

博士学位論文

建設機械の駆動システムでの潤滑油類が
起因となる故障への対策

- システムズエンジニアリングアプローチからの再考 -

Countermeasure for Failure Caused by Lubricants in
Driving System of Construction Machinery

- Reconsideration from Systems Engineering Approach -

2019年8月

大川 聰

要旨

本論文は、これまで長年に渡り、著者が手がけてきた潤滑油類を起因とする建設機械の駆動システムの故障への対策について、その内容全体をまとめる形で論じるとともに、新たにシステムズエンジニアリングのアプローチからこれらの故障の原因究明と対策が可能となることを示すものである。具体的にはシステムズエンジニアリングを用いて、エンジンと油圧システムからなる駆動システムの基本アーキテクチャを理解した上で、故障のメカニズムを解明し、対策を体系化することを目的としている。

建設機械は過酷な使用条件で使われるために、潤滑油、燃料、不凍液、グリース(以下潤滑油類と呼ぶ)の品質は駆動システムの耐久性に与える影響が大きい。市場では低品質の潤滑油類が建設機械に使われて故障を起こすことも多い。特に近年、欧州では建設機械に使用される潤滑油類に対しても環境負荷の低減が求められている。生分解性作動油は、建設機械からこぼれても自然に分解して炭酸ガスと水になるので環境汚染を防止できるが、環境規制のため有効な添加剤を配合できずに潤滑油類としては低品質となる。この結果、建設機械の駆動システムの故障を起こすことがあり、建設機械メーカーはユーザから故障の対策を求められている。

潤滑油類に関する研究および開発に携わるエンジニアの業務の中で故障の解析と対策が占める割合は大きい。故障の対策は網羅的に実施する必要があるものの、その効率性は必ずしも高くなく、潤滑油類を起因とする故障メカニズムが未解明のまま残ることもある。このため、潤滑油類が流れる駆動システム全体を把握した上で故障の解析と対策を実施するシステムズエンジニアリングのアプローチが有効になると考えられる。

本論文は、6章からなり、第1章では、建設機械と潤滑油類の歴史と動向について述べ、次いで建設機械の社会的な影響、利害関係者、建設機械の使われ方、建設機械に用いられる潤滑油類の種類、ならびに建設機械の構造の概略について論じる。次いで潤滑油技術者の研究開発の対象と、本論文の課題設定と目的を述べる。さらに、潤滑油類の具備すべき品質を述べ、論文の構成を示す。

第2章ではエンジンと油圧システムでの潤滑油類の振る舞いをもとに、潤滑油類が起こしうる故障の部位とその重要度を述べ、潤滑油類の配合成分と故障の関係についても概要を述べる。潤滑油類に起因する故障について、危険源と危険コンテキストの組み合わせによる分類を示した上で、本論文で取り上げる故障解析と対策の項目を分類している。

第3章では運用と開発のステージで発生したエンジンの故障とその対策について述べる。運用ステージの故障は、低品質な米国製エンジン油によるエンジン焼付きの解析と、ヘッドガスケット用の冷却水シールの漏れ故障である。エンジン焼付きに対しては Systems

Modeling Language (SysML)によりエンジン油やピストンリングの基本メカニズムを記述して低品質エンジン油による故障メカニズムを解明する。冷却水シールの漏れの解析にはアーキテクチャを故障のビューから見た Decomposition Analysis Resolution (DAR) Process を用いて原因を解析する。開発ステージでのクランクシャフト用オイルシールの漏れ故障についても同様に DAR を用いて原因と整理し、SysML を用いてオイルシールの振る舞いを理解して対策することを述べる。

第4章では運用ステージで発生した生分解性作動油による油圧システムの故障とSysMLによる記述に基づく解析と対策について述べる。従来の手法に基づく故障解析では、生分解性作動油による作動不良の問題が未解決のまま残っていたが、SysML を用いて油圧システムの基本メカニズムを記述した上で生分解性作動油を起因とする作動不良に至るメカニズムを解明し、作動不良を防止する対策を導き出す。そして、SysMLの安全に特化した拡張プロファイル Safety Modeling Language (SafeML)を用いて作動不良コンテキストおよびその対策案を記述して、最も有効な対策を選定できたことを述べる。

第5章では、建設機械メーカーの従来の故障対策の方法について述べ、今後の有力な故障対策となる純正油類を用いたメンテナンスについて論じる。次いで、故障対策のシステムズエンジニアリングのアプローチによる故障解析や対策の結果を論じる。さらに、これらのシステムズエンジニアリングに基づく故障対策の方法が、一般の機械設備や複雑システムにも役立つ可能性について論じる。

第6章では、本論文全体のまとめを述べるとともに、結論を述べる。

Abstract

This thesis discusses on analysis and countermeasure results of past drive system failures of the construction machinery caused by lubricants, which the author has worked for a long period of times. Using the systems engineering approach, it becomes possible to investigate the cause of these failures and countermeasures. Specifically, the purpose is to use systems engineering to understand the basic architecture of the drive system consisting of an engine and a hydraulic system, to clarify the failure mechanism, and to systemize failure analysis and countermeasures.

Lubricants, fuels and coolants (hereinafter called lubricants) greatly affect durability of construction machineries. Low quality lubricants are occasionally used and cause machinery failures in the field. Furthermore, the users and the government offices concerned recently request environmental protection. Since the environmentally friendly lubricants show generally low qualities by the additive restrictions from the environmental awareness, those lubricants can cause the machinery failures. Therefore, the users appreciate durable machineries, which can enable to use the low-quality lubricants.

In the research and development on lubricants, failure analysis and countermeasures account for a large percentage. The lubricants engineer should perform comprehensive analysis and verification, which are not efficient. Unresolved failures and those mechanisms may remain in some cases. From this situation, it is effective to understand an entire driving system streaming lubricants, to analyze the failure mechanism and to implement the countermeasure by a systems engineering approach.

This thesis consists of 6 chapters. Chapter 1 describes background of this study as follows; the history and the future trend of construction machinery and lubricants, the requirements for the lubricants' quality from the social impact, stakeholders and operational conditions. Also, volume and types of lubricants for the construction machinery and lubricants engineer's interests for the researches and developments are described. Then the problem setting and the purpose of this thesis is described. Further, this chapter describes lubricants qualities to be fulfilled for the construction machineries and the structure of this thesis.

Chapter 2 introduces the lubricants activities in the internal structure of the engine and in the hydraulic system, then describes the subjected important component and parts for this research. The quality problems of lubricants from the additive composition are described. Further, the failures caused by lubricants are classified by combinations of hazards and

hazardous contexts. Then the failures and the countermeasures taken up in this thesis are itemized.

Chapter 3 describes engine failures that occurred in the utilization and development stages and their countermeasures. The failure of the utilization stage is the analysis of engine seizures with low quality US engine oils and the leak failure of the coolant seal for the head gasket. For engine seizure, the basic mechanism of engine oil and piston ring are described using Systems Modeling Language (SysML) to clarify the failure mechanism. For analysis of coolant seal leakage, the cause could be analyzed using the Decomposition Analysis Resolution (DAR) Process from the failure view of the architecture. Similarly, the leak failure of the crankshaft seals in the development stage could also be clarified and be taken the countermeasure using DAR and SysML description.

Chapter 4 describes the failure analysis and the improvement of hydraulic system against biodegradable hydraulic oil regulations in the utilization stage. Although the most hydraulic components were improved by the previous countermeasures, a hydraulic malfunction remained unsolved. This chapter proposes a new systematic approach to solve the malfunction using the SysML descriptions. The SysML can fully describe the action mechanism of hydraulic system. Based on the mechanism, the hydraulic malfunction mechanism can be clarified and defences against the malfunction can be derived. Using the Safety Modeling Language (SafeML); extended profile of SysML, the malfunction context and the defences can be described and the most effective defence can be selected.

Chapter 5 describes previous failure measures for construction machinery manufacturers, and discusses a new maintenance contract using genuine lubricants as a major countermeasure. Furthermore, discussing the results of failure analysis and countermeasures by means of systems engineering approach. These methods based on the system engineering for failure measures are discussed on the possible usage for a general machineries and complex systems.

Chapter 6 presents conclusions of the whole thesis.

目次

要旨	i
Abstract	iii
図目次	viii
表目次	xii
1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 建設機械と潤滑油類の歴史と動向	2
1.3 建設機械の社会への影響	5
1.4 建設機械の利害関係者	6
1.5 建設機械の使われ方	7
1.6 建設機械に用いられる潤滑油類の種類と用途	8
1.7 潤滑油技術者が対象とする故障	10
1.8 潤滑油類の具備すべき品質	11
1.9 本論文の課題設定と目的	13
1.10 本論文の構成	14
2 章 潤滑油類が起因する故障の概要、分類ならびに本論文に取り上げる項目	17
2.1 建設機械の駆動システムと潤滑油類の振る舞いと構造	17
2.2 潤滑油類の種類と配合成分が及ぼす故障への影響	20
2.3 潤滑油類に起因する故障の分類	22
2.4 本論文で取り上げる故障と対策の項目	23
3 章 建設機械用エンジンの潤滑油類が起因となる故障の対策	25
3.1 低品質の米国製エンジン油によるエンジン焼付きの解析	25
3.1.1 米国でのエンジン焼付きの調査と解析	26
3.1.2 ホットチューブテストにより評価したエンジン油の耐熱限界の検証	31
3.1.3 システムズエンジニアリングを用いたエンジン焼付きのメカニズムと対策 についての再考	32
3.1.4 エンジン焼付きに対する改良	36
3.1.5 ホットチューブテストの自動車工業会エンジン油規格への採用	36
3.1.6 まとめ	38
3.2 Decomposition Analysis and Resolution (DAR) Process の手法を応用した エンジンヘッドガスケット用の冷却水シールの故障解析と対策	40

3.2.1 基本的な要求と運用 (OpsCon) 及び DAR による水シールの漏れ原因 の解析と調査方法	41
3.2.2 冷却水漏れの原因の解析	43
3.2.3 DAR の手法から導かれた水シールの漏れメカニズム.....	49
3.2.4 Verification Analysis and Validation Resolution (VAR)による検証と妥当性 確認	50
3.2.5 改良水シールの採用と水シールのプロダクトライフサイクルマネジメント (PLM)を考えた対策	54
3.2.6 まとめ	55
3.3 クランクシャフト用オイルシールの漏れ故障の対策	56
3.3.1 高周速クランクシャフトシールとデュアルリップシールに生じた漏れの メカニズムの検討	56
3.3.2 システムズエンジニアリングの DAR を用いたシールの漏れ対策の再考.....	59
3.3.3 DAR に沿った高周速クランクシャフトシールの漏れの対策.....	60
3.3.4 DAR に沿ったデュアルリップシールの漏れの対策	63
3.3.5 両クランクシャフトシールの市場稼働車による妥当性確認	69
3.3.6 まとめ	70
4 章 生分解性作動油による油圧システムの故障の解析と対策	72
4.1 欧州バイオ油規制に対する戦略の構築	72
4.2 欧州バイオ油の品質の調査	74
4.3 欧州バイオ油に対応する短期と長期の対策のシナリオ	77
4.4 システム全体の原因解明と対策決定	82
4.5 不具合要因の技術検討	83
4.6 不具合に至る油圧システムの振る舞いの分解	88
4.7 バイオ油の状態遷移と作動不良の関係と対策案の検討	90
4.8 作動不良のコンテキストと対策の記述.....	94
4.9 まとめ	100
5 章 考察	102
5.1 従来の建設機械メーカーの潤滑油類に起因する故障への対策について	102
5.2 システムズエンジニアリングアプローチからの故障対策への再考.....	106
5.3 一般の駆動システムへの、システムズエンジニアリングを用いた故障解析と 対策の適用	110

6 章 結論	112
文献	116
研究業績	128
謝辞	137

目次

1章

図 1-1 1835 年米国 W.T. Otis 発明の蒸気ショベル	2
図 1-2 1907 年米国 B. Holt 発明のガソリンエンジン搭載クローラトラクタ	3
図 1-3 世界の主要 7 建設機械の需要推移	4
図 1-4 国内の全車両の保有台数に対する建設機械の台数と二酸化炭素(CO ₂) 排出量	5
図 1-5 建設機械の主な用途と利害関係者	6
図 1-6 建設機械の使われ方の特徴	8
図 1-7 建設機械と自動車の潤滑油類の容量比較	9
図 1-8 代表的な建設機械の外観と油圧機器の配置	10
図 1-9 建設機械メーカーの潤滑油技術者が対象とする故障	11
図 1-10 本論文の全体像と各章間の関係	16

2章

図 2-1 建設機械の駆動システムの振る舞いを表わすアクティビティ図	17
図 2-2 エンジンの構造と仕組みを表わす内部ブロック図	19
図 2-3 潤滑油類の配合成分を表すブロック定義図	21
図 2-4 危険、コンテキストと危害の関係	22

3章

図 3-1-1 初期のホットチューブテスト	25
図 3-1-2 米国で焼き付いたブルドーザ用エンジンの分解調査結果	27
図 3-1-3 焼付きを生じないエンジン油と生じるエンジン油間の塩基価 TBN と 硫酸灰分 SA の比較	30
図 3-1-4 ホットチューブテストの模式図と限界温度の決定方法	30
図 3-1-5 ホットチューブテストにより求めた各エンジン油銘柄の耐熱性(Critical Temperature)とエンジン焼き付きの関係	30
図 3-1-6 三種類のエンジン油についての台上エンジン試験の結果	32
図 3-1-7 従来エンジンでのピストンリングの種類と過負荷運転時のピストンリング 溝温度	33
図 3-1-8 エンジンのピストンとシリンダ周辺でのエンジン油の状態遷移を表わす 状態機械図	33

図 3-1-9 耐熱性の高いエンジン油でのピストンリングの振る舞いを表わす アクティビティ図 -----	34
図 3-1-10 耐熱性の低いエンジン油でのピストンリングの振る舞いを表わす アクティビティ図 -----	35
図 3-1-11 米国製エンジン油 BTO-3 を用いた改良エンジン(過負荷条件)と 従来エンジン(標準条件)の台上エンジン試験の状態変化 -----	37
図 3-2-1 ヘッドガスケットの水シールの位置と水漏れを起こした水シールの例 ----	40
図 3-2-2 ヘッドガスケット用水シールの漏れの FTA -----	42
図 3-2-3 ヘッドガスケット用水シールの漏れについてのクリティカルイシュー により整理した DAR-----	42
図 3-2-4 従来ゴム P と改良ゴム S の水シールの接触状態の目視観察 --	43
図 3-2-5 均一な接触状態を保てる圧縮率の上限とヘッドガスケットの圧縮率 ----	44
図 3-2-6 シリコンゴム中のシリカ充填材の配合量と圧縮破壊するまでの圧縮率 の関係 -----	45
図 3-2-7 水シールの製造工程の実態 -----	47
図 3-2-8 従来ゴム P と改良ゴム S の充填材の SEM 写真 -----	48
図 3-2-9 冷却水シールの漏れのメカニズム-----	49
図 3-2-10 ヘッドガスケット・シール試験機の模式図 -----	51
図 3-2-11 ヘッドガスケット・シール試験機により得られた水シールの疲労曲線 --	52
図 3-2-12 台上エンジン試験によるヘッドガスケット用の各水シールの圧縮永久 歪みと冷却水漏れの発生 -----	53
図 3-2-13 台上エンジン試験における冷却水漏れ直後の水シール周りの状況	53
図 3-3-1 高周速用クランクシャフトシールの模式図 -----	57
図 3-3-2 大型エンジンの台上試験で漏れを起こしたクランクシャフトシールの リップ摺動部の炭化物とクラックと膨れ -----	58
図 3-3-3 高周速用クランクシャフトシールのリップの振る舞いを表わす アクティビティ図-----	58
図 3-3-4 クランクシャフトシールの漏れについての DAR -----	59
図 3-3-5 台上エンジン試験を用いた 30 分間のクランクシャフトシールのリップ 温度上昇の測定結果-----	61
図 3-3-6 オイルシール試験機を用いたリップ荷重とヘリックスの効果の測定結果	62
図 3-3-7 三種類のオイルシールについて三種類のエンジン油を用いた台上 エンジン試験の結果 -----	63

図 3-3-8 デュアルリップシールのリップの振る舞いを表わすアクティビティ図	64
図 3-3-9 開発したベントチューブ付きデュアルリップシール	65
図 3-3-10 ベントチューブ付きデュアルリップシールと従来品のオイルシール 試験機による結果	65
図 3-3-11 傾斜台上エンジン試験	67
図 3-3-12 傾斜台上エンジン試験におけるベントパイプ付きデュアルリップシール のオイル移動(漏れ)量の測定結果	67
図 3-3-13 種々のクランクシャフトシールの種々のエンジン試験結果の PV 線図 による整理	69
図 3-3-14 市場稼働の建設機械エンジンから回収した高周速クランクシャフト シールとベントチューブ付きデュアルリップシールの妥当性確認	70

4章

図 4-1 欧州における建設機械の使用環境と利害関係者の模式図	73
図 4-2 バイオ油と石油系作動油の水面上での状態変化	74
図 4-3 市販バイオ油の JIS 酸化安定度試験を用いた 100°Cでの酸化試験結果	75
図 4-4 市販バイオ油の黄銅に対する摩耗試験の結果	76
図 4-5 市販バイオ油の低ニトリル NBR の浸漬試験の結果	76
図 4-6 市販バイオ油中のペーパー摩擦材の摩擦係数の測定結果	77
図 4-7 欧州のバイオ油規格に基づく油圧システムに対する要求を表す要求図	83
図 4-8 建設機械の油圧システムの構造と仕組みを表す内部ブロック図	84
図 4-9 断熱圧縮とキャビテーションによるバイオ油のラッカー生成の推定図	86
図 4-10 油圧タンクとフィルタ付きブリーザの模式図	87
図 4-11 油圧システムの正常な状態の振る舞いを表すアクティビティ図	88
図 4-12 油圧システム内でのバイオ油のラッカー生成を表すアクティビティ図	89
図 4-13 油圧システムでの汚染されたバイオ油による作動不良を表す アクティビティ図	90
図 4-14 バイオ油の状態遷移を表わす状態機械図	91
図 4-15 建設機械のフィールド試験での飽和脂肪酸合成エステル基油のバイオ 油と石油系作動油の酸価 TAN の経時変化	92
図 4-16 石油系作動油を用いた作動油フィルタの交換時間の延長試験 (4,200 時間)でフィルタ全体に付着した茶色のラッカー	93
図 4-17 SafeML に追加した要素	94

図 4-18 バイオ油による油圧バルブの作動不良に対する 3 つの対策案を表す 拡張 SafeML 図	96
--	----

5章

図 5-1 建設機械メーカーの 1990 年代のデザインレビュー制度の仕組み	103
図 5-2 テレマティックスを利用した純正油類によるメンテナンス契約の CVCA 図 ..	105
図 5-3 建設機械メーカーの妥当性確認	108

表目次

1章

表 1-1 建設機械用の潤滑油類の歴史と動向	3
表 1-2 建設機械用潤滑油類の具備すべき品質の一覧	12

2章

表 2-1 本論文で取り上げる部品の故障と対策の故障分類	23
------------------------------------	----

3章

表 3-1-1 エンジン焼付きの要因についての調査結果の一覧表	26
表 3-1-2 エンジン油の銘柄によるエンジン焼付きの整理	29
表 3-1-3 JASO エンジン油規格作りの利害関係者、制定活動ならびに利用方法 ..	38
表 3-2-1 使用冷却水中の有機酸(強酸)イオン量の分析と水シールの状態	46
表 3-2-2 DAR の項目と対応させた検証と妥当性確認の VAR の試験項目	50
表 3-2-3 ヘッドガスケット・シール試験機を用いた高温(155°C)試験の結果	54

4章

表 4-1 バイオ油の品質上の問題点とプロジェクトチームが実施した短策と長期の 対策	79
表 4-2 バイオ油の品質等級付けと推奨する運転条件	80
表 4-3 JCMAS バイオ油の規格作りの利害関係者、制定活動ならびに利用方法 ..	80
表 4-4 バイオ油の酸化の問題の原因と短期対策	81
表 4-5 油圧ダストの粒径毎の粒子数(清浄度)の限界値と故障が発生した 作動油中の粒子数の典型例	87
表 4-6 作動不良の対策案のタグ値、安全スコアとコスト評価の比較	99
表 4-7 フィルタ改良前後の車両での作動不良の発生件数の比較	100

5章

表 5-1 運用ステージでの潤滑油類に起因する故障対策の分類	104
表 5-2 エンジンと油圧システムを用いる機械装置	110

第1章 序論

1.1 研究の背景

建設機械は極寒地、熱帯林、砂漠、河川そして4,000 m級の高地でも使用される。使用時の負荷は高いため、建設機械では耐久性に関する要求の優先順位が最も高い。近年は環境意識の高まりから、本論文でも取り上げる環境汚染を防ぐ生分解性作動油の導入、および環境負荷物質が含まれる潤滑油類と部品の使用を禁ずる規制が始まっている。さらに建設機械の世界的な排出ガス規制、欧州における住環境のみならず自然環境にも考慮した騒音規制[1][2]、世界に先駆けた日本のCO₂排出量(燃費)規制であり[3]、建設機械メーカーの環境負荷物質に関する自主規制もある[4]。

建設機械のユーザが用いる潤滑油、燃料、不凍液あるいはグリース(以下潤滑油類と呼ぶ)は、市販品によっては低品質であることも多く、これに起因する故障の対策にメーカーが苦しんできた歴史がある。近年では、環境汚染を防ぐ潤滑油類の配合成分にも厳しい制約が課され、結果的に低品質となり建設機械の故障を起こすことがある。これに対して建設機械メーカーは早急に故障を防ぐ対策を講じ、耐久性の向上を図ることが求められている。

建設機械メーカーは自動車メーカーと同様に潤滑油技術者(一部は設計者兼任)を配置しており、彼らは潤滑油以外にも燃料、不凍液、グリースを研究開発の対象である。その研究開発の目標は低品質の潤滑油類に適合するコンポーネントの故障対策および耐久性の高いコンポーネントの開発も行うこと、そして高品質の潤滑油類を純正部品として開発することにある。一方で石油メーカーもまた、主に自動車用を対象として全ての潤滑油類について高品質の潤滑油類の開発を行っている。

著者は市場の安価で低品質の潤滑油類を用いたことによる故障のメカニズムの解析と対策、低品質な潤滑油類をも使用可能とする部品またはコンポーネントの開発を行ってきた。建設機械の高性能化に伴う新しい潤滑油類の開発、あるいは潤滑油類の環境対策もその対象であった。著者が開発した潤滑油類は、建設機械メーカーの純正部品として海外工場でも建設機械に充填されグローバルにユーザへ販売され、市場での故障を防ぐ手段になっている。このように多くの成功した実績と国際会議での発表もあるが、システムティックな解析と対策が十分に行われてないために未解決の課題も残されていた。それは、従来の故障の解析と対策が旧来のシステムズエンジニアリングのアプローチで進められていたことに原因があった。この古いアプローチでは、今後、さらに複雑化する建設機械への対応、あるいは潤滑油類の使用環境への複雑化する高度な要求に対応するには限界がある。最新のシステムズエンジニアリング[5][6][7]のアプローチを導入して、システムティックに、潤滑油類に起因する故障の解析を行い、適切に対策を講じることが必要になっていると言える。

1.2 建設機械と潤滑油類の歴史と動向

広義の建設機械には浚渫船、トンネル掘削機あるいは空気圧縮機なども含まれるが、ここでは土木工事、建築工事、鉱山作業、除雪作業、あるいは災害復旧工事に用いられる車両に限定する。建設機械と使用される潤滑油類の歴史の概要を以下に述べる。建設機械の歴史[8]とそこで使用される潤滑油類の歴史の概要を以下に述べる。

世界で初めての建設機械は古代ローマ水道の建設に用いられた人力クレーンまで遡る。このクレーンの軸受、複合滑車などには獣脂、菜種油あるいは天然アスファルトなどの潤滑剤が使用された[9]。産業革命により蒸気機関が発明されると、1800年には蒸気浚渫船と蒸気クレーンが英国で開発されている。1835年に米国では実用的な蒸気ショベル(図 1-1)が発明されて当時盛んになった鉄道の建設工事に多く用いられた[8]。蒸気機関のピストンの潤滑用には現在でも使われるカルシウム石鹼グリースが発明されている[9]。これ以外にも菜種油、鯨油などの動植物油が様々な機械に使われ始めており[10]、後述する近年の生分解性作動油の発想にもつながっている。1914年に竣工したパナマ運河の工事に米国の大型蒸気ショベル90台が投入されたことがきっかけとなり、建設機械が世界的に普及した。1907年には内燃機関を搭載したトラクタが米国で発明された(図 1-2)。1914年には自動車用潤滑油が開発されている[10]。ラジエータに入れる不凍液は現在と同じエチレングリコールも使われ、これに配合する防食剤も発明された。表 1-1 に建設機械の変遷と潤滑油類の歴史をまとめる。グリース(Grease)は最初に発明された潤滑油類であるが、建設機械では将来も使われると考えられる。内燃機関(Internal Combustion Engine)が発明されるとエンジン油(Engine Oil)、ガソリンと軽油(Liquid Fuel)、変速機油(Transmission Oil 以下 TM 油)と不凍液(Engine Coolant)が開発されるが、将来の電池駆動車(Battery Drive)の普及により軽油とエンジン油は不要になる。一方、後述する



図 1-1 1835年米国 W.T. Otis 発明の蒸気ショベル

ように TM 油、不凍液と作動油 (Hydraulic Oil) は将来も使われる。

日本では建設機械は大正時代初期まで多く輸入され一部は技術導入されて製造されていた。しかし、昭和初期の金融恐慌により、日本政府は土木工事を失業対策として全て人力に頼る方針を出し、その後ほとんど建設機械が使用されることがなかった。これに対して米国ではブルドーザなどの大型建設機械を用いた土木工事が活発に行なっていた。米国建設機械メーカ

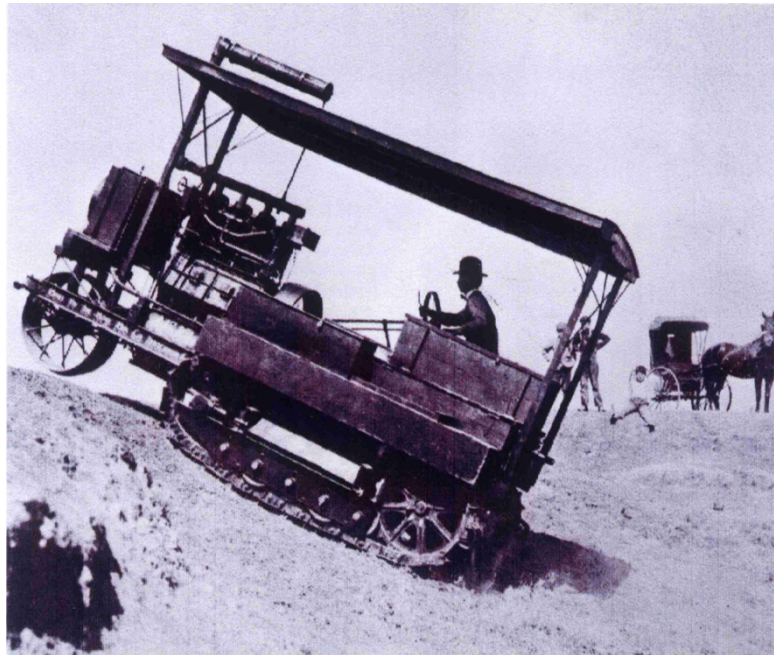


図 1-2 1907 年米国 B. Holt 発明のガソリンエンジン搭載クローラトラクタ

表 1-1 建設機械用の潤滑油類の歴史と動向

Type of Driving System	400 B.C.	1800 A.D.	1900	1950	2000	Future
	Man-powered Machinery	Steam Engine Machinery	Internal Combustion Engine	Hydraulic Actuated		Battery Drive
Grease						
	Bearing and	Piston and Chain	Pin Bushing			
Engine Oil			Internal Lubrication of Engine			
Liquid Fuel			Gasoline and Diesel Fuel			
TM Oil						
			Gear Lubrication	Clutch Lubrication		Gear Lubrication
Engine Coolant			Engine Cooling			Battery Cooling
Hydraulic Oil				Hydraulic Drive		
Remark	Vegetable Oils Natural Asphalt	Metallic Soap Grease	Petroleum Lube., Glycol Coolant and Synthetic Esters			

のキャタピラー社は 1935 年にディーゼルエンジン油を石油メーカーと共同開発しており[11]、その後の潤滑油の発展の礎になっている。第二次大戦中には、米国はこれら大型建設機械を用いて太平洋の島々に短期間で飛行場を設営することで、日本への攻撃を決定的に有利に進めた[8]。ドイツでは戦時中にジェット戦闘機用の潤滑油として 3,500 種類以上の合成エステル油を開発しており[10]、この技術は近年の生分解性作動油にも応用されている。戦後間もなく、イタリアで世界初の油圧式ショベルが発明されて世界中に普及することになった。戦後の日本政府は建設機械が国力増強に役立つとして建設機械産業の育成に力を入れた結果、現在では世界 50 位以内の建設機械メーカーが国内に 12 社ある状況となっている[12]。

近年の世界の建設機械の需要(Demand for 7 Major Products)は、図 1-3 に示すように 2000 年以降中国と東南アジアの開発ブーム(Era for resource-rich and emerging countries)により増加しており 1990 年代の 2 倍の台数が販売されるようになっている。世界の建設機械の 2017 年の生産額は約 600 億米ドルに達して活況を呈しており[14]、今後も建設機械需要の落ち込みは少ないと思われる。

今後、乗用車ではバッテリー駆動の電気自動車が増加すると予測され[15][16]、米国では大型トラックのバッテリー駆動車も市場投入が予定されている[17][18]。バッテリー駆動車では潤滑油類は不要なため、潤滑油類メーカーは打撃を受けると考えられる。建設機械では負荷率(全負荷運転の時間/全運転時間)が最大 80%に達し、1 日当たりの運転時間は 3 交代作業で 20 時間になる。建設機械にリチウムイオンバッテリーを採用しても 4~5 時間しか運転できない上、充電には 5 時間を費やす課題がある[19]。また、山間僻地や住宅地周辺の現場では充電設備の設置は難しい。これらの理由からバッテリー駆動の建設機械の実用化は難しく、当面

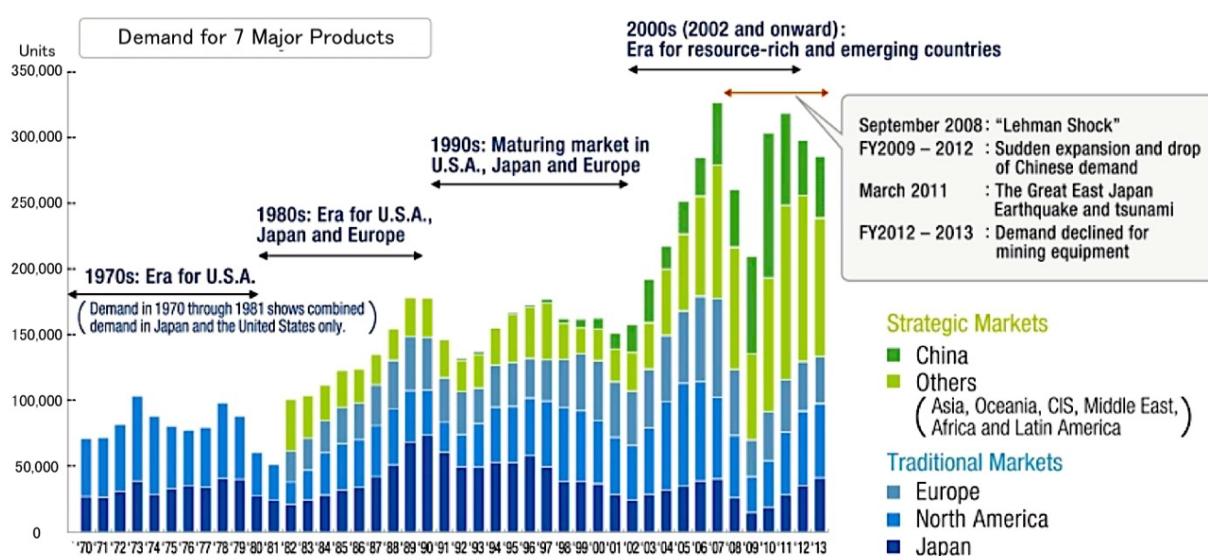
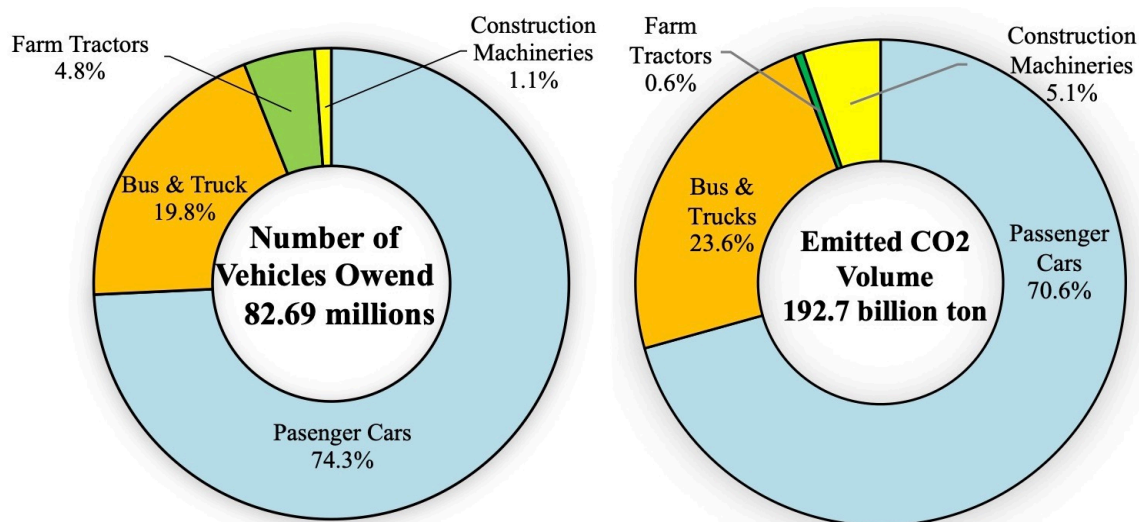


図 1-3 世界の主要 7 建設機械の需要推移 文献[13]より転載

は住宅地工事や地下工事などの低負荷用の小型建設機械に限定される。内燃機関による駆動は今後も主流と考えられる。さらに、油圧アクチュエータのパワー密度は電気アクチュエータに比べて10倍以上[20]もあるため、油圧アクチュエータ(特に油圧シリンダ)を全て電動式に変更することは困難である。このように建設機械では潤滑油類の重要性は今後も高いが、潤滑油類メーカーの衰退による品質低下に建設機械メーカーは備える必要がある。

1.3 建設機械の社会への影響

国内の建設機械の保有台数(Number of Vehicles Owned)は図1-4に示すように全車両の約1.1%に過ぎないが、二酸化炭素(CO₂)排出量(Emitted CO₂ Volume)では全車両の排出量に対して5.1%にもなる。これはエンジンの負荷率があらゆる車両の中で高く、また運転時間も長いためである。建設機械が社会に大きな影響を与えることがわかる。このため、日米欧のバス・トラックの重量車燃費基準に続いて、国内では世界に先駆けて2014年より建設機械のCO₂削減のための燃費基準認定が始まっている[3]。欧州では菜種油を原料とするバイオディーゼル(脂肪酸メチルエステル、FAMEとも称する)がCO₂低減のために1990年代から使用されている[26]。軽油にバイオディーゼルの5%混合した燃料(B5)が主に使われており、これによりCO₂発生は2~3%抑制される[11]。日本では廃食油の使用を前提としたバイオディーゼルの品質がJIS規格[29]となっている。今後、欧州はバイオディーゼルの混合量を10%まで増やす



a) 建設機械の保有台数比率
(2012-2016年)

b) 建設機械のCO₂排出比率
(2005-2016年)

図1-4 国内の全車両の保有台数に対する建設機械の台数と二酸化炭素(CO₂)排出量
(2012-2016年の文献[21]-[27]に基づき作成)

計画である[30]。

建設機械の排出ガス中の酸化窒素(以下 NO_x)の排出量に関しては、2000 年時点で国内全車両が排出する NO_x 中の 33.8%も占めると算出された[11]。そのため建設機械の排出ガス規制が、2014 年以降に日米欧でバス・トラックと同等の排出ガス規制が実施されている[11]。変遷する排出ガス規制に対応して、エンジン油の品質は排出ガス中の有害成分(NO_x 、パーティキュレート他)除去装置に悪影響を及ぼさないように、添加剤の制限が加えられるようになっている。今後の建設機械の燃費基準の高度化に備えて潤滑油類の改良も必要となっており、著者らも油圧機器の内部漏れを防ぐことで燃費低減を図る新たな作動油の開発を行っている[31][32]。

1.4 建設機械の利害関係者

建設機械の用途と利害関係者の関係を図 1-5 に示す。図 1-5 は国内での例を示しているが、海外でも同様な関係となっており、基本的に B2B(企業間取引)である。建設機械の最も大きい販売先はレンタル業(Rental Company)であり世界的にその需要は 55-60%もあるが[33][34]、中小型機種が主である。ゼネコン(General Contractor)は建設土木業者(Construction and Engineering)に各種工事を発注し、建設土木業者はレンタルあるいは自社所有の建設機械で道路(Road Work)、河川(River Work)、建物解体(Demolition)、土地造成

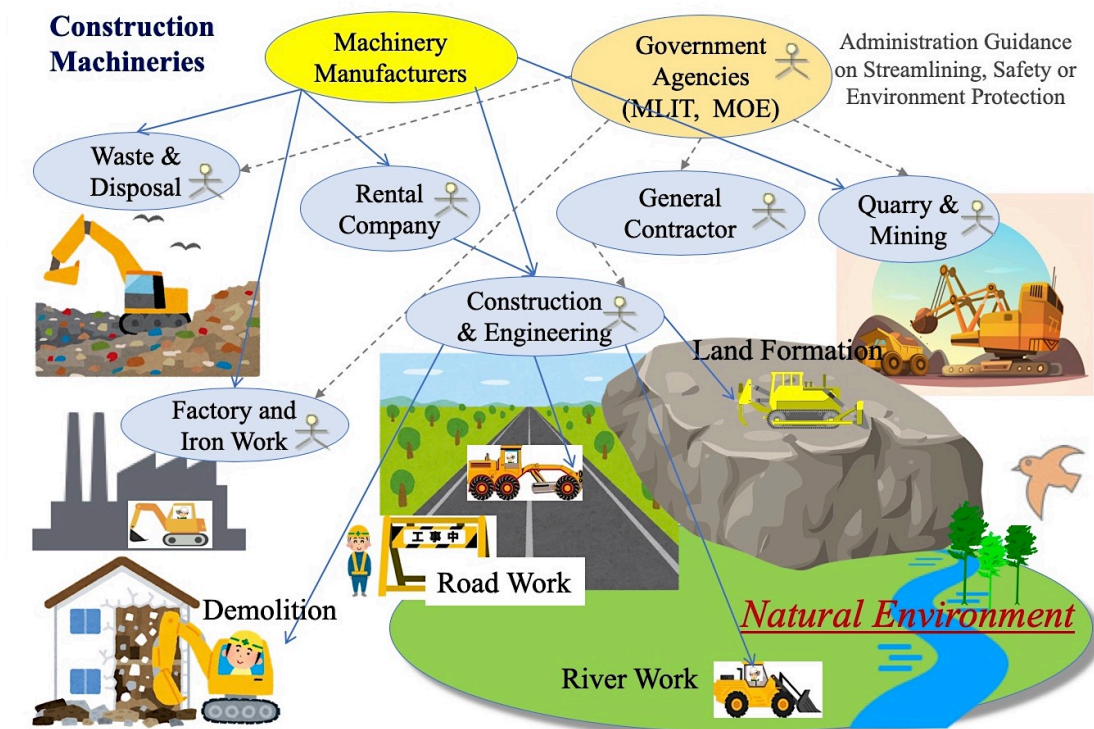


図 1-5 建設機械の主な用途と利害関係者

(Land Formation)などの工事を行う。砕石場と鉱山(Quarry and Mining)、産廃処理場(Waste and Disposal)あるいは工場・製鉄所(Factory and Ironwork)は建設機械を直接購入して使うことが多い。このようなユーザは潤滑油類への関心が高く、潤滑油類とメンテナンスに費用を掛けることをいとわない。レンタル業者はユーザによるメンテナンスには不安があるので、メンテナンス間隔の延長を望んでいる。いずれのユーザも潤滑油類に起因する建設機械の故障を減らすことを要求している。

建設機械の工事に関する効率化、安全性および環境に対しては国土交通省(MLIT 以下国交省)と環境省(MOE)が各建設機械ユーザへの指導(Administration Guidance on Streamlining, Safety and Environmental Protection)を行なっている。国交省は公共工事において直接ユーザへの指導を行なうので、建設機械メーカー(Machinery Manufacturer)への影響は大きい。環境については、国内では前述のように排出ガス規制、燃費基準あるいは騒音規制が厳しく指導されており、欧州では後述する生分解性作動油の使用なども地方政府から行政指導されている。多くのユーザは建設機械の環境対策にも真剣に取り組んでおり、建設機械メーカーの早急な対応を望んでいる。

1.5 建設機械の使われ方

建設機械の使われ方の特徴を図 1-6 に示す。自動車と異なる建設機械の使用方法は、(1) 頻繁な全後進と方向転換がある(Frequent back-and-forward Motion and Change in Direction)。これにより変速装置あるいはブレーキ装置などに用いるクラッチまたはブレーキは、早期の摩耗を防ぐために潤滑油中(湿式)で使うことが必須となる。岩石を取り除くような作業では(2) エンジンが連続 100%出力となる過負荷運転(Overload Operation)となる。自動車とは異なり走行風による冷却がないために、ラジエータによるエンジン冷却とオイルクーラによる駆動システムの冷却が必要となる。岩石などを崩す作業では(3) 衝撃を伴う場合があり(Operation with Impact)、駆動システム中の歯車、作業機の軸受などに直接衝撃が加わる。(4) 作業により舞い上がる砂塵あるいは水中作業(Operation under Dust, or in Mud Water)などにおいては潤滑油類用シールの高い性能と耐久性が必要になる。(5) ユーザは 10,000 時間以上のオーバーホール寿命(Long Overhaul Interval)を要求しているため、システムが十分な耐久性を持つことが要求される。(6) 整備・修理は現場で行われる(Repair on Site)ことが多いため、潤滑油類とフィルタなど消耗品を長寿命化して整備回数を減らす必要がある。また、整備・修理時の潤滑油類の漏洩による環境汚染を最小とするために環境負荷が高い物質の使用を避ける必要がある。これらの使用条件または要求に加えて、(7) 海外では低品質の潤滑油類(Low Quality Lubricants)が使用される場合があり、(8) 極寒地から熱帯地、砂漠など広範囲の外気温(Operation under Wider Range Climatic Temperature)で運転するため、これに対応する潤滑油類とシールが要求される。

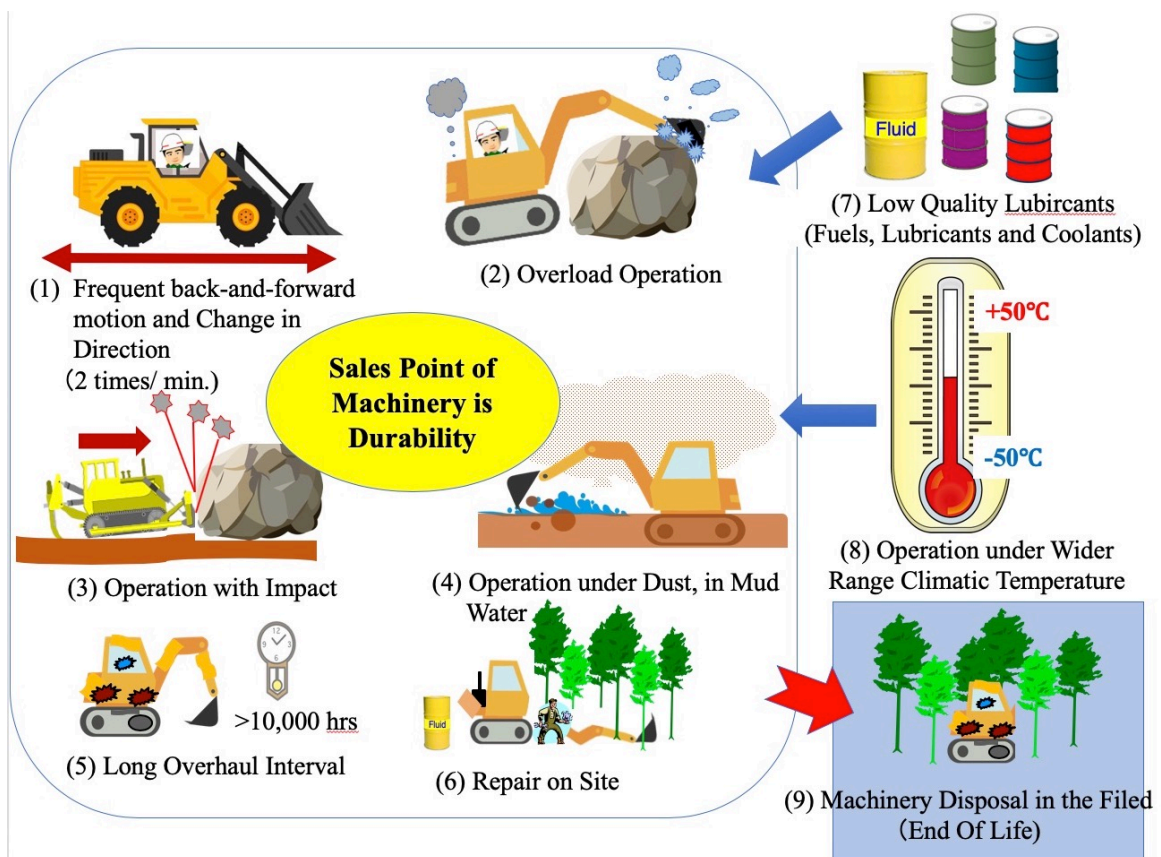


図 1-6 建設機械の使われ方の特徴

(9) 建設機械あるいは部品が廃棄される場合、建設機械本体(標準で 20 ton)や部品が重いために現場に廃棄(Machinery Disposal in the Field)せざる得ない場合がある。これら廃棄物による自然環境の汚染を抑制するために環境毒性の少ない材料の採用を進める必要がある。このため著者らは日本建設機械施工協会にて環境負荷低減技術指針を制定している[35]。高負荷の使用手法と苛酷な使用環境によって建設機械の故障を完全に防ぐことはできないため、故障が少ない建設機械は耐久性に優れる製品としての大きなセールスポイントである。

1.6 建設機械に用いられる潤滑油類の種類と用途

建設機械(Middle-size Excavator、中型油圧ショベル)には図 1-7 のように乗用車(Middle-size Passenger Car)の約 14 倍、大型トラック(Heavy-duty Truck)の約 3 倍の容量の潤滑油類が使われる。潤滑油類の質量は、建設機械の車体質量の 1.5%にもなり、部品としての価値と、建設機械の耐久性と性能への影響も大きい。潤滑油類には図中に示すようにエンジン油(Engine Oil)、油圧システムに使う作動油(Hydraulic Oil)、変速装置に使うトランスミッション油(Transmission Oil: TM Oil)、湿式ブレーキとディファレンシャル歯車を内蔵するアクスル用のア

クスル油 (Axle Oil)、終減速歯車装置にギヤ油 (Gear Oil)、そして作業機の軸受あるいは旋回歯車に用いられるグリース (Grease) があり、エンジンの冷却と腐食防止のための不凍液 (Engine Coolant) が使用される。エンジン油は自動車用と共用の場合もあるが、その他は建設機械用として独自の発達をしている。

建設機械の代表例として油圧ショベルの外観と駆動システムであるエンジンと油圧機器の配置を図 1-8 に示す。建設機械はこの油圧ショベルのようにクローラ (Travelling Equipment, Crawler) またはタイヤを回転させて自力走行し、掘削用バケット (Digging Bucket) などの作業機 (Work Equipment) を、旋回する上部ボディ (Rotating Upper Body) を回転させて掘削作業を行う車両である。その走行および掘削用の装置は高圧の油圧ポンプ (Hydraulic Pump, 21 – 45 MPa) で駆動され、作業者は複数の油圧パイロットバルブ (Hydraulic Pilot Valves) を介して高圧のメインバルブ (Hydraulic Main Valve) を動かして、これらの複雑な操作を行う。ハイブリッド油圧ショベルは旋回油圧モータ (Hydraulic Swing Motor) だけを電気モータに交換した方式が多い。建設機械の駆動方式には多くの種類があるが、近年の油圧ショベル以外の機種では、油圧によるハイドロスタティック・トランスミッション (HST) 式の駆動系が主流となっている。大型機種に多い機械式の変速装置には、マニュアル式のパワーシフト・トランスミッションとこれを自動化した自動変速機があり、さらに自動変速機に油圧モータを組み込んだハイドロリック・メカニカルトランスミッション (HMT) がある。自動変速機、パワーシフト・トランスミッションあるいは HMT の構造は類似しており、使用する潤滑油類も同じである。

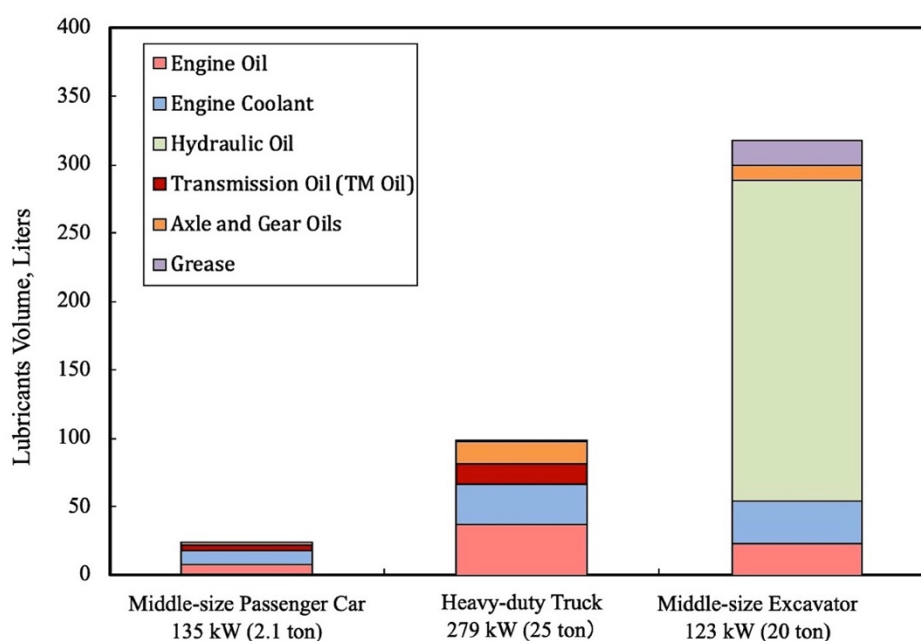


図 1-7 建設機械と自動車の潤滑油類の容量比較 文献[36]-[38]に基づき作成

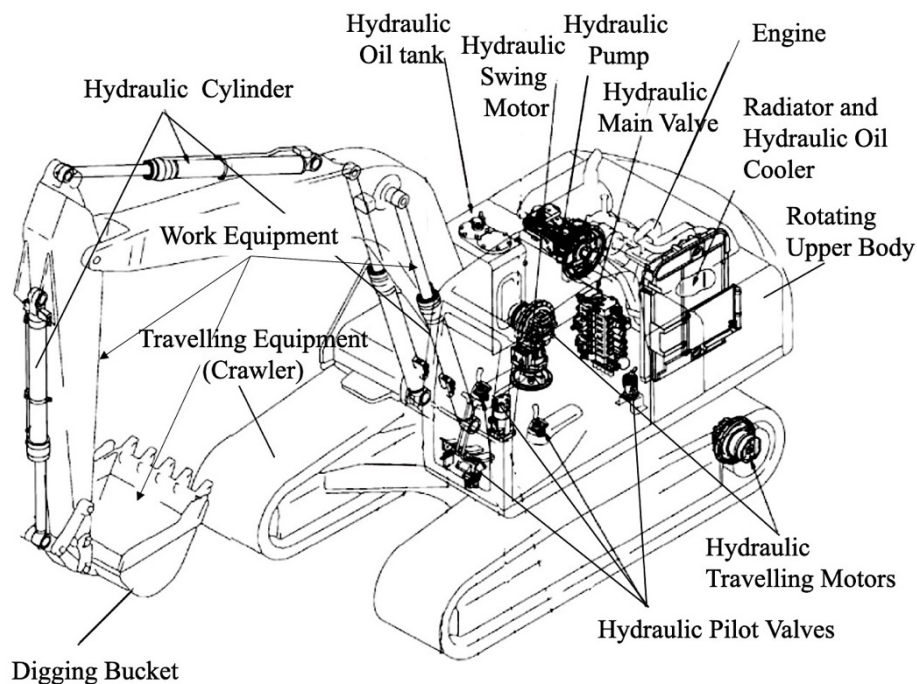


図 1-8 代表的な建設機械の外観と油圧機器の配置 文献[11]より転載

1.7 潤滑油技術者が対象とすべき故障

潤滑油類により発生する建設機械のリスクは、前述のように苛酷な使用条件で低品質の潤滑油類が使用されることによりエンジン、油圧システム、変速装置、冷却システム、作業機、走行装置などのコンポーネントとシステムが様々な故障を起こす。このような潤滑油類が起因する故障あるいは環境汚染を洗い出すと、図 1-9 のようなシステムとコンポーネント (Components of Construction Machinery) が対象となる。エンジンと油圧システムに潤滑油類に起因する故障は多いが、変速装置 (Transmission)、湿式ブレーキ (Wet Brake)、作業機 (Work Equipment) と冷却システム (Cooling System) などの故障も少なくはない。走行装置 (クローラ) は土砂による摩擦耗などが課題であるが潤滑油類に起因する故障は少ない。また、潤滑油類の漏れ (Leak)、あるいは潤滑油類用の消耗部品 (フィルタ、ホース、シール) の投棄 (Disposal) または焼却 (Burning) により自然環境 (Natural Environment) に悪影響を与える場合がある。油圧ホースの破損により高圧の作動油が噴霧されると建設機械の火災事故にもつながる。

潤滑油技術者はこれらのコンポーネントを故障させない高品質の潤滑油類を開発し、低品質の潤滑油類でも故障しない部品を開発することが使命である。そのためには故障のメカニズムを解析して対策方法を導き出すことが重要であるが、故障に対する潤滑油類の問題点を見付けて故障に至るメカニズムを解明することは、従来は潤滑油技術者だけがなし得ることであっ

