

**GTL の船用利用のための課題についての調査研究
報告書**

2009年3月

(財) 日本船舶技術研究協会

GTL の船用利用のための課題についての調査研究 H20 年度報告書

目 次

1. はじめに	2
1. 1 調査研究の背景	2
1. 2 調査研究の目的	2
2. GTL の船用利用に関する将来予測	4
2. 1 GTL の利用に適する船種及び運航パターンに関する検討	4
2. 2 市場規模の推定	4
3. 船用燃料として利用する場合に想定される技術的課題の整理	7
3. 1 文献による調査結果	7
3. 1. 1 GTL 燃料の一般的特徴と実用面での特質	8
3. 1. 2 GTL の自動車用ディーゼル機関への適用性の観点から見た検討結果	9
3. 2 船用エンジンメーカーへの訪問・ヒアリング調査結果	16
3. 3 重油/GTL を混合利用した場合の燃焼性能・排ガス特性の推定	20
3. 3. 1 燃焼性能	20
3. 3. 2 排ガス特性	20
3. 4 将来検討すべき事項及び実証実験に関するまとめ	22

1. はじめに

1. 1 調査研究の背景

2008年の原油価格の高騰は海運業界に大きな衝撃を与えた。その後、価格は落ち着いたものの、長期的には需要の増大による価格上昇傾向は続くと考えられている。一方、燃料の安定確保、すなわちエネルギー安全保障の観点や、環境問題に対する意識の高まりから、二酸化炭素排出を制限する政策は強化される見通しである。このような状況から、そのほとんどを石油燃料から得ている海運においても、今後はエネルギーの多様化を進める必要がある。

また、MARPOL条約 Annex VIの改定により、船用機関の排ガス規制は強化されることが決まっている。特に硫黄酸化物(SO_x)規制においては、燃料油中の硫黄分が厳しく規制されることになり、現行の残渣油(C重油)の利用は困難になると考えられる。しかしながら、残渣油からの硫黄除去は技術的にも経済的にも容易ではないため、より硫黄分の低い代替燃料が有力な選択肢の一つと考えられるようになった。さらに、窒素酸化物(NO_x)規制の強化では、エンジン排ガスの後処理装置として脱硝触媒の利用が必然と考えられるが、この触媒は硫黄分による障害があるとされている。この観点からも、燃料の低硫黄化への要求は高い。

エネルギー多様化に関しては様々な研究開発がなされているが、天然ガスを液体燃料に変換したGTL(Gas-to-Liquid)は、軽油に近い液体燃料であることから、船舶への適合性が高いと考えられる。また一方で、現在、石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)及び日本GTL技術研究組合によって、生産技術に関する実証プロジェクトが進められており、国内における試験生産が2009年度中にも開始される見通しである。

GTL燃料は、SO_x、PMなどの大気汚染物質の排出量を大幅に低減できるという魅力があり、また、性状による特性をうまく利用すれば燃焼効率の向上やNO_x削減の可能性についても期待が持てる場所である。このような状況を踏まえ、GTLを船舶用の代替燃料の一つとして想定した場合の技術的課題、その他インフラ整備等利用上の課題を明らかにすることの意義は高い。

1. 2 調査研究の目的

本調査研究では、燃料の多様性拡大、低硫黄化の進展、GHGガス排出抑制等の観点から、GTL利用の意義を明らかにし、一方、船用機関にGTLあるいはGTLと重油の混合燃料を使用する場合の技術的課題、試験導入に適した航路等について調査検討を行った。

具体的な調査研究項目は、以下の通りである。

(1) GTLの利用に適した船種、運航パターン

技術的観点、商業的観点等からGTLの利用に適した船種を絞り込み、具体的な航路に即した運航パターンの検討を行う。

(2) 船用利用を想定した場合の市場規模

GTL の船用分野における市場規模を推定する。現状では精度の高い推測は困難と考えられるが、可能な範囲で市場規模の見積もりを行う。

(3) GTL を船用燃料として利用する場合の技術的課題

文献調査等の結果に基づき、GTL を船用燃料として利用する場合の燃焼性能及び排ガス特性を推定する。

船用エンジンメーカー及び GTL 利用実績のある機関からのヒアリングを実施し、GTL を船用燃料として利用する場合の技術的課題を明らかにし、将来的に必要となる検討事項及び実証実験について整理する。

2. GTL の船舶利用に関する将来予測

2. 1 GTL の利用に適する船種及び運航パターンに関する検討

近い将来、GTL 実用化が実現した直後は、GTL を供給可能な設備が限定されることから、利用に適する船種についても限定的に考える必要がある。

今後、NO_x・SO_x等の環境規制が強化されること、CO₂をはじめとする温室効果ガス排出規制が強化されること等を鑑みると、選択式還元触媒（SCR）技術を用いた各種機器等の搭載により対応が可能な外航船と異なり、そのような改造が困難な比較的小型（500 トン未満）の内航船の GTL 利用ニーズが一番大きいと考えられることから、これらの船舶を検討の対象とした。

更に、これらの中で、定期傭船に従事している船舶、及び、離島航路、都市間・都市内交通用のフェリー、水上バス等、旅客を搭載して運航している船舶を抽出し、GTL 実用化が実現した直後の潜在需要量として算出した。

一方、GTL 実用化後一定期間が経過し、GTL 供給設備が整った後は、GTL 利用ニーズは徐々に大型船にも広がっていくものと考えられることから、全ての内航船を念頭に、将来的な潜在需要量を算出した。

2. 2 市場規模の推定

「内航船舶明細書 2009」、「日本船舶明細書 I 2009」を使用し、以下の検討を行った。

まず、「内航船舶明細書 2009」（総トン数 100 トン以上の内航登録船を収録）より、総トン数 500 トン未満であって、定期傭船の運航形態を取っているものを抽出すると、1,374 隻となる

内訳は、

タンカー	125 隻
セメント等運搬船	70 隻
ケミカル運搬船	274 隻
液化ガス等運搬船	12 隻
コンテナ船	6 隻
一般貨物船	850 隻
押船・曳船	37 隻

次に、「日本船舶明細書 I 2009」（総トン数 100 トン以上の日本国籍を有する船舶を収録、ただし、内航登録船を除く）より、旅客を運ぶ総トン数 500 トン未満の船舶を抽出すると、306 隻となる。

内訳は、

旅客船	169 隻
-----	-------

フェリー 85 隻
 貨物／旅客兼用船 12 隻

以上の船舶を、総トン数 100～299 トン、300～499 トンの 2 つの categories に分類し、各船舶の年間運転日数を 200 日と仮定した上で、各明細書に記載されている燃料消費率等の category 毎の平均値を用いて年間燃料消費量を算出すると以下の表になる。

