昭和47年10月19日第4種学術刊行物許可　平成28年7月15日発行（奇数月）

ISSN 1346−7719　フルードパワーシステム
ISSN 1880−3121　日本フルードパワーシステム学会論文集

日本フルードパワーシステム学会誌

JOURNAL OF THE JAPAN
FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

フルードパワーシステム

July.2016 Vol.47 No.4

日本フルードパワーシステム学会論文集
TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

特集「フルードパワーを支える油圧作動油の劣化と対策」

JFPS 一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会　http://www.jfps.jp

ISSN 1346-7719
第47巻　第4号　2016年7月

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目　次

【挨拶】
会長就任にあたって　小山　紀　152
副会長のご挨拶　眞田　一志，肥田　一雄　153

特集「フルードパワーを支える油圧作動油の劣化と対策」

【巻頭言】
「フルードパワーを支える油圧作動油の劣化と対策」発行にあたって　丸田　和弘　154

【総論】
作動油の劣化とその対策について　風間　俊治　155

【解説】
作動油の劣化と対応　田崎　博之　160
固形ダストによる油圧回路の不具合とその対処法　石塚　信　164
エレメントレス・フィルターによる油中コンタミの除去技術　福田　寛人　168
水分による油の劣化とフィルトレーション　森永由一郎　171
油圧作動油と気泡　坂間　清子，田中　豊　174
状態基準保全（CBM）を実現するオイル分析　山中　克浩　178

【ニュース】
日中若手研究者交流事業報告　伊藤　和寿　182

【トピックス】
空気圧サーボ制御を用いた手術支援ロボットを開発する大学発ベンチャー企業　川嶋　健嗣　184
特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム……特許文献を見る2　木原　和幸　187

【研究室紹介】
沼津工業高等専門学校　村松・前田研究室　村松久巳，前田　篤志　191

【企画行事】

平成27年度ウィンターセミナー開催報告　兵藤　訓一　194

【会告】

第35期　通常総会終了　197
平成28年度　特別教育講座のお知らせ
「油圧システムのモデリングの基礎をつかむ―ブロック線図とパワーフロー ―　198
日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会共催
平成28年秋季フルードパワーシステム講演会のお知らせ　198
平成28年度　オータムセミナー
「生産技術に貢献するフルードパワー inトヨタ産業技術記念館」のお知らせ　198
共催・協賛行事のお知らせ　199
その他　196，201，202

■表紙デザイン：山本　博勝　㈱豊島

一般社団法人　日本フルードパワーシステム学会

〒 105-0011 東京都港区芝公園 3－5－22 機械振興会館別館102
TEL：03-3433-8441　FAX：03-3433-8442
E-Mail：info@jfps.jp

FLUID POWER SYSTEM

ISSN 1346-7719
Vol. 47, No. 4 July 2016

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

【Greeting Message】
A Letter of Greetings as an Inaugural Address from the President — Osamu OYAMA — 152
Message of the Inauguration of the Vice-chairpersons — Kazushi SANADA, kazuo HIDA — 153

Special Issue "Deterioration and Countermeasure of Hydraulic Oil Supporting Fluid Power"

【Preface】
On the Special Issue "Deterioration and Countermeasure of Hydraulic Oil Supporting Fluid Power" — Kazuhiro MARUTA — 154

【Survey】
Degradation of Oils and Its Countermeasures — Toshiharu KAZAMA — 155

【Review】
hydraulic fluids, Deterioration and Maintenance — Hiroyuki TAZAKI — 160
Trouble Shooting of Hydraulic Circuit by Solid Dust — Makoto ISHIZUKA — 164
Removal Technology of Contamination in Oil with Element-Less Filter — Hiroto FUKUDA — 168
Deterioration of oil by Water and Filtration — Yuichiro MORINAGA — 171
Hydraulic Oil and Air Bubbles — Sayako SAKAMA,Yutaka TANAKA — 174
Oil Analysis for Condition Based Maintenance — Katsuhiro YAMANAKA — 178

【News】
Report on Japan-China Younger Researcher Exchange Program 2015 — Kazuhisa ITO — 182

【Topics】
Venture Company Emerged from University to Develop Surgical Robot with Pneumatic Servo Control — Kenji KAWASHIMA — 184
Investigation of the Patent Documents/Japan Platform for Patent Information - Patent Literature Reference 2 — Kazuyuki KIHARA — 187

【Laboratory Tour】
Muramatsu・Maeda Laboratory in National Institute of Technology, Numazu College — Hisami MURAMATSU, Atsushi MAEDA — 191

【JFPS Activities】
Winter Seminar 2015 — Norikazu HYODO — 194

【JFPS News】
196, 197, 198, 199, 201, 202

The Japan Fluid Power System Society
c/o Kikaishinko Building
3-5-22 Shiba-koen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011, Japan

挨拶

会長就任にあたって

著者紹介

小山（おやま）　紀（おさむ）
明治大学理工学部
〒314-8571 川崎市多摩区東三田１－１－１
E-mail : oyama@isc.meiji.ac.jp

明治大学理工学部教授，流体制御の研究に従事．日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，計測自動制御学会などの会員，工学博士．

先の学会総会にて平成28，29年度会長に指名されました小山です．私自身は非力であることを自覚していますが，皆様のご協力を頂きながら以下に述べることに取り組んでみたくお引き受けしました．

築地前会長は安倍総理の「三本の矢」に例えて，産学連携基盤，国際的学術基盤，財政基盤の強化を目標に掲げられ，実績をあげてこられました．産学連携については賛助会員企業サービスへ軸足を置いた産学共同研究委員会「国内外のフルードパワーシステム研究開発動向調査委員会」が立ち上がり，国際的学術基盤に関しては新たに韓国およびベトナムとの交流が開始されました．財政基盤についても着実な成果があがっています．賛助会員企業にもご支援いただき，企業からの新規会員を募ることができました．しかし，TPPや英国のEU離脱問題など国際的流動状況，国内ではグローバル化対応や団塊世代の退職など，学会をめぐるさまざまな不安定要因があることも事実です．

産学連携，国際的学術，財政基盤の強化は学会存在のため何よりも重要な事項です．継続して取り組まなければなりません．そのため他組織との連携が必須です．工業会，産業界，他学会および外国機関との連携強化を図りたいと考えます．特にフルードパワー工業会は不可欠のパートナーです．また，会員増強のためには，学会員であるメリットを実質化することが急務です．安倍総理が政策を「三本の矢」と名付けたのは恐らく，郷里山口県の前身長州藩の開祖である戦国武将・毛利元就が，３人の息子に話したと伝わる「三ツ矢の教え」が頭にあったと思います．伝説では矢の意味は「それぞれは単独では折れやすいが，三本重ねると折れない」として，３人に団結を諭したものです．学会に例えると「三本」とは，学会組織，会員，賛助会員企業と見做すことができるかも知れません．もちろん矢のように「単独では折れやすい」と言っている積りではありません．共に信頼しながら，協力してゆく必要があると思うからです．会員，賛助会員企業にとって魅力ある学会，頼りにされる学会でなければなりません．

魅力ある，頼りにされる学会であるには要望や提案を出しやすい環境を整備し，さらには待つだけではなく積極的に引き出す努力が必要です。またこれらを迅速に実現するよう最大限の努力をするのが，学会を運営する者の使命です．「前例がないから」と尻込みすることはしたくありません．さまざまな要望や提案に迅速に対応するために，各委員会等の意見を尊重しながら，学会内組織の垣根をこえた意思疎通を目指します．

学会は「知識の交換や情報提供により研究の進歩・普及を図り，学術の発展に寄与する」（定款より，一部略）ことを活動目的としています．その意味において賛助会員企業との研究協力についての論議をすでに始めています．もちろん，企業間の思惑の相違等があり得，軌道に乗せるには種々の困難がありそうです．しかし，困難だからこそ意義があるのではないでしょうか．

学会が正当な社会的認知を受けるには，活動実績を発信してゆく必要もあると思います．４年後に学会は創立50周年を迎えます．半世紀にわたる学会活動とその意義を社会に伝える機会です．

最後になりましたが，学会運営にはなによりも会員皆様のご理解・ご協力が必要です．どうかよろしくお願い申しあげます．

（原稿受付：2016年６月27日）

挨拶

副会長のご挨拶

著者紹介

眞田一志（さなだかずし）
横浜国立大学大学院工学研究院
〒240-8501 横浜市保土ケ谷区常盤台79-5
E-mail : sanada-kazushi-sn@ynu.ac.jp

昭和61年3月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程制御工学専攻修了．昭和61年4月東京工業大学助手，平成10年横浜国立大学工学部生産工学科助教授，平成13年横浜国立大学大学院助教授，平成16年横浜国立大学大学院教授，現在に至る．

肥田一雄（ひだかずお）
川崎重工業株式会社　精密機械カンパニー
〒651-2239 神戸市西区櫨谷町松本234
E-mail : hida_k@khi.co.jp

川崎重工業株式会社常務取締役精密機械カンパニー プレジデント，（一社）日本フルードパワーシステム学会副会長，（一社）日本機械学会会員．

（一社）日本フルードパワーシステム学会の平成28年度総会が開催され，学会長に小山紀先生が選出されました．また，副会長として，肥田一雄が継続し，新たに眞田一志が任命されました．就任のご挨拶で，小山新会長は新しい運営方針を掲げられました．私ども，副会長として，小山新会長の運営方針に全面的に賛同し，新会長を補佐しつつ，学会の運営に尽力する所存です．副会長のご挨拶として，所信を述べさせていただきます．

当学会では，アジア各国や欧米諸国との国際交流事業が活発に行われるようになりました．第10回JFPS国際シンポジウム（2017年10月25日㈬～27日㈮）の開催準備が進められています．海外研究動向調査委員会では，海外の国際会議に参加した会員から，開催状況や研究発表動向を紹介していただき，会員相互で共有し，研究活動に活用することを目指しています．日中若手研究者交流事業では，中国のフルードパワー学会との間で若手研究者を交互に派遣しています．中国機械工程学会流体伝動及控制分会と共同で日中国際共同ワークショップが開催されています．築地前会長は，2015年に韓国釜山で開催された国際セッションに日本代表団を派遣され，日韓の国際交流をさらに進めることとなりました．また，最近ベトナムの国立研究所との間でMOUが締結され，今後国際交流事業が進められる予定です．インドフルードパワー学会の国際会議への参加など，交流が行われています．ドイツ，米国，イギリス，北欧で開催される国際会議には，継続的に会員が参加しており，当学会のプレゼンスを示しています．このように，アジア諸国だけでなく，欧米各国との国際交流はさらに活発に行われます．これらの国際交流活動が円滑に進められるよう，副会長としてサポートをして参ります．

産学連携を最重要の事業として位置づけ，一層のレベルアップが達成できるよう支援して参ります．特に，フルードパワー工業会と連携して，さまざまな事業が進められており，Win Winの関係を継続，強化して参ります．

学会の運営体制，基盤の強化については，引き続き，副会長として，尽力して参ります．会員として，また賛助会員として，当学会に参加してよかった，と思われるように，さまざまな努力をして参ります．任期中，事務局と会員，賛助会員との橋渡しとして，私ども副会長も，微力ながらお役に立ちたいと考えておりますので，ご理解，ご支援のほど，何卒よろしくお願い申し上げます．

（原稿受付：2016年6月17日）

巻頭言

フルードパワーを支える油圧作動油の劣化と対策

著者紹介

丸田和弘（まるた かずひろ）

㈱小松製作所
開発本部　油機開発センタ
〒323-8558 栃木県小山市横倉新田400
E-mail：kazuhiro_maruta@komatsu.co.jp

1987年３月埼玉大学大学院工学研究科修士課程修了．1987年４月小松製作所入社．油機開発センタ勤務，主に油圧ポンプ・モータの開発に従事した後，油圧システム・バルブの開発に従事，現在に至る．

油圧システムの動力を伝達するために欠かすことのできない油圧作動油の劣化について取り上げる．油圧作動油は密閉空間に閉じ込められ力を伝達する媒体である．油圧作動油は油圧システムが長時間，力強くかつ安定した性能を発揮するために非圧縮性・潤滑性能・劣化のしにくさ・ゴムや金属との適合性・流動性や消泡性などさまざまな機能が要求される．この油圧作動油が常に本来の理想状態を保つことが出来ていれば油圧システムの性能・耐久性は問題なく狙い通りの働きをしてくれる．しかし，なかなかそのような理想状態を保つことは困難である．

油圧ショベルをはじめとする建設機械のほとんどが油圧により動いているが，特に劣悪な環境下で稼動するケースの多い建設機械の油圧システムは作動油の劣化との戦いの繰り返しといっても過言ではない．油圧作動油の劣化といえば，固形ダスト，水，気泡，劣化生成物の混入・析出などがあげられる．いくつか不具合事例をあげると，固形ダストとして多いのが土砂（SiO_2）であり，油圧ショベルであれば油圧シリンダのシール部や作動油タンクのブリーザから混入するケースが少なくない．その場合，油圧ポンプ・モータのインターナル部品摺動部の摩耗やかじりの発生，バルブスプールのロック等を引き起こす．また，気泡については作動油の酸化や消泡剤の消耗による機能の低下により，タンク内の気泡が消泡せず，油圧ポンプの吸込み配管内のエアレーションの悪化により，ポンプの異音不具合や内部破損につながる．このような油圧作動油の劣化による不具合は建機ではかなり高い割合で発生している状況である．本特集では，油圧作動油の内部変化（劣化生成物）や固形ダスト・水・気泡等の「油圧作動油の敵」とも言うべき事象の解説と一般的な対処方法，および最近の技術動向について紹介いただいた．

はじめに，「作動油の劣化とその対策について」と題して，風間俊治氏に油圧作動油に要求される基本的な性質や状態を低下させる要因を挙げ，合わせてその対策を紹介いただき，本特集テーマを俯瞰的な視点で解説いただいた．

つぎに，田崎博之氏により「作動油の劣化と対応」として，主に作動油の内部・外部要因による劣化について紹介いただき潤滑管理の必要性について解説いただいた．

続いて，石塚信氏に「固形ダストによる油圧回路の不具合とその対処法」と福田寛人氏による「エレメントレス・フィルターによる油中コンタミ除去技術」と題して，固形ダストの対処法について紹介いただいた．主に石塚氏には固形ダストの油圧回路内への混入パターンを述べていただき，対処法として一般的なエレメントフィルタについて解説いただいた．また，福田氏には固形物の除去方法としてエレメントレス・フィルターの原理・構造について解説いただいた．

つぎに，森永由一郎氏に「水分による油の劣化とフィルトレーション」と題し，作動油中の水分の発生のメカニズムや水分が多く混入した場合の悪さの紹介，水分除去方法など解説いただいた．

さらに，坂間清子氏と田中豊氏による「油圧作動油と気泡」に於いては，作動油内への気泡混入原因や気泡が油圧作動油の特性に及ぼす影響，そして油中の気泡除去技術について解説いただいた．

最後に，山中克浩氏による「状態基準保全（CBM）を実現するオイル分析」と題して，油圧作動油の分析の目的や各分析方法について解説いただいた．

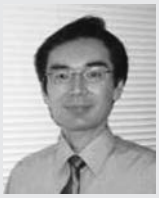
未筆ながら，ご多忙にもかかわらず，ご寄稿いただいた執筆者の皆様に厚く御礼申し上げる．本特集記事が作動油の劣化対策の一助となれば幸いである．

（原稿受付：2016年５月17日）

総論

作動油の劣化とその対策について

著者紹介



風間俊治（かざま としはる）
室蘭工業大学大学院
〒050-8585 北海道室蘭市水元町27－1
E-mail：kazama@mmm.muroran-it.ac.jp

1988年横浜国立大学大学院修了．2005年室蘭工業大学教授，現在に至る．主に，トライボロジー，キャビテーション，設計工学などの教育研究に従事．日本フルードパワーシステム学会，日本トライボロジー学会，日本機械学会等の会員．博士（工学）．

1. はじめに

フルードパワーシステムは，流体の圧力エネルギーを伝達する媒体として，油圧システムでは油（作動油）[1]が，空気圧システムでは気体（空気）が，水圧システムでは水（水道水）が，不可欠である．各システム内では，それぞれの流体が純一無雑の状態であることが理想であり，他相や相変化は受け入れ難く，また互いに相容れない．要するに，油圧システムを例にとれば，液体の変質のみならず，塵埃の混入，水分の溶解，気泡の発生などは，作動油[2]としての機能の低下を引き起こす．よって，これらの状況を阻止あるいは影響を低減させる必要がある．

本総論では，作動油に要求される基本的な性質や状態（性状）[3]を低下あるいは汚損させる主な現象や要因を概観する．合わせて，その対策を俯瞰する．なお，個々の事象[4]や具体的な対応，各種の規格や分析の方法などについては，本号の各論に譲る．

2. 作動油の劣化

2.1 油圧システムへの影響

図１は，油圧装置の故障原因のデータ[1]である．作動油の汚染や劣化が原因となる割合（図中の1a）は，全体の６割に達する．今日，基油にさまざまな添加剤を調合して製造される作動油[2]は，耐摩耗性やマルチグレード性，省エネルギー化や長寿命化などが図られている．しかしながら，油圧システム内の作動油は，高温や高せん断流れに曝されるとともに，空気や水および塵埃や摩耗粉が混じり込む環境を避けることができない．前者は機器やシステムの高動力密度化の流れを受けて促進され，後者は信頼性や安全性を追求する中で壁として立ちはだかる．ゆえに，作動油の適切な維持と継続的な管理[3]はきわめて重要な事柄となるのである．

2.2 劣化について

「劣化」とは，「品質が劣化すること（広辞苑）」，「材料の力学的，電磁気的，光学的，その他の種々の特性が低下する現象．劣化の原因は，熱，光，放射線，酸素，オゾン，化学薬品などが単独かあるいは複合されて，材料の化学構造に作用して構造変化を起こさせる．また繰り返し曲げ疲労のように機械的外力が原因のときもある……（トライボロジー辞典）」などと定義されている．

潤滑油の劣化[5]を論じる際に，しばしば参照される図１[6]では，工業用潤滑油の劣化に及ぼす諸因子が，基油の酸化・熱分解，添加剤の劣化，放射線，気相，液相，固相の６つの影響に分類され，関連現象がまとめられている．基本的には油の変質に着目しているとも見て取れる．本稿では，作動油の劣化を油圧システムのエネルギー伝達媒体としての機能低下の視座で捉える．

