

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 —

大川 聰*、尹 善吉、日比谷 孟俊、西村 秀和

生分解性作動油により建設機械の油圧システムに様々な不具合が生じた。油圧サブシステムの損傷については従来の要素解析手法を用いて原因解明と対策がなされたが、油圧システムの作動不良については複雑なシステムと生分解性作動油の独特の化学特性のため長く解明できていなかった。新たにシステムモデルを用いて総合的に解析することで、作動不良の原因推定が可能となり安価で効果的な対策案が導出できた。要素解析手法とこの総合解析手法との統合によりシステムティックな開発を可能にできる。

キーワード: 油圧システム、建設機械、生分解性作動油、作動不良、不具合対策、システムモデル、SysML

A new process to develop a hydraulic system adapted to biodegradable hydraulic oil for construction machinery

—Case study integrating component analyses and SysML description in failure analyses—

Satoshi OHKAWA*, Sunkil YUN, Taketoshi HIBIYA and Hidekazu NISHIMURA

Causes and countermeasures for various kinds of hydraulic system failures in construction machinery generated by biodegradable hydraulic oil (bio-oil) are discussed. Previous component analytical methods can prevent all kinds of failures except hydraulic system malfunction, which requires a holistic approach for analysis. Using the Systems Modeling Language (SysML), the cause of malfunctions can be understood, and the most effective countermeasure can be obtained. Integration of a component analysis method and a holistic analysis method for system development is proposed.

Keywords: Hydraulic system, construction machinery, biodegradable hydraulic oil, malfunction, countermeasure, SysML

1 はじめに

建設機械は、図1の油圧ショベルの例のようにクローラ（またはタイヤ）を回転させて自力走行し、バケットにより掘削などの作業を行う車両である。その走行や掘削用の装置は高圧の油圧（34～45 MPa）で駆動され、作業者は複数の油圧パイロットバルブを介してこれらの複雑な操作を行う。この建設機械では、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や、作業中にホースを岩などに当て破損させて広い範囲に高圧のオイルを飛散させた際に、オイルが周囲に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による汚染、魚の死亡あるいは森林や畑の植物の枯れなどである。

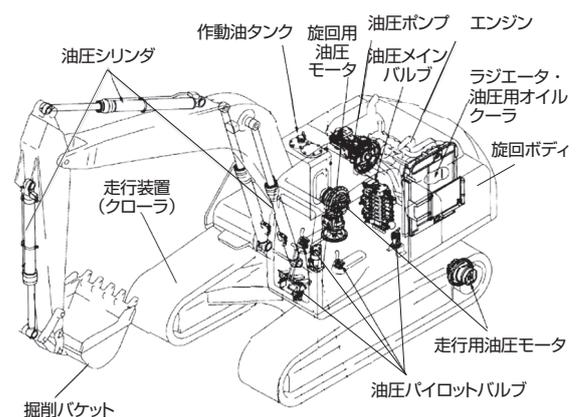


図1 建設機械の外観と油圧機器の配置¹⁾

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 (SDM) 〒223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1
SDM Research Institute, Graduate School of System Design and Management, Keio University 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8526, Japan * E-mail: ohkawakmt@gmail.com

Original manuscript received December 18, 2018, Revisions received February 15, 2019, Accepted February 18, 2019

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生分解性作動油（以下バイオ油）の使用が義務付けられた^{[2][3]}。これはドイツの水管理法^[4]などに基づく地方政府の行政指導^[5]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^[3]、2002年にはバイオ油の品質規格もISO規格となっている^{[3][6][7]}。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^[8]。

図2は欧州における建設機械の使用環境と利害関係者（以下ステークホルダー）の関係の模式図である。次第に厳しくなる環境規制当局からのバイオ油使用の要求と近隣住民からの圧力も加わり、ユーザは建設機械メーカーに早急な対応を迫っていた。オイル研究者である著者の一人は株式会社小松製作所にてバイオ油の全社プロジェクトを立ち上げて対応した。プロジェクトチームはサービス部門、設計部門、試験部門、工場部門、購買部門の担当者達をメンバーに加えて、部品メーカーの協力を得ながら対策を立案して推進した。暫定対策としてバイオ油の取扱いマニュアルを半年内で作成すること、恒久対策として油圧システムを4～5年で改良することとした。

サービス員とユーザ向けのバイオ油の取扱いマニュアルは、EUの競争法^[9]（日本の独禁法に相当）にも注意して作成した。環境保護地域には岩場、森林や水源地も多いために作業負荷が高く、僻地であるため劣悪な現場でのメンテナンス作業も多いのでオイル洩れも起こり易い。ユーザは環境規制当局の指導に従ってバイオ油の採否を決め、マニュアルとサービス員の指導を参考にバイオ油の選定、運

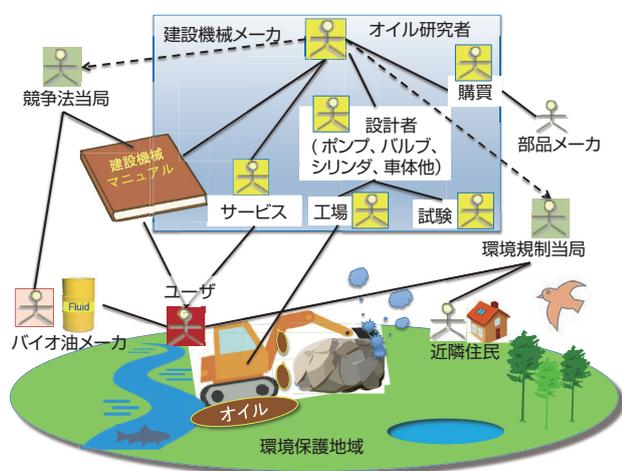


図2 欧州における建設機械の使用環境とステークホルダーの模式図（実線：直接の関係、破線：情報の収集）

転操作やメンテナンスなどを行う。

バイオ油には菜種油（グリセリンの脂肪酸エステル）や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）^[10]。菜種油や不飽和脂肪酸を含む一部の合成エステルは、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の配合に大きな制約があるため^[1]、石油系作動油に一般的に使用されるヒンダードフェノールや芳香族アミンの酸化防止剤あるいはジアルキルジチオリン酸亜鉛（以下ZDTP）の酸化防止・焼付き防止剤など^[11]は、水性環境有害性^[11]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（高圧粘度^[12]）が石油系基油よりも小さい^{[13][14]}。このため油膜が薄くなり、油圧ポンプや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ZDTPなどの焼付き防止剤は上述のように配合ができない。これらの理由から市販バイオ油に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^{[3][15][16][17]}。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り使い方が難しい。

バイオ油を使用可能とする油圧システムを開発するには、特性要因図、フォールトツリー解析（Fault Tree Analysis, 以下FTA）^[18]、故障モードと影響解析（Failure Mode and Effects Analysis, 以下FMEA）^[19]などの要素解析手法を用いることが考えられ、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）を開発することになった。FTAは設定した頂上事象の発生原因や要因を抽出して現象の発生条件や要因の解析を行う手法であり^[18]、FMEAはシステムの性能に関する潜在故障モードとその原因や影響を明確にする解析手法である^[19]。これらの要素解析手法は1980年位から自動車や建設機械のメーカーで広く採用され、FTAは不具合原因の解析、FMEAは改良・設計時の故障予防に用いられるのが一般的である。

2 バイオ油に適合する建設機械の開発のシナリオ

今回の開発のシナリオを図3に示す。バイオ油には多く

表1 バイオ油の品質上の問題点と建設機械メーカーが要素解析手法を用いて実施した暫定対策と恒久対策

No.	一般に要求される潤滑油の品質項目	バイオ油の現状性能	市場での不具合	不具合発生要因	対策の有無と内容 (○:あり、×:なし)		備考
					暫定対策	恒久対策	
1	油膜強度	低い	軸受メタルの焼付き	・低い高圧粘度 ・極圧添加剤の配合不足	○*1	軸受メタルの幅拡大	*1: バイオ油の使用基準と適正な交換時間の推奨 *2: バイオ油の銘柄の推奨
2	ゴム膨潤の防止性	低い	・シールの油洩れ ・ホース破損	エステル基油のゴムとの強い親和性	○*1	ゴム材質変更	
3	防錆性	低い	作動油タンクの錆発生	防錆添加剤の配合不足	○*1	防錆処理	
4	青銅に対する防食性	低い	軸受メタルの異常摩耗	活性な硫黄系添加剤の配合	○*1,*2	青銅合金の改良	
5	摩擦係数	過剰に低い	駐車ブレーキの制動不良	エステル基油の特性	○*1	ブレーキ材料の改良	
6	石油系作動油との混合安定性	沈殿生成	フィルタ目詰まり	エステル基油と石油系作動油添加剤との反応で炭酸カルシウムやカルシウム石ケンが沈殿	○*1	バイオ油の工場充填	

の品質上の問題がある。暫定対策のマニュアルの開発では、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決め、市販バイオ油の銘柄を品質毎に区分した。暫定対策は恒久対策が完結した時点で終了した。恒久対策の対象は建設機械の油圧システムの機器の技術に関するものが多数を占める。建設機械の生産に関連しては工場で充填した作動油との混合による問題がある。これらの課題については従来のFTAあるいはFMEAにより、バイオ油により引き起こされる不具合の原因を解析して対策方法を検討して導出することができる。しかし、多数のサブシステムから構成される複雑な油圧システムに加えて、オイルの化学的特性（酸化安定性）も複合的に絡む不具合に対しては従来の手法では原因究明が困難である。また、不具合対策の立案やその検証などの適切な手法もなかった。そこで、この論文では、複雑システムの分析、仕様決定、設計、検証および妥当性確認をサポートする図的なモデリン

グ言語である Systems Modeling Language（システムモデリング言語、以下 SysML）^[20] を用いて分野横断的アプローチのシステムズエンジニアリング^[21] 的な視点から、この未解決の問題の解析と対策の導出を試みた。