GT	船種	隻数	年間運転日数	燃料消費率 (ton/day)	年間燃料 消費量 (ton)
対象船舶 (100-299GT)	旅客船	141	200	1.84	368
	フェリー	85	200	1.09	218
	貨物/旅客兼用船	6	200	3.70	740
	タンカー	66	200	2.16	432
	セメント等運搬船	21	200	2.25	450
	ケミカル運搬船	117	200	2.20	440
	液化ガス等運搬船	4	200	2.40	479
	コンテナ船	0			
	一般貨物船	359	200	2.52	503
	押船・曳船	35	200	7.50	1500
対象船舶 (300-499GT)	旅客船	28	200	2.2	440
	フェリー	40	200	4.8	960
	貨物/旅客兼用船	6	200	6.1	1220
	タンカー	59	200	3.01	602
	セメント等運搬船	49	200	3.945	789
	ケミカル運搬船	157	200	3.2	640
	液化ガス等運搬船	8	200	2.4	480
	コンテナ船	6	200	5.64	1128
	一般貨物船	491	200	4.3	860
	押船・曳船	2	200	7.50	1500

13749

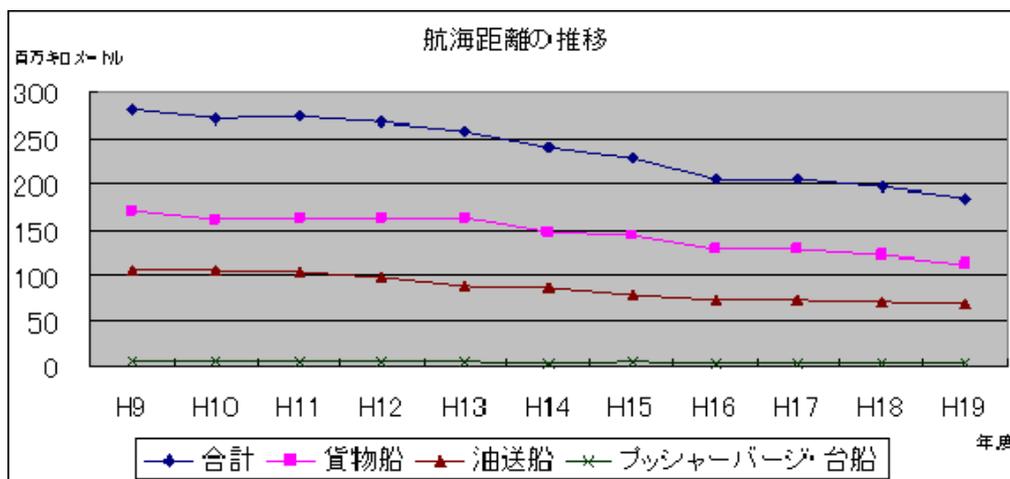
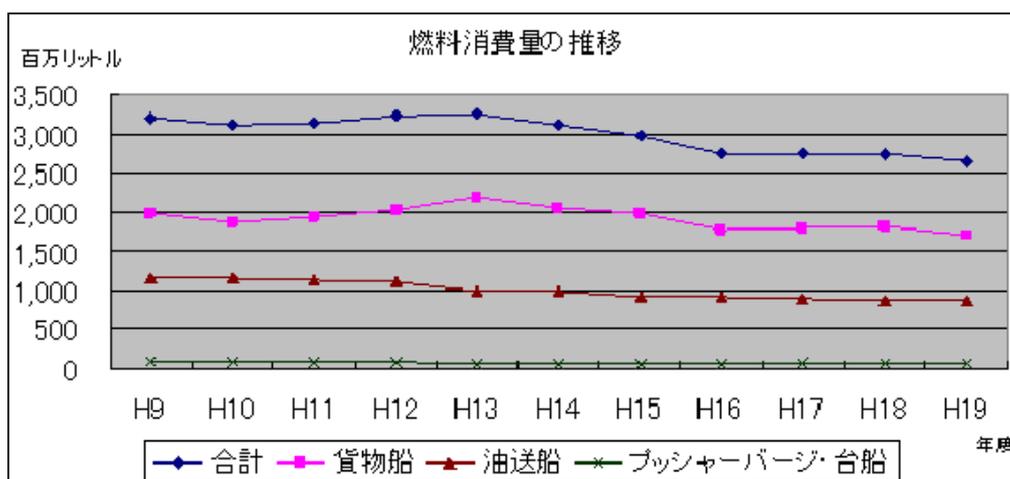
今後、これらの隻数が横ばいで推移すると仮定し、燃料への GTL 混合比を 10% とすると、短期的な潜在需要量は、年間 1,400 トン弱となる。

一方、将来的な潜在需要量については、「内航船舶輸送統計調査」（国土交通省総合政

策局情報管理部情報安全・調査課交通統計室)によると、平成19年度の内航船の燃料消費量は、合計260万トン程度とされており、今後、これらの隻数が横ばいで推移すると仮定し、燃料へのGTL混合比を10%とすると、将来的な潜在需要量は、年間26万トン程度まで拡大することとなる。

平成19年度 燃料消費量・航海距離

項目	燃料消費量(千リットル)			航海距離(千キロメートル)		
	19年度	18年度	対前年度比	19年度	18年度	対前年度比
合計	2 668 622	2 748 901	96.7	185 116	196 048	94.4
貨物船	1 706 986	1 813 079	94.1	111 997	121 828	91.9
油送船	879 664	871 431	100.9	69 127	70 234	98.4
プッシャーバージ・台船	71 972	64 392	111.8	3 992	3 986	100.1



出典：国土交通省「内航船舶輸送統計調査」

3. 船用燃料として利用する場合に想定される技術的課題の整理

3. 1 文献による調査結果

船用燃料として GTL を利用する際に想定される問題点及び将来の開発課題を明らかにするため、文献による調査を実施した。

GTL を燃料として利用するための研究はこれまでに複数の機関によって実施されており、多くの関連論文が出ている。関連論文の内容としては、燃料としての GTL の特性に関するもの、GTL の自動車用ディーゼルエンジンへの適用性及び排ガス特性について検討されたものが多く、船用燃料としての利用の観点から論じた文献はほとんど見当たらなかった（本調査で参考にした論文では、後述する文献^[1]のみ）。

