

軽油・FAME・エタノールによるゴムの浸漬挙動評価

山田圭祐*

Evaluation of Rubber Immersion Behavior in Gas Oil, FAME, and Ethanol

YAMADA Keisuke*

This study aims to evaluate the swelling behavior of rubber materials when immersed in liquid fuels. Five types of rubber—natural rubber (NR), fluoroelastomer (FKM), chloroprene rubber (CR), hydrogenated nitrile rubber (HNBR), and silicone rubber (VMQ)—were selected for testing. Gas oil, methyl oleate (FAME), and ethanol were selected as immersion liquids. Rubber specimens were immersed under temperature-controlled conditions, and changes in mass and thickness were measured over time.

The results enabled assessment of the degree of swelling for each combination of rubber material and liquid. In addition, conditions under which mass and thickness decreased were also identified.

キーワード: 浸漬試験, ゴム, 軽油, FAME, エタノール

1. 諸言

船舶の機関室に設置される主機関や補助機械、配管類には、多数のゴム製部品が使用されている。これらの部品は高温、高圧、振動、油分などの環境に晒されながら、重要な機能を果たしている。ゴム製部品の例としては、パッキンやシール材、ホース、防振ゴムなどが挙げられる。これらは各種流体の漏洩防止、振動の緩和、機器の保護といった役割を担っており、船舶の安全運航および保守性の確保に不可欠な存在である。しかしながら、ゴム材料は使用環境に応じて物理的および化学的な劣化が生じやすく、特に燃料油や潤滑油などとの接触によって膨潤が生じる可能性がある。膨潤によるゴム製部品の寸法変化は、密閉性の低下やこれに伴う流体の漏洩、機器の故障を引き起こす恐れがある。

近年、国際海事機関による排出ガス規制の強化を背景に、海運業界では従来のC重油から低炭素燃料への転換が進んでいる。特定の新造船や一部の航路では天然ガスの導入が進んでおり、さらに今後はアン

モニア、水素、バイオ燃料、メタノール、エタノールを利用するエンジンの一定程度の普及が見込まれる。

バイオ燃料は主に植物由来の原料を用いた再生可能エネルギーであり、船用代替燃料として注目されている。表1に、バイオ燃料の種類と概要を示す。SVO (Straight Vegetable Oil)は大豆、菜種、パームなどから採取された植物油をそのまま燃料として利用するものであるが、流動性や貯蔵安定性などの観点から実用化には課題が多いのが実情である。また、FAME (Fatty Acid Methyl Ester)は、植物油、動物性脂肪、廃食油を原料とし、メタノールと触媒によるエステル化反応によって得られる。これと同様の原料に水素化処理を施すことで得られるHVO (Hydrotreated Vegetable Oil)は軽油に類似した燃料性状を持ち、ドロップイン燃料として注目されている。さらに、バイオマス由来のメタノールやエタノールといったアルコール燃料もある。

近年では、日本国内において低硫黄重油などにFAMEを20%程度混合した燃料による試験航行の成功事例⁽¹⁻⁴⁾が見受けられる。また、メタノールと重油の二元燃料エンジンがメタノール輸送船やばら積み船、RORO船において実用されている例⁽⁵⁻⁸⁾がある。さらに、日本国内のエンジンメーカーにおいては、メタノールに対応した船用エンジンの市場投入が近く計画されて

* 商船学科
e-mail: keisuke@nc-toyama.ac.jp

表 1 バイオ燃料の種類と概要

SVO (粗植物油)	大豆, パーム, 菜種, ジャトロ ファなどから採取される植物 油を, 化学的な改質を施さ ずに燃料として利用する。
FAME (脂肪酸メチル エステル)	動植物油や廃食油などを原 料とし, メタノールと触媒を用 いてエステル化反応を行うこ とにより得られる。
HVO (水素化植物油)	動植物油や廃食油などを原 料とし, 水素化処理を行うこ とにより得られる。軽油に近 い性状を持つ。
バイオアルコール	バイオマスの熱分解により生 成した合成ガスと触媒の反 応により作られるグリーンメタ ノールや, バイオマスの発酵 および蒸留により得られるバ イオエタノールがある。