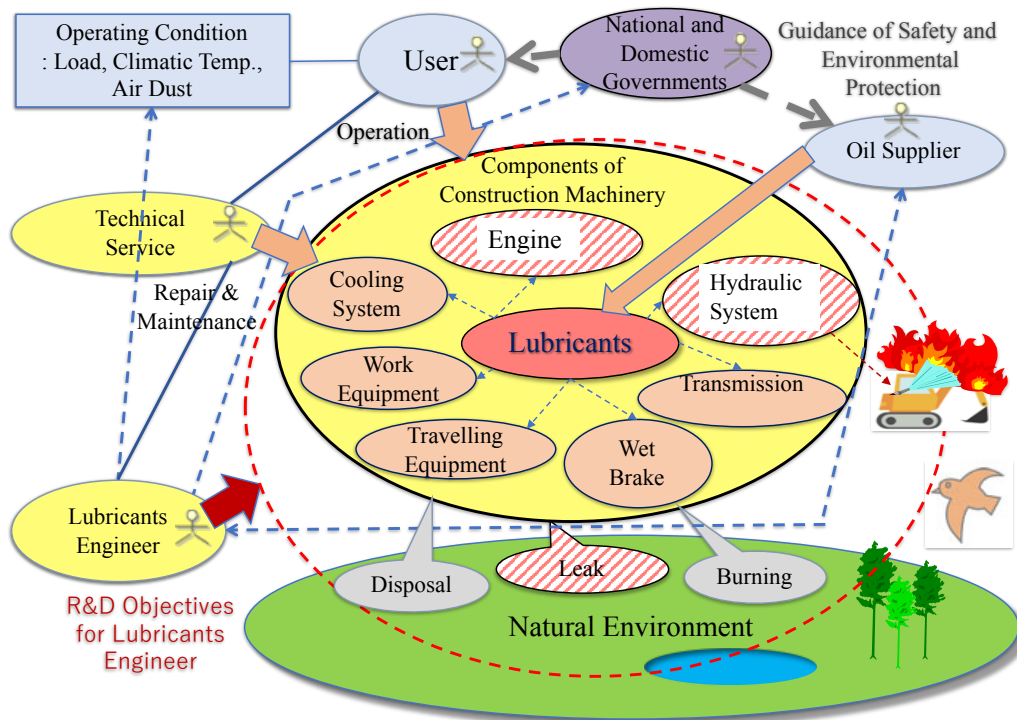


図 1-9 潤滑油技術者が対象とすべき故障(斜線部が本論文で取扱う項目)

た。例えば変速装置の歯車の異常摩耗故あるいは冷却システムの腐食故障などでは、金属材料技術者と設計者だけで対策にあたる場合が多いが、著者はこれらの問題が潤滑油類に起因する故障であった例を多く経験している。

近年は自然環境への悪影響を最小化することも強く要求されている。潤滑油技術者は、技術サービス員(Technical Service)を通じて世界のユーザの運転条件(Operating Condition)あるいは品質要求を知り、世界の中央・地方政府(National and Domestic Government)の安全と環境への要求(Guidance of Safety and Environment Protection)を把握して、現地の潤滑油販売者および石油メーカー(Oil Supplier)とも情報交換を行う必要がある。著者は今まで潤滑油技術者として、潤滑油類に起因する故障についても他の専門技術者と共同で対策およびコンポーネントの改良を図ってきた。建設機械の火災対策についても、著者は水を含む不燃性の作動油を使用できる油圧ショベルの開発も行っている[39]。

1.8 潤滑油類の具備すべき品質

建設機械用の潤滑油類の具備すべき品質について、表 1-2 にまとめる。各潤滑油類において重要な品質を◎印、その他具備すべき品質を○印で示す。

建設機械用エンジンは、高負荷で使用されるためエンジン油に具備されるべき品質として、ピストンリングの固着を防ぐ洗浄能力(Detergency、以下清浄性)が重要になる。これは燃焼で

表 1-2 建設機械用潤滑油類の具備すべき品質の一覧

(◎:特に重要な品質、○:必要な品質)

No.	Type	Necessary Properties	Low Temp. Fluidity	High Viscosity in High Temp	Detergency	Dispersancy	Anti-oxidation	Anticorrosion	Antiwear	Antiscuffing	Proper Friction Coefficient	Rubber Compatibility	Ignition Property (Cetane Number)	Other Properties
1	Engine Oil	○	○	◎	○	○	○	○			○			No adverse effect to emission treatment device
2	Fuel	○									○	◎		No adverse effect to emission
3	Coolant					○	◎				○			No adverse effect to environment
4	Hydraulic Oil	○			○	○	○	◎		○	○			(Bio-Oil : No adverse effect to emission)
5	TM Oil	○	○		○	○	○	○	○	◎	○			
6	Axle and Gear Oils	○	○			○		○	◎	○	○			
7	Grease	○	○			○		○	◎		○			(Bio-Grease : No adverse effect to emission)

生じるすすと油に溶けない酸化縮重合物[11](以下ラッカー)を洗浄して溶かす能力である。低温でのすす・ラッカーの洗浄能力(Dispersancy、以下分散性)、酸化防止性(Anti-oxidation)、摩耗防止(Antiwear)、銅合金への腐食防止性(Anticorrosion)も具備すべき品質である。近年は排出ガス後処理装置に有害な添加剤の削減(No adverse effect to emission treatment device)が必要となっている。

燃料は着火性(Ignition Property, Cetane Number:セタン価)が最も重要な品質であるが、排出ガス規制による低硫黄化も要求されている[40]。欧州ではバイオディーゼルが普及しているが品質の問題もあり、開発途上国ではダストが混入する問題もある。燃料品質はユーザが自由に選択できないため、建設機械メーカーは燃料の使用マニュアルあるいは建設機械の改良などを行なっている。著者らは工場充填用に独自燃料も開発している[41]。

不凍液(Coolant)は、自動車用の JIS 品質規格 [42] があるが、建設機械用としては防食性能が不足するため、建設機械専用の不凍液が開発されている。不凍液は河川に排出されることがあるため、自然環境を汚染しない(No adverse effect to environment)腐食防止剤(Anti-corrosion)を用いた不凍液を著者らは開発している[43]。近年は環境に有害な鉛を用いないアルミニウム製ラジエータが使用されているため[4]、アルミニウム防食性(Anticorrosion)が重要であり、酸化安定性も具備すべき品質である[44]。

作動油は、低圧(14MPa 以下)の産業用の品質規格があるが、高圧(21~41MPa)の建設機械用には適していないため、著者らは日本建設機械施工協会にて規格を作っている[45]。作

動油の品質は、油圧ポンプ焼付きと摩耗の防止性 (Antiwear) が必要な品質である。環境汚染を防ぐための生分解性作動油 (Bio-Oil: No adverse effect to emission)、あるいは火災を防ぐ難燃性作動油なども、ユーザは建設機械に使用するが、いずれも品質は十分でない[46]。

変速装置では、大トルクの伝達が必要なためトランスミッション油 (TM Oil、以下 TM 油) は、自動車用の自動変速機油 (ATF) とは品質が異なる。具備すべき TM 油の品質は摩擦係数 (Proper Friction Coefficient) が重要であり[47]、焼付きと摩耗防止性 (Antiwear) も必要である。アクスル油とギヤ油は、歯車への焼付きと摩耗防止性 (Antiwear) が最も重要であり、リミテッド・スリップ・ディファレンシャル (Limited Slip Differential: LSD) [48]の摩擦係数も重要である。

グリース (Grease) はリチウム石鹼など増ちょう剤を用いて潤滑油を半固体化したものである。建設機械用グリースでは焼付きと摩耗防止性 (Antiwear) が最も必要な品質である。自動車用グリースは JIS 規格[49]にあるが、建設機械ではより幅広い用途に使用されるため、著者らは日本建設機械施工協会にて建設機械用グリース規格を作っている[50]。また、建設機械専用の高性能グリースも開発している[51]。

ゴム膨潤防止性 (Rubber Compatibility) と、低温時の流動性 (Low Temperature Fluidity) は全潤滑油類に必要な品質である。今後は、CO₂ 削減のための品質も具備すべき品質になる。

1.9 本論文の課題設定と目的

本論文は、過去の潤滑油類に起因する建設機械の駆動システムの故障の解析と対策結果に注目して、従来の経験的な取り組みでは解明できなかった故障原因の究明ならびに、未対策の問題について、新たにシステムズエンジニアリングのアプローチからこれらの故障の原因究明と対策が可能となることを示すものである。具体的にはシステムズエンジニアリング [5][6][7]を用いて、エンジンと油圧システムからなる駆動システムの基本アーキテクチャを理解した上で、故障のメカニズムを解明し、対策を体系化することを目的としている。

建設機械は苛酷な使用条件で使われるために、潤滑油、燃料、不凍液、グリース (以下潤滑油類と呼ぶ) の品質は駆動システムの耐久性に与える影響が大きい。市場では低品質の潤滑油類が建設機械に使われて故障を起こすことも多い。特に近年、欧州では建設機械に使用される潤滑油類に対しても環境負荷の低減が求められている。生分解性作動油は、建設機械からこぼれても自然に分解して炭酸ガスと水になるので環境汚染を防止できるが、環境規制のため有効な添加剤を配合できずに潤滑油類としては低品質となる。この結果、建設機械の駆動システムの故障を起こすことがあり、建設機械メーカーはユーザから故障の対策を求められている。

潤滑油類に関する研究および開発に携わるエンジニアの業務の中で故障の解析と対策が占める割合は大きい。故障の対策は網羅的に実施する必要があるものの、その効率性は必ずしも高くなく、潤滑油類を起因とする故障メカニズムが未解明のまま残ることもある。このため、

潤滑油類が流れる駆動システム全体を把握した上で故障の解析と対策を実施するシステムズエンジニアリングのアプローチが有効になると考えられる。すでに、システムモデルを用いたシステムズエンジニアリング[52][53]がエンジンの開発[54]に用いられているが、故障への解析と対策に用いるのは初めてである。

本論文では、具体的には建設機械の駆動システムであるエンジンと油圧システムの故障を取り上げる。エンジンでは低品質のエンジン油による焼付き故障、冷却水シールの漏れ故障そしてクランクシャフト用オイルシールの漏れ故障であり、過去行なったメカニズム解析と対策についてシステムズエンジニアリングのアプローチから再考して論じる。油圧システムでは未解決である生分解性作動油による作動不良の問題についてシステムズエンジニアリングを用いた新しい解析と対策について論じる。

1.10 本論文の構成

本論文は以下の6章で構成される。本論文の全体像を図1-10(16頁)に示す。

第1章「序論」では、建設機械と潤滑油類の歴史と動向について述べ、次いで建設機械の社会的な影響、利害関係者、建設機械の使われ方について論じる。そして建設機械に用いられる潤滑油類の量・種類と建設機械の構造の概略について示し、潤滑油技術者の研究開発の対象を述べる。次いで、本論文の課題設定と目的を述べる。さらに、潤滑油類の具備すべき品質を述べ、本論文の構成を示す。

第2章「潤滑油類が起因となる故障の概要と故障の分類ならびに本論文で取り上げる項目」では、本論文で取り上げるエンジンと油圧システムでの潤滑油類の振る舞いをもとに、潤滑油類が起こしうる故障の部位とその重要度を述べ、本論文の対象とするコンポーネントと部品について述べる。また、潤滑油類の配合成分と品質の関係についても概要を述べる。潤滑油類に起因する故障について、危険源と危険コンテキストの組み合わせによる分類を示した上で、本論文で取り上げる故障解析と対策の項目を分類している。

第3章「建設機械用エンジンの潤滑油類が起因となる故障の対策」では、3.1節は運用ステージでの故障である低品質の米国製エンジン油によるエンジン焼付きの解析と対策について述べ、3.2節は運用ステージでの故障であるエンジンヘッドガスケット用の冷却水シールの漏れ対策についてシステムズエンジニアリングの Decomposition Analysis Resolution (DAR) Process を応用して原因を整理している。これを元に改良したシリコンゴムと水素化 NBR のシールについても述べる。3.3節では開発ステージでの故障であるエンジンのクランクシャフト用オイルシールの漏れ故障の対策について述べる。この章の図表およびデータは、著者が米自動車技術者協会 (Society of Automotive Engineer 以下 SAE) に投稿した学術誌論文[55]-[57]、査読付き国際会議発表[58]、ならびに著者の解説記事[59]-[62]から転載したものである。

第 4 章「生分解性作動油による油圧システムの故障の解析と対策」では欧州で導入された生分解性作動油（以下バイオ油）への運用ステージでの建設機械メーカーのプロジェクトチームによる対応を最初に説明する。対応の内容は暫定対策（以下短期対策）としてバイオ油の使用マニュアルを発行し、恒久対策（以下長期対策）として低品質なバイオ油に適合する油圧システムの機器を改良したことである。しかし、一連の対策後も油圧バルブの作動不良が未解決のまま残り再発も起こっていた。この課題についてシステムズエンジニアリングの視点からシステムモデリング言語である Systems Modeling Language（以下 SysML）による記述に基づく解析と対策について述べる。SysML を用いて油圧システムの基本メカニズムを記述した上で生分解性作動油を起因とする作動不良に至るメカニズムを解明し、作動不良を防止する対策を導き出す。そして、SysML の安全に特化した拡張プロファイル Safety Modeling Language（以下 SafeML）を用いて作動不良コンテキストおよびその対策案を記述して、最も有効な対策を選定できたことを述べる。本章内の図表およびデータは、著者の Synthesiology と SAE の学術誌論文[63][64]-[66]、査読付き国際会議発表[45][46]、国際会議発表[67]ならびに著者の解説記事[68]から転載したものである。

第 5 章「考察」では、建設機械メーカーの従来 of 故障対策の方法について述べ、今後の有力な故障対策となる純正油類を用いたメンテナンスについて論じる。次いで、故障対策のシステムズエンジニアリングのアプローチによる故障解析と対策の結果を論じると共に、これらのシステムズエンジニアリングに基づく故障対策の方法が、一般の機械設備あるいは複雑システムにも役立つ可能性について論じる。

第 6 章「結論」では、本論文全体のまとめを述べるとともに、結論を述べる。巻末には、参考文献、研究業績を参考資料として加え全体の構成とする。

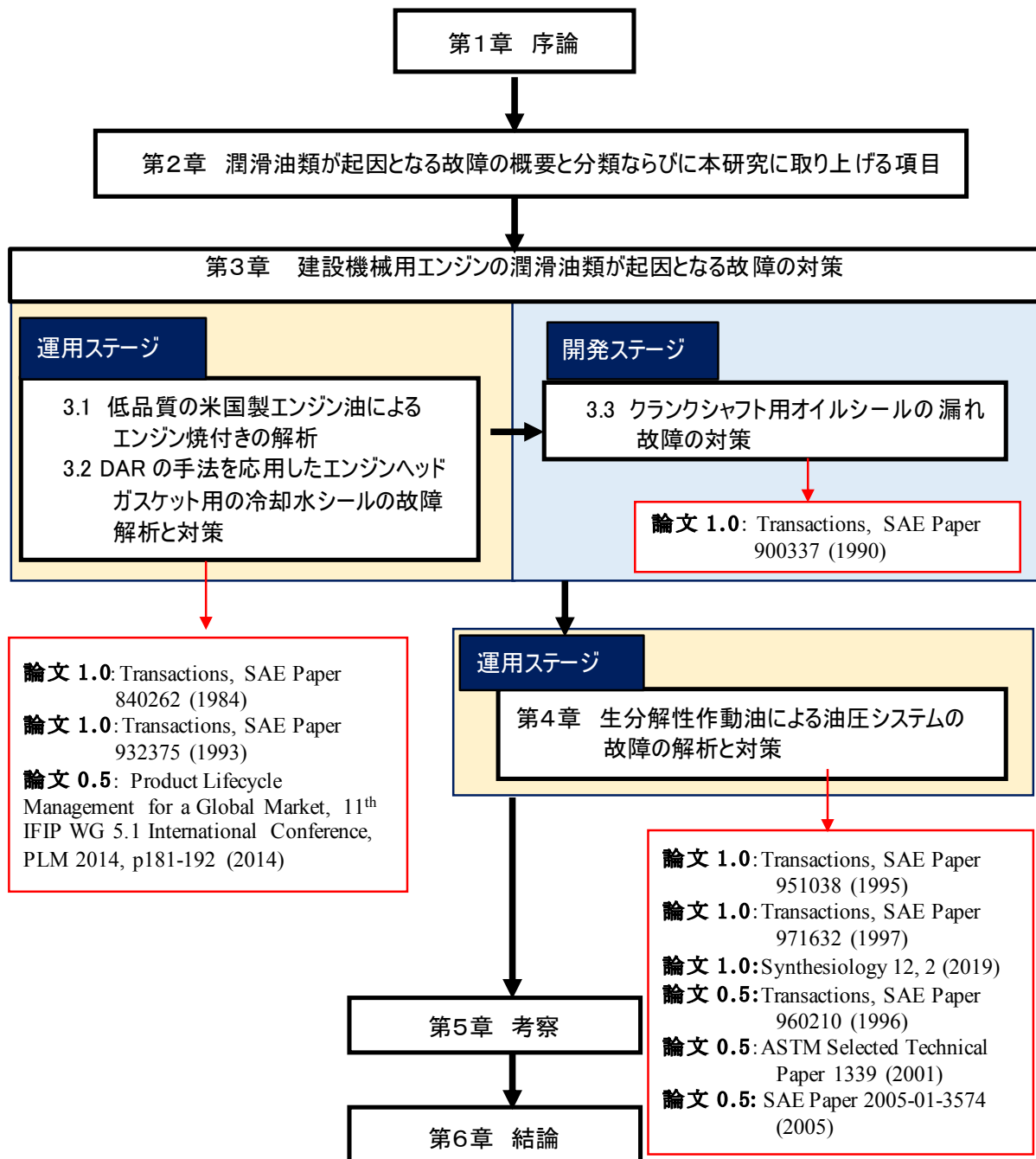


図 1-10 本論文の全体像と各章間の関係

第2章 潤滑油類が起因する故障の概要と分類ならびに本論文に取り上げる項目

建設機械のエンジンと油圧システムからなる駆動システムでの潤滑油類の振る舞いと、これに起因して故障の重要性について述べる。エンジンについては、内部の構造と潤滑油類および熱の流れなどと共に故障が起こる部位を示す。潤滑油類の種類とその成分についても概要を述べ、故障との関係を示す。また、潤滑油類に起因する故障の分類と本論文で取り上げる項目についても述べる。

2.1 建設機械の駆動システムと潤滑油類の振る舞いと構造

近年の建設機械の駆動システムは、前述の油圧ショベル(図 1-8)のようにエンジンと多数の油圧機器から構成される油圧システムとの組み合わせになっている。ここでは、分野横断的でシステムの構造と振る舞いを図的に表現できる SysML (Systems Modeling Language)[52]を用いて駆動システムでの潤滑油類の振る舞いおよびエンジン構造を示す。

駆動システムのアクティビティ図を図 2-1 に示す。SysML 内の表記では、英語を用いる。エンジン(Engine)は発生した出力(Generate Power)を油圧システム(Hydraulic System)に伝える。このエンジン出力により油圧システムが作動して作業装置(Work Component)である掘削装置(Excavate Earth)、旋回装置(Rotate Excavating Direction)と走行装置(Run Machinery)を動かす。油圧システムには、わずかな量であるが外部の空気が出入りするようになっている。掘削装置は図 1-8 の掘削バケットを含む作業機であり、旋回装置により旋回ボディが駆動される。走行装置はクローラのことである。この油圧システムには作動油が使われ、高圧油の圧力は油圧

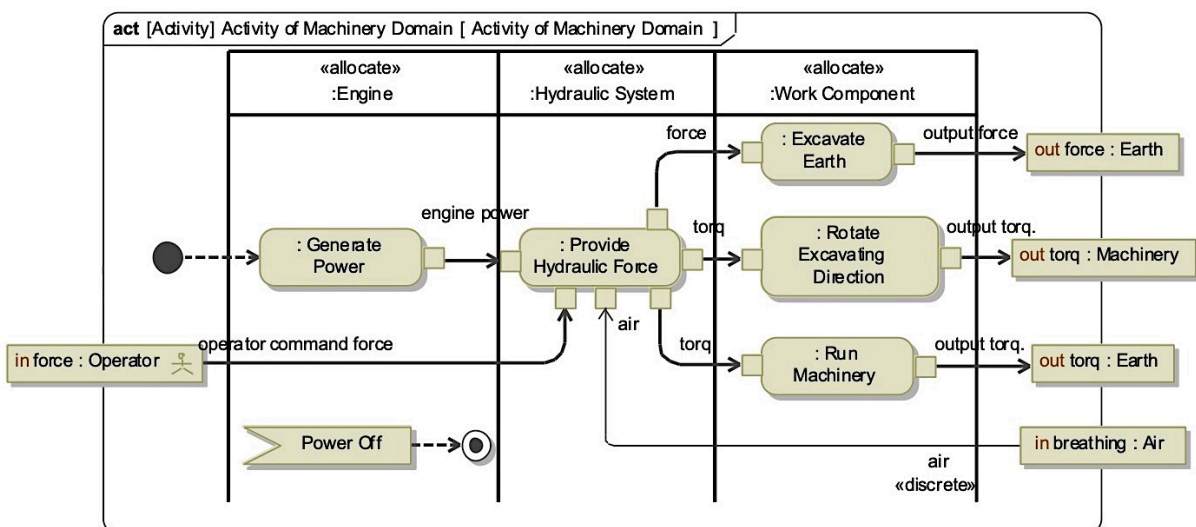


図 2-1 建設機械の駆動システムの振る舞いを表すアクティビティ図

ショベルでは 35 MPa が標準的な値である。オペレータ (Operator) は油圧システムを操作して全ての作業を行う。エンジンを停止する (Power Off) ことにより作業は停止する。油圧システムの詳細については 4 章で後述する。このように近年の建設機械の駆動はエンジンと油圧システムだけで行われるため、エンジンまたは油圧システムが故障すると建設機械は動かなくなる。これらの装置は大きく重いいため大型クレーンを用いた大掛かりな修理が必要となる。

エンジンについてはエンジン油 (以下本章では EO とする) 以外に燃料、排出ガス、熱、不凍液の振る舞いが故障に大きく影響する。図 2-2 の内部ブロック図を用いて以下に仕組みを説明する。エンジン内部を、エンジン油の供給アッセンブリ (Oil Feed Assembly)、エンジンブロック (Engine Block Assembly)、パワー発生アッセンブリ (Power Production Assembly)、シリンダライナアッセンブリ (Cylinder Liner Assembly)、クランクシャフトアッセンブリ (Crankshaft Assembly)、動弁機構・シリンダヘッドアッセンブリ (Valve Train and Cylinder Head Assembly) の 6 つのアッセンブリならびにヘッドガスケット部品 (Head Gasket Parts) に分ける。黄色の線で示す燃料 (Fuel) は、動弁機構・シリンダヘッドアッセンブリの燃料噴射サブアッシ (Fuel Injection Subass'y) からパワー発生アッセンブリ中のピストン (Piston Parts) に噴霧されて燃焼する。黒線で示す燃焼による力 (Power) はパワー発生アッセンブリから出て、クランクシャフト軸 (Reciprocation to Rotation Conversion Parts) に伝えられる。ここで往復運動から回転運度に変えられて外部にエンジン出力 (Engine Power) として伝えられる。燃焼で発生した排出ガスはヘッドガスケットにより密封されて排気バルブを通して外部へ排出される。一部の燃料は完全に燃えずに EO 中に入らずとして混入する。燃焼で発生した熱はピストンリングを通じてシリンダライナにより冷却される。ピストンとピストンリングは燃焼の熱で高温になり、EO の酸化劣化によるラッカーが付着する。これは本論文で取り上げる故障の原因となる。動弁機構・シリンダヘッドはシリンダヘッドの冷却水路 (Cylinder Head Coolant Gallery) で冷却される。不凍液は最初にエンジンオイルクーラ (Cooling Oil Subass'y) で EO を冷却した後、シリンダブロック内の冷却水路 (Coolant Gallery) を通ってシリンダライナの外周部を冷却する。その後、ヘッドガスケットの水シールを經由してシリンダヘッドを冷却水路で冷却した後に、エンジン外部のラジエータに至る。ヘッドガスケットは高温・高圧の燃焼ガス、不凍液と EO を密封する重要な役割を持っている。本論文では、この部品の故障を取り上げている。

EO はエンジン油の供給アッセンブリ内のオイルパン (oil pan: Reserve Oil Subass'y) からオイル圧送サブアッシ (pump: Pumping Oil Subass'y) により送り出され、エンジンオイルクーラで冷却され、オイルフィルタ (filter: Dust Eliminating Subass'y) では、すすと摩耗粉がろ過される。その後、EO はエンジンブロック内の油通路 (Oil Gallery) から、主にクランクシャフトの軸受 (Bearing Metal Parts) を潤滑すると同時に、パワー発生アッセンブリ内のコンロッド (Conrod Subass'y) を經由してピストンに噴射されて、これを冷却する。クランクシャフト先端と後端にある

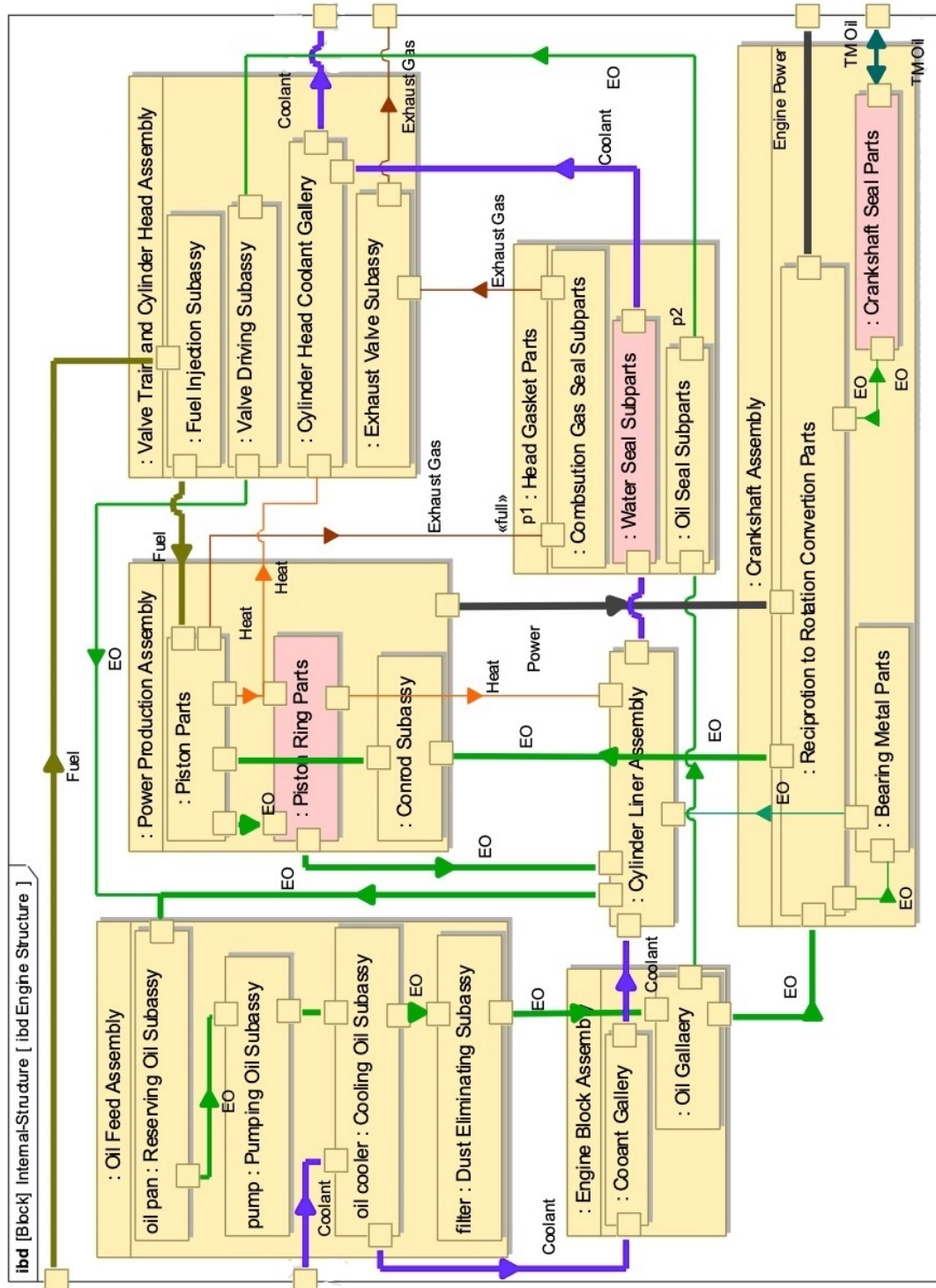


図 2-2 エンジンの構造と仕組みを表す内部ブロック図

クランクシャフトシール(Crankshaft Seal Parts)はエンジン内の EO を密封している。クランクシャフトの後端部はエンジン出力を外部に取り出すため直径が大きくなり、これに対応してシールの内径も大きくなり密封が難しい。機種によっては変速装置側の TM 油もこのクランクシャフトシールで EO と同時に密封されることを要求されるために、技術的な困難さが一層高い。また、シールクランクシャフトシールの耐久性には EO の品質も影響している。本論文ではクランクシャフトシールの故障を取り上げている。

ピストンに噴射された EO は、ピストンリングとシリンダライナを潤滑してオイルパンに戻る。シリンダライナには燃料の不完全燃焼により生じたすすが付着しており、ピストンリングに掻き落とされて EO に混入する。エンジンプロック内で EO の一部は、ヘッドガスケットの油シール(Oil Seal Subparts)を経由して排気バルブなどを駆動する動弁機構(Valve Driving Subassy)を潤滑した後、オイルパンに戻る。

本論文で取り上げるエンジンの故障は、内部ブロック図中に桃色に着色した(1)高温にさらされるピストンリング、(2)燃焼ガス、EO と不凍液を同時にシールするヘッドガスケットの水シール、そして(3)クランクシャフト後端のクランクシャフトシールに生じたものである。いずれも複雑な使用条件と、耐久性の要となる部品である。

2.2 潤滑油類の種類と配合成分が及ぼす故障への影響

本論文で取り上げる故障に影響する潤滑油類(Lubricants)について、配合成分を図 2-3 のブロック定義図を用いて示す。ここでは、潤滑油類中の石油系潤滑油(Lubricating Oil)、生分解性作動油(Bio-Hydraulic Oil、以下バイオ油)と不凍液(Antifreeze Coolant)について述べる。石油系には表 1-2 に示したように多くの種類があるが、EO と作動油で代表される石油系潤滑油は石油の基油(Petroleum Base Oil)と数種類の添加剤(Additives)が配合されている。添加剤は、1.8 節で前述したように酸化防止剤(Anti-oxidant)、摩耗防止剤(Antiwear)、腐食防止剤(Cu Corrosion Inhibitor)、清浄剤(Detergent)、分散剤(Dispersant)、粘度調整剤(Viscosity Modifier)ならびに消泡剤(Antifoam)である。エンジン油は全ての添加剤が配合されるが、特に清浄剤の配合量とその種類が最も重要である。低品質のエンジン油は清浄性の配合が少ないためにエンジン故障を起こすことが多い。近年の排出ガス対策用のエンジンに対しては、後処理装置への悪影響を抑えるために、EO の清浄剤の配合量を減らす必要が生じている。また、後処理装置の影響で、酸化防止剤の種類の見直しが必要となっている。

石油系の作動油には酸化防止剤と摩耗防止剤が中心の配合となり、清浄剤あるいは分散剤は用いられない。低品質な作動油は摩耗防止性が劣っていることが多い。先進国では知られていないが基油自体の品質も問題であり、発展途上国で作られた精製不良の基油により油圧

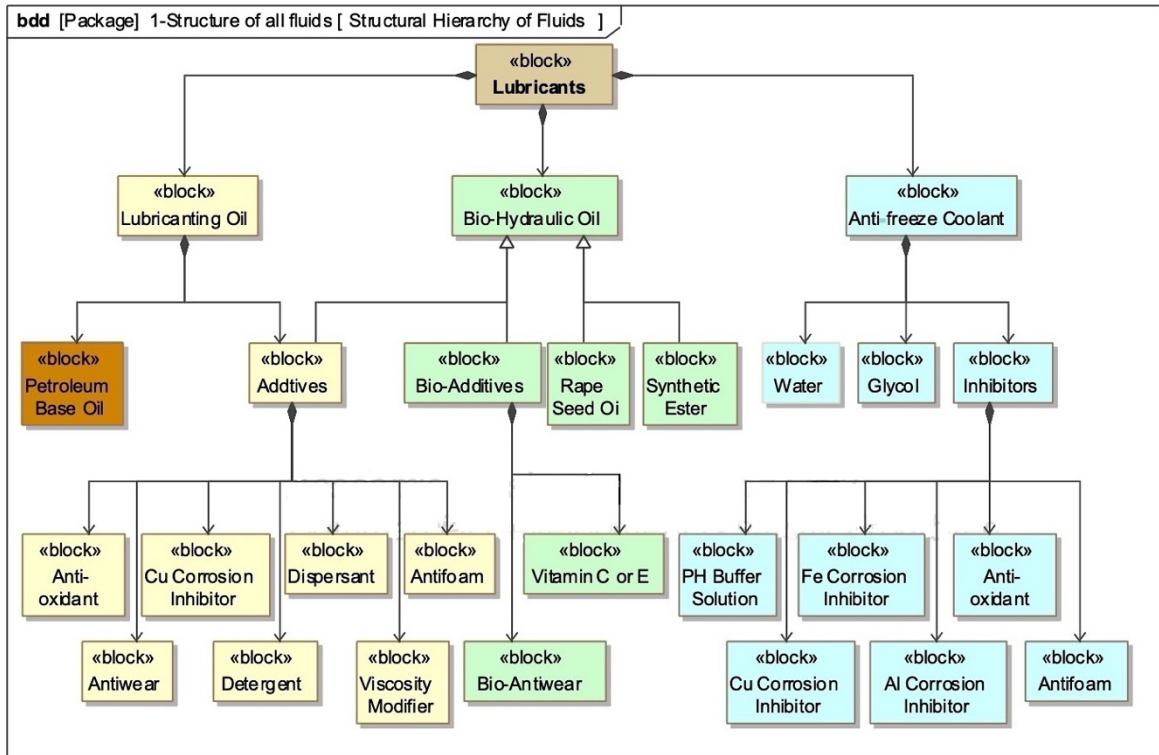


図 2-3 潤滑油類の配合成分を表すブロック定義図

システムのオイルシールの漏れ故障が生じたケースもある。

バイオ油は菜種油 (Rape Seed Oil) か合成エステル油 (Synthetic Ester) が基油として用いられ、添加剤には環境毒性がないように少量の酸化防止剤、摩耗防止剤および銅合金の防食剤が配合される[69]。菜種油は酸化しやすい欠点があるが、これに環境毒性がない添加剤 (Bio-Additives) としてビタミン C あるいは E (Vitamin C or E)、あるいはバイオ油専用の摩耗防止剤 (Bio-Antiwear) を配合して用いられた例もある。建設機械の使用条件では、このような菜種油系のバイオ油は劣化が著しいため使用されなくなっている。合成エステルの基油は多様な種類があり、菜種油よりは酸化安定性が良いものの、添加剤の配合量が石油系作動油の半分以下と少ないために石油系作動油に比べると品質は低い。また、合成エステルの基油はゴムを膨潤させやすく、摩擦係数も過剰に低くなる欠点がある。このためバイオ油は酸化防止性、腐食防止性、摩耗防止性、摩擦係数、ゴム膨潤防止性などの全ての品質が低い[64]-[68]。しかし、ユーザからは建設機械が自然環境に悪影響を及ぼさないように、低品質であってもバイオ油を積極的に建設機械に用いることがユーザから要望されている。

不凍液 (Antifreeze Coolant) は、使用時に水 (Water) を 40~70% の主成分として、水の凍結を防ぐグリコール (Glycol) を加えている。防食用の添加剤 (Inhibitor) として pH を弱アルカリ性に保つ緩衝液 (pH Buffer Solution)、銅用の防食剤 (Cu Corrosion Inhibitor)、鉄の防食剤 (Fe

Corrosion Inhibitor)、アルミニウムの防食剤 (Al Corrosion Inhibitor)、酸化防止剤 (Anti-Oxidant)と消泡剤 (Antifoam)などが配合されている[70]。水が主成分のため不凍液の粘度は作動油粘度の 1/15 (80°C)と低く、潤滑性もないためシールは難しい。

2.3 潤滑油類に起因する故障の分類

ISO/IEC GUIDE 51:2014[71]によれば、図 2-4 に示すとおり、危害(Harm)は、危険源または危険(Hazard)のみで生じるものではなく、何らかの危険コンテキスト(Hazardous Context)が重なって生じる。建設機械の潤滑油類に起因する故障を、建設機械への危害(Harm)とする場合については、故障にいたる際の危険と危険コンテキストを次の二種類に分類することができる。

- 故障分類 I: 建設機械の駆動システム内に新しい設計を導入したことにより、標準的な潤滑油類の品質の限界を超えて使用するケースが生じ、これが危険コンテキストとなり、駆動システム内に故障が生じる。
- 故障分類 II: 低品質の潤滑油類を用いることが危険源となり、駆動システムが仕様通りに動作することが危険コンテキストとなって駆動システム内に故障を生じる。

ここで、潤滑油類の標準的な品質とは各々の建設機械メーカーが市場の潤滑油類の調査をもとに規定しているものであり、市場には低品質な潤滑油類が存在する。

故障分類 I で生ずる故障は、本来は新しい設計を導入する開発ステージで行われる検証あるいは妥当性確認の中で故障することが認識され、対策されるべきである。ただし、開発期間が長引くことを避けるためには、故障の早急な原因解明と対策が必要である。故障分類 I の実例は、3.2 節の冷却水シールの故障、3.3 節のクランクシャフトシールの故障である。冷却水シールの故障は開発ステージで発見されずに運用ステージの故障になった例である。一方、クランクシャフトシールの故障は開発に遅れをきたしたものの、開発中に対策が可能になり運用ステージでの故障を生じなかった例である。

故障分類 II は、運用ステージで、低品質の潤滑油類を用いることにより生ずる故障であり、この結果、建設機械のユーザは作業の停止を余儀なくされ大きな被害を被る。メーカー側はユーザ



図 2-4 危険コンテキストと危害の関係

に純正部品としての潤滑油類(以下純正油類)の使用を推奨しているが海外では十分な供給体制がなく、市販の比較的品質の高い潤滑油類を指定するものの安価で入手しやすい低品質の潤滑油類が使用されて、対策費用の負担が発生することとなる。市場にある多様な品質の潤滑油類が用いられる限りは故障分類 II の故障を完全に防ぐのは困難である。この実例は 3.1 節の低品質エンジン油による焼付き故障、4 章のバイオ油による油圧システムの故障である。故障分類 II は建設機械で最も多く発生する潤滑油類に起因する故障である。

2.4 本論文研究で取り上げる故障と対策の項目

3 章および 4 章では、建設機械の駆動システムの要であるエンジンと油圧システムの故障対策を取り上げる。表 2-1 に、3.1~3.3 節(Section)および 4 章(Chap.)のそれぞれについて、駆動システム、パーツ、故障分類、従来あるいは標準的な駆動システム内の使用での故障発生(Failure in Previous or Usual Driving System)の有無、危険、主たる危険コンテキスト(Major Hazardous Context)をまとめて示している。

エンジンの故障については、複雑な使用条件と耐久性のキーとなるピストンリング(Piston Ring)、ヘッドガスケットの冷却水シール(Head Gasket Coolant Seal)とクランクシャフト用オイルシール(Crankshaft Seal)、油圧システムについては油圧バルブ(Hydraulic Valves)を示す。故障分類 I では前述のとおり、3.2 節「ヘッドガスケットの冷却水シール」と 3.3 節「クランクシャフト用オイルシール」である。故障分類 I では、用いられる潤滑油類は標準的な品質性能(Coolant Original Properties: Low Viscosity and Low Lubricity、または Typical Oil-film Thickness of Genuine EO)有するため、従来あるいは標準的な駆動システムで使用されても、故障は発生しない(No Failure)。しかしながら、新しい設計の導入によりシール周辺の変位の増加(To Increase Displacement Surrounding Seal)あるいは速度の増加(To Increase Oil Seal Speed)など

表 2-1 本論文で取り上げる部品の故障と対策の故障分類

Chap. & Section	Driving System	Parts	Failure Classification	Failure in Previous or Usual Driving System	Hazard	Major Hazardous Context
3.1	Engine	Piston Ring	II	Fail	Low Quality (Detergency) of EO	To Deposit Lacquer to Piston Ring Groove
3.2		Head Gasket Coolant Seal	I	No Failure	Coolant Original Properties: Low Viscosity and Low Lubricity	To Increase Displacement Surrounding Seal
3.3		Crankshaft Seal	I	No Failure	Typical Oil-film Thickness of Genuine EO	To Increased Oil Seal Speed
4	Hydraulic System	Hydraulic Valves	II	Fail	Low Anti-Oxidation Performance of Bio-oil	To Generate Lacquer

危険コンテキストの存在により、潤滑油類の品質性能の限界を超えて故障を起こす。

故障分類Ⅱは前述のとおり、3.1節「エンジンのピストンリング」と4章「油圧システムの油圧バルブ」である。危険源となる低品質な潤滑油類は、従来あるいは標準的な駆動システムで故障を起こす。低品質なエンジン油 (Low Quality (Detergency) of EO) は、エンジンのピストンリング溝にラッカー付着を起こし (To Deposit Lacquer to Piston Ring Groove)、これが危険コンテキストを生じ、低酸化防止性のバイオ油 (Low Anti-Oxidation Performance of BO) はラッカーを生じ (To Generate Lacquer)、これが危険コンテキストとなり、油圧システムに故障を生じる。

第3章 建設機械用エンジンの潤滑油類が起因となる故障の対策

本章では運用ステージで生じた2件のエンジンの故障と、開発ステージで生じた1件のエンジンの故障について述べる。

3.1 低品質の米国製エンジン油によるエンジン焼付きの解析

建設機械メーカーは国内およびシベリアで使用実績のある大型ブルドーザを、1980年前後から米国に出荷を始めた。出荷したブルドーザは、ディーゼルエンジン(以下エンジン)のピストンとシリンダが焼き付く故障(以下エンジン焼付き)を起こしたが、エンジン焼付きの原因は容易に解析できなかった。そのため、建設機械メーカーはエンジンの使用実態解析チーム、設計対策チーム、焼付き防止対策チームならびに燃料・潤滑油チームのプロジェクトチームを結成して原因究明と対策を行なった。

著者らは燃料・潤滑油チームとして、初めに米国のエンジン油を収集して品質性状を調査したが、エンジン焼付きとの関係は何も得られていなかった。ただし、エンジン焼付きを起こしたエンジンの一部にピストンリング固着が生じたことがわかったため、エンジン油の清浄性について先行研究を調べた[59]。ピストンリングの固着を防止する清浄剤は早い時期に開発[72]されている。エンジン油の清浄性は、エンジン試験を用いた評価試験[73]が現在も一般的である。Hsu[74]は上記のエンジンを用いた清浄性の評価試験をシミュレートする机上試験をいくつか示して、図3-1-1の初期のホットチューブテストが使用されることを述べている。ホットチューブテストは、ガラス管(Glass Capillary Tube)内に少量(0.3 ml/hour)のエンジン油をポンプ(Oil from Syringe Pump)で圧送し、空気で押し上げて排出する。16時間の試験後に、ガラス管を加

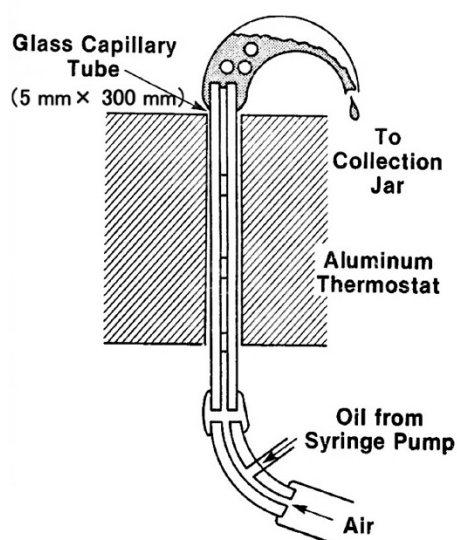


図3-1-1 初期のホットチューブテスト 文献[74]より転載

熱したアルミニウムブロックから取り出して、溶剤で洗浄した後にラッカーの付着を評価する。ガラス管の温度は 277°Cとすることで、エンジン試験のピストンリング周りのラッカー付着をシミュレートできるとされる。ただし、ホットチューブテストとエンジン試験の結果は公表されていない[74]。著者らは他の机上試験を試みた上で、ホットチューブテストでのエンジン油と空気との振る舞いが、エンジン内での状態に近いと考え、この机上試験機を製作してエンジン油とエンジン焼付きの関係を調べることにした。本論文の本節については、SAE にて論文発表して学術誌[55]に掲載されている。

本節では、エンジン焼付きのホットチューブテストを用いた原因の解析と対策について述べる。次いで、エンジンに関するシステムモデルを用いて、ホットチューブテストが評価するエンジン油の品質について再考する。品質の異なるエンジン油中でのピストンリングの振る舞いを理解することで、エンジン焼付きに至るメカニズムを検討できることを述べる。

3.1.1 米国でのエンジン焼付きの調査と解析

(1) エンジン焼付きの要因の調査

上記プロジェクトチームは、エンジン焼付きの原因となりうる利害関係者 (Stakeholders) が関係する要因 (Possible Factors for Engine Scuffing) について調査を行なった (表 3-1-1)。ユーザのメンテナンス (Maintenance) について調べた結果は、冷却水補給 (Coolant Level)、ラジエータなど機械の洗浄 (Machinery Washing)、あるいはオイル交換時間の遵守 (Oil Change Interval) は概ね適切に行われている (Adequacy)。ただし、全調査車両の内 28% のユーザがエンジン出力を調整して過負荷運転 (Overloaded) をしている。ユーザでの建設機械の運転条件 (Operating Conditions) に関しては、酷暑 (Hot Climatic Condition) あるいは砂塵が舞う状態

表 3-1-1 エンジン焼付きの要因についての調査結果の一覧表

No.	Stakeholders	Possible Factors for Engine Scuffing	Investigating Result	
1	Users	Maintenance	Coolant Level	Adequacy
2			Machinery Washing	Adequacy
3			Oil Change Interval	Adequacy
4		Operating Load		Overloaded (28% User)
5		Operating Conditions	Hot Climatic Condition	The Same Conditions as Japan
6			Dusty Condition	
7			Rocky Ground	
8			Steep Ground	
9	Oil Suppliers	Fuel Qualities	Good	
10		Engine Oil Qualities	To Be Investigated	
11	Machinery Service	Maintenance/Repair	Several Faults	

(Dusty Condition)ではなく、地形条件としても岩盤地(Use in Rocky Ground)または急傾斜地(Operate instep Ground)も少なく、使用実績のある国内とほぼ同じである(The Same Conditions as Japan)。現地石油メーカ(Oil Suppliers)がユーザに供給している燃料について、24 サンプルを分析したが品質は良好(Good)であった。しかし、エンジン油については日本のエンジン油の品質性状が大きく異なる銘柄があり、それらの品質(Engine Oil Qualities)を調査する必要がある(To Be Investigated)。サービス員(Machinery Service)の整備(Maintenance/Repair)は数件の整備不良が現地調査で見ついている。したがって、エンジン焼付きに関係する要因は、エンジン油品質、過負荷運転と整備不良の三つに絞られる。

(2) エンジン分解調査

図 3-1-2 は米国にて発生したエンジン焼付きを生じたエンジンの分解調査例である。右端(No.1007)は正常に稼働したエンジンで、ピストンとシリンダの表面に損傷はなく摩耗も少ない。本エンジンのピストンには4本のピストンリングがある。左4台のエンジンが焼付を起こしている。いずれもピストンとシリンダ(Cylinder Liner)に焼付きによる縦傷(Scuffing)が発生しており、シリンダとリングの摩耗が著しく大きい(Liner and Ring Wear)。焼き付いた4台のうち、左端のエンジン(No. 1132)ピストンは焼付きによる過熱で割れている(Piston Crack)。このうちエンジン2台

Criteria	Scuffing				No-Trouble
	Free	Free	Sticking	Sticking	Free
2nd Ring	Free	Free	Sticking	Sticking	Free
Engine	1132	1074	1083	1016	1007
Cylinder	#6	#6	#4	#2	#3
Oil	R	N	T	O	E
Cylinder Liner	—				
Piston					
Ring Wear mm	1st	0.78	0.88	0.69	0.07
	2nd	1.43	0.65	0.90	0.01
	Oil	0.21	—	0.21	0.06
	Skirt	0.11	0.10	0.11	0.11

図 3-1-2 米国で焼き付いたブルドーザ用エンジンの分解調査結果

(No.1083, No.1016)では、2番目のピストンリング(2nd Ring、以下セカンドリング)が固着(Sticking)していて、セカンドリングの摩耗も最上部のピストンリング(1st Ring、以下トップリング)よりも多いことが、従来のエンジン焼付きでは見られない特徴である。

(3) エンジン油品質の影響解析

エンジン油品質の影響を調べるために、エンジン油の銘柄をエンジン焼付きが発生しなかったグループ(Engine Oil Brands without Scuffing)と、発生したグループ(Engine Oil Brands Caused Scuffing)に分けて表にしたのが表 3-1-2 である。エンジン油の銘柄 A~J までは 25 台のエンジン中でエンジン焼付きは 2 例(Engine 1100, 1125)だけであり、表中のその他の問題(Other Problems)に示すように燃料インジェクタの故障(Failure of Fuel Injector)または修理ミス(Wrong assembly, Maladjustment of valve)が原因と推定される。これに対して銘柄 K~S までの 21 台中は 16 件(76%)に焼付きが生じているおり、エンジン油の品質が焼付きに大きく関係していると推定される。また、セカンドリングの固着(Ring Stick)は銘柄 A~J までは皆無に対して、銘柄 K~S では 9 件(43%)も発生している。銘柄 T と U は建設機械メーカーが推奨していない軽負荷エンジン用の銘柄(CC グレード)であったので、エンジン焼付きが生じる可能性は大きい。これらの解析結果からエンジン油の品質がエンジン焼付きに関係していると判断できる。使用実態解析チームが注目した過負荷運転(Overload)は、エンジン焼付きのない銘柄グループと発生したグループ双方にあるために影響は明確でない。

上記のエンジン油銘柄グループ間の添加剤組成を分析して比較した例を図 3-1-3 に示す。○印で示す塩基価(Total Base Number、以下 TBN)[75]は、ピストンに付着したすすを洗浄する作用(清浄性)を持つ添加剤の量の指標となる。●印で示す硫酸灰分(Sulfated Ash、以下 SA)[76]はカルシウム、亜鉛などの金属を含む添加剤の量の指標であり、ともに配合された添加剤の過不足の判定の参考に用いる。焼付きを生じない銘柄(No Scuff Oil) A~J と P ならびに U、焼付きが多発した銘柄(Scuffed Oil) K~S (P を除く)と T について、TBN と SA を比較すると後者の TBN がやや低いが決定的な差はない。

そこで、前述のホットチューブテストを参考として、多数のエンジン油を正確に評価できるように、ガラス管の上下の均熱域とそれぞれのガラス管温度が± 0.5 °C以内になるよう試験機を製作した。試験条件は前述の通りで、加熱したガラス管中に入ったエンジン油は、空気により圧送されて液滴になりガラス管内を数回上下して外部に排出される。著者らが開発したのは、図 3-1-4 のように試験温度を変えて、エンジン油の清浄性の限界温度を調べる方法である[59]。この試験では、加熱したガラス管内部に付着するラッカーの量を色見本により評価し、所定の色の濃さ(Rating 6)になる温度を限界温度とする。すなわち限界温度はエンジン油が持つ清浄性の耐熱性であり、限界温度(以下耐熱性)を超えるとラッカーは洗浄されずにガラス管に多量に付着する。各エンジン油銘柄の耐熱性(Critical Temperature)とエンジン焼付きの発生との関

表 3-1-2 エンジン油の銘柄によるエンジン焼付きの整理

Oil	Engine#	Hours	Scuff	Ring Sticks#	Overload	Other Problems
A	1059	2591	No	No	No	
B	1100	4235	#3,4,5,6	No	No	Failure of Fuel Injector
	1284	>3000	No	No	-	
C	1184	2258	No	No	Yes	Wrong assembly
	1126	2306	No	No	Yes	
	1253	>3000	No	No	No	
	1009	>3000	No	No	-	
	1125	3104	Yes	No	No	
D	1261	1431	No	No	-	
E	1246	1993	No	No	Yes	
	1154	2897	No	No	No	
	1007	2129	No	No	No	
F	1280	624	No	No	No	
	1034	>3000	No	No	-	
G	1063	>3000	No	No	-	
	1097	3041	No	No	-	
H	1131	2356	No	No	-	
	1004	>3000	No	No	No	
I	1018	2009	No	No	-	
	1239	1555	No	No	No	
	1093	3445	No	No	No	
	1124	3636	No	No	-	
	1116	313	No	No	Yes	
J	1010	>3000	No	No	-	
	1266	1947	No	No	No	
K	1076	>3000	No	No	No	Maladjustment of valve
	1090	2483	#2	Yes	No	
	1231	2490	#3,6	No	No	
	1145	2286	#1,6	Yes	Yes	
	1250	2026	Yes	No	No	
	1185	1439	#5	Yes	No	
	1263	3898	Yes	Yes	No	
L	1001	1351	#5	Yes	No	
	1040	>3000	No	No	No	
M	1105	818	#1	No	Yes	
		2500	#6	Yes	No	
	1213	2526	No	No	Yes	
N	1074	1787	#3,4,6	No	Yes	
O	1016	2128	#2	No	No	
	1030	3343	#5	Yes	Yes	
P	1129	3634	No	No	No	
Q	1073	3910	#3,5	Yes	Yes	
R	1153	1445	Yes	No	Yes	
	1071	4204	Yes	No	No	
	1132	1219	#6	Yes	Yes	
S	1142	570	Yes	No	Yes	
T(CC)	1083	1909	#4,5	Yes	No	
U(CC)	1291	>3000	No	No	-	

↑ Engine Oil Brands without Scuffing
↓ Engine Oil Brands Caused Scuffing

係を図 3-1-5 に示す。耐熱性が 280℃以上のエンジン油銘柄はエンジン焼付きを生じていないが、280℃未満の銘柄では、銘柄 P を除いて全てエンジン焼付きを生じている。この結果からエンジン油の耐熱性不足がこのエンジンの焼付き原因であると考えられた。日本の市販エンジン油の耐熱性は 280～320℃の間にあり、米国製エンジン油の品質は全く異なっていることも明らかになった。米国製エンジン油の耐熱性が日本製に比べ低いことは日米双方で全く認識されておらずエンジン焼付きによる故障は予測できなかった。米国製エンジン油はガソリンエンジ

ンとディーゼルエンジンに共用可能に設計されているため、ディーゼルエンジン用としての清浄性は犠牲になっている。近年でも一部の米国ディーゼルエンジン油はガソリンエンジン共用であり、未だに耐熱性は低い銘柄がある。