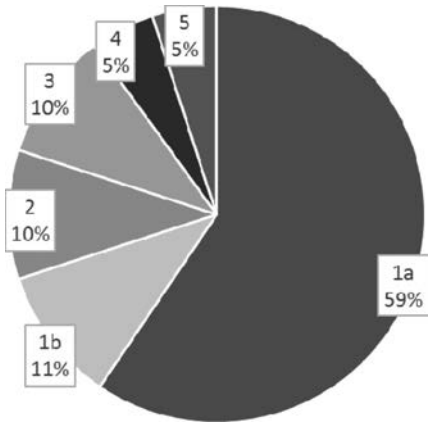


図１　油圧装置の故障原因（１：作動油の不適および管理の不備（a：作動油の汚染劣化，b：その他），２：機械的損傷，３：装置の機能に対する知識の不足，４：過負荷運転，５：その他）

作動油の劣化の要因は，互いに複雑に絡み合っていることから，単純には整理し難い．ひとつの試みとして，それらに係る代表的な原因（要因や因子）とそこで生じる結果（現象や影響）を物質の３相（３態）の視点で表１にまとめる．大掴みに，固相はコンタミネーション[7]が，液相は酸化が，気相はキャビテーション[8]が主として関与する．なお，ここに区別し難い，発熱やせん断流れ場は，酸化の重縮合やキャビテーションの発生を概ね促進させる方向に働く．

他方，劣化を外的要因と内的要因とにも大別できる．前者は物理的因子が多く，コンタミナントや発熱が，後者は化学的因子が多く，酸化や変質が深く関わるであろう．また，劣化を可逆性の面から捉えることができるかもしれない．端的に言えば，塵埃の混入については，これを除去することで劣化前の状態近くまで戻すことができることから，可逆的な劣化ともいえる．一方，酸化は不可逆的な劣化に位置付けられ，更油（作動油の交換）[1]を要する．

2.3　固相要因による劣化

油圧機器は精密機械であり，数マイクロメートルのすきまやサブミリメートルの絞りを随所に有する．すきまの代表値を表２に示す[9]．機器の性能を十分に発揮するためには，各部品の加工や組立の精度と合わせて，作動油の清浄性が求められることがわかる．ただし，機器の個体差や条件の変動幅が大きく，数値の参照は慎重であるべきことを付言する．

システム内の作動油には，運転の初期段階および定常期間に固相の異物が入り込み，これが機器やシステムの不具合を引き起こす．代表的な異物は，外部の土砂や塵埃，内部での摩耗粉[10]，塗料の剥片，バリやシールの破片などに基づく固体粒子やその集合体である．これらがしゅう動部にかみ込む，あるいは絞りを閉塞させる．すきまや孔の寸法に比してきわめて小さい粒子は，作動油と一緒に流れ去る．逆に，これらに比して極めて大きい粒子は，そのような部位に入り難い．すなわち，流路の大きさとほぼ同程度の寸法の粒子がかみ込みや詰まりを引き起こしやすく，大きな影響を及ぼす．なお，固体粒子の材質や強度および形状や寸法などはさまざまである．生成も多種多様である．たとえば，摩耗粉は，滑りや転がりあるいは衝撃や化学反応などにより，アブレシブ摩耗，凝着摩耗，疲労摩耗，腐食摩耗などの種々の形態[6]で生じる．

作動油の汚染度（清浄度コード）には，今日，JIS B9933（ISO 4406 Cleanliness Code）が用いられる．これは，気中パーティクルカウンタ（APC）による計測で，試料１㎖に含まれる，３区分の固体粒子径の各個数を Range code に照らし合わせて表記する規格である．例として，20/18/14 の意味を簡単に記すと，試料中に粒径 4，6，14㎛以上の固体粒子が，それぞれ，5,000個を超え10,000個以下，1,300個を超え2,500個以下，80個を超え 160個以下，含まれていることを意味する．

作動油の管理レベルの例を次に示す．サーボ弁を用いた装置では18/16/13（７級），ピストンポンプや比例電磁式制御弁などを用いた圧力21MPa以上の油圧装置では20/18/14（９級），中圧（14～21MPa）や低圧の油圧装置で，それぞれ，21/19/15（10級），21/20/16（11級）が望ましい[11]とされている．ここで，括弧書きは長年にわたって汚染の度合いとして用いられてきた，NAS等級（NAS1638）であり，５～15㎛，15～25㎛，25～50㎛，50～100㎛，100㎛以上ごとに規定された個数を00～12級で評価する規格であった．ただし，双方の定義は異なるので，厳密な対照表は作成できない．あくまでも目安である．なお，作動油中の汚染物質は，固体粒子よりも半固体状，つまり酸化生成物[12]やスラッジ[13]が支配的との見方もある．

2.4　液相要因による劣化

代表的な現象として酸化[14]を挙げることができ

表１　作動油の劣化に係る主な要因とその影響

相態	要因・因子	影響・現象
固相	塵埃，摩耗粉	かみ込み，焼付き，閉塞，…
液相	異種油，水	酸化，乳化，変色，異臭，粘度変化，スラッジ，…
気相	気泡，キャビテーション	応答性低下，油膜破断，壊食，ディーゼル効果，…

表２　代表的な油圧機器のすきま

機器と各部位	すきま［㎛］
ベーンポンプ	
ベーン・カムリング間	0.5～　1
ベーン・側板間	20　～　40
歯車ポンプ	
歯先・ケーシング間や側板間	2　～100
ピストンポンプ	
ピストン・ボア間	10　～　25
弁板・シリンダブロック間	0.5～　5
サーボ弁	
スプール・スリーブ間	1　～　20
ノズル・フラッパ間	1　～　20
方向制御弁	1　～　25

る．作動油や潤滑油などの炭化水素系混合物の酸化反応は複雑であるが，一般的にはラジカル連鎖反応で進行する．かいつまんで記せば，熱や光のエネルギーを受けてアルキルラジカルを生成し，これが空気中の酸素と反応してパーオキシラジカルや過酸化物（化学的に不安定），アルデヒド，ケトン，重縮合を繰り返してカルボン酸，エステルを主体とする高分子化合物を生成する（酸化劣化生成物）過程である．

一般に，酸化速度と温度との関係は，60 ～ 70℃程度までの範囲において10℃の上昇で２倍，高温下ではさらに加速される[15]．言い換えれば，作動油の寿命は10℃毎に半減することになる．さらに，空気，圧力，金属触媒（銅など）は酸化を高める．

酸化を抑える防止剤は作用機構の違いから，連鎖停止剤，過酸化物分解剤，金属不活性剤に分類される．具体的には，一例を挙げれば，ヒンダードフェノール系の連鎖停止剤DBPC（2,6-ジ-tert-ブチル-p-クレゾール）などがある[16]．ただし，酸化防止剤の効果は 150℃程度までとなるから，使用には注意を要する．

高温下における作動油や潤滑油の熱分解の起こり難さを表す指標は，熱安定性である[17]．当然のことながら，酸素環境下では酸化を伴うことになる．なお，有機化合物の分類で比較すれば，脂肪族化合物より芳香族化合物の方が安定である．

劣化進行に伴い，一般に全酸価（試料１g中の全酸性成分の中和に必要なKOH量）が増加する．また，同時に動粘度も増加する．なお，極性の低い炭化水素系基油の場合は全酸価の方が，極性の高いエステル系基油の場合は動粘度の方が，その増加傾向は強い[18]．

水分も作動油を劣化させる．水分の混入は潤滑不良を生じさせ，エマルジョン化を引き起こし，錆を誘発する．空気中の水分の凝縮やオイルクーラの冷却水の侵入などが原因となる．数値例として，冷凍機用潤滑油の場合，水分量が0.2vol％以上で影響が現れ，１vol％以上で寿命は約60％低下する[19]．

すきまや絞り部における流れも，作動油に作用する機械的外力として，劣化要因となる．つまりは，作動油が大きなせん断流れ場に曝されると，分子量の大きな添加剤が破壊されるためである．

寒冷地における使用では，油温の低下に対しても留意すべきである．作動油の変化や不具合としては，流体摩擦の増加，流動性の低下，ワックス分の析出，消泡性の低下，見掛けの吸込揚程の低下，キャビテーションの発生，さらには，結露による水分混入も問題となり得る[20]．対策として，ヒータによる加熱が基本となるが，熱劣化や火災防止のため，大よそ６kW/㎡ 以下[1] に抑えた方がよい．

2.5　気相要因による劣化

作動油には，おおよそ，８～ 10％程度の気泡が混入している[21] といわれている．気相の分圧と液相のモル分率との間には，比例関係（ヘンリーの法則）が成り立つ．ただし，気体の溶解速度は比較的遅い．具体的には，圧力0.7 ～ 2.1MPa下の鉱油では10秒で50％程度，あるいは直径50㎛の気泡で約180秒である．気液界面が汚れている場合は遅くなり，流動している場合は速くなる[8]．

作動油中の気泡は，体積弾性係数を低下させ，機器内部に壊食を生じさせ，しゅう動部における油膜破断の基となり，高圧力場における液中気泡の断熱圧縮によるカーボンの生成（ディーゼル効果）を促す．一般に，潤滑油に対しては，気泡の混入は劣化の主因に含めないようであるが，作動油に対しては，特に応答性の低下やキャビテーション壊食の損傷による影響が無視し得えず，主要な劣化要因となる．

3. 劣化作動油の対策

3.1　異物による作動油の機能劣化

異物に基因する作動油に対する方策としては，

ⅰ）異物を混入させないこと

ⅱ）異物を発生させないこと

ⅲ）異物を取り除くこと

に帰着することができよう．上記ⅰ）では固相が主対象となり，異物を混入させないこととしては十分な洗浄や環境の清浄化が求められる．ⅱ）では液相が主対象となり，異物を発生させないこととしては仕様範囲内での運転や定期的なメンテナンスが要となる．ⅲ）では固相と液相が主対象となり，異物の除去としてはフィルタの使用や作動油の交換[22] などが挙げられる．以下にこれらを順に述べる．加えて，劣化の判定法にも触れる．

3.2　異物の混入に対して

作動油への異物の混入は，洗浄や組立時，保管や輸送中，装置の露出部や修理分解時に生じることが多い．異物の種類には，塵埃，錆，鋳物砂，切粉，溶接スラグ，シール材，塗料片，油劣化物，摩耗粉，水分，異種液体，空気などが挙げられる[1]．

混入の時期は，システム稼動初期とシステム運転期が多い．初期の異物には，機器および補器や配管類の製造時の残留物，組み立て時の外界からの混入物がある．使用中の異物には，外部からの混入と内部における発生に分けられる．前者は，主に空気中からの塵埃や水分であり，その侵入経路にはタンクの給油口や外部と接するシール部などが挙げられる．

後者には，ポンプ，バルブ，モータ，シリンダなどの機器しゅう動部における摩耗粉の発生や絞り部のキャビテーション壊食に基づく離脱粉などがある．

油圧システムの運転とは直接的に関係しない時期の対策，言い換えると，作動油の管理にも気をつけるべきである．たとえば，ドラム缶を長期保管する際，屋外に保管した場合の雨水の防御は言うに及ばず，注入・換気口を地面と水平位置に横置きとし，温度変化による呼吸作用で空気中の湿気が容器内に浸入し凝縮水になることを防止[1]することが要となる．

3.3　異物の発生に対して

作動油中の異物は，運転中の発熱による油温上昇に伴う酸化劣化，添加剤の消耗や変質にも関わるスラッジやカーボンの生成などが挙げられる．したがって，酸化防止の視点では，油温の上昇を抑えることが肝心である．

単位時間当たりのシステム全体の発熱量は，各機器等の損失動力から見積ることができる[23]．また，温度上昇速度は，損失動力に比例し，作動油の密度と比熱，回路内の作動油総体積量に反比例する．他方，放熱量は，熱交換器に加えて，タンクを主とする機器壁面などにおける放熱面積と周囲との温度差に比例する．したがって，伝熱面積は発熱量との熱平衡条件で求まる[24]．近年のタンクの小型化や作動油の少量化などの要請の高まりは，システム全体の放熱量を減少させることに繋がるため，油温の上昇を加速させている．

3.4　異物の除去に対して

異物が発生あるいは混入した場合は，これを除去せねばならない．塵埃や摩耗粉等を運転中に除去する第一の方法はフィルタリングとなる．

フィルタの種類や使用法は数多あるが，ポンプのタンク内吸込み配管のサクションストレーナ，タンク内戻り管路端のリターンフィルタ，タンク上部のエアブリーザ，制御弁の手前などに置かれるラインフィルタ，主回路とは別に組まれるオフラインフィルタなどがある．ただし，ストレーナは，メッシュを細かくし過ぎると流動抵抗が増して吸込み性能が悪化し，キャビテーションが発生しやすくなる．オフラインフィルタは，通過流量が少なく効率が悪い．また，やや種類を異にするが，タンク内にマグネットを設置する方法もある．ただし，捕集できる対象は限られる．

フィルタの選定基準には，従来，公称ろ過粒度や絶対ろ過粒度（精度）が用いられてきたが，現在は，マルチパステスト法と呼ばれるフィルタエレメントのろ過性能試験（JIS B8356-8，ISO16889）に基づく β 値を用いる．

システムの定期的な点検において，酸化や変質の進行が判明した場合，更油が求められる．その際，特に異種油や添加剤に差異のある作動油間では，反応物が生成されてスラッジの析出が大きな問題となる．よって，フラッシングオイルの使用や共洗いの実施など，適切なフラッシングが不可欠である．

気泡については，一般に仕切り板などを設けて，タンク内で気泡自体の浮力を利用して分離あるいは除去する．一方で，積極的に旋回流[25]等を用いて除去する方法もあり，効果も確認されている．

3.5　劣化の判定について

劣化の判定は，サンプリングした作動油の性状分析となる．試験項目と対応する規格，および耐摩耗性作動油に対する基準の例[1]を表３に示す．その他，カールフィッシャー試験による水分定量分析，FTIR（フーリエ変換赤外分光分析）を用いた有機官能基の定性による性状分析，フェログラフィーによる摩耗粒子判定，高圧ピストンポンプ試験による潤滑性評価方法（JCMAS-P-044-2004）などがある．

他方，現場では目視による判定に頼らざるを得ない場合も少なくない．判定の目安[1]は表４となる．ひとつの例を記せば，作動油が変質した場合，色相（JIS K 2580/ ASTM D1500）の変化[26]が顕著である．なお，表中のクラックル試験とは，ホットプレート上へ滴下したときの水はねや小さな破裂音で確認する方法である．

表３　作動油の更油基準の例（* 変化量）

試験項目	JIS	更油基準例
比重（15/ 4 ℃）	Z 8804[27]	±0.05*
動粘度（40℃）㎟/s	K 2283[28]	±10％ *
全酸価 ㎎ /KOH/g	K 2501[29]	0.5 ～ 1.0*
水分 vol％	K 2275[30]	0.2以上
汚染度 ㎎ /100 ml	B 9934[31]	10以上

表４　作動油劣化の目視判断の目安

目視等による判断方法	状態
色相が黒褐色・刺激性の悪臭	劣化の進行
機器・配管内の発錆	防錆剤の消耗，水分
白濁：クラックル試験	水分の混入
白濁：静置により透明化	気泡の混入
タンク内の気泡増加	消泡剤の減少
フィルタ目詰まりの多発	汚染の増加

4. む　す　び

作動油[32]は，油圧システムの血液とも喩えられ

る．作動油[33]の機能劣化の視点で，適正な性状の維持管理（オイルマネージメント）の重要性をあらためて提議した．本稿ならびに本特集号が，機器やシステムあるいは作動油の設計や開発あるいはメンテナンスに携わる技術者の一助となれば幸いである．

参考文献

1）岡部平八郎，山口惇：作動油ハンドブック，潤滑通信社（1985）
2）Totten, G.E.（ed.）：Handbook of Hydraulic Fluid Technology, Marcel Dekker（2000）
3）桜井俊男：潤滑の物理化学，新版第2版，幸書房（1979）
4）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（2006）
5）柴田正明：潤滑油の劣化診断とトライボロジー，トライボロジスト，Vol. 39, No. 7, p. 559-565（1994）
6）日本トライボロジー学会（編）：トライボロジーハンドブック，養賢堂（2001）
7）黄泰栄，山口惇：固体粒子による微小絞りの閉そく（第1報，実験），油圧と空気圧，Vol. 22, No. 3, p. 348-353（1991）
8）山口惇：作動油のキャビテーション，潤滑，Vol. 22, No. 8, p. 477-482（1977）
9）日本フルードパワー工業会（編）：実用油圧ポケットブック（2008）
10）Nikas, G.K.：A State-of-the-art Review on the Effects of Particulate Contamination and Related Topics in Machine-element Contacts, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J：Journal of Engineering Tribology, Vol. 224, No. 5, p. 453-479（2010）
11）油研工業：総合カタログ（2014）
12）佐々木徹：油の酸化生成物に起因する油圧バルブの固着について，トライボロジスト，Vol. 40, No. 5, p. 386-890（1995）
13）佐藤理有：作動油中汚染物の実証的解析と設備診断への応用，トライボロジスト，Vol. 41, No. 5, p. 387-390（1996）
14）中村政宣：潤滑油の物理化学的性質・酸化と劣化，潤滑，Vol. 19, No. 5, p. 405-411（1974）
15）辻茂：油圧作動油の問題点，潤滑，Vol. 13, No. 7, p. 315-319（1968）
16）開米貴：潤滑油の酸化劣化に伴うDBPCの化学変化，石油学会誌，Vol. 21, No. 2, p. 89-93（1978）
17）岡田美津雄：潤滑油の劣化試験をする場合の留意点，トライボロジスト，Vol. 37, No. 9, p. 780-783（1992）
18）横山文彦，羽石正，益子正文：潤滑油の酸化劣化に伴う全酸価変化と動粘度変化の相関性，トライボロジスト，Vol. 46, No. 9, p. 733-736（2001）
19）石井正昭：各種潤滑剤の適用と管理―圧縮機油・冷凍機油，潤滑，Vol. 22, No. 7, p. 415-420（1977）
20）風間俊治：寒冷地における油空圧，油空圧技術，Vol. 50, No. 13, p. 1-3（2011）
21）畑一志：気体の溶解度と気体溶解時の物性(1)，トライボロジスト，Vol. 35, No.7, p. 471-474（1990）
22）服部清三：各種潤滑剤の適用と管理―油圧作動液―，潤滑，Vol. 22, No. 7, p. 421-426（1977）
23）山口惇，田中裕久：油空圧工学，コロナ社（1986）
24）風間俊治：油圧機器の発熱，油空圧技術，Vol. 52, No. 3, p. 19-22（2013）
25）坂間清子，鈴木隆司，田中豊：気泡除去装置の設計と評価に関する研究（第2報，スパイラル係数を用いた放気口径と流出口径の選定），日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 45, No. 5, p. 79-84（2014）
26）本田知己，岩井善郎：潤滑油の劣化と色，トライボロジスト，Vol. 53, No. 5, p. 319-325（2008）
27）JIS Z 8804，液体の密度及び比重の測定方法（2012）
28）JIS K 2283，原油及び石油製品―動粘度試験方法及び粘度指数算出方法（2000）
29）JIS K 2501，石油製品及び潤滑油―中和価試験方法（2003）
30）JIS K 2275，原油及び石油製品―水分試験方法（1996）
31）JIS B 9934，油圧―光遮蔽原理を用いた自動粒子計数法による清浄度測定方法（2012）
32）風間俊治：油圧機器のトライボロジー～理論編(2) 油圧機器と作動油，技術講座，フルードパワー，Vol. 28, No. 2, p. 40-43（2014）
33）風間俊治：入門講座「トライボロジー」第5回：油剤について，フルードパワーシステム学会誌，Vol. 46, No. 2, p. 87-89（2015）