いる⁽⁹⁻¹¹⁾。エタノールを燃料とする船用エンジンの実用化に向けた動き⁽¹²⁾もあるなど、海運企業やエンジンメーカーは代替燃料の利用に力を注いでいる。

以上の動向を踏まえると、各種燃料と接触するゴム材料の膨潤性を定量的に評価し、適合性を明らかにすることは、機関室におけるゴム製部品の信頼性向上、保守計画の合理化、設計段階での適切な材質選定に資する有用な知見になり得る。

本研究において、浸漬液はその極性と実験者の安全性確保を考慮し、低極性の軽油(GO)、FAMEの一種で中極性であるオレイン酸メチル(OME)、高極性のエタノール(EtOH)を選定した。各浸漬液に短冊状のゴム試験片を浸け、時間変化に伴う質量と厚さの計測を行うことにより、ゴム材質と浸漬液の組合せにおけるゴムの浸漬挙動を評価した。

2. 実験条件および実験方法

本研究では、天然ゴム(NR)、フッ素ゴム(FKM)、クロロプレンゴム(CR)、中高ニトリルゴム(HNBR)、シリコンゴム(VMQ)の5種類のゴム材質を対象とした。「JIS K 6258 加硫ゴムおよび熱可塑性ゴム—耐液性の求め方」⁽¹³⁾に記されている規定を踏まえ、厚さ2 mmの各種ゴムシートから長さ50 mm、幅10 mmの短冊状試験片を切り出した。「JIS K 6258 - 8.1.2 質量変化」⁽¹³⁾に

基づいて、ゴム試験片の質量変化率 Δm_{100} を算出するために、浸漬開始前の質量 m_0 を電子天秤(最小表示1 mg)により計測した。一方、厚さの計測については「JIS K 6258: - 8.1.4 寸法評価」で言及されているものの、単体では評価対象として規定されていない。しかしながら、厚さが重要となるゴム製部品においては、厚さの時間変化に関するデータは有用であると考え、計測を行うこととした。試験片中央部をダイヤルシクネスゲージ(測定範囲0~10 mm、目量0.01 mm、測定力1.5 N以下)の測定子とアンピルの間に挟み、厚さを計測した。計測後、試験片1枚をスクリー缶瓶(容量50 mL)に入れ、所定温度に保たれた浸漬液に浸した。浸漬液は45 mlとし、試験片全体が浸かる状態を確保した。浸漬温度は「JIS K 6250 ゴム—物理試験方法通則」⁽¹⁴⁾を準用し、25°Cおよび55°Cの2条件とした。温度管理は冷温庫により行い、内部温度が設定値から $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内に保たれていることを、質量および厚さの計測時に都度確認した。予備実験では、浸漬直後の膨潤速度が特に大きい条件があることや、時間経過とともに膨潤が緩やかになる傾向が確認された。このことから、「JIS K 6250」を参考にしつつ、浸漬開始時を基点として1, 2, 4, 24, 48, 72, 144, 168時間後に計測を行うこととした。

計測に際して、まずサンプル瓶からポリアセタールピンセットで試験片を取り出し、瓶を即座に冷温庫に戻した。試験片に付着した浸漬液を紙ウエスで拭き取った後、質量および厚さを計測し、元の瓶に戻して冷温庫に収納した。この一連の工程は、試験片1枚につき2分以内に完了するように実施した。本研究では、ゴムおよび浸漬液の種類、浸漬温度の組合せにより計30条件を設定のうえ、各条件につき3枚の試験片を用意し、質量と厚さの計測を行った。

3. 実験結果

前章で述べたとおり、5種類のゴム材質と3種類の浸漬液を組合せた条件のもと、所定時間に浸漬液から試験片を取り出し、質量および厚さを計測した。各計測項目について、時間経過にともなう変化率の推移を以下に示す。

3.1 ゴム試験片の質量

「JIS K 6258」⁽¹³⁾に基づき、各条件に対して3枚の試験片の質量変化率 Δm_{100} [%]を式(1)より算出した。 m_0 は浸漬前の試験片の質量[mg]、 m_i は浸漬後の試験片の質量[mg]である。

$$\Delta m_{100} = (m_i - m_0) / m_0 \times 100 \quad (1)$$

3枚の試験片によってそれぞれ得られた値の中央値を「JIS Z 8401:2019 数値の丸め方」⁽¹⁵⁾に則り、丸めの幅1で表す。以上の手順により得られたデータをゴム材質毎に整理して、図1~5に結果を示す。

