

大型低速エンジンの振動に関する最近の動向

-二元燃料エンジン振動の特徴-

株式会社三井 E&S DU

○瀧本 崇弘

株式会社三井 E&S

清水 祐太

上海中船三井造船柴油机有限公司 梶原 修平

1. はじめに

世界の貨物輸送手段として多くを担っている海上輸送に使用されている大型商船の推進主機関として大型低速エンジンが多く使用されている。大型低速エンジンは現在ではライセンス供与による各メーカーが生産する体制になっており、ライセンサーとしては 3 社(MAN Energy Solutions (MAN ES), Winterthur Gas & Diesel (WinGD), ジャパンエンジンコーポレーション (J-ENG))ある。それぞれのブランドエンジンには違いはあれど、1980 年代に 2 ストローク・ユニフロー掃気式に集約されている。

これらの主機関は過給機の高性能化や主機関の電子制御化、構造部品の最適設計によって高出力化、低エミッション化と低燃費化の両立を実現してきた。2010 年代に入ってから燃料の多様性が求められるようになり、大型低速エンジンでは重油専焼(ディーゼルエンジン)から新たに重油と LNG, LPG, メタノールなども使用できるデュアルフューエルエンジン(DF エンジン)が登場している。今回は現状最も普及している新燃料である LNG と重油の二元燃料低速エンジンの振動に関する特徴などを紹介する。

2. 船用 2 サイクル二元燃料エンジン

2.1 現状の船用 2 サイクル二元燃料エンジン

LNG と重油のいずれも燃料として使用可能な船用 2 サイクル二元燃料エンジン(DF エンジン)は現在 2 社のライセンサーより商品化されており、国内でも採用実績が増加している。

大型低速 DF エンジンは多くは MAN ES と WinGD の 2 ライセンサーの設計によるエンジンが広く生産されているが、この両社設計の主力の DF エンジンには燃焼方式などに違いがある。両社の DF エンジンの特徴を表 1 に示す。

表 1 MAN ES / WinGD 設計 DF エンジンの特徴

		ME-GI (MAN ES)	X-DF (WinGD)
排ガス	NOx 3 次規制	排気再循環 または排ガス 後処理装置で 対応	機関単独で 対応
負荷変動時安定性		○	○
ガス供給圧力		300bar	13.3bar
ガス供給設備		高圧ポンプ	低圧ポンプ
ガス モード	熱 サイクル	ディーゼル サイクル	オットー サイクル
	燃焼 方式	拡散燃焼	予混合燃焼

MAN ES の DF エンジン (LNG の場合) は”ME-GI”, WinGD の DF エンジンは”X-DF” という型式名である。これらのエンジン間では燃料ガスの供給方式や燃焼サイクルといった熱機関の基幹を構成する箇所に違いがあり、それぞれのエンジンの大きな特徴として認識されている。

2.2 MAN ES ME-GI エンジンと WinGD X-DF エンジンの特徴

2.2.1 燃料噴射方式

ME-GI 機関のガス燃料噴射方式は通常のディーゼル機関と同様に圧縮行程が完了した圧縮空気に着火用のパイロット燃料(液体燃料)と燃料ガスを噴射、パイロット燃料着火を火種として燃料ガスの燃焼を開始、燃焼ガス圧力でピストンを上下に動かしクランク機構を介して軸出力を得る。燃焼サイクルの行程を図 1 に示す。