（原稿受付：2016年3月24日）

解説

作動油の劣化と対応

著者紹介

田崎博之（たざきひろゆき）
昭和シェル石油株式会社
〒243-0303
E-mail : hiroyuki.tazaki@showa-shell.co.jp

1992年昭和シェル石油入社，機器分析部門で潤滑油の評価試験及び機器分析業務を経て，2010年潤滑油開発部署にて油圧作動油製品の研究開発に従事．

1. はじめに

油圧機器の技術進歩と同様に，近年の油圧作動油も技術革新が進み，基油や添加剤に関する最新の処方技術に基づき，高い性能が付与されている．油圧作動油は，動力伝達の媒体の役割のほかに，摩擦や摩耗を低減する潤滑剤としての働きや，金属部品の防錆，発熱箇所の冷却作用も有している．さらに，長寿命，使用温度域の拡大，省エネルギー性などにより，ユーザーの生産性向上に貢献している．

作動油は使用時間とともに，熱・酸化などのストレスや，金属摩耗粉，機械的なせん断などの影響を受け，添加剤消耗や基油が変質すること，および，塵埃，水分などの異物混入による汚染により，外観だけでなく，物理性状や性能が変化する．

このため，初期の性能を維持できず，トラブルを生じることがあるため，定期的に性状分析やオイル交換といった潤滑管理を行う必要がある．一方で，作動油の潤滑管理において多項目の性状測定を実施すると，経済的な負担が大くなるため，監視項目を最少限とすることが望まれる．

図1に潤滑油の劣化因子と形態をまとめた．

2. 作動油の劣化とトラブル

このように，添加剤消耗，基油の変質，汚染などによって作動油の物理性状や性能が変化することが劣化であり，劣化におよぼす諸因子としては，内部変化によるものと外的要因によるものに大別される．

添加剤消耗や基油の変質によるものが内部変化として挙げられ，塵埃や水分といった環境中の異物混入による作動油の汚損が外部要因であるといえる．

2.1　内部要因による劣化（励起エネルギー）

光や熱などのエネルギーを受けると，潤滑油に含まれる炭化水素化合物の化学結合が破壊され，ラジカルと呼ばれる化合物が生成する．このラジカルは反応性が高く，連鎖反応を促進する働きがあり，フ

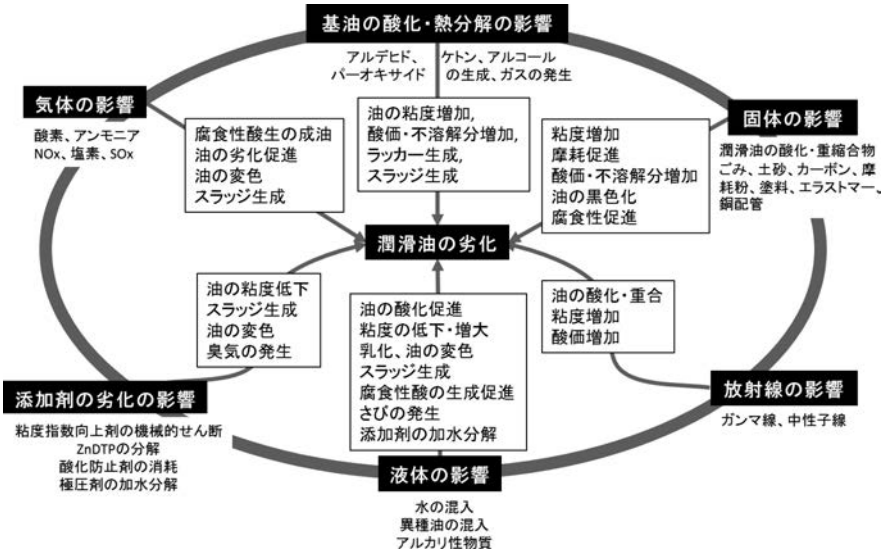


図1　潤滑油の劣化変質におよぼす諸因子と劣化過程での形態[1)]

リーラジカル連鎖機構と呼ばれる[2]．酸化により酸性成分が生成され，酸価が上昇する．

酸化は潤滑油の代表的な劣化形態のひとつで，油圧機器内のしゅう動部を局所的にみると，摩擦のため高温になり，接触圧力も高く，触媒になりうる金属も存在することから，油圧作動油にとって過酷な環境である．また,水の存在によっても酸化反応は促進される．

酸化を抑制するため，作動油には酸化防止剤が添加されており，酸化の起因となるラジカルを補足することで，基油や添加剤が酸化から守られている[2]．酸化防止剤が消耗してしまうと連鎖反応の抑制ができずに，さらに酸化が進むと性状変化が顕著となり，作動油の色が暗褐色に変化し，特有の臭気が発生する．ユーザーが最初に感じる変化である．

長期にわたり作動油が酸化を受けると，酸性成分が増加して,金属部品の銅や鉛などがオイルに溶出し，異常摩耗の原因となる．また，基油などの有機成分が重合し，スラッジやバーニッシュ[3]と呼ばれる粘ちょう性の有機物が生成し，異常摩耗やバルブの動作不良，潤滑流路の閉塞を引き起こす．

劣化反応は温度が高いほど進行速度が速くなり，約10℃上昇すると反応速度が２倍になるアレイニウスの法則が知られている．したがって，オイルクーラーによる冷却や，省エネ作動油の使用による油温上昇の抑制は，劣化を遅らせる有効な手段である．

一方，偏摩耗による焼付きや，油圧路内に混入した気泡によるキャビテーションによって，局所的に高温になり，添加剤や基油が分解されることがある．この場合，外観の変化は小さくても，添加剤の消耗が激しく，摩耗が増加したり，異臭がするなどの変化を生じる．

この他に，せん断による劣化がある．せん断力はせん断の大きさを示すもので，油膜など油が介在する２つの面がズレることで油が受ける変形量であり，狭いクリアランスを高速で動く部分では大きなせん断力が発生する．粘度温度特性を向上させた油圧作動油においては，高分子の粘度指数向上剤が配合されており，せん断力が大きいと，高分子成分の粘度指数向上剤が分子レベルで引き伸ばされることで破壊されて，粘度低下する．このため，漏れ，摩耗増加，焼付きなどを生じるリスクが高まる．

熱劣化や酸化劣化においては，油に不溶のスラッジが生成するため，次節で説明するコンタミ粒子の一つとなる．

潤滑管理の監視項目については後述に詳しく記すが，作動油の酸価，粘度，きょう雑物量の変動を監視することで潤滑油の状態把握をすることができる．

2.2　外部要因による劣化（コンタミ）

コンタミ粒子といった異物には，劣化により生成する油に不溶なスラッジ，金属摩耗粉，外部から混入する粉じん，塵埃といった粒子が挙げられる．いずれも作動油の酸化を促進するため，放置すると潤滑性の悪化，摩耗破損の要因となる．また，油圧装置のトラブル発生原因の８割が，異物や，異物に起因するものだと推察されるという報告もある[4]．

油圧路に異物が入り込むと，フィルタ閉塞により差圧が高まり，ポンプやバルブの異常摩耗や作動不良の原因にもなる．また，異物が増加すると，作動油の透明感が無くなり暗色化する．作動油の色相変化やフィルタ差圧などから異常を感じることが出来るが，きょう雑物量の監視には，溶剤に不溶なきょう雑物量を重量で計測する測定方法がある．

水や他潤滑油の混入によってもさまざまなトラブルが生じる．水の進入経路は雨水やオイルクーラーの破損による混入と思われがちだが，寒暖差による結露や空気中の水分からの吸収などもある．トラブル内容としては錆の発生や油膜切れによる摩耗，油圧装置の場合はキャビテーションによる摩耗や異音などがあり，貯蔵タンクにおいては，水の混入量が多いと水と油の界面層にカビが発生することもある．水が混入すると透明感が無くなり，サンプリング容器を静置すると底部に分離した透明な粒として確認されることがある．

誤給油などで他の潤滑油が混入した場合は，添加剤同士が反応してスラッジを生成したり，適正粘度から外れ，潤滑不良やエネルギー効率の低下を引き起こすことがある．他潤滑油の混入の有無を確認するためには，一般的な性状測定のほかに，赤外吸収や元素分析など機器分析が必要となる．

気体の混入では，キャビテーションや発泡により，潤滑不良による摩耗・焼き付きや，異音・振動の発生，劣化の促進などが引き起こされる．

外部からのコンタミ混入予防としては，オイル漏れなどシール部の異常を放置しないことと，給油や異常と感じた際の状況など，日頃のメンテナンス記録があることで，トラブルの原因究明に有用な情報となる．

表１に作動油の劣化要因とトラブル内容についてまとめた．

3. 潤滑管理

作動油の管理に必要な項目としては，酸価，粘度，きょう雑物量，水分が最低限必要であり，目的に応じて元素分析やその他の分析項目を組合わせる．また，試料採取時の外観やオペレーターが感じる違和

表1　作動油の劣化要因とトラブル内容

要因		トラブル内容
励起エネルギーによる劣化	酸化・熱	暗色化，不透明化 異臭 粘度上昇 スラッジ生成 フィルタ詰まり 作動不良 摩耗の増加
	光・放射線	暗色化，不透明化 スラッジ生成
	せん断	粘度低下 漏れ 異常摩耗 焼付き
コンタミによる劣化	固体・きょう雑物	暗色化，不透明化 摩耗の増加 異音，焼付き 作動不良 フィルタ詰まり
	液体；水・誤給油	濁り，分離，乳化 錆びの発生 カビの発生 摩耗の増加 作動不良 キャビテーションによる異音
	気体；空気	キャビテーションによる異音 泡立ち スラッジ生成 腐食の発生

感などもトラブルの原因究明では有用な情報であり，そうした知見により原因究明に至る過程で，不必要な作業を省くことが出来る．表2には作動油の管理に重要な項目と目安値[5]をまとめた．また，表2には測定時に必要な試料量についても併記した[6]．

3.1　酸価の測定（JIS K2501）

酸価は，潤滑油中に含まれる酸性物質を滴定によって定量することで，酸化劣化の進行度合いを把握する試験である．ただし，油圧作動油に配合される添加剤にも酸性を示すものがあり，酸価の値すべてが劣化によって生成するものではないので，注意が必要である．亜鉛系作動油の場合は新油でも0.4～0.8mgKOH/g程度の酸価を示す．

鉱物系作動油の酸価の管理基準は，上限1.0mgKOH/gが目安であり，この値を超えるようならば，オイル交換を検討すべきである．

3.2　きょう雑物量の測定（JIS B9931）

油中のきょう雑物量を測定することで，スラッジ発生量，摩耗量，外部からの異物混入が把握できる．きょう雑物量の測定方法には光学的に粒子の数を計測する計数法と，ろ過により不溶成分の重量を測定する重量法がある．計数法は厳密にコンタミ管理する装置に向いているが，変色した使用油には不向きであるため，通常の潤滑管理では重量法での管理を薦める．

作動油の管理目安としては15mg/100ml以下，サーボ機構を有する油圧装置にはより厳密に管理する必要があるため，5mg/100ml以下に維持し，この管理目安値を超えるようであれば，オイル交換を検討すべきである．この数値が急増するのであれば，酸化劣化の進行，異常摩耗，シール破損が疑われ，重量法測定で使用したフィルタの補足物を蛍光X線分析（XRF）などで詳細分析することで，汚染原因の究明に役立つ情報が得られる．

3.3　粘度の測定（JIS K2283）

粘度測定法は，石油製品により種々の測定方法があるが，一般的に油圧作動油の管理には40℃の動粘度を用いる．粘度を測定することで適正粘度に維持できているか判断でき，酸化劣化による重合生成物やコンタミ物質量の増加があると粘度が上昇する．また，シビア条件の運転で大きなせん断力が加わった場合や他油種の誤給油などがあると粘度低下する．

作動油の管理目安としては，新油からの粘度変化は10%以内が好ましい．

3.4　水分の測定（JIS K2275）

作動油には，通常使われる状態でも数十ppm程度

表2　潤滑油の管理に重要な項目と目安値

	JIS K2283	JIS K2501	JIS K2275	JIS B9931	ASTM D5185
	動粘度KV40 （㎟/s）	酸価 （mgKOH/g）	水分 （質量ppm）	きょう雑物量 重量法（mg/100ml）	油中元素 （質量ppm）
鉱油系作動油	±10%以内	1以下	1,000以下	15以下 （サーボは5以下）	Fe/Cu/Pb/Al 20以下
脂肪酸エステル系作動油		5以下	2,000以下		
リン酸エステル系作動油		2以下	1,500以下		
含水系作動油		メーカー指定値	メーカー指定値		
必要試料量	50ml	10ml	10ml	100ml	5ml

の水分が存在している．鉱油系油圧作動油の管理の目安としては1,000ppm以下に維持し，これ以上の混入は，水が分離しタンク底部にたまり，劣化の促進や発錆の要因になるので，低レベルに維持，監視が必要である．水分量測定には，水分と定量的に反応するカールフィッシャー試薬を用いた試験法が一般的である．

鉱油系油圧作動油は水分の混入があると濁りを生じ，目視でも異常を感知できる．しかし，難燃性作動油の脂肪酸エステル系やリン酸エステル系などの場合では，用いられる合成基油の性質により一般的な作動油に比べて吸湿しやすく相溶性があるため，水分が混入しても濁りを生じないことがある．

これらの難燃性作動油においては水分混入量が多いと加水分解を生じたり，適正粘度から外れてしまうため，難燃性作動油においても水分量の適正管理の必要がある．

4. おわりに

潤滑管理においては，必要最小限の監視項目の経時変化を把握し，メンテナンスを計画的に実施することにより，合理的なオペレーションコストで機械損傷を未然に防ぐことができる．また，オペレーターの感じた違和感なども重要な情報源であり，作動油の性状測定結果とあわせてメンテナンスの履歴情報を管理することも，作業手順として標準化し，運用する事が重要である．

近年の油圧装置は，装置の高圧化，小型軽量化，油圧システムの精密化などの技術革新が進んでいる．一方で，作動油も耐摩耗性が向上し，長寿命化が図られている．加えて，高引火点で省エネルギー性を有する高性能な油圧作動油が普及し，これらの技術により，オイル交換サイクルの延長，メンテナンスコストの削減が可能となっている．

油圧装置の生産性を向上させるには，適切な油圧作動油の選定と標準化された潤滑管理が有効な手段である．

参考文献

1）：潤滑油の劣化変質におよぼす諸因子と劣化過程での形態，日本トライボロジー学会編，トライボロジーハンドブック，養賢堂，p. 819-821
2）大勝靖一，岡部平八郎：フェノール系酸化防止剤，石油製品添加剤の開発と最新技術，シーエムシー，p. 12-26
3）水村彰志：バーニッシュの発生原因と除去対策，フルードパワー，27(4)，4-7，2013-10
4）安木秀己，油空圧技術，48(12)，7（2009）
5）永仮光洋，トライボロジー設計マニュアル，テクノシステム，p. 655-664
6）株式会社エス・ブイ・シー東京，分析・エンジン試験標準料金表（2016/ 4 / 6 ）

（原稿受付：2016年 5 月17日）

解説

固形ダストによる油圧回路の不具合とその対処法

著者紹介

石塚　信（いしづか　まこと）
ヤマシンフィルタ株式会社
〒235-0033 横浜市磯子区杉田５－32－84
E-mail : makoto_ishizuka@yamashin-filter.co.jp

1988年横浜国立大学工学部機械工学課卒，同年トキコ株式会社（現日立製作所）入社，1990年デュポンジャパン入社，1996年山信工業（現ヤマシンフィルタ）入社,現在に至る．

1. はじめに

油圧回路の故障の原因の７割が油中の異物が原因と言われており，「固形ダスト」「気泡」「水分」「油劣化生成物」の４種類に大別できる．ここではその内固形ダストの発生源，油圧回路に及ぼす影響とその対策，その周辺知識について専門的知識がなくても理解できるよう極力わかりやすい言葉・文章で説明していきたい．

2. 油圧とは

工事現場などで動いている建設機械，航空機の舵面や水門の開閉など，大きな力を必要とする装置の多くに油圧回路が採用されている．

内燃機関や電動機など動力源はいくつかあるが，油圧回路が上記設備に使われるのはそれなりの理由がある．ひとつが油圧回路は動力伝達が容易であること．たとえば油圧ショベルの場合，ブーム→アーム→バケット，と構造体が連結されている．内燃機関で動力をバケットまで伝達させるのは機構が非常に複雑になる．油圧なら油圧ホースを接続するだけで簡単に動力を伝達できる．

もうひとつが，これがもっとも大きな理由であるが，油圧回路は容易に大きな力を発生させることができることだろう．油圧回路の仕組みは簡単に言うと，２つの大きさの異なる注射器をゴムホースで繋ぎ，注射器の中に液体（油）を入れ，一つの注射器を押すと他方の注射器が動く，というものである（実際は間に流れを制御するコントロールバルブが入る）（図１）．パスカルの定理に従えば，小さな注射器内の圧力と，大きな注射器内の圧力は等しくなるので，ガスケットの受圧面積の比率分，大きな注射器は大きな力を出すことができるわけである．実際の油圧回路では，小さな注射器はポンプ，大きな注射器はアクチュエータ（シリンダ）に相当する．