図1に、天然ゴムの質量変化率の推移を示す。天然ゴムは軽油およびオレイン酸メチルに対して著しい質量変化が確認され、その傾向は浸漬温度が高い条件でより顕著に現れた。浸漬温度55°Cのオレイン酸に168時間浸漬した場合、 $\Delta m_{100} = 90\%$ となり、試験片の元の質量に匹敵するほどのオレイン酸メチルを吸収したことがわかる。一方、天然ゴムをエタノールに浸漬した場合については、時間経過に伴い元の質量を下回り、55°Cでは168時間後に $\Delta m_{100} = -4\%$ となった。

図2に、フッ素ゴムの質量変化率の推移を示す。フッ素ゴムはいずれの浸漬液に対しても質量変化率が小さく、最も大きい場合でも55°Cのエタノールに168時間浸漬して $\Delta m_{100} = 3\%$ となったのみであった。また、他の組合せでは高々1%程度の増加にとどまった。

図3に、クロロプレンゴムの質量変化率の推移を示す。クロロプレンゴムはオレイン酸メチルに対する質量変化率が最も大きく、168時間後には浸漬温度25°Cおよび55°Cにおいて、ともに $\Delta m_{100} = 28\%$ となった。軽油の場合には、両方の温度条件下で $\Delta m_{100} = 10\%$ を上回った。一方エタノールに対しては、25°Cのときに $\Delta m_{100} = -6\%$ 、55°Cでは $\Delta m_{100} = -10\%$ となった。

図4に、中高ニトリルゴムの質量変化率の推移を示す。軽油に浸漬した場合、55°Cよりも25°Cの方が質量変化率は大きくなるという他のゴム材質には見られない結果が示された。オレイン酸メチルに浸漬した場合、55°Cでは48時間後までは質量が増加し続け、25°Cのときの質量を上回った。しかしながら、これ以降55°Cの試験片は質量が減少に転じ、一方で25°Cの試験片は