◆ ME-GI/LGI機関の特徴

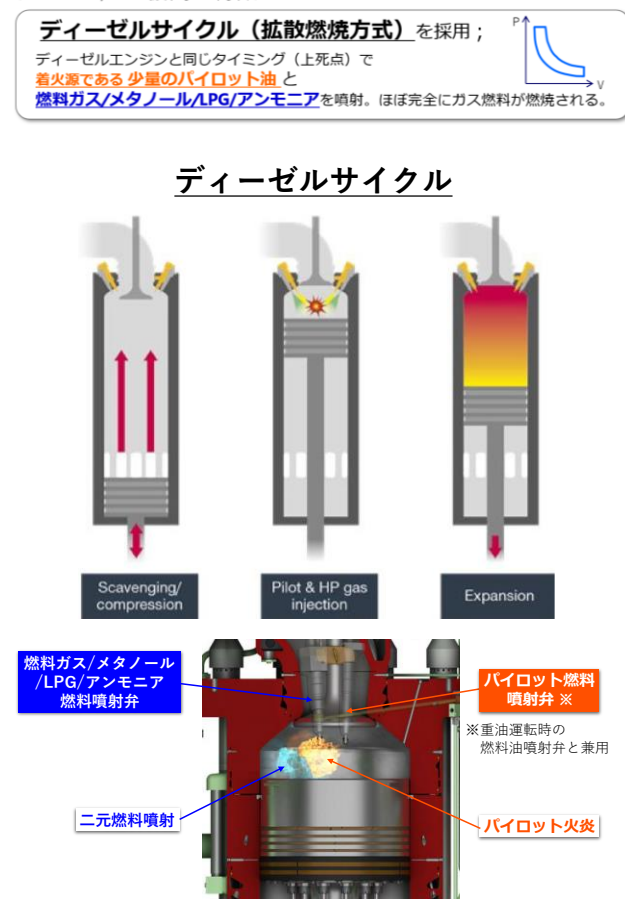


図 1 ME-GI 燃焼コンセプト

ME-GI の燃料噴射系の特徴としては、圧縮上死点にて高圧圧縮空気に燃料ガスを噴射するため、ガス噴射圧力は高圧に昇圧する必要がある。着火源となるパイロット燃料噴射は重油燃焼時の燃料噴射弁と兼用して構成機器を簡素化している。

燃焼熱サイクルとしては、重油使用のディーゼル

機関と同様のディーゼルサイクルである。

これに対して、X-DF 機関のガス噴射方式は ME-GI とは異なる。X-DF 機関のガス噴射は圧縮行程に入ってからピストンが上昇途中でシリンダ内部へ燃料ガスを噴射する。ガス噴射はシリンダライナのピストン行程途中に設けたガス噴射弁からなされる。そして、圧縮行程の間に空気とガス燃料を混合して圧縮上死点に達した時にパイロット燃料を噴射して混合気の燃焼を開始、燃焼ガス圧力でピストンを上下に動かしクランク機構を介して軸出力を得る。X-DF の燃焼サイクルの行程を図 2 に示す。

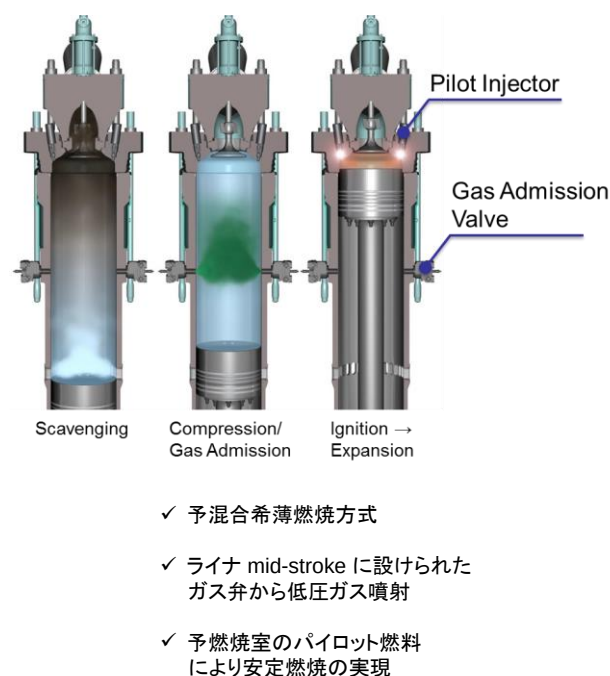


図 2 X-DF 燃焼コンセプト

X-DF の燃料噴射系の特徴としては、圧縮行程途中で燃料ガスをシリンダ内部へ噴射することになるため、低い噴射圧力で混合気を生成することができるのが特徴である。図 3 に X-DF の混合気着火方法を示す。パイロット燃料専用の燃料弁が追加された予燃焼室方式を適用して少量噴射で着火する。シリンダライナ中ほどにガス噴射弁を装備している。