3 油圧システムのサブシステム毎の要素解析手法 (FTA、FMEA) による故障解析と対策

表1はバイオ油の品質上の問題点 No.1～6と、それぞれに対して著者らが行った暫定対策と、バイオ油に適合するサブシステムを開発するための恒久対策をまとめたものである。市場での不具合と、著者らが行った化学分析や机上試験によるバイオ油の品質の調査結果^{[17][22]} に基づいて要素解析手法を用いてマニュアルを検討した。暫定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ーが競争法当局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

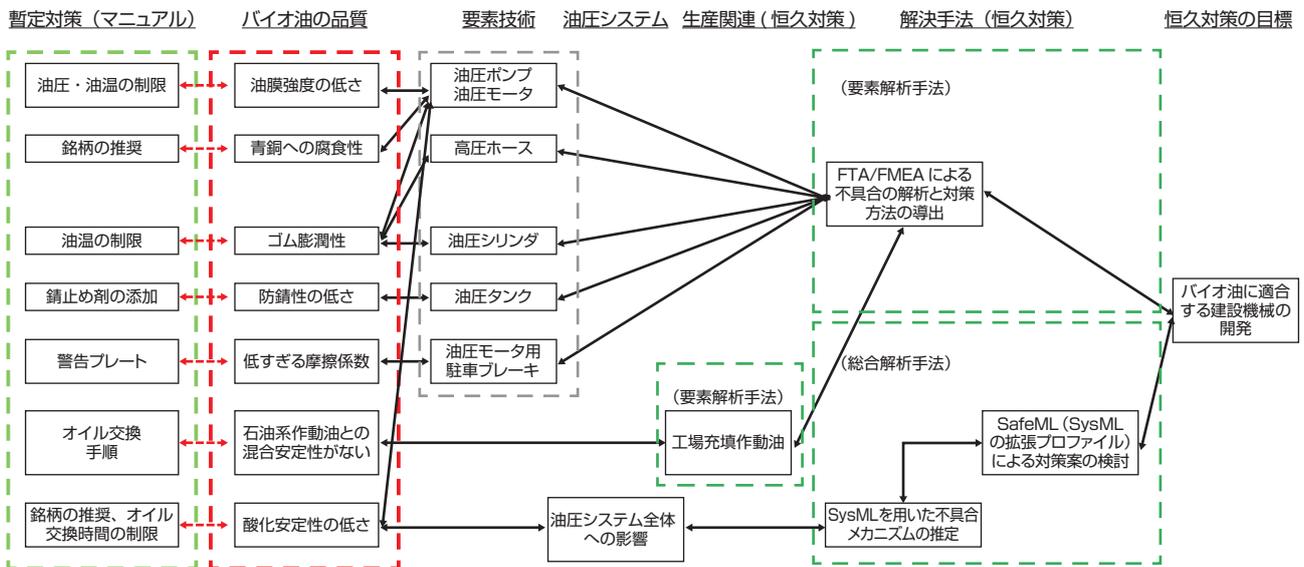


図3 バイオ油に適合する建設機械の開発のシナリオ

表 2 バイオ油の品質等級付けと推奨の運転条件^[17]

品質等級	基油	油温、℃	油圧、MPa	オイル交換時間、hrs	駐車ブレーキ
1	菜種油	-10+80	32 以下	1,500 以下	警告プレート貼付、または改良ブレーキ材への交換
2	菜種油または合成エステル		35 以下	3,000 以下	
3	合成エステル	-30+100	42 以下	5,000 以下	
4					そのまま使用

表 3 バイオ油の酸化の原因と暫定対策

市場での不具合とその可能性	不具合発生の要因	暫定対策
油の変色	・不飽和のエステル基油 ・酸化防止剤の配合不足	表 2 のオイル交換時間の短縮
鉛青銅軸受の鉛溶出	酸化生成物による鉛の腐食・溶解	

表 2 のように、バイオ油の品質毎に、運転時の油温・油圧の制限、オイル交換時間の短縮ならびに品質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^[17]。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。

バイオ油を使用可能とするサブシステムの開発には要素解析手法を用いて表 1 に示す対策を行った。No.1 の油膜強度が低い問題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）を拡大する設計変更を行った。No.2 のバイオ油によるゴムの膨潤は、クロロブレンゴム（CR）やニトリル成分の配合量が少ないニトリルゴム（以下 NBR）などの強度を著しく低下させる^[16]。そこで、これらのゴム部品について、耐油性の高いニトリル配合量の多い NBR や水素化 NBR（HNBR）などの材質に変更した。No.3 のバイオ油の防錆性不足については作動油タンク内部への防錆塗装を施した。No.4 の青銅の腐食については、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化水素に対する耐食性を改良した^[23]。No.5 の低くなり過ぎる湿式多板式駐車ブレーキのトルクに対しては、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を開発して採用した。No.6 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に対しては、バイオ油使用を希望するユーザ向けに予め工場でバイオ油を充填して出荷することにより石油系作動油との混合を防ぐ対策を施した。

バイオ油の酸化安定性の低さについては、表 3 のように当初菜種油の変色（黒色化）だけが市場での不具合になっていた。鉛青銅軸受の鉛溶出の可能性も考えられたが市場での不具合は生じていなかった。このため、著者らはユーザへのオイル交換時間の指導で問題はないと判断して

いた。恒久対策として、品質等級 4 を目標とした酸化安定性の高いバイオ油を日本国内で開発^{[15][17]}したが、欧州の環境毒性規制^[8]に対応できず市場導入していない。

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、油圧シリンダや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、外部から侵入する砂塵と内部で発生する摩擦粉（以下油中ダスト）による油圧バルブの固着や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かった。バイオ油の酸化安定性が低いことで、油に不溶の酸化縮重合物^[1]（以下ラッカー）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至らなかった。

4 システム全体の原因究明と対策決定のためのシステムモデルを用いた総合解析手法の適用

前述のように複雑な油圧システムに加え、バイオ油の酸化安定性が絡む不具合については新たに SysML で記述したシステムモデルを用いた総合的な解析を試みる必要があった。SysML はシステムの要求、構造、振る舞いを図的に表現でき、検証および妥当性確認をサポートするモデリング言語であるため、表 4 のように不具合の原因究明と対策立案に SysML と SafeML (SysML の拡張プロファイル、詳細は後述) を合わせて使えば有効と考えられる。従来の要素解析手法では原因が特に複雑な場合やシステム全体の解析を行うには適用が難しく、メカニズムを図示することもできない。要素解析手法では、専門家でないとして記述してある専門用語を理解できず内容を検討できない欠点がある。これに対して SysML は原因が複雑な場合でも記述が可能であり、専門用語は平易な表現（例えば「油圧バルブ」は「油の流れをコントロールするサブシステム」とするなど）として図示するので専門家以外でも理解し易い。但し、対策の妥当性の検証はできるものの対策の立案や検証はできない。SafeML は危険と危険状況、および危害の組み合わせをリスクとして定義し、これに対する防御方策を明確に記述する言語である。ただし、不具合のメカニズムを詳しく図示することは難しい。SysML と SafeML は技術者以外の人も加わって分野横断的な検討が可能である。

図 4 は要素解析手法を用いた従来の各サブシステムの解析と開発、そして総合解析手法を用いた油圧システムをシ

表 4 不具合の原因説明と対策立案の手法とシステムモデルを用いた方法の比較（○：可能、△：一部可能、×：不可能）

No.	使用する手法名 またはモデリング言語		原因説明			対策の立案			専門家以外 の検討
			不具合原因の 説明事例	複雑なシステム ・要因への適用	不具合のメカニズム (振る舞い) の図示	立案	検証	妥当性確認	
1	特性要因図		あり	×	×	×	×	×	
2	FTA		あり	×	×	×	○	×	
3	FMEA		あり	×	×	×	○	×	
4	SysML	SysML	なし	○	○	×	○	○	
5		SafeML	あり	△	×	△	○	○	

ステマティックに捉える解析と開発の双方を統合した手法を示す。要素解析手法はサブシステム毎に絞った原因究明と対策は有効であるが、この油圧バルブの作動不良のように油圧システムの全体を俯瞰しながら、バイオ油の状態変化も絡めて解決すべき複雑な問題には対応できない。

この論文では、SysML を用いて油圧システムの動作をシステムモデルとして記述して理解する。次に不具合に至る油圧システムのメカニズム（以下振る舞い）を記述し、バイオ油の状態変化との関係を把握し原因を推定する。また、バイオ油の状態変化から不具合との関係も把握する。

SysML は安全分析と統合する試み^{[24]-[26]}が多く行われているが、Biggs ら^[27]が提唱する SafeML が実用的である。SafeML は SysML の安全情報に特化した拡張プロファイルであり、システムのリスクや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^[28]。この SafeML を用いて作動不良が起こる状況から、対策を立案し、その効果の把握と妥当性検証に加え対策コストも検討する。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する。このシステムモデルでは、サブシステムの部品担当者にも容易に理解できるように油圧部品レベルで記述する。SysML、

SafeML の図については日本語の記述では不完全になるため英文記述とする。

5 システムモデルを用いた総合解析手法による油圧システムの理解と不具合要因の技術的な検討結果

5.1 SysMLによるシステムモデル記述

建設機械全体のシステムの振る舞いを図5のアクティビティ図に示す。アクティビティ図は入力フロー、出力フロー、制御のフロー（点線）、オブジェクトのフロー（実線）ならびにアクションのブロックを用いて振る舞いを示す^[20]。エンジン (Engine) は発生した出力 (Generate Power) により油圧システム (Hydraulic System) を駆動する。オペレータは油圧システムを操作し (operator command force)、油圧を力や回転トルクとして作業機 (Work Component) に伝える (Provide Hydraulic Force)。これにより作業機を動かし、掘削作業 (Excavate Earth)、バケット旋回 (Rotate Excavating Direction)、あるいは走行 (Run Machinery) を行う。なお、油圧システムの圧力調整のために少量の空気 (Air) が不連続 (discrete) に吸入される。