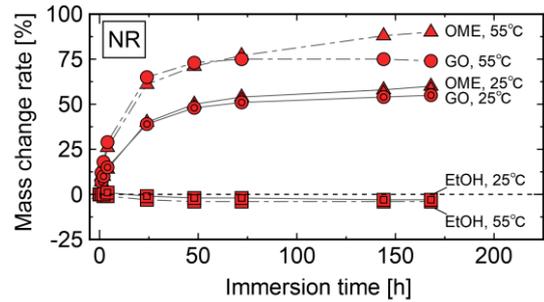


図1 天然ゴムの質量変化率の推移

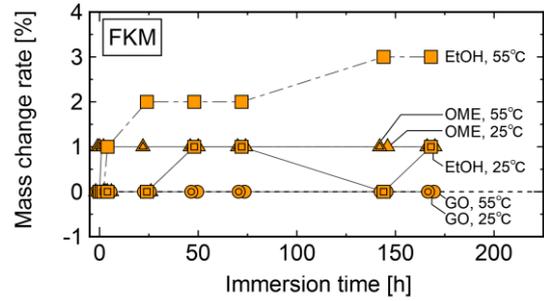


図2 フッ素ゴムの質量変化率の推移

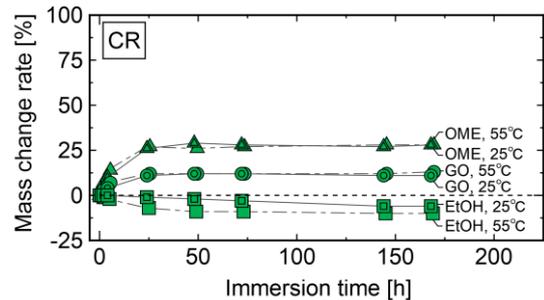


図3 クロロプレンゴムの質量変化率の推移

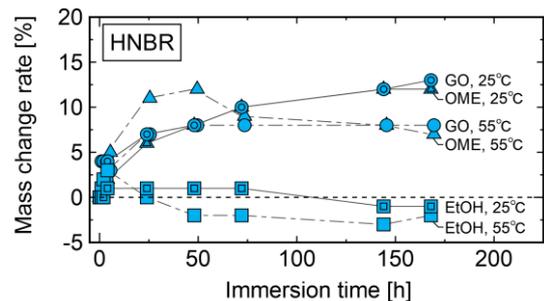


図4 中高ニトリルゴムの質量変化率の推移

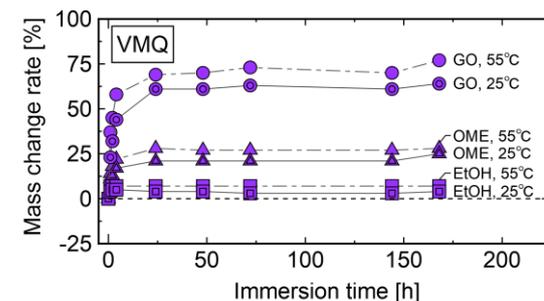


図5 シリコンゴムの質量変化率の推移

168 時間後まで質量の増加が続いた。これにより、72 時間経過時点で質量の大小関係が逆転した。エタノールについては、25°Cのときは 72 時間後まで $\Delta m_{100} = 1\%$ にとどまっていたが、144 時間経過後には $\Delta m_{100} = -1\%$ となった。55°Cでは 4 時間後の $\Delta m_{100} = 3\%$ をピークに、それ以降は質量の減少が続き、168 時間後には $\Delta m_{100} = -2\%$ となった。

図 5 にシリコンゴムの質量変化率の推移を示す。軽油に浸漬した際に、最も著しい質量変化が確認された。浸漬温度 55°Cのとき 168 時間経過時点で $\Delta m_{100} = 77\%$ となり、同浸漬条件では天然ゴムを僅かに上回る大幅な変化であった。オレイン酸メチルに対しても 55°Cのときに $\Delta m_{100} = 28\%$ となり、クロロプレンゴムと同程度の質量増加を示した。エタノールに対しては、1 時間経過時点で 25°Cのとき $\Delta m_{100} = 4\%$ 、55°Cのとき $\Delta m_{100} = 7\%$ と質量変化が顕著に表れたが、それ以降は計測終了時まで質量の変化は僅かであった。

以上のとおり、ゴム材質と浸漬液の多くの組合せで、試験片の質量が増加する傾向が見られ、その程度は様々であった。一方で、天然ゴム、クロロプレンゴム、中高ニトリルゴムをエタノールに浸漬した場合については、浸漬直後に質量が増加する条件も一部あるものの、基本的には長時間の浸漬によって、試験片の質量が初期値を下回る結果となった。

3. 2 ゴム試験片の厚さ

厚さの変化率 Δt_{100} [%]を式(2)により算出する。 t_0 は浸漬前の試験片の厚さ[mm]、 t_1 は浸漬後の試験片の厚さ[mm]である。

$$\Delta t_{100} = (t_1 - t_0) / t_0 \times 100 \quad (2)$$

一般的に、“厚さの変化率”はガスケットやパッキンのシール材が圧縮された後、元の厚さに戻る割合を表すことが多いが、今回はこれと異なる指標である点に注意されたい。3 枚の試験片によってそれぞれ得られた変化率の中央値を丸めの幅 1 に直し、この値をゴム材質毎に整理して、図 6~10 に結果を示す。変化率の大小関係や正負は、質量変化率と同様の傾向となった。しかしながら、中高ニトリルゴムとエタノールの組合せでは、時間経過に伴って質量は初期値より