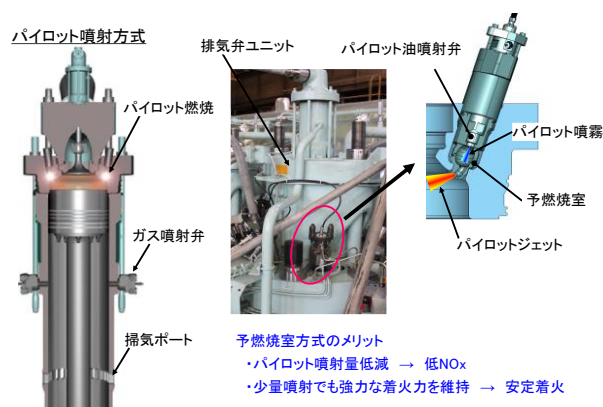


図3 X-DF 混合気着火方法

X-DF のガスモードの燃焼熱サイクルはオットーサイクルである。燃焼室内に圧縮された混合気が広範囲で燃焼を開始することもある。ディーゼルサイクルと比べて燃焼最高圧力(Pmax)は高くなる。X-DF のディーゼルモードとガスモードではガスモードの方が Pmax は高くなる。

2.3 ME-GI と X-DF の起振力の違い

2.1 項に示すとおり ME-GI と X-DF にはガスモードに適用されている燃焼方式の違いによりシリンダ内圧特性が異なる。このため、振動の起振力が変わってくる。

2.3.1 シリンダ内圧

図4～図7に各々の機関のシリンダ内圧代表例を示す。本図にはガス・ディーゼル両モードの違いを100% LOAD 運転時と低負荷運転時（シリンダ数次共振回転数）が分かるように並べてグラフを示す。

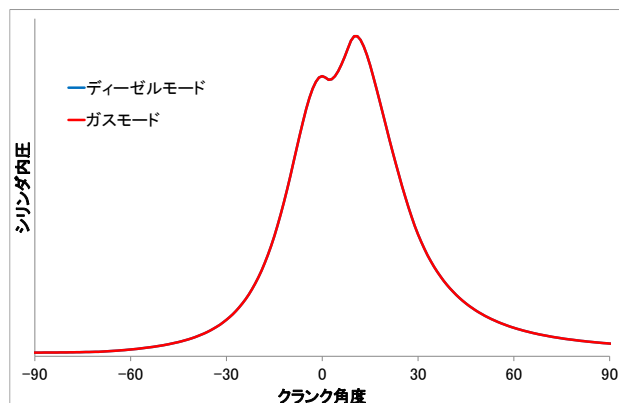


図4 ME-GI シリンダ内圧(ガス・ディーゼル)
比較例(100% LOAD)

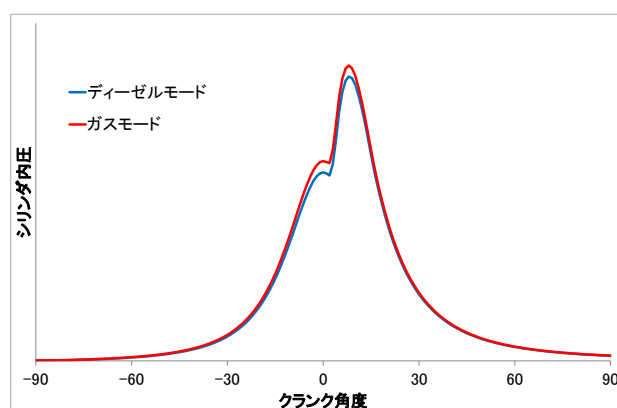


図5 ME-GI シリンダ内圧(ガス・ディーゼル)
比較例(シリンダ数次共振回転数)

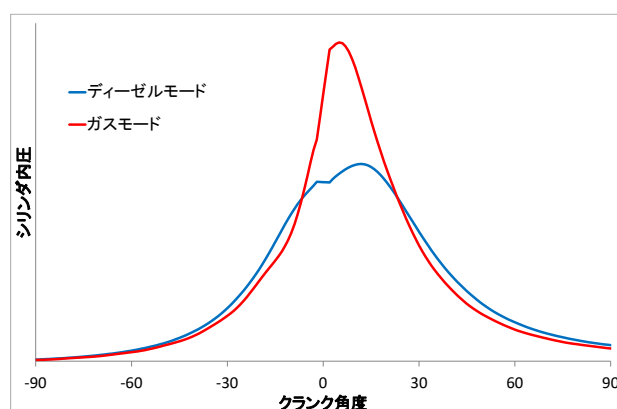


図6 X-DF シリンダ内圧(ガス・ディーゼル)
比較例(100% LOAD)