同様に油圧システムのコンテキストを図6の内部ブロック図により示す。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) 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) や油圧シリンダ (Hyd-cylinder Device) を作動させる。作動後の高圧油はメインバルブ中に戻って低圧油 (LP_oil, 0.1 MPa) となり、オイル供給サブシステム (block4:

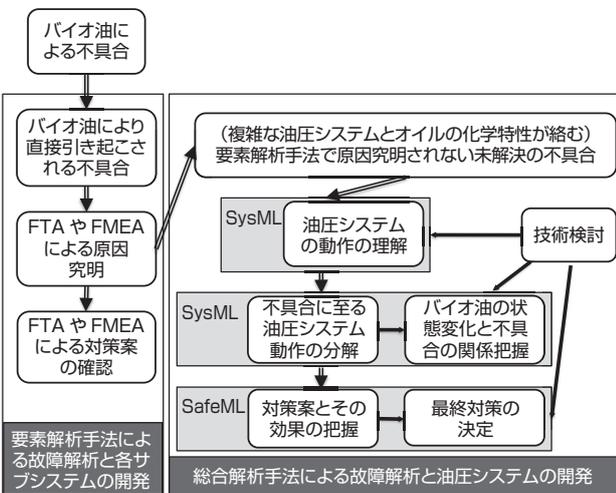


図 4 バイオ油に対する各サブシステムの開発と、SysML を用いた油圧システムの開発の手法

Oil Feed Subsystem) に入る。各部の摩擦や粘性抵抗による発熱と共に、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。

5.2 不具合要因の技術検討

5.2.1 バイオ油の酸化を生じるサブシステム (ポンプ、

バルブ) についての考察

バイオ油における酸化安定性の低さに対しては恒久対策がされておらず、作動不良にも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6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) や作業機を動かすサブ

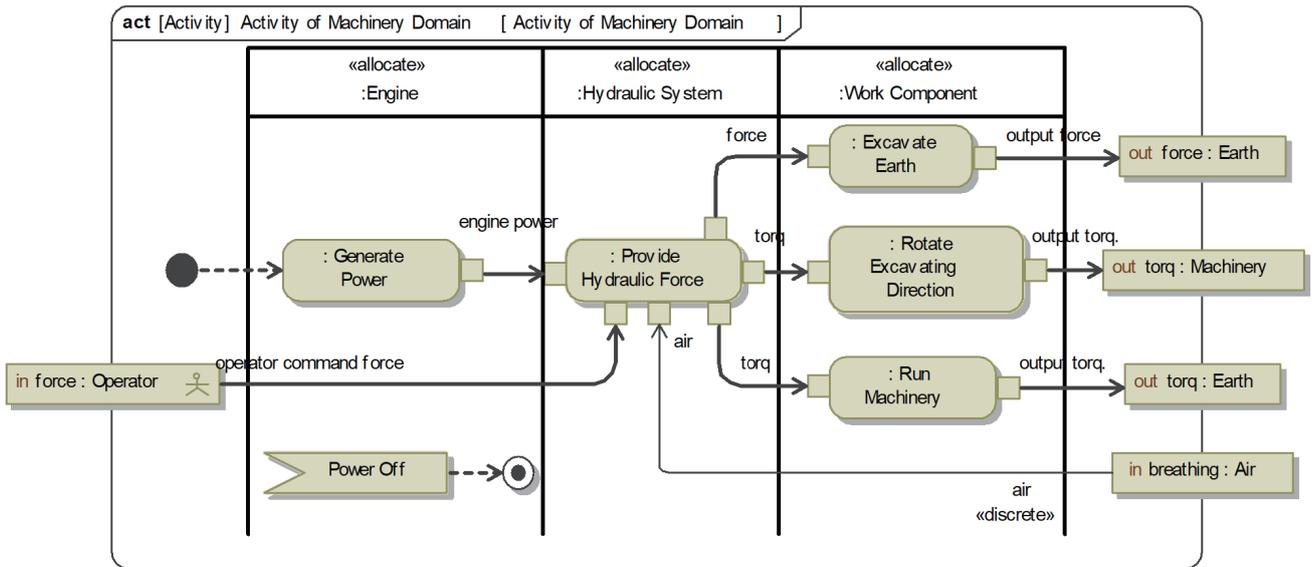


図5 建設機械ドメインのアクティビティ図

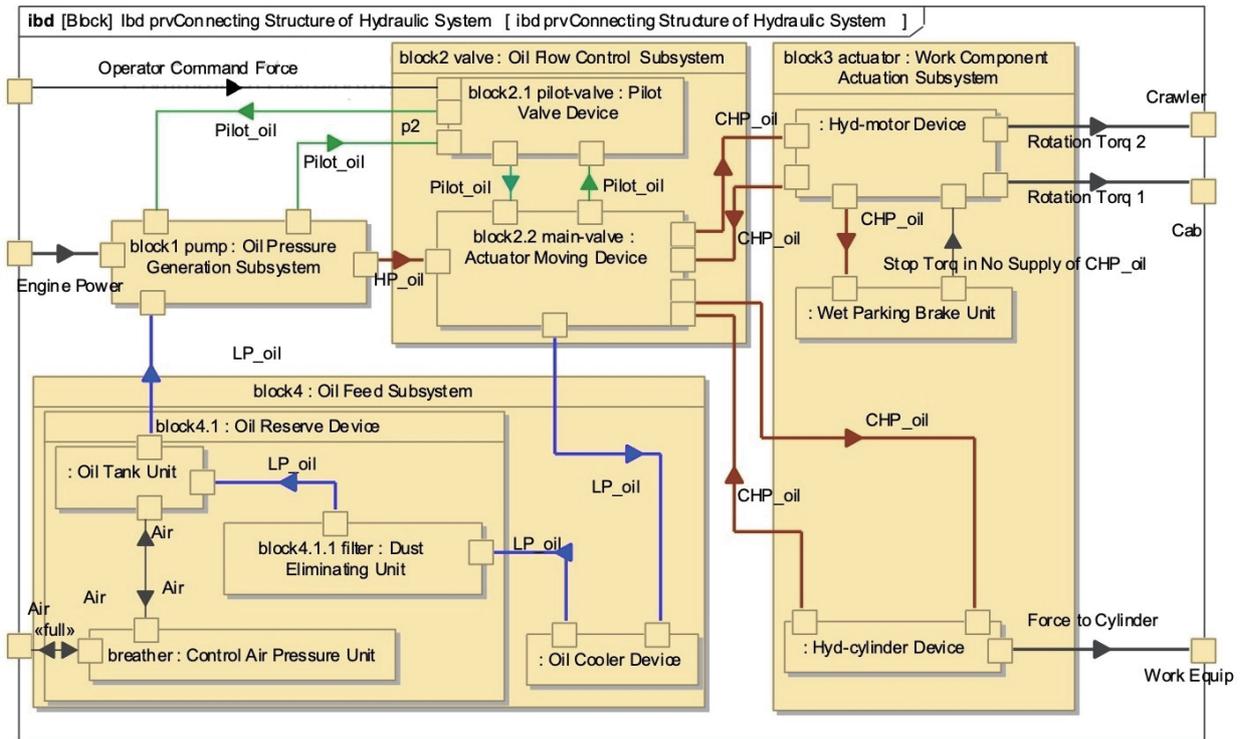


図6 建設機械の油圧システムの内部ブロック図

システム (block3 actuator) 中の油圧モータや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^[29]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^[30]、バイオ油が酸化してラッカーになると推定できる。

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 %^{[31][32]}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繋がるので、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掛かった状態で油圧シリンダや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 (1)^[33]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。

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

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^[34]はメインバルブ (block2.2 main-valve) の動作をシミュレーションし、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^[1]、激しいキャビテーションを起こす。これにより焼入れや浸炭を施した鋼部品にも損傷を生じる場合がある^[1]。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 (約 4,700 °C、100 MPa) のホットスポット^[35]が生じるとされる。その中ではほとんど原子状態まで分解されるか、あるいは炭素結合がランダムに裂かれる^{[35]-[37]}。これにより周辺のバイオ油は酸化してラッカーを生成すると推定される。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^[38]。これらの検討から著者らは、油圧ポンプと油圧バルブでラッカーが生じることを新たに見出すことができた。

油圧モータや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や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^[31]。このため油圧モータや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。

5.2.2 油中ダストとフィルタについての考察結果

図 7 に油圧タンク、フィルタとブリーザの構造を示す (図 6 block-4.1)。フィルタ (block-4.1.1 filter) は低压油を 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が開いて低压油はフィルタを通らず直接油圧タンクに入る設計になっている。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 hrs とされている。

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^[39] (block4.1.1 breather) から、空気の入りと同時に粉塵や泥水として侵入する。ブリーザのフィルタ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、油圧ホース交換や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) や長

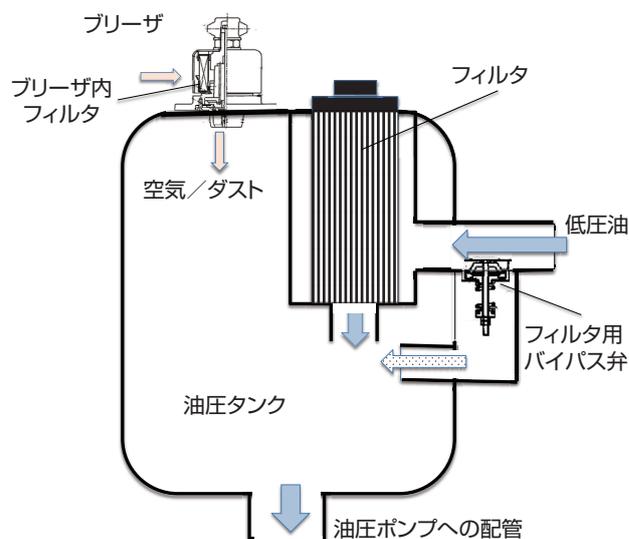


図 7 油圧タンクとフィルタ・ブリーザの模式図

表5 油圧ダストの粒径毎の粒子数（清浄度）の限界値と不具合が発生した作動油中の粒子数の典型例

粒径、 μm	5-15	15-25	25-50	50-100	>100
上限規格個数、 mL^{-1}	500,000	32,000	4,000	1,000	100
不具合が発生した汚染の例、 mL^{-1}	3,490,150	96,990	3,120	140	0