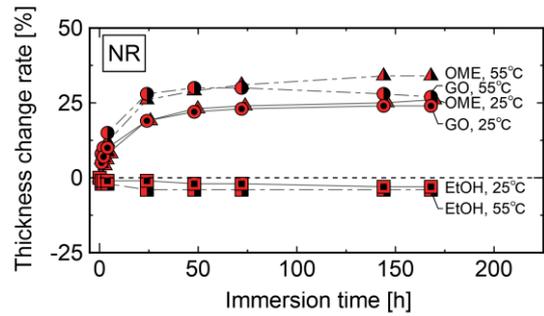


図 6 天然ゴムの厚さ変化率の推移

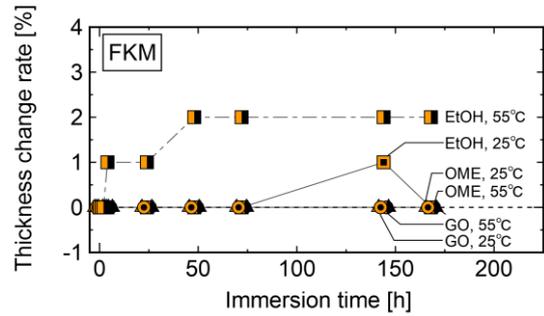


図 7 フッ素ゴムの厚さ変化率の推移

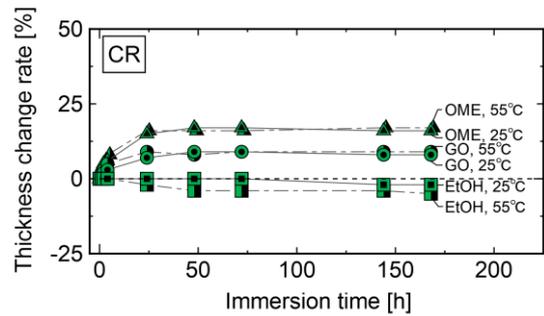


図 8 クロロプレンゴムの厚さ変化率の推移

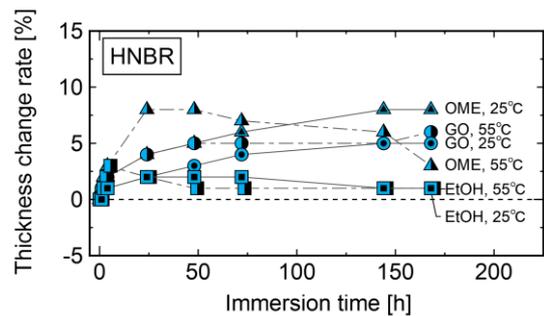


図 9 中高ニトリルゴムの厚さ変化率の推移

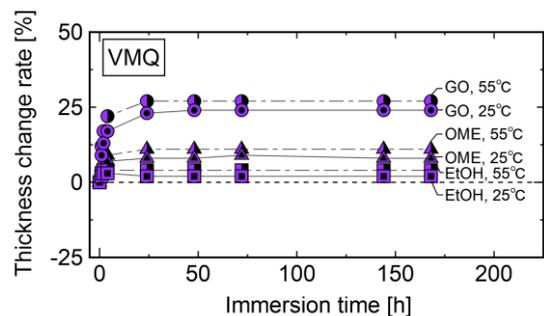


図 10 シリコンゴムの厚さ変化率の推移

減少する一方、厚さは初期値より増大するという結果が得られた。中高ニトリルゴムに含まれる可溶成分が抽出されて質量が減少するとともに、ニトリル基を持つ強い双極子とエタノールの高い極性の相互作用によって、膨潤が生じたと考えられる。

3.3 ゴム試験片の質量および厚さの減少

質量の減少が最も顕著であったクロロプレンゴムとエタノール(浸漬温度 55°C)の組合せにおける、浸漬直後および 168 時間経過後のサンプル瓶の外観を図 11 に示す。浸漬開始直後のエタノールは無色透明であったが、時間の経過に伴い黄色味を帯びた。また、サンプル瓶を室温で自然冷却したところ、32°C付近で白色の微細な固相が観察されるようになり、冷却に伴いその結晶は次第に成長、25°Cのときには白色の固相が液相中に広く分散している様子が確認された。

図 12 は、浸漬を行っていない試験片と、55°Cのエタノールに 168 時間浸漬した試験片を並べてデジタル顕微鏡で撮影し、各試験片の中央部以外の領域をトリミングして比較したものである。浸漬前の試験片は黒色を呈しており、その様子は顕微鏡画像でも確認された。これに対し、168 時間浸漬後の試験片は目視で灰色へと変化し、顕微鏡画像においても全体的に白みがかっていることが認められた。また、浸漬前には観察されたゴムの光沢が、浸漬後には消失していた。これは、ゴム表面の微細構造の変化によって、光の散乱特性が変化したことによるものと考えられる。

定量評価は行っていないが、著者による触感の比較では、浸漬後の試験片は弾力性が低下し、硬化していた。また、浸漬前はウェット性があり、グリップ感のある手触りであったのに対し、浸漬後はさらさらとした滑りやすい手触りに変化した。

表 2 に、ゴム製品に添加される代表的な添加剤と、それにより付与される機能を示す。観察結果に基づき、試験片の表面層からエタノール中にシリカや可塑剤が抽出された可能性が示唆される。しかしながら、GC-MS や FT-IR などの化学分析は未実施であり、成分の詳細な同定には至っていない。膨潤と抽出は同時に進行するため、時間変化に伴う質量と厚さの計測のみでは、両者の進行を正確には評価できない。浸漬後