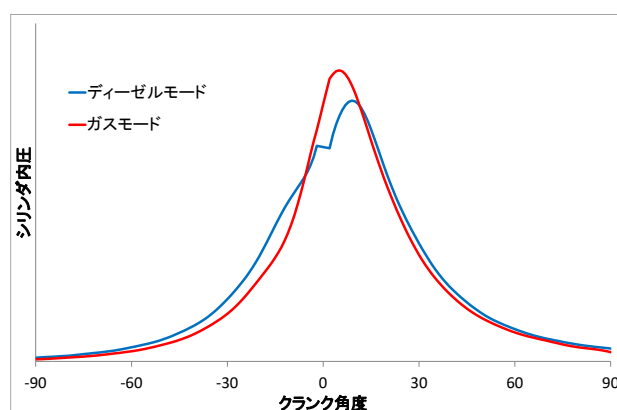


図7 X-DF シリンダ内圧(ガス・ディーゼル)
比較例(シリンダ数次共振回転数)

シリンダ内圧力特性を ME-GI と X-DF で比較すると、ガスモードについては大きく特性が異なる。

ME-GI では高負荷(100%LOAD, 図 4), 低負荷(シリンダ数次共振回転数, 図 5)のどちらもガスモードとディーゼルモードのシリンダ内圧特性はほぼ同じと言える。

X-DF では燃焼最高圧力(Pmax)が特に高負荷(100%LOAD, 図 6)では圧力レベルも最高圧力発生クランク角度もガス・ディーゼルモード間で異なる特性となっている。低負荷(シリンダ数次共振回転数, 図 7)では最高圧力レベルは似通ったものとなるが, 最高圧力発生クランク角度は異なる。シリンダ内圧特性の違いは起振力にも影響が現れることが考えられる。

2.3.2 ねじり振動起振力

ねじり振動は, 特定の回転次数が大きく応答する特性があり, ねじり振動起振力も各回転次数の起振力であるトルクハーモニクスを用いて計算するのが一般的である。トルクハーモニクスとは, クランクに作用するトルク変動を回転次数に分解して算出する係数であり, 特定の回転次数のねじり振動起振力の大小を表す。すなわち, トルクハーモニクスは特定の次数に絞って, シリンダ内圧特性によるねじり振動起振力の大小の比較に用いることが可能である。

ME-GI と X-DF の 6 次のトルクハーモニクスについて比較を図 8 と図 9 に示す。この比較はあくまで起振源の比較であり, 実際の振動応答は共振・減衰が作用した結果となるため単純にねじり振動応答の大小を現わすわけでは無いことに注意が必要である。

ME-GI ではガスモードとディーゼルモードのトルクハーモニクス差が小さい。これはシリンダ内圧のガス・ディーゼルモードの違いと同様の傾向であり, 燃料モードが変わってもねじり振動起振力の差が小さい。

X-DF についてはガスモードとディーゼルモードのトルクハーモニクス差が高出力域になると大きくなる傾向である。こちらもシリンダ内圧の傾向と同一であり, ねじり振動起振力についても高出力域で