本調査で参考にした論文を、以下に時系列順に示す。

- [1] 横田久司、田原茂樹、佐野藤治、合成軽油（GTL）の排出ガス性状への影響調査（その 1）、東京都環境科学研究所年報、2002, pp.140-146.
- [2] 横田久司、田原茂樹、佐野藤治、合成軽油（GTL）の排出ガス性状への影響調査（その 2）、東京都環境科学研究所年報、2002, pp.147-151.
- [3] 花島脩、鍵渡徳彦、船舶からの排ガス規制－燃料による対応、日本マリンエンジニアリング学会燃料潤滑委員会資料、2002, pp.39-46.
- [4] 松原秀樹、GTL 燃料の生産動向とディーゼル車両への利用、自動車技術、Vol.58., No.11, 2004, pp.41-46.
- [5] 辻村拓、小熊光晴、後藤新一、GTL 燃料の物性とエンジン・車両排ガス特性、日本マリンエンジニアリング学会誌、第 40 巻、第 6 号、2005, pp.29-34.
- [6] 辻村拓、後藤新一、松原秀樹、GTL 軽油性状がディーゼル車両排出ガス特性に及ぼす影響、自動車技術会論文集、第 37 巻、第 1 号、2006.
- [7] 辻村拓、後藤新一、松原秀樹、GTL 軽油ディーゼル車両の粒子状物質排出特性に関する研究、自動車技術会論文集、第 37 巻、第 6 号、2006, pp.147-153.
- [8] 三澤誠太郎、森昌昭、北野康司、阪田一郎、Richard Clark、GTL 燃料性状が直噴ディーゼルエンジンの燃焼に及ぼす影響、自動車技術会秋季学術講演会前刷集、No.122-06, 2006.
- [9] 石井素、鈴木央一、川野大輔、後藤雄一、阪田一郎、FTD 自動車の開発試作（第 1 報）－GTL 燃料使用時のベースエンジンの排出ガス特性－、交通安全環境研究所研究発表会講演論文集、2006, pp.105-106.
- [10] 石井素、鈴木央一、川野大輔、後藤雄一、阪田一郎、FTD 自動車の開発試作－燃料特性を利用した排出ガス低減方策－、交通安全環境研究所研究発表会講演論文集、2007, pp.105-106.
- [11] 石井素、鈴木央一、川野大輔、後藤雄一、阪田一郎、FTD 自動車の開発試作－試作

車両の排出ガス特性一、交通安全環境研究所研究発表会講演論文集、2008, pp.97-98.

本節では、文献調査を通じて得られた結果を、第3. 1. 1節「GTL の燃料としての一般的特徴と実用面での特質」、及び第3. 1. 2節「GTL の自動車用ディーゼル機関への適用性の観点から見た検討結果」に分けて整理する。

3. 1. 1 GTL 燃料の一般的特徴と実用面での特質

GTL の燃料としての性状については、わが国では特に自動車への適用の観点から検討されており、様々な特性が明らかにされている（例えば^{[4],[5]}）。

燃料性状の観点から見た場合、GTL 燃料は、直鎖型パラフィン（Normal-Paraffin）を主成分とする第一世代と、側鎖を持つ分枝型パラフィン（Iso-Paraffin）が成分の50%以上を占める第二世代とに分類される。なお、分枝型パラフィンの含有量は、GTL の製造工程における水素化分解の際に用いる触媒により左右される。

GTL 燃料の性状は、その製造工程でどのような合成触媒と水素化分解技術を用いるかによって細かい差異はあるが、その一般的な特徴及び実用面での特質を以下に整理する。

(a) GTL 燃料の一般的特徴

- (1) GTL 製造の前段階で硫黄分を除去した後にパラフィン基を合成するため、硫黄分や芳香族成分をほとんど含まない。よって、燃料自体が無色透明でクリーンである。
- (2) 芳香族成分をほとんど含まない（直鎖飽和炭化水素の含有量が多い）ため、着火性が良い。セタン価（ディーゼル機関における軽油のノッキングの起こりにくさ及び着火性の良さを示す指標）は、一般軽油が54程度、DME（ジメチルエーテル）が55程度であるのに比べ、GTLでは約78である。
- (3) 低位発熱量が高い（一般軽油：約43kJ/kg、DME：約28kJ/kgであるのに比べ、GTL：約46kJ/kg）。
- (4) 液体密度が小さい。
- (5) 蒸気圧が軽油と同等で、引火点が軽油より高いため、使用安全性が高い。

(b) GTL 燃料の実用面での特質

- (1) 常温・常圧で液体であるため、既存の給油・物流インフラの活用が可能で、通常の石油製品とほとんど同様に取り扱うことができる。
- (2) 動粘度が軽油より低く、硫黄分や極性物質を含まないため、自己潤滑性が低い。
- (3) 芳香族成分をほとんど含まないため、燃料噴射ポンプ周りのシーリング材料への影響（膨潤性の悪化）が懸念される。
- (4) 直鎖型パラフィンを多く含む第一世代 GTL は流動点が高いため、低温における流動性が悪い。

上に述べた特徴・特質のうち、(a)の(1)~(3)、(a)の(5)及び(b)の(1)はGTL燃料の利点と考えられる。

一方、(a)の(4)及び(b)の(2)~(4)のようなGTL燃料の課題点のいくつかについては、個別に克服する必要がある。これらの課題点のうち、(b)の(2)の自己潤滑性の不足については、エステル系ないし脂肪酸系の潤滑向上剤を使用することで比較的容易に改善することが可能であると考えられている。また、(b)の(4)の低温流動性の問題については、分枝型パラフィンの含有量が多い第二世代GTLを用いることにより、①流動点を下げ、②潤滑性を上げる効果を得ることができる^[4]。

3. 1. 2 GTLの自動車用ディーゼル機関への適用性の観点から見た検討結果

GTL燃料を自動車用ディーゼル機関に適用するための検討は複数の機関で行われており、参考文献も多い。

先に述べたGTL燃料の課題点のうち、自己潤滑性の不足については産業技術総合研究所^[5]において、シール材膨潤性をはじめとする材料適合性については、産業技術総合研究所^[5]や交通安全環境研究所^[11]において、それぞれ実験的検討がなされている。

また、GTL燃料の燃焼性能、排ガス特性については、東京都環境科学研究所^{[1],[2]}、産業技術総合研究所^{[5],[7]}、トヨタ自動車^[8]、交通安全環境研究所^{[9],[11]}など、多くの機関で実験的研究が実施されている。

以下に、各研究の内容及び結果の概要を機関別に示す。

(a) 東京都環境科学研究所

東京都環境科学研究所では、GTL(純品)^[1]及びGTL混和軽油^[2]を自動車用ディーゼル機関で用いた場合の排出ガス特性と触媒影響について実験的検討を行っている。

実験では、GTL(純品)、GTL混和軽油及び低硫黄軽油の3種類を最新規制(平成10年)適合車両の燃料とした場合について、4種類の試験走行パターンにおける排ガス性能を計測し、排ガス特性と酸化触媒の有無との関係を調べている。供試車両のエンジン設計・燃料噴射時期・噴射圧力等は市販軽油(硫黄含有率500ppm)に合わせて最適化されたままで、当該実験のためにエンジン条件の変更は行われていない。