石、あるいは金属摩耗粉である酸化鉄や銅などの硬質（ビッカース硬度 Hv 600 以上）の成分が含まれている。表5は著者ら^[40]がまとめた油中ダストについての清浄度の限界値（Cleanliness limit）^[1]と、不具合が生じた典型的な清浄度の例である。この限界値を超えると、油圧バルブの固着による作動不良や摩耗を起こす原因となる^[33]。メインバルブやパイロットバルブの可動部の間隙は数 μm ～30 μm ^[1]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倍に達していた。

6 不具合に至る油圧システムの振る舞いの検討結果

6.1 油圧システムでの正常なバイオ油の振る舞い

図8に油圧システムの正常な振る舞いのアクティビティ図を示す。各アクティビティ区画は図6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や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。但し、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℃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。

6.2 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について図9のアクティビティ図で示すことができる。(1) 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。(2) 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

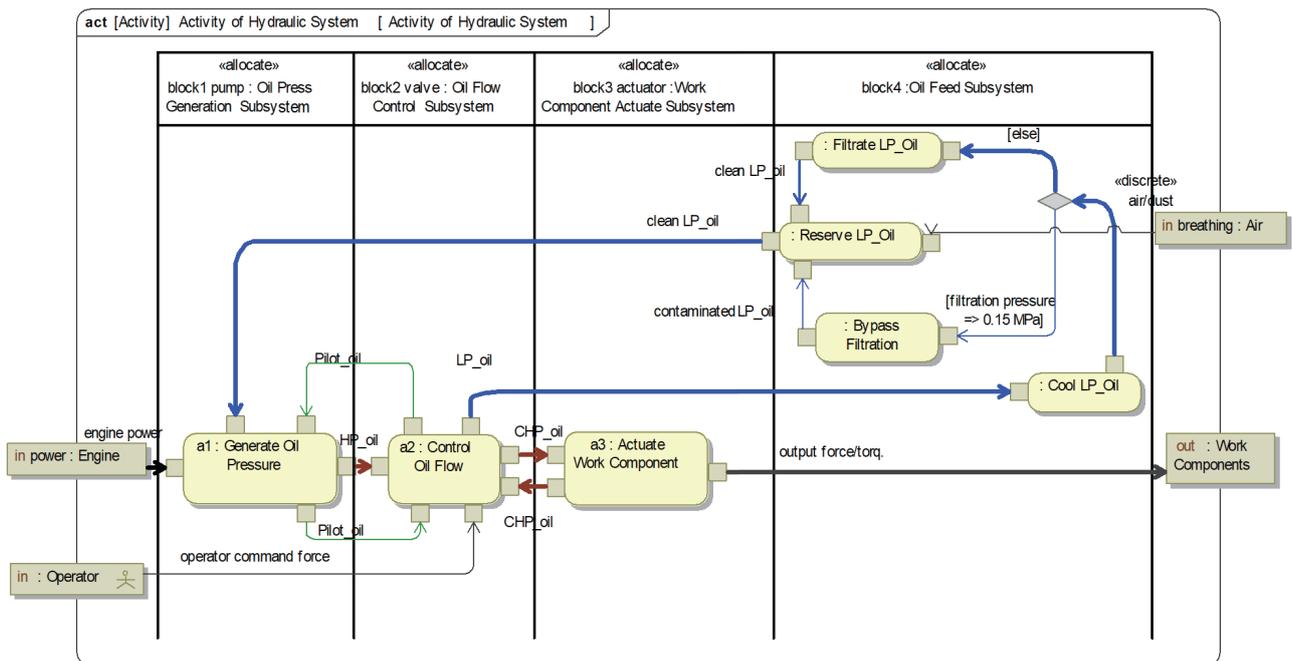


図8 油圧システムの正常な状態のアクティビティ図

流入する。(3) ラッカーを含んだ高圧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。(4) 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)、清浄な低圧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、油中ダストやラッカーがろ過されずに低圧油に混入し (contaminate LP_oil)、油中ダストに汚染された低圧油が流れる (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 10 に示す。汚染された低圧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圧油とパイ

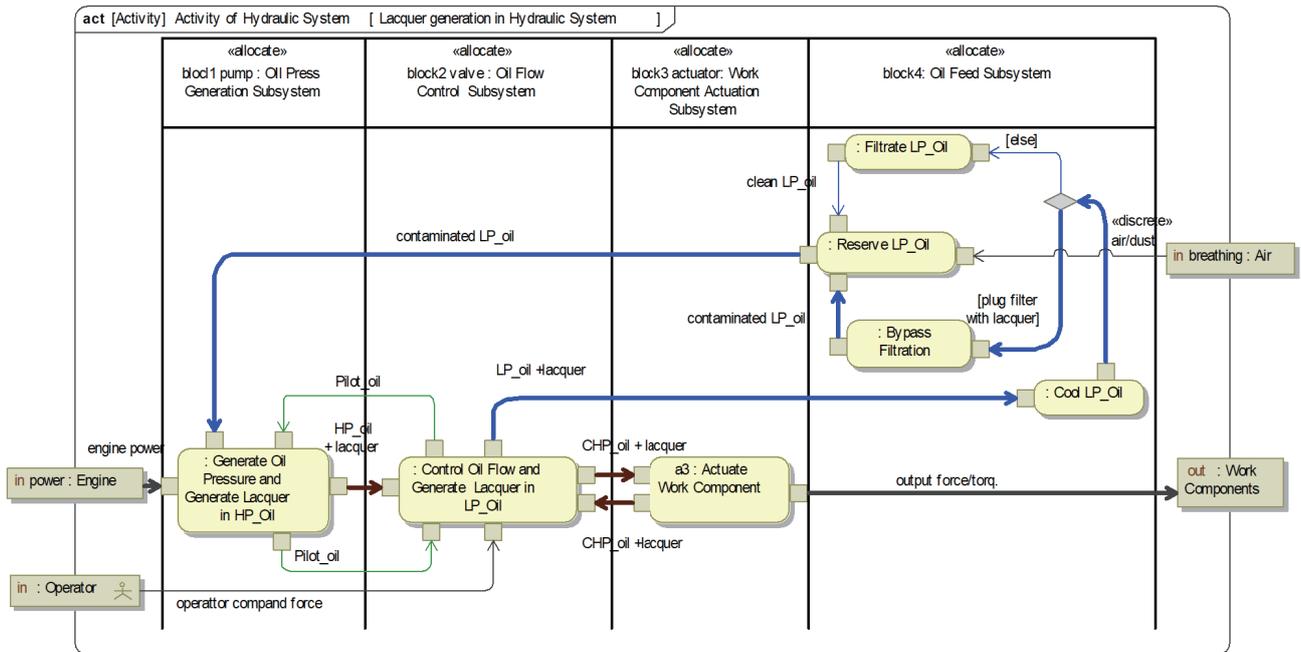


図 9 油圧システムにおけるバイオ油のラッカー生成とその挙動

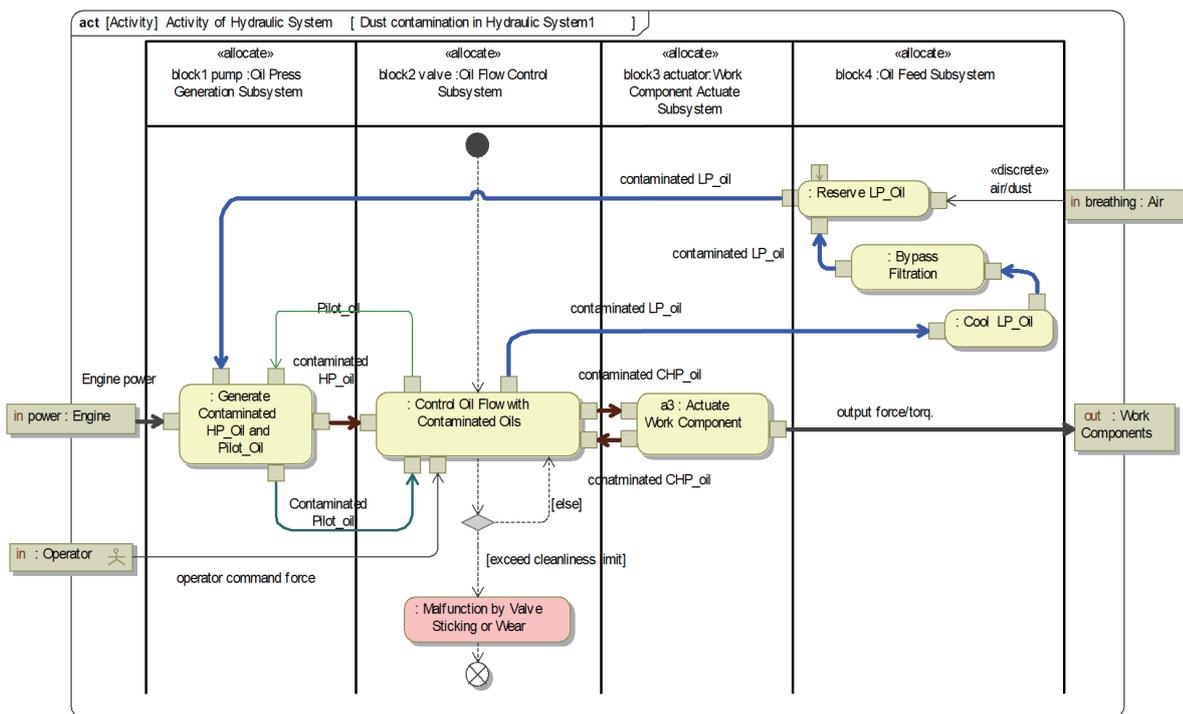


図 10 汚染されたバイオ油と油圧システムの作動不良

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擦粉が入り、低压油としてオイル供給サブシステムに戻り、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超えると (●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や摩擦により作動不良が起こる (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分かった。