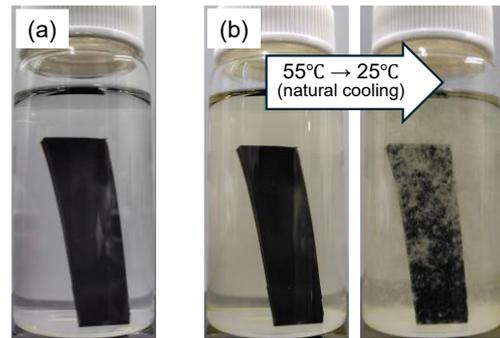


図 11 エタノールにクロロプレンゴムの試験片を浸漬した際の外観の変化

(a) 浸漬直後, (b) 浸漬開始から 168 時間後 (55°C)と自然冷却後 (25°C)

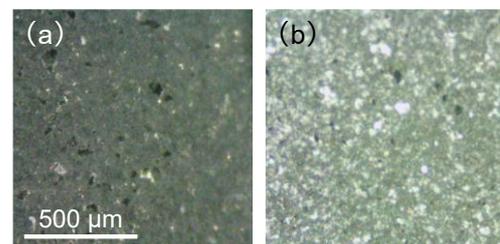


図 12 クロロプレンゴム表面の顕微鏡写真

(a) 浸漬せず, (b) 浸漬開始から 168 時間後

表 2 ゴム製品に用いられる添加剤の例^(16,17)

名称	付与される機能
カーボンブラック	炭素からできた粉体。ゴムの強度や硬さ、耐摩耗性を向上する。
シリカ	二酸化ケイ素の白い粉体。ゴムのウェット性や耐摩耗性を向上するほか、転がり抵抗を低減する。
可塑剤	柔軟性や加工性を向上する。
加硫促進剤	加硫時間を短縮したり、硫黄の加硫反応を促進したりする。
硫黄	ゴムに強度や弾力性を与える。
老化防止剤	ゴムの耐熱性、耐酸化性、耐候性などを向上する。

のゴム性状や浸漬液中の抽出成分に関する詳細な分析が必要であり、これらは今後の課題である。

ゴム材料は浸漬液に浸されることで膨潤するだけでなく、条件によっては質量や寸法の減少、さらには添加剤の抽出に伴う機能低下を来す可能性もある。したがって、船舶機関室などの過酷な環境下でゴム部品を使用する際には、使用環境に応じた適切な材質の選定と予防保全管理の徹底が重要となる。

4. 結言

本研究では、軽油、オレイン酸メチル、エタノールに5種類のゴム試験片を浸漬し、経過時間ごとに試験片の質量および厚さを計測した。その変化率を比較し、得られた知見を以下に示す。

1. 対象とした5種類のゴム材質のうち、いずれの浸漬液に対しても質量および厚さの変化率が最も小さいのはフッ素ゴムであった。
2. 軽油とオレイン酸メチルにより膨潤の程度を比較すると、天然ゴムおよびクロロプレンゴムではオレイン酸メチルの影響が大きく、シリコンゴムでは軽油の方が大きかった。フッ素ゴムではほとんど差異は認められず、中高ニトリルゴムでは一部条件下で質量の増減が見られ、影響の大小を一概に評価することはできなかった。
3. エタノールは軽油およびオレイン酸メチルに比べて、ゴムの膨潤に及ぼす影響は小さい傾向を示すが、天然ゴムとクロロプレンゴムでは質量および厚さが初期値より減少し、中高ニトリルゴムでは質量が減少する一方で厚さが増加するという結果が得られた。

5. 謝辞

本研究の遂行にあたり、実験データの取得において宮田理仁氏(令和6年度当時 商船学科5年生)の卒業研究による多大なご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

6. 文献

- (1) 飯野海運株式会社, “当社初のバイオディーゼル燃料の実証実験をケミカルタンカーで実施”, ニュースリリース, 2023年3月1日
<https://www.iino.co.jp/kaiun/news/ship/2023/0301-403.html>
(最終アクセス日:2025年11月30日)
- (2) 出光興産株式会社, “当社グループ初の大型原油タンカー(VLCC)によるバイオ燃料試験航行に成功 グループ連携によるカーボンニュートラル