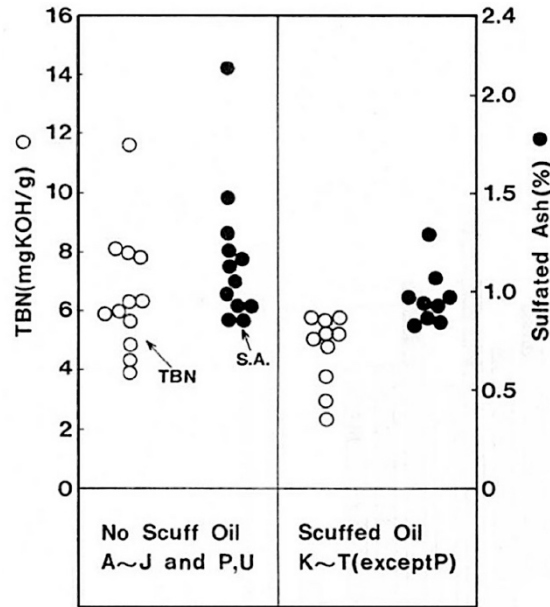


図 3-1-3 焼付きを生じないエンジン油と生じるエンジン油間の塩基価 TBN(○)と硫酸灰分 SA(●)の比較

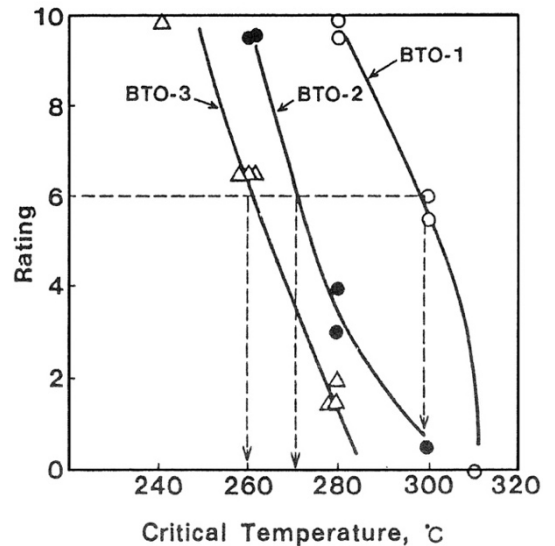
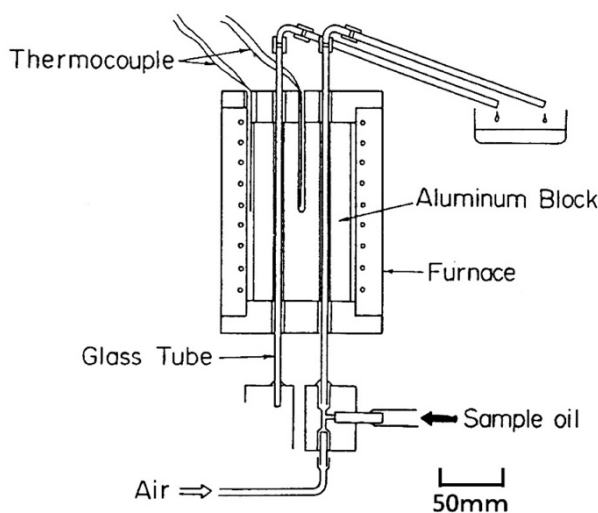
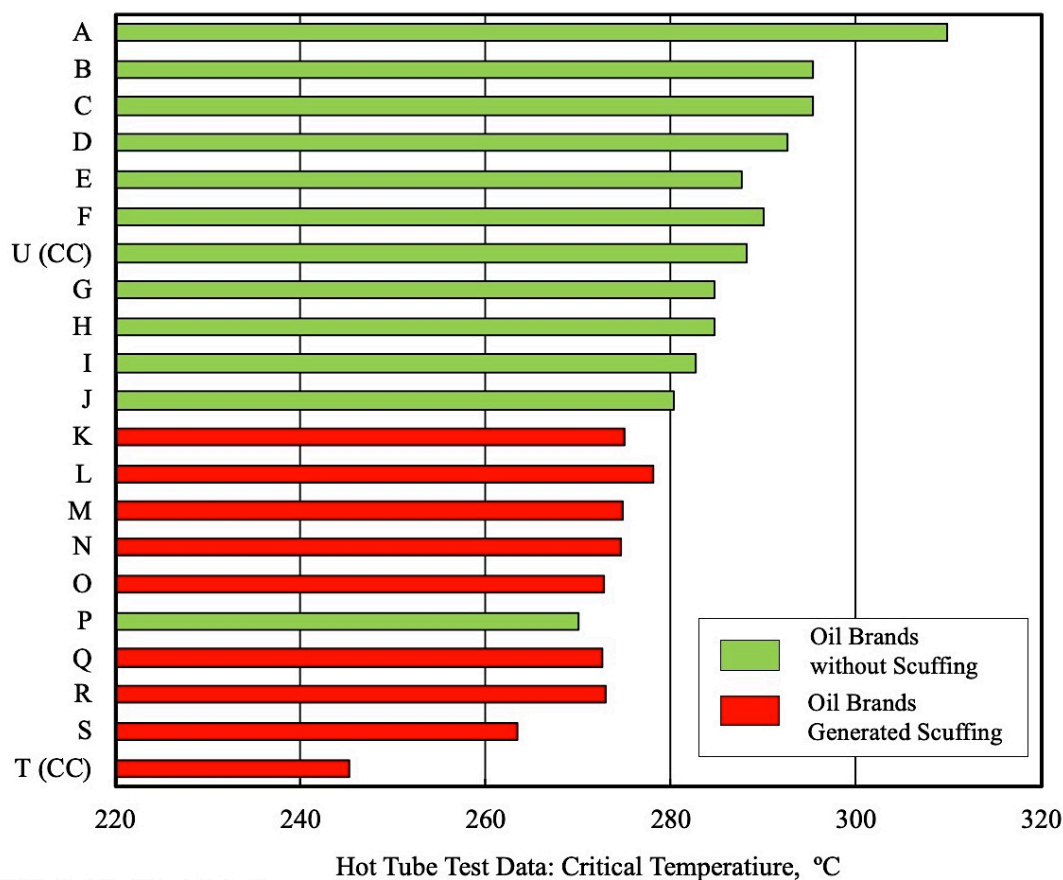


図 3-1-4 ホットチューブテストの模式図と限界温度(耐熱性)の決定方法
(試験条件:油量 0.3 ml/hr, 空気量 10 ml/min. 試験時間 16 hrs)



*(CC): EO for Light-duty Use

図 3-1-5 ホットチューブテストにより求めた各エンジン油銘柄の耐熱性 (Critical Temperature) とエンジン焼き付きの関係

3.1.2 ホットチューブテストにより評価したエンジン油の耐熱限界の検証

エンジン油の耐熱性不足がエンジン焼き付きの原因であることを検証するために、3種類の耐熱性の異なるエンジン油で6回の台上エンジン試験を行った(図 3-1-6)。供試油は純正エンジン油(BTO-1)、軽負荷用の市販エンジン油(BTO-2)、最も耐熱性の低い米国エンジン油(銘柄 S、BTO-3)の3種類である。それぞれの耐熱性は 300°C、270°Cと 260°Cである。BTO-1 は過負荷の条件(Overload)で500時間異常なく動いた。BTO-2 は過負荷条件で150~200時間で6気筒中3気筒のエンジン焼き付きと、セカンドリングの固着が発生した。これに対して米国エンジン油 BTO-3 は過負荷条件の1回目の試験ではわずか7時間でエンジンが焼き付き、2回目の過負荷条件の試験では32時間で焼き付きが発生した。標準の負荷条件(S.T.D. Load)でも80時間でエンジン焼き付きが生じたが、燃料がエンジン油に混入する問題(Fuel Dilution in EO)を見つけたので2回目の試験を行った。その結果250時間で4気筒分のセカンドリングが固着

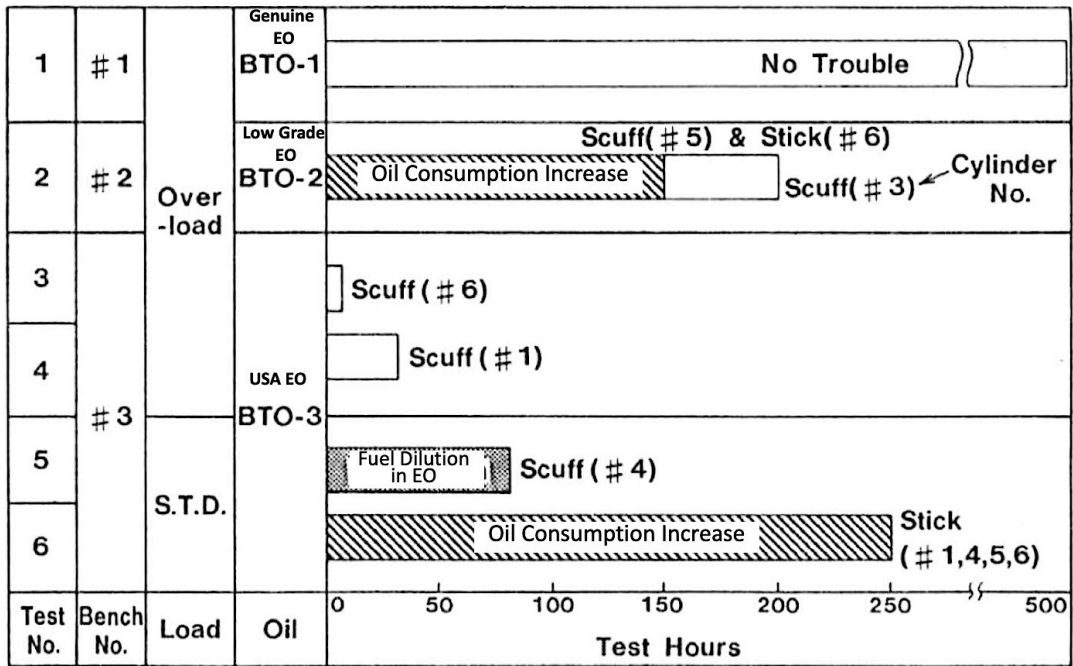


図 3-1-6 三種類のエンジン油についての台上エンジン試験の結果

してオイル消費 (Oil Consumption Increase) が異常に増加する結果となった。台上エンジン試験によりホットチューブテストを用いたエンジン油の耐熱性の評価方法とその結果の検証ができた。

3.1.3 システムズエンジニアリングを用いたエンジン焼付きのメカニズムと対策についての再考

前表 3-1-1 のように市場でエンジン焼付きを生じたエンジン中の 40% にセカンドリング固着が生じており、台上エンジン試験でもセカンドリングの固着が見られた。通常は 1 段目のピストンリング (以下トップリング) の摩耗が多いのが普通であるが [77]、ピストンリング摩耗 (Ring Wear) の engine 1074 と 1016 はセカンドリングの方が摩耗は多い。図 3-1-7 は従来エンジンに用いたピストンリングの種類と過負荷運転時の温度を示す模式図である。トップリングはリング溝中に入り込むラッカーとスーツを排除する作用 (Discharge Lacquer and soot) を持つキーストン形 (Keystone Top Ring) [11][78] であり、285 °C の条件でも固着または焼付きは生じない。セカンドリングは 228 °C と低い、ラッカーが付着 (Deposit Lacquer with Soot) しやすいレクタアンギュラ形 (Rectangular Ring) [11] である。このためエンジン焼付きの原因はラッカーによるセカンドリング固着であると推定しているが、ここでシステムズエンジニアリングを用いて再考を行う。

セカンドリングを固着させるラッカーの生成とその付着のメカニズムについて、システムモデルを用いて検討する。ピストンとシリンダライナー周りでのエンジン油の SysML の状態遷移を図 3-1-8 に示す。ディーゼルエンジン中では燃焼ガス (Combustion Gas、温度 500°C 以上) により、

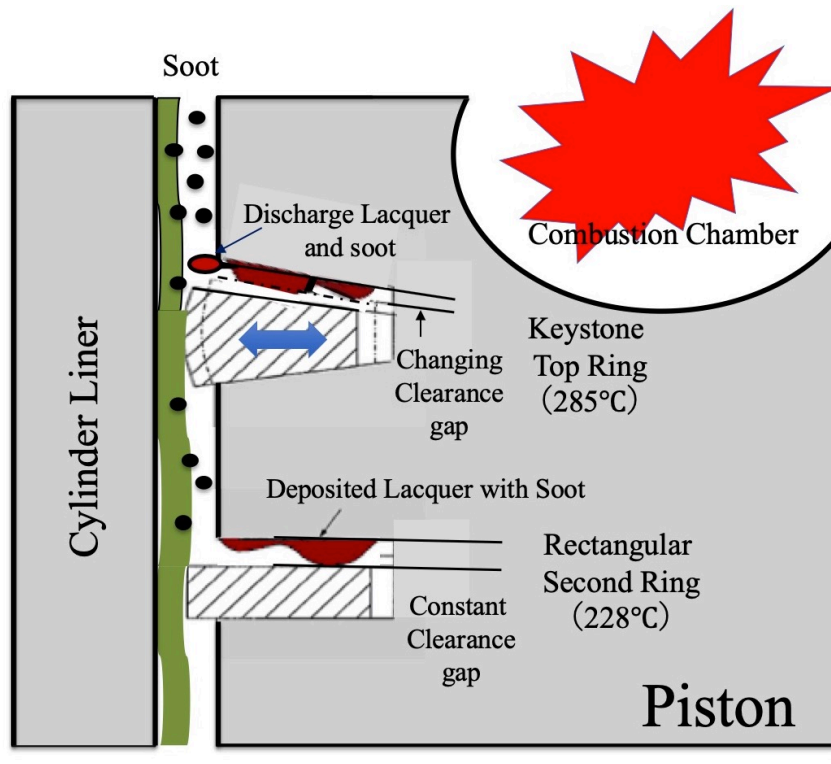


図 3-1-7 従来エンジンでのピストンリングの種類と過負荷運転時のピストンリング溝温度

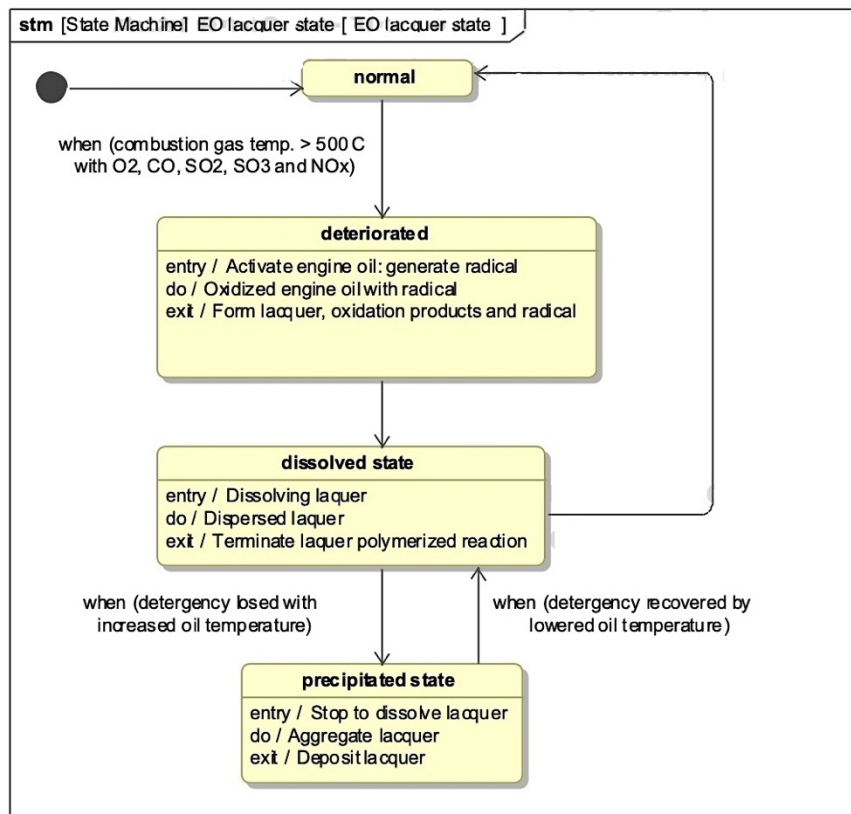
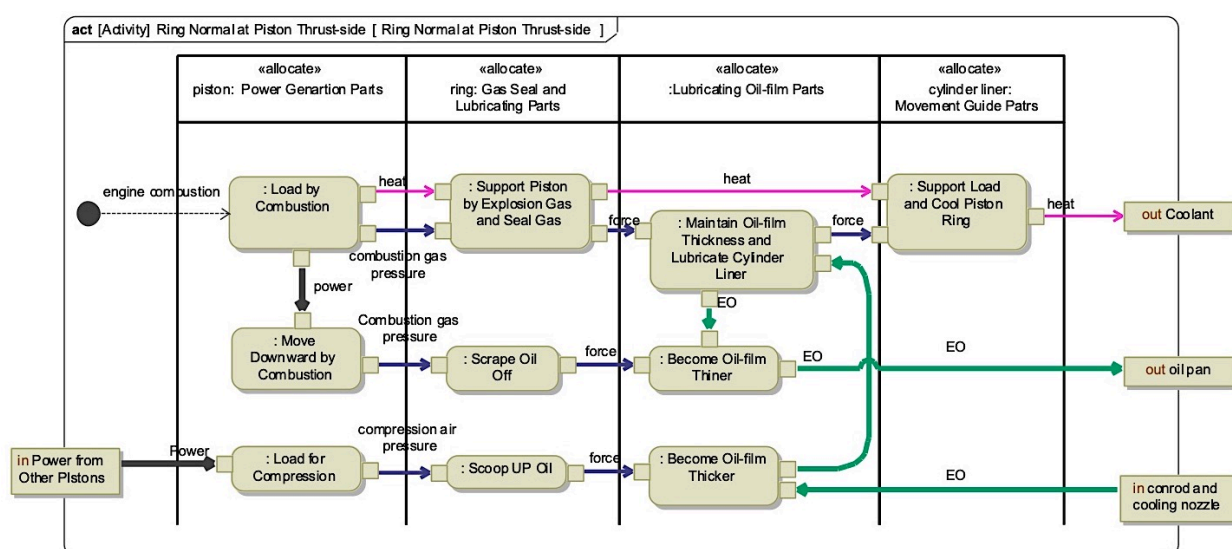


図 3-1-8 エンジンのピストンとシリンダ周辺でのエンジン油の状態遷移を表す状態機械図

エンジン油はリシリンダライナ表面で加熱され、燃焼ガス中に含まれる酸素(O₂)、一酸化炭素(CO)、二酸化硫黄(SO₂)、三酸化硫黄(SO₃)あるいは窒素酸化物(NO_x)により酸化されてラッカーが生成する劣化状態(deteriorated)となる。ここで、エンジン油の清浄性が作用している状態ではラッカーはエンジン油中に溶解した状態(dissolved state)となり、ラッカーは分散され(dispersed lacquer)、それ以上の高分子になることも防がれて(terminate polymerization of lacquer)、正常な状態(normal state)と見なされる。エンジン油の耐熱性を越える温度になって、清浄性が失われた場合(When (detergency loosed with increased oil temperature))ではラッカーはピストンとピストンリング溝などに付着する沈殿状態(precipitated state)となる。この状態で、ラッカーはピストンリング溝に付着してリング固着を起こすことになる。ピストンなどに付着したラッカーは再びエンジン油に溶解することはないが、エンジン油中に残ったラッカーは油温が下がると再びエンジン油に溶解する(When (detergency recovered with lowered oil temperature))。ホットチューブテストは様々な酸化性ガスに対するエンジン油の酸化安定性を評価する訳ではなく、エンジン油のラッカーを溶解する清浄性だけを評価していることが、この状態機械図から明確になる。一酸化炭素、二酸化硫黄あるいは窒素酸化物を使用せずに、空気だけでエンジン油を酸化させるホットチューブテストが、実際のリング固着とこれにより引き起こされるエンジン焼付きと一致する結果が得られる根拠でもある。すなわち、エンジン油の焼付きを防ぐ性能は、酸化によるラッカー生成を抑制する品質(酸化安定性)よりも、ラッカーを溶かす品質(清浄性)が重要である。

図 3-1-9 は、耐熱性の高いエンジン油を使用した場合の、燃焼と圧縮行程でのピストンリングの振る舞いのアクティビティ図である。エンジンが燃焼してピストン(piston: Power Generation



(負荷が高いピストンのスラスト側での燃焼時と圧縮時の状態を示す)

Parts)に負荷が掛かる(Load by Combustion)と、ピストンリング(ring: Gas Seal and Lubricating Parts)には燃焼によるガス圧の荷重が掛かる。この荷重はエンジン油の油膜により支えられ、燃焼のガスは密封される(Support Piston and Seal Gas)。荷重はシリンダライナ(cylinder liner: Movement Guide Parts)で受け止められ(Support Load and Cool Piston Ring)、燃焼の熱(heat)の一部は油膜を介してシリンダライナにより冷却される。燃焼によりピストンは下方に移動し(Move Downward by Combustion)、シリンダライナ表面のエンジン油は掻き落とされる(Scarpe Oil)。このため油膜はオイルパン(oil pan)に流れて薄くなる(Become Oil-film Thinner)。次に、別の気筒の力によりピストンは圧縮行程(Load for Compression)に入り、エンジン油は掻き揚げられて(Scoop UP Oil)油膜は厚くなる(Become Oil-film Thicker)。これにより油膜は厚さを保持されてシリンダライナーを潤滑する(Maintain Oil-film Thickness and Lubricate Cylinder Liner)。

図 3-1-10 は耐熱性の低いエンジン油が使用された場合のアクティビティ図である。油膜中に酸化によるラッカーの沈殿物が生成する(Produce Lacquer)が、高温ではラッカーを溶解する清浄性が無くなるためにピストンリングの溝に入り込んで(Enter Lacquer)沈殿し付着する。キー

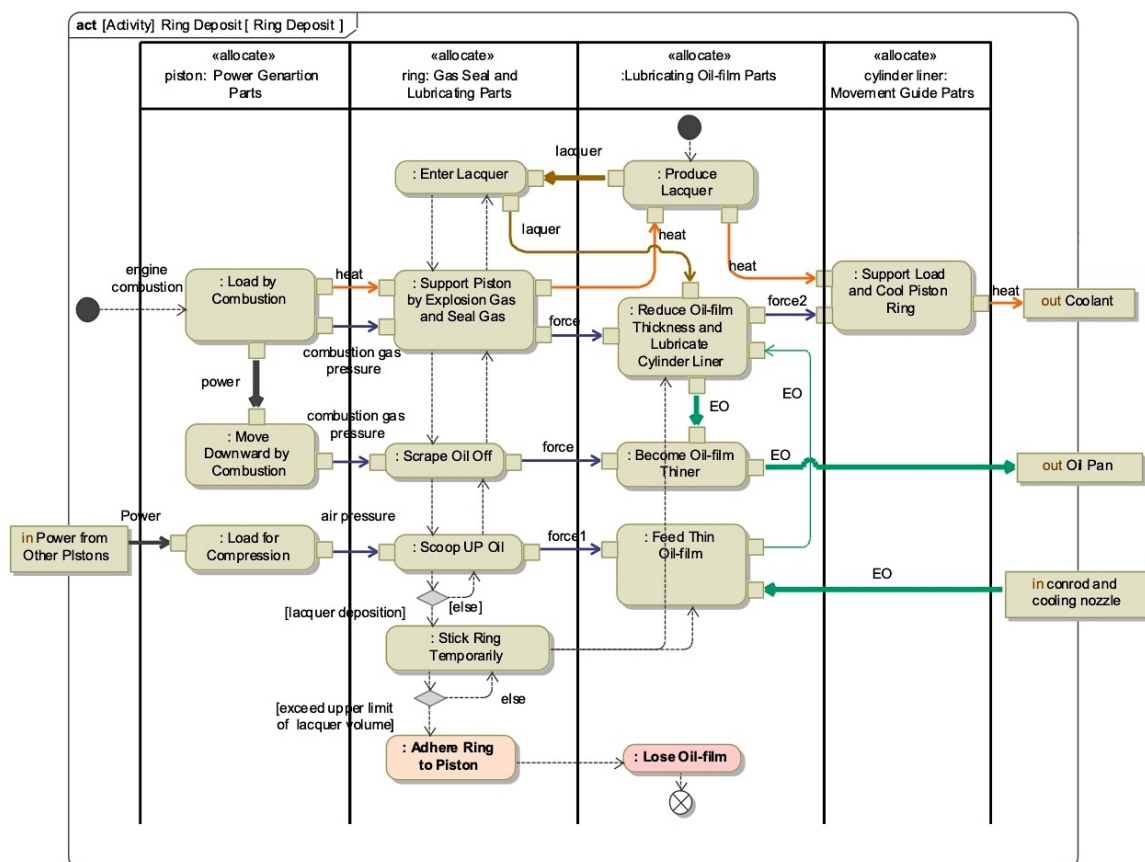


図 3-1-10 耐熱性の低いエンジン油でのピストンリングの振る舞いを表すアクティビティ図

ストンリング形のピストンリングであればラッカーは剥ぎ取られて油膜中に排出される。レクタアンギュラ形ピストンリングはラッカーが時間とともに沈殿して堆積 (lacquer deposition) し、ピストンリングとリング溝の間に一時的な接着 (Stick Ring Temporarily) が起こり、圧縮行程でのピストンリングによるエンジン油の掻き上げ量が減って油膜の厚さが一時的に薄くなる (Reduce Oil-film Thickness and Lubricates Cylinder Liner) と共に、ガスのシールも不安定になる。これによりオイル消費が増えたり、油温と冷却水温度が変動するようになる。ラッカーの量が一定値を超える (exceed upper volume limit of deposit lacquer) と、ピストンリングとピストンの固着 (Adhere Ring to Piston) が起こり、油膜が形成されない (Lose Oil-film) ようになって焼付きに至る。

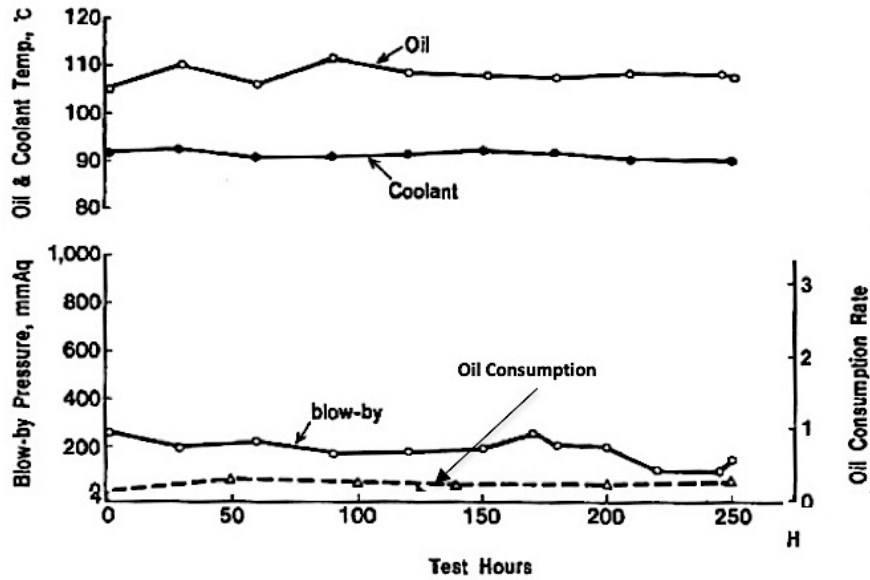
3.1.4 エンジンの焼付きに対する改良

耐熱性の低いエンジン油が用いられても焼付きを起こさないように、改良エンジンではキーストーン形ピストンリングが採用された。妥当性確認のために、著者は米国エンジン油 BTO-3 を取り寄せて、この改良エンジンを過負荷条件での 250 時間の台上エンジン試験を行なった。この試験で改良エンジンが焼付きを起こさずに運転できることを確認した (図 3-1-11)。これに対して、従来エンジンではエンジン焼付き前にも油温あるいは冷却水温度が変動すること、オイル消費が増えている。この理由は前述のアクティビティ図の記述のように、ピストンリングとリング溝の一時的な接着が起こることで、油膜厚さが変動してピストンリングからシリンダライナへの熱の伝導が不安定になるためと説明できる。油膜厚さの変動は、オイル消費の増加にも関係がある。

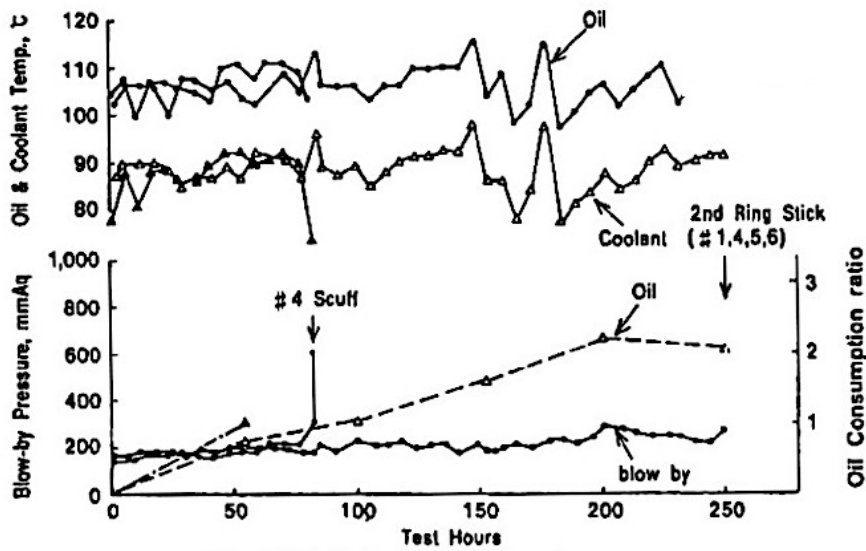
改良エンジンに載せ替えたブルドーザは、米国始め世界の市場でエンジン焼付きを起こすことなく使用されている。近年の新しいエンジン開発においても、改良エンジンと同じピストンリングの設計と、著者が規格化した低品質エンジン油を用いたエンジン試験方法が採用されている。純正部品としてのエンジン油 (以下純正エンジン油) は、ホットチューブテストで 300°C 以上の耐熱性であったので、これを純正エンジン油の規格とした。ただし、近年は清浄剤がエンジン排出ガスの後処理装置に悪影響を与えるために清浄剤の配合量を減らしているが、純正エンジン油の必要最小限の耐熱性は維持している。

3.1.5 ホットチューブテストの自動車工業会エンジン油規格への採用

近年、排出ガス規制の進展に伴って触媒とディーゼルパーティキュレートフィルタ (以下 DPF) に対するエンジン油の悪影響を避けるため、添加剤配合を減らす動向があるために清浄性が低下することが自動車メーカーでも問題となっている [11]。著者は、自動車工業会が石油連盟と共同で日本独自のエンジン油規格 (JASO、以下 JASO EO 規格) を作る機会を利用して、ホット



a) 改良エンジンの過負荷条件の台上試験



b) 従来エンジンの標準条件の2回の台上試験

図 3-1-11 米国製エンジン油 BTO-3 を用いた改良エンジン(過負荷条件)と従来エンジン(標準条件)の台上エンジン試験の状態変化

チューブテストを試験規格に組み入れることにした[79][80]。これに先立ちホットチューブテストは石油学会規格にしている[81]。表 3-1-3 に、この規格への利害関係者(Stakeholders)と規格制定の活動(Establishment of A New JASO Engine Oil (JASO EO) Standard)、規格利用(Utilization of JASO EO Standard)を示す。国内自動車メーカー(Japanese Car Mfr.)と石油メーカー

表 3-1-3 JASO エンジン油規格作りの利害関係者、制定活動ならびに利用方法

No.	Stakeholders		Establishment of A New JASO Engine Oil (JASO EO) Standard			Utilization of JASO EO Standard	
			Providing Tests		Discussing Items		
1	Author		-	Hot Tube Test	-	All	For Genuine EO
2	Japanese Car Mfr.		Engine Tests	-	-		Recommendation to User, For Factory-fill, For Genuine EO
3	Japanese Oil Suppliers		-	-	Oil Tests		Manufacturing JASO EO
4	Japanese Construction Machinery Mfr.		-	-	-	Requirements	Recommendation to User, For Factory-fill, For Genuine EO
5	SAE Asia	USA Car Mfr.	-	-	-		-
6	Committee	Global & Asian Oil Suppliers	-	-	-		Manufacturing JASO EO
7	User		-	-	-	-	Use JASO EO

(Japanese Oil Suppliers)と共に、著者 (Author) は建設機械メーカ (Japanese Construction Machinery Mfr.) の代表として加わり規格の作成に加わっている。著者はホットチューブテスト試験方法 (Hot Tube Test) とそのデータを提供している (Provide Tests)。2001 年の規格発行以降は国内多くの建設機械メーカが新エンジン油規格を採用している[82]。海外への普及に対しては、米国 SAE 燃料・潤滑油部会のアジア委員会 (SAE Asia Committee) での JASO EO 規格の検討 (Discussing Items) を通して、海外のユーザ (User) と石油メーカ (Global & Asian Oil Suppliers) に周知する機会としている。JASO EO 規格の使用方法 (Utilization of JASO EO Standard) は、ユーザへの規格登録エンジン油の推奨、工場充填ならびに純正のエンジン油 (Recommendation to User, For Factory-fill, For Genuine EO) への使用である。

3.1.6 まとめ

本節では、エンジン油の耐熱性を机上で試験する新しい方法として開発したホットチューブテストについて述べた。このテスト方法により、米国でのエンジン焼付き故障が、耐熱の低い米国製エンジン油が原因であることを見出すことができた。改良エンジンへの対策として、セカンドリングをキーストン形に変更し、リング固着により発生するエンジン焼付きを防止した。新設計エンジンの運用ステージでの焼付きを防ぐため、耐熱性の最も低いエンジン油を標準として用いる台上エンジン試験が採用されることになった。

システムズエンジニアリングのアプローチにより、駆動システム全体の振る舞いを理解した上で明らかにした項目は次のとおりである。

- 1) エンジン油のラッカー生成と溶解についての状態遷移を、SysML の状態機械図で記述す

ることにより、次のエンジン油の状態が明らかになった。エンジン内でのエンジン油は、清浄な状態、酸化によりラッカーが生成する劣化状態、清浄剤によりラッカーが溶ける溶解状態とラッカーが付着する沈殿状態の4つに分類できた。エンジン焼付きは沈殿状態で生じるので、この状態に至るエンジン油の温度(耐熱性)が焼付き発生の有無を決める。ホットチューブテストはこの耐熱性を評価している。

- 2) ホットチューブテストは空気だけで酸化しており、エンジンの複雑な酸化をシミュレートしていないとの専門家の議論もある。しかし、沈殿状態になる耐熱性のみを評価しているために、エンジン焼付きとの関係が得られることがわかった。
- 3) ピストンリングの振る舞いを SysML のアクティビティ図を用いて記述することにより、耐熱性の低いエンジン油でのピストンリングのラッカーによる固着に至るメカニズムを推定できた。今後は、アクティビティ図によるピストンリングの振る舞いについて、実験で検証すべきである。

3.2 Decomposition Analysis and Resolution (DAR) Process の手法を応用したエンジン・ヘッドガスケット用の冷却水シールの故障解析と対策

建設機械用の新しい高出力ディーゼルエンジン(以下エンジン)はディーゼル発電機または船舶用エンジンとして先行的に市場導入されたが、冷却水漏れの故障を起こしていた。冷却水はヘッドガスケット中の冷却水シール(以下水シール)から漏れているが、その原因は多岐にわたり複雑であり、漏れメカニズムを明確に解明することができなかった。図 3-2-1 にヘッドガスケットの水シールの構造と、冷却水漏れを起こした水シールの亀裂の状態の例を示す。

水シールまたはゴムの亀裂についての先行研究例はない。ゴム材料の先行研究は、ラジエータホースとシリンダライナ用 O リングシールが対象である。Keller[83]は耐油性のない EPDM に代わる耐水性フッ素ゴム(以下 FKM)あるいは水素化 NBR (HNBR)を開発している。一方で Hertz[84]は不凍液により水素化 NBR は FKM より耐熱性が劣ることを見出しており、同じ水素化 NBR であってもその配合と製造法の違いによって耐熱性が異なることを示している。井上[85]は充填剤中のシリカの種類がシリコンゴムの耐熱性に影響することを報告している。これらの先行研究を参考にして本論文でもシリコンゴムのシリカの影響を検討し、水素化 NBR についても耐熱性の検討をした。著者らはこの水シールの原因解析と対策を行ない、SAEにて論文発表して学術誌[56]に掲載されている。

本節では、この複雑な水シールの漏れ故障の原因の解明と対策について、新たにシステムズエンジニアリングのアプローチを試みる。ヘッドガスケット用水シールのアーキテクチャを故障のビュー (Architecture View) として、Decomposition Analysis and Resolution (以下 DAR)

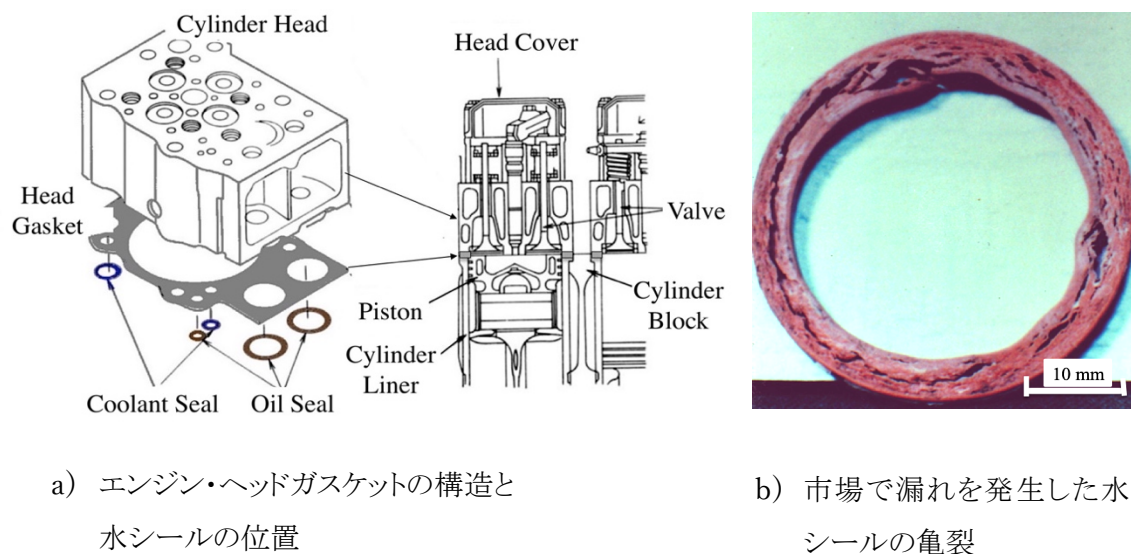


図 3-2-1 ヘッドガスケットの水シールの位置と冷却水漏れを起こした水シールの例

Process[5]を記述する。この水シールは単純な矩形断面のゴムリングでありながら、複雑に絡んだ5つの原因により冷却水漏れを生じている。DARを用いて漏れ故障のメカニズムを解明して対策を検討したことを述べる。これらの対策によりこのヘッドガスケット方式のエンジンの運用ステージの寿命を大きく延長できたことも述べる。この論文の内容は国際会議でも発表[58]している。

3.2.1 基本的な要求と運用 (OpsCon) 及び DAR による水シールの漏れ原因の解析と調査方法

水シールの冷却水漏れに対して、原因を明確に把握することと、置換え可能な改良シールを早急に開発することが要求されていた。現場での修理を考えるとシリンダヘッドの設計変更などのエンジン本体の改良はできない状況である。この水シールの運用 (Operation of Concept、以下 OpsCon)[5][6]は、(1)極寒地から熱帯での苛酷な作業に耐えるために-50~+110℃まで使用可能であること、(2)水シールがエンジン燃焼室とヘッドガスケット内のオイル用のシールに隣接しているため耐油性が必要であること、(3)エンジンオーバーホール迄の10,000時間以上の寿命を持ち途中の分解修理はしないことである。

冷却水の漏れ(Leakage)故障について、従来の Fault Tree Analysis (以下 FTA) 手法[86]を用いてその事象を図 3-2-2 に示す。不均一なシール接触(Unequal Seal Contact)または疲労亀裂(Fatigue Crack)のいずれかが生じると、ヘッドガスケットでの潤滑のない状態(Unlubricated Condition)と高出力化による大きな変位(Large Displacement)により冷却水漏れが生じることがわかる。その他の事象による漏れのメカニズムも理解はできるが、事象の内容と位置付けがわかり難い欠点がある。例えば製造工程の不良(Poor Quality Control)、冷却水の劣化とゴム成分との関係が隣り合うことなどであり、総合的なメカニズムの理解は難しい。

冷却水の漏れ(危害 Harm)に対する重要な問題点(Critical Issues on Harm、以下問題点)として、危険コンテキスト(Hazardous Context)と対応策(Resolution)を DAR として図 3-2-3 に表す。この DAR はユーザ要求の定義のためのクリティカルイシュー手法[5]を応用している。これによる冷却水漏れとシールの亀裂というユーザで使用中のエンジンに生じた重要な問題点を次の5階層(Section)に分けて検討した。システムのトップでは何故高出力エンジンだけに漏れが生じるかという問題(Section 1, System-Engine: Only Cause in High-output engine)、アッセンブリレベル 2(Assembly - Head Gasket)では何故水シールだけに漏れが生じるかという問題(Section 2: Only Caused In Coolant Seal)、アッセンブリレベル 3 では冷却水の劣化により生じる水シールの亀裂問題(Section 3: Seal Crack Caused by Coolant Deterioration)、部品レベル 4 (Parts - Coolant Seal)では水シールの製造工程の不良の問題(Section 4: Inadequate Seal Production Process)、材料レベル 5(Material Composition)では水シール用ゴムの不適切な充填剤という問題(Section 5: Unsuitable Rubber Filler)である。

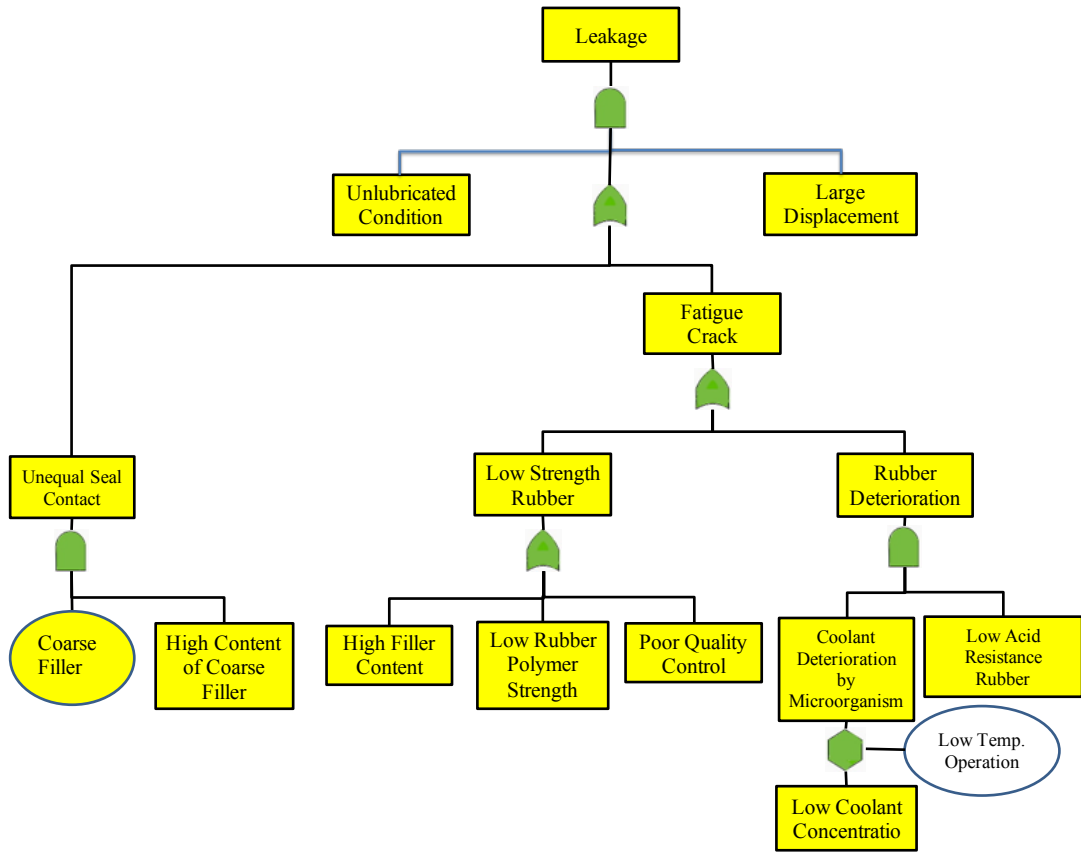


図 3-2-2 ヘッドガスケット用水シールの漏れの FTA

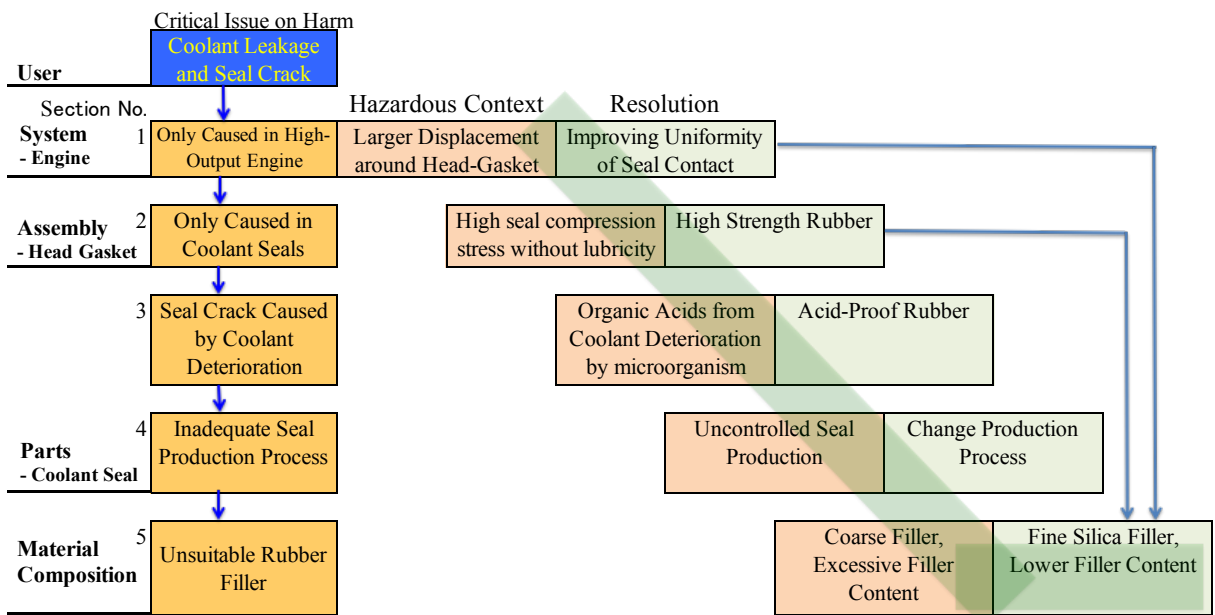


図 3-2-3 ヘッドガスケット用水シールの漏れのクリティカルイシューにより整理した DAR

DAR に示した問題点を解析して水シールの漏れメカニズムを明らかにするために、次のような方法を用いて調査を行なった。

- 台上エンジン試験によるヘッドガスケットの変形方向と量ならびに温度分布の測定。
- 水シールの機械的な振る舞いとシール用ゴム材料の強度測定。市場で亀裂を起こして漏れを生じた水シールの亀裂部の顕微鏡観察。市場で劣化した冷却水とこれにより亀裂を生じた水シールのゴムの化学分析と電子顕微鏡による観察。そして化学と生化学からの劣化についての考察。
- 水シール製造メーカーの品質管理の工程監査。
- ゴム組成の化学分析、機器分析ならびに電子顕微鏡観察。

3.2.2 冷却水漏れの原因の解析

以下図 3-2-2 の DAR の問題点の順番に基づいて解析を行う。

(1) 高出力エンジンだけに漏れが生じる問題 (Section 1)

エンジン出力増加によりヘッドガスケット周りに大きな変形が生じていると推定されたため、高出力エンジンを運転してシリンダヘッド、ヘッドガスケット、シリンダブロック周辺の変位と温度を測定した。この結果ヘッドガスケットの変位は従来エンジンに比べて大きいことが明らかになった。ヘッドガスケットの水シール周辺の最高温度は従来エンジンと同じ 120 °Cであったので、水シール温度は漏れに関係はないと判断される。そこで、シリンダヘッド、シリンダブロック間での水シールの接触状態をシミュレートした観察を行った。図 3-2-4 は実際のシリンダブロック上

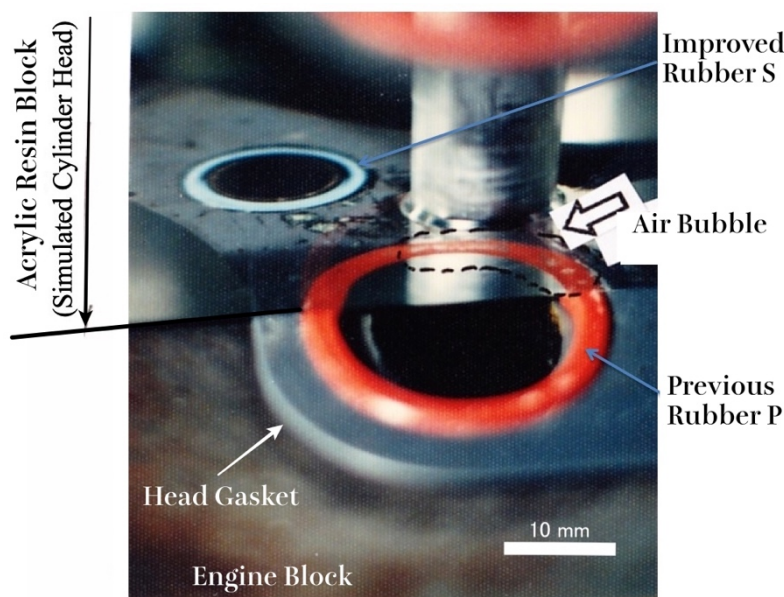


図 3-2-4 従来ゴム P と改良ゴム S の水シールの接触状態の目視観察

にヘッドガasketを置いて水シールを組み込み、上からシリンダヘッドに相当する透明なアクリル樹脂ブロックを押し付けて水シールの接触状態を観察した写真である。手前の赤色の従来水シールのゴム P (Rubber P) はシールが大きくなるような変形を生じて、表面に白い空気の水シールのゴム S (Rubber S) はシールが均一に接触して全く気泡は見られない。改良ゴム S は著者らがゴム部品メーカーと検討して選定した候補品である。実際のエンジンでこのような空気の水シール接触面を移動することが考えられる。冷却水がこの空気の水シール接触面を移動することが推定される。

そこで、厚みの異なるヘッドガasketを数種類用意して、水シールが不均一な接触状態となる圧縮率 (Compression Limit of Uniform Contact) について感圧紙を用いて調べた。不均一な接触は気泡ができる状態であると仮定している。水シールの圧縮率は水シール厚さを供試ヘッドガasket厚さで除した値である。この結果を図 3-2-5 に示す。水シール用ゴム材料について比較品を含めて3種類の圧縮率を測定した。従来のゴム P (Rubber-P) は最も低い圧縮率 (28%) で不均一な接触を起こして歪みを生じる。市販ゴム (以下 COTS) のシリコンゴム A (Rubber A) も同様に低い圧縮率で歪みを生じる。ヘッドガasketにおける水シールの圧縮率は 20~35% に設定しているので、従来ゴム P と COTS ゴム A はヘッドガasket内で不均一な接触状態を生じる。なお、この圧縮率はシールの標準的な値である。改良ゴム S はヘッドガasket内では均一な接触状態を保てることがわかった。ヘッドガasket周りの大きな変位 (Large Displacement around Head-gasket) による危害発生への対応策 (Resolution) は、シールの接触

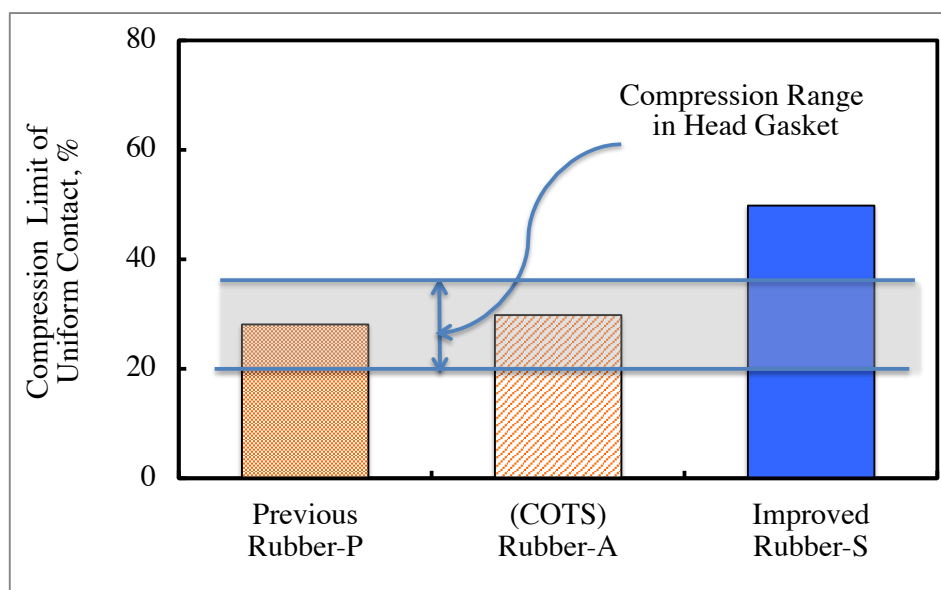


図 3-2-5 均一な接触状態を保てる圧縮率の上限とヘッドガasketの圧縮率

を均一化させる (Improved Uniformity of Seal Contact) ことである。

(2) 水シールだけに漏れが生じる問題 (Section 2)

著者らの測定では、80℃における市販の不凍液を混合した冷却水の粘度 (0.36～0.67 mm²/s) はエンジン油粘度 (10.0～15.0 mm²/s) の 3～4% 程度である。そのため狭い隙間でも冷却水は容易に漏れる可能性がある。エンジン油はこれに対して高粘度であるために狭い隙間を通過できず漏れが生じにくい。またエンジン油はシール表面を潤滑し、シリコンゴム内部にも浸透して潤滑する作用がある。このため、水シールと同じ従来ゴム P を用いるヘッドガスケットのオイル用シールでは全く油漏れの問題は発生しておらず、異常な亀裂も生じていない。

シール表面が無潤滑になると高い圧縮応力が発生するため [87]、シールに亀裂が生じる可能性が考えられた。そこで、水シールが圧縮によって破壊する場合を想定して、図 3-2-6 のように従来ゴム P、改良ゴム S ならびに COTS のシリコンゴム A～D についての圧縮破壊試験を行った。シリコンゴムの充填剤は微細な珪砂粉末 (以下シリカ) が使われるのが一般的である。著者はシリカの配合量がシリコンゴムの強度と関係があると仮定して、圧縮破壊試験 (Compression Ratio To Fracture) の結果をシリカ配合量 (Silica Filler Content) で整理した。明らかにシリカの配合量は圧縮破壊が起こる圧縮率と関係があることがわかる。従来ゴム P は低い圧縮率で破壊するが、ヘッドガスケットの圧縮率に比べるとゴム P の破壊する圧縮率はそれより高い。改良ゴム S と COTS のシリコンゴム A は高い圧縮率まで破壊しない。著者らは市場で