7 バイオ油の状態遷移と不具合の関係の検討結果

7.1 バイオ油の状態遷移のシステムモデル記述

バイオ油の酸化とダスト混入に関する状態遷移の振る舞いを図 11 の状態機械図に示す。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^[41]。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^[42]、連鎖的に酸化を加速する作用がある。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^[43]。

著者らは、バイオ油は 135 °C × 500 hrs 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^[44]で確認している^{[15][22]}。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。建設機械の油圧システムの最高油温は 110 °C と低く^[1]135 °C には達しない。このため、著者らは前述した気泡の断熱圧縮^[30]やキャビテーション^[35]のような局部的高温部 (ホットスポット) が生じて初めてバイオ油の急激なラジカル生成、酸化反応ならびにラッカー生成が起こると推定した。このようにして生成し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 9 の filter plugged 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になる。最終的には油中ダストによる汚染は、油圧システムの清浄度の限界値を超えることが本状態機械図の検討からも導出される。

なお、酸化反応で生成した酸化生成物 (oxidation products)^[45]や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^{[46][47]}。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。但し、酸化生成物は油中に濃縮されることに

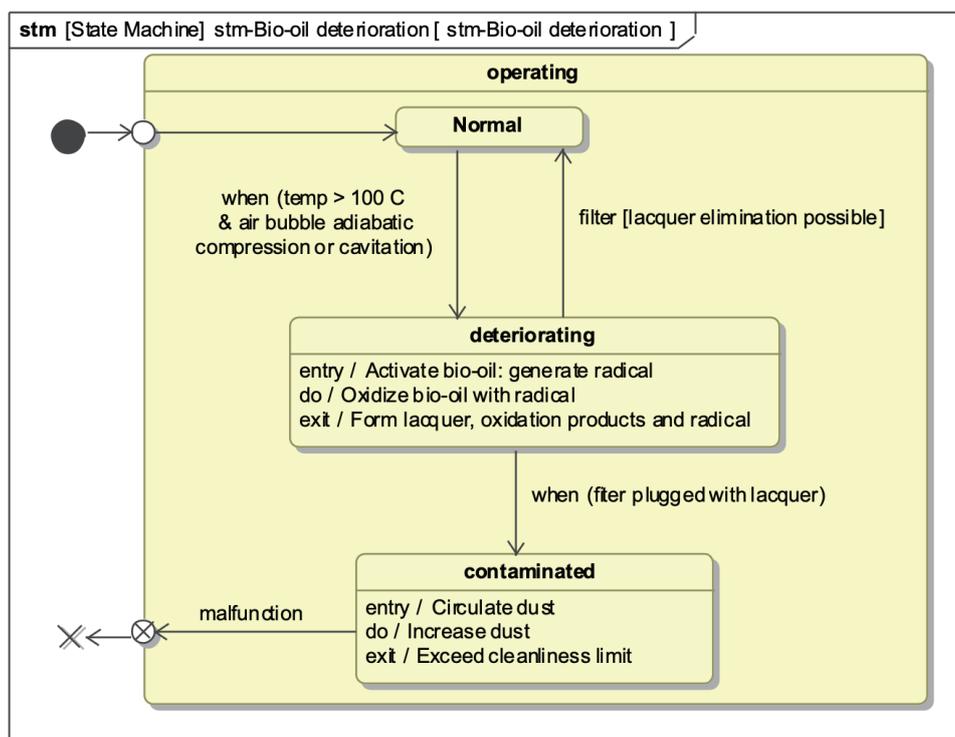


図 11 バイオ油の状態遷移を示す状態機械図

なる。

7.2 バイオ油状態遷移の技術的検討の結果

7.2.1 バイオ油のフィールド試験における酸価増加について

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、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について、建設機械のフィールド試験を行った結果^[48]を図12の実線で示す。酸化生成物の濃度の指標となるバイオ油の酸価は、3,000 hrsを超えると石油系作動油の使用限界値に近くなる。ここで酸価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^[49]。このため著者らは酸価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 hrs 毎（表2）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酸価上昇は生じないため、オイル交換時間は5,000 hrs 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酸価が増加すると言われる^[50]。しかし、Tottenら^[38]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^[48]を得ているので、図10には酸化だけの状態遷移を示した。

7.2.2 バイオ油以外のフィルタ閉塞の事例の検討

ラッカー生成メカニズムを検討するために、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について

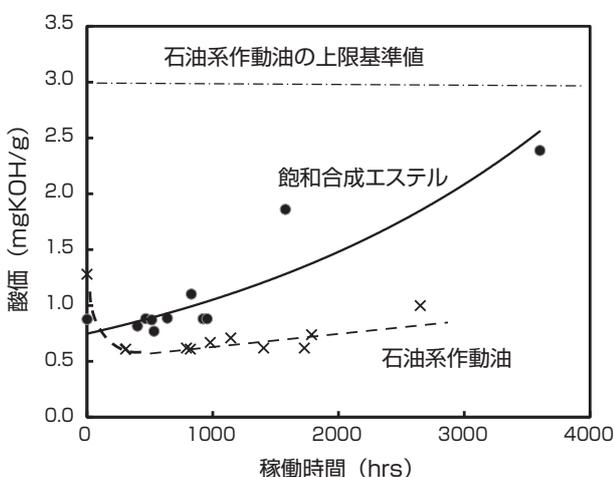


図12 建設機械のフィールド試験における飽和脂肪酸合成エステル基油のバイオ油^[48]と石油系作動油の酸価の経時変化

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)のフィルタ交換時間を500 hrs から5,000 hrs 以上に延長するフィールド試験において、フィルタへの著しいラッカー付着を観察している(図13)。フィルタの白色エンドプレートとセルロースろ材(新品は黄色)に茶色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 hrs でも酸価は低い(図12)ので、酸価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^[51]。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バイオ油の状態遷移の振る舞いの推定を裏付ける。

8 拡張SafeMLによる作動不良の対策の提案

8.1 SafeMLの拡張

SysMLにより記述した作動不良の振る舞いをもとに、SafeMLを用いて危険状況を記述して対策を検討した。但し、従来のSafeMLは製品自体の不具合に対する危険源は対象ではなかった^[28]。そこで、著者らは製品不具合なども取り扱えるように、SafeMLの防御要素(Defence elements)として三つの紫色の元素で示す短期対策(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を把握するための市場調査(Field Survey)を追加して拡張した(図14)。この論文では短期対策と市場調査については取り上げない。Biggsら^[27]は、複数の対策案について相対的で定量的な

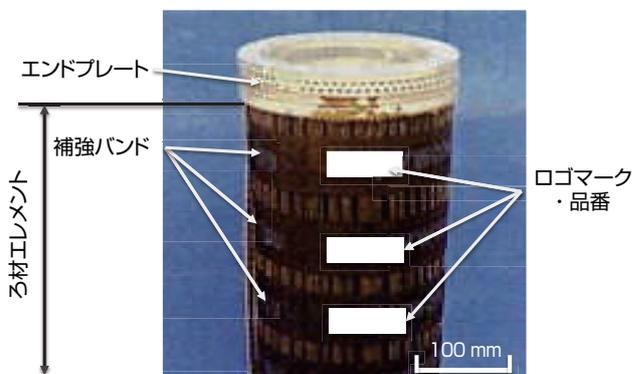


図13 フィルタ交換時間の延長試験(4,200 hrs)で付着したラッカー

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。ここでは対策の選定について安全スコアの適用も試みる。

8.2 拡張SafeMLを用いた作動不良と対策に関する提案

拡張 SafeML を用いて三つの対策案を図 15 のように提案する。図 8 ~ 10 に記述した危険状況に対する対策案を記述している。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 (桃色のエレメント 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 (赤のエレメント 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 (黄色のエレメント Harm Context) 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や摩耗を生じること (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 (緑のエレメント <<Long-term defence>>) は危険状況を防ぐための案であり、対策効果 (青のエレメント <<DefenceResult>>) には効果の内容を具体的に示す。赤・黄・緑・青のエレメント内には 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)、危害の過酷度 (severity)^[27] を検討して記入する。<<reqDefence>>として関連付ける安全性要求 (薄桃色のエレメント <<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もできる。

作動不良の振る舞い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。

8.2.1 対策案1

緑エレメント (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 (薄桃色エレメント Hydraulic system shall reduce oil pressure at a low load operation) という安全性要求が生じる。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