燃料モードによる差が大きくなる。

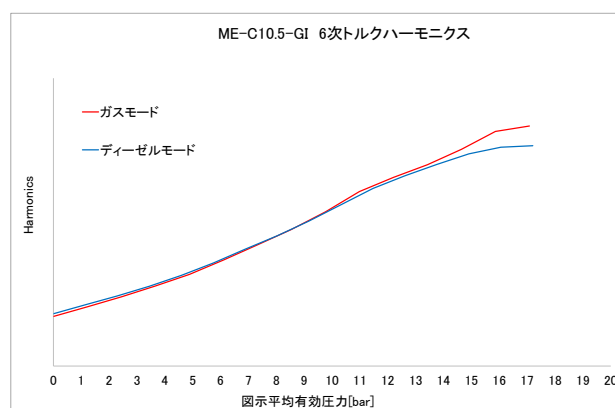


図 8 ME-GI 6 次トルクハーモニクスの比較例

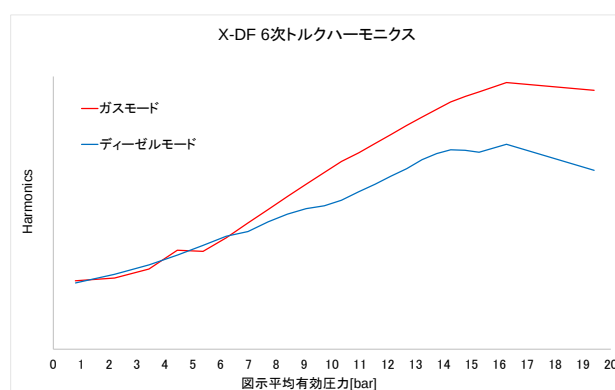


図 9 X-DF 6 次トルクハーモニクスの比較例

2.3.3 ねじり振動計算結果比較

ME-GI と X-DF それぞれのディーゼルモード, ガスモードのねじり振動計算例の比較を図 10 と図 11 に示す。

ME-GI については起振源となるシリンダ内圧特性が燃料モードによる差がほとんど無いため, ねじり振動応答についても低負荷から高負荷の全域で大差が無い結果となっている。

X-DF については, 前項までの解説で挙げた通り燃料モードによってシリンダ内圧特性や起振力に違いがあることから, ねじり振動応答についても差が生じる。高負荷ではガスモードの方がやや高い応答となってくるが, 平均的な商船の軸系で現れるシリンダ数次共振振動の共振回転数は低負荷であるため, ガスモードとディーゼルモードのシリンダ内圧, トルクハーモニクス差は小さい。従って, ねじり振動

応答についても燃料モードによる違いは大きくない。共振が発生しない高負荷域ではほとんど違いが判らない ME-GI と比べても X-DF の応答はガスモードの方がわずかながら大きい応答を示す。

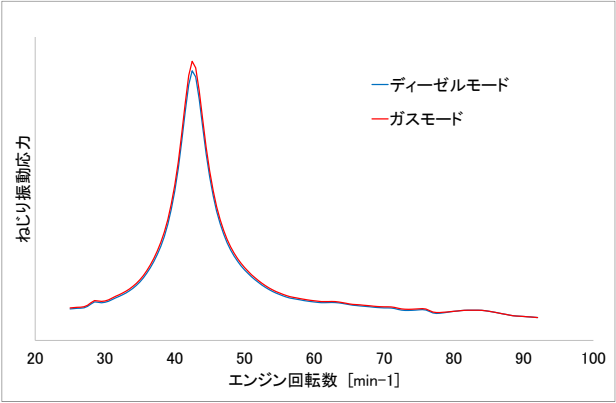


図 10 ME-GI ねじり振動応答計算例
(中間軸,I/6 次)

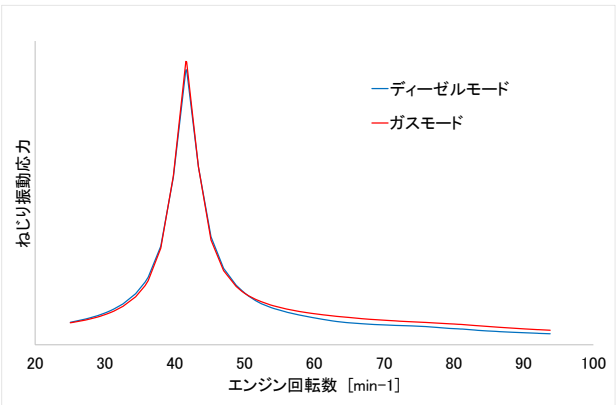


図 11 X-DF ねじり振動応答計算例
(中間軸,I/6 次)

2.3.4 アンバランスモーメント

船体振動の起振源となるアンバランスモーメントは、図 12 に示す外部モーメント M_{1V} , M_{1H} , M_{2V} , M_{4V} が一般に評価対象とされる。アンバランスモーメントはシリンダ数、着火順序、運動部品の重量に大きく依存するが、シリンダ内圧に依存しないため燃料モードによる違いはない。従って、これまでの 2 ストローク大型低速ディーゼルエンジンと DF エンジンでは特性は変化しない。X-DF(6X62DF)のアンバランスモーメント例を表 2 に示す。