社会の実現に向けた取組み”ニュースリリース, 2023年4月21日

https://www.idemitsu.com/jp/news/2023/230421_2.html

(最終アクセス日:2025年11月30日)

- (3) NX 商事株式会社, “自社バンカー船「愛光丸」へのバイオディーゼル供給を実施”, ニュースリリース, 2024年3月21日

<https://www.nx-shoji.com/news/2024/000359.html>

(最終アクセス日:2025年11月30日)

- (4) 川崎汽船株式会社, “川崎汽船運航船に日本国内で初めてバイオ燃料を供給～脱炭素化に向けた取り組み～”, ニュースリリース, 2024年12月19日

<https://www.kline.co.jp/ja/news/csr/csr-20241219.html>

(最終アクセス日:2025年11月30日)

- (5) 株式会社商船三井, “メタノールを主燃料としたメタノール輸送船“Cypress Sun”が竣工～メタノール燃料船によるGHG削減への取組みを推進”, プレスリリース, 2023年1月19日,

<https://www.mol.co.jp/pr/2023/23006.html>

(最終アクセス日:2025年11月30日)

- (6) 株式会社商船三井, “国内初のメタノール内航燃料船「第一めた丸」の命名・進水式を実施”, プレスリリース, 2024年7月4日,

<https://www.mol.co.jp/info/article/2024/0704.html>

(最終アクセス日:2025年11月30日)

- (7) 日本郵船株式会社, “日本郵船グループ初のメタノール二元燃料ばら積み船が竣工”, プレスリリース, 2025年5月14日,

https://www.nyk.com/news/2025/20250514_02.html

(最終アクセス日:2025年11月30日)

- (8) 株式会社商船三井, “三菱ガス化学向け新造メタノール二元燃料外航船「第七甲山丸」が竣工”, プレスリリース, 2025年6月2日,

<https://www.mol.co.jp/pr/2025/25050.html>

(最終アクセス日:2025年11月30日)

- (9) 日本海事新聞, “ヤンマーPT, メタノール燃料機
関 26 年商品化へ。今秋にマレーシアで実機検
証”, 記事公開, 2024 年 5 月 30 日,
<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=296329>
(最終アクセス日:2025 年 11 月 30 日)
- (10) 日本海事新聞, “ダイハツディーゼル、工場予定
地で地鎮祭。26 年稼働。メタノール機関出荷へ”,
記事公開, 2024 年 8 月 1 日,
<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=297994>
(最終アクセス日:2025 年 11 月 30 日)
- (11) 株式会社赤坂鐵工所, “試験エンジン 3X28Me
および新実験棟完成”, ニュースリリース, 2025 年
10 月 9 日,
<https://www.akasaka-diesel.jp/2025/10/post-8578/>
(最終アクセス日:2025 年 11 月 30 日)
- (12) WinGD Ltd., “WinGD to introduce first ethan
ol-fuelled marine two-stroke engine in 2026”,
プレスリリース, 2025 年 9 月 30 日
[https://wingd.com/news-media/news/wingd-to-int
roduce-first-ethanol-fuelled-marine-two-stroke-eng
ine-in-2026](https://wingd.com/news-media/news/wingd-to-introduce-first-ethanol-fuelled-marine-two-stroke-engine-in-2026)
(最終アクセス日:2025 年 11 月 30 日)
- (13) 日本規格協会, JIS K 6258 (加硫ゴムおよび熱
可塑性ゴムー耐液性の求め方), 2016 年
- (14) 日本規格協会, JIS K 6250 (ゴムー物理試験方
法通則), 2019 年
- (15) 日本規格協会, JIS Z 8401 (数値の丸め方), 20
19 年
- (16) 株式会社ブリヂストン, “タイヤの材料”,
[https://www.bridgestone.co.jp/corporate/technolog
y/basics/material/](https://www.bridgestone.co.jp/corporate/technology/basics/material/)
(最終アクセス日:2025 年 11 月 30 日)
- (17) 日本ゴム協会 配合技術研究分科会, やさしいゴ
ムの加工技術 第 3 講 配合技術ー配合設計の
基礎, 日本ゴム協会誌, 第 92 巻 第 5 号(2019)
pp.195-200.