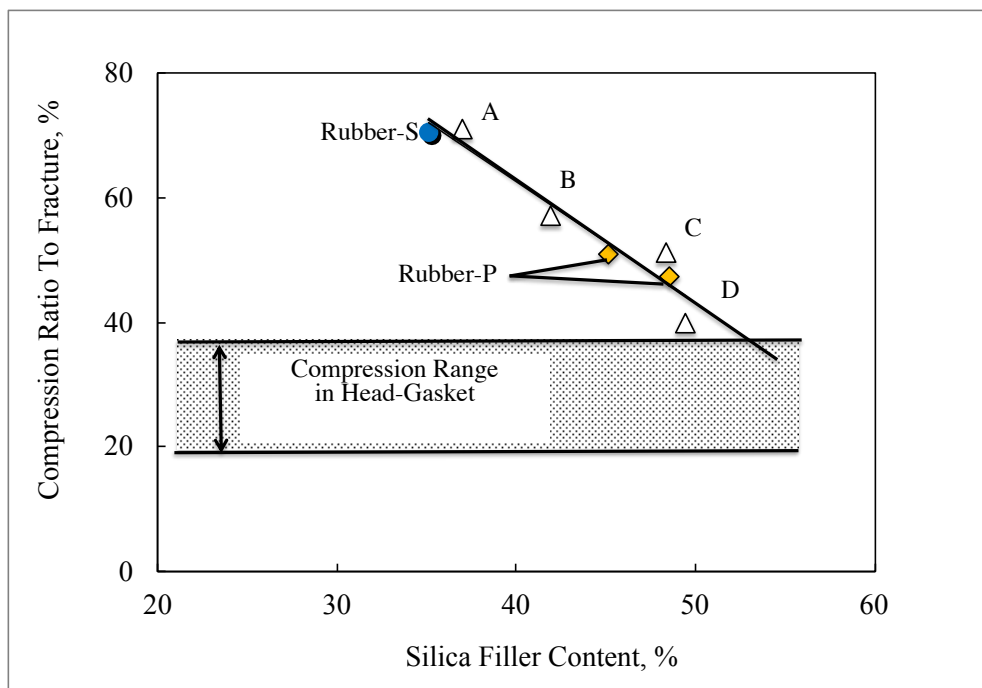


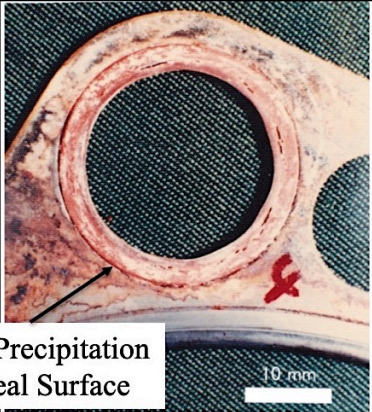
図 3-2-6 シリコンゴム中のシリカ充填剤の配合量と圧縮破壊するまでの圧縮率の関係

損傷した水シール表面を走査型電子顕微鏡により観察して、水シールの亀裂の一部は疲労破壊であることを見つけている。このため、後述するように異常亀裂発生を検証するためシールの疲労試験も行っている。無潤滑での高いシール圧縮応力 (High seal compression stress without lubricity) の危険への対応策は、ゴム S あるいはゴム A のような高強度ゴム (High strength rubber) 採用である。

(3) 冷却水の劣化により生じた水シールの亀裂の問題 (Section 3)

非常用エンジン発電機 (Emergency Generator Engine) で、従来ゴム P がわずか 18 時間の運転後に水シールの亀裂による冷却水漏れを起こした。非常用の発電機は長時間運転を休止しているのが通常であるため、亀裂を生じたのは 2 年目である。非常用エンジン発電機から回収された水シールの状態と、使用されていた冷却水の分析結果を表 3-2-1 に示す。また、比較のため稼働率の高かった船用エンジン (Marine Engine) の水シールと冷却水も回収して分析した。水シールのゴム P を化学分析 (熱天秤、クロマトグラフィなど) した結果、ゴム P のポリマは有機酸により著しく分解していることがわかった。水シール表面の白色沈殿物 (White Precipitation) からは不凍液の添加剤成分とともに有機酸 (シュウ酸、プロピオン酸など) の強酸イオンが検出された。使用された冷却水にはカビ臭もあり、顕微鏡により微生物も観察できた。使用冷却水の分析からは標準的な使用条件の船舶用エンジンの 6 倍もの有機酸の強酸イオン量 (Total Acid Ion) が検出されており、このような事実から有機酸イオンは不凍液の主成分であるエチレングリ

表 3-2-1 使用冷却水中の有機酸 (強酸) イオン量の分析と水シールの状態

	非常用発電機エンジン	船用エンジン
	Emergency Generator Engine 18 hrs (2 years)	Marine Engine 2,100 hrs (2 years)
強酸イオン量		
Total Acid Ion, ppm	607	109
Coolant Seal Condition	 <p>White Precipitation On Seal Surface</p>	Normal

コールが微生物により劣化して生じたと推定された。常木ら[88]はエチレングリコールの濃度が20%以下になるとバクテリアが繁殖することを明らかにしている。この非常用発電機の不凍液濃度はメンテナンス不良のため15%になっており、エンジン運転時間も短いため水温は上がらないので微生物の発生が起りやすい。有機酸溶液へのゴムの浸漬試験を行って従来ゴムPは劣化しやすいが、改良候補ゴムSのゴムは耐酸性があるため劣化は少ないことを確認している。そこで、後述するように有機酸に浸けた水シールを動的なシール性試験してこの効果を検証することにした。冷却水の微生物による劣化で生じた有機酸 (Organic acids from coolant Deterioration by microorganism) による危険への対応策は耐酸性ゴム (Acid-proof Rubber) の採用である。

(4) 水シールの製造工程の不良の問題 (Section 4)

水シールの異常な亀裂の原因として製造不良の可能性も指摘されたため、著者は品質管理部門担当者とともに、水シールメーカーのエンジン工場の工程監査を行った(図 3-2-7)。直接工場に納入しているメーカー(親メーカー、Seal Manufacture)は、水シールの製造を多くの下請け(Sub-contractor)に出しており1~3次の下請けまでも訪れて工程の全容を知ることになった。最終の委託先の工場では、ゴムの加熱硬化作業の工程で加熱温度と時間がほとんど管理されていない(No Quality Control and No Record for Cure Temperature)ことがわかった。親メーカーは下請け先から製品の水シールを受け取ると、製品の比重、硬さ、材質など簡単な検査を行なって検査票(Inspection Data)を製品に貼付してエンジン工場に納入していた(Delivery with Inspection Data)。

建設機械メーカーの品質管理部門は親メーカーに対して即時の下請け方法の改善と、品質管理

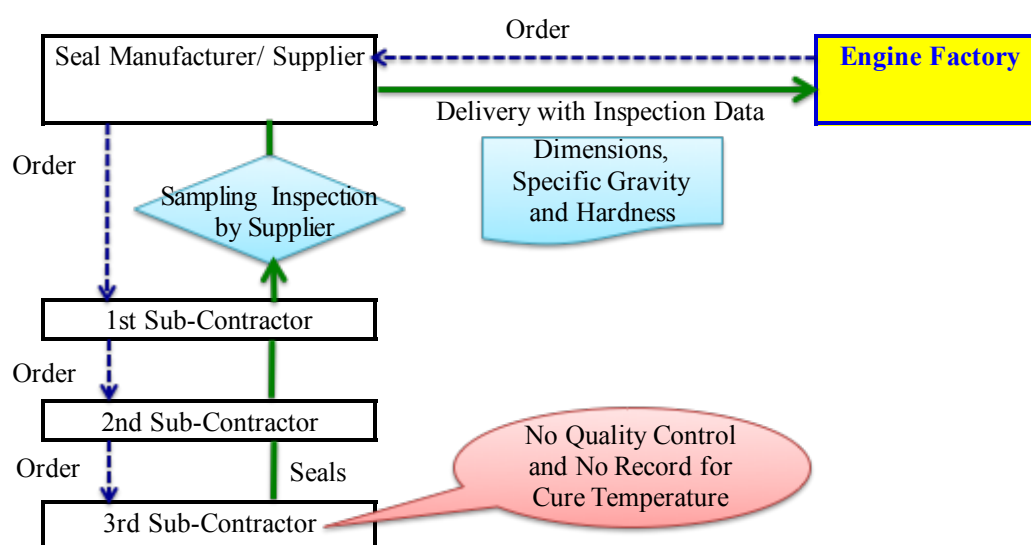


図 3-2-7 水シールの製造の実態

の実施を要請している。シリコーンゴムの硬化温度と時間が不適切であると強度不足が起こる可能性が高い。このためエンジン工場内に在庫してあった水シールの検査と分析が行われたが、このような潜在的な危険性にも関わらず検査・分析した全ての水シール品質には異常は認められなかった。予想される危険性はゴムの疲労強度の低下による亀裂であるが、調査した範囲ではこの品質管理上の危険性は今回の異常な亀裂の原因にはなっていないと判断された。未管理のシール製造(Uncontrolled seal production)による危険への対応策としては生産工程の変更(Change production process)である。

(5) 水シール用ゴムの不適切な充填剤の問題(Section 5)

前述のようにシリコーンゴム中のシリカはゴムの強度に大きな影響がある。そこで、従来ゴム P と改良ゴム S を完全に燃焼させて残ったシリカを走査型電子顕微鏡(以下 SEM)を用いて観察を行った。図 3-2-8 がシリコーンゴム中の充填剤シリカの SEM による写真である。従来ゴム P は粗く脆いシリカ(珪藻土)が配合され、改良ゴム S は微細なシリカを充填剤として配合している。従来ゴム P の粗い珪藻土シリカは不均一な接触の原因となることが明らかであり、反対に改良ゴム S の微細なシリカは均等に接触する性質を持つことが理解できる。COTS のシリコーンゴム A は 30%のシリカを含むが珪藻土の配合量は少なく微細シリカが多いため、高い圧縮率まで破壊しないが低い圧縮率では接触状態は不均一になる。これから粗いシリカはシールの歪み変形を生じ、シリカの配合量の多さはシール強度の低下を招くことが明らかである。井上らの先行研究[85]でも粗い珪藻土は水蒸気中での耐熱性に悪影響があるデータを示している。充填剤の粗大さと過剰な量(Coarse filler, excessive filler content)による危険性への対応策は微細シリカの採用と配合量を減らすこと(Fine silica filler, lower filler content)である。

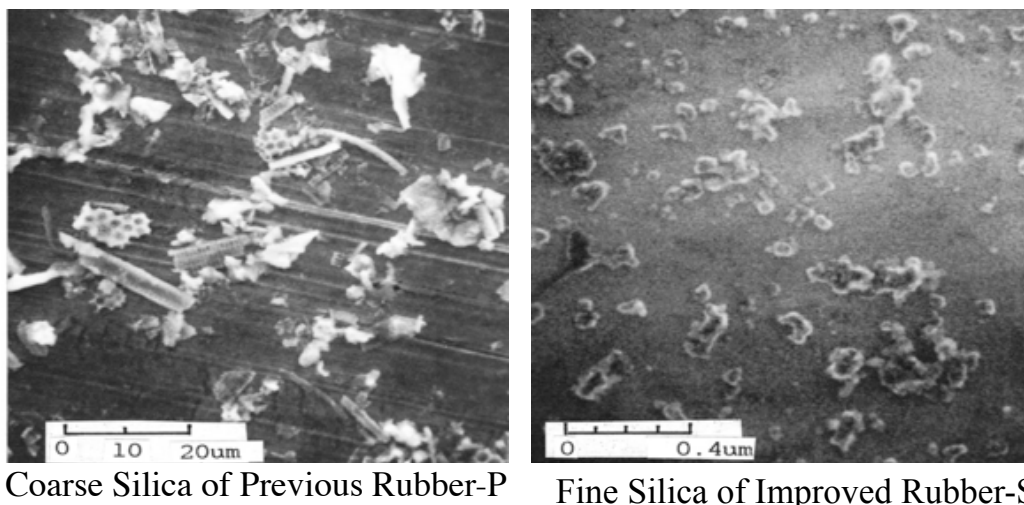


図 3-2-8 従来ゴム P と改良ゴム S の充填剤の SEM 写真

3.2.3 DAR の手法から導かれた水シールの漏れメカニズム

システムズエンジニアリングのアーキテクチャビューとして DAR を用いた解析によって、複雑な冷却水の漏れメカニズムを図 3-2-9 のように明確に示すことができた。冷却水漏れは、最初に粗いシリカ (Coarse filler) の粒径によりシールの歪み変形 (Non-uniform seal contact) が起こり水シール表面に気泡が生じる。この気泡に冷却水が入ってエンジン振動で位置を移動して冷却水が水シールの外に放出されて冷却水漏れが起こる。次に過剰なシリカ量 (Higher filler volume) がゴム強度を低下させて圧縮疲労破壊 (Low fatigue strength) を起こし水シールの亀裂 (Seal crack) を生じる。シリカの種類と量が冷却水漏れに影響するので、シリカが微細で配合量も減らしたゴム S は水シールのシール性能と耐久性を改良するための対応策になると考えられる。微生物による水シールのゴムの劣化 (Coolant deterioration by micro-organism) は非常用発電機エンジン (Special engine) とメンテナンス不良 (Poor maintenance) が重なった稀なケース (Rare case) であるが、このエンジンの信頼性を改良するためには対策が必要である。ゴム S の耐酸性ゴムポリマ (Acid proof rubber) は微生物による劣化の防止策になる可能性が考えられ、後述の確認試験も行っている。もう一つの水シールの亀裂を起こしうる潜在的な原因 (Possibility of crack generation) は水シールの製造の品質管理の不良 (Lack of quality control) である。

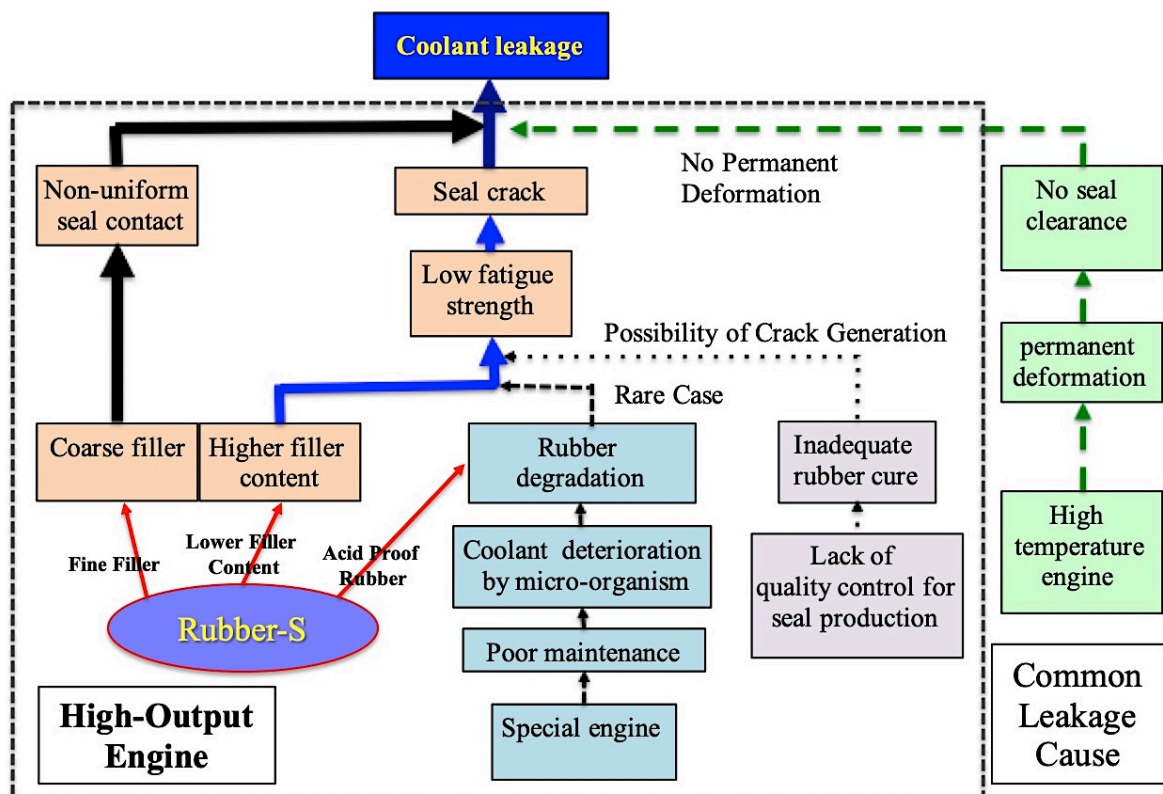


図 3-2-9 冷却水シールの漏れメカニズム

for seal production) であり、何も対策しなければ将来問題を起こす可能性がある。市場における一般的なシールの漏れの原因 (Common leakage cause) はシールのへたり (Performance deformation、以下圧縮永久歪み) であるが、市場から回収された水シールの調査ではへたりは一件も報告されていない。経験と試行錯誤に基づいた対策により結果は得られたものの、最初からアーキテクチャのビューを考えていれば試行錯誤をすることなく迅速なメカニズム解明ができたと思われる。

3.2.4 Verification Analysis and Validation Resolution (VAR)による検証と妥当性確認

(1) 試験方法

前述のクリティカルイシューの No.1~5 の項目と対応させて、改良ゴム S による対策の検証と妥当性確認(Verification and Validation Plan)の項目を表 3-2-2 に示す。表中の黄色セルは検証項目であるが、このために著者らはヘッドガスケット・シール試験機 (Head Gasket Seal Tester) を新たに製作した。表中の緑の網掛けセルは妥当性確認の項目であり、台上エンジン試験と改良ゴム S を組み込んだエンジンによる市場試験により実施した。早急な冷却水漏れの対策が求められていたために、妥当性確認と市場調査 (Countermeasure and Field Survey) は検証試験が完了してすぐに実行に移した。ヘッドガスケット・シール試験機は、実際のエンジンの水シールをシミュレートするために実際の高出力エンジンのアッセンブリを使用して組み立てた。図 3-2-10 に試験機の模式図を示す。エンジンの燃焼による圧力をシミュレートする 2~15 MPa の油圧サイクル (Cyclic oil pressure) をエンジンピストンの燃焼室に加えた。これによりエンジン燃焼をシミュレートしたヘッドガスケット周辺の大きな変位を再現している。変位はヘッドガスケット

表 3-2-2 DAR の項目と対応させた検証と妥当性確認の VAR の試験項目

No.	Critical Issues	Items for Countermeasure	Verification and Validation(hatched cell) Plan		
			Head Gasket Seal Tester	Engine Bench Test	Countermeasure and Field Survey
1	Only caused in improved engine	Improving uniformity of seal		✓	✓
2	Only caused in coolant seals	Adoption of high strength rubber	✓	✓	✓
3	Seal crack caused by coolant deterioration	Acid-proof rubber (Rubber-S)	✓	✓	✓
4	Inadequate seal production process	Change of seal production process			✓
5	Unsuitable rubber composition	Fine silica filler (Rubber-S)	✓	✓	

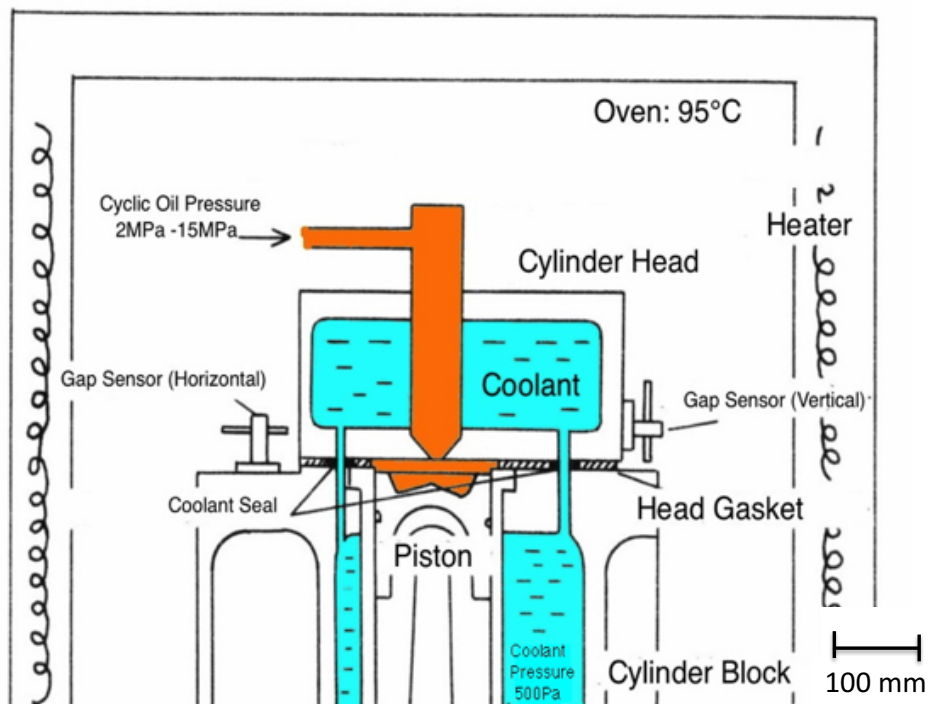


図 3-2-10 ヘッドガスケット・シール試験機の模式図

周辺に何箇所かに設置した縦横用の隙間センサ (Gap Sensor) で測定して実際のエンジンと同じ動きになることを確認している。試験機全体を外側のヒータによって 95°C に加熱して水シールの温度を実際のエンジンの状態に近づけている。水シールの圧縮率を調整するために、数種類の厚さのヘッドガスケットを準備して試験ステップ毎に交換しながら試験を行った。台上エンジン試験と市場でのエンジン試験については後述する。

(2) ヘッドガスケット・シール試験機を用いた改良ゴム S 水シールの耐久性の検証

本ヘッドガスケット・シール試験における水シールの疲労試験の結果を図 3-2-11 に示す。従来ゴム P は、圧縮率 (Compression Ratio) 40% の過大負荷の条件において 6×10^6 サイクル (Pressure Cycle) で亀裂発生が再現できた。市場の亀裂の状態に類似しており、SEM による観察結果も市場での亀裂と同じ疲労破面を呈していた。従来ゴム P と改良ゴム S の疲労曲線は明確に異なっている。一定の圧縮率であればゴム S はゴム P の 10 倍以上の疲労寿命になる。有機酸 (ここでは 10% 酢酸) に浸漬したゴム P (Immersed Rubber-P) は疲労強度が大きく低下するが、同じ有機酸に浸漬したゴム S (Immersed Rubber-S) は耐酸性があるため疲労強度の低下は少なく抑えられる。非常用発電機エンジンの使用冷却水中にはシュウ酸が多く含まれていたため、シュウ酸にも浸漬してエンジン試験を行って同様な結果を得ている。有機酸浸漬後のゴム S はゴム P の約 100 倍に疲労寿命が延びることがわかった。

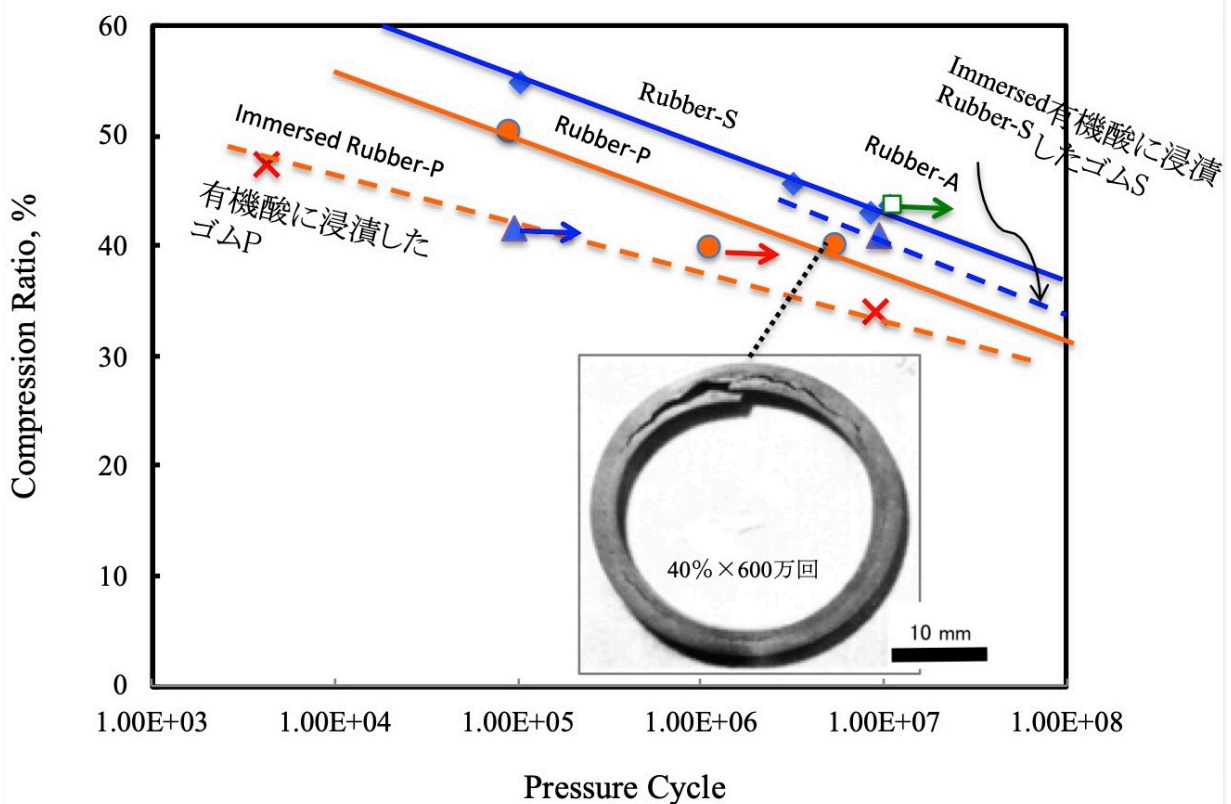


図 3-2-11 ヘッドガスケット・シール試験機により得られた水シールの疲労曲線

(3) 台上エンジン試験による改良水シールの妥当性確認

この高出力エンジンを用いて図 3-2-12 のように全 19 回の台上エンジン試験を行った。その内 10 回のエンジン試験には従来ゴム P の水シール(図中の赤×印)を組み込んで試験を行い、9 回のエンジン試験には改良ゴム S (図中の青丸印)の水シールを組み込んで試験を行った。従来ゴム P の水シールでは 100~1,000 時間の試験で 5 回の冷却水漏れ(Leakage)が生じたが、改良ゴム S の水シールでは 50~2,000 時間の 9 回の試験で全く冷却水の漏れは生じずシール性と耐久性の妥当性確認ができた。試験後のゴム S の水シールのへたり(圧縮永久歪み)量の測定から、ゴム S が目標のオーバーホール迄の寿命 10,000 時間以上が保持できると推定された。なお、圧縮永久歪みに関しては従来ゴム P もゴム S と同等の性能であった。

(4) 台上エンジン試験によるシール変形による漏れメカニズムの妥当性確認

これらの台上エンジン試験において、著者らは従来ゴム P の水シールは亀裂が発生していないにもかかわらず冷却水の漏れを起こすことを見つけた。この漏れのメカニズムを確認するた

めに台上エンジン試験で漏れが発生すると同時に、エンジンヘッドをドライアイスで急冷して凍結させて分解した。シリンダヘッドを取り外してヘッドガスケットに紫外線ランプを照射して観察した結果が図 3-2-13 である。左写真の矢印では、水シールから漏れた不凍液入りの冷却水が青色に光っているが、冷却水漏れを起こした水シールには右写真の矢印のように亀裂などが全くないことがわかる。したがって、従来ゴム P による冷却水漏れの一つの原因は不均一な圧

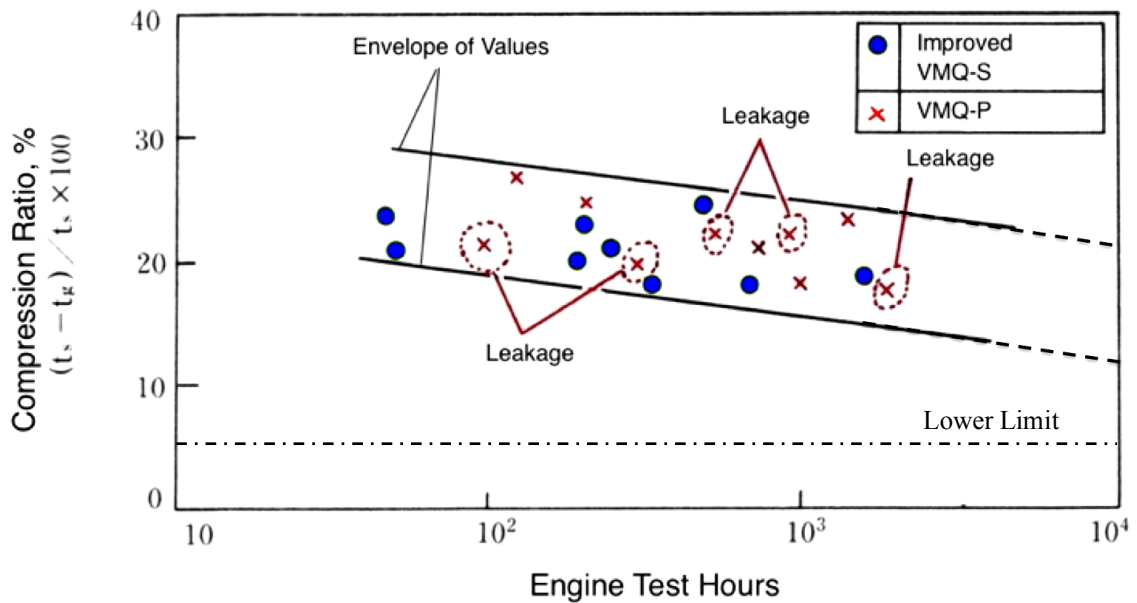


図 3-2-12 台上エンジン試験によるヘッドガスケット用の各水シールの圧縮永久歪みと冷却水漏れの発生



図 3-2-13 台上エンジン試験における冷却水漏れ直後の水シール周りの状況
(左写真:紫外線により青く光る不凍液、右写真:水シールの状態)

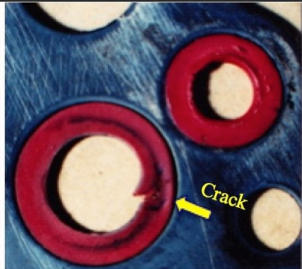
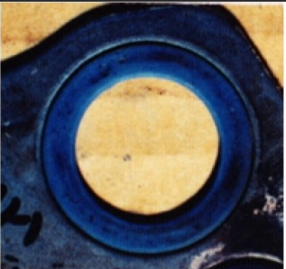
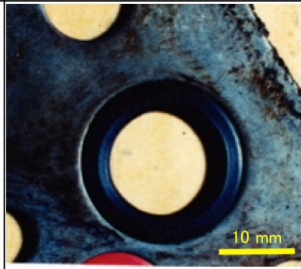
力分布による変形であることが確認された。

3.2.5 改良水シールの採用と水シールのプロダクトライフサイクルマネジメント(PLM)を考えた対策

妥当性確認が完了した後に、著者らは工場で生産される全てのエンジンは改良したゴム S の水シールを採用するようにした。また、市場で冷却水漏れが見つかった全てのエンジンは分解して改良ゴム S の水シールに交換するようにした。この半年間の短期対策によって市場からはヘッドガスケットからの冷却水漏れは報告されなくなった。

先行的に量産されていた船舶用と発電機用のエンジンでは、この改良ゴム S の水シールにより将来も使用できる見通しを著者らは持っていた。しかし、建設機械用エンジンではこの後に厳しい排出ガス規制の強化が行われる計画が日米欧にあり、将来このヘッドガスケット方式を持つ高出力エンジンが存続できるか懸念があった。このため、このエンジンに排出ガス浄化装置を装着して台上エンジン試験が行なった結果、ゴム S の水シールは圧縮永久歪みが 0% と圧縮代がなくシールできない状態になった。著者らはシリコンゴムに替わるゴム材料として水素化 NBR の水シールへの採用を長期対策として研究した。水素化 NBR は空気中の加熱では耐熱性は低いが、冷却水中ではシリコンゴムあるいはフッ素ゴムよりも耐熱性が高くなることを見出した。Keller の先行研究[83]での水素化 NBR が冷却水中では FKM より高い耐熱性を持つ報告と一致する結果である。水素化 NBR (以下ゴム T) の水シールはゴム S と同様に接触の均一性、圧縮破壊試験、有機酸浸漬試験などの検証を行った後に、高温のヘッドガスケット試験による妥当性確認を行なった結果は表 3-2-3 のとおりである。この結果、ゴム T は試験後十分な圧縮比(Compression Ratio)保持しており、ゴム S に比べ約 10 倍の寿命を持つことを検証できた。従来ゴム P は 1/2 以下のサイクル(Test Cycles)で亀裂を生じ、ゴム S は亀裂を生じないものの圧縮代が全くなって下限値(Lower Limit)を下回っている。

表 3-2-3 ヘッドガスケット・シール試験機を用いた高温(155°C)試験の結果

	Rubber-P	Rubber-S	Rubber-T	Remark
Test Cycles	4.7 x 10 ⁶	1.2x 10 ⁷		
Compression Ratio, %	1 (NG)	<1 (NG)	10 (OK)	Lower Limit: 5
Seal Condition				

しかしながら、OpsCon で要求されている極寒地における-50℃～-30℃の低温領域に対してはゴム T がゴム弾性を失いシール性がなくなる問題があった。このため、ゴム S は寒冷地用としてゴム T と使い分けることにした。改良した水シールについては、これを取り扱う利害関係者、すなわち工場の組立て作業員、冷却水漏れを経験したユーザ、ディーラ修理員、建設機械メーカーのサービス員に容易に改良品とわかるようにゴム S は水色、ゴム T は黒色で面取りして区別できるようにしている。

ゴム T の開発によりこのヘッドガスケット方式用いた高出力エンジンは、製品ライフサイクル管理 (PLM) での量産から生産終了までの製品寿命 (Middle of Life、以下 MOL)[89]を大幅に延長することができている。2017 年現在もゴム T の水シールを使用したエンジンは基本的なモデルチェンジなしに 5 回の排出ガス規制を乗り越えてこと生産中である。このような子部品 (Sub Parts) であっても、PLM の観点から長期的な対策を行うことが必要である。

3.2.6 まとめ

ヘッドガスケットの水シールの漏れ原因は、FTA を用いるにより、粗いシリカ充填剤による水シールの不均一な接触、疲労による亀裂発生、冷却水中で発生したバクテリアによるゴムの劣化、製造不良の 5 項目を見出すことができた。しかしながら、原因が多岐にわたるため漏れメカニズムを明確に解明できていなかった。当時は、シリコンゴム材料の改良を施す対策により、漏れ故障を防ぐことができた。

システムズエンジニアリングの DAR を用いるアプローチにより解明した漏れメカニズムと対策を再考した結果、次の結論を得た。

- 1) DAR を用いて、故障(危害)に関する問題点をシステムからゴム組成までの 5 階層に分け、危険コンテキストと対策を整理することで、冷却水の漏れメカニズムを明確に示すことができた。
- 2) DAR の階層毎に問題点に対する試験の結果を検討することにより、水シールの漏れの原因を総合的に理解することができた。対策した水シールの効果を評価することができた。
- 3) VAR を用いてヘッドガスケット試験機による検証、台上エンジン試験による妥当性確認、ならびに対策実施後の市場調査による妥当性確認により、故障対策が完結したことを確認できた。
- 4) 新たに開発した水素化 NBR の水シールは、改良シリコンゴムに代わって、この高出力エンジンの製品ライフサイクル管理 (PLM) での MOL を大きく延長できた。潤滑油類に起因する故障への対策では、MOL 延長を狙うことを提案する。

3.3 クランクシャフト用オイルシールの漏れ故障の対策

建設機械メーカーでは用途に応じてサイズの異なるディーゼルエンジンを必要とする。エンジン開発に際しては、エンジン油に起因する故障を生じると開発を中断することにもなり兼ねない。ここでは大型および中型のクランクシャフトの出力側にあるオイルシール(以下クランクシャフトシール)に関する対策について述べる。大型エンジンではクランクシャフトシールが 24~30 m/s の高周速となる問題が生じ、中型エンジンでは 2 液を同時に密封できるデュアルリップのクランクシャフトシール(以下デュアルリップシール)を必要とする問題が生じた。

高周速のオイルシールおよびデュアルリップシールに関する先行研究では、オイルシールの故障の解析をシステムティックに試みた例がある。仙田[90]は漏れ故障の要因と使用条件を FTA により整理しており、Hirabayashi ら[91]は市場での漏れ故障を Failure Mode and Effects Analysis (以下 FMEA)[92]で整理している。技術的な先行研究では Symons[93]はオイルシールへのヘリックス追加による耐久性改良を示しているが、Matsushima ら[94]はヘリックスが早期に摩耗するので効果はないとしている。Rapp ら[95]は高速のギヤ油用オイルシールでリップ表面に炭化物が堆積することを報告しており、リップ荷重の低減とヘリックスが炭化物による漏れの防止に効果があるとしている。福永[96]はデュアルリップのクランクシャフトシールに発生する負圧をエンジンブロックとシール双方に開けた穴で抜く方法を特許化している。

本節では、高周速クランクシャフトシールのエンジン油の漏れ原因を解明し、漏れの発生の条件を見い出したことについて述べる。デュアルリップシールの油漏れの原因は、リップ間の負圧によることを見い出している。これらへの対策を行なって、高周速クランクシャフトシールとデュアルリップシールを開発したことを述べる。本節については SAE にて論文発表して学術誌[57]に掲載されている。これについて、システムズエンジニアリングのアプローチにより、リップの振る舞いを可視化し、3.2 節に述べた DAR を用いることで、経験的に進めた両クランクシャフトシールの漏れ故障の原因解析と対策を整理して再考する。

3.3.1 高周速クランクシャフトシールとデュアルリップシールに生じた漏れのメカニズムの検討

(1) 高周速クランクシャフトシールの構造、漏れが発生したリップの状態観察ならびにリップの振る舞いの検討

高周速クランクシャフトシールの模式図を図 3-3-1 に示す。高周速クランクシャフトシールは外径 260 mm、幅 20 mm であり、クランクシャフトシールのリップはエンジン停止中ではゴムにより密封しているが、クランクシャフトが回転することにより偏心あるいは振動でリップとの間に隙が生じてオイルが漏れることになる。そのためリップ自体は回転中にエンジン油が漏れないようにエンジン油を押し戻す作用を持っている。さらに、油を押し戻す作用を持つ逆ネジの出っ張り(ヘリックス)をゴムのリップ大気側に付ける場合がある。このリップの振る舞いの詳細は SysML のア

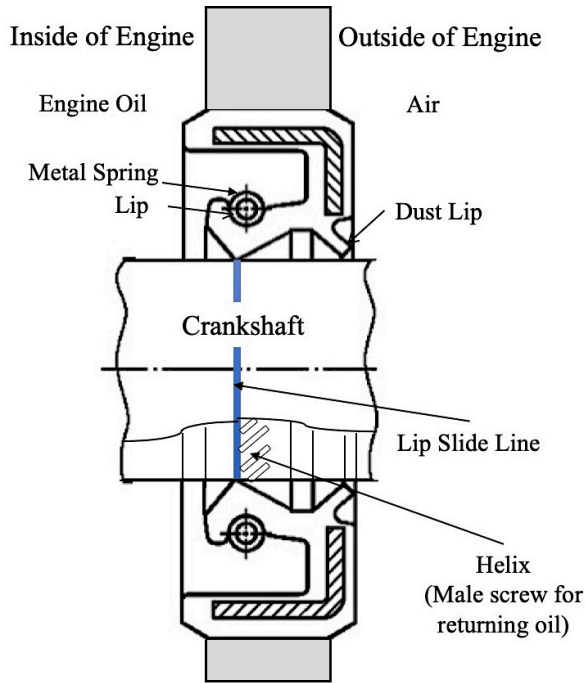


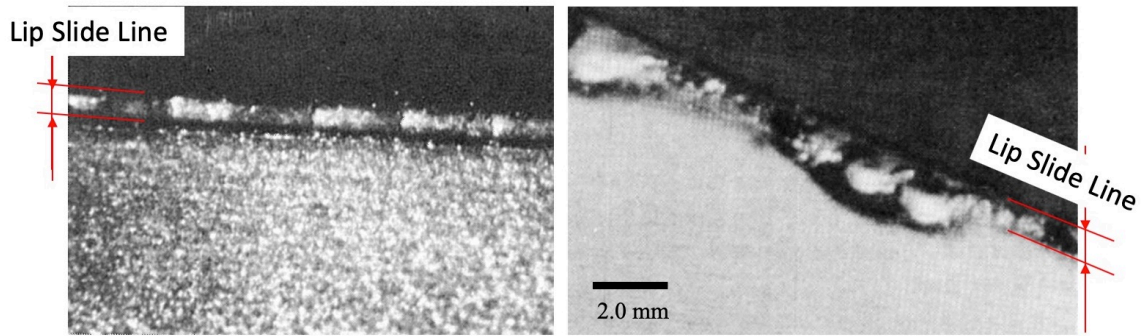
図 3-3-1 高周速クランクシャフトシールの模式図

クティビティ図を用いて後述する。

大型エンジンの台上試験により 2 種類の材質の異なるクランクシャフトシールをそれぞれ 1,000 時間試験した結果、いずれのクランクシャフトシールからエンジン油の漏れが発生した。図 3-3-2 はシリコンゴム(以下 VMQ)とフッ素ゴム(以下 FKM)のクランクシャフトシールの試験後のリップ先端の状態を示す。VMQ クランクシャフトシールでは炭化物の付着とクラックが発生し、FKM クランクシャフトシールでは炭化物の付着と膨れが生じていた。VMQ と FKM クランクシャフトシールの炭化物を調べるとゴムの成分は検出されず、エンジン油の添加剤成分(カルシウムと亜鉛)だけが検出された。これら炭化物の付着は従来の低周速のクランクシャフトシールでは気が付かれなかった現象であり、エンジン油の油膜切れによると推定した。VMQ に付着した炭化物直下のゴムには熱分解によりクラックが生じている。FKM の炭化物周辺の膨れはゴム成分である充填剤の溶け出しと熱による影響により生じている[97]。

(2) シールのリップの振る舞い

図 3-3-3 に高周速用クランクシャフトシールのリップの振る舞いを表す SysML のアクティビティ図を示す。クランクシャフトシール中 (crankshaft sea: Sealing Parts) にはヘリックス付きのリップ (Seal Lip with Helix) がある。リップはエンジン側から外部に出ようとするエンジン油 (以下 EO)



- a) シリコンゴム (VMQ) オイルシールのリップ摺動部の炭化物とクラック
 b) フッ素ゴム (FKM) オイルシールのリップ摺動部の炭化物と膨れ

図 3-3-2 大型エンジンの台上試験で漏れを起こしたクランクシャフトシールのリップ摺動部の炭化物とクラックと膨れ

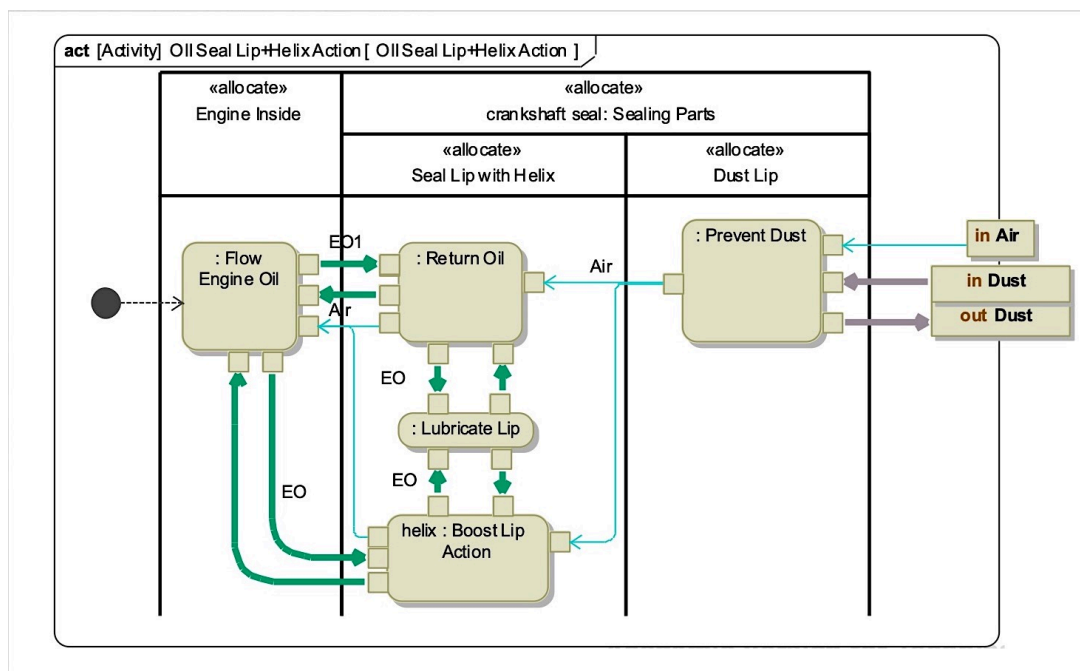


図 3-3-3 高周速用クランクシャフトシールのリップの振る舞いを表すアクティビティ図

をシャフトとの間を潤滑 (Lubricate Lip)させた後に、エンジン側に押し戻す (Return Oil)。この時リップからは、外部からの空気も一緒にエンジン内に入る。この空気はオイルシールの外側に付けたダストリップ (Dust Lip)から入るが、狭い隙間のダストリップおよび繊維を編んだ通気性のあるダストリップによりダストは外部に排出される (Prevent Dust)。高周速になってリップの

摩擦温度が上がって潤滑が不十分になると、油膜が薄くなってEOの炭化物が生成すると考えられる。ヘリックスはリップのEOを押し戻す作用を増強する(helix: Boost Lip Action)が、同時に潤滑(Lubricate Lip)の効果も増強して油膜を厚くする効果があると考えられる。

3.3.2 システムズエンジニアリングのDARを用いたシールの漏れ対策の再考

オイルシールのアーキテクチャの故障ビューであるDARを用いて、クランクシャフトシールからのEOの漏れ(Leak from Crankshaft Seal)に対する各階層での問題点(Critical Issues on Harm)、危険コンテキスト(Hazardous Context)と対応策(Resolution)を図3-3-4に示す。大型エンジンの高周速クランクシャフトシールはシャフト直径が大きいので漏れを生じる(Section 1, System - Engine: Leak in Larger Shaft Size)ものである。これは高周速となる危険コンテキストによる(High Rotation Speed)。デュアルリップシールも2液用シールとしては高周速である(High Speed as a Dual Lip)。高周速ではリップ摺動による発熱が大きくなる(Section 2, Assembly - Crankshaft: High Heat Generation)ので温度を下げる対策が必要となる(Lowering Temperature)。シールリップの荷重が大きいくことで漏れる(Section 3, Parts - Crankshaft Seal: Leak by High Radial Load)ことに対しては、過大なスプリング力(Excessive Spring Force)が考えられるので、対策としてシールのスプリング荷重を下げる(Lowering Spring Force)ことが考えられる。先行研究でもリップ荷重を下げることで漏れを防止することが報告されている。さらにシー

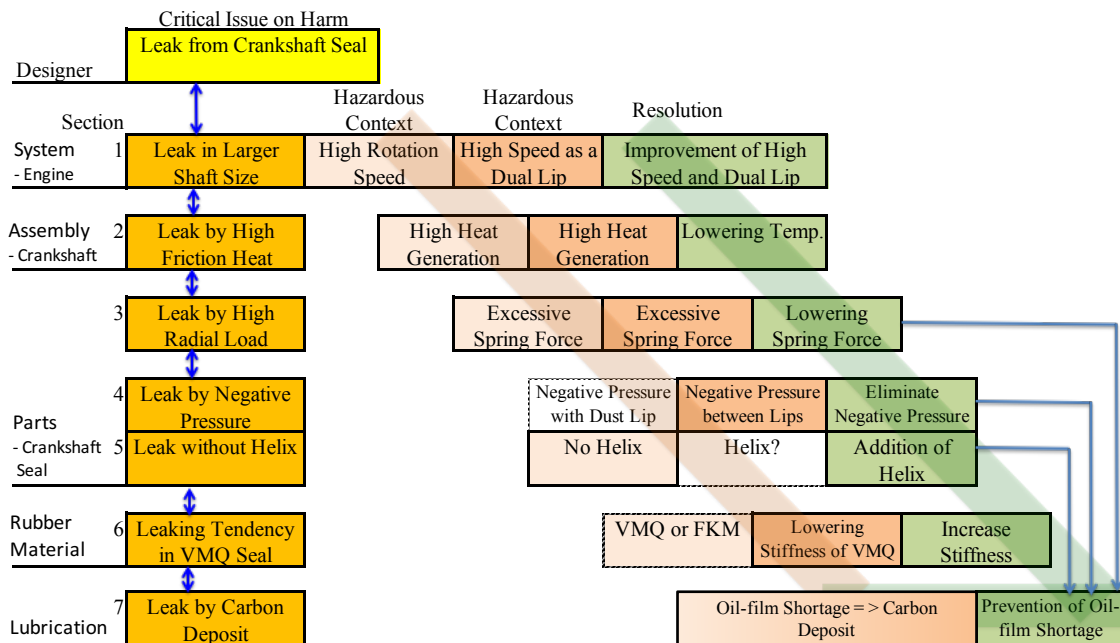


図 3-3-4 クランクシャフトシールの漏れについての DAR

リップの荷重が大きい問題では、高周速クランクシャフトシールのダストリップの隙間が適正で負圧が発生しない(Section 4, Parts: Leak by Negative Pressure)ことを確認する必要がある。また、デュアルリップシールでは 2 リップ間の負圧発生が故障につながる危険コンテキスト(Negative Pressure between Lips)であり、負圧を無くす対策が必要である(Eliminate Negative Pressure)。リップのヘリックスがないために漏れる問題(Section 5, Parts: Leak without Helix)については先行研究で十分解明されていないので、その効果を明らかにする必要がある。デュアルリップシールへのヘリックスの効果も検討が必要である(Helix)。材料の耐熱性については VMQ の 200~225 °C に対して FKM は 250 °C と高い[98]ので、耐熱性の影響で漏れやすい(Section 6, Rubber Material: Leaking Tendency in VMQ seal)ことがあるのかを把握する必要がある。また、VMQ シールが使用中に FKM シールに比べて剛性が低下しやすい(Lowering Stiffness VMQ)ことを経験しているので VMQ シールの剛性アップ(Increase Stiffness)も検討すべき課題である。リップへの炭化物付着による漏れ(Section 7, Lubrication: Leak by Carbon Deposit)の問題については、これが油膜切れ(Oil-film Shortage→Carbon Deposit)の危険コンテキストによることを確認して対策(Prevention of Oil-film Shortage)を考える必要がある。

3.3.3 DAR に沿った高周速クランクシャフトシールの漏れの対策

(1) Section 1 (シャフト径が大きい)~5 (ヘリックスなし)までの検討

シャフト直径が大きい問題(Section 1, Leak in Larger Shaft Size)への対策は、回転数を下げること、あるいはエンジン設計の見直しが考えられ、性能低下が起これば開発を遅らせることになり現実的ではない。したがって、大型と中型エンジン用のクランクシャフトシールを改良する必要がある。摺動による発熱が大きいこと(Section 2, Leak by High Friction Heat)に対しては、低摩擦係数のゴム材料を用いることが考えられる。しかし、シールメーカーによって長い間研究されているが実用には至っていない。

シールリップの荷重が大きいこと(Section 3, Leak by High Radial Load)については、リップ荷重を従来シールに比べ大きく減らした改良クランクシャフトシールを開発していた。そこで、従来シールと改良シールについて台上エンジン試験を用いてリップの温度測定を行なった。クランクシャフトシールのリップ先端から 1.0 mm の位置に熱電対を埋め込み、一定温度に収束する 30 分間の温度測定を試みた結果を図 3-3-5 に示す。なお、リップ荷重はクランクシャフトの振れに対する追従性能を保つために 40 N 以下に下げることができない。大型エンジン A-1~A-3 の台上試験では改良品の低リップ荷重 VMQ (52 N)、ヘリックス付き低リップ荷重 VMQ (42 N)、低リップ荷重 VMQ (54 N) の 3 種類とも、リップ温度上昇(Lip Temperature Rise)は 40 °C 未満であった。これに対して従来品の高リップ荷重 FKM シール (83 N)、低リップ荷重 VMQ シール (55 N)、高リップ荷重 VMQ シール (83 N) はいずれもリップ温度上昇は 50~60 °C となった。

Engine	Seal	Engine endurance test	Lip Temperature Rise, °C					
			20	30	40	50	60	70
A-1	VMQ 52N	OK	[Bar chart showing temperature rise up to ~38°C]					
	FKM 83N	Cracking, Oil-leakage	[Bar chart showing temperature rise up to ~60°C]					
A-2	VMQ Helix 42N	OK	[Bar chart showing temperature rise up to ~38°C]					
	VMQ 55N	Coking, Oil-leakage	[Bar chart showing temperature rise up to ~55°C]					
A-3	VMQ 54N	OK	[Bar chart showing temperature rise up to ~30°C]					
	VMQ 83N	Coking, Oil-leakage	[Bar chart showing temperature rise up to ~50°C]					

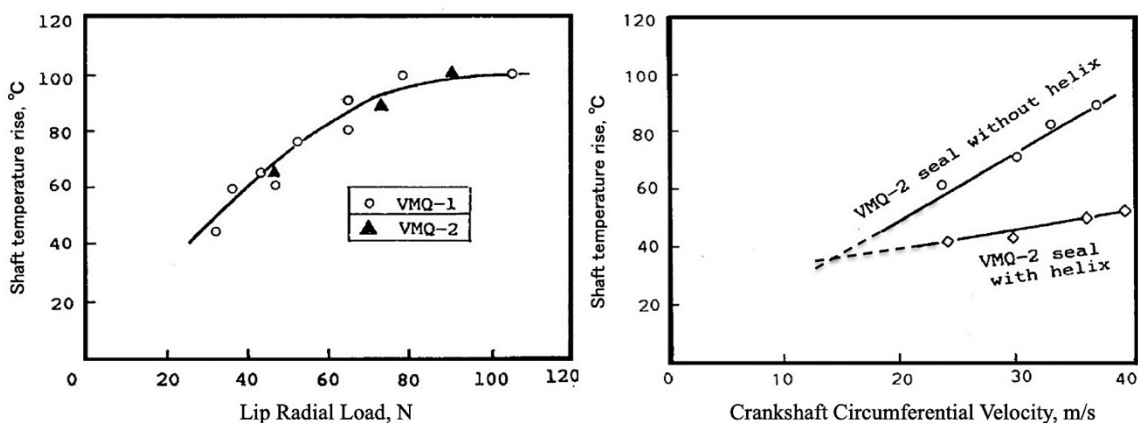
図 3-3-5 台上エンジン試験を用いた 30 分間のクランクシャフトシールのリップ温度上昇の測定結果(周速:14~20 m/s、油温:80 °C)

これら全ての供試クランクシャフトシールについては図中に示すように台上エンジンによる耐久試験(Engine endurance test)が行われており、従来シール 3 種いずれも炭化物付着(Cracking or Coking, Oil-leakage)を生じ、改良シールは炭化物付着および漏れは生じていない。したがって、炭化物が付着しないリップ温度上昇の限界は 40 °C 近辺にあることを見出した。