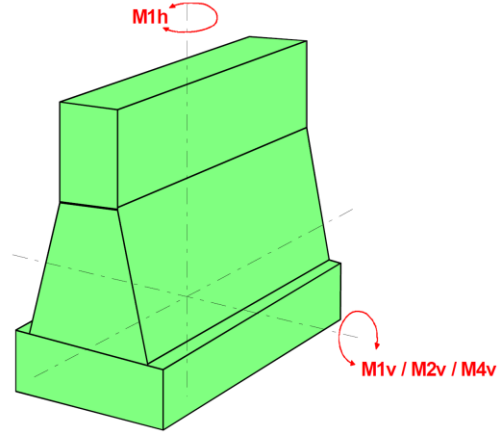


図 12 外部モーメント種類

表 2 X-DF 6X62DF 外部モーメント例

エンジン機種		6X62DF	
燃料モード		ディーゼルモード	ガスモード
外部モーメント	M_{1V}	0	0
	M_{1H}	0	0
	M_{2V}	1181	1181
	M_{4V}	82	82

2.3.5 ガイドフォースモーメント

主機関架構振動については着火順序やシリンダ内圧に関わるガイドフォースモーメントが起振源となっている。シリンダ内圧に特徴が現れる DF エンジンではガイドフォースモーメントに違いが現れる。

図 13 にガイドフォースモーメントの種類(H 形, X 形)を示し、図 14 にガイドフォースモーメントが引き起こす架構振動モード図(H 形振動/X 形振動)を示す。

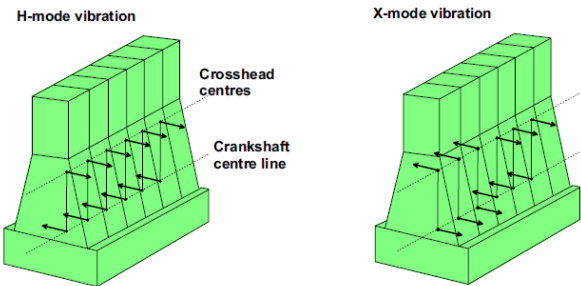
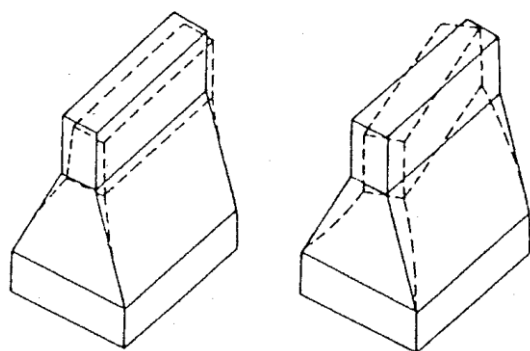


図 13 ガイドフォースモーメント種類



H形振動

X形振動

図 14 架構振動モード図

ME-GI はディーゼルモードとガスモードのシリンダ内燃焼圧力に大きな違いが無いことからガイドフォースモーメントについて燃料モードによる違いは小さい. 図 15 と図 16 に ME-GI のガイドフォースモーメント例を示す.

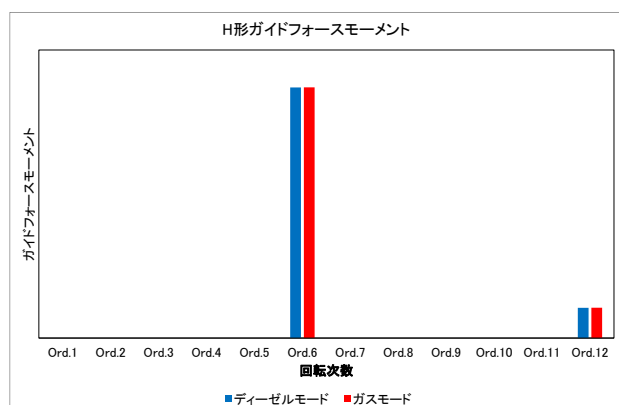


図 15 ME-GI H 形ガイドフォースモーメント例
(6S60ME-C10.5-GI, 100% LOAD)

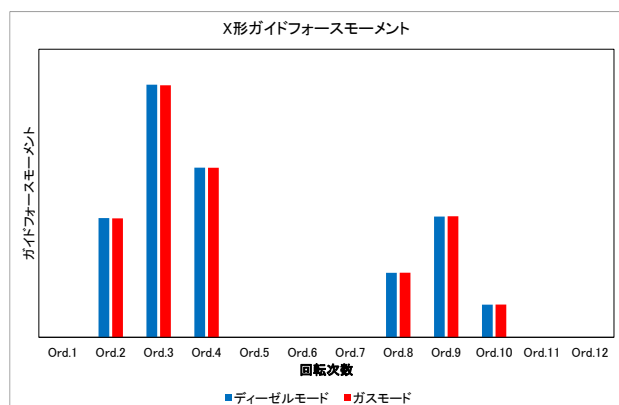


図 16 ME-GI X 形ガイドフォースモーメント例
(6S60ME-C10.5-GI, 100% LOAD)