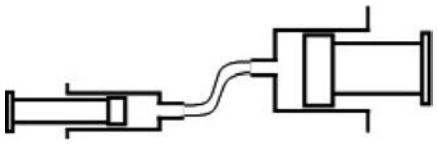


図１　注射器による油圧回路のモデル

3. 油圧回路内の固形ダスト

動力を伝達させる作動油であるが，さまざまな場所からさまざまな固形ダストが混入してくる．

まず，油圧機器に付着していた固形ダストが油圧回路内に流出することがある．写真１，２は建機油圧回路用リターンフィルタに捕捉された固形ダストの顕微鏡写真である．写真１の黒色のダストは砂型鋳造で使われた鋳砂が油圧機器に付着していて，それが作動油中に流れ出たものである．また写真２の中心にある球体は作動油タンク製作の際に発生した溶接スパッタであろう．

つぎに油圧回路の組立工程で混入する固形ダストが考えられる．一部の特殊なケースを除けば油圧回路はクリーンルームで製造されるわけではない[1)]．製造環境中のダストが回路油中に入り込む危険も考えられる．また配管をねじ込む際に用いるシールテープが剥がれ出る可能性もある．

ここまでが油圧回路の製造工程内で混入する固形ダストであるが，回路稼動中も固形ダストは混入してくる．特に建設機械は粉塵の舞い上がる場所で使用されることが多い．作動油タンクには給油するためのポートがタンク上面にあり，そこから固形ダストが侵入する危険がある．また油圧シリンダはロット部が大気にむき出しになっている．ロットを引く際に，ロット表面に付着したダストが引きずり込ま

れ，作動油中に混入する恐れがある（ダストワイパーでダストの侵入を防いでいるが長時間使用等で劣化することもある）．写真２の茶色のダストは砂であり，大気中の粉塵や地面の泥などが作動油回路に混入したものと思われる．

油圧機器は金属構造物（ケーシング）の孔に金属スプールが往復運動（摺動）する，という構造になっているものが多い．金属と金属が接しながら動いているのでどちらか（あるいは両方）の金属が削れることがある．写真１中の金属光沢のダストは油圧機器の摺動部から発生した金属片であろう．

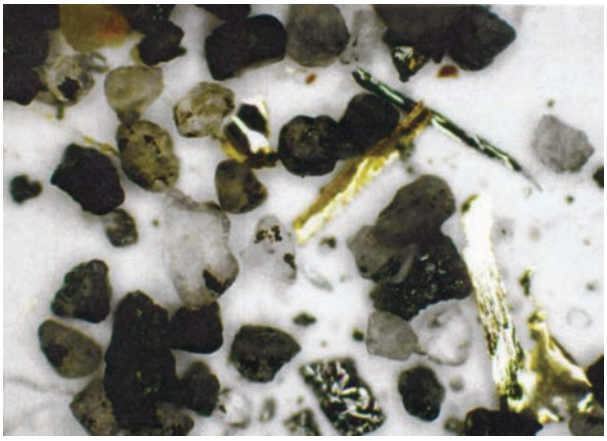


写真１　油中固形異物１

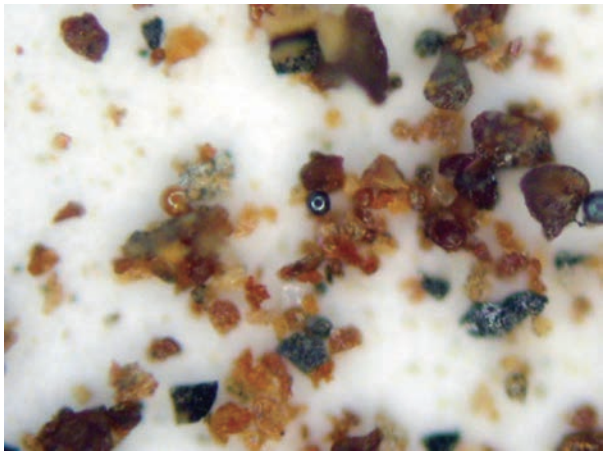


写真２　油中固形異物２

4. 油圧機器のクリアランスと固形ダスト

先ほど油圧機器はケーシング孔をスプールが往復運動している，と書いたが孔とスプールには適切なクリアランスが設けられている．この適切なクリアランスは油圧機器の種類により異なるが，およそ１㎛から50㎛くらいの範囲にある．これらのクリアランスより小さい固形ダストは抜けてしまうため大きな問題は発生し難い．またクリアランスより大きい固形ダストは内部に侵入することができないので問題はそれほどない．固形ダストが油圧機器に問題を発生させるのは，油圧機器のクリアランスと同程度のサイズ（１㎛から50㎛）の固形ダストである[2]．写真３は油用高圧ケースの耐久試験機に使われていた増圧器のピストンであるがシリンダ内面との隙間に固形ダストが噛み込み動かなくなった時のものである．

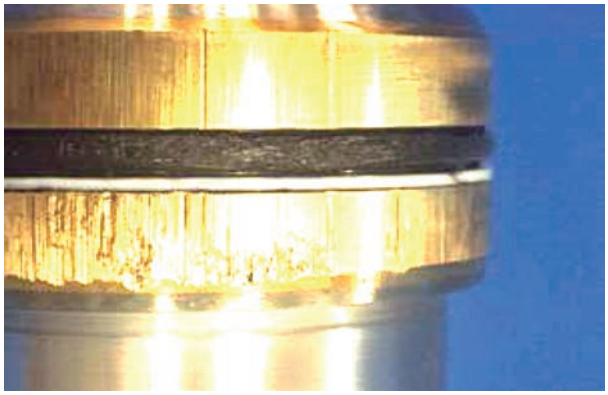


写真３　固形ダストによるピストン破損

5. 油中固形ダストの除去方法

上述したように，油圧回路の作動油中にはさまざまな固形ダストが混入しており，それらが油圧回路の故障を誘発させる．そのため油圧回路を故障から守るためには油中固形ダストを除去することが重要になる．液中固形ダストの除去（ろ過）の方法は多種あるが，油圧回路の固形ダストの除去には，ダストの大きさ，流体（作動油）の流量，動粘度，などを考慮すると，ろ材によるろ過がもっとも適切である．

ろ材にも多種あるが，もっとも身近なものといえば調理用品でも使われている金網（メッシュ）であろう．金網にも，編み方によりいくつかの種類があるが，代表的なものに平織り金網がある．縦と横の針金を交互に編んであり，縦横の針金で構成された四角い枠（目開き）より大きい固形ダストは除去され，液体（油）はこの枠内を通過する．この枠の大きさが金網の精度になり，１インチ当たりの針金の数で表現され，「メッシュ番号」と呼ばれる．メッシュ番号が大きい方がより精度が良い金網となる．比較的安価に入手できる平織り金網のメッシュ番号は#20から#200くらいであり，目開きはおよそ80㎛から800㎛である．これでは油圧機器のクリアランス（１㎛から50㎛）をカバーしない．金網では油圧回路を固形ダストから守れないのである．金網は作動油回路のメインろ材には使用されることはなく，通油抵抗が小さいという特性を生かし，キャビ

テーションが発生しやすい吸込み系のフィルタに使用される．

6. 不　織　布

金網のように繊維を機械的に織り込むことによって作るろ材では精度に限界がある．そこで径の小さい繊維を積層させることによって作る不織布によるろ過が精度を上げるために有効になる．数ある繊維の内，安価に入手できる繊維に木材から作られるセルロース繊維がある．繊維径が８μmから40μmほどであり，それによって構成される繊維間の目開きも繊維径と近似する（写真４）．これは油圧機器のクリアランス範囲に近い．また，繊維が積層されているため，ろ材厚さ方向にも空隙があり，厚さ方向でも固形ダストを捕獲できる（写真５）．そのためセルロース繊維ろ材（ろ紙）は長い間油圧回路のメインフィルタろ材として使われてきた．

また，ろ紙は水中で繊維を分散・沈殿させて作製するため，下部に細かい繊維，上部に太い繊維が集まる傾向がある．そのため上部の空隙は大きくなり粒径の大きな固形ダストを捕獲し，下部の空隙は小さくなり粒径の小さい固形ダストを捕獲する．これを「孔径勾配」といい，ろ材深さ方向を有効にダスト除去することができる構造となる．そのため，ろ材の裏表がろ過する上で非常に重要となる．

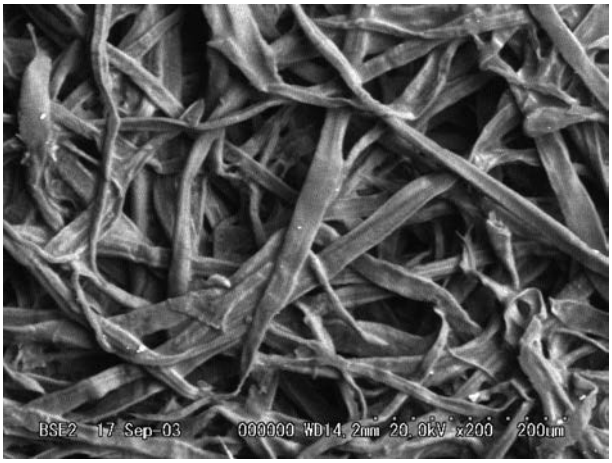


写真４　ろ紙表面電子顕微鏡写真

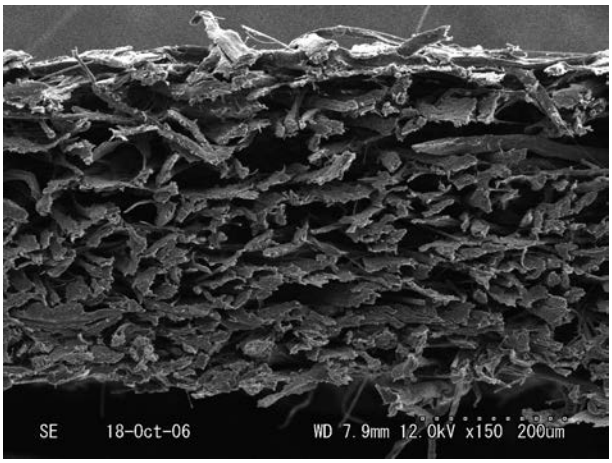


写真５　ろ紙断面電子顕微鏡写真

7. ガラス繊維ろ材

身近にあるガラスは非常に細い繊維に加工できる．繊維状になったガラスに硬さはなく，柔軟性に富む．繊維径は0.1μmから10μmであり，セルロース繊維ろ材と比較するとより高精度なろ材を作ることができる．またセルロース繊維ろ材の様に，繊維径が大きいと，ろ材表面を繊維によって覆い隠してしまい，繊維間で構成する孔の数が少なくなってしまうが，繊維径が小さければ繊維がろ材表面を覆う面積が少なく，より多く繊維間で構成する孔数が多くなり，より細かな固形ダストを多く捕獲することが可能となる．一般的にろ材の繊維径が小さければ小さい程，精度は良くなり，捕獲ダスト量が多くできる．現在ではフィルタエレメントに使用するろ材はセルロース繊維ろ材からガラス繊維ろ材に代わりつつある．

8. フィルタエレメント

上記ろ材を使用して油圧回路中の固形ダストを除去するのだが，ろ材は単なる板（紙）状のものなので、このままでは機能しない．フィルタエレメントとして作り込み，油圧回路内に組み込む必要がある．一般的なフィルタエレメントは，ろ過させる面積を大きくするためにろ材をひだ織（プリーツ）加工する．また油圧回路で使われる作動油は比較的動粘度が高く，流量も大きいため，ろ材の通過抵抗が大きくなり，ろ材だけではその形状を維持することが出来ない．そのため孔の開いた筒状のものをプリーツろ材の内側に入れ（外内流れの場合）形状を維持させている（写真６）．

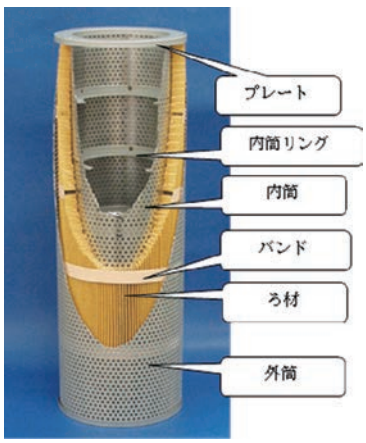


写真６　一般的な油用フィルタエレメントの構造

9. フラッシング

上述した「油圧回路の製造工程内で混入するダスト」は工場出荷前に機械油圧回路内の作動油をろ過させることによってある程度解決できる．これは「フラッシング」と呼ばれる工程で，大型の高精度フィルタを組み込んだ別置きの油圧ユニットに対象機械の作動油を油圧ホースで吸い込ませ，ろ過したクリーンな作動油を対象機械に戻す，というものである．フラッシング中は対象機械を動かしながら，回路内の作動油を循環させている．これは，別にろ過用回路を用いることから「オフラインろ過」「バイパスろ過」「キドニーループ」「パーシャルフロー」とも呼ばれるフィルトレーションの手段のひとつである．

オフラインろ過によるフラッシングとは別に，対象機械の油圧回路中に比較的高精度なフラッシング用フィルタを組み込み，機械を稼動させることにより作動油を循環させ，ろ過するという手段もある．フラッシングに使用されたフィルタエレメントは破棄され，通常のフィルタと交換し工場出荷される．これはオフラインろ過のように，作動油の一部をろ過するのではなく，対象機械の回路の流れのすべてをろ過することから「フルフローろ過」と呼ばれる．

10. さまざまなフィルタ

油圧回路の製造工程内で混入する固形ダストはフラッシングによって対応することを上述したが，稼動中の固形ダストの混入に対しては対応できない．稼動中に混入する固形ダストを除去するために油圧回路中の各場所にフィルタを設置する．

作動油タンクの給油孔から外気中のダストの混入を防ぐため，ここにエアブリーザを設置する．精度10㎛程のフィルタが入っているユニットを給油孔部にセットし，ユニットを外すことにより給油ができる構造になっている．エアブリーザ内のフィルタは除去するダストが空気中のダストであり，精度の表記は油用フィルタとは異なる．

ポンプ手前，作動油タンク内にはサクションストレーナを設置する．その直後にある高価なポンプを固形ダストから保護するためのものだが，精度の良いフィルタは設置できない．ポンプ手前は負圧になるため，精度が良いフィルタを設置すると負圧が大きくなり油中に溶け込んでいる空気が気化し気泡となるキャビテーションが発生する．発生した気泡がポンプにより圧縮されると非常に高い圧力が発生し，ポンプ壁面を損傷させる．そのため，ここには通過抵抗の小さい#80から#150メッシュ（目開き100㎛から200㎛）の金網を使用したフィルタを用いる．

ポンプの後，コントロールバルブ手前にはインラインフィルタが取り付けられる．現在ではコントロールバルブやアクチュエータの保護のために設置されるが，以前は回路全体の汚染度管理用として使用されていた．しかしシステムの高圧化によりフィルタケースの小型化が要求されるようになり，その役目を後述するリターンフィルタに渡すことになる．またインラインフィルタを設置しない油圧回路もあり，オプション設定されているものもある．

油圧回路最終部にはリターンフィルタが設置されている．リターンフィルタは油圧回路全体の汚染度管理をしており，回路要求汚染度によりろ材が選定される．ポンプから吐出された作動油の大半がリターンフィルタに戻るため，フルフローろ過となる．また，ろ過効率を最適にするため，作動油がろ材を通過する速度（流速）が低く抑えられている．そのため，ろ過面積が大きく，形状の大きいフィルタとなる．また，特にアクチュエータに油圧シリンダを使用している油圧ショベルはアクチュエータの動きによって戻り流量が変動する．そのためリターンフィルタのろ材プリーツもそれに従い変形を繰り返し，長時間使用すると破損する．一般的にフィルタを交換するタイミングは固形ダストによる目詰まりと考えられているが，目詰まりが発生していなくても機械を動かせばろ材プリーツには繰り返し変形による疲労が残る．そのため目詰まりによる交換以外に，使用時間による交換が必要になる．

11. 終わりに

煙草用フィルタ，コーヒーフィルタなど生活していく上でフィルタは身近にある．しかしながら一般の人が油圧用フィルタを身近に接することはないだろう．そのため油用フィルタの抱える環境・状況などフィルタとは直接関係のないところから説明した．

この論文を通し，油用フィルタに興味を持っていただければ幸いである．

参考文献

1）竹内哲郎：油圧作動油の汚染度管理，潤滑通信No. 158
2）根元康博：フィルタの選定方法とフィルタの上手な使い方潤滑経済No. 345

（原稿受付：2016年 3 月31日）

解説

エレメントレス・フィルターによる油中コンタミ除去技術

著者紹介

福田寛人（ふくだひろと）
株式会社industria
〒358-0014 埼玉県入間市宮寺2700
E-mail : fukuda@industria.co.jp

2008年工学院大学大学院工学研究科博士後期課程修了．大学助手，高等専門学校客員研究員を経て，2010年株式会社industriaに入社，現在に至る．水処理関連の技術開発等に従事．日本化学会の会員．博士（工学）．

1. はじめに

近年，油圧システムは目まぐるしい進化を遂げており，産業界において無くてはならない重要な役割を担っている．油圧システムの進歩と並行して，そのシステムで使用される作動油についても省エネルギー化等を目的とした新液が種々開発されている．その具体的動向については，日本フルードパワーシステム学会セミナー IFPEX2014にて，出光興産㈱の藤浪氏より，「油圧作動油の最新動向」と題して，講演が行われた．

作動油を使用する上で、その維持管理も重要となる．作動油の天敵として，空気，水，固形物などのコンタミが挙げられ，特に固形物の混入による油圧システムのトラブルは多く，固形物の除去に使用されるフィルターは油圧システムを運用する上で重要な役割を担う．本稿では，コンタミを固形物に絞り，エレメントレス・フィルターおよび，それを利用した油中のコンタミ除去技術について解説する．

2. 油中のコンタミ原因

2.1　作動油について

主に油圧で使用される作動油の条件として下記のような内容が挙げられる[1)]．

①非圧縮性流体であること
②使用環境下で適正な流動性があること
③潤滑性に優れ，粘度指数が高いこと
④劣化しにくく，難燃性であること
⑤金属・樹脂・ゴム等を腐食しないこと