次にクランクシャフトシールのリップ荷重をスプリングの調整で変更した 2 種類のクランクシャフトシールについてオイルシール試験機を用いて図 3-3-6 のようにシャフト温度測定を行なった。図 3-3-6 a) に示すようにリップ荷重 40~80 N の範囲ではリップ荷重(Lip Radial Load)とシャフト温度上昇(Shaft temperature rise)は比例するが 80 N を越えるゴムのリップが変形するため温度上昇は一定になった。負圧による漏れ(Section 4, Leak by Negative Pressure)については、繊維で通気性のあるダストリップを使用しているので負圧は生じない。

次に、ヘリックスの影響(Section 5, Leak without Helix)をより正確に把握するために、同一クランクシャフトシールでヘリックス付きとヘリックスなしの 2 つのシールを用いてシャフト回転数(Crankshaft Circumferential Velocity、周速)を変えてシャフト温度上昇を測定した(図 3-3-6 の b)。ヘリックス付きのクランクシャフトシールは周速 15 m/s 以上でシャフト温度上昇を大きく低下させる効果があり、目標とする周速 30 m/s で 20 °C の温度低減効果が得られることがわかった。

図 3-3-5 のエンジン A-2 のヘリックス付き低リップ荷重の VMQ シール(42 N)を、高周速用クランクシャフトシール用として選定した。この高周速用クランクシャフトシールについて、台上エンジン試験で周速 30 m/s の条件で 500 時間の検証を行った後に、建設機械を用いた妥当性確認を行った。



a) リップ荷重とシャフト温度上昇 b) ヘリックスの有無とシャフト温度上昇

図 3-3-6 オイルシール試験機を用いたリップ荷重とヘリックスの効果の測定結果

(2) Section 6 (VMQ シールによる漏れ) ~ 7 (炭化物堆積による漏れ) の検討

VMQ シールの漏れ易い傾向 (Section 6, Leaking Tendency in VMQ Seal) とは、VMQ シールが油中のダストなどにより傷または切れを生じ易く高温での剛性が低い問題を示す。このため、高周速クランクシャフトシールの候補材料として FKM も検討したが、VMQ の -60 °C まで可能なシール性能に比べて FKM は -20 °C 以下でシール性を失うため採用できなかった。

炭化物の堆積による漏れ (Section 7, Leak by Carbon Deposit) については、エンジン油の品質とクランクシャフトシールリップ荷重ならびにヘリックスとの関係を把握するために台上エンジン試験を実施した結果を図 3-3-7 に示す。供試した 3 種類のクランクシャフトシールは、高リップ荷重と低リップ荷重のクランクシャフトシール Seal A と Seal C、そして低リップ荷重リップにヘリックスを付けたクランクシャフトシール Seal D である。供試した 3 種類のエンジン油は純正エンジン油 (Oil-1)、3.1 節に前述した米国の低品質エンジン油 (Oil-2) ならびに軽負荷用エンジン油 (Oil-3) である。高リップ荷重 VMQ Seal (85 N) は、軽負荷用の Oil-3 を用いると短時間で炭化物の付着度合い (Lip Coking Rating) が 4 に達してオイル漏れ (oil-leakage) が生じる。Oil-1 と Oil-2 を用いると漏れが発生するまで間隔は約 2 倍の 800 時間になる。低リップ荷重 VMQ Seal C (50 N) は、軽負荷用の Oil-3 でも漏れは発生しないがリップの炭化物は付着する。ヘリックス付き低荷重の VMQ Seal D (50 N) は Oil-3 でも炭化物が付着しない。ヘリックスは前述のアクティビティ図からも考えられたようにリップの潤滑油膜を厚くするため [93][95][99]、炭化物の付着が防がれる。リップ荷重を下げても炭化物付着は抑制されることが明らかになった。炭化物付着に対して純正エンジン油 Oil-1 と米国エンジン油 Oil-2 との差はないことがわかり、以降の試験では Oil-1 を用いる。軽負荷用エンジン油 Oil-3 は市場では使用されない。

高周速においてのクランクシャフトシールの漏れメカニズムは、最初にリップが油膜切れを生

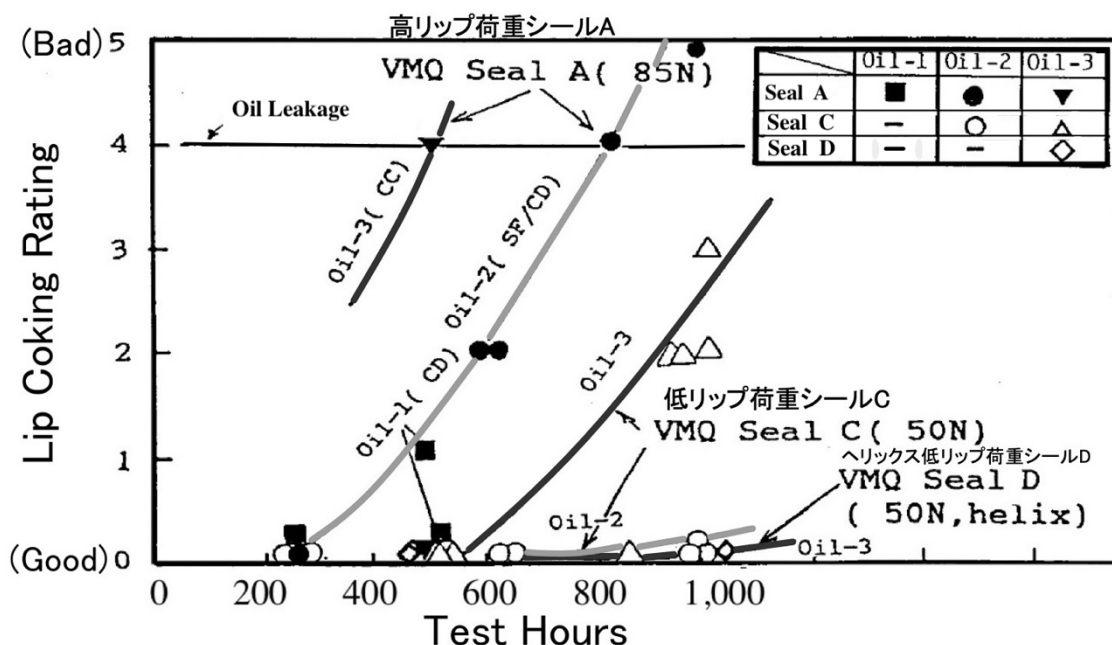


図 3-3-7 三種類のクランクシャフトシールについて三種類のエンジン油を用いた台上エンジン試験の結果

じ、このためにエンジン油の炭化物が堆積し、この炭化物量が一定量以上に堆積するとシールからの EO 漏れが生じると推定される。炭化物生成の危険は純正エンジン油にもあるが、エンジン油が具備すべき品質は多く、クランクシャフトシールのために改良する余地はない。クランクシャフトシールが、標準的なエンジン油の品質の限界を超えて使用される危険コンテキストとなったことが漏れ故障の原因である。

3.3.4 DAR に沿ったデュアルリップシールの漏れの対策

(1) Section 1 (シャフト径が大きいことによる漏れ) ~ 3 (高いリップ荷重による漏れ) までの検討

前述の図 3-3-4 に沿って対応を再考する。シャフト直径が大きい問題への対策は、シングルリップにすることで容易に解決できるが、変速装置側の改良が必要となり開発を遅らせることになる。摺動による発熱が大きいこと (Section 2, Leak by High Friction Heat) に対しては、前述のとおり低摩擦係数のゴム材料は実用されていない。シールリップの荷重が大きいこと (Section 3, Leak by High Radial Load) については高周速クランクシャフトシールの開発で得られた知見を元にデュアルリップシールの低リップ荷重化を図るようにした。デュアルリップシールの最大の課題はリップ間に生ずる負圧 (Negative Pressure between Lips) により、リップが変形してシャフトに吸い付くことである。

(2) Section 4 (負圧による漏れ) に対するデュアルリップシールの振る舞いの記述とベントチューブ付き

デュアルリップシールの開発

図 3-3-8 はデュアルリップシールのリップの振る舞いを表すアクティビティ図である。基本的にはデュアルリップシールは、変装装置 (Automatic Transmission) からの TM 油の漏れを防ぐリップ (Dual Sea Lip) を追加したものである。シールリップ (Seal Lip) とデュアルリップ (Dual Lip) によりエンジン側と変速装置側に空気が出て行くため、リップの間 (Space between Sea Lips) が負圧になってシャフトに吸盤のように吸い付く (Sack Shaft) 現象が生じる。この減圧はシャフト停止時などにリップとシャフトとの隙間が空き、不連続に空気が入って (air discrete) 解消するという不安定な状態である。小径のデュアルリップシールではリップ剛性を上げることで、吸盤状になるのを防ぐ方法が一般的である。著者らはエンジン側よりも油面が低い変速装置側のリップに孔を開けて負圧をなくす方法を検討した。大型クランクシャフトシールでは前述の福永[96]のようにエンジブロックとデュアルリップシール双方に孔を開けてリップ間の負圧を抜く方法もあるが、加工および組み立ての工数が増えることと、建設機械では外部から直接ダストが入る懸念があり採用はできない。

図 3-3-9 に著者らが開発した中型エンジン用のデュアルリップシール (外径 180 mm、幅 25 mm) の模式図を示す。リップに孔を開けるだけでは TM 油がリップ間に流れ込むことが考えられたので、リップ間にシリコンゴムチューブ (Silicone Rubber Ventilating Tube、以下ベントチューブ) を付けたデュアルリップシールを開発した[100]。リップ間に負圧が発生する箇所 (Negative Pressure Generating Place) にベントチューブを付け、自動変速機側の空気が吸い込まれて負圧の発生を防ぐ。自動変速機側の TM 油はシャフトの回転 (Shaft Rotation Direction) に伴って遠心力と風圧によりデュアルリップシールのケース内周に沿って流れるため、オイルシ

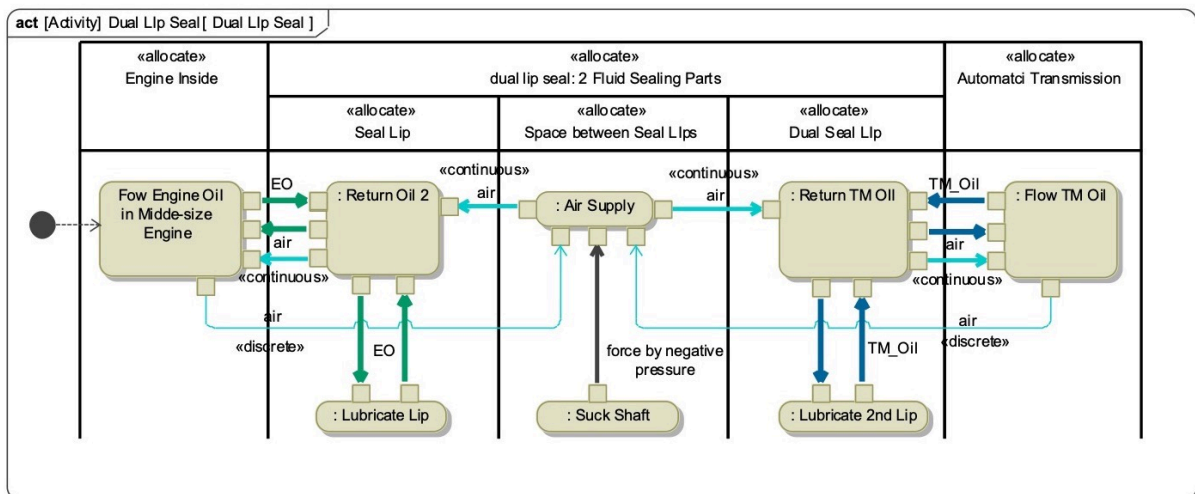


図 3-3-8 デュアルリップシールのリップの振る舞いを表すアクティビティ図

ール試験機を使って油の吸い込みがないVENTチューブの位置を決定している。これには油面高さが設計基準値 (Standard Oil Surface Level) 以下であることが前提である。

図 3-3-10 は従来のデュアルリップシールとVENTチューブ付きデュアルリップシールのオイルシール試験機による試験結果である。エンジン油は Oil-1 である。小径のデュアルリップシー

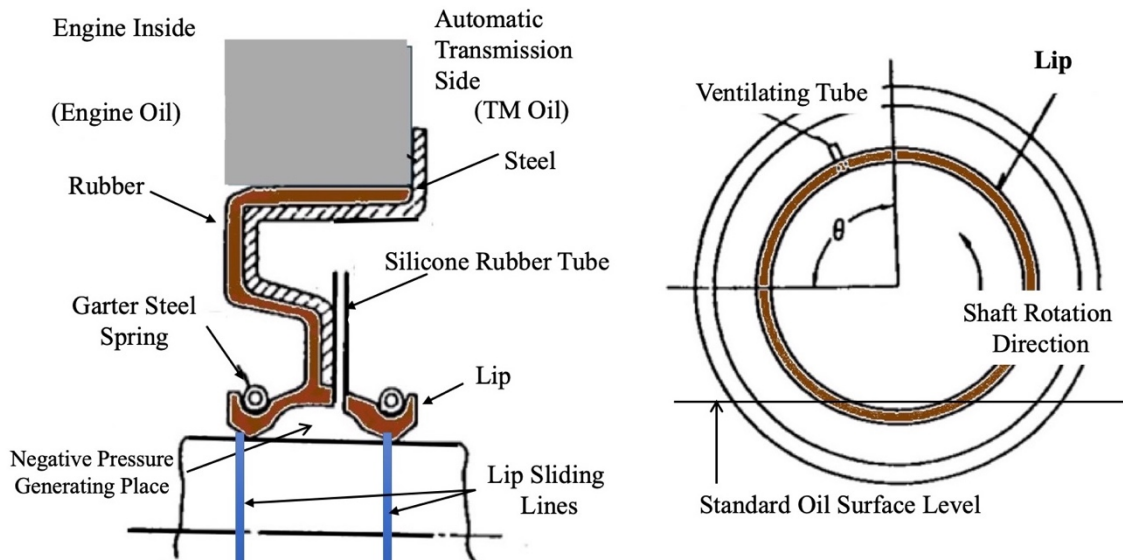


図 3-3-9 開発したVENTチューブ付きデュアルリップシール

No.	Shaft size	Seal Type	Test conditions		Test hours						
			Speed, m/s	Oil Temp., °C	0	100	200	300	400	500	
1	A	VMQ-D1 (68N)	18	80	Oil leakage, Coking						
2		VMQ-D2 (53N)			Oil leakage, Coking						
3		VMQ-D3 (59N) Ventilated tube			OK						
4	B	VMQ-D4 (42N)	16	80	Coking						
5		FKM-D5 (58N)			OK						
6		FKM-D5 (58N)	Oil leakage, Coking								
7		VMQ-D6 (45N) Ventilated tube	22	120	Blister						
					OK						

図 3-3-10 VENTチューブ付きデュアルリップシールと従来品のオイルシール試験機による結果(エンジン油:Oil-1、TM油:純正TM油)

ル (Shaft size A) においては、油温 80 °C、周速 18 m/s でも高リップ荷重のシール VMQ-D1 (68 N) と低リップ荷重のシール VMQ-D2 (53 N) は、いずれもオイル漏れが生じ炭化物付着 (Oil leakage, Coking) も生じていた。ベントチューブ付けたシール VMQ-D3 (59 N) では 500 時間オイル漏れはなくベントチューブの効果が認められた。

大径のデュアルリップシール (Shaft size B) では低周速試験 (16 m/s、80 °C) と高回転・高温試験 (22 m/s、120 °C) の試験を行った。低周速試験でも低リップ荷重のシール VMQ-D4 (42 N) が炭化物付着を生じたが漏れは (Coking) 生じていない。低リップ荷重のシール VMQ-D4 はリップ剛性が低い設計であり、負圧によりリップが容易に負圧で変形した状態になったのが炭化物付着の原因である。大径のデュアルリップシールの低周速試験 (16 m/s) ではリップ剛性が高いフッ素ゴムのシール FKM-D5 (58 N) は問題を生じないが、高周速・高温試験 (22 m/s、120 °C) では炭化物付着とゴムの膨れによる漏れ (Oil leakage, Coking and Blister) が生じた。この条件下でもベントチューブ付き低リップ荷重シール VMQ-D6 (45 N) はオイル漏れを生じなかった。

このベントチューブ付きデュアルリップシール (VMQ-D6) を中型エンジン用として選定し、台上エンジン試験により耐久性の検証を行った。その後、建設機械にベントチューブ付きデュアルリップシールを装着した中型エンジンを搭載して市場試験による妥当性確認を行った。

(3) Section 5 (ヘリックスなしによる漏れ) ～6 (VMQ シールによる漏れ) の検討

ヘリックスと VMQ シールの低剛性の問題 (Lowering Stiffness of VMQ) については、ブルドーザと油圧ショベルを用いた市場における妥当性確認で検討すべき事項となった。ブルドーザが傾斜地での作業中に、上記のベントチューブ付きデュアルリップシールから TM 油のエンジン側への移動、すなわちオイル漏れを発生した。トルクコンバータの前後の傾斜が一定角度を越えると油面が急に高くなり、油面がクランクシャフト軸の中心までになることがわかった。そこで、エンジンを前後に傾ける台上エンジン試験を図 3-3-11 のように実施した。この台上試験装置では自動変速機を装着する代わりに接続部のトルクコンバータ (Torque Converter) を付けて試験を行っている。試験結果を図 3-3-12 に示す。エンジンの傾斜角度 (Engine Angle) が水平から 10 ° まではオイル移動 (oil-transfer、漏れ) はなかったが、20 ° 以上の傾斜角度では 1 時間に 33～34 ml のオイル移動があり、ブルドーザでのオイル漏れ故障を再現できた。そこで、ベントチューブ付きデュアルリップシールのエンジン側リップにヘリックス (Helix) を付けた試作品を、傾斜角 30 ° でエンジン試験するとオイル移動はゼロになった。しかし、別に行なったオイルシール試験機を用いた 3 回の検証試験で、毎回油中のダストがベントチューブに詰まった。ベントチューブの詰まりで発生した負圧によりリップが吸盤のように変形していることも確認された。これはヘリックスの強いポンプ力 (著者らの実測によればヘリックスのないリップの 10 倍) により

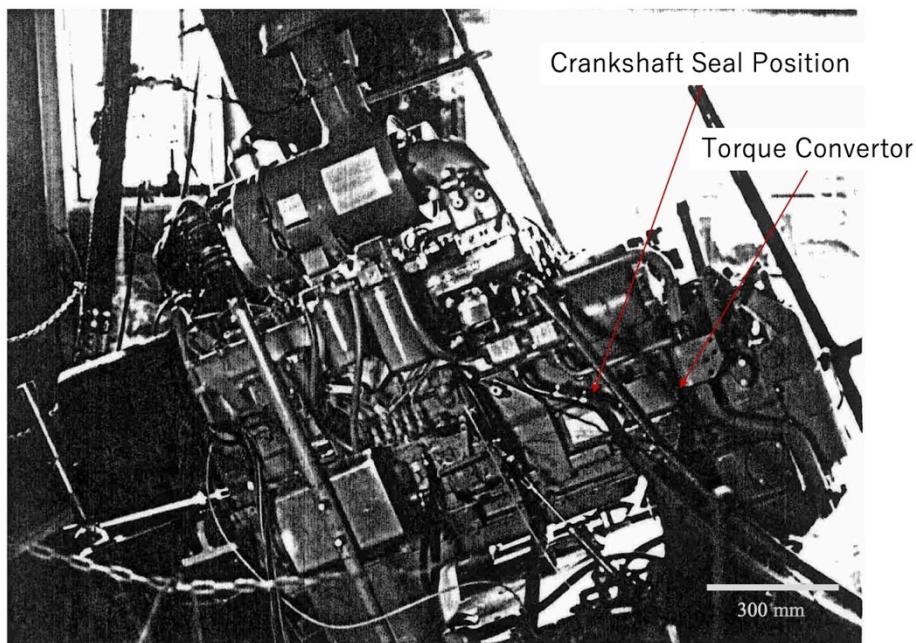


図 3-3-11 傾斜台上エンジン試験

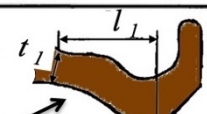
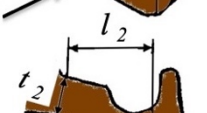
Engine angle	Bonded dual-lip seal type	Oil-transfer, ml/hr
Horizontal	Ventilating tube	0
10°		0
20°		34
30°	Helix	33
	Inducing outside air	0
	Flywheel housing	0
	Stiff lip  Previous lip $T_1/l_1=0.3$  Stiff lip $T_2/l_2=0.5$	0

図 3-3-12 傾斜台上エンジン試験におけるベントチューブ付きデュアルリップシールのオイル移動(漏れ)量の測定結果

オイルと同時にダストを吸い込むためであり実用化できないことを見い出した。次にフライホイールケースの外までベントチューブ (Inducing outside air) を延長して傾斜角 30° でエンジン試験するとオイル移動はなくなるが、加工と組み立てが難しく実用化できない。リップ長さ ($l_1 \rightarrow l_2$) を短くしてリップ厚さ ($t_1 \rightarrow t_2$) を増やして剛性を上げたリップ (Stiff lip) にベントチューブを付けたデュアルリップシールは傾斜角 30° でもオイル移動は生じないため、これを最終製品の候補とした。

この一連の実験から、デュアルリップシールではヘリックスはオイル漏れを生じる危険コンテキストができること、VMQ シールの剛性不足によりオイル漏れの危険コンテキストが生じることを見い出した。DAR を用いた検討ができていれば、妥当性確認の前に漏れ故障を防ぐことができたと考えられる。リップの剛性を上げて対策したデュアルリップシールは、再度ブルドーザを使った妥当性確認を行って実用化した。

(4) Section 7 (リップへの炭化物付着による漏れ) に対する設計対策

エンジン油の炭化物付着は、前述のように 40 °C 以上のシャフト温度上昇で生じるために、これが油膜切れによると推定される。そこで、著者はすべり軸受の油膜切れである焼付き限界を表す PV 値[10]を用いて、クランクシャフトシールのリップの限界負荷の計算を試みた。高速クランクシャフトシールとデュアルリップシールを含めて、クランクシャフトシールのリップ温度上昇を式(3-1)のように表すことができる。

$$\Delta T = f \times (\alpha Pr + \beta Pn + \gamma Pg) \times V/d \quad (3-1)$$

ここで ΔT はリップ温度上昇 (°C)、 f は摩擦係数、 Pr は初期の単位周長さ当たりのリップ荷重 (N/m)、 Pn は負圧 (N/m²)、 Pg はクランクケース内の圧力 (ブローバイガス圧、N/m²)、 V はシャフト外径周速 (m/s)、 d はリップ摺動幅 (m) である。 α はリップの荷重保持の係数、 β と γ はリップ形状に関する係数である。ダストリップ付きのクランクシャフトシールでダストリップとシャフトに隙間がない場合の Pn は 8 kN/m² とし、デュアルリップでは 20 kN/m² とする。ただし、本論文では摩擦係数 f の測定はできなかったため同一と仮定したが、建設機械メーカーの先行研究では 0.20 前後である。また、ヘリックスの効果についてはこの式に組み込めていない。

この式の考えに基づいて図 3-3-13 に、VMQ と FKM のクランクシャフトシール (Single-lip、○または●印) とデュアルリップシール (Dual-lip、△または▲印) の様々なエンジンによる試験結果を PV 線図としてまとめる。図中の総リップ荷重 (Total radial load、 P) は $\alpha Pr + \beta Pn + \gamma Pg$ である。クランクシャフトシールの漏れが生じる限界 PV 値は約 3,000 になり、これを越えるとクランクシャフトシール、デュアルリップシールやゴム材質 (VMQ と FKM) の違いもなくオイル漏れが生じる。このことからクランクシャフトシールの使用条件の限界は、エンジン油の油膜切れによると推定する根拠になる。従来、デュアルリップシールに発生する負圧に対してはリップ剛性の増加により対応していたが、中型エンジンの 20 m/s を越える周速に対しては負圧を抜くことで

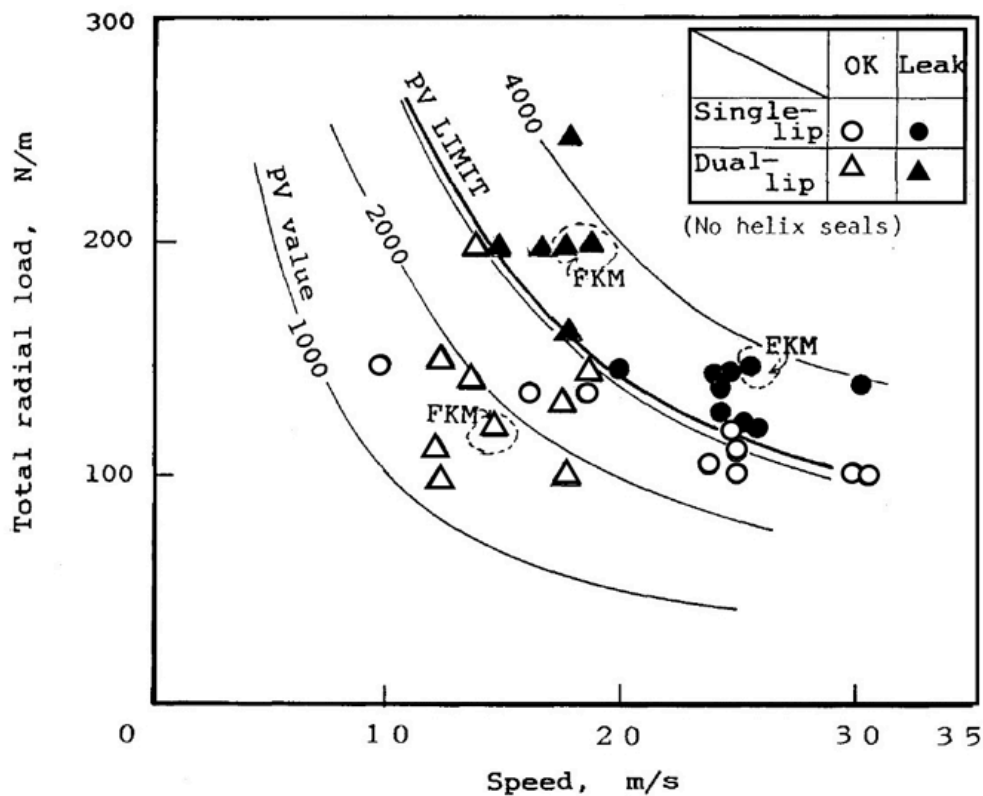


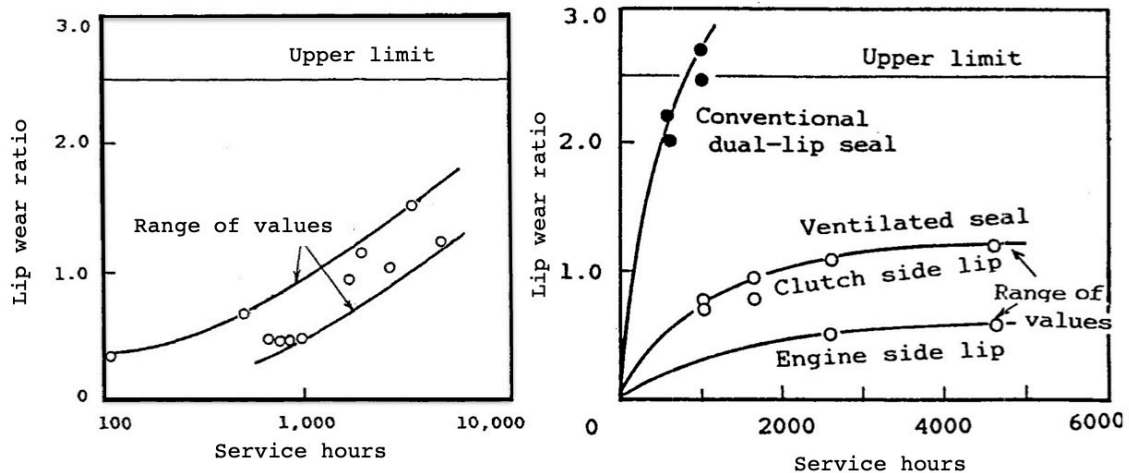
図 3-3-13 種々のクランクシャフトシールのエンジン試験結果の PV 線図による整理
 (シール材質は FKM を除いては全て VMQ である、供試エンジン油:Oil-1)

総リップ荷重を低減することが必要であることがわかる。大型クランクシャフトシールでは試作するのにコストが掛かるが、PV 値による限界算出によって設計時点でクランクシャフトシールとデュアルリップシール双方の炭化物付着による漏れを防止できる。

3.3.5 両クランクシャフトシールの市場稼働車による妥当性確認

大型エンジン用に改良した高周速クランクシャフトシールと、ベントチューブ付きデュアルリップシールは実用化後に、市場で運転された建設機械エンジンから回収してクランクシャフトシールの状態とリップ摩耗量を測定した(図 3-3-14)。高周速クランクシャフトシールについては、回収した 10 台分についてはオイル漏れあるいは炭化物の付着はなく、リップの摩耗量の推移から目標とした 10,000 時間以上の寿命を越えると確認できた。

中型エンジン用のデュアルリップシールについては、従来のデュアルリップシールが 1,000 時間以内でリップ摩耗の限界に達したのに対して、回収した 4 台分のベントチューブ付きデュアルリップシールはエンジン油側リップも自動変速機側リップ(Clutch-side lip)も摩耗量の増加は少なく 10,000 時間以上の寿命の可能性が確認できた。



a) ホイールローダなどで使用された高周速クランクシャフトシールのリップ摩耗量の推移

b) ブルドーザで使用されたデュアルリップシールのリップ摩耗量の推移

図 3-3-14 市場稼働の建設機械エンジンから回収した高周速クランクシャフトシールとベントチューブ付きデュアルリップシールの妥当性確認

3.3.6 まとめ

本節では、2種類のクランクシャフトシールの漏れの原因について解析して対策を行なった。いずれのオイルシールの漏れも、エンジン油のリップ先端の油膜切れにより生じる炭化物の堆積が原因であることがわかった。高周速クランクシャフトシールについてはリップ荷重の低減とヘリックス追加により対策し、デュアルリップシールについては負圧を防ぐベントチューブを開発して対策ができた。さらに、短時間の台上エンジン試験でのリップ温度測定により、クランクシャフトシールの耐久性を評価する手法を開発した。また、PV値を用いたクランクシャフトシールの設計手法を開発した。

システムズエンジニアリングのアプローチを用いて再考した結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 両クランクシャフトシールのリップの作用は、SysMLのアクティビティ図を用いて可視化できた。これにより、高周速クランクシャフトシールのヘリックスの効果を確認することにより、ヘリックスの強さ(逆ネジの角度)を調整してより効果の高い対策も検討できると考えられる。デュアルリップシールについては、リップ間に生ずる負圧のメカニズムを明確に示すことができた。この知見を共有することで、オイルシールメーカーとの協力によりベントチューブ開発を短期間で行えたものと考えられる。
- 2) DARを用いることで高周速用とデュアルリップ用の両方のクランクシャフトシールの漏れメカニズムを解析できた。

- 3) この DAR からは、高周速クランクシャフトシールのダストリップの一時的な負圧発生、最適な材質の検討が抜けていたことがわかった。デュアルリップシールでは、DAR による検討段階でヘリックスとリップ剛性についての検証の必要性がわかるため、建設機械を使った妥当性確認で生じた TM 油漏れの問題は事前に防ぐことができたものと考えられる。

第4章 生分解性作動油による油圧システムの故障の解析と対策

近年の建設機械では作動油が河川などに流出して環境汚染を引き起こすことが欧州で大きな問題となっている。そのため、欧州では自然界の微生物により短期間に分解して炭酸ガスと水になる生分解性作動油(以下バイオ油)の使用が、1990年代より環境当局の行政指導により義務付けられている。2章でも述べたようにバイオ油は潤滑油として持つべき多くの品質が低く、バイオ油が起因となる故障が発生し始めていた。

このような過去に例のない規制に対応するために著者は、自然環境を守るためのバイオ油の使用義務化に対応することを建設機械メーカーの方針とする提案を行い、全社的なプロジェクトチームを立ち上げてバイオ油に適合する油圧システムの開発を行った。この結果、半年後に短期対策としてバイオ油の使用マニュアルを作成して配布し、予定どおり5年以内に長期対策として油圧システムを構成する多くのコンポーネントを改良して新しい建設機械に搭載することができた。しかし、一連の対策後もバイオ油による油圧バルブの作動不良の問題が起きていた。

本節では、システムズエンジニアリングアプローチに基づき SysML を用いて油圧システムの基本メカニズムを記述した上で、バイオ油を起因とする作動不良に至るメカニズムを解明し、この解析により作動不良を生じさせないための対策を導き出している。次に SysML の安全に特化した拡張プロフィールである SafeML を用いて、作動不良のコンテキストおよびその防御について記述し、最も効果的な対策を選定できたことを述べる。この内容は学術誌 *Synthesiology* の論文として掲載[63]されている。一方1990年代に実施した研究開発の内容は、SAE で論文発表し学術誌[64]-[66]に掲載されている。

4.1 欧州バイオ油規制に対する戦略の構築

(1) 欧州の環境規制当局の意図とバイオ油の建設機械への影響

建設機械では作業者が油圧システムの作動油の交換を作業現場で行う際、あるいは作業中にホースを岩などに当てて破損させて高圧のオイルを飛散させた際に、周囲にオイルが流出して環境汚染を引き起こすことが問題となる。具体的には飲料水への油膜汚染、魚の死亡あるいは森林と畑の植物の枯れなどである。そのため、1990年代に入り、ドイツ、スイスならびにオーストリアで建設機械に対して自然界の微生物により短期間に分解して炭酸ガスと水になる性質をもつバイオ油の使用が義務付けられた[101]。これはドイツの水管理法[102]などに基づく地方政府の行政指導[103]によるものである。建設機械に対するバイオ油義務化は、現在は広く欧州全域に影響を与えて環境保護地域に普及し[101]、2002年にはバイオ油の品質規格がISO規格となっている[104]。また、日本のエコマークに相当する2011年のEUエコラベルでは、バイオ油に対して40項目以上の環境毒性試験に合格した製品のみを認証している[105]。

バイオ油には菜種油(グリセリンの脂肪酸エステル)または合成ポリオールエステル(以下合

成エステル)などの主成分(以下基油)が使われるが、これらの基油は微生物による酵素反応で分解され、その微生物の栄養素(生体構成成分)として取り込まれる(資化と言われる)[106]。菜種油と不飽和脂肪酸を含む合成エステルは、二重結合を含むために酸化安定性が低い。酸化安定性が高い飽和脂肪酸の合成エステルを基油に用いた市販バイオ油であっても、石油系作動油に比べて酸化安定性は劣る。なぜならば厳しい環境規制により添加剤[101]の配合に大きな制約があるため、石油系作動油に使用されるヒンダードフェノールおよび芳香族アミンの酸化防止剤の配合の量に制約があり、最も効果の高いジアルキルジチオリン酸亜鉛(以下ZDTP)酸化防止・焼付き防止剤は水性環境有害性[107]の観点から配合できない。すなわち石油系作動油はオイル洩れがないことが前提であるが、バイオ油は河川など自然環境に洩れることを前提に開発されている。

合成エステルの基油はその種類によっては、圧力による粘度増加(以下高圧粘度[108])が石油系基油よりも小さい[109][110]。そのため油膜が薄くなり、油圧ポンプと油圧モータの軸受メタルの焼付きを起こす欠点がある。この油膜の薄さを補う摩耗防止剤の配合には大きな制約がある。これらの理由から、後述のようにバイオ油は酸化安定性が低く劣化し易い、油膜が薄いなどの多くの問題がある。複雑な油圧システムをもつ建設機械に、何の対策もせずこのバイオ油を採用すると不具合が発生することになる。

(2) バイオ油対応のプロジェクトチームとその戦略

欧州におけるバイオ油に関する建設機械の使用環境と利害関係者の関係を図 4-1 の模式

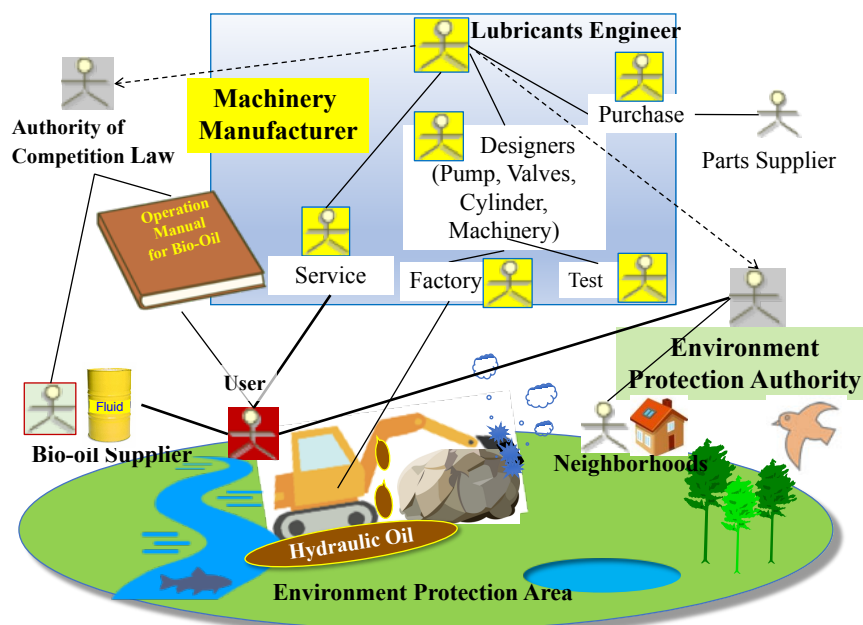


図 4-1 欧州における建設機械の使用環境と利害関係者の模式図

(実線:直接の関係、破線:情報収集)

図で示す。次第に厳しくなる環境規制当局 (Environment Protection Authority) からのバイオ油の使用要求と近隣住民 (Neighborhoods) からの圧力も加わり、建設機械のユーザ (User) はサービス員 (Service) を通じて建設機械メーカ (Machinery Manufacturer) に早急な対応を迫っていた。著者 (Lubricants Engineer) はバイオ油の全社プロジェクトを商品企画検討会 (5.1 節で後述) で提案して承認をもらい、プロジェクトの立ち上げを行った。プロジェクトチームは著者がリーダーとなり、設計部門 (Designers)、試験部門 (Test)、サービス部門 (Service)、工場部門 (Factory)、購買部門 (Purchase)、欧州本社の責任者ならびに担当者達をメンバーに加えて、部品メーカ (Parts Supplier) の協力も得ながら計画を立案して推進した。著者が立てた戦略は、短期対策として半年以内にバイオ油の使用マニュアル作成をして建設機械メーカとしてバイオ油の使用を保証すること、長期対策として 5 年以内にバイオ油に適合する油圧システムを新型の建設機械に搭載することである。この戦略には欧州の競合メーカに対して先手を打ってバイオ油の全面的な採用を進め、建設機械メーカの欧州市場での存在感を高める狙いもある。図 4-2 はバイオ油が湖沼に漏れた時の生分解の状態を模した著者らの試験結果である。バイオ油は短期間で自然に分解して油膜 (Disappearance of Oil-film) がなくなり、建設機械の作動油の漏洩による環境汚染を防ぐことがわかる。

4.2 欧州バイオ油の品質の調査

プロジェクトチーム結成に先立って、著者は欧州で市販されているバイオ油 20 銘柄以上の

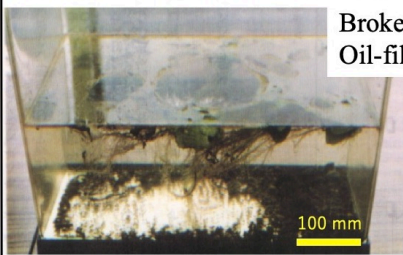
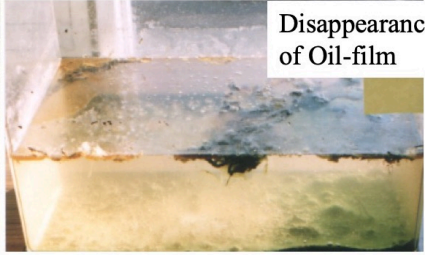
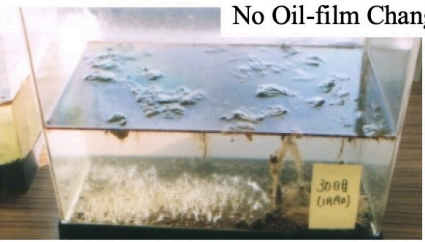
	After 8 days	After 1 month
Bio-oil	 Broken Oil-film 100 mm	 Disappearances of Oil-film
Petroleum Hydraulic Oil	—	 No Oil-film Change 30日 (14日)

図 4-2 バイオ油と石油系作動油の水面上での状態変化

(水道水に土、水草を入れて供試油を 5 mm 厚さにして屋内自然光下で静置)

品質について徹底的な調査を行っていた。主な調査項目は酸化安定性、油膜強度(摩耗防止性)、ゴム膨潤防止性、防錆性、青銅に対する腐食防止性、湿式ブレーキの摩擦係数、石油系作動油との混合安定性などである。この試験結果の一部を以下に示す。

図 4-3 は市販の菜種油バイオ油 (Rape Seed Bio-oil, VO-A)、市販の合成エステルバイオ油 (Synthetic Ester Bio-oil SE-A)、石油系作動油 (Petroleum Hydraulic Oil, HO46) と後述する開発バイオ油 (developed Bio-oil, S-7) の酸化安定度試験[111]の結果である。油中の酸化生成物の量を示す酸価 (TAN) の経時的変化を示す。この試験条件では石油系作動油 HO46 と開発バイオ油 S-7 はほとんど酸化しないので、油中の TAN の変化はない。これに対して菜種油バイオ油 VO-A は数時間で TAN が急増し著しく酸化することがわかる。合成エステルバイオ油 SE-A は VO-A よりは酸化しにくい、150 時間以降に TAN が増えて酸化し始める。実際に欧州市場では菜種油バイオ油が作動油タンク内で短期間に酸化して黒変する問題が報告されている。

図 4-4 は市販の菜種油バイオ油 (Rape Seed or Vegetable Bio-oil, VO-A~C) と市販の合成エステル SE-A と石油系作動油 HO46、開発バイオ油 S-7 について、黄銅プレートと焼入れ鋼を用いた摩耗試験の結果である。菜種油バイオ油はいずれも摩耗防止性は石油系作動油なみであるが、合成エステル SE-A は規格値 (Upper Limit) を上回る過大な摩耗量を示す。市販バイオ油の摩耗防止性でも品質に大きな幅があることがバイオ油の特徴である。欧州市場でもバイオ油による油圧ポンプの異常摩耗が報告されている。

図 4-5 はゴムの浸漬試験[112]の結果である。膨潤しやすいニトリルゴム (以下低ニトリル

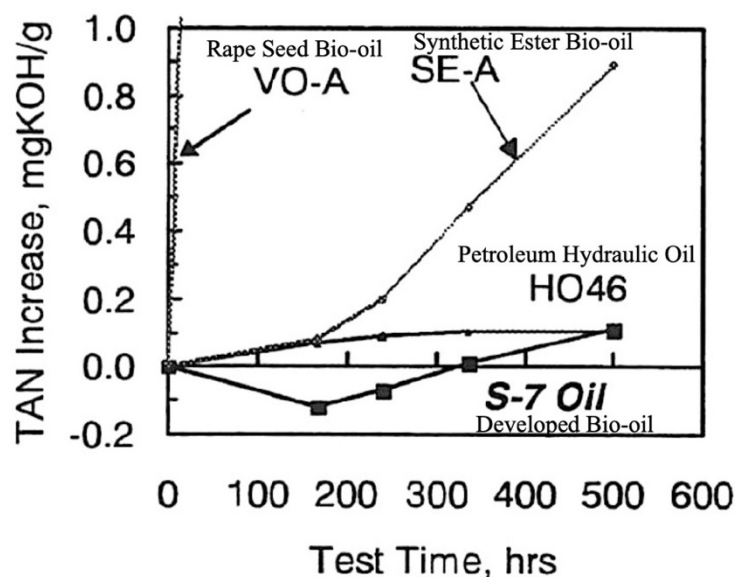


図 4-3 市販バイオ油の JIS 酸化安定度試験を用いた 100 °C での酸化試験結果

NBR)を4種類の菜種油バイオ油(VO-A~D)、4種類の合成エステルバイオ油(SE-A~D)と石油系作動油 HO46、開発バイオ油 S-7 に浸漬した。この試験では菜種油バイオ油の VO-D と合成エステルバイオ油 SE-A が限界値(Lower Limit and Upper Limit)を大きく超え、膨潤による体積増加(Volume Change)が生じてゴムの硬度(Hardness Change)は低下する。このため欧州では油圧シリンダ用シールと油圧ホースのゴム硬度の低下によるオイル漏れの問題が発生していた。

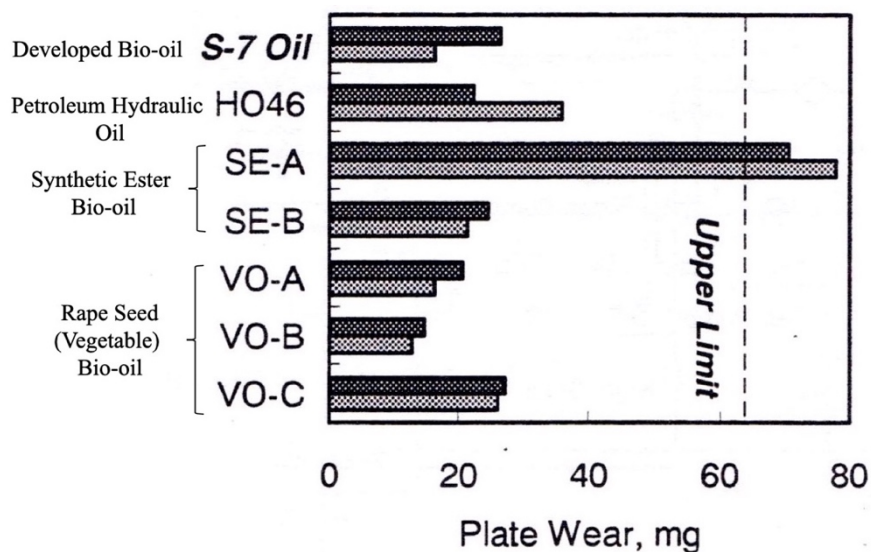


図 4-4 市販バイオ油の黄銅に対する摩耗試験の結果
(往復摺動試験:1.5 m/s、80 °C、1 時間)

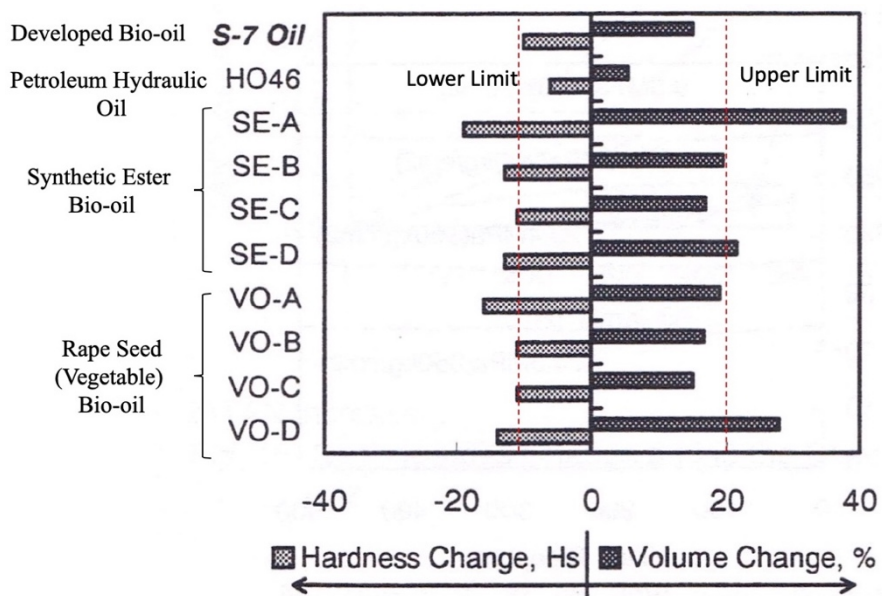


図 4-5 市販バイオ油の低ニトリル NBR の浸漬試験の結果(120°C、70 時間)

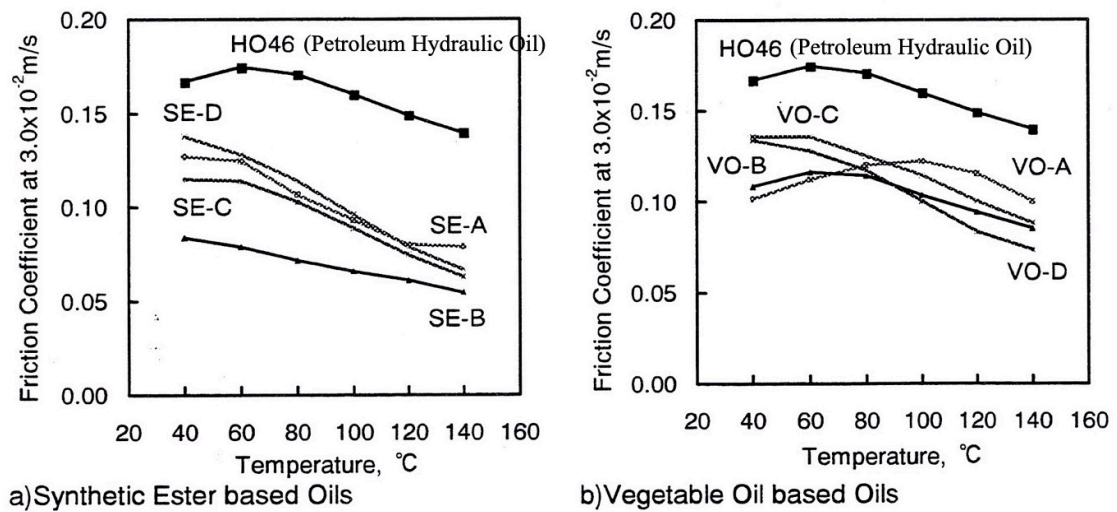


図 4-6 市販バイオ油中のペーパー摩擦材の摩擦係数の測定結果

図 4-6 は油圧モータ中に内蔵されている湿式の駐車ブレーキへのバイオ油の影響を調べた結果である。著者らが開発したマイクロクラッチ試験[113][114]を用いて摩擦係数 (Friction Coefficient) を測定した。合成エステルバイオ油 SE-A～D、菜種油バイオ油 A～D いずれも石油系作動油よりも大幅に摩擦係数が低く、駐車ブレーキが効かない危険性がある。台上油圧モータ試験でも合成エステルバイオ油は石油系作動油の 1/2 のブレーキトルクしかなく、駐車ブレーキのトルク容量が基準に満たないことがわかり早急な短期対策が必要であった。

この他に明らかになったバイオ油の品質の問題点は、鋼板に錆を発生すること、すべり軸受に用いられる青銅合金の腐食を起こすこと、石油系作動油と反応して金属石鹸の微粒子を生じることである。

これらの調査から、酸化安定性、摩耗防止性、ゴム膨潤防止性、摩擦係数などほとんどの項目で低品質となる合成エステル SE-A を、検証および妥当性確認で用いる潤滑油類に危険源として選定している。この合成エステル SE-A は、建設機械メーカーの試験部門だけでなく、部品メーカーにも提供し、検証と妥当性確認に使用してもらうこととした。

4.3 欧州バイオ油に対応する短期と長期の対策のシナリオ

バイオ油を使用可能とする油圧システムを開発する際には、特性要因図、FTA、FMEA など従来の手法を用いることが考えられる。これらの解析に基づき、バイオ油に適合する建設機械を構成する油圧システム中の機器(以下サブシステム)を、著者とプロジェクトチームの各責任者および担当者が中心となり開発することにした。バイオ油の短期対策としてのバイオ油の使

用マニュアルの開発は、それぞれの品質の問題に対して建設機械での使用方法を定め、市販バイオ油の銘柄を品質毎に区分した。この短期対策の実施は、長期対策を講じることができるまで継続した。長期対策としては、建設機械の油圧システムのコンポーネント(以下サブシステム)の技術にすることが多数を占める。これらの課題については、バイオ油に起因する故障の原因を解析して対策方法を導き出した。

表 4-1 はバイオ油の品質上の問題点 No.1～6 と、それぞれに対してプロジェクトチームが計画を作り上げて実施した短期対策 (Short-term Countermeasure) と、バイオ油に適合するサブシステムを開発するため計画を作り上げて実施した長期対策 (Long-term Countermeasure) をまとめたものである。前述のバイオ油の品質の調査結果と市場での問題点に基づいてマニュアル (Machinery Operation Manual for Bio-Oil Use and Recommendation of Bio-oil Brands) を検討した。短期対策として低品質のバイオ油銘柄の使用禁止も検討したが、現地バイオ油メーカ (Bio-oil Supplier) が競争法当局 (Authority of Competition Law) へマニュアルの競争法抵触を訴えるおそれがあるため実施しなかった。このため表 4-2 のように、バイオ油の品質毎 (Quality Grade) に、運転時の油温・油圧 (Oil Temperature, Pressure) の制限、オイル交換時間の短縮 (Oil Change Interval) ならびに品質等級毎の推奨銘柄についてのマニュアルを配布して、ユーザに対応を任せる方策を取っている。ユーザはこの推奨を参考として品質等級 3 の銘柄を選ぶようになり効果は得られている。

近年、欧州以外の豪州などの一部地域または国内でもバイオ油の使用を要求するユーザが一部にあったために、日本建設機械施工協会 (Japan Construction Machinery and Construction Association、以下 JCMA) で表 4-3 に示すように建設機械用のバイオ油規格 (JACMAS BO Standard) を 2004 年に開発した[45]。前述の JASO EO の規格制定の仕組みをそのまま用いている。品質は前表 4-2 の品質等級 3 以上として、油圧システムに故障が生じないようにしている。著者 (Author) は本規格作りの委員長であり、油圧ポンプおよび湿式ブレーキの試験方法の資料を提供した。国内建設機械メーカ (Japanese Construction Machinery Manufactures) は油圧ポンプ試験、石油メーカ (Japanese Oil Suppliers) は潤滑油試験方法などを提供した。自動車メーカ (Japanese Car Manufactures) と海外石油メーカ (Global & Asian Oil Suppliers) は、米国 SAE アジア委員会 (SAE Asia Committee) での規格の要求の検討 (Requirements in Discussing Items) を通して規格制定に関わっている。JCMA のバイオ油規格の運用 (Utilization of JACMAS BO Standard) の方法は、ユーザへの規格適合バイオ油を推奨することと、規格に適合する純正バイオ油 (For Genuine BO and Recommendation to User) を開発することである。ユーザは推奨するバイオ油を使用して (Use JCMA BO) 油圧システムの故障を防ぐことができる。この規格のバイオ油は、国内では水上工事に使用する建設機械あるいは工事用船舶に使用されているが普及は今後になるものと考えられる。