実験で使用された3種類の供試燃料(GTL純品、GTL混和軽油及び低硫黄軽油)のうち、GTL混和軽油は、GTLを30%の割合で低硫黄軽油に混和したものである。これらの供試燃料は、蒸留性状が比較的近いものが選定されている。供試燃料の硫黄含有率は、GTL純品で1ppm未満、GTL混和軽油で約22ppm、低硫黄軽油では約30ppmである。また、セタン指数についてはGTL純品で約80、GTL混和軽油で約65、低硫黄軽油では約56と大きく異なる。

測定条件は、①法定モード(ディーゼル自動車13モード)、②東京都実走行パターン3

種類 (No.2 : 平均車速 8.4km/h、試験時間 878s、No.5 : 平均車速 18.0km/h、試験時間 1,178s、No.8 : 平均車速 28.5km/h、試験時間 1,178s) の計 4 種類である。ここで、東京都実走行パターンとは、都内幹線道路の走行調査結果から、平均車速の区分ごとにアイドリング時間比率等の走行条件で代表的な車速の変化パターンを抽出したものである。

実験結果の概略を以下に示す。

- ①排ガス特性 : GTL 純品を使用した場合には、低硫黄軽油と比較して PM が 18~30%、NO_x が 15%程度、CO が 22~37%減少した。THC については、法定モードで 8%増加したが実走行では 36%低減した。また、GTL 混和軽油を使用した場合には、低硫黄軽油と比較して CO、THC が 20%弱減少したが、PM 及び NO_x の減少は若干量であった。
- ②酸化触媒の排ガス低減効果への影響 : GTL 純品あるいは GTL 混和軽油を使用した場合、PM 及び NO_x については酸化触媒による低減効果はほとんど見られなかったが、CO、THC については顕著な低減効果が見られた。
- ③燃料消費率 : 同一の東京都実走行パターンに対して、供試燃料の種類及び触媒の有無による燃料消費率の差はほとんど見られなかった。

(b) 産業技術総合研究所

産業技術総合研究所^[5]では、GTL 燃料を自動車用ディーゼル機関へ用いる際に懸念される自己潤滑性の不足及びシール材膨潤性について実験的な検証を行い、さらに、新長期排ガス規制に対応した大型ディーゼル車両の実走行状態を再現すること等が可能な実験棟を使用して、GTL 軽油による車両排ガス特性についても検討を行っている。特に粒子状物質 (PM) については、GTL の燃料分子構造の相異が PM 排出量と粒子径分布へ及ぼす影響などについて詳細な検討結果を得ている^{[6],[7]}。

主な結果について、以下に項目別に示す。

(1) 潤滑性

潤滑性については、GTL 軽油及び超深度脱硫処理によって 50ppm 以下にまで低硫黄化した軽油について、潤滑向上効果のある脂肪酸タイプ及びエステルタイプの向上剤を添加し、HFRR (High-Frequency Reciprocating Rig; 軽油用の潤滑性評価機) を使用して石油学会規格 (JPI-5S-50-98) に準じて各添加剤による潤滑向上効果を調べている^[5]。これは、試験燃料に浸漬された硬球を 50Hz 周期で往復動させ、この際にディスクとの摩擦により硬球に残る磨耗痕の平均径を光学顕微鏡により観察し、湿度補正を経て得られる磨耗痕径 (WS1.4) から、試験燃料の潤滑性を評価するものである。試験結果の概要を以下に示す。

- ① 潤滑向上剤を添加しない場合には、GTL 軽油及び低硫黄軽油の潤滑性能はいずれも国際標準規格 (WS1.4 < 460µm) を満たさず、実用上問題がある。
- ② 潤滑向上剤を 100ppm 程度添加すると、両者とも WS1.4 < 460µm となり、実用レ

ベルまで潤滑性が向上する。

以上より、GTL 軽油の潤滑性の問題については 100ppm 程度の潤滑向上剤を添加することによって実用に供することが可能であるとしている。

(2) シール材膨潤性

自動車の燃料系に使用されるゴム等のシール材は、あらかじめゴム素材の膨潤性を考慮した上で十分なシール効果が得られるよう設計されるが、GTL 軽油のように芳香族分の含有率が低いとゴム素材が十分に膨潤せず、燃料供給系に漏れやにじみを発生させる恐れがある。

シール材膨潤性の問題については、GTL 軽油を用いて 3 種類の標準ゴム (NBR, HNBR 及び FKM) の膨潤試験を実施し、GTL 軽油がゴム素材の膨潤性に及ぼす影響について調べている^[5]。試験では、2mm の加硫ゴムシートからダンベル状に打ち抜いた試験片を、3 種類の供試燃料 (脱硫黄前軽油、低硫黄軽油、GTL 軽油) を入れたガラス容器内において 23℃にて 72 時間浸漬した。試験結果の概要は以下の通りである。

- ① 浸漬後の標準ゴムの物性値の変化は、多くの項目で、脱硫黄前軽油 > 低硫黄軽油 > GTL 軽油 の順であった。
- ② 標準ゴムの物性値変化の燃料による差異は小さく、GTL 軽油が標準ゴム材料 (NBR, HNBR, FKM) の膨潤性に及ぼす影響は軽油と同程度である。

以上より、GTL 軽油のシール材膨潤性の問題についてはそれほど大きな問題はないとしているが、一方で、以下の点に留意すべきであると指摘している。

- ① 製品化されたシール材の場合、ゴムへの添加物に対して GTL 軽油が影響を及ぼす可能性があるため、この点については別途、試験等による検討を要する。
- ② 既販の車両で低硫黄軽油を燃料とした場合に、劣化したゴム材から燃料の漏れやにじみが発生した例が報告されている。

(3) 排ガス特性

排ガス特性に関する実験では、燃料性状の異なる 2 種類の GTL 軽油を既販車両 (平成 10 年排出ガス規制適合車両) の燃料とした場合について、種々の定常運転条件における排ガス性能を計測し、GTL 軽油性状と車両排ガス性状との関係を調べている^[5]。供試車両のエンジン設計・燃料噴射・EGR 率等の制御は市販軽油に合わせて最適化されたままで、当該実験のために車両の改造は行われていない。

実験における 2 種類の供試燃料 (GTL#1 及び GTL#2) は、いずれも硫黄分・芳香族分・オレフィン分 (C_nH_{2n} で表されるエチレン系不飽和炭化水素の総称) をほとんど含まず、またセタン価も約 92 とほぼ等しいが、以下に示すように、異性体 (飽和炭化

水素の分枝構造)の割合が大きく異なる。

- GTL#1： C25 以上の高級な成分は含まれないが C8～C24 まで広く分布しており、そのうち約 60%が分枝状の炭化水素。
- GTL#2： 成分が C14～C18 に限定され、異性体は約 14%しか含まれない。