これらの条件を満たすものが作動油として使用されているが，それらは下記のように分類することができる（図1）．

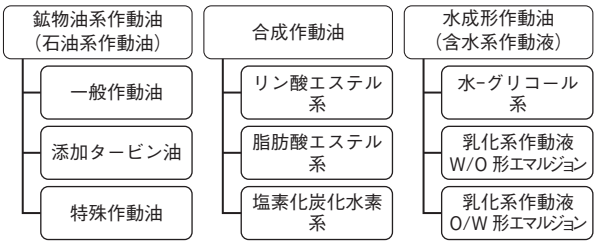


図1　作動油の分類

これら各種作動油は，航空機等に使用される高度な油圧システムから始まり，油圧プレス，鍛圧プレス機等の工場レベルの工作機械油圧システムまで，種々の使用条件・環境にあったものが選定され，使用されている．次章で述べるコンタミ除去技術に対し，これら各作動油の動粘度が重要な因子となってくることを補足しておく．油種と使用環境にもよるが，一般的な作動油の動粘度は20 ～ 50㎟/s程度のものが多い．

2.2　コンタミ原因とその管理

先述した通り，作動油中のコンタミ除去は作動油を管理する，または油圧システムのトラブル回避の上で重要な役割を担う．作動油中のコンタミは大きく二つに分類できる．作動油を使用している油圧機器・装置の内部摩耗や劣化により機器内部で発生するものと，機器外部より侵入するコンタミである．この外部より侵入するコンタミについては，油圧機器の使用外部環境の整備，または油圧システムの設計で改善可能である．すなわち，コンタミが侵入しない条件を整えれば対策可能である．一方で，機器またはシステム内部より発生するコンタミについては，フィルターを利用して系外に排出する必要がある．内部で発生する具体的なコンタミは機器動作による金属摩耗粉，パッキン・シール材の摩耗屑，一部塗装の剥離カス等が挙げられる[2)]．

これらのコンタミを除去することは，油圧機器をトラブルなく使用する上で重要となるが，実際に使

用している油中のコンタミ量を把握する，すなわち作動油の清浄度をセンシングし，管理することも同時に重要となる．国内で作動油の清浄度を数値的に評価する際は，NAS1638にて定められる等級によるものが一般的だが，ISO4406による清浄度コードにて管理する手法に移行しつつある．測定機としては，一般的にパーティクルカウンターと呼ばれる光散乱の原理を利用したものが用いられる．このような測定機にて作動油の清浄度を管理することは，油圧機器のトラブルを未然に防ぐ上で重要視される．現状は作動油を定期的にサンプリングし，清浄度を測定・管理するケースが大半だが，近い将来，各油圧機器内の作動油の清浄度をリアルタイムに監視できるシステムの開発が期待されている[2)]．

3. 油中コンタミ除去とフィルター

3.1　作動油で使用されるフィルター

作動油中のコンタミを除去する際に使用されるフィルターは，ラインフィルターなどと呼ばれる一般的なエレメント式のフィルターが主流である．エレメントの材質はステンレス製が多く，糸巻式，ペーパー式のエレメントは経年使用またはコンタミとの摩擦によりエレメント自体から糸屑，紙屑のコンタミが発生するため，コンタミ除去の観点からは推奨されない．フィルターのエレメントのサイズ（保持粒子径）は使用環境等にもよるが，1 μmから数十μmレベルのものが使用される．

油圧機器の製造工程（検査工程等）では，作動油を循環使用するケースが大半であり，フィルターにて連続的にコンタミを除去し，清浄度も日々管理されている．このような工程ではエレメント目詰まりによるエレメント交換頻度を可能な限り少なくするため，他のコンタミ除去装置と併用して使用されるケースが多い．その代表例として遠心分離機が挙げられる．遠心分離機の装置内はモーターにて回転しており，そこに送液された作動油に遠心力が働くことで，比重の異なる物質が分離されるメカニズムである．遠心力により油中コンタミの自然沈降速度が加速され，作動油とコンタミが分離されるイメージである．遠心分離機の代替として，エレメントレス・フィルターを使用しているケースもある．エレメントレス・フィルターのメカニズムは遠心分離機同様，遠心力を発生させることによる作動油とコンタミの分離であるが，遠心分離機と大きく違う点は，モーター等の動力を必要としないという点に限る．使用環境、対象サンプルにもよるが，国内A社実ラインにて分離性能を比較しても遜色のない結果が得られている（表１）．

表１　遠心分離機とエレメントレス・フィルター 処理液の比較

	遠心分離機	エレメントレス フィルター
コンタミ量（夾雑物）［mg/100mℓ］	1.5	0.6
平均粒子径［μm］	23.4	6.2

※A社油圧機器用鉱物油系作動油循環使用ラインにて（液温70℃）
上記処理液を最終的に６μmラインフィルターにて処理して循環使用

3.2　エレメントレス・フィルターとは

エレメントレス・フィルターとは，文字通りエレメントを使用しないフィルターである．原理としては，液体サイクロンとなるが，一般的なサイクロンフィルターと呼称されているものと構造が大きく異なる．一般的なサイクロンフィルターは，図２で示すように分離されたコンタミを常時液体と共に下部へブローダウン（排出）しなければ機能せず，作動油の一部を損失し続けながら対象液をろ過しなければならず，作動油のフィルターとしては使用できない．

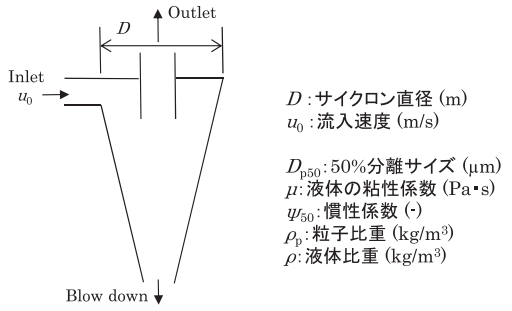


図２　サイクロンフィルターの構造

なお，サイクロン原理を利用したフィルターの理論的分離性能は式(1)にて算出される．この式から解るように，サイクロン原理を利用したフィルターの分離性能は，対象液の粘度に多きく依存する（式２）．

$$D_{p50}=\sqrt{\frac{18\mu D\Psi_{50}}{(\rho_p-\rho)u_0}} \quad \cdots(1)$$

$$D_{p50}=K\mu^{1/2} \quad \cdots(2)$$

一方，エレメントレス・フィルターはブローダウンを必要とせず，分離されたコンタミをフィルター下部のスペースへ回収することが出来る．図３にエレメントレス・フィルターの構造イメージを記したが，分離物を回収する下部の構造については，製造メーカーの特許範囲であるため，構造の詳細表記は割愛する．この機能により，対象液である作動油を

損失することが無く対象液をろ過することができる．しかし，根本的な原理はサイクロンとなるため，液粘度が分離性能に影響してくる点に関しては同様である．

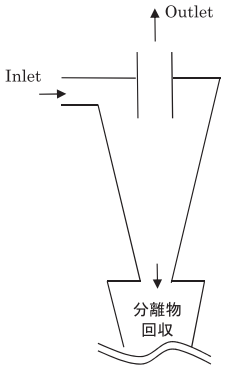


図３　エレメントレス・フィルターの構造（イメージ）

サイクロン原理を利用したフィルターの分離性能は10㎛程度であるが，その性能向上のための研究が大学含め各企業で日々実施されている[3-5]．サイクロン原理を利用したフィルターに影響してくる因子は内部構造・形状と式⑴に登場する各パラメータが挙げられるが，フィルター内部に電荷をかけ，ゼータ電位を変化させて分離性能を向上させるという興味深い取り組みもなされている．試験レベルでは，数㎛程度までの分離が報告されている[5]．

式⑵から解るように，エレメントレス・フィルターを使用する上で，対象液の粘度が低いことは，より細かいコンタミを分離するうえで重要な条件となる．油圧作動油というと，比較的粘度が高いイメージがあるが，作動油の使用温度が比較的高い場合，粘度が下がり，分離条件的に有利に働く．さらに，省エネ対策を目的とした低粘度作動油の開発も近年活発に行われており，今後ますますエレメントレス・フィルターが使用できる環境が増加することが期待される．

4. おわりに

本稿では，油中コンタミ除去とそれに利用されるフィルターの特徴について述べた．今後の各種フィルターの技術向上とコンタミ対策に焦点を当てた作動油開発の相乗効果により，油中のコンタミ問題が解消される日が訪れることに期待したい．それにより，国内外問わず，より一層の油圧システムを活用することでの産業の効率化による社会の発展を願う．

参考文献

1）池生慎一：油圧作動油について，NACHI TECHNICAL REPORT, Vol. 22D1（2011）
2）石塚雅規：作動油の清浄度センサ，フルードパワーシステム，Vol. 46，No. 2, p. 61-63（2015）
3）H. Yoshida, T. Takashina, K. Fukui, T. Iwanaga：Effect of inlet shape and slurry temperature on the classification performance of hydro-cyclones, Powder Technology, Vol. 140, p. 1-9（2004）
4）H. Yoshida, Y. Hayase, K. Fukui, T. Yamamoto：Effect of conical length on separation performance of sub-micron particles by electrical hydro-cyclone, Powder Technology, Vol. 219, p. 29-36（2012）
5）T. Yamamoto, T. Oshikawa, H. Yoshida, K. Fukui：Improvement of particle separation performance by new type hydro cyclone, Separation and Purification Technology, Vol. 158, p. 223-229（2016）

（原稿受付：2016年４月11日）

解説

水分による油の劣化とフィルトレーション

著者紹介

森永 由一郎（もりなが ゆういちろう）

トリプルアール工業株式会社
〒329-4423 栃木県栃木市大平町西水代3000
http://www.triple-r.co.jp

1994年成蹊大学工学部工業化学科卒．同年トリプルアール工業株式会社に入社．

1. はじめに

近年では潤滑油のコンタミネーションコントロールを各々の会社で保全担当者様がさまざまな方法を用いて実施している．

油圧トラブルの原因の大半が潤滑油の管理不十分によるものであるが，油圧機器を効率よくトラブル無く稼働させるために潤滑油に対してどのような管理を行うとコンタミナントの抑制が可能となるか弊社の考えや取り組みを紹介する．

2. 油の清浄度維持について

コンタミネーションコントロールを行っていく上で，フィルトレーションは必要不可欠である．

フィルトレーションとは対象機器に合ったフィルタ等を用いて回路内の摩耗原因となる塵埃や金属粉などの固形夾雑物を捕捉することであるが，フィルタだけではコンタミネーションコントロールは成し得ない．

コンタミネーションコントロールをしていく上で，水分や酸化劣化物といったコンタミナントすべてを取り除くことが重要となってくる．

近年の油圧機器ではラインフィルタが殆ど装着されており，フィルトレーションの向上を感じる．しかしラインフィルタは油圧機器へ突発的なダメージを与えるような異物の侵入を防ぐために重要だが，それ以上でも以下でもない．

油圧機器トラブルを未然に防ぐには，下記の３つが必要である．

①油中のゴミ（固形夾雑物）の除去
②油中の水分除去
③油中の酸化劣化物の除去と抑制

この全てを行うことがコンタミネーションコントロールであり，弊社のオイルクリーナの定義そのものである．

まず油中のゴミの除去とは，先ほど説明した通り油圧機器に合った濾過精度のフィルタを使用し，機器に悪影響を及ぼす固形夾雑物を取り除くことである．機器へのゴミの侵入は給油時の混入，シリンダーのシールからの侵入，ポンプの摩耗にて発生する摩耗粉，タンク呼吸作用によるブリーザからの侵入などが挙げられる．サーボ弁などを使用している精密制御機器ではクリアランスが小さいので清浄度を上げる必要性がありインラインフィルタだけでは不十分と言える．

つぎに油圧機器内の油に水分が混入する要因は，エアブリーザによる油圧タンクの呼吸作用により油温と外気温との温度差によってタンク内に発生する結露水と，オイルクーラーからの冷却水の漏れや，工作機械などではシール部から水溶性クーラントの混入などが挙げられる．

特に建設機械などは，粉塵の侵入による汚染だけでなく水分混入による問題が起こりやすい．建設機械は一般的に昼間の稼働時は50 ～ 80℃と油温が高めだが，停止している夜間では作動油が冷えてタンク内に結露水が発生しやすい．ここで，水分がどのように悪影響を与えるか説明する．水分が混入すると潤滑不良である油膜切れが発生しやすく，可動部の摩耗に繋がる．また粉塵により回路内でも機器が摩耗し金属摩耗粉が発生する．さまざまな要因で増加した水分が，発生した金属摩耗粉を触媒に作動油の酸化劣化を促進させて油の寿命を縮めているのである．

さらに，水分が多くなるとキャビテーションを発生する要因となり，図１のようにキャビテーションの発生でポンプ破壊につながることもある．

また回路内やタンク内に錆を発生させる要因でもある．

油圧機器の故障とは潤滑油の使用限界と密接な関

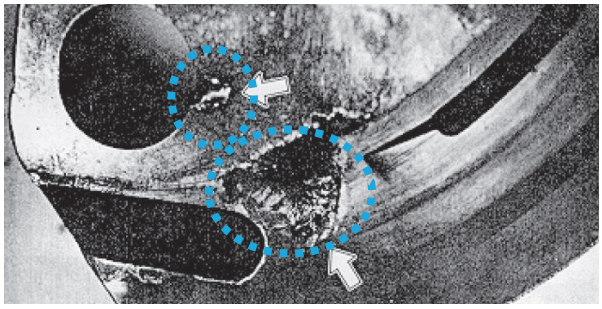


図１　ポンプ破損

係にある．潤滑油の使用限界とは油圧機器の故障だけではなく、潤滑油の汚染・劣化を要因とし添加剤の消耗を引き起こすことでもある．潤滑油の劣化は，全酸価値を見ることで確認ができる．いわゆる酸化劣化である．

この劣化とコンタミナントの関係性について，潤滑油に劣化触媒として金属摩耗粉Fe，金属摩耗粉Cu，水分，を加え劣化速度を比較した結果，全酸価値の上昇速度は図２の通りであった．

酸化検証のテスト条件として，酸化速度を速めるために水分値を有：0.15％（1,500ppm）・無：0.01％（100ppm），油温：90℃にて実施した．

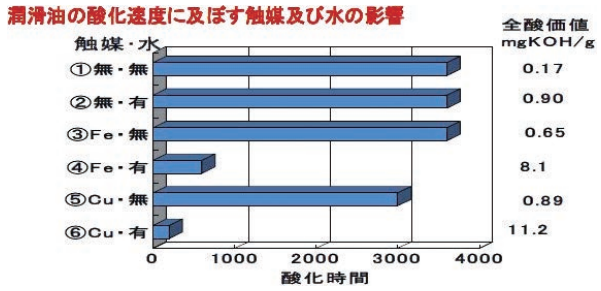


図２　酸化速度テスト

全酸価値と酸化時間から，⑥銅+水分＞④鉄＋水分＞⑤銅のみ＞②水分のみ＞③鉄のみ＞①摩耗粉無・水無の順に劣化速度が早いことがわかる．

油の劣化メカニズムとして，酸化触媒として摩耗粉の材質による酸化速度の変化もあるが，水分が大きく関わっていることをご理解頂けると思う．

一般的な作動油の管理基準値として，水分値は0.1％（1,000ppm）以下に定められているが，親水性素材のデプスタイプエレメントを使用し水分を吸着除去することにより油中の水分値の上昇を防ぎ管理基準を大きく下回る汚染管理が可能である．

水分と酸化触媒である金属摩耗粉を取り除くことが，油の酸化を防ぐこととなり酸化劣化物の発生を抑制することに繋がってくる．

3. 水分除去について

一般的にフィルタとはふるい捕捉の原理のため水分除去を目的としていない．フィルタの網目（濾過精度）より大きな粒子は捕捉できるがそれより小さな粒径は通過する構造であり，水分を補足することはできない．

コンタミナントのひとつである水分の除去について弊社では濾材と構造による吸着方式で循環濾過しながら水分除去を可能としている．濾材による吸着のため吸着量に限界はあるが油の清浄度を維持することを同時に行えるため有効である．また，遊離水分といわれる回路やタンク内に沈殿や分散して存在し稼働による回路循環や撹拌によって各所で悪さをする水分に関しては，添加剤の影響や油種によって分離効率が異なるが，下図３の写真のようにコアレッサフィルタを使用し油と水の比重差を利用して沈殿させる方法で水分除去する方法もある．

工作機械などでシール部等から水溶性クーラントなどの水分が連続して混入してしまう場合などには非常に有効である．

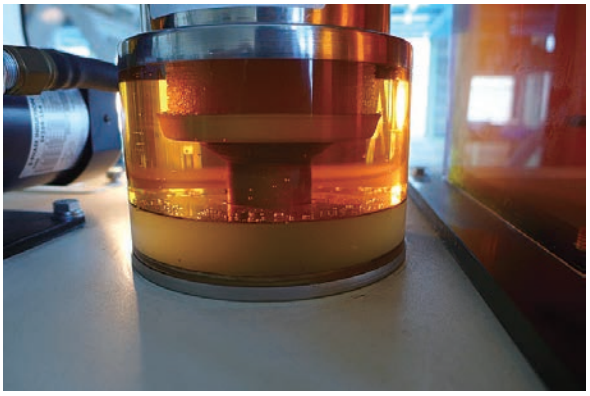


図３　分離・沈殿

そのほかに真空水分除去方式なども水分除去に効果的である．

真空ポンプなどを使用しハウジングなどの容器内の気圧を下げることにより，溶解水分であっても水分を減らすことが可能である．油温やハウジング内の気圧によって除去能力は異なるが消耗品が無く使用できることが大きな利点である．

4. おわりに

前述の通り，コンタミネーションコントロールの目的は，油の中からコンタミナントを取り除き油圧機器をトラブル無く，効率良く稼働させることである．過剰なコンタミネーションコントロールは管理者の負担となりコンタミネーションコントロールを

継続させることを困難にして結果的には不十分な管理に繋がる．

管理者においては必要十分な管理基準を決めて継続可能な管理を行うことが重要である．

現状では油の状態を定期的にサンプリングして分析機関にて分析をすることでコンタミネーションコントロールについて検証することができるが，今後は機械設備の状態監視などの観点からもインラインで使用できる粒子カウンターや水分計などのセンサー類などによって常に潤滑油の状態を監視できるような取り組みを弊社でも始めている．