表 4-1 バイオ油の品質上の問題点とプロジェクトチームが実施した短期と長期の対策

No.	Required Lubricant's Performance	Bio-oil's Quality	Field Failure	Main Failure Cause	Countermeasures		Remark
					Short-term	Long-term	
1	Antiwear	Poor	Bearing Metal Seizure of Pump	Low Base Oil Viscosity in High Pressure, Low Content of Antiwear Additive	Yes	Expanding Bearing Width	Yes: Machinery Operation Manual for Bio-Oil Use and Recommendation of Bio-oil Brands
2	Anti-oxidation	Poor	Oil Color Change	Nature of Synthetic Ester and Rape Seed Oil	Yes	No	
3	Friction Coefficient	Too Low	Reduction of Parking Brake Torque	Nature of Synthetic Ester and Rape Seed Oil	Yes	New Brake Material	
4	Rubber Compatibility	Poor	Oil Leak from Pump Seal, Hose Breakage	Strong Affinity of Ester with Rubber Material	Yes	Change Rubber Material	
5	Compatibility with Petroleum Hydraulic Oils	Generate Precipitation	Filter Plugging and Oil Color Change	Chemical Reaction between Synthetic Ester and Petroleum Oil Additive	Yes	Factory-fill of Bio-Oil	
6	Anticorrosion for Bronze Bearing	Poor	Bronze bearing Corrosion in Pump	Active Sulfur Additive	Yes	Improve Bronze Composition	
7	Antirust	Poor	Hydraulic Tank Rust	No Antirust Additive	Yes	Antirust Treatment	

表 4-2 バイオ油の品質等級付けと推奨する運転条件

Quality Grade	Base Oil	Oil Temp., °C	Pressure, MPa	Oil Change Interval, hrs	Parking Brake
1	Rape Seed Oil	-10 + 80	32 max.	1,500 max.	Need to Stick Caution Plate
2	Rape Seed Oil or Synthetic Ester		35 max.	3,000 max.	
3	Synthetic Ester	-30 + 100	42 max.	5,000 max.	
4					

表 4-3 JCMAS バイオ油の規格作りの利害関係者、制定活動ならびに利用方法

No.	Stakeholders		JCMAS Bio-Oil (JCMAS BO) Standard				
			Providing Test		Discussing Items	Utilization of JCMAS BO Standard	
1	Author		Pump Test, Wet Brake Test and Related Tests	-	-	All	For Genuine BO
2	Japanese Construction Machinery Mfr.		-	Pump Tests	-		Recommendation to User, For Genuine BO
3	Japanese Oil Suppliers		-	-	Oil Tests		Manufacturing JCMAS BO
4	Japanese Car Mfr.		-	-	-	Requirements	Use as Reference
5	SAE Asia Committee	Global & Asian Oil Suppliers	-	-	-		Manufacturing JCMAS BO
7	User		-	-	-	-	Use JCMAS BO

長期対策であるバイオ油を使用可能とするサブシステムの開発は、次に述べる対策方法を決めて全ての機種に対して実施した。No.1 の油膜強度が低い問題 (Antiwear) に対しては、複雑な品質確認をしなくて済むように、軸受メタルの幅 (面積) を拡大する (Expanding Bearing Width) 設計変更を行った。No.2 の酸化安定性の低さについてのサブシステムの改良と開発については、有効な対策は見い出せなかった。これについては後述する。No.3 の低くなり過ぎる湿式駐車ブレーキのトルク (Friction Coefficient, Reduction of Parking Brake Torque) に対しては、ブレーキ材メーカーと共同でバイオ油中でも高いトルクを発生する材料 (New Brake Material) を開発して採用した。No.4 のバイオ油によるゴムの膨潤 (Rubber Compatibility) は、クロロプレンゴム (CR)、低ニトリル NBR などの強度を著しく低下させる[66]。そこで、これらのホースまたはシールなどゴム部品について、耐油性の高い高ニトリル NBR あるいは水素化 NBR (HNBR) などの材質に変更した (Change Rubber Material)。No.5 の石油系作動油の添加剤との反応で生じるフィルタ詰まり (Compatibility with Petroleum Hydraulic Oils) に対しては、短期対策のバイ

オイル使用マニュアルに記載したオイル交換手順の説明で問題を防ぐことができると考えられた。しかし、現場での石油系作動油からバイオ油に交換する作業では、両オイルが混合して白濁やフィルタ詰まりが発生したので長期対策の計画が必要となった。このため、バイオ油使用を希望するユーザ向けに、予め工場ではバイオ油を充填して出荷する(Factory-fill of Bio-Oil)ことにより石油系作動油との混合を防ぐことを長期対策として実施した。No.6 の青銅の腐食(Anticorrosion for Bronze Bearing)については、その金属組成に錫などを加えて軸受け性能を維持しながら硫黄系添加剤に対する耐食性を改良した(Improve Bronze Composition)[115]。No.7 のバイオ油の防錆性(Antirust)不足については作動油タンク内部への防錆塗装(Antirust Treatment)を施している。

バイオ油の酸化安定性の低さについては、表 4-4 のように当初菜種油の変色(Oil Color Change、黒色化)だけが市場での問題になっていた。鉛青銅軸受の鉛溶出(Lead Corrosion of Bronze Bearing)の可能性[72]も考えられたが市場での故障はなかった。このため、著者らはユーザへのオイル交換時間(Reduction of Oil Change Interval)の指導で問題はないと判断していた。長期対策として著者らは、品質等級 4 を目標とした酸化安定性の高いバイオ油(前述の開発バイオ油 S-7)を日本国内で開発したが[65]、欧州の環境毒性規制[105]に長い間対応できず欧州への導入ができなかった。その後、欧州の石油メーカーとグローバル純正油として新しく品質等級 4 のバイオ油を共同開発して導入している。

上記の一連の対策後にも次の問題が起こっている。建設機械の現場では、バイオ油による油圧バルブの作動不良が発生し、油圧ポンプの圧力不足、油圧シリンダあるいは油圧モータなどの誤作動が問題となっていた。これらに対する調査結果からは、外部侵入する砂塵と内部で発生する摩耗粉(以下油中ダスト)による油圧バルブの固着と摩耗が原因とされたものの、バイオ油との直接的な関係性は未だ解明されていない。バイオ油の酸化安定性が低いことで、油に不溶のラッカーが生じ、油圧バルブにこれが付着して作動不良を起こすことも考えられたが、作動不良を生じた油圧バルブの検査結果ではラッカーの付着はなかった。結果的に、作動不良の現象は収まったように見えたが、油圧バルブの作動不良の原因が解明されないままになっ

表 4-4 バイオ油の酸化の問題の原因と短期対策

Probability of Failure	Failure Cause	Generation of Failure in the Field	Short-term Countermeasure
Oil Color Change	Unsaturated Base-oils, Inadequate Anti-Oxidant Content	Yes	Reduction of Oil Change Interval (Ref.: Table 4-2)
Lead Corrosion of Bronze Bearing	Lead Corrosion by Oxidation Products	No	

た。これによりバイオ油に適合する建設機械の開発が完了するには至らなかった。

4.4 システム全体の原因説明と対策決定

様々な危険源を持つ低品質のバイオ油が、多数のサブシステムから構成される油圧システムが仕様通りに動作することに起因する故障は複雑であるため、従来の手法では原因究明が困難である。そこで、システムズエンジニアリング[5]のアプローチに基づき SysML によるシステムモデルの記述を用いて、この未解決の問題の解析と対策の導出を試みた。油圧システムの基本メカニズムについて SysML によるシステムモデルの記述した上で、バイオ油を起因とする作動不良に至るメカニズムを解明する。これにより作動不良を防ぐ対策案を導き出す。

システムのリスクに関する安全分析と SysML を統合する試み[116]-[119]が、メカトロニクス、ロボット、航空機などの分野で行われている。この中で Biggs ら[119]は SafeML を用いることを提唱している。SafeML は SysML の安全情報に特化した拡張プロファイルであり、システムのリスクおよびそのリスクに対する対策手段、リスク管理の結果を明確に記述できる[120]。この SafeML を用いることにより作動不良の危険コンテキストと前述の対策について記述できる。ここで明確になった作動の安全性に関わる項目から安全スコア(後述)を算出して最終対策を決定している。なお、SafeML の図に用いる表記は、SysML と同様に英語記述とする。

欧州のバイオ油規格と、建設機械用油圧システムに欧州のバイオ油を使用するために生じる要求との関係を、図 4-7 に SysML の要求図を用いて示す。EU エコラベルなどによるバイオ油への要求(European Bio-oil Specification)は、所定の環境性能を持つバイオ油基油(Use of Bio-Base Oil)と制約された添加剤(Additive Limitation)を用いることである[100]。この基油の特性からは油圧システムに対して5項目の要求((1) Bearing Improvement against thin Oil-film, (2) Proper Oil Change, (3) Brake Torq. Increase, (4) Oil Proof Rubber, (5) Exchange Manual)、添加剤からは2項目の要求((6) Antirust Treatment, (7) Corrosion Resist Material)が導き出されるので、4.2 節に前述した調査結果と照らし合わせてバイオ油の品質について抜けのない検討ができる。また、要求図では導出された要求に対して試験すべき油圧機器の対策品も抜け漏れなく記述することができる。ただし、低い酸化安定性(Low Oxidation Stability)から導き出された適切なオイル交換時間((2)Proper Oil Change Interval)は、長期対策でないため試験すべき油圧機器の対策品がないことも明示される。

建設機械全体(ドメイン)のシステムの振る舞いは、すでに2章の図 2-1 にアクティビティ図を用いて示した。ここでは、油圧システムの危険コンテキストのメカニズムを、図 4-8 に内部ブロック図を用いて示す。エンジン出力(Engine Power)により油圧ポンプ(block1 pump: Oil Press Generation Subsystem)を駆動して、高圧油(HP_oil, 35 MPa)と中圧(3 MPa)のパイロット油(Pilot oil)を発生させる。オペレータは油圧バルブ(block2 valve: Oil Flow Control Subsystem)

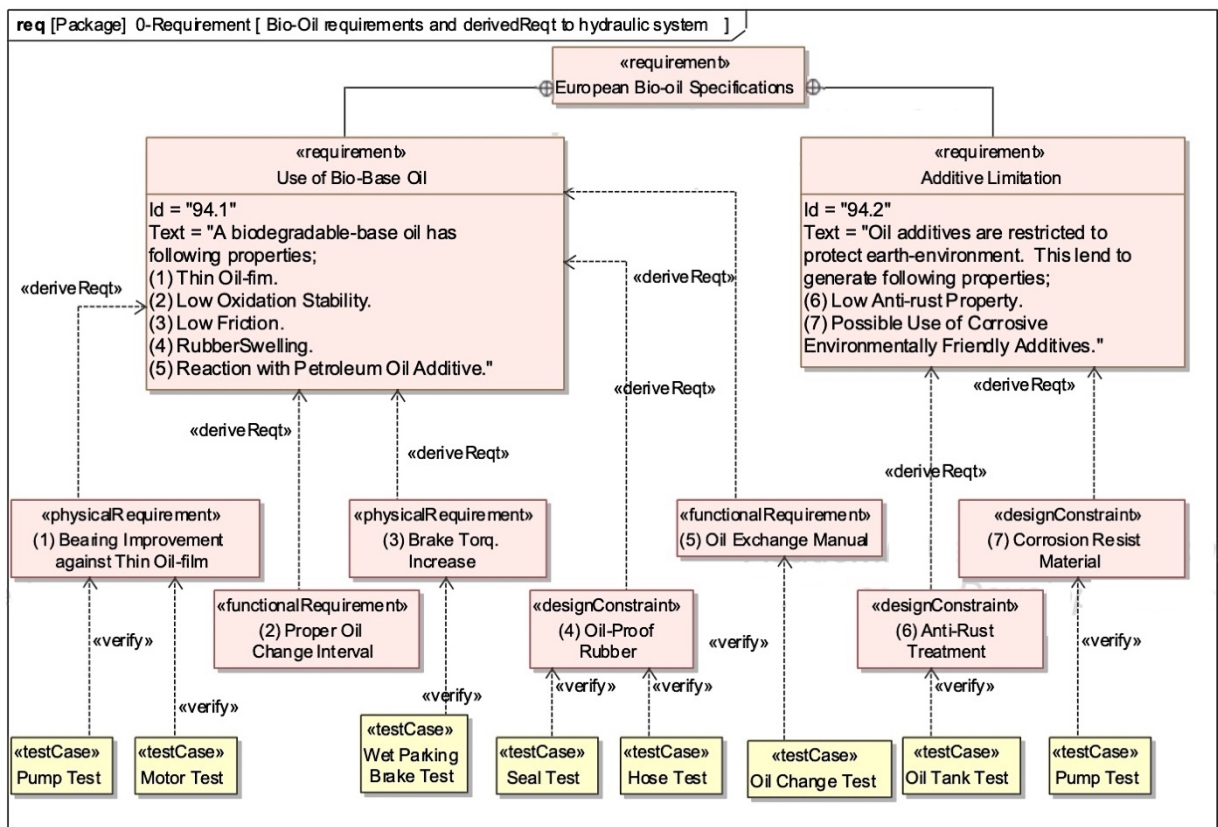


図 4-7 欧州のバイオ油規格に基づく油圧システムに対する要求を表す要求図

中のパイロットバルブ (block2.1 pilot valve: Pilot Valve Device) を介して、油圧ポンプの圧力の調整と、メインバルブ (block2.2 main-valve: Actuator Moving Device) の操作を行う。メインバルブは高圧油の方向、流量ならびに圧力を制御する複数のユニットからなっている。制御された高圧油 (CHP_oil) は、作業機を動かすサブシステム (block3 actuator : Work Component Actuation Subsystem) 中の油圧モータ (Hyd- motor device) または油圧シリンダ (Hyd-cylinder Device) を作動させる。作動後に高圧油はメインバルブ中で圧力が解放されて低圧油 (LP_oil, 0.1 MPa) となり、オイル供給サブシステム (block4: Oil Feed Subsystem) に入る。各部の摩擦と粘性抵抗による発熱とともに、高圧油が低圧油になる時の発熱により油温が上昇するのでオイルクーラ (Oil Cooler Device) で冷却する。その後、低圧油はフィルタ (block4.1.1 filter: Dust Eliminating Unit) により油中ダストが濾過され油圧タンク (Oil Tank Unit) に戻る。

4.5 不具合要因の技術検討

- (1) バイオ油の酸化を起こす油圧サブシステム (ポンプ、バルブその他) の特定と酸化メカニズムの検討
 バイオ油における酸化安定性の低さに対しては長期対策が施されておらず、作動不良にも

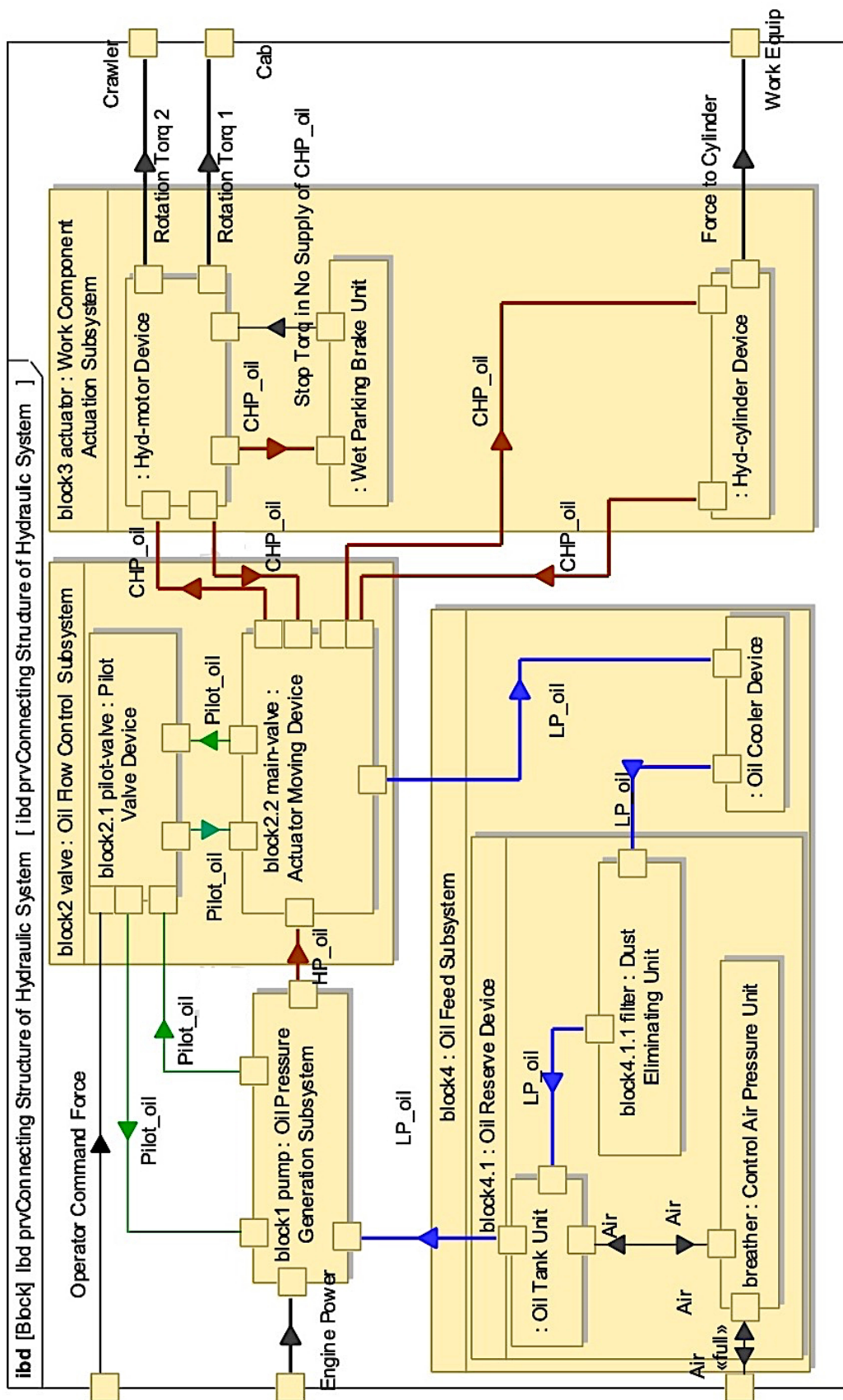


図 4-8 建設機械の油圧システムの構造と仕組みを表す内部ブロック図

関わりがあると考えられる。そこで、油圧システムの作動不良の原因を理解するために、どのサブシステムの中でバイオ油が酸化するかを明らかにする必要があった。図 4-8 の中で酸化を起こす可能性が高いサブシステムは負荷と温度が高い油圧ポンプであるが、メインバルブ (block2.2 main-valve) あるいは作業機を動かすサブシステム (block3 actuator) 中の油圧モータと油圧シリンダにおける酸化の可能性については検討されていない。風間ら[121]は建設機械に使用される斜板アキシャルピストン式油圧ポンプ (21 MPa) で温度測定を行い、シリンダブロックで 30 °C 以上の温度上昇 (油温 80 °C の場合 110 °C) することを見出している。油中に気泡が存在する場合は断熱圧縮により 1,400 °C 以上 (35 MPa の場合) のホットスポットを生じて周辺のバイオ油を加熱するため[122]、バイオ油が酸化してラッカーになると推定できる。なお、エンジンのピストンリング固着を起こすラッカーも、バイオ油のラッカーと同様の化学構造の油に溶けない酸化縮重合物[11]である。

建設機械における稼働時の全てのサブシステムのエネルギー損失は 60-75% [123][124] に達するが、著者らの調査ではそのうち油圧ポンプが約 15%、メインバルブが約 25% であった。エネルギー損失は油温の上昇につながるので、メインバルブ内の油温が油圧ポンプ以上に高い場合もあると推定できる。また、メインバルブ内には高压油を低压の回路に排出するユニット (リリーフ弁) がある。建設機械が掘削バケットで大きな岩を取り除く時などに、油圧システムに過大な負荷がかかった状態で油圧シリンダと油圧モータの動きが止まると、余剰な高压油がリリーフ弁から低压のオイル供給サブシステムの回路 (block2.2 main-valve から出る青の LP_oil 回路) に解放され、運動エネルギーが熱に変換される。この時発生するリリーフ弁での発熱量を式 (4-1) [125] に従って算出すると、油温は約 100 °C (油温 80 °C の場合) となり油圧ポンプの油温と同等である。

$$H = p \cdot Q \quad (4-1)$$

ここで H はリリーフ弁からの発熱量 (kJ/min.)、 p はリリーフ圧力 (MPa)、 Q はリリーフ流量 (L/min.) である。

今西ら[126]はメインバルブ (block2.2 main-valve) の動作をシミュレーションしたことによりメインバルブからアクチュエータ (block3 actuator) への高压油の流れの方向を制御するユニットでもエネルギー損失はリリーフ弁ユニットと同等で大きいことを示している。この高压油の流れの方向を制御するユニットではオイルは流速 100 m/s 以上で流れて[11]、激しいキャビテーションを起こす。これにより焼入れあるいは浸炭を施した鋼部品にも損傷を生じる場合がある[11]。このような激しいキャビテーションでは気泡の崩壊により高温・高压部 (約 4,700 °C、100 MPa) のホットスポット[127]が生じるとされる。ホットスポット周辺のバイオ油は図 4-9 のように酸化してラッカーを生成すると推定される。ホットスポット (Hot Spot) の中ではほとんど原子状態まで分解されるか、あるいは燃焼状態で炭素結合がランダムに裂かれる (Hydrogen, Carbon and Oxygen at

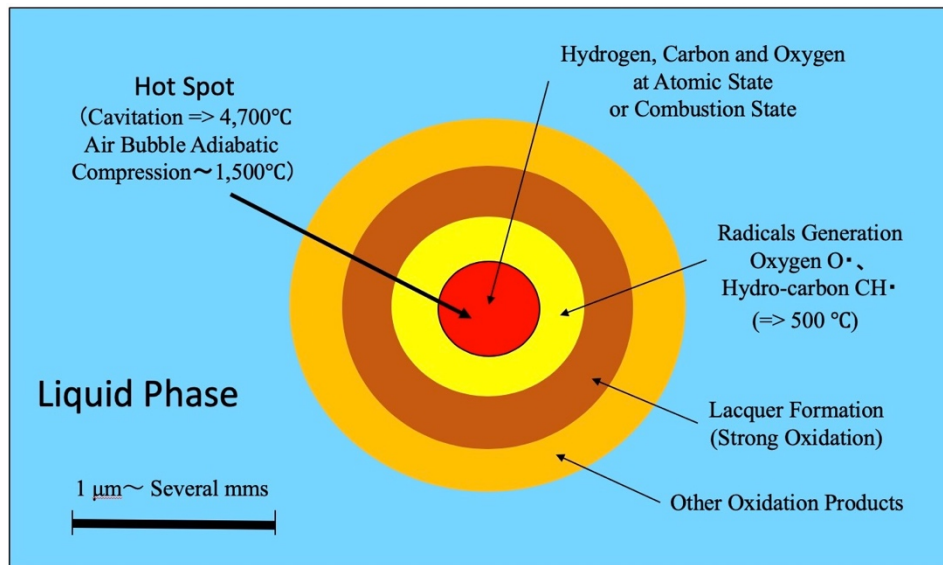


図 4-9 断熱圧縮とキャビテーションによるバイオ油のラッカー生成の推定図

Atomic State or Combustion State) [128][129]。ホットスポット周辺ではラジカルが生成し (Radical Generation)、その外側でラッカー (Lacquer Formation) あるいは他の酸化生成物 (Other Oxidation Products) が生じる。なお、油圧ポンプ内でもキャビテーションによる損傷は小規模ながらも発生する[130]。これらの検討から、新たに油圧ポンプと油圧バルブでラッカーが生じることを見出すことができた。油圧モータと油圧シリンダでもラッカー生成が起こりえるが、いずれも負荷頻度は油圧ポンプとメインバルブに比べ低い。過去には旋回用油圧モータが左右の回転切り替え時にキャビテーションによる問題を起こしたが、現在は油圧バルブの改良で対策されている [123]。このため油圧モータと油圧シリンダでのラッカー生成は少ないと推定できる。生成したラッカーはバイオ油に溶けないのでフィルタに捕捉され、フィルタ詰りの要因となる。

(2) 油中ダストの発生、フィルタによる捕捉そして作動不良への影響の検討

図 4-10 に油圧タンク、フィルタ付きブリーザの構造を示す(図 4-9 block-4.1)。フィルタ(図 4-9 block-4.1.1 filter)は低圧油を 20~100 回通過させることで油中ダストを捕捉する。著者らの実車試験では従来のセルロースろ材(後述)のフィルタ(Filter)は数時間で 5 μm 以上の油中ダストを 50%以上捕捉できる。これにより油中ダストの粒子数(清浄度)は油圧システムに必要とされる上限値以下に抑えられる。フィルタが詰まり圧力が高くなると、フィルタ用バイパス弁 (Bypass Valve for Filter Protection) が開いて低圧油はフィルタを通らず直接油圧タンク (Hydraulic Tank) に入る設計である。フィルタ交換時間は油中ダストの捕捉容量から設計され 250~500 時間である。前述のように油中ダストは外部ダストと内部の金属摩耗粉からなる。外部ダストは油圧タンクに装着されたフィルタ付きブリーザ (Breather) [131](block4.1.1 breather) から、空気の入りと同時に粉塵または泥水として侵入する。ブリーザのフィルタ (Breather

Filter)は一回の通過だけなので、細かいダストの侵入を防げず油中ダストの一因となっている。このフィルタはオイル用フィルタと同じセルロースろ材を使っている。外部ダストは劣悪な現場ではオイル補給、フィルタ交換、油圧ホース交換とサブシステムの修理時にも混入する。

このため油中ダストには砂塵由来の珪砂(石英)、長石、あるいは金属摩耗粉である酸化鉄と鋼などの硬質(ビッカース硬度 Hv 600 以上)の成分が含まれている。表 4-5 は油中ダストについての清浄度の限界値(Upper Limit of Particles Number, Cleanliness limit)[132]と、故障が生じた建設機械油圧システムの作動油の典型的な清浄度(Example Data of A Failed Machinery)の例である。清浄度の限界値を越えると、油圧バルブの固着による作動不良と摩耗を起こす原因となる[125]。メインバルブとパイロットバルブの可動部の間隙は数 μm ~ $30\mu\text{m}$ [11]であるので、清浄度限度内であっても油中ダストは隙間に入り込むが、ポンプ不具合を起こした表の例では油中ダストの個数は清浄度限界の最大7倍に達している。

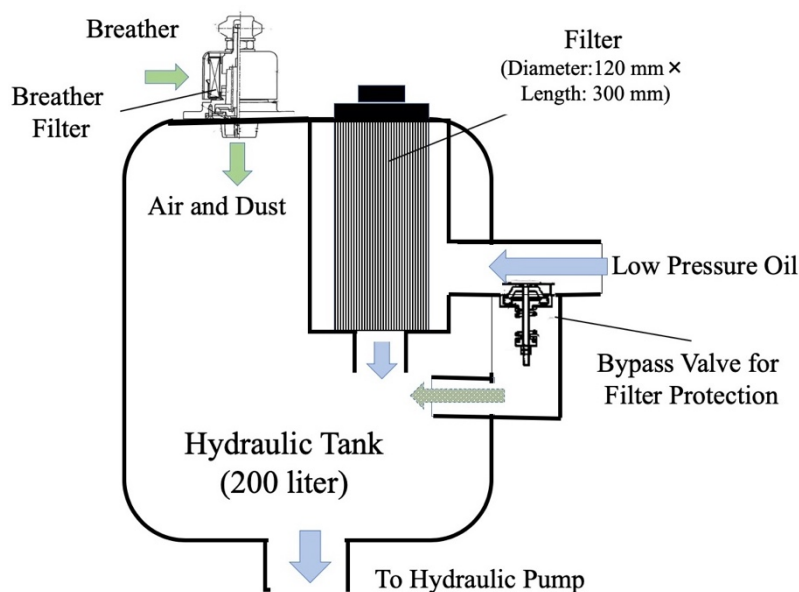


図 4-10 油圧タンクとフィルタ付きブリーザの模式図

表 4-5 油圧ダストの粒径毎の粒子数(清浄度)の限界値と故障が発生した作動油中の粒子数の典型例

Particle Size, μm	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 - 100	>100
Upper Limit of Particle Numbers, mL^{-1}	500,000	32,000	4,000	1,000	100
Example Data of A Failed Machinery, mL^{-1}	3,490,150	96,990	3,120	140	0

4.6 不具合に至る油圧システムの振る舞いの分解

(1) 油圧システムの一般的な振る舞いの状況

図 4-11 に油圧システムの正常な振る舞いを表すアクティビティ図を示す。各アクティビティ区画は前述の図 4-8 のサブシステムのブロックに一致する。油圧ポンプ (block1 pump) は高压油 (HP_oil) を油圧バルブ (block2 valve) に送り出す。オペレータは油圧バルブを操作して、パイロット油 (Pilot_oil) によりポンプ圧力の調整を行い、高压油の流れの方向あるいは流量を制御する。この制御された高压油 (CHP_oil) によって油圧モータまたは油圧シリンダなどのアクチュエータ (block3 actuator) を動かす。これにより作業機器 (Work Component) が作動する。作業に使われた高压油は油圧バルブを経由して低压油 (LP_oil) としてオイル供給サブシステム (block4) に戻り、冷却されて (Cool LP_Oil)、フィルタでろ過され (Filtrate LP_oil)、清浄な低压油 (clean LP_oil) としてオイルタンク (Reserve LP_Oil) を経て油圧ポンプに入り再び高压化される。ただし、低温始動時などバイオ油の粘度が高い時にはフィルタ差圧が高くなり (filtration pressure => 0.15 MPa)、フィルタ用のバイパス弁が一時的に開く。これによりバイオ油はフィルタを通過せずに (Bypass Filtration)、油中ダストを含んだままオイルタンクに流れる (contaminated LP_oil)。なお、始動後 30 分程度で油温は 60 °C 以上に上がるため、この間に低压油はフィルタを通過するようになり油中ダストの量は直ちに減少する。

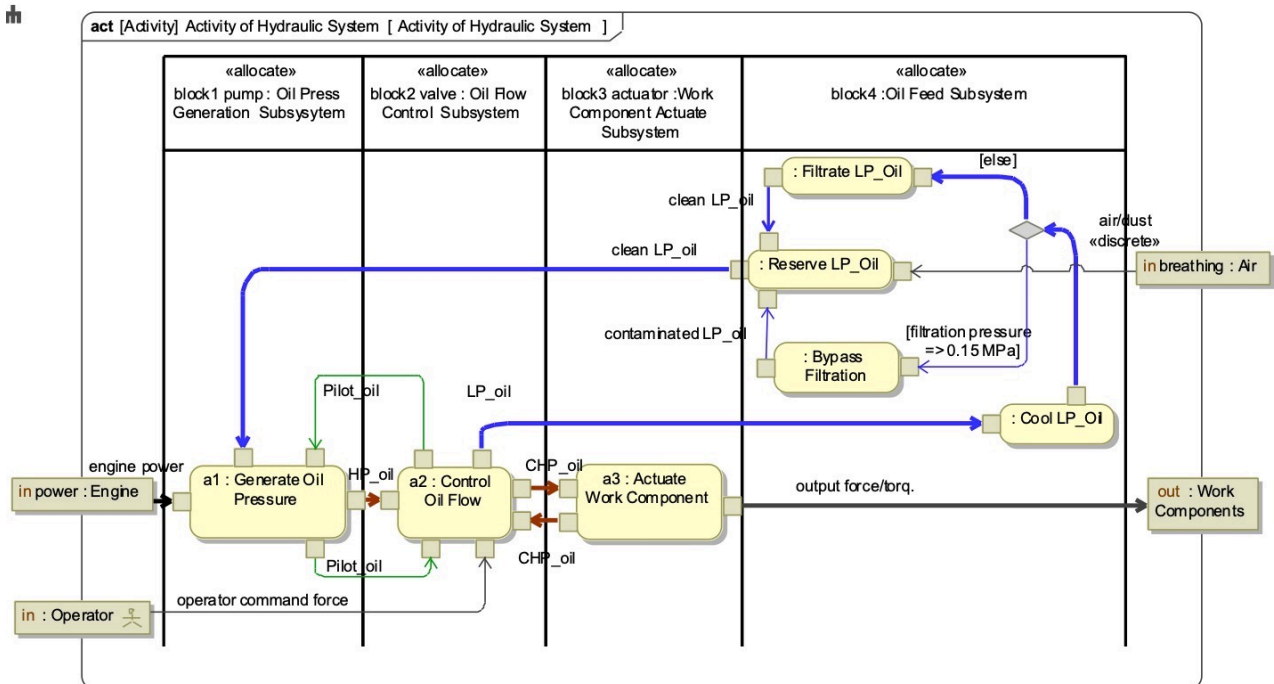


図 4-11 油圧システムの正常な状態の振る舞いを表すアクティビティ図

(2) バイオ油の酸化による油圧システムの作動不良の振る舞いの検討結果

バイオ油の酸化によるラッカーの生成と油圧システムでの振る舞いをアクティビティ図を用いて図 4-12 に示す。(a) 油温が上がった油圧ポンプでは、気泡の断熱圧縮によりラッカーが高压油中に生成される (Generate Oil Pressure and Generate Lacquer in HP_oil)。ラッカーを含んだ高压油 (HP_oil + lacquer) は油圧バルブ内に流れる。(b) 油圧バルブでは激しいキャビテーションが発生して低压油中にラッカーが生成され (Control Oil Flow and Generate Lacquer in LP_Oil)、オイル供給サブシステムに流入する。(c) ラッカーを含んだ高压油はアクチュエータにも流れるがアクチュエータへの影響は小さい。(d) ラッカーはオイル供給サブシステム内のフィルタに捕捉され (Filtrate LP_oil)、清浄な低压油として油圧ポンプに戻る。しかし、次第にラッカーがフィルタに堆積すると、油温が 60 °C 以上でもフィルタ差圧が 0.15 MPa 以上となり、フィルタ用バイパス弁が開いたままの状態 (以下フィルタ閉塞) となる (plug filter with lacquer)。この結果、油中ダストとラッカーがろ過されずに低压油混入し (contaminate LP_oil)、油中ダストに汚染された低压油が流れる (contaminated LP_oil)。

汚染された状態のバイオ油の油圧システム中の振る舞いを図 4-13 に示す。汚染された低压油は油圧ポンプに吸入され、油中ダストとラッカーを含んだ高压油とパイロット油 (Generate Contaminated HP_Oil and Pilot_Oil) となり、油圧バルブに送られる。汚染された高压油 (contaminated HP_oil) にはアクチュエータなどで摩耗粉が入り、低压油としてオイル供給サブ

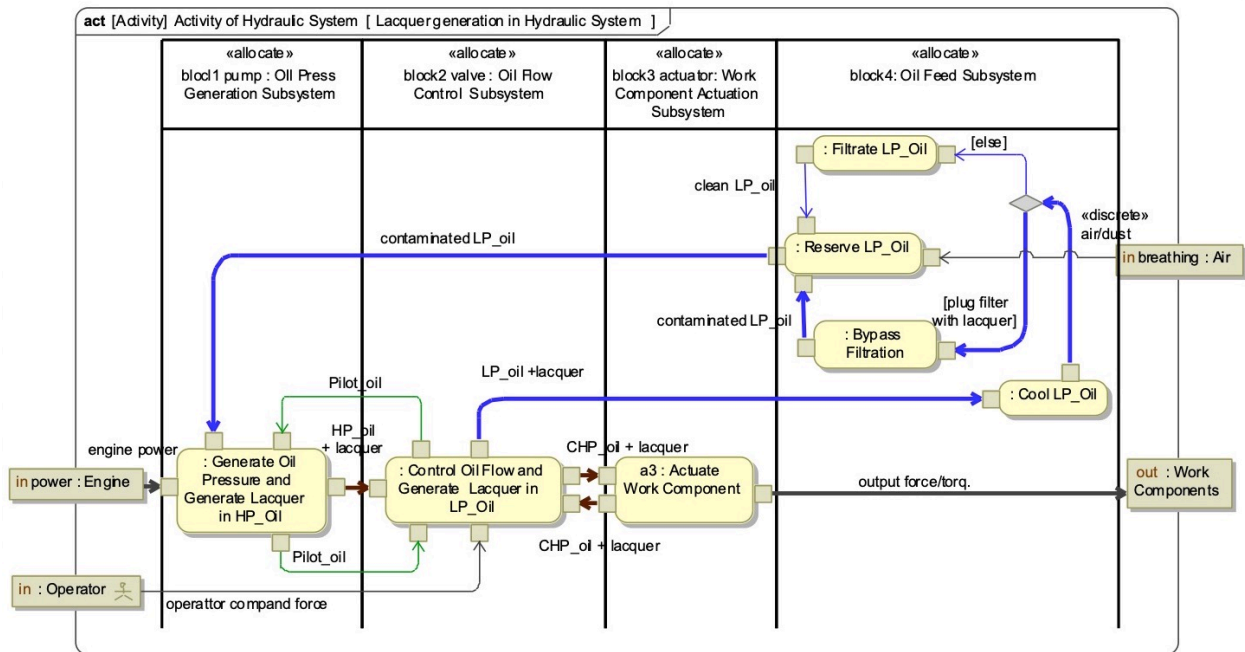


図 4-12 油圧システム内でのバイオ油のラッカー生成を表すアクティビティ図

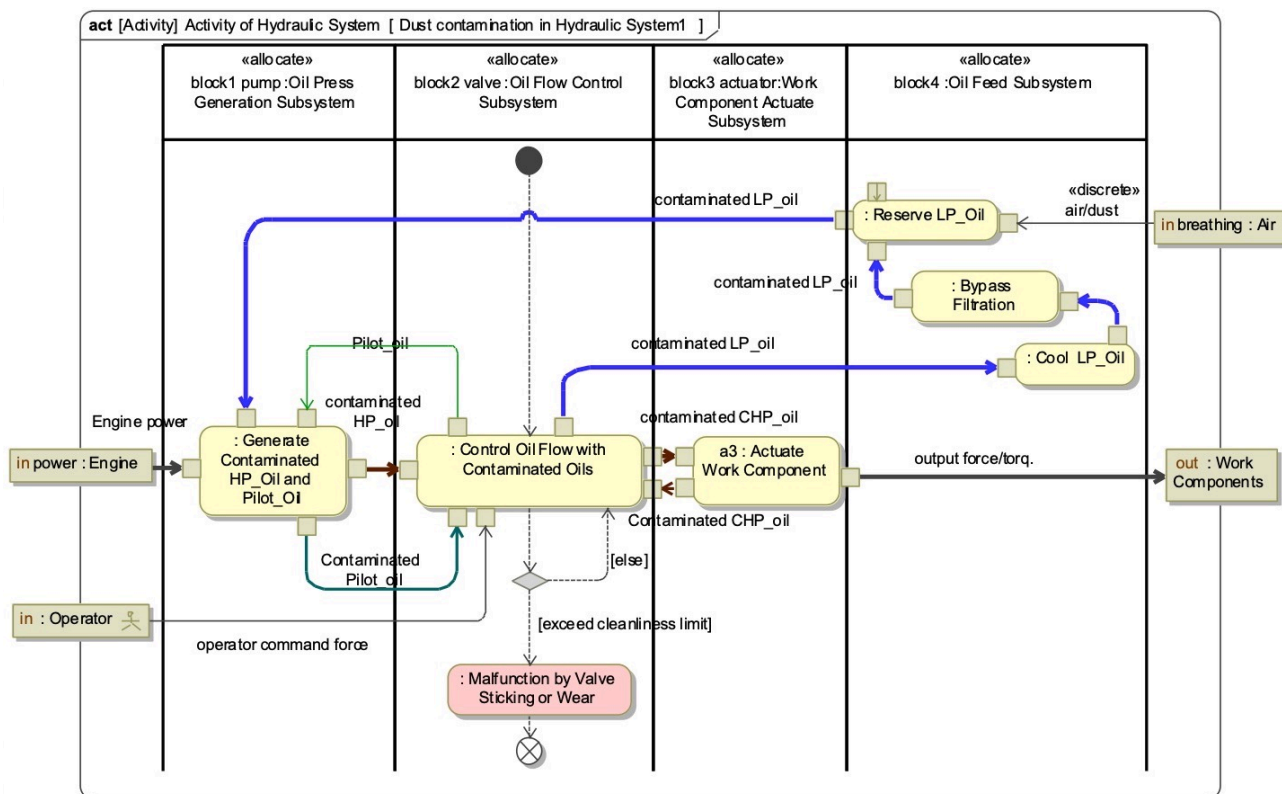


図 4-13 油圧システム内での汚染されたバイオ油による作動不良を表すアクティビティ図

システムに戻り、外部ダスト (air/dust) が混入する。これが繰り返されて油中ダストの濃度が清浄度の上限値を越えると (●下の◇、exceed cleanliness limit) 油中ダストが油圧バルブ (メインバルブとパイロットバルブ双方) の隙間に入り込んで固着または摩耗により作動不良が生じる (Malfunction by Valve Sticking or Wear)。フローは終了 (⊗) して修理が必要となる。油圧バルブの作動不良により、油圧ポンプ、油圧モータあるいは油圧シリンダのいずれかに誤作動が生じることがわかった。

4.7 バイオ油の状態遷移と作動不良の関係と対策案の検討

(1) バイオ油の状態遷移のモデル記述

バイオ油の酸化とダスト混入に関する状態遷移を図 4-14 に示す。バイオ油は、油圧システムの運転によって作動状態 (operating) になる。バイオ油は油中に酸素が溶解していると、油温 100 °C 程度でもバイオ油の一部が酸化によりラジカル (radical) になる [133]。ラジカルとはオイル分子の一部の結合が切断して活性化した短寿命の分子であり [134]、連鎖的に酸化を加速する作用をもつ。バイオ油のラジカルは石油系作動油と同様の反応メカニズムで酸化を起こす [135]。

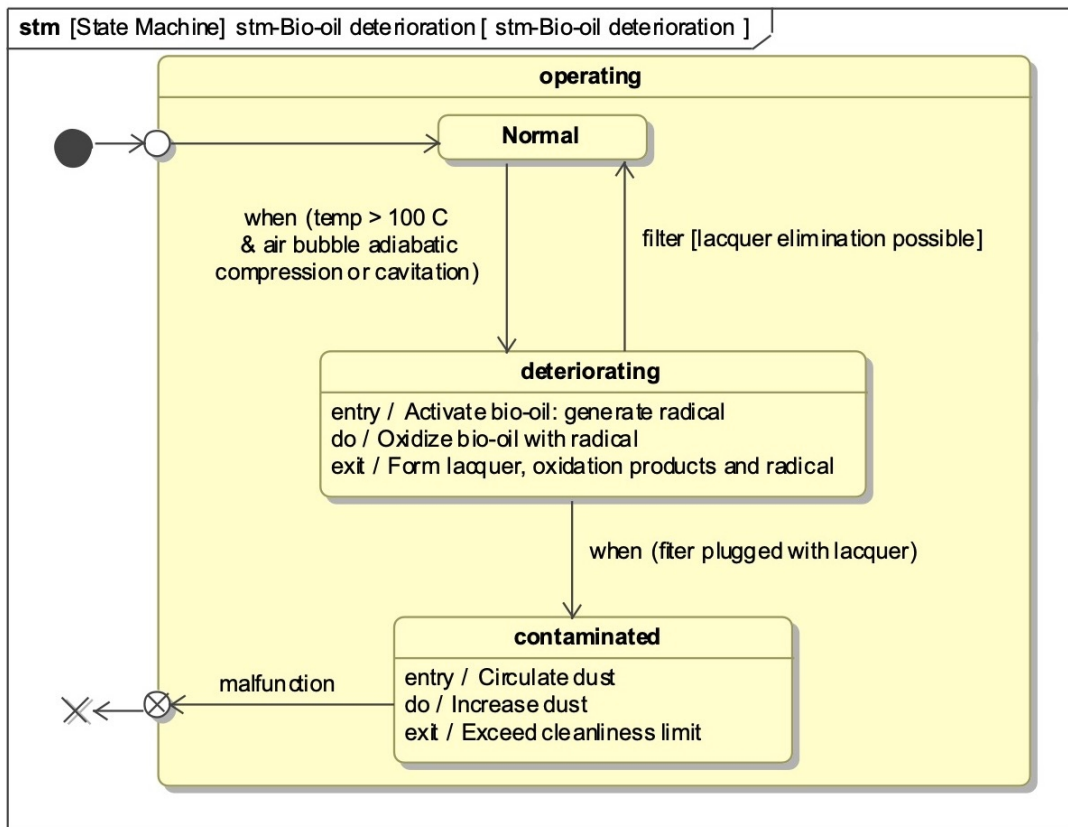


図 4-14 バイオ油の状態遷移を表す状態機械図

著者らは、バイオ油は 135 °C × 500 時間以上の条件で酸化するとラッカーが生じ始めることを酸化安定度試験[111] で確認している。石油系作動油はこの条件ではラッカーの生成は認められなかった。前述のように気泡の断熱圧縮またはキャビテーションにより生成されたラッカーを含むバイオ油は劣化状態 (deteriorating) にある。フィルタによりラッカーが除去されれば正常な状態 (Normal) と見なされる。ラッカーはフィルタの捕捉可能な容量 (lacquer elimination possible) まで除去される。ラッカーがフィルタに蓄積してフィルタ差圧が高まると、フィルタ閉塞の状態となり(図 4-12 の plug filter with lacquer)、バイオ油は油中ダストとラッカーに汚染された状態 (contaminated) になる。油中ダストによる汚染は、最終的に油圧システムの清浄度の限界値を越えて作動不良 (malfunction) を起こしてターミネート擬似状態 (X) となり状態機械図の振る舞いは停止する。

なお、酸化反応で生成した酸化生成物 (oxidation products) [136] とラジカルはオイル中に溶解しており、フィルタを通過して油圧システム内を循環する。反応性が高いラジカルは短寿命 (1 ns ~ 数時間) で、反応性の低いラジカルは 1 年以上の寿命がある[136] [137]。ラッカーを生成するような反応性が高いラジカルは油中に蓄積されることは少ないと思われる。ただし、酸化生成物は油中に濃縮されることになる。

(2) バイオ油状態遷移からの作動不良の対策案の導出

対策案はこの状態機械図から対策案を導き出すことができる。バイオ油の正常状態から劣化状態への遷移を防ぐには油温を 100℃以下にすること、気泡の断熱圧縮を防ぐこととキャビテーションを防ぐことである。ラッカー生成の主要因は、断熱圧縮とキャビテーションにより極端な高温のホットスポットができることであると考えられ、これを防ぐことが対策となる。気泡の断熱圧縮に対しては坂間[122]の提案のように油中の気泡を遠心分離装置で取り除くことが有効と考えられる。キャビテーションの抑制については高压油の低压部への不要な放出を防ぐことであり、エンジン回転の制御により過剰な高压油が発生しないように油圧ポンプ出力を抑えることである。一部の機種ではこのようなエンジン回転制御装置は装着されており、バイオ油の劣化抑制のためにより強くエンジン回転を抑制する方法も考えられる。

バイオ油の劣化状態から汚染状態への遷移を抑えるにはフィルタの容量を拡大することである。このフィルタに関しては近年ろ材の改良が進み、ダスト捕捉能力の向上と同時に閉塞までの寿命を延長できるようになっている[138]。この他にも多くの対策案を導き出すことができるが実用性と効果の点から上記 3 項目とした。

(3) バイオ油状態遷移の技術的検討

ラッカー生成に対するバイオ油の酸化生成物の濃縮の影響を調べるために、著者らが行った建設機械の酸化安定性の高い飽和脂肪酸合成エステル基油の市販バイオ油 (Saturated Synthetic Ester Bio-Oil) についての、フィールド試験結果[139]を図 4-15 の実線で示す。酸化

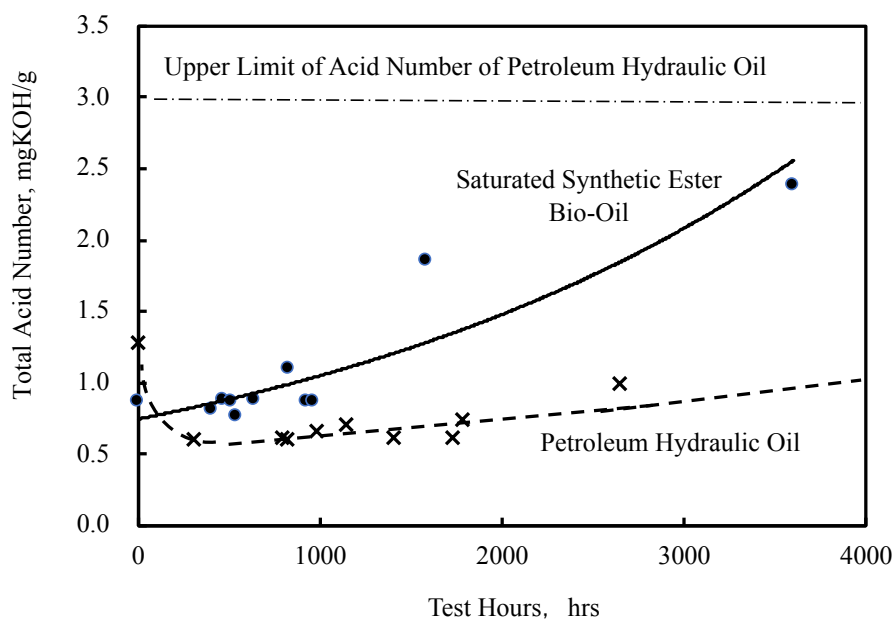


図 4-15 建設機械のフィールド試験での飽和脂肪酸合成エステル基油のバイオ油と石油系作動油の酸価 TAN の経時変化

生成物の濃度の指標となるバイオ油の TAN(以下 TAN)は、3,000 時間を越えると石油系作動油の使用限界値(Upper Limit of Acid Number of Petroleum Hydraulic Oil)に近くなる。TAN (Acid Number)とは潤滑油中に含まれる酸性成分あるいは遊離脂肪酸の量の指標で、中和する水酸化カリウムの必要量で表す。この限界を超えると、酸化生成物が鉛青銅系軸受メタルに含まれる鉛を腐食・溶解して焼付きを生じるようになる[72]。このため著者らは TAN を限界値以下にするように、欧州の標準的な飽和脂肪酸合成エステルバイオ油のオイル交換時間の推奨は 3,000 時間毎(表 4- 2 参照)と規格に定めた。石油系作動油では図の破線で示すように早期の TAN 上昇は生じないため、オイル交換時間は 5,000 時間毎としている。バイオ油の酸化増加がラッカー生成と関係があるかを次項で検討する。

合成エステルバイオ油は数%の水が混入すると、加水分解が起こり TAN は増加すると言われる[140]。しかし、Totten ら[130]は油圧ショベルなどに混入する水分量は 0.1%以下と少ないので加水分解は起きないと断定している。著者らも同様にフィールド試験で加水分解は起きていない結果[139]を得ているので、図 4-14 に示したバイオ油の状態遷移には酸化のみを扱った。

(4) バイオ油以外のフィルタ閉塞の事例の検討

ラッカー生成によるフィルタ閉塞メカニズムの妥当性を確認するために、著者らは石油系作動油とエンジン油についてのラッカー生成とフィルタ閉塞の例について調べた。

石油系作動油を使用し、大型建設機械(ホイールローダ)の作動油フィルタの交換時間を 1,000 時間から大幅に延長するフィールド試験では、図 4-16 のようにフィルタへの著しいラッカー付着を観察している。ラッカーが生成した原因は明らかでない。このフィルタの白色エンドブ

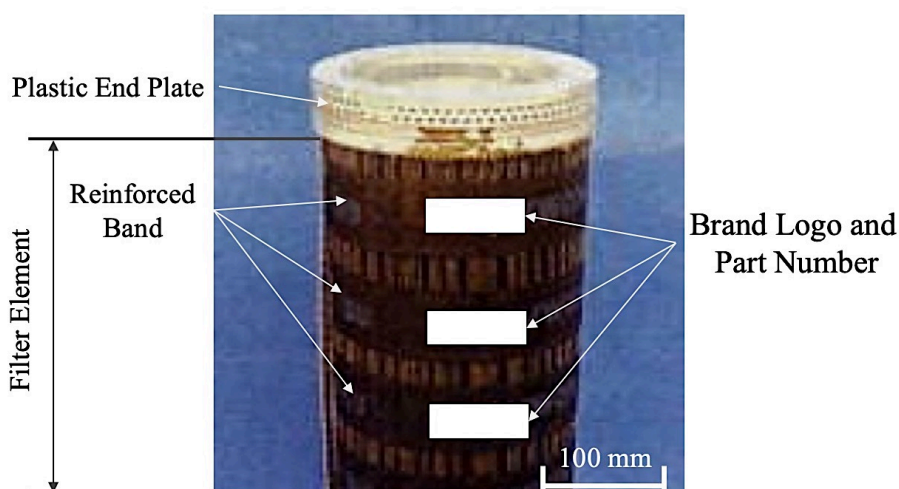


図 4-16 石油系作動油を用いた作動油フィルタ交換時間の延長試験(4,200 時間)でフィルタ全体に付着した茶色のラッカー

レート(Plastic End Plate)とセルロースろ材(Filter Element and Reinforced Band、新品は黄色)に茶色のペースト状のラッカーが付着しており、ろ材はラッカーにより目詰まりしていた。石油系作動油は4,000時間付近でもTANは低い(図4-15参照)ので、TANの増加はラッカー生成とは関係なく、ホットスポット周辺でのラッカー生成によってフィルタ閉塞が生じた可能性が高いと考えられる。

また、著者らはエンジンで同様な不具合の原因を解明している[141]。燃焼ガス中の窒素酸化物(NOx)によりエンジン油中にラジカルができて多量のラッカーを生成し、早期のフィルタ閉塞によるエンジン部品の過大摩耗が引き起こされている。ここで使用されたエンジン油にはNOxによる酸化に対して有効な酸化防止剤が配合されていなかった。バイオ油がラジカルに有効な酸化防止剤を含まないのと同じ状況である。これらのラッカー生成によるフィルタ閉塞は、図4-14に示したバイオ油の状態遷移を裏付けるものと言える。

4.8 作動不良の危険コンテキストと対策の記述

(1) SafeMLの拡張

バイオ油の状態遷移(図4-14)をもとに導き出した対策案を、SafeMLを用いて作動不良の危険コンテキストと共に記述する。ただし、従来のSafeMLは製品自体の不具合に対する危険源を対象としていなかった[120]。そこで、著者らは製品不具合を取り扱えるように、図4-17に

