

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420177

研究課題名(和文)ピストンスラップによるライナーキャビテーションの実構造における予測法の開発

研究課題名(英文)Piston slap induced liner cavitation in the actual engine structure

研究代表者

太田 和秀(Ohta, Kazuhide)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：60403929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：実機運転状態での水圧変動を予測するためガス爆発力、ピストンスラップ力、燃料噴射圧力、動弁系開閉力がエンジン構造に作用する状態でエンジン構造と冷却水音場の連成振動応答計算を行った。その結果、冷却水圧力変動の最大値はピストンスラップに支配されていることを明らかにした。また、冷却水内の気泡含有率に対応して水中音速が変化すると、冷却水内の圧力変動ピーク値が大きく変化することが明らかになった。

エンジン構造振動と冷却水内圧力変動の固有振動数が接近すると水圧変動が大きくなり、更にスラップ力が作用する位置の振動モードが大きくなると当該シリンダー接水面にキャビテーションが発生しやすくなることが判明した。

研究成果の概要(英文)：In order to predict the water pressure fluctuation in the actual operation condition, the coupled vibration response of the engine structure and the cooling water acoustic field is calculated when the gas force, the piston slap force, the fuel injection pressure and the valve opening/closing force act on the engine structure. As a result, it was revealed that the maximum value of the cooling water pressure fluctuation is dominated by the piston slap. In addition, it was revealed that the pressure fluctuation peak value in the cooling water greatly changes when the underwater sound speed changes corresponding to the bubble content rate in the cooling water.

It has been found that the water pressure fluctuation becomes large when the natural frequency of the engine structure and the water pressure approaches. Furthermore, when the vibration mode of the cylinder liner at the piston impact point becomes large, the liner cavitation is easy to occurs on the wet surface of the cylinder

研究分野：振動,騒音,水中音響

キーワード：ライナーキャビテーション ピストンスラップ 構造-音場連成振動 内燃機関

## 1. 研究開始当初の背景

エンジンの信頼性に大きな影響を及ぼす要因の一つがライナーやエンジンブロックの冷却水側に発生するキャビテーションエロージョンである。キャビテーションエロージョンはライナーラスト側の上下方向に帯状に発生することが多く、最悪の場合は貫通穴が発生して冷却水がシリンダー内に流れ込み、エンジンが運転不可能な事態を招くことになる。この主原因はピストンスラップによるライナーの衝撃振動が冷却水内に圧力変動を発生させ、それが飽和蒸気圧以下に低下すると気泡が発生し、その気泡が消滅するときの衝撃圧やマイクロジェットがライナー接水面のエロージョンを進行させることによる。ライナーキャビテーションによるエロージョンを防止するための研究は数多く実施されており、鋳鉄ライナーの微視構造の改良やダクタイル鋳鉄の採用等の材料面の改良やキャビテーション抑止効果を持つ冷却水添加剤の開発等の化学面からのアプローチが行われている。一方、ピストンスラップに関するピストンの首振り運動や衝突力及びライナーの振動応答については、キャビテーション防止だけでなく騒音低減の面からも多くの研究が実施されている。また、モデル試験装置を用いて、ピストンを加振した場合のライナー振動や冷却水内の圧力変動、気泡の発生等について詳細な研究を行い、ライナーの振動特性は冷却水やエンジンブロックの動剛性の影響を受けることや、冷却水中に置かれた板とライナーとの距離が近くなると振動水圧が増大し、それが飽和蒸気圧に達するとキャビテーションが発生することを示した研究も報告されている。これらはライナーやエンジンブロックの振動応答は冷却水の影響を受けるとともに、エンジン冷却水内圧力変動に冷却水内音場の振動特性が影響することを示唆しているが、従来の研究ではこれらの点についての詳細な検討は実施されていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、冷却水室の音響特性とライナーやエンジンブロックの振動応答が冷却水内圧力変動に及ぼす影響を定量的に評価できる解析法の開発を目指す。本研究ではこれまで研究担当者が開発してきたエンジン運