機械設備の状態に大きく関係している潤滑油の状態を適切に「見える化」することにより効率のよいコンタミネーションコントロールを実現することを目指している．

（原稿受付：2016年 4 月 1 日）

解説

油圧作動油と気泡

著者紹介

坂間清子（さかま　さやこ）
青山学院大学
〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺5－10－1
E-mail : sakama@me.aoyama.ac.jp

2015年3月法政大学大学院デザイン工学研究科システムデザイン専攻博士後期課程修了．同大学マイクロ・ナノテクノロジー研究センターのポスト・ドクターを経て，2016年青山学院大学理工学部機械創造工学科助教，現在に至る．日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会の会員．博士（工学）．

田中豊（たなか　ゆたか）
法政大学デザイン工学部
〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2－33
E-mail : y_tanaka@hosei.ac.jp

1985年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了，その後，東工大精密工学研究所助手を経て，1991年法政大学講師，1992年同助教授，2002年同教授，現在に至る．工学博士（1991年東京工業大学）

1. はじめに

油を媒体として動力を伝達する油圧システムは，油の高い剛性とパスカルの原理を利用することで大きな力の伝達を可能にする．油圧システムは，小形で大きな出力を必要とする産業分野で広く利用されているが，作業性の向上や環境負荷低減を目的として，さらなる小形化，高出力化がもとめられている．油圧システムにもとめられる性能の向上は，同時に作動油を過酷な環境にさらすことにつながり，作動油の特性に影響をおよぼす．本稿では，油中に混入する気泡に着目し，過酷な使用環境下で油圧システムが利用されるときに油中気泡が作動油の特性におよぼす影響について解説する．

2. 油圧動力伝達システムにおける気泡の混入原因

油圧システムにおける気泡の混入原因の例を以下に示す．

1）タンク内油面の低下によるサクションラインからの空気の吸い込み

2）戻り管路の出口における油面の攪拌

3）ポンプやバルブ内でのキャビテーションによる気泡の析出

3）のキャビテーションとは，流動している液体が減圧されたときに生じる液体自身の蒸発，あるいは液中に溶解している空気の析出により気泡が形成される現象である．油圧回路内では作動油の飽和蒸気圧まで圧力が低下することは少なく，作動油の蒸発によってキャビテーションが発生することは稀である．作動油は大気圧下で8～10%もの空気を含有しており，油圧システムで発生するキャビテーションのほとんどがこの溶解空気に起因するものである．ここで，バルブ等の絞り部における流れを例にキャビテーションについて説明する．図1に絞り部におけるキャビテーション発生の様子を示す．ここで，p_iとp_oは絞りの上流側と下流側の圧力である．絞りを一定流量で流れる流体は，絞りの上流側よりも，管路径の小さい絞り内部で流速が速くなる．したがって，ベルヌーイの定理より，絞り内部の圧力は絞りの上流側の圧力に比べて低くなる．油圧システムの絞り部で発生するキャビテーションは，この圧力の低下によって油中の気体が膨張して析出する現象である．

キャビテーションの発生限界は，キャビテーション係数kで表され，次式で定義される．

$$k=\frac{p_o-p_g}{p_i-p_o} \tag{1}$$

ここで，p_gは油中に気泡が析出し始める気体分離圧である．通常使用される油圧回路では，作動油の気体分離圧p_gは絞りの下流側圧力p_oに比べて無視できるほど小さく，キャビテーション係数kは次式のように書き直すことができる．

$$k\approx\frac{p_o}{p_i-p_o} \tag{2}$$

キャビテーションはこの値が小さいほど発生しやすい．図2は絞りの上流圧力を変化させてキャビテーションの発生の様子を比較した実験の結果である．上流圧力p_iが大きく，キャビテーション係数の値が小さい方が，キャビテーションによって析出す

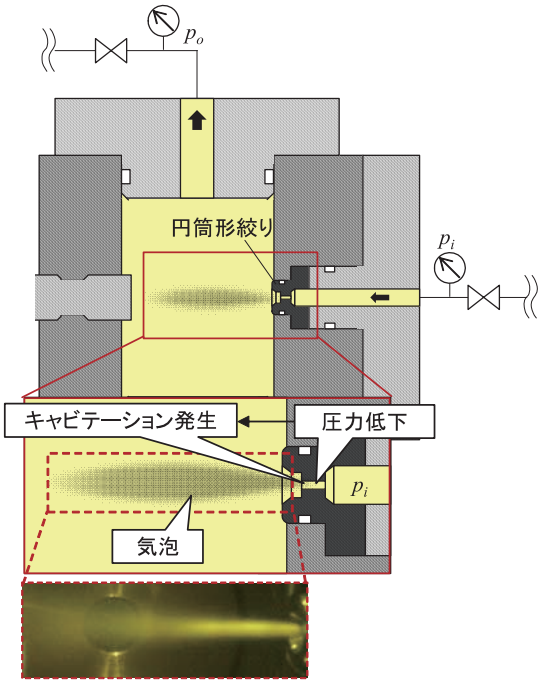


図１　絞りで発生するキャビテーション

る気泡の量が多いことが確認できる．

昨今の油圧機器の小形化・高出力化に対する要求に応えるために，多くの油圧システムは高圧化が進められている．図２の結果からもわかるように，油圧システムの高圧化はキャビテーションの発生を促進する．すなわち，過酷な環境下で使用される油圧機器は油中に気泡が混入しやすく，油中気泡に起因して生じる問題も顕著になる．

3. 油中気泡が作動油の特性におよぼす影響

3.1　作動油の劣化促進

次式のT_2は，理想的な気体の断熱圧縮を仮定した場合の気体の状態変化後の温度である．

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \tag{3}$$

T_1は断熱圧縮前の気体の絶対温度，p_1とp_2はそれぞれ断熱圧縮前後の気体にかかる圧力，κは比熱比で空気の場合1.4である．ここで，油圧回路内を流れる気泡が急激に加圧される状況を想定し，気泡の温度変化を計算してみる．図３は，初期温度T_1を40℃，初期圧力p_1を大気圧とし，圧力p_2で圧縮したときの空気の温度T_2の計算結果である．近年，建設機械等で使用されているポンプは定格圧力が40MPa程度まで高圧化されているものもあるが，40MPaでの空気の温度は初期温度の35倍以上となる約1460℃まで達することがわかる．油圧システム内の気泡も高圧条件下では急激に温度が上昇し，その周辺の作動油の温度を上昇させる．そして，この油温の上昇は作動油の酸化反応を加速させ，作動油の劣化促進の原因となる．したがって，油温の急激な上昇の一因である油中気泡を取り除くことで，作動油の劣化を抑制できると考えられる．先行研究では，油中気泡の除去による作動油の劣化抑制効果を実験的に検証している[1)]．実験では，循環劣化試験装置を用いて作動油を456時間循環させ，24時間毎に油タンク内の作動油の全酸価を測定し，作動油の劣化の進行を評価している．図４に油中気泡が除去された条件と気泡が除去されていない条件で作動油の劣化の進行を比較した結果を示す．油中気泡を除去しない条件では，456時間後の作動油の全酸価の値が気泡を除去した条件の約２倍であり，劣化の進行が速いことがわかる．以上のことから，油中の気泡は作動油の劣化進行に大きく影響をおよぼすことがわかる．

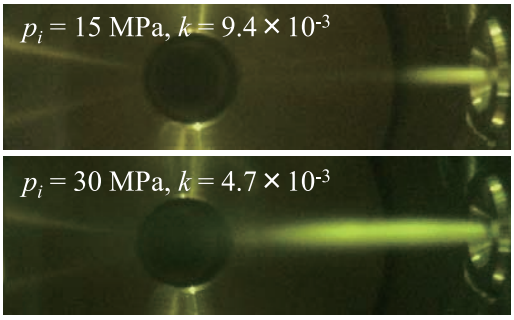


図２　上流圧力の違いによるキャビテーションの発生量の比較

3.2　見かけの剛性の低下

空気は，油と比較すると約10^4倍もの圧縮性をもつ．したがって，作動油中に気泡が混入すると，作動油の見かけの圧縮性が増大し，機器の動特性の低下やポンプの吐出効率の低下等の問題が生じる．本節では，流体の圧縮性の評価に用いられる体積弾性係数という指標を用いて油中気泡が作動油の見かけの剛性におよぼす影響について解説する．体積弾性係数は次式で定義される．

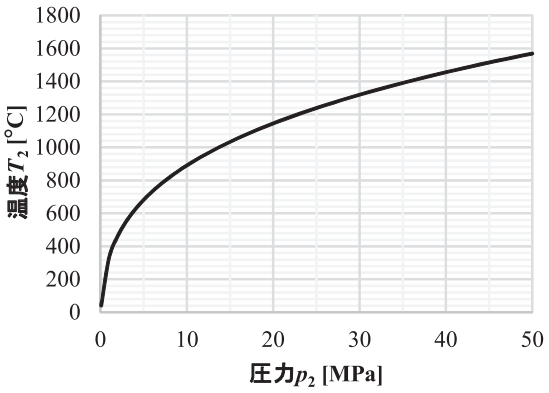


図３　断熱圧縮による気体の温度変化

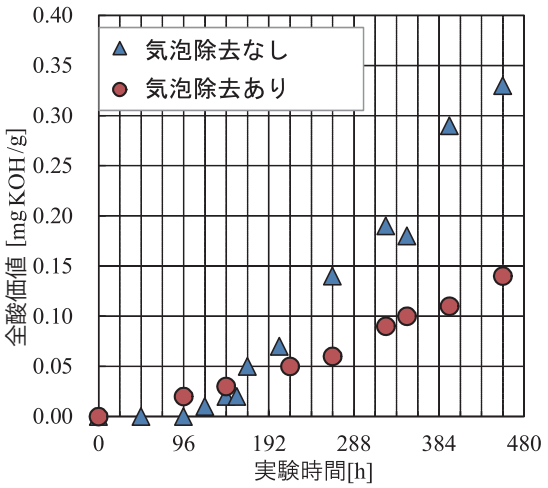


図４　作動油の劣化試験

$$K=-\frac{\Delta p}{\Delta V/\Delta V_0} \tag{4}$$

ここで，V_0は流体の初期体積であり，流体のおかれる状態が変化した後の圧力pと初期圧力p_0の差をΔp（$=p-p_0$），圧力pにおける体積Vと初期圧力p_0における初期体積V_0の差をΔV（$=V-V_0$）としている．体積弾性係数は，分母となる体積変化率（$=|V-V_0|/V_0$）を１にする，すなわち流体の体積Vを０にするのに必要な圧力であり，体積弾性係数の値が大きいほど，流体の剛性は高いと評価できる．

著者らの研究グループでは，圧力容器に封入した油をサーボシリンダで加圧し，そのときの圧力容器内の油の圧力と体積の変化から油の体積弾性係数を測定することで，油中気泡が油の見かけの剛性におよぼす影響を実験的に明らかにしている[3)]．図５は体積弾性係数の測定に用いた実験装置の構成である．ここでは実験的に体積弾性係数を測定した結果の一例を示し，油中気泡が作動油の剛性におよぼす影響を確認する．油中の気泡と体積弾性係数の関係を実験的に明らかにするために，本実験では，油に気泡を強制的に混入させた条件と油中の気泡を十分に除去した条件の二通りの条件で実験を実施した．気泡を強制的に混入させた作動油，あるいは気泡を除去した作動油を油循環回路で十分に循環させた後，ストップバルブAとBを閉じて，油圧サーボシリンダにより加圧室内を加圧し，そのときの加圧室内の体積変化と圧力変化を変位計と圧力計を用いて測定している．これらのセンサで取得された値を(4)式に代入して油の体積弾性係数を算出することで，油中気泡の有無が作業油の見かけの剛性におよぼす影響を確認した．

図６の上部にサーボシリンダに３㎜のステップ状変位入力の指令をあたえたときの体積変化率，下部にそのときの圧力変化を示す．サーボシリンダによる加圧で，いずれの条件でも加圧室内の体積は約0.2％減少している．しかし，圧力の変化を比較すると結果は大きく異なり，油中気泡を除去した条件では，３㎜の変位によって圧力は約３MPa（初期圧力との差圧は約2.5MPa）まで上昇するが，気泡を除去しない条件では１MPaにも満たない（初期圧力との差圧は約0.5MPa）．それぞれの条件で体積弾性係数を算出すると，気泡を除去した条件では約1,370MPa，気泡を除去しない条件では約260MPaであり，油中の気泡が油の剛性に大きく影響をおよぼしていることがわかる．また，気泡を除去した条件で初期圧力との差圧が約0.5MPaのときの体積弾性係数は約1,250MPaである．初期圧力との差圧が同じ約0.5MPaの条件で比較すると，気泡を除去しない条件に対して気泡を除去した条件での体積弾性係数は約５倍になることがわかる．

ここで，作動油を大気圧から0.5MPa加圧した条件を想定し，気泡を除去した条件と除去しない条件で流体の圧縮によるエネルギーの損失率を比較する．

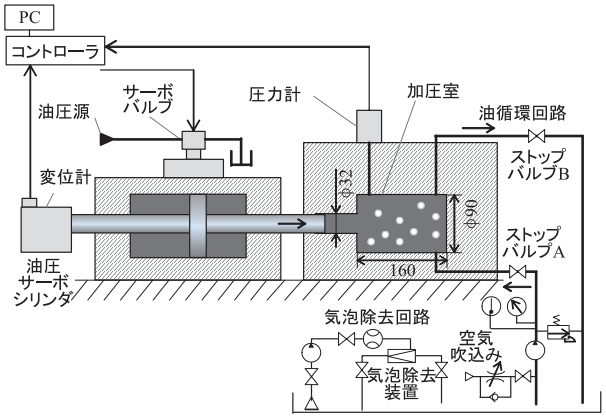


図５　体積弾性係数測定実験用装置の構成

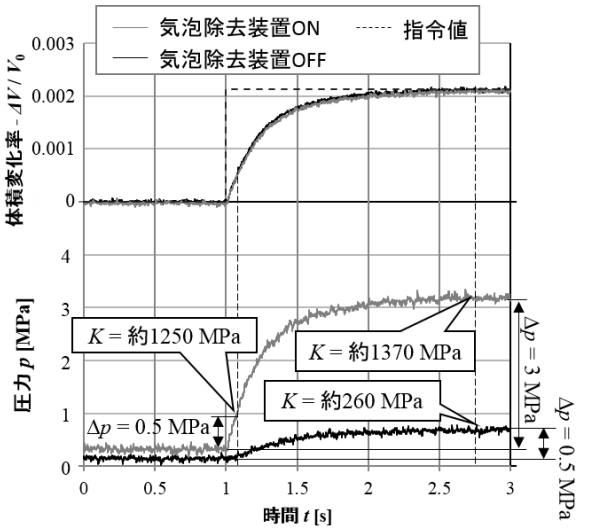


図６　体積弾性係数測定結果

流体の圧縮によるエネルギー損失率E_Rは以下の式(5)で表される．

$$E_R = \frac{\Delta p}{2K} \tag{5}$$

実験結果から上式を用いて流体の圧縮によるエネルギー損失率を算出すると，気泡を除去した条件では約0.02％であるのに対し，気泡を除去しない条件では約0.1％となる．以上のことから，油中の気泡は流体の圧縮によるエネルギー損失を増大させ，ポンプ効率低下等の原因になることがわかる．

4. 油中気泡の分離除去技術

油圧動力伝達システムでは，一般的に油タンクが油中気泡を分離除去する機能を担う．油圧システムの油タンクには，混入気泡や作動油の劣化による生成物の分離，油の温度調整等の働きがあり，消泡，異物の沈殿，油温の上昇抑制のために，一般的にタンク容量はポンプの１分間の平均吐出量の３～５倍以上とすることが望ましい[4]．しかし，最近では油タンクの小形化への要求が強く，タンクの容量は小さくなる傾向にある．建設機械を例に挙げると，タンク容量はポンプ吐出流量の0.3 ～ 0.5倍に設定されている[5]．このような使用環境では，タンク内の自然浮上による気泡の除去は困難になる．

油中気泡を取り除くために作動油には消泡剤が添加されており，一般的に市販の作動油ではシリコーン系の消泡剤が用いられる．しかし，シリコーン系の消泡剤は，油中に分散した気泡ではなく，油面付近に集合する泡沫の消泡に有効な添加剤であり，油中に分散する微小な気泡の残存には悪影響をおよぼすことがある[6]．

作動油の使用環境は今後ますます過酷さを増すことが予想され，従来の技術だけでは作動油中に残存する微小な気泡を除去することは困難であり，積極的に油中気泡を分離除去する技術の導入が不可欠である．著者らは旋回流を利用して油中気泡を分離除去する気泡除去装置を用いて油中気泡を分離除去する方法を提案している[7]．第３章の実験で利用しているのもこの気泡除去装置であり，気泡除去装置が油中気泡に起因して生じる油圧システムの問題の解決に有効であることが確認されている．タンク内での消泡で気泡の除去が不十分な場合には，このように積極的に気泡を除去する技術の導入が必要となる．

5. おわりに

本稿では，油中の気泡が作動油の特性におよぼす影響について解説した．過酷な環境で油圧機器を使用する場合には，油中気泡の影響を考慮し，使用環境に適した気泡除去技術の導入を検討してほしい．

参考文献

1）Tanaka, Y., Sakama, S., Suzuki, R.：Bubble Elimination from Working Oil for Environmentally Friendly Hydraulic System Design, Int J. of Automation Technology, Vol. 6, No. 4, p. 488-493 (2012)

2）実用油圧ポケットブック編集委員会：実用油圧ポケットブック，（一社）日本フルードパワー工業会，p. 252-254（2012）

3）Tanaka, Y., Sakama, S., Goto, H.：Experimental Investigation of Effective Bulk Modulus of Oil with Entrained Air Bubbles, Proceedings of the 12th International Conference on Motion and Vibration, 2 D22（2014）