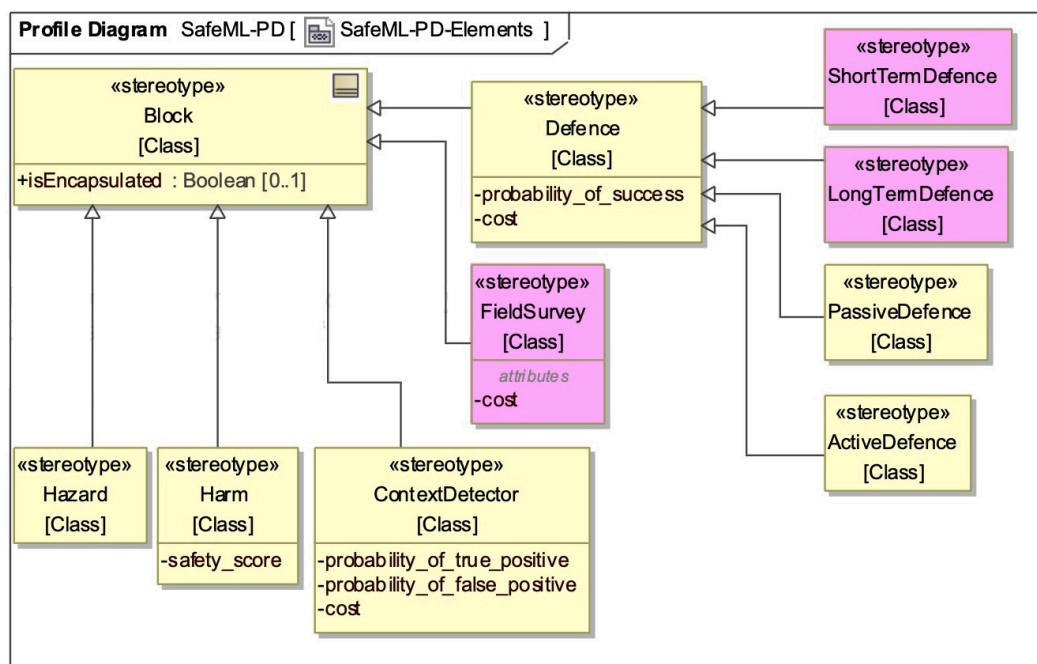


図4-17 SafeMLに追加した要素(紫色エレメント)

示すように SafeML の防御要素 (Defence elements) として二つの紫色のエLEMENTで示す短期対策 (Short-term defence)、長期対策 (Long-term defence、以下対策) ならびに短期対策の効果と問題点を把握するための市場調査 (Field Survey) を短期対策ELEMENTに追加して拡張した。なお、短期対策と市場調査についてはここでは使用しない。Biggs ら[119]は、複数の対策案について相対的で定量的な安全スコア (Safety Score、付録 A 参照) を算出する試みを行っている。ここでは作動不良への対策の選定に安全スコアの適用も試みる。

(2) 拡張 SafeML を用いた作動不良の危険コンテキストと対策の記述

拡張 SafeML を用いた作動不良の危険コンテキストと対策案の記述を図 4-18 に示す。図 4-11~13 に記述した危険状況に対して対策案を検討した結果を記述している。建設機械用として不適切な劣化しやすいバイオ油の使用 (桃色のELEMENT Unacceptable Bio-oil use in hydraulic system for hydraulic excavator) は危険源 (Hazard) であり、油中ダストによる油圧バルブの作動不良 (赤のELEMENT Malfunction of hydraulic system by oil dust) は危害 (Harm) である。危険源の元はバイオ油にあるので、<<deriveHzd>>として関連付けて示している。危険状況 (黄色のELEMENT、Harm Context) として示すのは、故障を起こす危険コンテキストである。危険状況は、バイオ油の劣化により早期にフィルタが閉塞し、油中ダストが油圧バルブの固着または摩耗を生じること (Valve sticking/wear caused by oil dust) である。危険状況を生じる要素は油圧バルブにあるので、<<deriveHC>>として関連付けて示している。対策 (緑のELEMENT <<Long-term defence>>) は危険状況を防ぐための案であり、対策効果 (青のELEMENT <<DefenceResult>>) には効果の内容を具体的に示す。赤・黄・緑・青のELEMENT内には 5 項目のタグ値、すなわち対策の成功の確率 (probability of success)、危険状況発生の確率 (probability of occurrence)、危害発生の確率 (probability of harm)、危害発生の範囲 (range)、危害の苛酷度 (severity) [119] を記入するが、詳細は後述する。<<reqDefence>>として関連付ける安全性要求 (薄桃色のELEMENT<<requirement>>) を記述して対策案の妥当性を確認する。安全性要求に<<satisfy>>で関連づけられる対策用の装置と<<verify>>で関連づけられる試験<<testcase>>は、設計部門と試験部門の情報共有のためにより具体的に記述することが求められる。

バイオ油の状態遷移から考えられる基本的な対策は、余剰な高圧油の発生を抑えてホットスポットの発生を防ぐこと、バイオ油の酸化を防ぐこと、ならびにフィルタの閉塞を防ぐことである。これら三つの対策の具体的な案を以下に示す。

対策案1 {緑ELEMENT (1)Auto engine controller} は、エンジン制御により余剰な高圧油のメインバルブのリリーフ弁ユニットからの排出を抑えて、キャビテーションを抑制しラッカーの生成を減らすことである。この対策案によって、低負荷時の余剰な油圧を下げる (薄桃色ELEMENT Hydraulic system shall reduce oil pressure at a low load operation) という安全性要求が導かれ

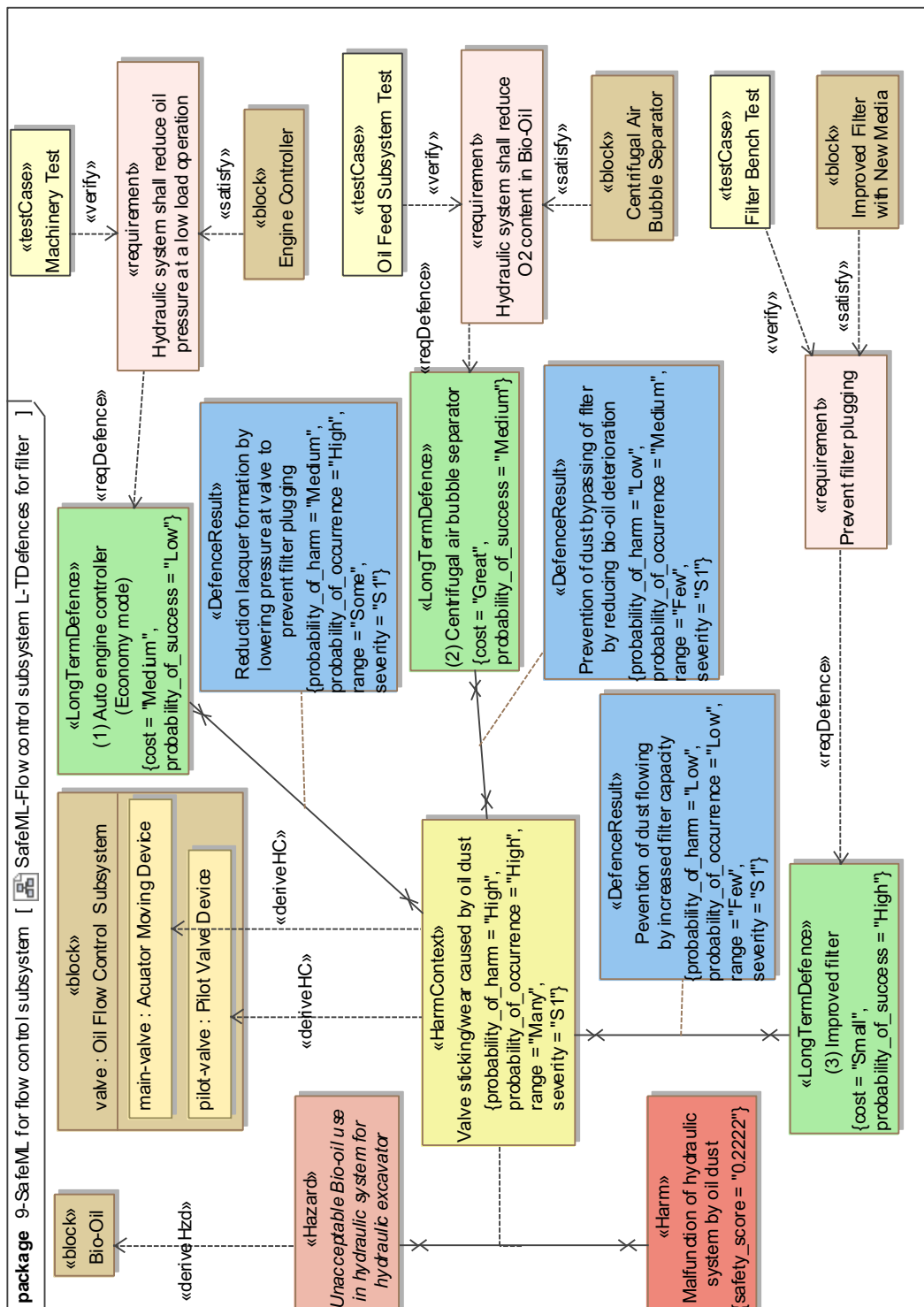


図 4-18 バイオ油による油圧バルブの作動不良に対する 3 つの対策案を表す拡張 SafeML 図

る。この要求を満たすためのエンジン回転制御装置 (block、 Engine Controller) については、エンジン車両を用いた試験 (Machinery Test) により検証する必要がある。対策の効果 (青エレメント Defence Result) は、フィルタの閉塞を防ぐために、油圧バルブの圧力を下げてラッカー生成を減らせることである (Reduction lacquer formation by lowering pressure at valve to prevent filter plugging)。

対策案 2 {緑エレメント (2) Centrifugal air bubble separator} は、遠心分離装置 [122] を用いて油中気泡を除去し、油圧ポンプでの断熱圧縮によるラッカー生成を減らすことである。安全性要求は、バイオ油の酸化を防ぐために油中酸素量を下げること (薄桃色エレメント Hydraulic system shall reduce O2 content in Bio-oil) である。この安全性要求を満たす遠心分離装置 (Centrifugal Air Bubble Separator) については、オイル供給サブシステムによる試験 (Oil Feed Subsystem Test) をする必要がある。対策の効果は、バイオ油の劣化を抑制して油中ダストの通過を防ぐことである (青エレメント Prevention of dust bypassing of filter by reduction of bio-oil deterioration)。

対策案 3 {緑エレメント (3) Improved Filter} は、フィルタのろ過性能を改良してラッカー閉塞を防ぐことである。安全性要求は、ラッカーによるフィルタ閉塞を防ぐこととなる (薄桃色エレメント Prevent filter plugging)。この要求を満たす新しいろ材を採用した改良フィルタ (Improved Filter with New Media) については、フィルタ台上試験による検証 (Filter Bench Test) をする必要がある。対策の効果は、フィルタの容量を増やすことで油中ダストの流出をさせないことである (青エレメント Prevention of dust flowing by increased filter capacity)。

(3) 対策案の技術検討

エンジンの自動制御で低負荷時に余剰な高圧油の圧力を下げて、メインバルブのリリーフ弁からの高圧油の排出を減らせば油温は下がる。しかし、これ以外の油圧バルブ操作でもキャビテーションは発生するので効果は限定的である。作動油の劣化について坂間 [122] は、油中気泡を遠心分離する方法によって作動油中の酸素量を減らせば、酸化反応の進行を抑制できることを明らかにしている。しかし、バイオ油の場合は前述のようにラジカル反応を十分に抑えられる酸化防止剤が配合されないために、酸素量が減った状態でも酸化反応は起こると考えられる。この遠心分離による方法では酸化防止の十分な効果が期待できない。

フィルタに関しては近年ろ材は改良が進み、ダストの捕捉性能の向上と同時に閉塞までの寿命を延長できるようになっている [138]。JIS 油圧用フィルタ性能評価方法 [142] による測定結果では、従来のセルロースろ材は 20~30 μm 以上のダストを 50% 以上捕捉するのに対して、最近のガラス繊維にポリプロピレン繊維などを混ぜて抄紙した改良ろ材は 5 μm 以上のダストを 50% 捕捉できる [11]。また、改良ろ材を採用したフィルタ寿命は、油中ダストだけでなく粘稠な液体などに対しても 2 倍以上になることが報告されている [138]。ちなみにセルロース繊維の直

径は最大 30 μ m に対して、改良ろ材の繊維の直径は最大 1.0 μ m である。これがろ過性能を改良した理由であり、この効果によりラッカーによるフィルタ閉塞が防がれ油中ダストは捕捉され、油圧バルブの固着や摩耗を防ぐことができる。

(4) 安全スコアに基づく対策の決定

表 4-6 は未対策 (Undefended Case) と各対策案について、図 4-18 中の各エレメント内に記入したタグ値から(4-2)～(4-4)の計算式を用いて算出した安全スコア (Safety Score, SS) とコスト評価の表である。それぞれの発生確率は低い (Low: 1/3)、中位 (Medium: 2/3)、高い (High: 1/1) の 3 段階に区分・数値化した。危害発生の範囲は 0.3%未満の台数 (Few: 1/4) から中位 (Some)、多数 (Many) そして 10%以上の台数 (Most: 4/4) など 4 段階とし、危害の苛酷度はほとんど費用が掛からない部品交換または洗浄・調整で済む場合 (S1: 1/4)、現場での部品またはサブシステムの一部交換あるいは分解洗浄が必要な場合 (S2: 2/4)、修理工場でのサブシステム修理が必要な場合 (S3: 3/4)、そして車両の全面修理あるいは人身の負傷事故が発生した場合 (S4: 4/4) の 4 段階とした。コスト評価は、互換性があり安価 (Minimum: 1/4) から小 (Low)、中 (Medium) そして新規サブシステム品番の追加あるいは車体改造必要などの大 (High: 4/4) までの 4 段階とした。

$$SS = Qu(1 - P(S)) + QdP(S) \quad (4-2)$$

$$Qu = P(Ou)P(Hu)RuSu \quad (4-3)$$

$$Qd = P(Od)P(Hd)RdSd \quad (4-4)$$

ここで、

SS 安全スコア

Qu 未対策の場合の仮安全スコア

Qd 対策した場合の仮安全スコア

P(S) 対策の成功確率

P(Ou) 未対策の場合に危険状況 (Context) が起きる確率

P(Hu) 未対策の場合に危害 (Harm) が起きる確率

Ru 未対策の場合の危害が起きる範囲

Su 未対策の場合の危害の苛酷度

P(Od) 対策した場合に危険状況が起きる確率

P(Hd) 対策した場合に危害が起きる確率

Rd 対策した場合の危害が起きる範囲

Sd 対策した場合の危害の苛酷度

未対策の場合は、危険コンテキスト内のタグ値を記入することにより安全スコアが 0.3750 と自動

的に計算されて危害エレメント内に表示される。対策案1のエンジン回転制御の安全スコアは、対策(緑エレメント)とその対策効果(青エレメント)に記入したタグ値を(4-2)～(4-4)式により計算して、安全スコア 0.3333 の値を得た。対策案2の遠心分離機の安全スコアも、対策とその対策効果に記入したタグ値から同様に計算して安全スコア 0.0741 となった。対策案3のフィルタ改良の安全スコアも、対策とその対策効果に記入したタグ値から同様に計算して安全スコアは 0.0000 と最小値(効果が高い)となった。タグ値の決定は、後述の技術的検討の結果に基づいている。コスト評価については、エンジン回転制御がすでに一部の機種で採用されていたため、コストは小(Small)と評価した。遠心分離機は油圧タンクの新規設計が必要であり[143]、一部の機種以外には採用されないためコスト大(Great)と評価した。改良フィルタは、ろ材強度の関係から従来フィルタとの互換性がないためコストは最小(minimum)ではなく小とした。3つの対策案の中でフィルタ改良が、最も安全スコアの数値が小さく安価であるため改良フィルタの採用が決定できる。ただし、安全スコアだけで判定するのではなく、それぞれの対策案についても利害関係者と検討して決めることが重要である[119]。

(5) 対策の技術的な妥当性の確認

エンジン回転制御は一部機種ではすでに採用されていたが、バイオ油による作動不良に対しては影響がなかったと推定された。作動油の遠心分離による気泡除去装置は前述のように建設機械の一部の機種に採用されているが、建設機械独特の大きな流量のために油中の気泡が十分取り除けないことが指摘されている[122]。

著者らは近年建設機械のオイル交換時間を延長するために改良ろ材のフィルタを採用した。改良フィルタの採用で期待された効果は、油中ダストをより多く捕捉して除去することにより、もともと酸化安定性が高い石油系作動油のオイル交換時間を延長することであった。改良フィル

表 4-6 作動不良の対策案のタグ値、安全スコアとコスト評価の比較

No.	Countermeasure Plans	Probability of Defence Success, <i>S</i>	Probability of Context Occurring, <i>P(Ou)</i> or <i>P(Od)</i>	Probability of Harm Occurring, <i>P(Hu)</i> or <i>P(Hd)</i>	Range of Harm, <i>Ru</i> or <i>Rd</i>	Severity of Harm, <i>Su</i> or <i>Sd</i>	Safety Score, <i>SS</i>	Cost Evaluation
0	Undefended Case	-	High (1.0000)	High (1.0000)	Many (0.7500)	S2 (0.5000)	0.3750	-
1	Auto Engine Controller	Low (0.3333)	High (1.0000)	High (1.0000)	Some (0.5000)	S2 (0.5000)	0.3333	Low (0.5000)
2	Centrifugal Air Bubble Separator	Medium (0.6667)	Medium (0.6667)	High (1.0000)	Few (0.2500)	S2 (0.5000)	0.0741	High (1.0000)
3	Improved Filter	High (1.0000)	Low (0.3333)	High (1.0000)	Few (0.2500)	S2 (0.5000)	0.0000	Low (0.5000)

表 4-7 フィルタ改良前後の車両での作動不良の発生件数の比較

	Annual Average Numbers of Valve Malfunction Occurrence
Machineries Adopted Previous Filter	10.5
Machineries Adopted Improved Filter	< 1.4

タを採用した機種と従来フィルタを採用した機種について、それぞれ 2 年間のバイオ油に起因する油圧バルブの作動不良の発生率を比較した結果を表 4-7 に示す。従来フィルタの機種では年平均 10.5 台であったが、改良フィルタの機種では 1.4 台未満であった。これにより改良ろ材フィルタが、バイオ油の作動不良に効果があったことが裏付けられた。また、安全スコアによる対策の決定が適切であることが裏付けられる。

4.9 まとめ

欧州での建設機械のバイオ油の使用義務化の規制に対応して、プロジェクトチーム活動により低品質のバイオ油に対する短期対策と、油圧サブシステムの改良を行う長期対策を施した内容を述べた。主な対策は次の通りである：

短期対策として、

- バイオ油の使用マニュアルを半年で作成して、ユーザに知らせた。

長期対策として、5 年以内で次のサブシステムを改良して逐次新型建設機械に搭載した。

- 新しい軸受け材料の採用と軸受け幅を改良した油圧ポンプ、油圧モータ
- 新ブレーキ材料を用いて改良した駐車ブレーキ
- ゴム材料を改良した油圧ホース
- ゴム材料を改良したシール部品を用いた油圧シリンダ
- 防錆処理をした改良油圧タンク
- 工場でのバイオ油の充填

しかしながら、一連の対策後も作動不良の問題が起きていた。この未解決のバイオ油の問題について、システムズエンジニアリングアプローチに基づき SysML を用いて油圧システムの振る舞いを記述して、バイオ油を起因とする作動不良に至るメカニズムを解明した。このメカニズムとバイオ油の状態遷移にもとづいて作動不良の対策案を導き出し、拡張 SafeML を用いた記述を行い、安全スコアを算出して対策を選定した。得られた結果をまとめると次のとおりになる。

- 1) 未解決のバイオ油による作動不良の原因を次のように解明できた。
 - バイオ油は油圧ポンプでの気泡の断熱圧縮と、メインバルブでのキャビテーションによりラッカーが生成される。
 - 生成したラッカーはフィルタに次第に堆積してフィルタを閉塞させる。閉塞したフィルタでろ過されずに流れた油中ダストが油圧バルブの固着または摩耗を起こして、油圧バルブの作動不良が起きる。
- 2) 3つの対策案、エンジン回転制御、遠心分離装置、改良フィルタを導き、安全スコアを算出した上で、最も効果的で安価な改良ろ材フィルタによる対策を選定することができた。

第5章 考察

本章では、まず建設機械メーカーの従来の開発の仕組みと故障対策の方法について述べ、システムズエンジニアリングのアプローチが必要になったことを述べる。また、従来の故障対策の方法を区分して目指すべき対策の方法を明らかにして、これを実現するための建設機械メーカーの純正油類によるメンテナンスを論じる。次に、第3章と第4章で述べた潤滑油類に起因する故障への対策をシステムズエンジニアリングの視点より論じる。これらシステムズエンジニアリングを用いた故障の解析と対策の方法が、一般機械装置の駆動システムあるいは他の複雑システムにも応用できることを述べる。

5.1 従来の建設機械メーカーの潤滑油類に起因する故障への対策について

本節では、従来の建設機械メーカーで行われている開発のデザインレビューの仕組みについて述べる。次に、運用ステージで行なった潤滑油に起因する故障の対策を区分して、最も有効な故障対策としての建設機械メーカーの純正油類を用いたメンテナンス契約について述べる。

(1) 建設機械メーカーのデザインレビュー制度を利用した潤滑油類の開発と故障対策の課題

建設機械メーカーは、1963～1981年にわたり少量多品種の製品を効率良く開発するために図5-1の商品開発のデザインレビューの仕組み(以下デザインレビュー制度)を確立している[144]-[147]。図中の会議体の欄に示す建設機械メーカーのデザインレビュー制度は、初期のシステムズエンジニアリングの考えが導入された。最上流では長期の商品戦略全体のターゲットとなるQCD(Quality, Cost, Delivery)を決める戦略検討会があり、その次に商品企画検討会で各商品についての戦術を決めて、一連の評価会(A, B, C, D)により開発継続の可否を担当者レベルの評価員が評価する。最初のシステムズエンジニアリングとされる米軍規格499A[148]を建設機械用に発展させたような内容である。商品企画検討会はSystem Concept Review (SCR)に相当し、評価会AはPreliminary Design Review (PDR)、評価会BとCはCritical Design Review (CDR)、またはAcceptance Review (AR)であり、評価会Dは最終のAcceptance Design Review (AR)に相当する。デザインレビュー制度では製品の品質目標、要求機能品質展開(QFD)、FMEA、日程、開発のQCD、品質確認方法、特許、安全性などと共に、著者らが追加した環境保全の観点[35]からも評価が行われる。この制度では、運用ステージでの故障を防ぐための妥当性確認が重視される。

過去、この制度の対象は建設機械、主要コンポーネントと油圧システムに限定されていたが、著者は潤滑油類の開発に初めて本制度を利用した。前述したバイオ油による故障の対策は本制度の適用例であり、全社的なプロジェクトを立ち上げて対策を推進することが可能となった。ただし、建設機械メーカーのデザインレビュー制度は、近年のシステムズエンジニアリングが採用されている訳ではない。このデザインレビュー制度では明確な階層化の考えはないため、担当

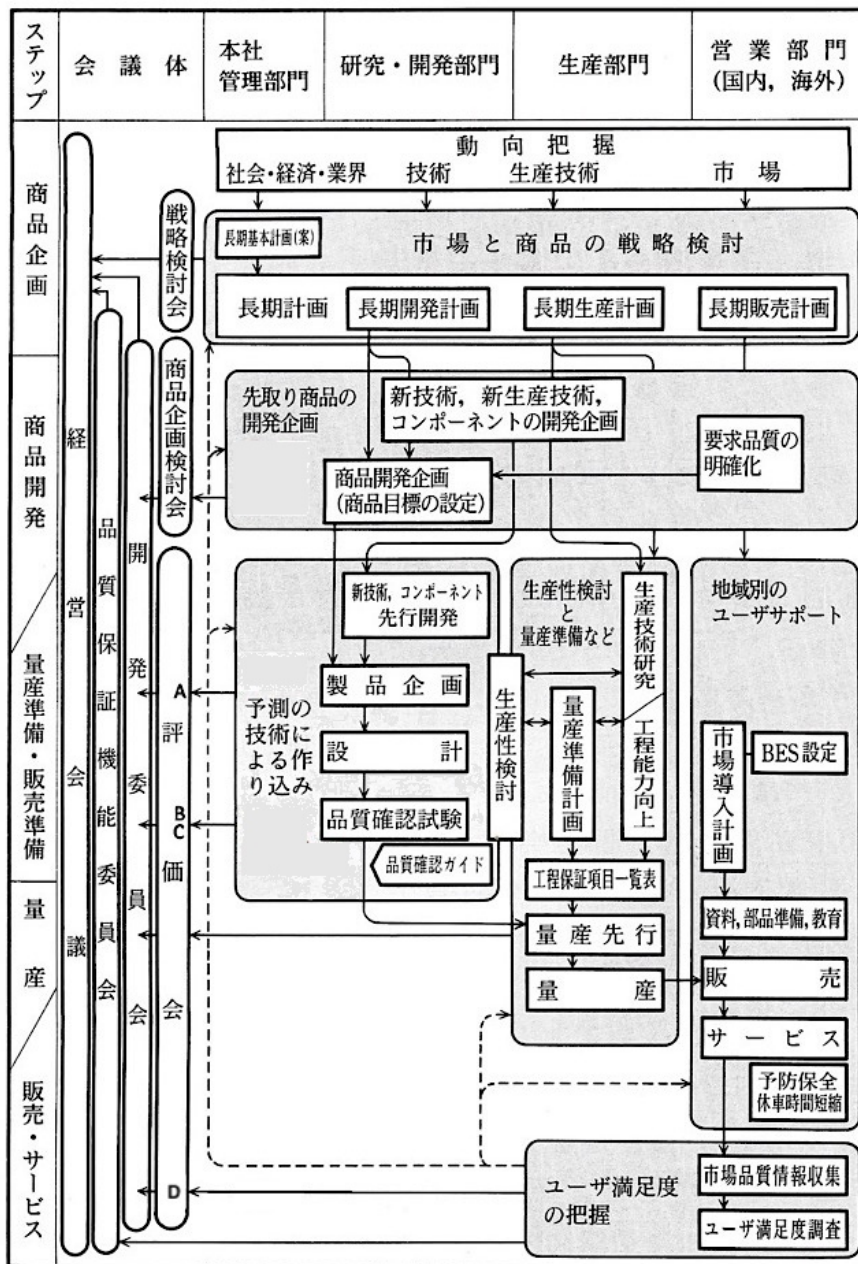


図 5-1 建設機械メーカーの 1990 年代のデザインレビュー制度の仕組み
文献[147]から転載

者が網羅的な解析と検証をすることになる。そのため、潤滑油類に起因する故障への対策は、FTA または FMEA などの手法も用いてはいるが、経験と長時間の試行錯誤の努力が必要であり効率的ではない。未解明の故障メカニズムまたは未解決の故障が残ることもある。しかも、故障対策は、開発とは異なり成果とは認められない。このような背景から、故障対策にはイノベティブな変革が要求されており、システムズエンジニアリングアプローチが必要になる理由であ

る。

(2) 故障への対策方法の種類

運用ステージにおける故障の発生は、建設機械メーカーの修理費用支払いだけでなく、故障の程度が深刻な場合にはユーザから休業補償が求められて、将来にわたり建設機械メーカーからの購入が避けられるおそれがある。このため、運用ステージでの対策はスピードと丁寧さが求められる。潤滑油類に起因する故障について、従来実施してきた対策方法は、表 5-1 のように 3 通りである。

対策方法 (Countermeasure Type) A は、ユーザが使用していた低品質の潤滑油類に代えて純正油類を用いる (To use genuine lubricants) ことである。対策分類 A は、最も早く確実 (Short-term but Long-term) 対策方法である。しかし、従来は海外ユーザへの純正油類の供給ができない問題があり、ユーザに純正油類の使用だけを要求することは独禁法などに抵触するおそれがあるため、海外では実施されていなかった。また、故障分類 I には効果がない。

対策方法 B は、低品質の潤滑油類に対して部品またはコンポーネントを改良する (To improve a parts or a component against a hazardous lubricant) ことである。改良に必要な期間で、短期対策 (Short-term) と長期対策 (Long-term) に分けられる。この対策では、コンポーネントの耐久性に関して過剰品質になるおそれがある。事例は、3.1 節の低品質エンジン油による故障への対策としてのエンジン改良と、3.2 節の冷却水シールの故障への短期と長期対策、4 章のバイオ油による油圧システムの故障への長期対策である。

対策方法 C は、特定のコンポーネントに対して危険のある潤滑油類の使用を禁止する (To prohibit use of a hazardous lubricant,)、あるいはユーザが入手可能な市販の潤滑油類について故障を生じない使用条件を推奨する (to recommend lubricants with proper operating conditions) ことであり、短期の対策である。この事例は、4 章のバイオ油による油圧システムの故障への短期対策のバイオ油の使用マニュアルである。

表 5-1 運用ステージでの潤滑油類に起因する故障に対して実施した対策方法の種類

Countermeasure Type	Countermeasure Method	Condition after Countermeasure			Term	Failure Classification
		Hazard	Hazardous Context	Harm		
A	To use genuine lubricants.	No	No	No	Short but Long-term	II
B	To improve a parts or a component against a hazardous lubricant.	To be Existed	No	No	Short-term and Long-term	I & II
C	To prohibit use of a hazardous lubricant, or to recommend lubricants with proper operating conditions.	To be Existed	To be Existed	No	Short-term	II

この方法の中では、純正油類を用いる対策方法 A の海外での実施が最も必要とされていた。

(3) 潤滑油類に起因する故障を防ぐための建設機械メーカーの純正油類によるメンテナンス契約

低品質な潤滑油類による故障分類 II に対しては、純正油類を用いる対策方法 A は効果が高いが、純正油類を海外全地域にも普及させることが必要であった。そのため、サービス部門が中心になり、著者、購買部門、商品企画部門がプロジェクトチームを組んで、海外石油メーカーと共同開発契約を結び[149]、2000 年より世界中へのグローバル純正油類の供給と、国内外工場への純正油類の充填を始めた。純正油類は前述のデザインレビュー制度にもとづいて開発しているため、海外サービス部門と海外工場に抵抗なく受け入れられた。純正油類が普及しなかった別の理由として、建設機械が山中に入り込んで作業しているため、純正油類の配送費用がかさむことがあった。

近年、建設機械にテレマティクス[150] が搭載されると、このプロジェクトチームの活動を基にテレマティクスを利用する純正油類を用いたメンテナンス契約の構想が作られた[151]。このメンテナンス契約について、図 5-2 の顧客価値連鎖分析図[152] (Customer Value Chain Analysis: 以下 CVCA)を用いて示す。純正油類は、潤滑油技術部門 (Lubricants Engineer) と

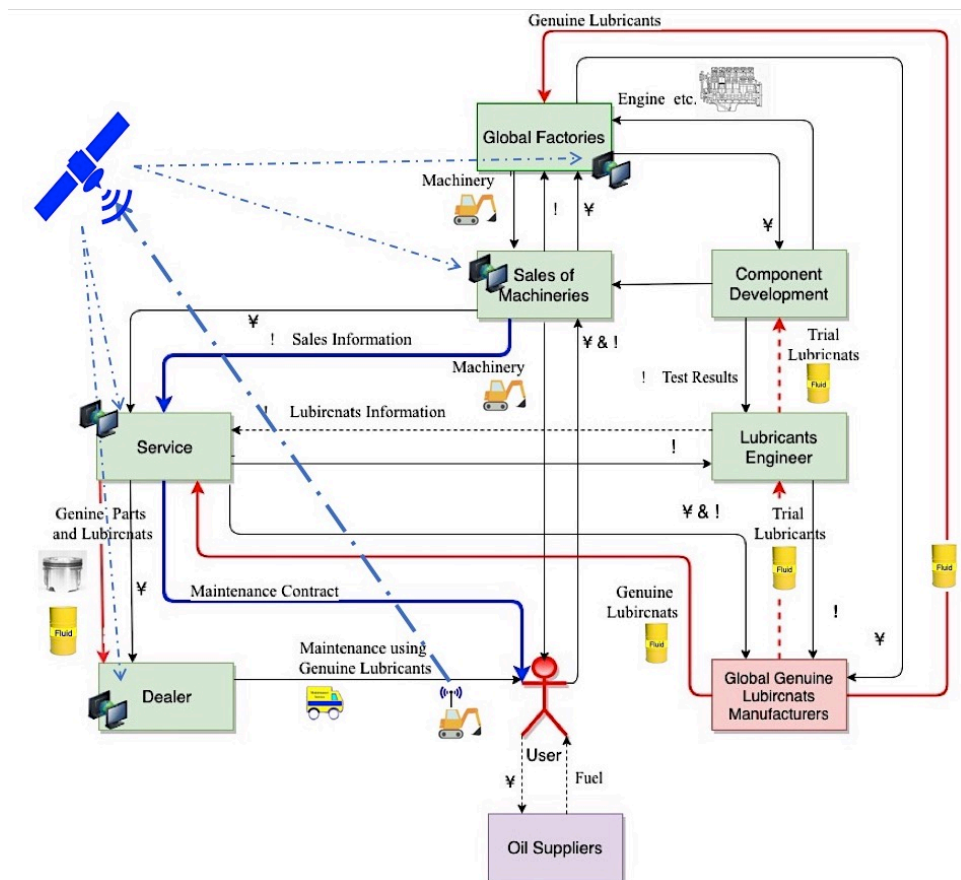


図 5-2 テレマティクスを用いた純正潤滑油類によるメンテナンスの CVCA 図

グローバル石油メーカ (Global Genuine Lubricants Manufactures) が共同開発して、その試作油 (Trial Lubricants) についてコンポーネント開発部門 (Component Development) が検証と妥当性確認を行う。純正油類が完成すると、建設機械メーカの国内外工場 (Global Factories) で全ての生産車両に充填される。サービス部門 (Service) は、建設機械の販売と同時にユーザとメンテナンス契約 (Maintenance Contract) を結び、純正油類を用いた整備 (Maintenance using Genuine Lubricants) を実施する[153]。全ての部門でテレマティックスを用いて建設機械の位置、運転時間、故障などが把握できるので、整備または修理に必要な部品と純正油類 (Genuine Parts and Lubricants) を持って短時間で現場に駆けつけることができる。海外ユーザへの純正油類の供給ルートができたこと、ユーザに純正油類の使用を強いることではないために契約が実現している。このメンテナンス契約のもう一つの理由は、排出ガス規制に適合する複雑な後処理装置の定期的なメンテナンスが必須になったためである。

この契約により純正油類による対策方法 A が実施されたため、故障分類 II の故障は減ることが期待される。近年、世界中の多くの建設機械メーカがテレマティックスを導入しており、純正油類の販売も始めているため、このような純正油類を用いたメンテナンスの方法が普及すると考えられる。

5.2 システムズエンジニアリングアプローチからの故障対策への再考

(1) 低品質の米国製エンジン油によるエンジン焼付きの解析についての考察(3.1 節参照)

建設機械メーカは、開発途上国で低品質の潤滑油類が多く使用されていることを認識していた。しかし、米国製エンジン油が国内エンジン油よりはるかに低品質であることは予想もできないことであり、このために原因の解析と対策が遅れたのである。システムズエンジニアリングアプローチからは、米国でのブルドーザの妥当性確認が不足していたと指摘でき、建設機械メーカの妥当性確認の方法は再検討されるべきである。米国の一部石油メーカは、ディーゼルエンジン油の市場において高負荷なブルドーザの使用台数は少ないため、ブルドーザに合わせてディーゼルエンジン油の品質を過剰に上げることはできないと説明していた。このため、潤滑油類に起因する故障を防ぐには、市場にある潤滑油類の中から最低品質の潤滑油類を選び、これに合わせて建設機械を改良するか、あるいはユーザに純正部品の潤滑油類を使用してもらう方法しかなかった。建設機械メーカのエンジンの開発で従来採用していたのは前者の方法である。

システムズエンジニアリングの SysML の状態機械図を用いて、エンジン内部でのエンジン油の状態遷移を記述することで、エンジン油の添加剤の振る舞いについて深く検討できることがわかった。酸化防止剤と清浄剤の働きがオーバーラップしていないことがわかる。ホットチューブテストが、燃焼条件が大きく異なる排出ガス規制以前のエンジンに対しても、現在の最終排出

ガス規制エンジンに対しても利用できるのは酸化ではなく、清浄性だけを評価しているためである。燃焼条件に関して排出ガス規制以前と最終排出ガス規制後を比較すると、燃料中の硫黄分が 5,000 ppm から 10 ppm に減り[11]、逆に排気再循環 (EGR) の採用によって吸入空気中の窒素酸化物量は増加している。今後は、低燃費エンジン油の開発などに状態機械図を用いた技術検討は役立つと思われる。

ピストンリングの振る舞いを SysML のアクティビティ図を用いて記述することにより、耐熱性の低いエンジン油でのピストンリングの固着に至るメカニズムを推定できたが、今後このアクティビティ図に基づいたピストンリングの振る舞いを、エンジンを用いた実験により検証することが技術進歩のために必要である。現在、様々な形式のピストンリングがあり、燃費低減またはオイル消費の削減に使い分けられているが、まだ技術が完結している訳ではない。キーストン形でラッカーが排出されることは経験的であり、SysML を用いたメカニズムの記述に基づいてエンジン試験を用いた測定により、理論を構築できると考えられる。ピストンリングの表面処理により、ラッカー付着を防ぐ方法も、アクティビティ図から導き出せる。潤滑油に起因するエンジン故障への対策にはアクティビティ図を用いることが必要である。

(2) DAR の手法を応用したエンジンヘッドガスケット用の水シールの故障解析と対策についての考察 (3.2 節参照)

ヘッドガスケット用水シールは、短時間の台上エンジン試験で冷却水漏れを起こしているが、これが開発ステージで発見されなかった理由は次の通りである。この高出力エンジンは、建設機械用に先行して発電機用および船舶用としてエンジンが開発され、台上エンジン試験だけによる妥当性確認が行われていた。この台上エンジン試験では、苛酷度を増すために不凍液を用いず試験用の粗悪水(腐食性イオンを多量に含む水)を使用した。そのため、高負荷運転時に冷却水漏れが生じた場合では、漏れた冷却水はヘッドガスケット外周で全て蒸発して痕跡は残らない。これにより冷却水漏れが検出されない状況が生じた。通常の使用条件で不凍液が使用されている場合には、エンジンから漏れると不凍液の主成分(グリコール)は、エンジン本体の熱により酸化して黒色の付着物になるために漏れが容易に発見できる。検証と妥当性確認のための試験では短期間で結果を出すために、苛酷度を増すことが優先されるが、苛酷度の低いユーザ試験などによる妥当性確認も重視する必要がある。図 5-3 は建設機械の妥当性確認であるが、実験場試験における苛酷な妥当性確認と、ユーザでの妥当性確認を並行して行っている。ユーザでの妥当性確認では、低負荷運転の特有の故障が生じることがある。

従来の FTA などを用いた故障メカニズムの解析は、専門家には有用であるが事象の階層と位置付けを理解することは難しい。そこで、システムズエンジニアリングアプローチとして、ヘッドガスケット用水シールのアーキテクチャを故障のビューとして DAR に記述して、システムから部品あるいは材料成分まで階層化して危険コンテキストと対応策を可視化できた。FTA を用いて

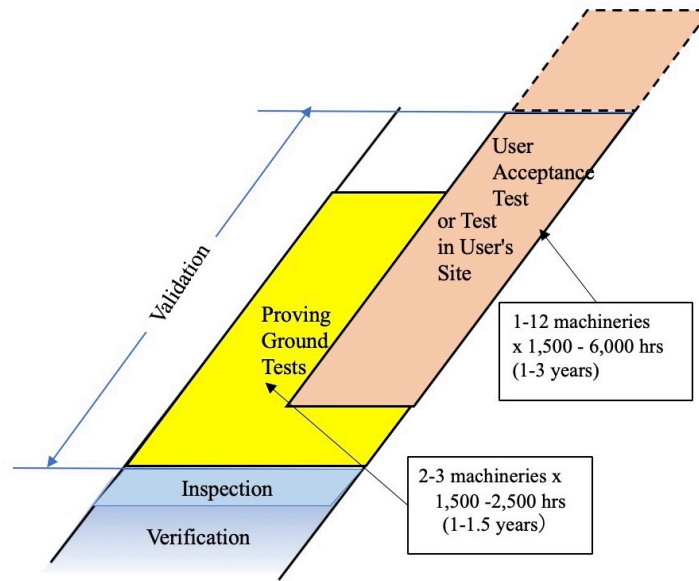


図 5-3 建設機械メーカーの妥当性確認 文献[155]-[160]をもとに作成

故障の解析と対策を行っていた場合には、製造工程の不良は例外的な問題として扱っていた。しかし、DAR により階層化すると、システムレベルの階層の危害が最も深刻な問題であり、アセンブリのレベルがその次の問題であるとわかった。製造不良という危険コンテキストに対しても適切な対策を行うことの重要性が明確になる。DAR を用いることで故障のカニズム解明と故障対策の検証ができるため、他の潤滑油類に起因する故障への対策にも DAR を用いることを提案できる。

このヘッドガスケットの水シールのように子部品だけの故障対策を行う例は多くない。ここでは、短期的な対策だけでなく、エンジンの将来を見据えた新しい材料開発を行なった長期対策の結果として、このヘッドガスケット方式を用いた高出力エンジンの製品寿命 (MOL) を大きく延長できた。今後は、潤滑油類に起因する故障への対策も、プロダクトライフサイクルマネジメント (PLM) の観点から行うことが必要である。

(3) クランクシャフト用オイルシールの漏れ故障の対策についての考察(3.3 節参照)

オイルシールのリップの振る舞いは、アクティビティ図で明確に記述することができた。本論文でアクティビティ図を用いて記述したヘリックスの作用、あるいはデュアルリップシールの負圧発生メカニズムなどは、エンジン設計者と技術者に十分理解されていない。そのため、これらの記述によりエンジン設計者と技術者が容易に理解できることが考えられ、オイルシールの技術の進歩に寄与できるものと考えられる。オイルシールでは、泥水に接触するダストリップの設計、米国で主流のレイダウン式オイルシールを用いた 2 液シールの負圧除去の設計など難し

い課題がある。アクティビティ図を用いてこれらを記述して設計の検討に役立てることが可能である。なお、レイダウン式オイルシールとは、ネジ状の溝を付けたフッ素樹脂(テフロンなど)製リップ(レイダウン)によるオイルシールであり、リップにはスプリングを用いない。国内でも一部の建設機械メーカーが採用している。

先行研究の FTA または FMEA によるオイルシールの漏れ原因の解析は理解が難しい。前述の DAR を用いて、高周速用クランクシャフトシールとデュアルリップシールの両シールの各階層の故障(危害)の問題について、危険コンテキストと対策を可視化することができた。この DAR では両シールを比較しながら検討するため、両シールへの剛性の異なるゴム採用による漏れ防止への効果、あるいはデュアルリップシールではヘリックスの採用の可能性など確認する必要があったことに気付くことができる。従来の経験と FTA に頼った故障メカニズムの解析では、気が付かない問題に対して、DAR を用いれば早期に検討することが可能である。

(4) 生分解性作動油による故障の対策についての考察(第 4 章参照)

プロジェクトチームは、迅速に短期対策と長期対策を実行できたが、これは初期のシステムズエンジニアリングに沿った解析と対策の手法が建設機械メーカーに根付いているためと考えられる。これら一連の対策によりユーザとサービス員から一定の評価が得られたが、未解決の油圧バルブの作動不良はユーザとサービス員に不満をもたらしていた。

システムズエンジニアリング的な視点から、未解決の不具合の解析を行って対策案を導出することで、バイオ油の使用を可能とする建設機械の油圧システムの開発を完結できた。SysML により油圧システムの基本メカニズムを記述して、バイオ油に起因する作動不良のメカニズムを明らかにできた。また、SysML を用いてバイオ油の状態機械図を記述することでラッカーが生成するメカニズムがわかり、内部ブロック図からラッカーが生成する部位(サブシステム)は、ポンプとメインバルブであることがわかった。従来の作動油の劣化は、ポンプでの気泡の断熱圧縮が主と考えられており[11]、空気を吹き込んだ高圧ピストンを用いた試験によりラッカー生成の量を測定する方法[154]も規格化されている。しかし、建設機械用として実用されている作動油が、この試験では不合格になるなど劣化のメカニズムが実際と合わない場合もある。この研究で見出されたメインバルブでのキャビテーションも含め作動油の劣化のメカニズムは工学的に再検討されるべきである。

SysML を用いた故障メカニズムの記述を解析することにより、新たにラッカーの生成によってフィルタ閉塞が起こることが明らかになった。従来はバイオ油の酸化しやすさは、油の変色と軸受メタル中の鉛の溶出ししか考えられていなかったのである。また、フィルタの機能として油中ダストを捕捉するだけでなく、ラッカーを捕捉してオイルの劣化を防ぐという新たな機能があることも見出された。今後は SysML を用いてシステムの作動メカニズムを記述することでシステム全体を見渡した開発が可能になると考えられる。バイオ油による作動不良を防ぐ対策案は、SysML

の状態機械図あるいはアクティビティ図の検討から導き出され、拡張 SafeML を用いて作動不良の危険コンテキストと対策案を記述できた。拡張 SafeML を用いた記述は、分野横断的チームの全員で共有でき、対策案の選定は安全スコアとコストのわかり易い指標から可能である。

ただし、FTA、FMEA などの手法は複雑なシステム全体に関わる問題を扱うには欠点があるが、コンポーネント(あるいはサブシステム)または部品の故障の解析には短時間で実施できるので有効な手段である。SysML は使いこなすのに時間が掛かるため、コンポーネントあるいは部品の故障対策には特性要因図、FTA、FMEA また今回新たに作った DAR を用いた解析の手法を組み合わせ用い、システム全体故障の対策には SysML および拡張 SafeML を用いた記述をもとに解析を行うことが提案できる。

5.3 一般の駆動システムへの、システムズエンジニアリングを用いた故障解析と対策の適用

本論文では、他の機械装置でも使用される普遍的なエンジンと油圧システムの故障への、システムズエンジニアリングを用いたアプローチを取り上げている。表 5-2 は建設機械とそれ以外の広範囲な機械装置 (Type of Machinery) での、エンジン (Engine) と油圧システム (Hydraulic System) の採用実態を示す。エンジンは 8 種の機械装置に用いられ、油圧システムは 7 種の機械装置に用いられている。それぞれの機械装置では、建設機械と似た潤滑油類に起因する故障への解析と対策が検討されている。著者は SAE の燃料・潤滑油部会アジア委員会 JASO EO 規格制定の活動および著書[11]の出版を通じて、自動車、農業用トラクタ (Farm Tractor)、自動 2 輪車 (Bike) のエンジンでの潤滑油類に起因する故障について知見を得ている。鉄道のディーゼルカー (Rail Car & Diesel Locomotive)、フォークリフト (Forklift)、船舶

表 5-2 エンジンと油圧システムを用いる機械装置

{✓:採用率 50%以上、(✓):採用率 50%未満}

No.	Type of Machinery	Engine	Hydraulic System
1	Construction Machinery	✓	✓
2	Car include Truck & Bus	✓	-
3	Bike	✓	-
4	Farm Tractor	✓	✓
5	Rail Car & Diesel Locomotive	✓	-
6	Forklift	(✓)	✓
7	Ship	✓	✓
8	Engine Generator	✓	-
9	Injection Machine	-	(✓)
10	Steel Making Machine	-	✓
11	Press Machine	-	✓

(Ship)とプレス機械(Press Machine)の潤滑油類に起因する故障には著者は直接関与していた。射出成形機(Injection Machine)と製鉄機械(Steel Making Machine)への知見はない。これらの駆動システムの潤滑油に起因する故障も、本論文に述べた内容に近いものがあるため、このシステムズエンジニアリングアプローチが故障解析と対策に必ず役に立つと考えられる。また、この方法は駆動システムに限らず他の機械装置、あるいは他の複雑システムにも極めて利用しやすいと考えられる。

DARによる故障の解析は、故障分類 I でも II でも使え、さらに潤滑油類が絡まない機器の故障にも適用できる。SysMLを用いて基本メカニズムを記述して理解し、故障メカニズムを解析して対策案を導く方法は、他の機械装置あるいは他の複雑システムでも利用できる。

潤滑油類の状態遷移を、SysMLの状態機械図に記述することにより潤滑油類を深く理解でき、今までにない技術的な検討ができたので石油メーカーでも役にたつと考えられる。本論文の提案するシステムズエンジニアリングを用いた故障解析と対策の方法が、機械装置あるいは他の複雑システムの産業で活用されることが期待される。

第6章 結論

これまで長年に渡り、著者が手がけてきた潤滑油類を起因とする建設機械の駆動システムの故障への対策について、その内容全体をまとめる形で論じるとともに、新たにシステムズエンジニアリングのアプローチからこれらの故障の原因究明と対策が可能となることを示した。具体的には、低品質のエンジン油によるエンジンの焼付き故障、エンジン冷却水シールの漏れ故障、エンジントランクシャフト用オイルシールの漏れ故障、および生分解性作動油による油圧システムの作動不良の問題について、それぞれのシステムの基本アーキテクチャを記述し、そこからその本質を理解した上で、故障のメカニズムを解明し、施すべき対策を導き出した。

メカトロニクス、ロボット、航空機分野では、システムズエンジニアリングアプローチに基づくシステムモデルを用いた、安全の観点からの解析と対策に関する研究はあるものの、本論文のような建設機械の駆動システムの故障に関してシステムモデルをもとに解析と対策が施された研究例は見当たらない。建設機械の駆動システムの中で潤滑油類の果たす役割は極めて大きく、メカトロニクスの専門性のみでは、故障問題の解決に至らない。本論文は、潤滑油類に関する学問分野とメカトロニクスの学問分野とを融合させて考えるべき故障問題を、システムズエンジニアリングアプローチの中で、特にシステムモデルを用いるアプローチで解決に導いた。

以下に、第2章から第4章の順を追って結論をまとめる。

第2章では、建設機械の潤滑油類に起因する故障を、建設機械への危害(Harm)とする場合について、故障にいたる際の危険と危険コンテキストを次の二種類に分類した。

故障分類 I: 建設機械の駆動システム内に新しい設計を導入したことにより、標準的な潤滑油類の品質の限界を超えて使用するケースが生じ、これが危険コンテキストとなり、駆動システム内に故障が生じる。

故障分類 II: 低品質の潤滑油類を用いることが危険源となり、駆動システムが仕様通りに動作することが危険コンテキストとなって駆動システム内に故障を生じる。

その上で、第3章と第4章に取り上げる故障をこの二種類に分類した。

第3章では建設機械用エンジンの故障を取り上げ、第3.1節では低品質エンジン油によるエンジン焼付きの解析について論じた。著者はエンジン油の耐熱性を評価できるホットチューブテストを開発し、このテスト方法を用いることでエンジン焼付き故障の原因が耐熱性の低いエンジン油であることを見出した。また、新たにエンジン設計を行う際の焼付きの問題を未然に解決に導くことを目的として、最も耐熱性の低いエンジン油を台上エンジン試験に用いる提案を行ったことを述べた。これらの研究に関して、システムズエンジニアリングを用いるアプローチにより再考して導いた結果は次のとおりである。

- 1) エンジン油のラッカー生成と溶解についての状態遷移を、SysMLの機械状態図で記述したことにより、エンジン内でのエンジン油の状態を、正常状態、劣化状態、溶解状態ならび

に沈殿状態の4分類に分けた。

- 2) エンジン焼付きはエンジン油が沈殿状態にあるときに生じるため、この状態に至る温度(耐熱性)がエンジンの焼付きが生じたかどうかを決める。ホットチューブテストは劣化状態ではなく、沈殿状態になるエンジン油の温度(耐熱性)を評価しているため、エンジン焼付きの有無との関係が得られることを明らかにした。
- 3) ピストンリングの振る舞いを SysML のアクティビティ図を用いて記述したことにより、耐熱性の低いエンジン油でのピストンリングのラッカーによる固着に至るメカニズムを推定できた。

第3.2節では、ヘッドガスケットの水シールの漏れの故障解析と対策を論じた。水シールの漏れの原因は、ゴム成分である粗いシリカ充填剤が起こす不均一な接触と早期の疲労亀裂、冷却水に発生したバクテリアによるゴム劣化であることを明らかにした。この結果から、シリコンゴムの改良を行い、漏れ故障を防ぐことができたことを示した。システムズエンジニアリングのアプローチにより再考した結果、得られた結論は次のとおりである。

- 4) FTA のみでは、多くの原因が複雑に絡み合う故障を解析することはできなかったが、アーキテクチャの故障ビューから見た DAR を用いて、故障に関する問題点を洗い出すことができることを示した。
- 5) システムから材料組成まで階層化して、故障の原因と対策を可視化することにより、水シールの漏れの原因を総合的に理解できるようになり、対策後の水シールの効果を評価できた。
- 6) 新たに開発した水素化 NBR の水シールは、これを用いた高出力エンジンの製品ライフサイクル管理(PLM)での MOL(Middle of Life)を大きく延長できた。潤滑油類に起因する故障への対策では、建設機械の駆動システムの耐久性の向上に寄与するため、MOL の延長を狙うことが可能となる。

第3.3節では、クランクシャフトシールの漏れの原因について解析して対策を行なった。漏れの原因は、オイルシールリップの油膜切れによる炭化物堆積であった。高周速用のクランクシャフトシールはリップ荷重低減とヘリックス追加で対策でき、2液用のデュアルリップシールは負圧を防ぐチューブをオイルシールに付けて対策した。これらの解析と対策を検討する中で、クランクシャフトシールのリップ温度測定で評価する方法と、PV 値を用いた設計手法を開発したことを述べた。システムズエンジニアリングのアプローチにより再考した結果、得られた結論は次のとおりである。

- 7) 両クランクシャフトシールのリップの作用を、SysML のアクティビティ図を用いて可視化できた。これにより、高周速クランクシャフトシールではヘリックスの効果を明確にでき、デュアルリップシールではリップ間に生ずる負圧のメカニズムを明確に示すことができた。

- 8) DAR を用いることで高周速用とデュアルリップ用の両方のクランクシャフトシールの漏れメカニズムを統合して解析できた。
- 9) この DAR を用いた解析結果から、高周速クランクシャフトシールのダストリップの一時的な負圧発生、シリコーンゴム (VMQ)あるいはフッ素ゴム (FKM) のどちらが最適な材質であるかなどの検討、およびデュアルリップシールでのヘリックスとリップ剛性について検討が不足していたことがわかった。

第 4 章では、建設機械のバイオ油の使用義務規制に対応して、プロジェクトチーム活動による対策を施したことについて述べた。対策として、バイオ油の使用マニュアルを作る短期対策と、油圧サブシステムの改良を行う長期対策に分けた。しかしながら、作動不良の問題点が未解決のまま残っていたため、システムズエンジニアリングアプローチに基づき SysML を用いて油圧システムの振る舞いを記述し、バイオ油を起因とする作動不良に至るメカニズムを解明した。このメカニズムとバイオ油の状態遷移にもとづいて作動不良の対策案を導き出し、安全分析とその対策の記述に用いる SafeML を拡張して用いてこれらを記述した。その結果、体系立てて対策案を選定することができた。結論をまとめると、次のとおりとなる。

- 10) 未解決のバイオ油による作動不良の原因を次のように解明できた。
 - バイオ油は、油圧ポンプでの気泡の断熱圧縮と、メインバルブでのキャビテーションによりラッカーを生成する。
 - 生成したラッカーはフィルタを閉塞させる。このためろ過されずに流れた油中ダストが油圧バルブの固着または摩耗を起こして油圧バルブの作動不良を起こす。
- 11) 3 つの対策案、エンジン回転制御、遠心分離装置、改良フィルタを導き、安全スコアを算出した上で、安価で効果の高い改良ろ材フィルタの対策を選定することができた。