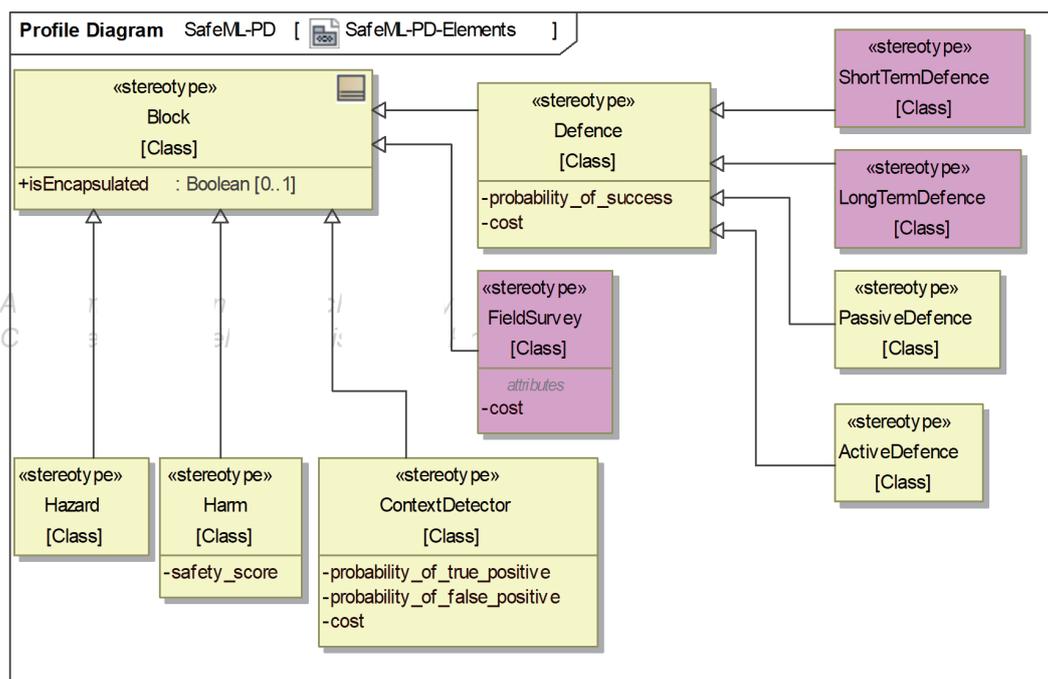


図 14 SafeML に追加した要素 (紫色のエレメント)

formation by lowering pressure at valve to prevent filter plugging)。

8.2.2 対策案2

「緑エレメント (2) Centrifugal air bubble separator」は、遠心分離装置^[30]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）。

8.2.3 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である（薄桃色エレメント Prevent filter plugging）。この要求を満たせる新しい

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）。

8.3 対策案の技術検討

エンジンの自動制御で低負荷時に高压油の圧力を下げて、メインバルブのリリーフ弁から余剰な高压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^[30]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の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。このため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

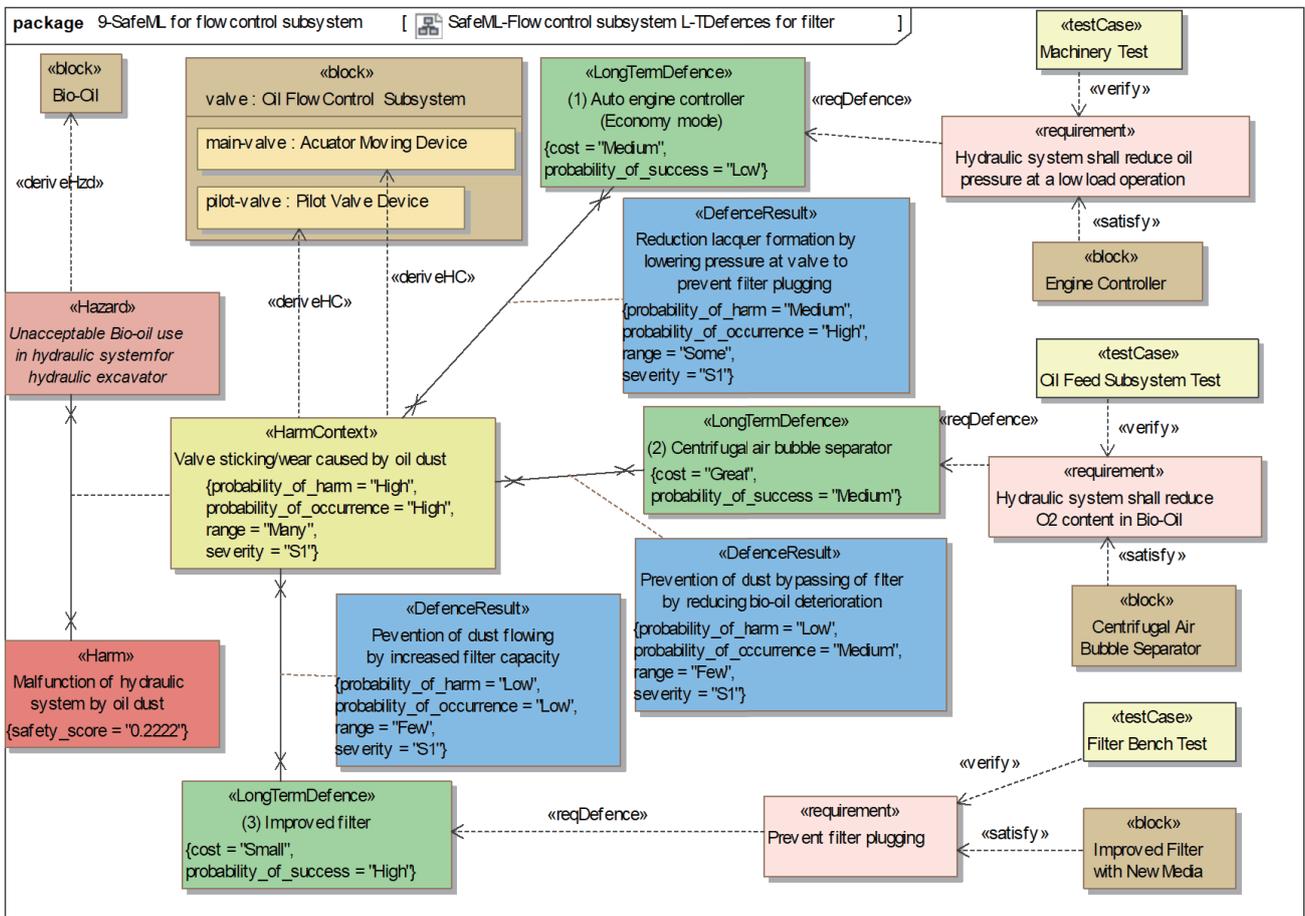


図 15 バイオ油による油圧バルブの作動不良に対する 3 つの対策案についての SafeML 図

表 6 作動不良未対策の場合と三つの対策案のタグ値 5 項目、そして安全スコアとコスト評価の比較

No.	対策案	対策の成功 確率、S	危険状況発生 の確率、 $P(Ou)$ または $P(Od)$	危害発生 の確率、 $P(Hu)$ または $P(Hd)$	危害発生 の範囲、 Ru または Rd	危害の過酷度、 Su または Sd	安全スコア、 SS	コスト評価
0	未対策の場合	-	High (1.0000)	High (1.0000)	Many (0.7500)	S2 (0.5000)	0.3750	-
1	エンジン回転制御 (エコミーモード)	Low (0.3333)	High (1.0000)	High (1.0000)	Some (0.5000)	S2 (0.5000)	0.3333	Small (0.5000)
2	遠心分離式の気泡除去 装置	Medium (0.6667)	Medium (0.6667)	High (1.0000)	Few (0.2500)	S2 (0.5000)	0.0741	Great (1.0000)
3	改良フィルタ	High (1.0000)	Low (0.3333)	High (1.0000)	Few (0.2500)	S2 (0.5000)	0.0000	Small (0.5000)

表 7 フィルタ改良前後の車両での作動不良の発生

	作動不良の年間の平均 発生件数 (2 年間)
従来のセルロースろ材 フィルタ採用車両	10.5
改良フィルタ採用車両	1.4 未満

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^[52]。JIS 油圧用フィルタ性能評価方法^[53]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^[1]。また、改良ろ材を採用したフィルタ寿命は 2 倍以上になることも報告されている^[52]。ちなみにセルロース繊維の直径は最大 30 μm に対して、改良ろ材の繊維の直径は最大 1.0 μm である。これら過性能が改良された理由であり、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。

8.4 対策の決定

表 6 は未対策(Undefended Case)と各対策案について、図 15 中のエレメント内のタグ値から付録 A 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)、そして高い (High: 1/1) の 3 段階に区分・数値化した。危害発生範囲は 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 段階とした。危害の過酷度は、ほとんど費用が掛からない部品交換や洗浄・調整で済む場合 (S1: 1/4)、現場での部品や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や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 (Small)、中 (Medium)、そ

して新規サブシステム品番の追加や車体改造必要などの大 (Great: 4/4) までの 4 段階とした。

未対策の場合では安全スコアは 0.3750 であるが、フィルタ改良案は安全スコア 0.0000 と最も数値が小さく (効果が大きく) 安価である。従って、改良フィルタの採用が決定できる。エンジン回転制御の安全スコアは 0.3333 であり、遠心分離機の安全スコアは 0.0741 であるので、対策の効果は改良フィルタよりも小さい。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おり全ての機種にも採用が決まっているため、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、一部機種^[54]以外には採用が決まっていないためコスト大 (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。

8.5 対策の技術的な妥当性の確認

最近、著者らは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結果、この改良ろ材フィルタを採用した建設機械からはバイオ油による油圧バルブの作動不良が発生していないことを表 7 のように見出した。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、酸化安定性が高く十分なオイル寿命を持つ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。

エンジン回転制御は従来のセルロースフィルタを採用している一部機種では既に採用されていたが、作動不良にはほとんど影響がなかったと推定される。作動油の遠心分離による気泡除去装置は前述の様に一部の機種に採用された^[54]

が、バイオ油に対する影響は確認されていない。これらの確認結果から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た。

9 考察

プロジェクトチームは迅速な暫定対策と恒久対策を実行できたが、これは要素解析手法が建設機械メーカーに根付いているためである。これら一連の対策によりユーザや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やサービス員に不満をもたらしていた。