転状態の連成振動解析法に冷却水音場の音響特性を組み込む解析法を提案し、水圧変動増大の要因を評価できる解析法を確立する。更に矩形タンクモデルや多シリンダーモデルを用いた試験で構造加振による水圧変動波形を計測し、計算結果と比較して解析法の有効性を検証する。更に水圧変動が飽和蒸気圧以下に低下するとキャビテーションが発生することを確認する。

## 3. 研究の方法

本研究ではこれまで研究担当者が開発してきたモード解析法によるエンジン運転状態の連成振動解析法を拡張して、冷却水音場の圧力変動を予測可能とする。更にモデル試験でその妥当性を検証する。

また、構造振動で励起された水圧変動が飽和蒸気圧より低下するとキャビテーションが発生することを音響的手法で検証する。次にエンジン実構造に冷却水を注入し、ピストンスラップ力を模擬した衝撃加振力を作用させて構造振動と水圧変動を計測し、解析結果と比較して本解析法の実機適用性を確認する。更に、モデル試験で気泡含有率によって音場の固有振動数が変化した場合の水圧変動変化を構造の固有振動数との関係から考察する。

## 4. 研究成果

### (1) 構造 - 水音場連成振動解析法の開発とキャビテーション発生の実験検証

図1に示すような底板が薄い金属の矩形タンクを製作し、底板加振時の振動と水圧変動を計測した。また、モード解析法とFEM(有限要素法)を組み合わせ、構造に外力が作用する場合の水圧変動予測法を開発した。図1に検証用の矩形モデルを示す。

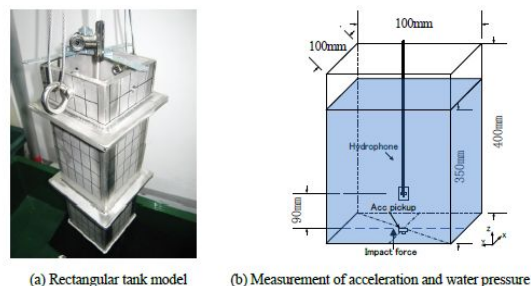


図1 検証用の矩形タンクモデル

図2に底板加振時の振動水圧波形を示すが、計算結果は実測結果とよく一致している。

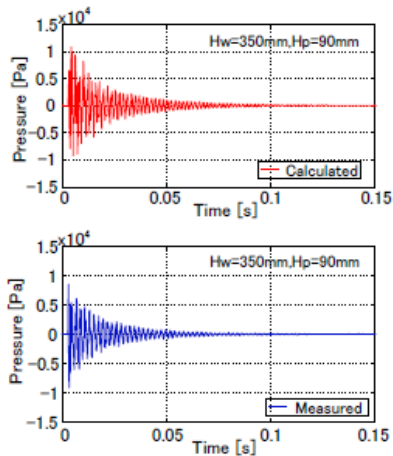


図2 底板加振時の水圧変動波形

図3に示すように大振幅加振時には、水圧変動が飽和蒸気圧(-100kPa)以下に低下すると、キャビテーションと見られる高周波の圧力変動が観測された。以上の結果より、本研究では水圧変動が飽和蒸気圧を下回る場合をキャビテーション発生のクライテリアとした。

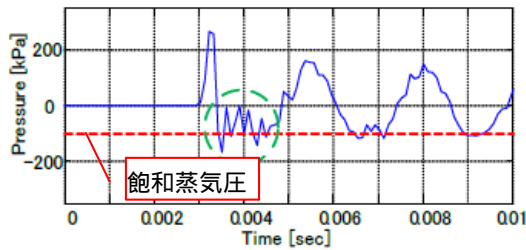


図3 キャビテーション発生時の水圧変動

### (2) エンジン運転状態での構造振動 / 冷却水室内圧力変動予測法の開発

本研究で対象とした4気筒4サイクル機関のエンジンプロックは鋳物構造であり、冷却水室形状も複雑であるので、図4に示すように構造と水音場共にFEMを用いて詳細モデルを作成した。加振試験時の振動応答は回転軸を除いた状態で、周波数領域での解析を行った。また、運転時の振動応答は筒内圧、ピストンスラップ力、歯車噛合い力等の起振力をエンジンプロックやクランク軸などの回転軸に作用させて計算で求めた。まず、エンジンプロックと冷却水音場の連成振動モデルの妥当性を確認するために、エンジンプロックに冷却水を注入し、気泡の影響をなくすために冷却水を加圧した状態で、シリンダライナーを加振し、構造振動と水圧変動を同時に計測した。

