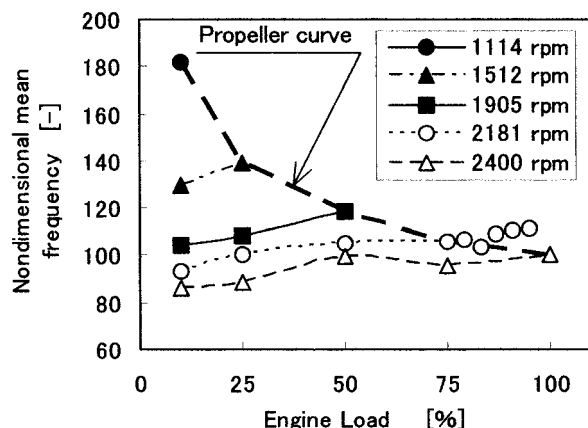


Fig.12. Nondimensional Mean Frequency.

する傾向が現れている。このことから、ピークスペクトル高さ比の最大値を検出することにより、トルクリッチ状態への変化を検出できるものと考えられる。

これらのことより、2181rpmの回転数一定の場合、負荷率75%付近において、トルクリッチ状態へと変化する領域が存在することが分かった。負荷率が75%より増加する場合、尖り度についてはFig.11に示したように減少傾向から増加傾向に変化する領域、ピークスペクトル高さ比についてはFig.13に示したように増加傾向から減少傾向に変化する領域である。よって、それぞれの値を状態監視することにより、トルクリッチ状態への変化が検出できると考えられる。なお、ピークスペクトル高さ比は負荷率によって変化する傾向が、尖り度や平均周波数よりも明確で、トルクリッチ状態へ変化した場合の判断がより正確にできると考えられる。

#### 4 まとめ

本研究では漁船機関の損傷事故の原因となっているトルクリッチ状態を診断するために、まず、熱発生率を用いた燃焼解析を行い機関が受ける熱負荷について検討した。次に、トルクリッチ状態の検出方法を検討するために、機関の運転データを用いた解析を行った。さらにシリンダヘッドから得られる振動加速度からトルクリッチ状態に現れる特徴を解析し簡便、高精度で検出する手法の検討を行った。その結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) 熱発生率を用いた解析の結果、船用特性上の負荷率75%の回転数におけるトルクリッチ状態においては、負荷率が91%以上になると、船用特性上の負荷率100%以上の熱負荷が作用する（危険なトルクリッチ状態となる）。
- (2) トルクリッチ状態を検知するための方法として給気圧力、燃料消費量、排気温度について検討したが、現在の小型漁船に一般装備されている計器では、危険なトルクリッチ状態を検出することは困難である。
- (3) 同一負荷率では回転数が増加するにつれて尖り度は減少する。また、同一回転数の場合では負荷率が増加すると尖り度も増加する。しかし、トルクリッチ状態では、負荷率の増加にしたがって、尖り度は増加傾向となった後、減少に変化する傾向がある。
- (4) 同一負荷率の場合、平均周波数は回転数が増加するにつれて減少する。一方、同一回転数においては負荷率が増加すると平均周波数も増加する。

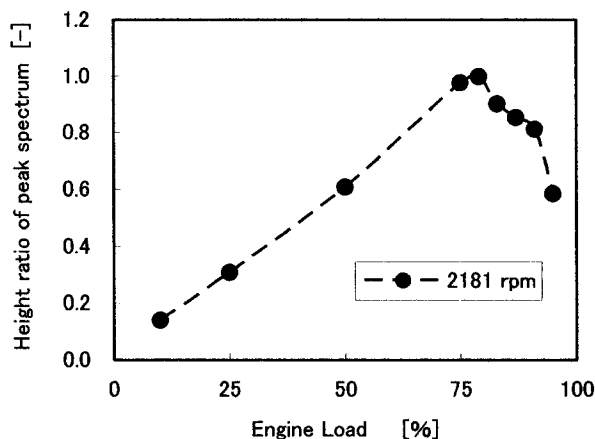


Fig.13. Height Ratio of Peak Spectrum.

- (5) 負荷率の増加につれてピストン往復成分に着目したピークスペクトル高さ比は増加し、トルクリッチ運転を行った回転数2181rpm、負荷率79%以上では減少する。この手法はトルクリッチ状態を検出する際に有効である。

今後の課題としては、本研究から得られた結果を基に、トルクリッチ状態をより正確に診断できるシステムや制御装置の開発を行うとともに、これを実船に設置して、作動の確認やシステムの改善を行う必要がある。

#### 文 献

- 1) (財)海難審判協会：海難審判庁裁決録，日本財団事業成果ライブラリー，<http://nippon.zaidan.info/library/seikabutsu>.
- 2) 津田 稔，前田和幸，下川伸也，一瀬純弥：水産大研報，53，93-98 (2005).
- 3) 長尾不二夫：内燃機関講義上巻，第3次改著第35版，養賢堂，東京，61 (2002).
- 4) 宮本 登，村山 正：内燃機関，18(6)，9-22 (1979).
- 5) 豊田利夫：設備診断のための信号処理の進め方，日本プラントメンテナンス協会，東京，48-54 (1996).