SysMLで記述したシステムモデルを用いた総合解析手法により未解決の不具合の解析と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への記述に基づき作動不良の原因とそのメカニズムを記述することができ、SafeMLへの記述に基づき対策案を検討して対策を決定できることが分かった。この解析によりバイオ油の低い酸化安定性が起こす問題は、従来は油の変色や軸受メタル中の鉛の溶出しが考えられていなかったが、新たに作動油においてもラッカーの生成によってフィルタ閉塞が起ることが明らかになった。フィルタが、油中ダストを捕捉するだけでなく、酸化によるラッカーを捕捉してオイルの酸化劣化を防ぐという新たな機能があることも見出された。今後この新しい総合解析手法によってシステム全体を見回した開発が可能である。SafeMLにより図的に表現された不具合の危険状況、対策案や安全性要求は、技術者以外も含めた分野横断的チーム全員で検討することが可能である。対策案の選定は安全スコアとコストの分かり易い指標から可能となる。要素解析手法は複雑なシステム全体に関わる問題に対しては欠点があるが、サブシステムや部品などの不具合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の記述によるシステムモデルを用いた総合解析手法は使いこなすのに時間が掛かる欠点がある。このために図4に示した様にサブシステムの開発には要素解析手法、システムの開発や問題解決には総合解析手法を用いることを提案する。

10 結言

この論文では、ヨーロッパで進められている建設機械の生分解性作動油について、いくつかの問題点をシステムモデルを用いた総合解析手法により原因究明と対策を試みた。

その結果要素解析手法を用いたバイオ油のプロジェクトチーム活動により次のように対策を取ることができた。

1) 暫定対策として、バイオ油の取扱マニュアルを半年内で作成してサービス員を通じてユーザに配布できた。このマニュアルは恒久対策完了まで有効とした。

2) 恒久対策では多くの油圧サブシステムを予定通り4～5年で改良して逐次建設機械に搭載することができた。

しかし、建設機械のバイオ油による未解明の作動不良の原因とメカニズム（振る舞い）に関して、その後作動不良の発生が収まったため解明されず、不具合対策もされないままであった。

このため、新しい総合解析手法を用いて作動不良を解析して対策することで次の結果が得られた。

3) SysMLで記述したシステムモデルにより作動不良の原因と振る舞いが次のように解明できた。

3-1 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はバイオ油中に生成する。

3-2 生成したラッカーは次第にフィルタに堆積してフィルタを閉塞させる。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や摩耗を起こして、油圧バルブの作動不良が起きる。

これらの解析結果に基づき SafeML を用いて対策を検討して、安全スコアとコストの評価から、安価で最も効果がある改良ろ材フィルタによる対策を導出できた。

4) この解析によってバイオ油に適合する建設機械の開発を完了できた。

今後、経営に影響するような大きな不具合や開発に対し、従来の要素解析手法に加えて、この総合解析手法を用いて原因の解析と対策の立案をすることが期待される。

最後に産業技術総合研究所の Geoffrey Biggs 博士の SafeML に関する助言に感謝いたします。

付録 安全スコアの計算式^[27]

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

$$Qu = P(Ou)P(Hu)RuSu \quad (2)$$

$$Qd = P(Od)P(Hd)RdSd \quad (3)$$

但し、

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) 未対策の場合にコンテキストが起きる確率

P(Hu) 未対策の場合にハームが起きる確率

Ru 未対策の場合のハームが起きる範囲

Su 未対策の場合のハームの過酷度

P(Od) 対策した場合にコンテキストが起きる確率

P(Hd) 対策した場合にハームが起きる確率

Rd 対策した場合のハームが起きる範囲

Sd 対策した場合のハームの過酷度

参考文献

- [1] 日本トライボロジー学会（大川聰編）：産業用車両の潤滑，養賢堂，4，20–26，63–69，79–87，107–108，190–195（2012）。
- [2] 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ィンターセミナー，15–27（1997）。
- [3] 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，49（8），25–32（2010）。
- [4] Wasserhaushaltsgesetz (Federal Water Act), 12 November 1996 (Federal Law Gazette I, 1695) (1996).
- [5] United Nation, Sustainable Development Goals: FRESHWATER COUNTRY PROFILE GERMANY, (2011), http://www.un.org/esa/agenda21/natinfo/countr/germany/germany_freshwater.pdf, 閲覧日2018-10-24.
- [6] ドイツ機械工業連盟規格VDMA 24-568: 1994, Biologisch schnell abbaubare Druckflüssigkeiten.
- [7] 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.
- [8] The European Commission: Commission Decision of 24 June 2011 on establishing the ecological criteria for the award of the EU Ecolabel to lubricants, *Official Journal of the European Union*, L169/28–39 (2011).
- [9] 根岸哲：EU競争法と市場統合の総合的検討，日本EU学会年報，(32)，18–28（2012）
- [10] 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），403–409（2002）
- [11] 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/anzenseisei07/pdf/05-03.pdf>, 閲覧日2018-10-27.
- [12] 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），654–666（2017）
- [13] 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），627–635（1980）
- [14] 鈴木章仁，益子正文，張禾暉：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），671–674（2002）
- [15] A. Konishi, S. Ohkawa, N. Nakamoto, M. Nanba and T. Yoshida: Development of a High Performance Biodegradable Hydraulic Oil for Construction Equipment, *SAE Transactions*, 971632 (1997).
- [16] R. Eguchi, Y. Ohtake, S. Ohkawa, M. Iwamura and A. Konishi: Compatibility of Hydraulic Seal Elastomer with Biodegradable Oils, *SAE Transactions*, 960210 (1996).
- [17] S. Ohkawa and A. Konishi: Biodegradable Hydraulic Oil for Heavy-Duty Construction Equipment, *1st Internationales Fluidtechnisches Kolloquium*, (1), 207–214 (1998).
- [18] JIS, デイペンダビリティ 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—故障の木解析 (FTA), C5750-4-4 (2011).
- [19] JIS, デイペンダビリティ 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).
- [20] S. Friedenthal, A. Moore and R. Streiner (著, 西村秀和 (監訳)): システムズモデリング言語 SysML, 東京電機大学出版局, (2012).
- [21] D. Walden, K.J. Dorsberg, R. D. Hamelin and T.M. Shortell: Model-based systems engineering, *INCOSE Systems Engineering Handbook—A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, Wiley, 11, 189 (2015).
- [22] S. Ohkawa, A. Konishi, H. Hatano, K. Ishihama, K. Tanaka and M. Iwamura: Oxidation and corrosion characteristics of vegetable-base biodegradable hydraulic oils, *SAE Technical Paper*, 951038 (1995).
- [23] 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.
- [24] P. Wilkinson, M. Novak and A. Mavin: Integrating safety into system design with SysML, *Journal of Safety and Reliability Society*, 29 (4), 79–93 (2009).
- [25] F. Mhenni, J.Y. Choley and N. Ngyuyen: SysML extensions for safety-critical mechatronic systems design, *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 242–247 (2015).
- [26] E. Villhauer and J. Brian: An Integrated model-based approach to system safety and aircraft system architecture development, *25th Annual INCOSE International Symposium*, 25 (1), 1373–1387 (2015).
- [27] 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), 147–178 (2016).
- [28] G. Biggs, 坂本 武志, 神徳 徹雄: 2A2-I06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 1–2A2-I06 4 (2013).
- [29] 風間俊治, 鶴野正真: 斜板式アキシャ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), 425–430 (2008).
- [30] 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, 11–12 (2014).
- [31] 岡部信也: 油圧ショベル大全, 日本工業出版, 60–61 (2007).
- [32] JXTGエネルギー: 省エネルギー型油圧作動油, <https://www.no.jxtg-group.co.jp/company/rd/intro/lubricants/shoene.html>, 閲覧日2018-03-27.
- [33] 日本フルードパワー工業会: 実用油圧ポケットブック, 244–248, 319 (2008).
- [34] 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), 32–36 (2012).
- [35] 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), 159–166 (1997).
- [36] K.S. Suslick, J.J. Gawlenowski, P.F. Schubert and H.H. Wang: Alkane Sonochemistry, *Journal of Physical Chemistry*, 87 (13), 2299–2301 (1983).
- [37] 香田忍: ソノケミストリーとは何か?, *日本音響学会誌*, 57 (5), 345–350 (2001).
- [38] G.E. Totten (ed.): *Handbook of Hydraulic Fluid Technology*, Marcel Dekker, 461–463, 630–647, (2000).
- [39] ヤマシンフィルタ株式会社R&D部: エアプリーザ吸排気特性測定装置概要, YAMASHIN Technical Report, <http://www.yamashin-filter.co.jp/ja/technology/development/main/02/teaserItems1/01/linkList/0/link/20160115.pdf>, 閲覧日2018-04-25.
- [40] S. Ohkawa and H. Hamaguchi: Progress of A New Hydraulic Fluid Specification HX-1 for Construction Equipment, *SAE Asia Colloquia*, 11 (2003).
- [41] 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), <http://www.kochi-tech.ac.jp/library/ron/2000/env/1010001.pdf>, 閲覧日2018-03-26.
- [42] 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2018-04-10.
- [43] 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), 1–14 (2003).