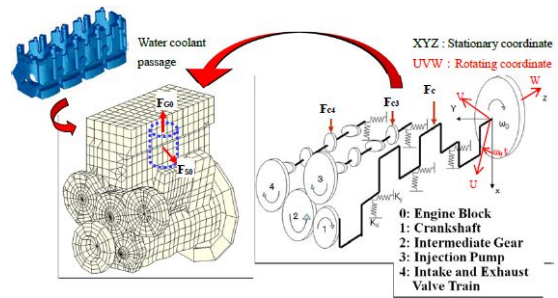


図4 エンジン構造・回転軸系と冷却水音場の連成振動解析モデル

図5に水圧変動の周波数応答の計測結果と解析結果の比較を示すが、共振周波数、圧力変動レベルとも両者はほぼ一致している。水圧変動にはエンジン構造と冷却水音場が連成した固有振動数で明確なピークが現れており、水圧変動波形の最大値もこれらの共振特性に支配されることが明らかになった。

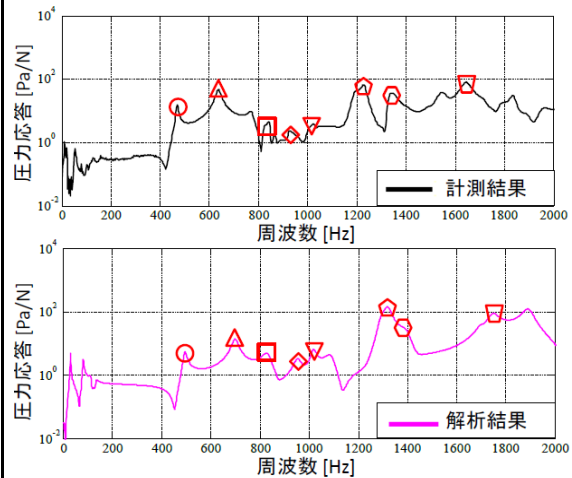


図5 エンジンプロック加振時の冷却水室内の圧力変動

### (3) 冷却水室内圧力変動に及ぼす水中音速の影響

冷却水音場の固有振動数は水中の音速によって決定されるが、冷却水内への気泡の混入率によって水中音速は大きく変化する。水中音速を変化させた場合の、#1シリンダライナー接水面での水圧変動波形の計算結果を図6に示す。着火順序は#1-#3-#4-#2であり、クランク角180度が#1シリンダ爆発タイミングとなり、このクランク角度近傍で#1シリンダに最大水圧変動が発生している。また、水圧変動の最大値と水中音速との関係を図7に示す。水中音速が $c=1000\text{m/s}$ 近傍で水圧変

動は最大となる。この原因は雑誌論文 で詳しく論じているが、エンジンプロックの振動モードと冷却水室内圧力変動モードの連成しやすい組み合わせが存在し、水中音速の変化で音場の固有振動数が構造の固有振動数に近接する場合に、圧力変動のピーク値が最大となるためである。