実験条件は、アイドリング（エンジン回転数：650rpm）からエンジン回転率 60%（1920rpm）におけるエンジン負荷率 20, 40, 60, 80%の定常運転条件である。

実験の結果、市販軽油と同等の最大駆動力が得られたエンジン回転数（1920rpm）に対して負荷条件を変化させた場合の GTL 軽油に対する排ガス性能は、すべての排出ガス成分について市販軽油より低減され、また、すべての負荷条件において排出ガスが低減された。実験結果の概略を排出ガスの成分ごとに以下に示す。なお、低減効果（%）は市販軽油の重量排出率を 1 とした場合の相対比較で示したものである。

- ①CO：低減効果は 40～50%で、アイドリング～低負荷条件で特に顕著。
- ②THC（total HydroCarbon）：低減効果は 22～50%で、アイドリング～低負荷条件で特に顕著。
- ③NOx：すべての負荷条件において低減効果が現れたが、CO や THC に対する低減効果ほど顕著には現れない。
- ④PM：低減効果は 31～76%で、アイドリング～低負荷条件で特に顕著。また、C19 以上の炭化水素を含まない GTL#2 に対する PM 低減効果が極めて大きい。大幅な PM 低減効果の理由としては、Soot に対する化学的生成能の高い芳香族成分が含まれないためと考えられる。

（c）トヨタ自動車

トヨタ自動車は昭和シェル石油の協力を得て、GTL 燃料のポテンシャルを引き出すため、燃料特性を活用した直噴ディーゼルエンジンの EGR 率制御について検討し、後処理システムとの組み合わせによって排ガス性能がさらに向上できる可能性を示している^[8]。また、GTL の排ガス性能についても実験的に調べ、HC 及び PM を低減すること、軽油と同じ運転条件では NOx 排出量は軽油と同等であること等を明らかにしている。

（d）交通安全環境研究所

交通安全環境研究所では、平成 17 年度からの 3 ヶ年計画で国土交通省からの委託を受け、産官共同による次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクトの一環として、FTD（Fischer-Tropsch Diesel）自動車の研究開発を進めている。ここで FTD とは、当該プロジェクトが、天然ガス由来の GTL の他にバイオマス由来の BTL（Biomass to Liquid）を視野に入れており、これらがいずれも FT（Fischer-Tropsch）合成法により製造される燃料であることから命名されたものである。当該プロジェクトのコンセプトは以下の通りである。

- ① FTD 燃料 100%を前提としたディーゼルエンジン燃焼系の最適化を行う。
- ② 後処理装置として NOx 吸蔵触媒及び DPF (Diesel Particulate Filter) を採用し、FTD 燃料の使用を前提とした NOx 還元時の燃料添加量及び時期等の最適化を図る。
- ③ 開発対象とするディーゼルエンジンは排気量を 2L、4L、7.7L の 3 種類をベースとし、最終的に排気量 7.7L のエンジン開発及び試作に集約する。
- ④ 開発目標は、NOx については 2009 年規制値 (0.7g/kWh) 以下、PM については 2009 年規制値 (0.01g/kWh) 以下、燃費については現行のディーゼル車以上とする。

プロジェクト初年度となる平成 17 年には、排気量 7.7L の新短期規制対応のベースエンジンにおいて、後処理装置を装着しない場合に、JIS 2 号軽油及び 2 種類の GTL 燃料を使用した場合の燃料消費率及び排出ガステ性 (NOx 及び PM) について実験的に調べている^[9]。平成 18 年には、前年と同様なエンジン条件において、JIS 2 号軽油及び 3 種類の GTL 燃料を使用した場合の燃料消費率及び排出ガステ性 (HC、NOx、スモーク) について実験的に調べ、その結果に基づき燃焼制御によるエンジンの最適化について検討している^[10]。プロジェクト最終年度 (平成 19 年) には、試作した FTD 燃料専用自動車の排ガステ性の評価のほか、燃料系部材の材料評価試験を実施している^[11]。

主な結果について、以下に項目別に示す。

(1) 材料適合性

FTD 燃料 (GTL か BTL かは不明) 及び JIS2 号軽油が燃料供給系部品 (NBR 製燃料ホース) に及ぼす影響を明らかにするため、80°C に加熱した供試燃料をポンプにより 50 時間循環させる単体評価試験を行い、材料の比重及び硬度の変化を調べている。FTD 燃料については、さらに長期規制対応の車両 (2 種類) を用いた実走行試験を行い、実際に車両が使用される条件下における影響についても解析している。試験結果の概要を以下に示す。

- ①比重: 軽油では変化なし。FTD 燃料ではやや大きくなった (単体評価試験では約 0.2% の増加、車両走行試験では約 0.4~1% の増加)。この理由としては、(NBR の場合には材料中の添加剤が燃料中に溶け出す、) 軽油の場合には燃料中のアロマ分が浸透するのに対して、FTD 燃料ではアロマ分が低いため浸透せずに材料がやや収縮したためと考えられる。
- ②硬度: 単体評価試験では、軽油に対して 3% 程度の軟化傾向を示したのに対して、FTD 燃料では 4% 程度の硬化傾向を示した。車両走行試験では最大で 7% 弱の硬化を示したが、いずれも硬化変化は誤差の範囲内であると考えられる。

上記両試験終了後の部品内表面の観察では、亀裂等の以上は全く認められていない。すなわち、今回の試験結果からは、NBR 部材を FTD 自動車で使用することについて

は特段の問題はないと考えられる、との結論を得ている。

(2) 排ガス特性及び燃料消費率

排ガス特性等に関する実験では、排気量 7.7L の新短期規制対応のベースエンジンにおいて、後処理装置を装着しない場合に、JIS 2 号軽油及び 2 種類の GTL 燃料を使用した場合の代表走行モード (JE05 モード) における燃料消費率及び排出ガス特性 (NO_x 及び PM) ^[8]、JIS 2 号軽油及び 3 種類の GTL 燃料を使用した場合の燃料消費率及び排出ガス特性 (HC、NO_x、スモーク) ^[9] について実験的に調べている。ここに、JE05 モードとは、国土交通省、日本自動車工業会、日本自動車研究所、交通安全環境研究所の連携によって、排出ガス試験のために開発された過渡走行モードのことで、平成 17 年度の新長期規制より、従来のディーゼル自動車 13 モードに代わって導入されている。

前者の実験における 2 種類の供試 GTL 燃料は、いずれも芳香族分をほとんど含まないが、JIS 2 号軽油に比べて蒸留 50%までの分留温度の高低に差がある (約 300℃と 265℃)。供試燃料の硫黄含有率は GTL 燃料で 1ppm 未満、JIS 2 号軽油で 3ppm である。また、セタン指数については GTL 燃料で 93 及び 84、JIS 2 号軽油では 61 である。前者の実験結果は以下の通りである。