- [44] 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化安定度, K 2514-1, (2013).
- [45] 日本トライボロジー学会編: メンテナンストライボロジー, 養賢堂, 117 (2006).
- [46] 港宏: 過酸化エステルの化学, 有機合成化学, 23 (1), 12-22 (1965)
- [47] Iowa University: Lipid Oxidation an Overview, <http://www.public.iastate.edu/~duahn/teaching/Lipid%20oxidation/free%20radicals.pdf>, 閲覧日2018-11-15.
- [48] 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, フルイドパワーシステム, 29 (5), 63-67 (1998).
- [49] 桜井俊男編: 石油製品添加剤, 幸書房, 263 (1979).
- [50] C. Kempermann and H. Murrenhoff: Reduction of water content in biodegradable and other hydraulic fluids, *SAE Technical Paper*, 981497 (1998)
- [51] K. Iwakata, Y. Onodera, K. Mihara and S. Ohkawa: Nitro-oxidation of lubricating oil in heavy-duty diesel engine, *SAE Technical Paper*, 932839 (1993).
- [52] 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).
- [53] 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(マルチバステスト法), B 8356-8, (2002).
- [54] 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学会誌, 39 (5), 272-276 (2008)

執筆者略歴

大川 聡(おおかわ さとし)

1969年、慶應義塾大学工学部応用化学科卒業。同年(株)小松製作所技術研究所材料研究室、1983年エンジン開発センタ、1988年本社商品企画部主査、1990年建機研究所シニアエンジニア、2005年コマツ材料技術センタ主幹技師、2009年コマツ退職、1992～2005年(社)日本建設機械化協会油脂技術委員長。1996～2005年米国自動車技術者協会(SAE)



燃料潤滑アジア運営委員会作動油リーダー。現在、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研究員。1997年日本建設機械化協会奨励賞。著書に『写真でたどる建設機械 200年』(単著)、『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』(編著)。この論文では、建設機械メーカーにおいて欧州のバイオ油の品質とその規制実態の調査、バイオ油プロジェクト立ち上げと推進を行った。また、バイオ油による作動不良の SysML と SafeML の記述を行い、論文の執筆も担当した。

尹 善吉(ゆん そんぎる)

2008年8月韓国アジュ大学機械工学部卒業。2008年より2010年まで Ezrobotics 会社で勤務。2014年慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科修士課程修了。現在、同大学院博士後期課程在学中。モデルベースシステムズエンジニアリング、システムモデリングに興味を持つ。日本機械学会会員、日本自動車学会会員。この論文では、油圧システムの SysML と SafeML による記述を担当した。



日比谷 孟俊(ひびや たけとし)

1971年3月慶應義塾大学大学院工学研究科応用化学専攻博士修士課程修了。工学博士。1971年4月より2001年12月まで日本電気株式会社基礎研究所勤務。2002年1月より2007年3月まで、首都大学東京システムデザイン研究科教授。2007年4月より20011年3月まで慶應義塾大学教授。現在、慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究所顧問。



著者に『Thermophysical Properties of Molten Silicon, in “Crystal Growth Technology, From Fundamentals and Simulation to Large-scale Production”』(共著)、『マイクログラビティ』(編著)、『宇宙実験最前線』(共著)、『磁気光学の最前線』(共著)、『江戸吉原の経営学』(単著)など。日本結晶成長学会会員、日本熱物性学会名誉員、IEEE フェロー、European Low Gravity Research Association などの会員。この論文では、開発のシナリオや原因究明と対策立案の手法について助言、監修を担当した。

西村 秀和(にしむら ひでかず)

1990年3月慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。工学博士。1990年4月より千葉大学工学部機械工学科助手、1995年より同助教授。2007年2月～3月バージニア大学訪問准教授。2007年4月より慶應義塾大学教授、現在、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教授。モデルベースシステムズエンジニアリ



ング、システム安全、制御システム設計などの教育・研究に従事。著書に『MATLABによる制御理論の基礎』(共著)、『MATLABによる制御系設計』(共著)の他、翻訳書『システムズモデリング言語 SysML』、『デザイン・ストラクチャー・マトリクス DSM』がある。日本機械学会フェロー。IEEE、ASME、INCOSE などの会員。この論文では、バイオ油による作動不良の SysML の記述の助言と全体の取りまとめ、監修を担当した。

査読者との議論

議論1 全体

コメント(赤松 幹之:産業技術総合研究所、小林 直人:早稲田大学)

本論文は、建設機械用油圧システムにバイオ油を用いた場合に生じる不具合の原因を探り、対策を策定するための方法として、SysML と SafeML を適用した事例について書かれています。バイオ油による不具合の発生メカニズムが複雑であることから、FTA 等の事故解析手法では対策に至るまでの分析が難しいのに対して、サブシステムの相互作用を記述できる SysML を用いることで、対策を検討することを可能としたことを示しています。バイオ油導入に対する対策をどのように進めたかのシナリオが記述されており、構成的なアプローチの事例です。建設機械用油圧システムに生分解性作動油を応用する場合の実際課題の解決法を与え、油圧システム開発に資するとともに、SysML や SafeML によって複合的な課題に対する総合解析手法の有効性を示したという点で、シンセシオロジーに相応しい論文であると言えます。

議論2 対策の全体像

コメント(赤松 幹之)

先のサブシステムでの対策とシステム全体としての対策、暫定対策、恒久対策、ステークホルダーへの働き掛け(例えば、マニュアル)の互いの位置付けなどの全体像があるとシンセシオロジー論文らしくなると思います。フィルターによる対策によって、これまでの対策は不要になったのか、それぞれはそれぞれで重要な役割を今でも担っているの

か、などが読者として関心があるところかと思えます。

回答（大川 聡）

サブシステムの対策とシステム全体としての対策、暫定対策、恒久対策の位置付けについて図を修正追加して分かりやすくしました。暫定対策と恒久対策の定義は1章に記述しました。

議論3 環境への影響

質問（小林 直人）

建設機械用油圧システムに生分解性作動油を利用する際の動機として、油漏れを起こした時の環境への汚染の影響を低減するためとのことですが、現実到现在までの例でどれくらいの量と頻度で油漏れが起こっていたのでしょうか。

回答（大川 聡）

30トン級油圧ショベルでは年平均約2,000時間稼働しますが、その1年間で約40L漏れる可能性があります。近年は作業時の油漏れを防ぐための指導（サービス員が整備する時にブルーシートを敷く、油吸着剤で油を除去するなど）によって漏れ量は減ったと思います。なお、1Lの油漏れは1m³（2ton）土を汚染し、その処理費用は10万円/tonになるため汚染土の処理費用は年800万円になる計算です。一方、緊急対策がとられるケースは、油圧ホースを岩や鉄筋に打ちつけて切れてホースから油が噴霧するような場合です。1分間で350Lの油圧タンクが空になります。

議論4 従来の手法との違い

質問（小林 直人）

従来の要素解析手法（FTAやFMEA）と今回採用の総合解析手法（SysMLやSafeML）との違いが明示されていますが、実際にはその境界が必ずしも明確ではないと思います。そこで（1）まず従来の手法で取り扱って、うまくいかない部分は新たな手法を適用するなどの使い分けの考え方、また（2）今回の手法（SysMLやSafeML）の適用可能性の高いシステムはどのようなものがあるか例示して頂ければと思います。

回答（大川 聡）

要素解析手法を使わずに、SysMLにより記述したシステムモデルを用いた総合解析手法だけでも全ての解析が可能です。実際に著者も総合解析手法だけで原因解析と対策決定を試みて、要素解析手法では気が付かなかった原因やメカニズムを見つけられました。しかし、総合解析手法（特にSysML）は著者らの習熟度合いも関係していますが、要素解析手法よりも数倍の時間を要しました。

（1）要素解析手法は簡便で素早くできるので全てに適用を試みる必要がとらわれます。総合解析手法は本論文でも示した様に、要素解析手法では解析できない複雑な問題だけに適用すべきと思われます。

（2）総合解析手法はコンピュータ制御式の機械システム、人の行動が影響する機械システム、あるいは化学反応が影響する機械システムなどに適用の意味があると思われます。

議論5 ラッカー生成について

質問（小林 直人）

（1）油圧ポンプにおける気泡の断熱圧縮、（2）メインバルブでのキャピテーション、が酸化縮合物であるラッカー生成の大きな原因とされていますが、それを裏付けるデータや写真等（既発表論文あるいは他の論文のデータでも結構です）を用いて、その発生メカニズムについて説明が可能であればお願いします。なおラッカーはフィルターの

目詰まりを誘起する重要な影響を及ぼしていますが、典型的な化学構造や名称等が分かれば明記をお願いします。また、他の酸化生成物についてはいかがでしょうか。

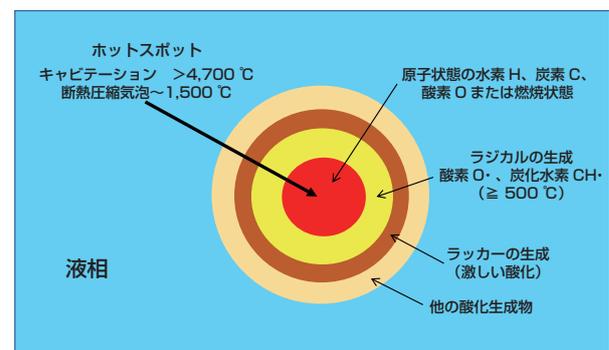
回答（大川 聡）

ラッカーの例として油圧ポンプ内の部品表面の写真を示します。油圧ポンプ内の断熱圧縮で生じたラッカーが附着したと推測しています。JIS規格の潤滑油酸化試験法（JIS K2514-1, 2018）には酸化によるラッカーの生成度合いの測定方法があります。著者も生分解性作動油についてこの酸化試験を実施した論文（S. Ohkawa, 他 “Oxidation and Corrosion Characteristics of Vegetable-Base Biodegradable Hydraulic Oils”, SAE Paper 951038, (1995)）を発表しましたが、当時はラッカーの重要性には気付かず記述を省略してしまいました。



市販作動油により生じた油圧ポンプ試験機のサーボバルブ表面のラッカー皮膜（茶色部分）（著者らによる）

生分解性作動油はラジカルによるランダムな酸化が始まると、アルコール(-OH)、アルデヒド(-CO)、酸(COOH)などを含んださまざまな分子量の複雑な組成の酸化生成物ができて粘度が上がります（分子量が200～8,000、高い場合は100,000）。ラジカルにより激しく酸化して高分子化すると、接着剤のような樹脂（ラッカー）になります。ラッカーはこのように制御されていない酸化により生成されるので、化学構造は一定しておらず分析は困難です。「他の酸化生成物」もやはり分析は困難であり、このような分析の先行研究例は見つかりません。ラッカーと「他の酸化生成物」の生成について、著者は図のように想像しています。



キャピテーションや断熱圧縮気泡により生じる生分解性作動油の酸化状態の想像図（著者による）