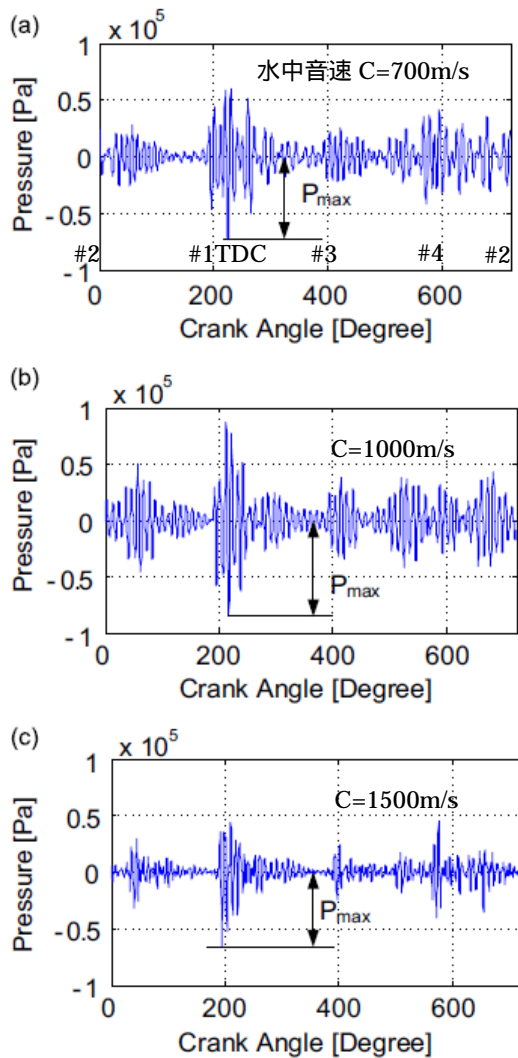


図6 水中音速変化時の水圧変動 (#1 シリンダー接水面)

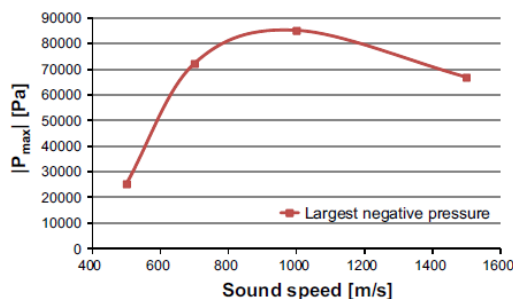


図7 水中音速と水圧変動の最大値 (#1 シリンダー接水面)

以上の研究成果から、ライナーキャピテーションによる損傷が特定のシリンダーで発生し易く、冷却水内の気泡の含有率によっては水圧変動のピーク値が4倍程度変化することが明らかになった。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

Kazuhide Ohta, Xiaoyu Wang, Atsushi Saeki, Piston slap induced pressure fluctuation in the water coolant passage of an internal combustion engine, Journal of Sound and Vibration 363 (2016) 329–344,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2015.10.026>

Xiaoyu Wang, Kazuhide Ohta, Study on Piston Slap Induced Liner Cavitation, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 137 /OCTOBER 2015, <http://vibrationacoustics.asmedigitalcollection.asme.org>

太田 和秀, 王 暁宇, 小野 晃裕, 佐伯 篤志, 冷却水音場を考慮したエンジン連成振動とキャピテーションの予測(解析法の提案とモデル試験による検証), 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 822, 2015, [DOI:10.1299/transjsme.14-00447]

〔学会発表〕(計6件)

太田 和秀, 佐伯 篤志, 吉田 大輔, 村瀬 蓮一, ピストンスラップによるライナーキャピテーション発生予測に関する研究(多シリンダモデル), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference, 2016/8,

Kazuhide Ohta, Xiaoyu Wang, Atsushi Saeki, Daisuke Yoshida, Prediction of Liner Cavitation Occurrence Considering Vibro-Acoustic Characteristics of Engine Structure and Water Coolant Passage, The 23rd International Conference of Sound and Vibration, Athens (Greece), 10-14 July 2016

太田 和秀, 佐伯 篤志他, 内燃機関のライナーキャピテーション発生予測の研究(箱型モデル試験と実機計算), 日本機械学会

Dynamics and Design Conference, 2015/8

Kazuhide Ohta, Xiaoyu Wang Akihiro Ono and Atsushi Saeki, Prediction of Liner Cavitation Induced by Piston Slap in the Internal Combustion Engine Considering Acoustic Characteristics of Water Coolant Passage, The 22th International Conference of Sound and Vibration, Florence (Italy) 12-16 July, 2015

太田 和秀, 東谷 航平他, ピストンスラップによるライナーキャピテーションの研究

(箱形モデル試験と音場 / 構造連成振動解析), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference, 2014/8

太田 和秀, 王 曉宇他: ピストンスラップによるライナーキャピテーションの研究 (実機構造の音場 / 構造連成振動解析), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference, 2014/8

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 和秀 (Ohta, Kazuhide )  
九州大学・工学研究院機械工学部門・教授  
研究者番号: 60403929

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

( )