- ①NO_x: 軽油の場合と比較して 2 種類の GTL 燃料に対する低減効果は見られなかった。
- ②PM: 軽油の場合と比較して 20~30%程度の低減効果が見られた。これは、GTL 燃料では芳香族成分がほとんど含まれないためと考えられる。
- ③燃料消費率: 重量ベースで算出すると GTL 燃料の方が軽油よりも低くなるが、発熱量ベースで比較すると軽油と同等である。

後者の実験における 3 種類の供試 GTL 燃料 (GTL 燃料 1, 2, 3) についてもいずれも芳香族分をほとんど含まない。うち GTL 燃料 1, 2 は 90%留出温度が等しく、GTL 燃料 2, 3 は 10%留出温度が等しい。供試燃料の硫黄含有率については、GTL 燃料はすべて 1ppm 未満、JIS 2 号軽油で 3ppm である。また、セタン指数については、GTL 燃料は 75~78 でほぼ等しく JIS 2 号軽油では 61 である。後者の実験結果は以下の通りである。

- ①HC: エンジン回転数 1080rpm の場合、軽質な GTL3 に対して排出量が最も多く、GTL1 に対して最も少なかった。GTL3 の場合に HC の排出量が多くなった理由に関しては、性状の軽質化に伴い自着火性の低い領域が存在したこと等によるとしている。
- ②NO_x: 軽油の場合と比較して 3 種類の GTL 燃料に対する低減効果は見られなかった。
- ③スモーク: 燃料 GTL1 では、約 5 割の低減効果が見られた。

研究では、さらにエンジンの最適化による NO_x 及びスモーク排出性能の改善の可能性について検討している。具体的には、圧縮比 18 で軽油の代わりに GTL 燃料を使用して EGR 率を 30%から 32%に増加させると NO_x 低減効果は約 2 割だが、ここで圧縮比を 16 に下げる（このとき EGR 率：32%→30%）と、スモークが 8 割以上低減された。この条件から EGR 率と燃料噴射時期を調整することにより、スモークレベルを同等としつつ NO_x 低減効果を約 5 割とすることができた、としている。

3. 2 船用エンジンメーカーへの訪問・ヒアリング調査結果

船用燃料として GTL を利用する際に想定される問題点及び将来の開発課題を明らかにするため、船用エンジンメーカー（A 社、B 社）を訪問し、GTL に精通する技術担当者を対象とする聞き取り調査を実施した（調査実施日：H21 年 2 月 19 日）。

調査では、事前の文献調査により抽出した燃料としての GTL に関する一般的な技術的課題をベースとして、GTL を船用燃料として利用する際に特に問題になると想定される点について話を伺った。

調査結果を項目別にまとめたものを以下に示す。

(1) 燃料潤滑性

(A社)

- ー 社内で取り扱っている中速エンジンではシリンダに注油しており、摩耗・シール性については技術的に対応可能であり特に心配はしていない（高速／低速エンジンについても個別に技術対応が可能である）。今後はコーティング等により耐摩耗性は強化の方向に進むので問題はないと考える。
- ー ただし、ニードル弁には注油していないため、ニードル弁の経時磨耗変化はチェックしておく必要がある。以前、DME（ジメチルエーテル）の潤滑性を評価するために社外の研究所で磨耗確認試験を実施したことがある。海技研等で磨耗痕の観察が可能か？
- ー 噴射系統で言えば、例えば噴射系部品メーカーでは、自動車用・船用の違い等についていろいろと情報を持っているはずである。

(B社)

- ー 潤滑性低下に伴う摩耗についてはそれほど問題ないと考えている。潤滑性を保つため以前は注油をしていたが現在は行っていない。むしろ、湾内運航でC重油からA重油に切り替える際、（プランジャーとバレルとの間隔がC重油に対応してチューニングしてあるため、）燃料がプランジャーバレル間から落下して潤滑油に混入する問題はある。

(2) シール材膨潤性

(A社)

- ー 南アフリカをはじめ、海外ではすでにGTL生産工場が稼働しており、プラント・配管に関する技術情報が集められているので、それを整理すれば事足りると思われる。シール材メーカーやOリングメーカーでも浸漬試験が実施されているのでその結果を整理すればよいと考える。

(B社)

- ー BDFやDMEの場合には膨潤性について問題を経験しているが、GTLの場合には大きな問題はないと考えている（BDFは酸素を含むため膨潤性があり、パッキンやホースの材料を変えることで対応可能。また、DMEはフッ素系材料への浸入・膨潤による漏れがある

が、フロン系材料に変えて対応可能)。

(3) 低温流動性

(A社)

- ー 小型陸上用高速エンジンでDMEの燃焼試験を行った際、DMEはガソリンと比べてオーダーで2桁ほど潤滑性が悪いため添加剤を使用したところ、長時間運転した後にプランジヤの下方部分に添加剤のみが残留・固形化したとの情報がある。潤滑性向上剤ほか各種添加剤を注入することで対応可能と思われるが、添加剤の選択を間違わないようにすることが重要である。

(B社)

- ー GTLの性状がどういうものかによって異なり、一概に「GTLは低温流動性が悪い」とは言えない。

(4) 重油/GTLの混合比が燃焼性能・燃費及び排ガス特性に及ぼす影響

(A社)

- ー 重油とGTLを混ぜて使用する場合に気になるのが、混合物の親和性・熱的安定性等の問題である。加温・加圧して混合する場合、揮発成分があれば燃料系統で気泡ができてしまい具合が悪いため、揮発成分の有無(蒸留特性)をあらかじめ調べて把握しておく必要がある。その準備として、まず重油とGTLの素性を明らかにしておくことが重要である。
- ー 重油/GTLの混合物に対してPMがどうなるかは分からない。スラッジが大量に発生する可能性もあり、重油/GTL混合物については実験してデータを集める必要がある。この場合も、重油とGTLの代表性状をまず決定(規格化)する必要がある。

(B社)

- ー 重油/GTL混合燃料の燃焼性能、燃費及び排ガス特性を検討した文献はやはり見当たらない。
- ー 重油の性状の範囲が広すぎるため、燃焼性能や排ガス特性を網羅的に調べるのは難しい。使用する重油及びGTLの性状を最初にある程度絞り、それについて燃焼性能や排ガス特性を実験的に調べるのが現実的である。その前提として、重油及びGTLの規格化により代表性状が決定されることが重要である。

(5) GTLの高セタン価が着火タイミング及びNOx発生量等に及ぼす影響

(A社)

- ー GTLはセタン価が高いため、着火が早くなる方向にシフトし、サーマルNOxは減る方向に行くと思われる。
- ー セタン価は、商用化されたエンジンでの着火特性とは異なる。低負荷運転ではセタン価の影響はあるが、高負荷運転ではセタン価の値に関係なく着火遅れ時間が短いため、