4）㈳日本油空圧学会編：新版　油空圧便覧，オーム社，pp. 346-348（1989）

5）高圭介，赤松隆志，吉田伸実：建設機械の作動油タンク，フルードパワーシステム，Vol. 41，No. 6，pp. 389-393（2010）

6）山口惇，林克行，朴河激，油中気泡の収縮・消滅に関する研究，日本機械学會論文集.B編，Vol. 48，No. 434，p. 1930-1935（1982）

7）鈴木隆司，横田眞一：旋回流利用による気泡除去（第二報　テーパ形による性能向上），油圧と空気圧，Vol. 25，No. 4，p. 91-96（1994）

（原稿受付：2016年４月７日）

解説

状態基準保全（CBM）を実現するオイル分析

著者紹介

山中克浩（やまなかかつひろ）
東京オイルアナリスト㈱分析センター
〒329-4423 栃木県栃木市大平町西水代3000
E-mail : yamanaka@tokyo-oilana.com

ISO18436-4準拠機械状態監視診断技術者（トライボロジー）カテゴリーⅡ取得．1985年東京オイルアナリスト㈱に入社．現在に至る．

1. はじめに

弊社は，1983年10月にオイル分析専門機関として設立した．設立当時のオイル分析はオイルメーカーのカスタマサービスが主であった．現在でもオイル分析専門会社は国内で数社のみでニッチな存在である．しかし，資源循環型社会，環境問題，資源枯渇などISO14001の普及で油のリデュース・リユース・リサイクルが注目されオイルを管理する事で設備保全，予知保全，原因除去型保全等でのコスト削減や生産性向上が確認報告され，オイル分析の重要性が認められてきた．

2. オイル分析の目的

2.1　オイルは管理が必要

オイルが劣化するとどうなるのか？

オイルの清浄度が悪化するとどうなるのか？

それはオイル管理を怠ると致命的な機械故障に至り生産停止に追い込まれてしまう．

油圧設備のオイル250mlをサンプリングして分析すれば未然に機械故障を防止できる．新油の状態を維持できれば機械安定稼働は可能である．

この状態基準をオイル分析で監視しながら保全活動を実施するのが状態基準保全（CBM）である．

以下に必須分析項目でオイル状態の何が解るのか，必要な管理項目を説明する．

2.2　各分析項目の説明

2.2.1　NAS等級

「National Aerospace Standard」の頭文字をとった略語がNAS等級である．

油中の夾雑物を，5μ～OVER100μ粒径測定範囲で定められた粒径分類での試験油100ml中の夾雑物個数を示すものです．粒径分類中，最も高い等級を総合結果とする（表1）．

等級は00～12級まで有り，12級が汚染度最大で，それ以上の汚染の場合はOVER 12と表す．一般に，作動油：新油時（ドラム缶内）の清浄度はNAS８級

表1　NAS1638

粒子サイズ（ミクロン）	等　級						
	00	0	1	2	3	4	5
5～15	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
15～25	22	44	89	178	356	712	1,425
25～50	4	8	16	32	63	126	253
50～100	1	2	3	6	11	22	45
100以上	0	0	1	1	2	4	8
粒子サイズ（ミクロン）	等　級						
	6	7	8	9	10	11	12
5～15	16,000	32,000	64,000	128,000	256,000	512,000	1,024,000
15～25	2,850	5,700	11,400	22,800	45,600	91,200	182,400
25～50	506	1,012	2,025	4,050	8,100	16,200	32,400
50～100	90	180	360	720	1,440	2,880	5,760
100以上	16	32	64	128	256	512	1,024

程度である．

通常の一般油圧装置においては，油清浄度をNAS10級程度で抑える事が望ましいとされている．また，７MPa以上の油圧装置においては，NAS９級以下の清浄度が求められている（ただし，サーボ弁使用の場合はNAS７級管理が望ましい．クリアランスが３μm程度のため）．

表１の規格表を見ると，NAS等級上昇で倍々に夾雑物個数が多くなり，油圧部品表面の摩耗も激しくなりクリアランスに侵入する確率も増大する．この夾雑物の中で金属摩耗紛と水分は，油温の上昇で酸化触媒となり作動油は酸化劣化を繰り返し，酸化劣化物が形成される．これらは，重合，凝集を経てタンク底部に堆積する．また，油温の低温時に樹脂状に固体化した酸化劣化物は機械始動時にバルブ等のクリアランスに侵入しバルブスティック等の不具合原因物質となる．NAS等級の粒径分類では，特にバルブやポンプのクリアランスに近い，５μ～15μの個数監視が重要である．

現在では，コンタミネーションコントロールを徹底する事により，油圧機械のトラブルの８割以上が解消されるという事実が，多くの生産現場で証明され，CBM（状態基準保全）の基礎となっている．但し，NAS等級での管理は現在，アジアでも日本で使用される程度で世界的にはISO4406の４／６／14μm（C）以上の粒子径で１ml中の粒子数をカウントして清浄度（スケール番号）を判定する事が主流となっている．※（C）はISO11171で校正した粒子カウンタ（図１）で測定した数値の意．これは，NAS等級の標準コンタミが製造中止になった事で，あと数年でNAS等級校正が出来なくなるからである．他にも測定法など諸条件があるが今後はISO4406での測定に移行していくのは確実である．表２のISO4406清浄度コードをご参照願いたい．

2.2.2　重量汚染度mg/100ml

JIS B9931の試験法である．

試験油100mlを，直径47mm，0.8μのメンブランフィルターで濾過し，フィルター上の残留物質量を計測する方法である．NAS等級やISO4406の粒子カウントとの相関関係はない．夾雑物質量は物質密度で異なるので個数と質量に相関がない．試験法の効果は，固形夾雑物が，メンブランフィルター上に捕捉されるので，顕微鏡観察や写真撮影，蛍光Ｘ線分析などが可能で物質の推測や特定に役立つ．また，酸化劣化物やバーニッシュ（ワニス）も捕捉されるので，これら５μm以下のNAS等級個数にカウントされない異物確認，観察に効果大である．一般管理基準値は，低圧の機械で10mg/100ml以下，サーボバルブ使用で５mg/100ml以下とされている．

図１　自動粒子カウンター

表２　ISO4406

清浄度コード（JIS B9933, ISO 4406）

粒子数N／mL		スケール番号	粒子数N／mL		スケール番号
＜N	N≦		＜N	N≦	
2,500,000		>28	80	160	14
1,300,000	2,500,000	28	40	80	13
640,000	1,300,000	27	20	40	12
320,000	640,000	26	10	20	11
160,000	320,000	25	5	10	10
80,000	160,000	24	2.5	5	9
40,000	80,000	23	1.3	2.5	8
20,000	40,000	22	0.64	1.3	7
10,000	20,000	21	0.32	0.64	6
5,000	10,000	20	0.16	0.32	5
2,500	5,000	19	0.08	0.16	4
1,300	2,500	18	0.04	0.08	3
640	1,300	17	0.02	0.04	2
320	640	16	0.01	0.02	1
160	320	15	0	0.01	0

酸化劣化物の顕微鏡写真を図２，３に示す．

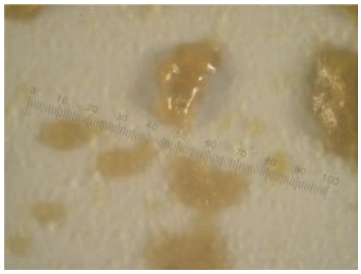


図２　ワニス状の酸化劣化物

図３　添加剤酸化劣化による変質物

2.2.3　水分ppm

JIS K2275の試験法である（殆どはカールフィッシャー法で測定する）図４，５．

測定器に投入するサンプル油１g中に含有される水分の量をppmで表わす．

油圧機械には水分が大敵である．油温の上昇に伴って金属摩耗粉や添加剤と化学反応を起こし，酸化を促進させ酸化劣化物発生の触媒になる．

一般に新油でも，100ppm前後の水分量が存在し，設備ではエアーブリーザーから侵入してくる外気や油温上昇に伴う結露現象等により100ppm～150ppm程度の水分は油中に混入している．

一般管理基準値は1,000ppm以下とされている．

図４　カールフィッシャー法水分測定装置

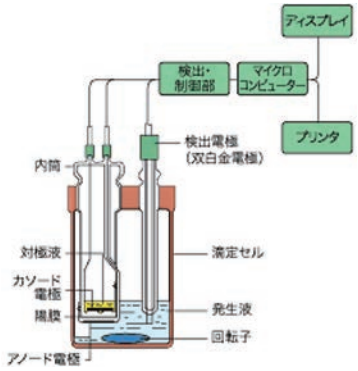


図５　測定部構造

2.2.4　動粘度㎟/s

JIS K2283の試験法である．

毛細管式のガラス製粘度計（図６）に一定の試験油を入れ，粘度測定用恒温槽内（図７）で試料油を40℃に保持し，毛細管内を票線から票線まで落下する秒数を計測する．計測秒数に粘度計定数を掛けたものが動粘度となる．動粘度は油圧機械においてもっとも重要な条件の一つで，その低下によっては機械的摩耗の促進や内部リーク，効率の低下等が問題になっている．粘度の増加によっては，配管内の抵抗増加による圧力損失や発熱，内部摩耗の増加につながる．

粘度変化は酸化劣化物の発生量，異種油混入量等，コンタミナントによる影響が主な要因となっている．

一般管理基準値は新油値の±10％以内とされている．

2.2.5　酸価mgKOH/g

JIS K2501の試験法である．（中和価滴定）

自動電位差適定装置（図８）による計測で，試験油１g中の酸性物質を中和させるKOH（水酸化カリウム）の量をmgで示したものである．酸価の上昇は，油が酸化し酸化劣化物が発生した結果である．但し，その値は油種によって大きく異なる．

⑴　R&O作動油

新油値の酸価値が一般に0.2mgKOH/gより低い性状のオイルで，一般的な油圧装置に使用されている．　このタイプの油は，酸化に伴い酸価値の上昇を示す（図９）．新油値と分析値を比較する事により，分析値が新油値よりも上昇していれば，酸化が促進し酸化劣化物の発生と判断する事ができる．

⑵　AW作動油（耐摩耗性作動油）

従来のAWタイプは，新油値の酸価値が0.5mgKOH/gより高い性状のオイルで，一般的には高圧油圧装置に使用されていた．このタイプの作動油は使用後，酸価値が下降して，その後上昇する傾向

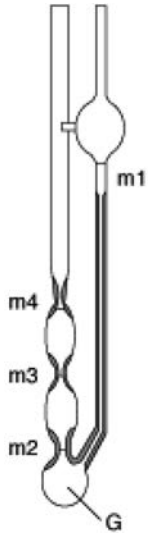


図６　毛細管式ガラス管粘度計

図７　粘度計測定用恒温槽（±0.01℃の温度制御が可能である

図８　自動電位差滴定装置

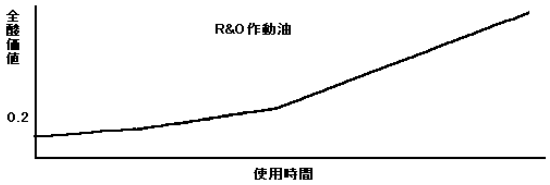


図９　R&O作動油

を示す（図10）．これは作動油中の添加剤ZnDTP（ジチオりん酸亜鉛）の性質により生じる現象と考えられる．現在は非亜鉛系耐摩耗性作動油が主流なので上記のような傾向はないが，従来設備に亜鉛系作動油を継続して使用している場合がありので注意が必要である．

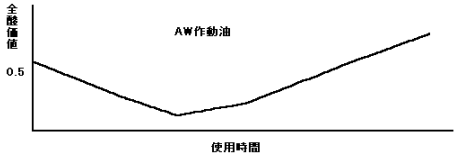


図10　AW作動油

2.3　鉱油系作動油の一般管理基準値

各種文献には様々な管理基準値（表３）が掲載されているが，下記に示した管理基準値は一般的に使用されている表である．オイルメーカー及び機械メーカーも，ほぼ同様の管理基準値を周知している．参考までジュンツウネットで閲覧可能な管理値を示した．

表３　鉱油系作動油の管理基準

項目	管理基準値	評価の内容
動粘度㎟/s 40℃ 酸　価　mgKOH/g	新油比±10％以内 降下後の上昇値0.5以下＊	異種油の混入，作動油の劣化 添加剤の消耗度合い，酸化劣化
水　分　vol％ 汚染度 mgKOH/100㎖ （0.8㎛フィルタ）	0.1以下または白濁のないこと 10以下（サーボ系の場合はNAS ８級）	水分の混入 ごみ，摩耗粉などのきょう雑物作動油の劣化・変質物の生成
色相（ASTM）	著しく変化のないこと	熱，酸化劣化，異物の混入

＊亜鉛系耐磨耗型作動油の場合　　潤滑通信社：ジュンツウネット参照

3.　オイル分析による機械状態監視とトラブル解決

オイル分析を専門機関に依頼する際に依頼方法で困った事はないだろうか．必要な情報を得るために分析項目はどれを選択すれば良いのか，図11にて説明する．

4.　ま　と　め

機械状態監視と状態基準保全にはオイル分析が重要と述べてきたが，オイル分析だけでは機械の安定稼働を維持する事はできないのは御承知の通りである．オイルの清浄度を保つためにはフィルトレーションが不可欠であり，酸化防止には目的に合わせた添加剤入りの油を使用する事が求められる．さらに，湿度，油温，水分，空気，金属摩耗粉の監視も重要である．一般管理基準値は参考であって万能な数値ではない．機械装置毎，油種毎，使用条件で様々に管理基準値は異なる．オイル分析を有効な機械状態監視の手段にする為には新油時からの継続分析で，より現場に即した感度の高いオイルからの情報を活用して頂くことを望むものである．

（原稿受付：2016年２月９日）

図11　オイル分析依頼選択フロー

ニュース

日中若手研究者交流事業報告

著者紹介

伊藤和寿（いとう かずひさ）
芝浦工業大学
〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作307
E-mail : kazu-ito@shibaura-it.ac.jp

1995年上智大学大学院博士前期課程修了．株式会社小松製作所，上智大学助手，鳥取大学准教授を経て，2011年芝浦工業大学教授．日本フルードパワーシステム学会，日本生物環境工学会，計測自動制御学会，電気学会等の会員．博士（工学）．

1. はじめに

JFPSと中国機械工程学会内にある流体伝動および制御分会との間で，フルードパワーシステムに関する学会間交流が開始されてすでに40年近い年月が経過した．両国が特に重視しているのは人材交流であり，以前から続けられていたものが正式に制度化されて15年近くになろうとしている．毎年一名の若手研究者を交換するこの事業では，これまで王慶豊教授（浙江大学），孔祥東教授（燕山大学），焦宗夏教授（北京航空航天大学），冀宏教授（蘭州理工大学），劉銀水教授（華中科技大学），趙丁選教授（吉林大学），阮健教授，孟彬博士（浙江工業大学）らが招聘され，大学訪問や企業見学を行っている．また日本からも，田中豊先生（法政大学），早川恭弘先生（奈良工業高等専門学校），高岩昌弘先生（徳島大学），佐藤恭一先生（横浜国立大学），加藤友規先生（福岡工業大学），伊藤らが訪中し，両国間のフルードパワー技術および研究者の架け橋となっている．

2015年度は，JFPSにより浙江大学State Key Laboratory of Fluid Power and Controlの徐兵（Xu Bing）教授および張軍輝（Zhang Junhui）博士が招聘された．以下，簡単に交流成果を報告する．

2. 滞在概要

来日された二名の先生は11月21日より29日までの九日間に渡って東京および鹿児島に滞在し，秋季講演会での特別講演および講演参加，フルードパワーシステム関連の大学研究室および企業を訪問された．

11月23日は，上智大学および法政大学の研究室見学が行われた．特に法政大学への訪問においては，徐教授より浙江大学の紹介を含む1時間程度の研究紹介と参加者らによるディスカッションも行われた．これには芝浦工業大学のポスドク研究者・学生12名も参加し，大学間研究交流を兼ねた非常に有意義な機会となった．当日の夜にはJFPS主催の歓迎会も開催され，これまで日中若手研究者交流事業に参加されたことのある先生方にもお越しいただくなど，大変盛況となった．

翌24日の株式会社小松製作所小山工場訪問では，油圧ポンプ・モータおよびエンジンの生産ラインやテストベンチ等の見学を行った．この日の訪問では，普段は見ることのできない大型油圧機器専用の耐久試験機等も見学でき，またそこに施されている安全対策の簡単なご説明もいただくなど，貴重な見学の機会となった．

26日から27日にかけては，鹿児島市内のジェイ

写真1　秋季講演会会場ジェイドガーデンパレス エントランス（右から，徐兵教授，張軍輝博士，アテンドにご協力頂いた法政大学大学院留学生の范想想氏）

ドガーデンパレスにて平成27年度秋季講演会が開催され，招聘者らにも参加いただいた．27日午前中には徐教授より，“Research on the Motion Control System for Mobile Machinery with Single Pump and Multiple Actuators”（建設機械のシングルポンプ-マルチアクチュエータにおけるモーションコントロールシステムに関する研究）というテーマで国際特別講演が行われた．徐教授らの研究グループは，従来の建設機械等で広く用いられているオープンセンタ方式等のメインバルブにおいて指摘されていたメータインおよびメータアウトにおける干渉を解決することを目的とし，新しい油圧制御方式であるIMCS（Independent Metering Control System）を提案している．この手法では供給側と戻り側ラインの流量を独立して制御することが可能なため，省エネルギー性の改善，圧力/速度の同時制御性の改善が図られるなど多くのメリットが期待できる．特に本講演では，省エネルギー性能を向上するためにポンプとバルブの協調制御系を導入する手法について説明が行われた．提案手法によるブームとアーム制御における実験結果では，省エネルギー性と制御性の向上が示された．さらに講演後半では，不連続なリアプノフ関数を導入した非線形制御理論によるポンプ制御の研究も紹介され，浙江大学の研究力の幅広さを感じる内容であった．講演後には，省エネルギー性の評価法や制御系の安定性等について活発な質疑応答がなされた．