一方で X-DF についてはディーゼルモードとガスモードでシリンダ内燃焼圧力に違いがあることからガイドフォースモーメントに燃料モードによる違いが生じる. 図 17 と図 18 に X-DF のガイドフォースモーメント例を示す.

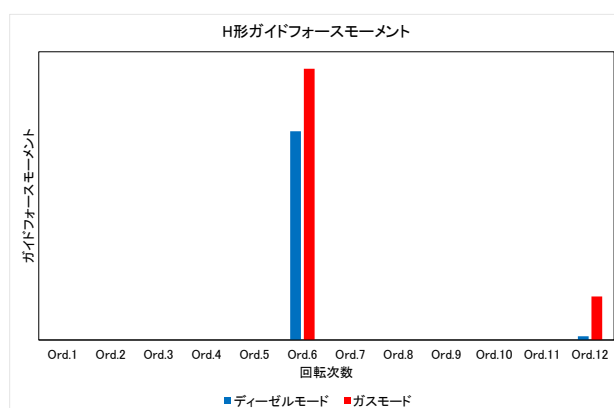


図 17 X-DF H 形ガイドフォースモーメント例
(6X62DF, 100% LOAD)

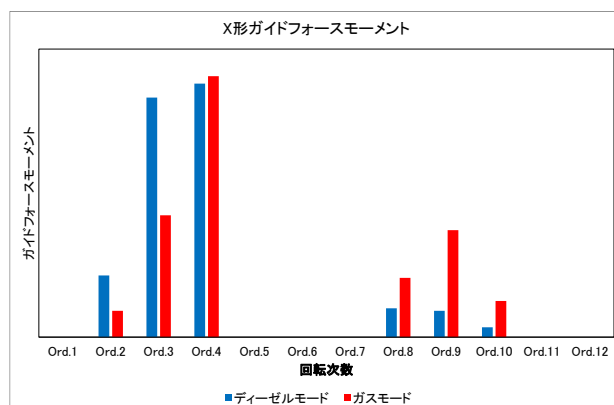


図 18 X-DF X 形ガイドフォースモーメント例
(6X62DF, 100% LOAD)

以上より, ガイドフォースモーメントについては ME-GI と X-DF ではディーゼル・ガスモード間の違いの現れ方が大きく異なる. X-DF では燃料モードの変化により架構振動の大きさが変化し, ME-GI では燃料モードによらず架構振動の変化は小さい.

3. まとめ

近年採用実績がますます増加している船用 2 サイクル二元燃料エンジンの振動の特徴を紹介した。とりわけ、LNG(ガス)と重油の二元燃料 DF エンジンではガスの燃料噴射・燃焼方式が異なる 2 型式のエンジン(ME-GI と X-DF)が市場に供給されている。

これらの異なる特徴を持つエンジンはそれぞれのガス・ディーゼルモード双方の振動についても異なる以下の特徴を持っていることが挙げられる。

3.1 ME-GI の振動特徴

- ガスモードとディーゼルモード間でねじり振動・機関振動に大きな違いは現れない。
- 従来のディーゼルエンジンと振動形態は変わらない。

3.2 X-DF の振動特徴

- ガスモードとディーゼルモードでシリンダ内圧特性が異なることから、両燃料モード間にねじり振動・機関振動とも違いが現れる。
- ねじり振動はシリンダ数次の共振点が現れる低負荷では起振力の差が小さいために振動応答の差も小さくなる。
- 機関振動(架構振動)は高負荷側ではガイドフォースモーメントが燃料モードによって差が大きくなるため振動応答にも違いが現れる。

今後は船用エンジンの燃料多様化はますます進んでいく。各種燃料の燃焼形態も各種各様の違いを持っていることから振動起振力にも違いが出てくると考えられる。我々エンジンメーカーとしても各燃料モードの振動特徴を捉えてよりよい船用エンジン開発を進めていきたい。