GTL特有の問題はないと思われる。

- ー GTL燃料に対しては、エンジンチューニングにより噴射時期を調整してNOx発生量を下げられる可能性はある。

(B社)

- ー NOx発生量については、複数の機関により、自動車用ディーゼルエンジンで軽油/GTL燃料を燃やした場合の検討がなされている。これらの多くは「NOx量が下がった」という結論になっているが、運転条件等によるので鵜呑みにはできない。重油/GTL燃料の場合については、シヨップテスト等によって実験データを集める必要がある。
- ー (4)と同じく、実験を行う前に、まず重油及びGTLの性状を最初にある程度絞ることが重要である。重油とGTLの相性の良い混合比率があれば、その着火時期に合わせたエンジンチューニングを行ってNOxやPM発生量を下げることが可能となる。いずれにしても、重油及びGTLの規格化により、代表性状が決定されることが前提となる。

(6) 重油/GTL混合燃料の製造場所

(A社)

- ー 規格化された重油とGTLを陸上で混合するべきであり、船上で混合するというのは非現実的と考える。

(B社)

- ー あらかじめ陸上で混合した燃料を利用するのが現実的だろうと思うが、理想としては船上で混合できればおもしろい(現実問題としては技術的成熟が必要)。いずれにせよ、混合燃料の供給インフラ整備の兼ね合い、あるいは混合燃料の混ぜ方、組成、安定性などによって変わってくるだろう。

(7) シヨップテストでGTLの燃焼試験をする場合の留意点及び計測すべき項目

(A社)

- ー GTLの燃焼試験はシヨップテストで長時間の試験をやる必要はない。実船で短時間データを取れば十分である。
- ー 噴射弁の試験、磨耗試験等はエンジンを回す必要はなく、単体で陸上の長時間試験を実施するのがよい。単体試験の結果と実船に搭載して1~2度回した結果とを合わせて評価すればよい。
- ー エンジンチューニングをシヨップテストで行う場合には、海防法とつながったできるだけ最新のエンジンで実施する方が意味のあるデータが取れる。

(B社)

- ー これも(4)、(5)次第で変わってくる話である。重油/GTL混合燃料の組成・性状が現在使用している燃料のそれと大きくかけ離れる場合には、やはりシヨップテストを実施してエンジンチューニングを行った方がよい。

- ー PMなどは実船試験では計測できないため、重油とGTLの相性の良い混合比率があれば、実船試験の前にシヨップテストを実施して、PM, NO_xの排ガス特性に関するベースデータを持っておく方が良い。あとで必ず参考になるはずである。

(8) 来年度以降にお願いすることのできるシヨップテストの有無

(A社)

- ー これについては、GTLの利用に適する船種のターゲットが決まった後に、皆の意見を聞いてから決めたい。

(B社)

- ー 基本的には、現在IMO二次規制対応及びSCR試験で手一杯の状況であり対応は難しい。当社では広い範囲のエンジン出力に対応しているため、出力(500KWあるいは1000kW?)によっては対応できる可能性もある。

(9) 船用燃料として将来GTLを利用すること(将来展望)に関する率直な考え

(A社)

- ー GTLは非在来型燃料であり開発・製造コストも大きいため、利用促進を考えるのであれば、石油メーカーへの税金控除のような税制優遇制度を整備することが必要であろう。
- ー 船用エンジンの場合、GTLが燃料全体に占める割合は小さい(せいぜい1%程度?)と予想されるため、自動車の世界と異なり、GTL、BTL(Biomass-to-Liquid)、CTL(Coal-to-Liquid)など特殊な燃料に特化したエンジンを作るという話にはならないであろう。また、船用エンジンはスクラップ&ビルドの期間が約30年程度と長く、おそらく既存のエンジンで従来型燃料とGTLを併用することになる。この場合、タンク内でGTLと従来型燃料が混ざること考えられる。そうすると、エンジンメーカーとしては、従来型燃料と比べてGTLがどのような燃料であるのかが不明だと困る。GTLの船用利用を考える場合には、まず、FCC系燃料とGTL燃料の親和性や熱的安定性について、燃料メーカーとの調整を通じて、規格化によって整理しておくことが非常に重要と考える。さらに、認証されたエンジンは噴射系を調整できないことも考慮に入れておく必要がある。いずれにしても、燃料、船舶、エンジンのターゲットをまず絞る必要がある。

(B社)

- ー 「お客様の要望があれば対応する」のがメーカーとしての基本姿勢である。また、GTLの利用を含め環境の観点からの対応は避けて通れないと考えている。あとは、国がGTLの規格化及び供給インフラ整備をどれだけ真剣に進めてもらえるかにかかっている。
- ー 実際の運航の観点からは、エンジンチューニングができる限り不要な燃料であることが望ましい。その意味で、重油/GTL混合燃料の性状は現在使用している燃料のそれとあまりかけ離れていないことが必須条件となる。

3. 3 重油/GTL を混合利用した場合の燃焼性能・排ガス特性の推定

第3. 1節でも述べた通り、重油/GTL を船用ディーゼルエンジンに適用した場合の実験的検討に関する報告が見当たらないため、ここでは、第3. 1節で取り上げた軽油/GTL を自動車用ディーゼルエンジンに適用した場合の実験結果等に基づいて、船用ディーゼルエンジンでの重油/GTL を使った場合の燃焼性能及び排ガス特性の推定を試みる。

燃焼性能及び排ガス特性の推定に当たっての留意点としては、以下のものが考えられる。

(1) エンジンの相違

船用ディーゼルエンジンは自動車用ディーゼルエンジンと比較して燃焼室が大きく、回転数が遅いため、燃焼が十分な期間をもって行われる。

(2) 使用燃料の相違

船用ディーゼルエンジンで使用する重油は、自動車ディーゼルエンジンで使用する軽油と比較して着火性が悪く、燃料中に硫黄分、窒素分、アロマ分を多く含む。一方で、混合する GTL の特徴としては、軽油や重油と比較して着火性が良く、燃料中に低硫黄、窒素分、アロマ分をほとんど含まないことである。

以上の点を踏まえ、重油/GTL を混合利用した場合の燃焼性能、排ガス特性を推定した結果を以下に示す。

3. 3. 1 燃焼性能

(1) 着火性

GTL は高セタン価燃料であり、重油と混合することにより着火が早くなる。着火遅れはエンジンの運転状態により変わり、高負荷運転時には着火遅れの変化は少なくなると推定される。始動時におけるエンジンが暖まっていない状態では、低負荷運転時に着火遅れの影響が大きく出るものと推定される。また、エンジンの始動性に関しても影響が大きく出るものと推定される。