以上の結論から、システムズエンジニアリングアプローチから再考した具体的な故障の解析と対策方法の体系化について、次のようにまとめることができる。

1. DAR により、故障の複雑な要因と対策を、システムレベルからコンポーネントレベルへ階層化して可視化することで、体系的に解析と対策ができることを示した。すなわち、DAR による故障原因の解析と対策の体系化ができた。
2. システムズエンジニアリングアプローチに基づき、SysML のアクティビティ図を用いて、エンジンおよび油圧システム内部の潤滑油類と部品との間の振る舞いを記述し、SysML の状態機械図を用いて、潤滑油類の状態の遷移を記述することにより、故障メカニズムを明確に把握できることを示した。建設機械の駆動システムの中で潤滑油類の果たす役割は極めて大きく、耐久性への影響が極めて高い。潤滑油類に関する学問分野とメカトロニクスの学問分野とを融合させて考えるべき故障問題を、システムズエンジニ

アリングアプローチの中で、特にシステムモデルを用いるアプローチで解決に導いた。

3. 故障解析とその対策の記述に拡張した SafeML を用い、安全スコアを算出することで低コストで効果の高い対策を選定することができた。システムモデルを記述した上で故障のもととなる危険源と故障に至る危険コンテキストを明らかにし、その対策を導く体系的な方法を示した。

本論文では、建設機械の潤滑油類に起因する故障への対策について、システムズエンジニアリングアプローチから再考し、故障に対する体系的取り組みの方法を示すことができた。潤滑油類に関する学問分野とメカトロニクスの学問分野とを融合させて考えるべき故障問題は極めて複雑であり、こうした学問分野をまたぐ機械設備あるいは複雑システムに対する故障対策には、同様のアプローチを適用することを推奨する。近年、航空機メーカーで故障対策の遅れによる売り上げを大幅に減らした事例や、部品メーカーで故障の解析と対策が不十分で、かつ対応が遅れたために破綻した事例もある。今後、多くの製品で、分野横断的で複雑な技術的問題を解決することが必要とされていくものと考えられる。本論文の成果が様々な故障への対策や、製品開発など多くの分野で活用されることを期待している。

文献

- [1] European Environment Agency: Noise in Europe 2014, *EEA Report, No.10/2014*, p9, (2014)
- [2] EU: DIRECTIVE 2000/14/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 8 May 2000 on the approximation of the laws of the Member States relating to the noise emission in the environment by equipment for use outdoors, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0014&from=EN>(閲覧日 2018-12-26)
- [3] 日本建設機械施工協会:建設機械の燃費評価 JCMAS 燃費試験規格と燃費情報表示について、(2014) <https://www.jcmanet.or.jp/wp-content/uploads/2014/12/6b49881094cff7a2848a42be7556ff67.pdf> (閲覧日 2019-1-4)
- [4] 鍋岡和之:建機製品の環境負荷物質低減活動の動向、*建設の施工企画*、742、p61-65, (2011)
- [5] K. Forsberg, H. Mooz and H. Cotterman: *Visualizing Project Management*, Wiley, New York, p9, p22-24, p122, p143-148, p241-248, p343-351, (2005)
- [6] D. Walden, G.J. Roedler, K.J. Forsberg, R. D. Hamelin, T.M. Shortell: *INCOSE Systems Engineering: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, Fourth Edition, Wiley, p11, p19, p49, (2015)
- [7] ISO/IEC 15288:2004, *Systems Engineering—System LifeCycle Processes*.
- [8] 大川聰:写真でたどる建設機械200年, 日本建設機械化協会、(2008)
- [9] 協同油脂:グリースの歴史、<https://www.kyodoyushi.co.jp/knowledge/grease/history/> (閲覧日 2019-3-21)
- [10] 日本潤滑学会編:*潤滑ハンドブック*、p4-7, p83, p406-407,(1987)
- [11] 日本トライボロジー学会(大川聰編):*産業用車両の潤滑—エンジン・油圧機器・パワートレイン・潤滑剤—*、養賢堂、p4, p9-15, p48-58, p63-69, p107-108, p111, (2012)
- [12] News Report, Equipment top 50 - 2018 Yellow Table, *International Construction*, 57, 3, p21-24, (2018)
- [13] https://home.komatsu/en/ir/library/annual/_icsFiles/afieldfile/2017/09/25/KR2014_PDF_en_0710.pdf(閲覧日 2019-07-13)
- [14] Off-highway Research, *International Construction*, 57, 2, p57, (2018)
- [15] D. Muoio:2040年までにガソリン車を禁止する国は?, *Business Insider* 2017/10/25

- [16] トヨタ、EV 中国生産 自社開発車を 20 年にも発売、*日本経済新聞*, 2018/4/25
https://www.nikkei.com/article/DGXMZO29830190V20C18A4EA2000/?n_cid=SPTMG002
- [17] Tesla: Tesla Semi Tesla's upcoming all-electric heavy-duty truck, (2018),
<https://electrek.co/guides/tesla-semi/> (閲覧日 2018-12-31)
- [18] Thor Trucks: ET-One, <http://www.thortrucks.com/et-one/> (閲覧日 2018-12-31)
- [19] 大平修司、落合正巳、木村敏宏:2 種類のバッテリー駆動ショベルの開発と今後の展開、*建設の施工企画*, 695, p54-59 (2008)
- [20] 田中豊:油圧の特徴と最新事例の紹介、*IFPEX2014 セミナー*(2014)
<http://www.jfps.jp/ifpex2014/pdf/IFPEX2014-4-Tanaka.pdf> (閲覧日 2019-1-5)
- [21] 自動車工業会:世界の 4 輪車保有台数、(2016)
http://www.jama.or.jp/world/world/world_2t1.html (閲覧日 2018-12-12)
- [22] 国土交通省:平成 27 年度 建設機械動向調査 e-Stat 政府統計の総合窓口 (2015)
https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00600080&tstat=000001118155&cycle=0&tclass1=000001118156&result_page=1&second=1&second2=1 (閲覧日 2018-12-12)
- [23] 経済産業省:13. 特殊自動車(建設機械・農業機械・産業機械)に係る排出量(2012)
http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/h24kohyo/todokedegai_haisyutsu/syousai/13.pdf (閲覧日 2018-12-12)
- [24] 国土交通省:運輸部門における二酸化炭素排出量、(2016)
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html (閲覧日 2019-1-2)
- [25] 大平修司、末廣めぐみ、太田健介、河村謙輔:排出権を用いた建設機械による地球温暖化防止への貢献、*日立評論*, 94, 5, p394-395, (2012)
- [26] 農林水産省:農林水産分野における地球温暖化対策・施策、(2013)
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004000/pdf/037_02_00.pdf (閲覧日 2019-1-2)
- [27] 平井康丸、末永隆裕、濱上邦彦:棚田の米生産におけるエネルギー消費量と温室ガス排出量、*システム農学*, 28, 1, p47-56, (2012)

- [28] F. Culshaw and C. Butter: A Review of The Potential of Biodiesel as A Transport Fuel, Department of Trade and Industry, *Energy Technology Support Unit Report*, London, ETSU-R-71, (1992)
- [29] JIS, 自動車燃料—混合用脂肪酸メチルエステル (FAME)、K2390、(2016)
- [30] 農林水産庁: EU におけるバイオ油燃料政策、
http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_rep/monthly/201704/attach/pdf/201704-6.pdf
(閲覧日 2019-2-28)
- [31] H. Hamaguchi, D. Placek and S. Ohkawa: Hydraulic Fluid Influence on Piston Pump Efficiency, *The 12th Annual Fuels & Lubes Asia Conference*, (2006)
- [32] 安部川利治、谷川優一郎、広沢敦彦: コマツ純正作動油 コマハイドロ HE の紹介、
Komatsu Technical Report, 56,163, p35-40, (2010)
- [33] 三井住友銀行: 国内建設機械業界の動向、(2018)
https://www.smbc.co.jp/hojin/report/investigationlecture/resources/pdf/3_00_CRSD_Report054.pdf (閲覧日 2019-1-3)
- [34] C. Hill: Worldwide construction equipment rental market to reach \$75.2 billion by 2024, *Equipment World*, (2017)
<https://www.equipmentworld.com/worldwide-construction-equipment-rental-market-to-reach-75-2-billion-by-2024/> (閲覧日 2019-1-3)
- [35] 松本毅、大川聰 (原案作成): 建設機械の環境負荷低減技術指針、*日本建設機械施工協会規格 JCMAS H016* (2002)
- [36] コマツ PC210LC-11 カタログ, コマツアメリカ
<https://www.komatsuamerica.com/equipment/excavators/mid-size/pc210lc-11> (閲覧日 2018-12-27)
- [37] クラウン取扱説明書, トヨタ自動車,
https://toyota.jp/pages/contents/crown/011_p_001/pdf/spec/crown_201811.pdf (閲覧日 2018-12-27)
- [38] 日野自動車資料 (2008)
- [39] 大川聰、伊藤光一郎、井上裕之、小西晃子、柳沢正和、斎藤秀明、飯田武郎、佐伯文高: 水グリコール仕様油圧ショベル PC300LC-6 の開発、*Komatsu Technical Report* 46, 1, p36-42, (2000)
- [40] European Automobile Manufacturers Association, Alliance of Automobile Manufacturers, Truck and Engine Manufacturers Association and Japan Automobile Manufacturers Association: *Worldwide Fuel Charter, Fifth Edition*, (2013)

http://www.jama.or.jp/eco/wwfc/pdf/WWFC5_2013_Final_single_page_corr.pdf(閲覧日 2019-03-03)

- [41] 大川聰、益子知幸、加藤敏夫、中野平:ディーゼルエンジンの排気バルブ固着に及ぼす軽油性状の影響、*内燃機関* 30, 383, p70-76, (1991)
- [42] JIS, 不凍液, K2234, (2018)
- [43] K. Iijima, S. Ohkawa, K. Iwakata; "Low-Toxic Engine Coolant for Heavy-Duty Construction Equipment", 6th Annual Fuels & Lubes Asia Conference (2000)
- [44] S. Ohkawa, T. Kawasaki and K. Kumagae; "A New Antifreeze Coolant for Heavy-Duty Diesel Engines", SAE Transactions Journal of Commercial Vehicles-V99-2, SAE Technical Paper 900433, (1990)
- [45] S. Ohkawa, Y. Touji, G. Sugiyama, T. Seno, K. Ogura, H. Ishiyama, H. Koderu, M. Nagao, H. Hamaguchi, H. Tauchi, S. Mitsumoto, Y. Shiraga, A. Mochizuki, M. Seki, H. Ootsu, H. Hasegawa, H. Nishina, H. Kosodo, T. Ando, N. Shizuka: Development of New Hydraulic Fluids Specifications for Construction Machinery, *SAE Technical Paper*, 2005-01-3574, (2005)
- [46] S. Ohkawa, A. Konishi, H. Hatano and D. Voss; "Piston Pump Failures in Various Type Hydraulic Fluids", American Society for Testing and Materials (ASTM) Selected Technical Paper (STP)1339 Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects, p263-277, (2001)
- [47] 大川聰、久世隆、柴田公、小西晃子:解説 湿式摩擦材(その3)、*Komatsu Technical Report*, 43, 2, p19-35, (1997)
- [48] 石井孝憲、澤瀬薫、後田祐一:前輪制御 LSD との統合制御により車両運動性能を向上させた軽量の制御 4WD システムの開発、*自動車技術会論文集*, 41, 4, p791-796, (2010)
- [49] JIS, グリース, K2220, (2013)
- [50] T. Seno, S. Ohkawa, G. Sugiyama, K. Ogura, H. Ishiyama, Y. Touji, H. Koderu, M. Nagao, H. Tauchi, H. Hamaguchi, M. Nakamura, K. Takeuchi, Y. Shiraga, A. Mochizuki, M. Seki, H. Hasegawa, H. Nishina: JCMAS New Grease Specifications for Construction Machinery, SAE Technical Paper, 2006-01-3504 (2006)
- [51] S. Ohkawa, A. Kimura and H. Kimura; "Non-black Heavy Load Multi-Purpose Grease for Construction Machine", SAE Transactions Journal of Fuels and Lubricants-V105-4, SAE Technical Paper 961106, (1996)

- [52] 西村秀和 (監訳), S. Friedenthal, A. Moore, S. R. Streiner 著: システムズモデリング言語 SysML, 東京電機大学出版局, p29, (2012)
- [53] 西村秀和: システムズエンジニアリングとMBSE、*日本機械学会誌*, 1177, 119, p646-649, (2016)
- [54] 中澤孝志: システムズエンジニアリングを用いた新エンジン開発、*日本機械学会誌*, 1177, 119, p658-661, (2016)
- [55] S. Ohkawa, K. Seto, T. Nakashima and K. Takase: “Hot Tube Test” – Analysis of Lubricant Effect on Diesel Engine Scuffing, *SAE 1984 Transactions-V93-84, SAE Technical Paper 840262*, (1984)
- [56] S. Ohkawa, K. Iwakata and Y. Kawashima; Coolant Seal Elastomer for Diesel Engine Head Gasket, *SAE Transactions Journal of Commercial Vehicles-V102-2, SAE Technical Paper 932375*, (1993)
- [57] S. Ohkawa, K. Iwakata and K. Tikugo: Radial Lip Crankshaft Seals for Heavy-duty Diesel Engines, *SAE Transactions Journal of Engines-V99-3, SAE Technical Paper, 900337*, (1990)
- [58] S. Ohkawa, H. Nishimura and Y. Ohkami; “Decomposition Analysis Resolution Process (DAR) of Systems Engineering Applied to Development of Countermeasure on Leakage of Engine Head-Gasket”, S. Fukuda et al. (Eds): *Product Lifecycle Management for a Global Market, 11th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2014*, p181-192, (2014)
- [59] 大川聰、瀬戸健三: エンジンオイルの高温清浄性評価—ホットチューブテスト、*小松技報* 25, 4, p231-236, (1979)
- [60] 大川聰、岩片敬策: ディーゼルエンジン用ゴム部品の改良、*小松技報* 32, 1, p1-8, (1986)
- [61] 大川聰、岩片敬策: 建設機械用ディーゼルエンジンのオイルシールの最近の動向、*月刊トライボロジー*, 23, p22-25, (1993)
- [62] 大川聰、岩片敬策: エンジンヘッドガスケット用冷却水シール、*バルカーレビュー* 38, 2, p1-9, (1994)
- [63] 大川聰、尹善吉、日比谷孟俊、西村秀和: 生分解性作動油に適合する建設機械用油圧システム開発の新しい手法～故障解析における要素解析手法と総合解析手法の統合事例～、*Synthesiology*, 12, 2, p57-74, (2019)
- [64] S. Ohkawa, A. Konishi, H. Hatano, K. Ishihama, K. Tanaka and M. Iwamura; Oxidation and Corrosion Characteristics of Vegetable-Base Biodegradable Hydraulic

- Oils, *SAE Transactions Journal of Fuels and Lubricants-V104-4*, *SAE Technical Paper 951038*, (1995)
- [65] A. Konishi, S. Ohkawa, N. Nakamoto, M. Nanba and T. Yoshida; Development of A High Performance Biodegradable Hydraulic Oil for Construction Equipment, *SAE Transactions Journal of Fuels and Lubricants-V106-4*, *SAE Technical Paper 971632*, (1997)
- [66] R. Eguchi, Y. Ohtake, S. Ohkawa, M. Iwamura and A. Konishi: Compatibility of Hydraulic Seal Elastomer with Biodegradable Oils, *SAE Transactions Journal of Material and Manufacturing-V105-5*, *SAE Technical Paper, 960210*, (1996)
- [67] S. Ohkawa and A. Konishi: Biodegradable Hydraulic Oil for Heavy-Duty Construction Equipment, *1st Internationales Fluidtechnisches Kolloquium, Aachen*, (12), p207-214, (1998)
- [68] 大川聰:生分解性作動油の現状と課題、*日本フルードパワーシステム学会ウインターセミナー*, p15-27, (1997)
- [69] P. Lämmle, B. Walterspiel and M. Woydt: *Ester Oils*. U.S. Patent No. 20130190217A1 (2013)
- [70] 飯島浩二、大川聰、岩片敬策:ノンアミンクーラントの開発、*Komatsu Technical Report*, 48, 149, p3-10, (2002)
- [71] ISO/IEC GUIDE 51:2014, Safety aspects — Guidelines for their inclusion in standards.
- [72] 桜井俊男編: *石油製品添加剤*, 幸書房, p263, p291 (1979)
- [73] Caterpillar; Single Cylinder Engine Tests for Evaluating the Performance of Crankcase Lubricants, Part I: Caterpillar 1G2 Test Method, ASTM STP 509A, p1-51,(1979)
- [74] S.M. Hsu; Engine Oil Evaluation Through Bench Testing, National Bureau of Standards Special Publication 584, p191-204, (1980)
- [75] JIS, 石油製品及び潤滑油—中和価試験方法, K 2501, (2003)
- [76] JIS, 原油及び石油製品—灰分及び硫酸灰分試験方法, K 2272, (1998)
- [77] 石附喜昭:エンジンのオイル消費メカニズム解析、*小松技報*, 25, 4, p237-251, (1979)
- [78] 鈴木吉洋監修: *自動車用ピストン*, 山海堂, p105, (1997)
- [79] K. Kikuchi: Update of the DX-1 Development, t6th Annual Fuels & Lubes Asia Conference - Full Conference Proceedings, (2000)

- [80] T. Hashimoto*, M. Niikura, F. Ueda, K. Nakamura, T. Ukai, K. Ito, K. Kikuchi, Y. Kishi, S. Ohkawa, M. Enomoto, H. Umetsu, S. Takamura, N. Naganuma, N. Kagiwata, M. Mishima, T. Suzuki, K. Arai, T. Narishima, K. Takagi, H. Hamaguchi, Y. Yokoyama, K. Fukuda, K. Tawa: New Standard for Four-stroke Diesel Engine Oils: JASO DH-1, *SAE Technical Paper 2001-01-1970*, (2001)
- [81] JPI(石油学会規格),エンジン油—ホットチューブテスト試験方法, JPI-5S-55-99 (1999)
- [82] http://www.jalos.or.jp/onfile/pdf/DH_J1812.pdf/(閲覧日 2019-6-19)
- [83] R. W. Keller: FKM and HSN Material for Diesel Engine Cylinder Liner Seals, *SAE Technical Paper 910967*, (1991)
- [84] D.L. Hertz: Effects of Thermal Cycling on Elastomers in High Temperature Coolant, *ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, American Society of Mechanical Engineers, (2010)
- [85] 井上凱夫:シリコンゴムの劣化耐候, 耐熱, 耐化学薬品性、*日本ゴム協会誌* 62,12, p803-818, (1989)
- [86] JIS, ディペンダビリティ マネジメント—第 4-4 部:システム信頼性のための解析技法—故障の本解析(FTA), C5750-4-4, (2011)
- [87] 金子秀男: *応用ゴム物性論 20 講*, 大成社, p127, (1978)
- [88] 腐食防食協会編: *腐食と対策事例集*, 海文堂, p359-363, (1985)
- [89] J. Stark; *Product Lifecycle Management: 21st Century Paradigm for Product Realization*, Springer, Berlin, (2011)
- [90] 仙田和久: 4.市場問題解析(その 2)、*日本ゴム協会誌* 66,12, p890-894, (1993)
- [91] H. Hirabayashi, M. Ohtaki, H. Tanoue and A. Matsushima: Troubles and Countermeasures on Oil Seals for Automotive Application, *SAE Technical Paper 790346*, (1979)
- [92] JIS, ディペンダビリティ マネジメント—第 4-3 部: システム信頼性のための解析技法—故障モード・影響解析(FMEA)の手順, C5750-4-3, (2011)
- [93] J.D. Symons: Dynamic Sealing Systems for Commercial Vehicles, Truck Systems Design Handbook-PT-41, *SAE Technical Paper 840001*, (1984)
- [94] A. Matsushima, M. Ohtaki, H. Hirabayashi, S. Iida et al., "Comments on Oil Seals for Engine Applications in Small Size Japanese Passenger Cars," *SAE Technical Paper 840191*, 1984,

- [95] H. Rapp, R. Drucktenhengst: Sealing Problems and Solutions in the Sealing of Truck Axle Pinions and Wheels by Radial Shaft Seals, *SAE 1984 Transactions-V93-84*, *SAE Technical Paper 841150*, (1984)
- [96] 福永光信:ダブルリップ形オイルシール、公開実用新案、昭57-136054、(1982)
- [97] 今野芳美、川井仁、田村幸雄、佐々木喜代治、村上満理奈:建設機械用オイルシールのプリスタ生成メカニズム、*Komatsu Technical Report*, 62, 169, p2-8, (2016)
- [98] SAE J200_201112: 2011, Classification System for Rubber Materials
- [99] 荒木義文:密封装置の変遷と最近のねじ付きシールの技術動向、*Koyo Engineering Journal*, 167, p15-18,(2005)
- [100] 大川聰、岩片敬策:オイルシール装置、公開実用新案公報、昭63-110769、(1988)
- [101] 広沢敦彦、大川聰:環境負荷に対する生分解性作動油の採用、*油空圧技術*、46, 11, p 25-32, (2010)
- [102] Wasserhaushaltsgesetz (Federal Water Act), 12 November 1996 (Federal Law Gazette I, 1695) (1996) <https://germanlawarchive.iuscomp.org/?p=326> (閲覧日 2019-3-8)
- [103] United Nation, Sustainable Development Goals: FRESHWATER COUNTRY PROFILE GERMANY, (2011)
http://www.un.org/esa/agenda21/natlinfo/countr/germany/germany_freshwater.pdf, (閲覧日 2018-1-24)
- [104] ISO 15380: 2016, Lubricants, industrial oils and related products (class L) -- Family H (Hydraulic systems) -- Specifications for hydraulic fluids in categories HETG, HEPG, HEES and HEPR.
- [105] Commission Decision of 24 June 2011 EU Union establishing the ecological criteria for the award of the EU Ecolabel to lubricants, Official Journal of the European Union (2011) <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:169:0028:0039:EN:PDF>(閲覧日 2019-3-8)
- [106] 武井俊晴: 化学物質の環境受容性と生分解性、*オレオサイエンス*, 2, 7, p403-409, (2002)
- [107] 厚生労働省: GHS 国連文書 第4部 環境に対する有害性
<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei07/pdf/05-03.pdf>, (閲覧日 2018-10-27)

- [108] 金子正人: 潤滑油の高圧物性(第1報), *トライボロジスト*, 62, 10, p664-666, (2017)
- [109] 平野二郎: ポリオールエステル系合成潤滑油の動向, *油化学*, 29, 9, p627-635, (1980)
- [110] 鈴木章仁, 益子正文, 張禾曄: ヒンダードポリオールエステルの弾性流体潤滑油膜形成能力と境界潤滑特性, *トライボロジスト*, 47, 8, p671-674 (2002)
- [111] JIS, 潤滑油—酸化安定度の求め方—第1部: 内燃機関用潤滑油酸安定度、K2514-1, (2013)
- [112] ASTM, Standard Test Method for Rubber Property-Effect of Liquids, D471-16, (2016)
- [113] 大川聰, 臼井隆, 川村敏雄, 瀬戸健三: エンジン油の摩擦特性評価方法(マイクロラッチテスト), *トライボロジー会議予稿集B11*, p113-116, (1979)
- [114] 杉山玄六ほか: 建設機械用油圧作動油—摩擦特性試験方法、日本建設機械施工協会規格 JCMAS P047 (2004)
- [115] 浜坂直治, 斎藤秀明, 石川勝司, 大川聰, 小西晃子: 摺動材料, 特開平 9-67630, 1995-08-29.
- [116] P. Wilkinson, M. Novak and A. Mavin: Integrating Safety into System Design with SysML, *Journal of Safety and Reliability Society*, 29 (4), Taylor & Francis, 79-93 (2009).
- [117] F. Mhenni, J.Y. Choley and N. Ngyuyen: SysML extensions for safety-critical mechatronic systems design, *Systems Engineering (ISSE), 2015 IEEE International Symposium*, 242-247 (2015)
- [118] E. Villhauer and J. Brian: An Integrated Model Based Approach to System Safety and Aircraft System Architecture Development, *25th Annual INCOSE International Symposium*, p1373-1387, (2015)
- [119] G. Biggs, T. Sakamoto and T. Kotoku: A Profile and Tool for Modeling Safety Information With Design Information In SysML, *Software & Systems Modeling*, 15 (1), p147-178, (2016)
- [120] G. Biggs, 坂本 武志, 神徳 徹雄: システムの安全性を記述するためのモデリング言語「SafeML」(安全・安心な RT 構築を目指して)、*ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2A2-I06, (2013)

- [121] 風間俊治, 鶴野正真: 斜板式アキシアルピストンポンプの熱潤滑特性(斜板ならびにシリンダブロックの温度測定), *日本機械学会論文集(C 編)*, 74 (738), p191-196, (2008)
- [122] 坂間清子: 油圧動力伝達システムにおける油中気泡の分離除去に関する研究, *法政大学大学院デザイン工学研究科学学位論文*, p11-12, (2014)
- [123] 岡部信也: *油圧ショベル大全*, 日本工業出版, p60-61, (2007)
- [124] JXTG エネルギー: 省エネルギー型油圧作動油, <https://www.noe.jxtg-group.co.jp/company/rd/intro/lubricants/shoene.html>, (閲覧日 2018-3-27)
- [125] 日本フルードパワー工業会: *実用油圧ポケットハンドブック*, p244-248, p319 (2008)
- [126] 今西悦二郎, 南條孝夫, 筒井昭: 油圧ショベルの低燃費を支えるシミュレーション技術, *R&D Kobe Steel Engineering Reports*, 62 (1), p32-36, (2012)
- [127] 加藤隆二: 超音波による有機液体の分解反応, *高圧力の科学と技術*, 6 (3), p159-166, (1997)
- [128] K.S. Suslick, J.J. Gawlenowski, P.F. Schubert and H.H. Wang: Alkane Sonochemistry, *Journal of Physical Chemistry*, 87, p2299-2301, (1983)
- [129] 香田忍: ソノケミストリーとは何か, *日本音響学会誌*, 57, 5, p345-350, (2001)
- [130] G.E. Totten: *Handbook of Hydraulic Fluid Technology*, Marcel Dekker, p461-463, p630-647, (2000)
- [131] エアブリーザ吸排気特性測定装置概, *YAMASHIN Technical Report*, <http://www.yamashin-filter.co.jp/ja/technology/development/main/02/teaserItems1/01/linkList/0/link/20160115.pdf>, (閲覧日 2018-4-25)
- [132] S. Ohkawa and H. Hamaguchi: Progress of A New Hydraulic Fluid Specification HX-1 for Construction Equipment, *SAE Asia Colloquia*, 11 (2003)
- [133] 南一郎, 飯塚宏平: 自動酸化反応に注目した潤滑油管理方法の検討, *高知工科大学実験レポート*, (2001)
- [134] 国際純正・応用化学連合: Radical (free radical), *IUPAC Gold Book*, <http://goldbook.iupac.org/html/R/R05066.htm>, (閲覧日 2018-4-10)
- [135] J.R.J. Smith, E. Nagatomi and D.J. Waddington: The Autoxidation of Simple Esters - Towards an Understanding of the Chemistry of Degradation of Polyol Esters Used as Lubricants, *Journal of The Japan Petroleum Institute*, 46, 1, p1-14, (2003)
- [136] 港宏: 過酸化エステル of 化学, *有機合成化学*, 23, 1, p12-22, (1965)
- [137] Iowa University: Lipid Oxidation an Overview,

- <http://www.public.iastate.edu/~duahn/teaching/Lipid%20oxidation/free%20radicals.pdf>, (閲覧日 2018-11-15)
- [138] Y. Kagami: Contamination Control in Earthmoving Machines-Hybrid Filter Elements Versus By-Pass Filters-Influence of Biodegradable Oil on Filter Life, *SAE Technical Paper*, 981501 (1998).
- [139] 飯島浩二,大川聡,小西晃子: 生分解性作動油のフィールドにおける劣化について, *フルードパワーシステム*, 29, 5, p63-67, (1998)
- [140] C. Kempermann and H. Murrenhoff: Reduction of Water Content in Biodegradable and Other Hydraulic Fluids, *SAE Technical Paper*, 981497 (1998)
- [141] K. Iwakata, Y. Onodera, K. Mihara and S. Ohkawa: Nitro-oxidation of Lubricating Oil in Heavy-duty Diesel Engine, *SAE Technical Paper*, 932839, (1993)
- [142] JIS, 油圧用フィルタ性能評価方法—第 8 部:フィルタエレメントのろ過性能試験 (マルチパステスト法), B 8356-8, (2002)
- [143] 小西晃子, 石井庄太郎, 野原達郎: 作動油タンクの小型化, *フルードパワーシステム*, 39, 5, p272-276, (2008)
- [144] 小松製作所: *小松製作所五十年の歩み*, p206, (1971)
- [145] コマツ: *Quality Control Hand Book*, p104, (1994)
- [146] コマツ: 品質と信頼性—責任ある顧客対応—,
<https://home.komatsu.jp/csr/products/quality.html> (閲覧日 2019-1-5)
- [147] 菅野文友, 額田啓三, 山田雄愛: *日本的デザインレビューの実際*, 日科技連出版, p5, p151-177, (1993)
- [148] MIL-STD, *Engineering Management*, 499A, (1974)
- [149] 建機用潤滑油開発, 共同で低価格化, コマツ, シェルなどと提携, *日本経済新聞*, 2000年7月1日朝刊, p.11
- [150] 荒川秀治: KOMTRAX STEP 2 の開発と展開, *Komatsu Technical Report*, 48,150, p8-14, (2002)
- [151] コマツ: back to the Future 革新的な IT (情報技術) の活用 (2006)
<http://www.komatsu.co.jp/CompanyInfo/ir/annual/pdf/2006/j17-23.pdf> (閲覧日 2019-1-12)
- [152] 白坂成功: 要求連鎖分析を用いた社会システムデザイン, (2012)
<http://www.sdm.keio.ac.jp/pdf/shirasaka.pdf>(閲覧日 2019-1-15)
- [153] コマツ: PC200-11,PC210-11 特定特殊自動車排出ガス 2014 年基準適合車カタログ, p12,

http://www.komatsukenki.co.jp/products/download/pdf/excavator/PC200_210-11.pdf
(閲覧日 2019-1-14)

- [154] 杉山玄六ほか:建設機械用油圧作動油—高圧ピストンポンプ試験による寿命評価方法、日本建設機械施工協会規格 JCMAS P045 (2004)
- [155] 原一生、折田哲夫: Tier4 Final 規制対応 ϕ 170 エンジンの開発、*Komatsu Technical Report*, 62, 169, p19-26, (2016)
- [156] <http://www.equipmentworld.com/caterpillar-launches-6015b-hydraulic-shovel-with-increased-power-more-loading-capacity/> (閲覧日 2018-12-7)
- [157] https://www.cat.com/en_AU/articles/solutions/acert-technology.html (閲覧日 2018-12-7)
- [158] <http://cumminsengines.com/cummins-tier-4-final-field-test-program> (閲覧日 2014-8-31)
- [159] http://www.hitachikenki.co.jp/products/featured/excavator/large/ex8000_reports/030421_09.html (閲覧日 2014-8-31)
- [160] <http://www.equipmentworld.com/bell-equipment-unveils-b60e-60-ton-artic-with-4x4-configuration> (閲覧日 2018-12-7)

研究業績

主論文に関連する学術誌掲載論文: 6 件

1. S. Ohkawa, K. Seto, T. Nakashima and K. Takase; "Hot Tube Test"- Analysis of Lubricants Effect on Diesel Engine Scuffing”, Society of Automotive Engineers (SAE) 1984 Transactions-V93-84, SAE Technical Paper 840262, (1984)
2. S. Ohkawa, K. Iwakata and K. Tikugo; “Radial Lip Crankshaft Seals for Heavy-duty Diesel Engines”, SAE Transactions Journal of Engines-V99-3, SAE Technical Paper 900337, (1990)
3. S. Ohkawa, K. Iwakata and Y. Kawashima; “Coolant Seal Elastomer for Diesel Engine Head Gasket”, SAE Transactions Journal of Commercial Vehicles-V102-2, SAE Technical Paper 932375, (1993)
4. S. Ohkawa, A. Konishi, H. Hatano, K. Ishihama, K. Tanaka and M. Iwamura; “Oxidation and Corrosion Characteristics of Vegetable-Base Biodegradable Hydraulic Oils”, SAE Transactions Journal of Fuels and Lubricants-V104-4, SAE Technical Paper 951038, (1995)
5. A. Konishi*¹, S. Ohkawa, N. Nakamoto, M. Nanba and T. Yoshida; “Development of A High Performance Biodegradable Hydraulic Oil for Construction Equipment”, SAE Transactions Journal of Fuels and Lubricants-V106-4, SAE Technical Paper 971632, (1997)
注* 1) メインオーサ小西晃子氏より大川指導の元に論文作成した主旨の書簡あり。
6. 大川聰、尹善吉、日比谷孟俊、西村秀和「生分解性作動油に適合する建設機械用油圧システム開発の新しい手法—故障解析における要素解析手法とシステムモデルを用いた総合解析手法の統合事例—」Synthesiology12, 2, (2019)

学術誌掲載論文: 4 件

7. S. Ohkawa, T. Mashiko, T. Kato and H. Nakano; “Effect of Diesel Fuel Property on Exhaust Valve Sticking”, SAE Transactions Journal of Fuels and Lubricants-V98-4, SAE Technical Paper 890416, (1989)
8. S. Ohkawa, T. Kawasaki and K. Kumagae; “A New Antifreeze Coolant for Heavy-Duty Diesel Engines”, SAE Transactions Journal of Commercial Vehicles-V99-2, SAE Technical Paper 900433, (1990)

9. S. Ohkawa, A. Kimura and H. Kimura; “Non-black Heavy Load Multi-Purpose Grease for Construction Machine”, SAE Transactions Journal of Fuels and Lubricants-V105-4, SAE Technical Paper 961106, (1996)
10. S. Ohkawa, T. Kuse, N. Kawasaki, A. Shibata and M. Yamashita; “Elasticity- An Important Factor of Wet Friction Materials”, SAE Transactions - Commercial Vehicles-V100-2, SAE Technical Paper 911775, (1991)

主論文に関連する Full Paper 査読 国際会議論文:4 件(内共著 1 件)

11. R. Eguchi*, Y. Ohtake, S. Ohkawa, M. Iwamura and A. Konishi; “Compatibility of Hydraulic Seal Elastomers with Biodegradable Oils”, SAE Transactions Journal of Material and Manufacturing-V105-5, SAE Technical SAE Paper 960210, (1996)
12. S. Ohkawa, H. Nishimura and Y. Ohkami; “Decomposition Analysis Resolution Process (DAR) of Systems Engineering Applied to Development of Countermeasure on Leakage of Engine Head-Gasket”, S. Fukuda et al. (Eds): Product Lifecycle Management for a Global Market, 11th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2014, p181-192, (2014)
13. S. Ohkawa, A. Konishi, H. Hatano and D. Voss; “Piston Pump Failures in Various Type Hydraulic Fluids”, American Society for Testing and Materials (ASTM) Selected Technical Paper (STP)1339, Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects, p263-277, (2001)
14. S. Ohkawa, Y. Touji, G. Sugiyama, T. Seno, K. Ogura, H. Ishiyama, H. Koderu, M. Nagao, H. Hamaguchi, H. Tauchi, S. Mitsumoto, Y. Shiraga, A. Mochizuki, M. Seki, H. Ootsu, H. Hasegawa, H. Nishina, H. Kosodo, T. Ando, N. Shizuka: Development of New Hydraulic Fluids Specifications for Construction Machinery, *SAE Technical Paper*, 2005-01-3574, (2005)

Full Paper 査読 国際会議論文:4 件(内共著 4 件)

15. K. Iwakata*, Y. Onodera, K. Mihara and S. Ohkawa; “Nitro-Oxidation of Lubricating Oil in Heavy-Duty Diesel Engine”, Society of Automotive Engineers (SAE) Technical Paper 932839, (1993)
16. M. Mori*, K. Mukai, A. Konishi, I. Uchino and S. Ohkawa; “Effect of Engine Oil Anticorrosion Characteristics on Multiple Wet Disk Brake in Off-Road Dump Truck”, SAE Technical Paper 961093, (1996)

17. T. Hashimoto*, M. Niikura, F. Ueda, K. Nakamura, T. Ukai, K. Ito, K. Kikuchi, Y. Kishi, S. Ohkawa, M. Enomoto, H. Umetsu, S. Takamura, N. Naganuma, N. Kagiwata, M. Mishima, T. Suzuki, K. Arai, T. Narishima, K. Takagi, H. Hamaguchi, Y. Yokoyama, K. Fukuda, K. Tawa; “New Standard for Four-stroke Diesel Engine Oils: JASO DH-1”, SAE Technical Paper 2001-01-1970, (2001)
18. T. Seno*, S. Ohkawa, G. Sugiyama, K. Ogura, H. Ishiyama, Y. Touji, H. Kodera, M. Nagao, H. Tauchi, H. Hamaguchi, M. Nakamura, K. Takeuchi, Y. Shiraga, A. Mochizuki, M. Seki, H. Hasegawa, H. Nishina: JCMAS New Grease Specifications for Construction Machinery, SAE Technical Paper, 2006-01-3504 (2006)

国際会議 Proceedings : 9 件 (内共著 2 件)

19. S. Ohkawa; “Gear Load-Carrying Capacity of Synthetic Engine Oil”, Proceedings of Japan Society of Lubrication Engineers (JSLE) International Tribology Conference Proceedings (Tokyo) , p497-502, (1985-7)
20. S. Ohkawa, N. Kawasaki, T. Kuse and A. Shibata; “Wet Clutch and Wet Brake for Construction Equipment”, Proceedings of International Tribology Conference (ITC) Yokohama, Satellite Forum (Japanese Society of Tribologists), p7-12, (1995-11)
21. S. Ohkawa; “Present and Future Lubricants for Construction Machine”, The 1st Annual Fuels & Lubes Asia Conference (1995)
22. S. Ohkawa; ” Recent Trend of Diesel Engine Technology and Requirement on Fuels and Lubricants for Construction Equipment”, 3rd Annual Fuels & Lubes Asia Conference (1997)
23. S. Ohkawa and A. Konishi; “Biodegradable Hydraulic Oil for Heavy-Duty Construction Equipment”, 1st Internationales Fluidtechnisches Kolloquium, Aachen 12, p207-214, (1998-3)
24. S. Ohkawa; “Need of Hydraulic Oil Specification for Construction Equipment”, 5th Annual Fuels & Lubes Asia Conference, (1999)
25. K. Iijima*, S. Ohkawa, K. Iwakata; “Low-Toxic Engine Coolant for Heavy-Duty Construction Equipment”, 6th Annual Fuels & Lubes Asia Conference, (2000)
26. S. Ohkawa; “Progress of a New Hydraulic Fluid Specification for Construction Equipment”, 9th Annual Fuels & Lubes Asia Conference, (2003)
27. H. Hamaguchi*, D. Placek and S. Ohkawa; “Hydraulic Fluid Influence on Piston Pump Efficiency”, The 12th Annual Fuels & Lubes Asia Conference, (2006)

その他対外発表

定期刊行誌への解説論文:41 件

28. 大川聰、瀬戸健三「エンジンオイルの高温清浄性評価 -ホットチューブテスト-」小松技報 25, 4, p231-236, (1979)
29. 大川聰、臼井隆、川村敏雄、瀬戸健三「エンジン油の摩擦特性評価方法(マイクロクラッチテスト)」トライボロジー会議予稿集 B11, p113-116, (1979)
30. 大川聰「最近の潤滑油の耐荷重能」小松技報 31, 1, p 1-8, (1985)
31. 大川聰、岩片敬策「ディーゼルエンジン用ゴム部品の改良」小松技報 32, 1, p 1-8, (1986)
32. 大川聰、稲葉哲郎、川崎千歳、熊谷憲二「高負荷ディーゼルエンジン用新クーラント」小松技報 32, 115, p12-25, (1986)
33. 大川聰「コロージョンレジスタの改良と高負荷ディーゼルエンジン用新ロングライフクーラントの開発」内燃機関 27, 340, p9-20, (1988)
34. 大川聰、益子知幸、加藤敏夫、中野平「ディーゼルエンジンの排気バルブ固着に及ぼす軽油性状の影響」内燃機関 30, 383, p70-76, (1991)
35. 大川聰、山本晃子、石浜和義、田中健三「生分解性作動油」油圧と空気圧 23, 7, p18-24, (1992)
36. 大川聰、山本晃子、新井満、布谷貞夫「低温における湿式摩擦材の摩擦係数」トライボロジー会議予稿集 F-9, p277-280, (1992-10)
37. 山本晃子、大川聰、石浜和義、田中健三、岩村幹男、横山登司男、池田和利「新耐摩耗性作動油の開発」Komatsu Technical Report 39,131, p37-45, (1993)
38. 大川聰「環境対応オイルの現状-生分解性作動油-」建設機械 29, 9, p73-8, (1993)
39. 岩片敬策、大川聰「建設機械用ディーゼルエンジンのオイルシールの最近の動向」月刊トライボロジ 23, p22-25 (1993)
40. 大川聰、川崎信明、森國義、黒田芳明「建設機械・産業機械における湿式クラッチ・ブレーキ」トライボロジスト39, 12, p 1014-1019, (1994)
41. 大川聰、久世隆、柴田公、田中義清「解説 湿式摩擦材(その1)」Komatsu Technical Report 40, 2, p20-35, (1994)
42. 大川聰、山本晃子「環境適合や粘度特性などに利点も酸化安定性、添加剤の改良が課題」油脂 47, 3, p38-41, (1994)
43. 大川聰、岩片敬策「エンジンヘッドガスケット用冷却水シール」バルカーレビュー38,2, p1-9, (1994)
44. 大川聰「最近の土木建設機械の技術動向と展望」月刊トライボロジ 93, p12-15, (1995)

45. 大川聰「生分解性作動油とその利用」設計工学 30, 12, p453-458, (1995)
46. 大川聰、久世隆、柴田公、田中義清「解説 湿式摩擦材(その2)」Komatsu Technical Report 41, 2, p 27-50, (1995)
47. 大川聰「環境問題と建設機械のトライボロジ」月刊トライボロジ109, p 14-17, (1996)
48. 木村晶美、木村浩、大川聰「グリースに用いる新規固体潤滑剤の探求」トライボロジー会議予稿集 1C12, p131-133, (1996-10)
49. 小西晃子、大川聰、斎藤秀明、波多野浩、岩村幹男「コマツ純正バイオ作動オイルの開発」Komatsu Technical Report 42, 1, p14-25, (1996)
50. 波多野浩、大川聰、小西晃子「建機で使われる生分解性作動油の現状」油空圧技術 35,12, p29-32, (1996)
51. 大川聰、久世隆、柴田公、小西晃子「解説 湿式摩擦材(その3)」Komatsu Technical Report 43, 2, p19-35, (1997)
52. 山口政房、大川聰「建設機械におけるコンタミ対策 -清浄度向上活動・オイルクリニック・ハイブリッドフィルタ」機械設計 41, 11, p50-53, (1997)
53. 飯島浩二、大川聰、小西晃子「生分解性作動油のフィールドにおける劣化について」フルイドパワーシステム 29, 5, p63-67, (1998)
54. 綿谷英男、大川聰、井上裕之、小西晃子「DLC薄膜皮膜の水グリコール仕様ギヤポンプへの適用」Komatsu Technical Report 45, 1, p 27-32, (1999)
55. 大川聰「産業分野のトライボロジー -建設機械-」トライボロジスト 45,12, p 944-947, (2000)
56. 大川聰、伊藤光一郎、井上裕之、小西晃子、柳沢正和、斎藤秀明、飯田武郎、佐伯文高「水グリコール仕様油圧ショベル PC300LC-6 の開発」Komatsu Technical Report 46, 1, p36-42, (2000)
57. 大川聰「グリーン購入法と環境負荷低減への取組み -作動油、エンジンオイル、グリース-」建設機械 37, 8, p 32-37, (2001)
58. 飯島浩二、大川聰、岩片敬策「ノンアミンクーラントの開発」Komatsu Technical Report 48, 149, p3-10, (2002)
59. 飯島浩二、大川聰「生分解性作動油=建設機械での使用について=」油空圧技術 42, 8, p13-16, (2003)
60. 大川聰「潤滑油によるエンジンパワートレインの長寿命化と信頼性向上」建設機械 40,1, p 47-54, (2004)
61. 大川聰「油圧作動油への期待」油空圧技術 45,13, p6-10, (2006)

62. 大川聰、小田庸介「建設機械用作動油に望まれること」油空圧技術 46,11, p11-20, (2007)
63. 斉藤秀明、飯田武郎、大川聰「建設機械用ポンプ・モータと環境対応作動油」フルードパワーシステム 40, 4, p214-219, (2009)
64. 広沢敦彦、大川聰「環境負荷に対する生分解性作動油の採用」油空圧技術 46,11, p25-32, (2010)
65. 大川聰「19 世紀の建設機械 - 蒸気式建設機械の発達史」建設機械, 10, p13-21, (2006)
66. 大川聰「建設機械の発達の歴史」土木技術, 64, 6, p11-16, (2009)
67. 大川聰「建設機械のルーツを求めて USA の歴史的建設機械の博物館を見る」建設の施工企画, 755, p58-66, (2013)
68. 大川聰編「建設機械化の歩み」日本建設機械要覧, 総論 2 章, p6-31, (2016)

国内一般講演:8 件

69. 大川聰「国際化する建設機械メーカーでの潤滑油の課題」石油学会石油製品討論会, p52-56, (1988)
70. 大川聰「建設機械のメンテナンストライボロジーオイルクリニック」トライボロジー研究会(1996)
71. 大川聰「生分解性作動油の現状と課題」日本フルードパワーシステム学会ウインターセミナー, p15-27, (1997-2)
72. 大川聰「潤滑油に関する環境適合性の問題」日本トライボロジ学会トライボ材料の環境適合性研究会(1998)
73. 大川聰「建設機械の作動油の現状と将来動向」平成 12 年度日本フルードパワー工業会講演会(2000-11)
74. 大川聰「建設機械の環境対応とトライボロジ」石川県鉄工機電協会 MEX 金沢 2000 テクニカルセミナー(2000)
75. 大川聰「建設機械用作動油の動向と規格化について」潤滑油協会平成 11 年度潤滑セミナー(2006)
76. 大川聰「建設機械用作動油の使われ方と性能の要望」日本フルードパワーシステム学会第 1 回フルードパワーシステム学会特別研修会(2006)

その他業績

特許:26件(登録:4件)

- S. Ohkawa, A. Kimura and H. Kimura: "Grease Composition for Construction Equipment", United States Patent 5,576,272 (1996)
- 大川聰、森真人、鶴岡邦明、静延彦、前田一仁「潤滑油組成物」特許 3329489 号 (登録 2002 年)
- 大川聰、木村晶美、木村浩「建設機械用グリース組成物」特許 3923100 号 (登録 2007 年)
- 大川聰、松永誠、掛川一樹、長富悦史「シール材適合性に優れた潤滑油組成物」特許 4107702 号 (登録 2008 年)

(非登録:22件)

- 大川聰「多板式クラッチブレーキ装置」実用新案 昭 53-9806 (公告 1978 年)
- 大川聰、筑後和夫「摩擦係数測定器」実開昭 49-92281(公開 1974 年)
- 瀬戸健三、大川聰「銅系焼結合金摩擦材と鋼製裏金との接合法」特開昭 50-150656 (公開 1975 年)
- 大川聰、横田謙一「多角形部材の摩擦圧接方法」特開昭 51-93763 (公開 1976 年)
- 大川聰「高負荷密封軸受用の潤滑油」特開昭 54-154405(公開 1979 年)
- 大川聰、松田昭「オイル劣化度表示装置」特開昭 56-133658(公開 1981 年)
- 大川聰「シリンダライナの加工方法」特開昭 56-5923 (公開 1981 年)
- 瀬戸健三、大川聰「円板クラッチおよびブレーキ装置」実用新案 昭 58-41379 (公告 1983 年)
- 大川聰「潤滑油温度制御装置」特開昭 59-82514 (公開 1984 年)
- 大川聰、川崎千歳「エンジン冷却系用防錆剤」特開昭 63-130786 (公開 1986 年)
- 大川聰「微量液体供給装置」実用新案 昭 63-18783 (公告 1988 年)
- 大川聰、岩片敬策「オイルシール装置」実願昭 63-110769 (公開 1988 年)
- 大川聰、川崎千歳「エンジンのヘッドガスケット」実用新案平 1-28828 (公告 1989 年)
- 浜坂 直治、斎藤 秀明、石川 勝司、大川聰、小西晃子「摺動材料」特開平 9-67630 (公開 1997 年)
- 柴田公、大川聰、斉藤一之、久世隆「湿式摩擦ディスク」特開平 11-336805(公開 1999 年)
- 綿谷英男、大川聰、井上裕之、小西晃子、伊藤光一郎「液圧回路」特開 2001-41174(公開 2001 年)
- 山本浩、大川聰、福田達「ジャーナル軸受」特開 2002-70865 (公開 2002 年)

- 飯吉伸久、山田輝、飯島浩二、大川聰、「不凍液」特開 2002-371270(公開 2002 年)
- 飯島浩二、大川聰、辻井哲也、伊藤 直嗣「不凍液／冷却液組成物」特開 2002-294227 (公開 2002 年)
- 江森伸彦、大川聰「フィルタカートリッジ」特願 2007-117872(公開 2007 年)
- 森木恵一、長富悦史、飯島浩二、広沢敦彦、大川聰「パワートレイン油」特願 2009-242677 (公開 2009 年)
- 谷川優一郎、大川聰「オイル導入装置およびオイルフィルタ装置」特開 2010-236582 (公開 2010 年)

著書:2 件

- 日本トライボロジー学会編(編集委員長:大川聰)『産業用車両の潤滑-エンジン・油圧機器・パワートレイン・潤滑剤-』養賢堂(2012)210 頁
(大川聰の執筆頁数:57 頁、その内訳は「1.産業用車両の概要」p1-6、「2.産業用車両に用いられるディーゼルエンジン」p7-9、「2.2 排出ガス規制とエンジン構造、2.3 排出ガス規制と燃料動向」p9-17、「2.4.5 オイルシール」p27-28、「2.4.7 エンジン部品の材料」p29-31、「2.5 主要潤滑部品(c)ピストンスカート／シリンダ」p33-34、「3 油圧機器 3.1.5 各コンポーネントの特徴と材料」p81-87、「4. 5 湿式摩擦材のトライボロジ」p132-137、「4.9.3 建設機械用パワートレイン油の品質と対応技術」p162-166、「4.9.5 建設機械用パワートレイン潤滑油のトラブル事例」p168、「6.潤滑管理」p189-196)
- 大川聰『写真でたどる建設機械 200 年』日本建設機械施工協会・三樹書房(2008)117 頁

学協会規格の制定:8 件(内 1 件は非制定メンバー)

- 大川聰ほか(原案作成)「建設機械用グリース」日本建設機械施工協会 JCMAS P040, (2004)
- 大川聰ほか(原案作成)「建設機械用油圧作動油」日本建設機械施工協会 JCMAS P041, (2004)
- 大川聰ほか(原案作成)「建設機械用油圧作動油 - フィルタラビリティ試験方法」日本建設機械施工協会(2004) JCMAS P043, (2004)
- 大川聰ほか(原案作成)「建設機械用油圧作動油 - 高圧ピストンポンプ試験による潤滑性評価方法」日本建設機械施工協会 JCMAS P044, (2004)
- 松本毅、大川聰(原案作成)「建設機械の環境負荷低減技術指針」日本建設機械施工協会 JCMAS H06, (2002)

- 「自動車用ディーゼル機関潤滑油」日本自動車技術会 JASO M355, (2000)
- “Standard Guide for Performance Evaluation of Hydraulic Fluids for Piston Pumps”, American Society for Testing and Materials (ASTM) D 6813 – 02a, (2002)
- 「エンジン油－ホットチューブ試験方法」石油学会 JPI-5S-55-99, (1999)

外部委員： 6 件

- (社)日本建設機械化協会(現建設機械施行協会)油脂技術委員長
- 米国自動車技術者協会(SAE) 燃料潤滑油部門アジア運営委員リーダー
- (社)日本建設機械化協会 建機の環境負荷低減チーム アシスタントリーダー
- (社)日本油空圧工業会(現フルードパワー工業会)新作動油委員会主査
- 石油連盟・(社)日本自動車工業会合同委員会「自動車・潤滑油検討会」エンジンオイル小委員会 JASO ”DX-1” ワーキング・グループメンバ
- 米国材料試験協会(現 ASTM) D02 Products and Lubricants 委員会、D02.No.07 Lubricating Properties 小委員会メンバ

表彰： 3 件

- 1988 年コマツ社長表彰「新クーラントの開発」
- 1997 年日本建設機械化協会技術奨励賞「環境対応高性能潤滑油の開発」
- 2004 年コマツ研究本部利益貢献賞「グローバル純正油脂の開発・商品化」

謝辞

本論文は、著者が慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究所に研究員として在籍した2014年4月から2019年3月の5年の期間に同研究科の西村秀和先生のご指導のもとで行った研究成果に基づいて執筆したものです。西村秀和先生には多くの論文投稿などで叱咤激励を頂き、アカデミックな研究に対する心構えを教えて頂いたことを深く感謝しております。このような論文としての成果をまとめることができました。

論文の内容は建設機械メーカーに於いて行なった故障解析と対策で、米国の自動車技術者協会(SAE)への投稿論文に基づいております。このように機械の故障について多くの海外発表をした技術者は少ないと思いますが、これには共同執筆者の皆様のご協力と、社外発表に寛容だった元の職場の株式会社小松製作所には感謝申し上げます。

68才から72才の高齢者になってから初めてのアカデミックな研究であり、建設機械の泥臭い技術者として仕事をやってきた人間には目からウロコの経験の連続でした。大学の先生方がどんなに生徒のためにご自身の時間を割き、目と頭と体を鍛えてご精進しておられるか良く分かりました。

大学同窓会で建設機械メーカーの技術者がどんなに涙ぐましい努力をしたかを紹介する講演で、日比谷孟俊君(僕にとっては大先生ですが)から「過去の経験を生かしてSDMで勉強してはどうか」とお誘いを受けたのが始まりでした。最初は狼嘉彰先生、日比谷先生や大塚聡子君、前島弘則君、大谷康雄君、木下聡子君らの方々とのゼミで、まずシステムズエンジニアリングとは何ぞやと基本的な考えを勉強させて頂き、物事をどう考えるかについて今までと全く違った視点でみることを学ばせて頂きました。この経験がなければSysMLを用いるまでの研究には至らなかったと思います。

本論文をまとめるに当たって西村秀和先生のご丁寧なご指導を頂いたのは勿論ですが、論文審査に当たり副査としてご指導頂きました慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 小木哲朗教授、千葉工業大学システム科学部プロジェクトマネジメント学科 関研一教授、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 日比谷孟俊SDM研究所顧問には、多くの的確なご指摘とご丁寧な助言を頂き深く感謝申し上げます。

コンピュータソフトが素人の私に、西村研究室の尹善吉君から懇切丁寧にSysMLについてアドバイスを頂き、有り難く思いました。また、西村研究室の学生の皆様にも様々なご助言とご指摘を頂き、感謝しております。

最後に、研究員として勉強して博士論文を執筆するに当たって、終始サポートして的確なアドバイスや息抜きをさせてくれた妻の眞知子と娘の慶子に心から感謝を表します。