その一方で、着火遅れの影響は高速回転の方がクランク角で大きく出するため、低速回転の船用ディーゼルエンジンの場合には、自動車用ディーゼルエンジンと比べてその影響が少なくなることが予想される。

(2) 燃焼性

GTL は重油に比べて蒸留特性が良いため、重油と混合することによって燃焼が改善されることが予想される。このため、燃焼性の悪い重油と混合した場合には、燃料消費率の改善への寄与が相対的に大きくなると考えられる。

3. 3. 2 排ガス特性

(1) HC、CO

GTL は重油と比べて着火性及び燃焼性が良いため、重油と混合することによって

HC、CO は低減されると推定される。燃焼性の悪い重油を使用する場合や、エンジン運転が低負荷運転の場合など、特に燃焼の悪い状態において低減効果が大きいと考えられる。

(2) NOx

第3.1節で取り上げた軽油/GTL を自動車用ディーゼルエンジンに適用した場合の実験結果における NOx 特性に関しては、軽油燃料のみの場合と比較して減少したという結果とほとんど変わらないという結果が混在しており、実験条件によってばらつきが見られる。従って、これらの結果から NOx 低減効果を推定することは困難であることを踏まえた上で、推定結果を以下に示す。

GTL は高セタン価燃料であるため、着火は早くなり、予混合燃焼に関わる燃料の量は減少する。その結果、燃焼初期の急激な熱発生率が抑制され、Thermal NOx の発生は減少すると推定される。また GTL は燃料中に窒素分を含まないため、Fuel NOx は発生しない。

以上のことより、GTL を重油に混合することによって、NOx はおそらく低減する方向に向かうのではないかと思われるが、その低減効果については HC や CO ほど顕著な差が出ない可能性がある。さらに、使用するエンジン、運転状態、比較する燃料等によっては、燃焼が改善されることによって燃焼室内の温度及び圧力が高くなり、結果的に NOx が低減しないことも考えられる。

(3) SOx

SOx は燃料中の硫黄分により生成されるため、硫黄分を含まない GTL を重油に混合して使用することにより、排ガス中の SOx 排出量を大幅に低減することが可能である。

(4) PM

重油に GTL を混合することによって、PM は低減するものと推定される。これは Soot の生成に寄与するアロマ分と、サルフェートの生成に寄与する硫黄分が GTL 燃料中に含まれないためである。重油の中にはアロマ分と硫黄分が含まれるため、GTL の混合割合を増やすことにより、PM 低減効果は大きくなるものと考えられる。

3. 4. 将来検討すべき事項及び実証実験に関するまとめ

以上の調査結果に基づき、GTL の船用燃料としての利用を考える際に、将来検討すべき事項及び実証実験について以下に整理する。

(1) 燃料潤滑性の問題について

自動車用ディーゼルエンジンへの適用研究^[5]では、適量の潤滑向上剤を添加すれば問題なく使用可能との結果が出ている。また、船用エンジンメーカーのヒアリングでも、潤滑性低下に伴う材料磨耗に関しては技術的に対応可能とのことであった。GTL 燃料として、分枝型パラフィンの含有量が多い第二世代 GTL を用いることで潤滑性の向上が期待できる^[4]ことも知られている。

以上より、GTL の燃料潤滑性に起因する大きな問題はなさそうだが、GTL 燃料を用いた際のニードル弁の経時磨耗変化など、個別に懸念される点については単体で長時間のショップテストを実施するなどしてデータを取っておくのが良いと考えられる。

(2) シール材膨潤性・材料適合性の問題について

自動車用ディーゼルエンジンへの適用研究^{[5],[11]}では、軽油と同程度で大きな問題はないと結論している。船用エンジンメーカーのヒアリング結果もおおむね同様の結果であった。本件に関しては、海外の GTL 生産工場で収集されたプラント・配管に関する技術情報を整理することで対応が可能であると考えられる。しかしながら、市販のシール材における添加物への影響など、個別に懸念される点については一定期間のショップテストを実施するなどしてデータを取っておくのが良いと考えられる。

(3) 低温流動性の問題について

本件については、①分枝型パラフィンの含有量が多い第二世代 GTL を用いる、②GTL の合成段階で低温流動性が高くなる条件にするなど、GTL 製造・燃料設計技術により対応可能であると考えられる。

(4) 重油/GTL 混合燃料の規格化について

本件は、船用エンジンメーカーのヒアリングにおいて指摘された事項である。GTL を船用燃料として加圧・加温して使用する場合、揮発成分の有無が燃料系統で問題となるため、蒸留特性をあらかじめ把握しておく必要がある。そのためにはまず、国が燃料メーカーと協力して GTL 燃料の規格化を行い、代表性状が決定されることが前提となる。また、船用では既存のエンジンで従来型燃料と GTL が併用されると予想され、この場合にはタンク内で両者が混ざると考えられるため、その観点からも規格化（代表性状の把握と決定）は重要なポイントである。

(5) 重油/GTL 混合燃料の親和性・熱的安定性について

本件は、船用エンジンメーカーのヒアリングにおいて指摘された事項である。重油/GTL 混合燃料の親和性・熱的安定性は、排ガス特性、燃焼性能、燃料の混合場所などに大きな影響を与えると考えられる。よって、燃料メーカーの協力の下、親和性・熱的安定性の良い混合割合等について、あらかじめ燃料の規格化と合わせて検討を重ねておくことが重要である。

(6) 重油/GTL 混合燃料の排ガス特性、燃焼性能について

重油/GTL 混合燃料をディーゼルエンジンに適用した研究は見当たらない。自動車用ディーゼルエンジンへの適用研究の結果から、排ガスのうち SO_x 及び PM の大幅な低減効果、HC 及び CO の低減効果はある程度期待できるが、NO_x の低減効果については全く不明であるため、重油/GTL 混合燃料の燃焼性能、燃費及び排ガス特性については、陸上で短期間のショップテストを行って実験データを蓄積する必要がある。ただし、重油及び GTL の性状範囲は極めて広いため、実験は船用燃料として使用する重油及び GTL の代表性状を最初にある程度絞ることが前提となる。

重油/GTL 混合燃料の燃焼性能については、自動車用ディーゼルエンジンへの適用研究^[11]において、EGR 率と燃料噴射時期を調整するなどのエンジンチューニングによって NO_x 低減効果が得られたという報告がある。また、船用エンジンメーカーでも、着火性が良いという GTL の特性に合わせたエンジンチューニングを施すことで NO_x や PM 発生量を下げられる可能性があるとの見方をしている。ただし、これについても規格化により GTL 燃料の代表性状が決定されることが前提となる。特に、重油/GTL 混合燃料の性状が従来燃料と大きく異なる場合にはエンジンチューニングが必要である。