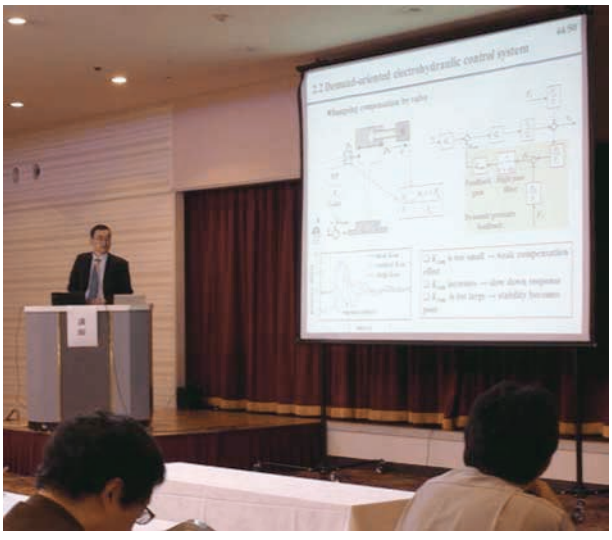


写真２　国際特別講演でレクチャーされる徐教授

なお徐先生らは学会最終日の夜の新幹線で福岡に移動後，28日に福岡市内の観光を楽しまれ，翌29日の便で無事帰国された．

3. 招聘を終えて

徐教授は日立建機株式会社等への訪問経験も含めて既に四回の来日経験があり，2014年に太原理工大学で開催された第三回の日中ジョイントワークショップでも中国側窓口を担当された．現在も中国機械学会流体伝動および制御分科会の国際交流担当者を務められるなど，日本との接点を多くお持ちである．滞在中はJFPSの構成や大学教員の企画事業・各種委員会への関わり方など，多くの質問を受けた．合理的な点は是非中国での学会運営にも参考にしたいとのことであった．

また，上智大学への訪問時に築地会長と意見交換した際には，2015年10月にJFPSの訪問団が参加した韓国のフルードパワーシステム学会の国際セッションの件が話題に上り，日中韓の三カ国によるジョイントワークショップ開催が提案された．これは徐先生を通じて中国側でも議論頂くことになった．ただし，これまで同様に担当者の負荷を増やさぬよう，各国の国内会議に同期させて実施すること，および参加者増員についての何らかのアイデア検討が必要であることが確認された．

なお，今回の招聘でも張博士が同行されたように，近年中国側から研究者が来日する際には若手研究者を同行させることが増えている．実際，2009年度の冀教授，2013年度の阮教授を含め，ここ４回のうちで３回の実績がある．同行者は30–35歳前と若く，この年代の研究者が来日して交流が実現されていることは，将来の日中間の研究交流において重要な布石となる．従って，中国側からの招聘の際にも日本からは文字通り「若手」を同行させることが得策と考えられる．

最後に，大学訪問，企業見学および招聘者へのアテンドに際し，ご対応を頂いた多くの皆さまに感謝申し上げます．特に築地会長，田中豊先生，加藤友規先生ならびに吉田伸実理事には細部に亘ってご尽力いただきましたことに，改めて感謝の意を表します．ありがとうございました．

（原稿受付：2016年５月３日）

トピックス

空気圧サーボ制御を用いた手術支援ロボットを開発する大学発ベンチャー企業

著者紹介

川嶋健嗣（かわしまけんじ）
東京医科歯科大学
〒101-0062 千代田区神田駿河台２－３－10
E-mail : kkawa.bmc@tmd.ac.jp

1997年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了．同助教授などを経て，2013年東京医科歯科大学生体材料工学研究所教授，2014年大学発ベンチャー企業設立，現在に至る．流体計測制御，ロボット工学の研究に従事．日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会などの会員．博士（工学）．

1. はじめに

著者らは，2012年に文部科学省の大学発新産業創出拠点プロジェクト（通称STARTプロジェクト）の支援を受けて，2014年５月に大学発ベンチャー企業リバーフィールド㈱を設立した．東京工業大学香川利春特命教授，只野耕太郎准教授，東京電機大学藤田壽憲教授と当方らが長年研究を行ってきた空気圧の計測制御技術を基盤とし，2003年から東京医科歯科大学低侵襲医学研究センターの協力を得て研究開発を進めて来た，手術支援ロボットの開発を目指す会社である．

ベンチャー企業の成功の割合は，千社に三社程度と言われる．さらに医療機器の製造を目指す会社は，ITベンチャーなどと異なり，初期費用がかかる．また，薬事申請や品質マネジメントなど専門知識が求められ，参入障壁が高い．逆に言えば，障壁を乗り越えれば，その後の継続的な発展が期待できる．世界的に高齢化社会を迎えており，医療機器は成長が期待される産業分野である．

最近，大学発ベンチャー企業の設立の機運が高まっており，検討している先生方や支援を考えている企業の方も多いと考える．自身の経験を紹介し，少しでも参考になれば幸いである．

2. 技術的な強み

大学発ベンチャー企業において，研究者の技術シーズを有することは言うまでもないが，ニーズを適確に捉え，ビジネスの可能性を事前に十分精査する必要がある．特に，医療機器分野では，医師のニーズはさまざまであるが，それと市場性は別の話である．シーズとニーズが融合し，特許取得，資金調達，組織体制や売り上げの見込みなどの目途が立った上で起業すべきである．

著者らの事例において，まずその研究シーズは，空気圧サーボ制御による空気圧アクチュエータの精密制御である．空気圧アクチュエータへの流入，流出流量をサーボ弁で制御することで精密な位置決めや圧力制御を実現している．空気圧サーボの研究は1950年代からスタートしたもので[1]，制御だけを見れば決して新しい技術ではない．しかし，シール技術の向上，高応答サーボ弁の実用化，MEMSセンサの発展，制御器の高性能化など要素技術が進展し，それらを適切に組み合わせることで高性能な制御を実現している．空気圧配管の影響，サーボ弁のラップ領域の特性，空気圧シリンダの温度や摩擦特性など，空気圧要素の特性解析を踏まえて制御系を構築している[2]．制御において制御対象を適確に把握することが重要であり，その部分に強みがある．さらに，通常アクチュエータとして用いられる減速機付きの電動モータにはない特徴を活用した．それは，空気圧駆動がバックドライバビリティを有する，つまり出力側での外力が入力側の圧力に直接返る点である．

手術支援ロボットの開発は，東京医科歯科大学の医師のニーズから始まった．現状のマスタ・スレーブ型の手術支援ロボットでは，その操作を視覚のみに頼っており力覚が伝わらない．よって，縫合糸を切ってしまう，臓器を傷つけてしまうなどの課題がある．力覚提示機能は安全性の意味からも絶対搭載すべきとの見解であった．しかし，体内に入るスレーブ側鉗子に力センサを搭載することは，滅菌や洗浄の運用面から困難である．空気圧駆動はクリーンであり，軽量なことから医療機器との相性が良い．さらに，上記の特徴を活用すれば，鉗子先端に力センサを搭載することなく，鉗子根元の差圧から力覚を推定，提示できるコンパクトなロボットが開発で

きると考えた（図１）．つまり，シーズとニーズが結びついた．

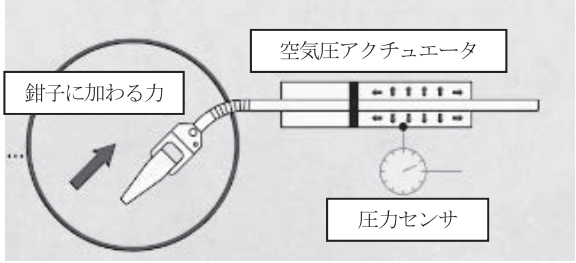


図１　空気圧シリンダを用いた外力推定イメージ

3. 手術支援ロボット

3.1 市 場 性

医師からのニーズがあっても，それがどの程度の市場があり，ビジネスとして成り立つか検証する必要がある．ただし，ベンチャー企業は大企業とは異なり，市場規模が大きいことより，ニッチあるいはハイリスクだが利益を確保できる分野に注目すべきと考える．

腹腔鏡手術用の支援ロボットは米国一社の独占状態であるが，その市場は今後増加することが見込まれている．NEDOの試算では国内において2035年に500億円規模と予想されている．これは，大企業にはあまり魅力的ではない数字かもしれない．また，治療機器はハイリスクな領域である．よって，ベンチャー企業に適した分野である．さらに，手術支援ロボットは単に機器を製造販売するだけでなく，その後の消耗品が必須である．つまり，定常的な利益が見込める．

3.2 試 作 機

実用化予定の機器に対して強い特許を有していること，先行特許への抵触の可能性についても十分な精査が必要である．その意味で，空気圧駆動を用いた手術支援ロボットは独自性があった．

手術支援ロボットの研究開発は2003年から開始した[3]．当時学生だった只野准教授が中心となってこれまでに６回の改良を行っている．図２に示すように，外科医や医学部生の協力を得て，評価実験を実施している．

手術支援ロボットの利点は手振れしない，直感的な操作性を有することからラーニングカーブが早いことが挙げられる．図３に示す胆管空腸吻合を模擬した評価キットを用い，図３右下に示した従来のストレート形状鉗子と図２に示した手術支援ロボットを用いた場合の時間を比較した．実務経験５年以上の外科医５名と手術経験のない医学部生５名の結果

図２　手術支援ロボットの評価実験風景

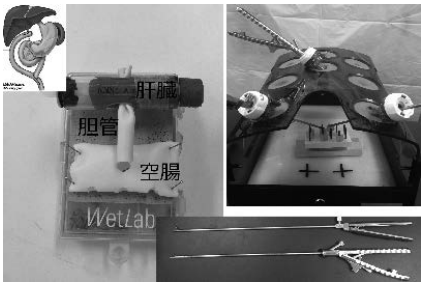


図３　評価実験用の吻合キット（左図），トレーニングボックス（右上），ストレート形状鉗子（右下）

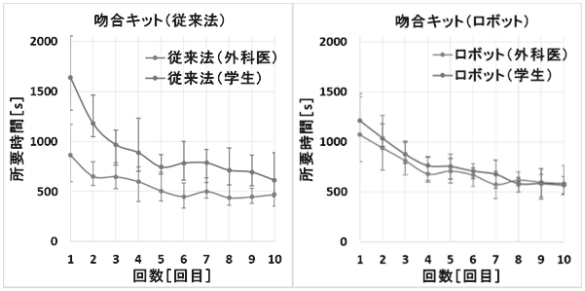


図４　評価実験の結果　従来法（左図），手術支援ロボット（右図）

をまとめたものが図４である．左図に示すストレート鉗子を用いた従来法では，経験の差が歴然であるが，手術支援ロボットを用いた右図ではほぼ差がない．手術支援ロボットは手技の学習時間の短縮，技術の底上げや医師の疲労低減などに有効であることを実証している[4]．

4. 実用化した内視鏡操作システム

手術支援ロボットは高度医療機器に分類され，薬事承認のためには時間と費用を要する．そこで，起業当初より，まず手術支援ロボットから派生した腹腔鏡手術用の内視鏡操作システムの実用化を目指した[5]．

腹腔鏡手術は，術者が細い筒から鉗子類を入れ，別の穴から挿入した内視鏡の映像をモニタで見ながら体内で縫合などを行う．執刀医のほかに内視鏡を保持し，執刀医の口頭指示の下，内視鏡の視野を操作する助手（スコピスト）が必要である．医師不足や内視鏡の3D化に伴う手振れによる酔いの発生などから，内視鏡を保持するロボットアーム開発の

ニーズは高い．いくつか商品化されたものがあるが，いずれも普及するに至っていない．その原因の一つに，操作方法があると考えた．従来の機器は音声あるいは手元のスイッチを用いるものが多いが，直感性や応答性に課題があった．

そこで，術者の頭部の動作と連動して操作可能なシステムを開発した．内視鏡を保持するロボットアームの各軸はすべて空気圧サーボ制御を用いた駆動であり，滑らかな動作を実現している．内視鏡挿入位置を中心とする回転３自由度および挿入方向の並進１自由度の計４自由度を有している．執刀医の手術帽に３軸ジャイロセンサを装着し，頭部の左右，上下動作を検知する．医師の頭の動きによって，直観的かつリアルタイムに操作を指令することができる．術者の足下にはフットスイッチが配置され，これを押している間のみ保持アームが駆動する．したがって，保持アームにより視野の移動を行わない間は，スイッチから足を外すことで執刀医は自由に頭部を動かすことができる．また，前後と回転動作は別のフットスイッチで行う．

図５に開発の変遷を示す．起業前の2013年に臨床試験が実施できるプロトタイプを試作，起業後の2014年に改良版を製作し，2015年夏に図５右に示す上市版が完成した．医療機器でも最近はデザイン性が要求されることから，外部に委託して洗練させた．転倒防止や運用のあらゆるリスク分析の結果，予想以上に大きなものとなってしまった．研究開発段階と実用化の間のギャップの大きさを痛感した．また，電気安全試験や破壊試験のために，はじめの段階で10台弱の機器を製造する必要があり，その他を含めて予想以上に費用が発生した．かなり余裕を見た資金計画のつもりであったが，実際には冷や汗の連続であった．

医療機器の製造のためには，製品の全責任を負う製造販売業を取得する必要がある．また，その販売のためには販売業の取得を要する．ただし，大学発ベンチャーが販売業を取得しても，販売していくことは容易ではない．そこで，設立したベンチャー企業では，医療機器の販売業許可を取得したが，実際には大手医療機器の会社に販売を委託している．販売契約書の作成など，法務面でもサポートがないと大変である．また，機器のメンテナンス体制など製品開発以外の業務も多数ある．

医療機器の場合，すぐに販売とはならず，はじめに試用期間でその有効性が検証される．実用化した内視鏡操作システムは，現在30以上の病院において，腹部外科や泌尿器科を中心に２月末の段階で100症例以上の手術に使用されている．概ね高評価であるが，実際の購入につながる割合は現段階では不明である．

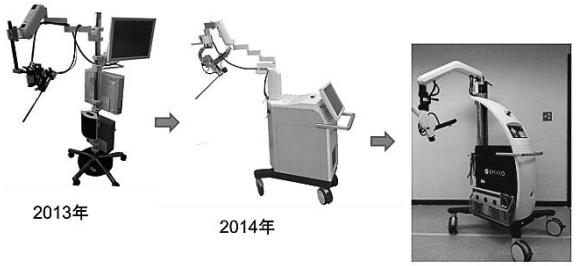


図５　内視鏡操作システムの開発変遷

5. おわりに

空気圧サーボ制御を用いた医療機器開発を目指す大学発ベンチャー企業における経験を述べさせていただいた．起業の準備はSTARTプロジェクトにおけるプロモータであるベンチャーキャピタルの支援下でかなり周到に実施した．それでも，実際には予想外の費用や想定外の開発の遅れなどさまざまな問題が発生した．ベンチャー企業の利点であるフットワークの良さを活かし，外部の協力を積極的に活用して，スピード感と方向修正する柔軟性を持って進むことが重要なことを経験した．現在，2019年に手術支援ロボットを上市することを目指して開発を進めている．

最近，ベンチャー企業設立のためのサポート体制が充実しており，起業には適した環境が整っている．介護や福祉分野ではソフトロボティクスへの期待が大きい．また，大出力が要求される分野では油圧駆動の魅力が再認識されている．フルードパワー関連は多くの可能性があると考える．

参考文献

1）Shearer J.E.：Study of Pneumatic Process in the Continuous Control of Motion with Compressed Air-I, II. Transactions of ASME, Feb., p. 233-249（1956）
2）香川利春，蔡茂林：圧縮性流体の計測と制御―空気圧解析入門，日本工業出版（2010）
3）Kotaro Tadano, Kenji Kawashima：Development of a Master Slave System with Force-Sensing Abilities Using Pneumatic Actuators for Laparoscopic Surgery, Advanced Robotics, Vol. 24, No. 12, p. 1763-1783（2010）.
4）中村麻由，赤星径一，伴大輔，菅野貴皓，川嶋健嗣：腹腔鏡下手術における支援ロボットの評価研究，第24回日本コンピュータ外科学会大会，15-4，（2015）
5）只野耕太郎，川嶋健嗣，田中直文，小嶋一幸：空気圧駆動ロボットアームとヘッドマウントディスプレイを用いた立体内視鏡操作システム，日本医工学治療学会，Vol. 24, No. 3, p. 177-184（2012）

（原稿受付：2016年３月23日）

トピックス

特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム …特許文献を見る２

著者紹介

木原和幸（きはら かずゆき）

工業所有権協力センター
〒135-0042 東京都江東区木場１－２－15
E-mail : k-kihara@sctv.jp

1974年神戸大学工学部計測工学科卒．東京計器入社，パワーコントロール研究室長，油空圧技術部長等を経て，現在に至る．比例弁，サーボ弁，ピストンポンプ等の油圧機器とそれらを制御するコントロールシステム等の開発に従事．日本フルードパワーシステム学会会員．

1. はじめに

前稿までに国際特許分類（IPC）および日本における特許の分類の大まかな概要を紹介し，具体的な事例として，低騒音，高圧化，耐コンタミ性に関する特許文献をキーワードから検索する方法を示した．さらに，アクチュエータと流体回路に関連して，わかりにくい点も示した．前稿では実際の特許文献として比例電磁式制御弁の特許文献例で，どのようなFI，Fタームが付与されてるかを示した．本稿は，ポンプ関連の特許文献の例を前稿と同様な観点から紹介する．

2. 特許文献１

最初に紹介する特許文献は，特開平6-129346可変容量形ピストンポンプに関するものであり，簡単な構成で降圧時の応答性を良好にし，中立位置付近での制御性と省エネ性を向上させることを目的としている．請求項１，代表図，要約に記載の構成を示す．

【特許請求の範囲】

【請求項１】中立位置から正方向に最大傾転位置まで傾斜角を変化させることにより吐出量を調整する斜板と，この斜板を中立位置から正方向に押圧するバイアス手段と，このバイアス手段の押圧力に抗して前記斜板の正方向の傾斜角を調整すると共に，該斜板を中立位置から負方向に押圧して負方向の傾斜角を調整する制御手段とを有する可変容量形ポンプにおいて，前記バイアス手段に，前記斜板が負方向に傾転した時に吐出圧を低下させる第１の圧抜孔を設けると共に，前記制御手段に，前記斜板の負方向の最大傾転位置近傍で内圧を逃がすための第２の圧抜孔を設けたことを特徴とする可変容量形ポンプ．

図１に代表図（構成図）を示す．

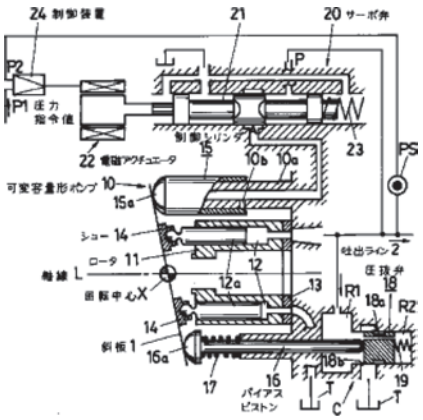


図１　代表図

【構成】可変容量形ポンプ10の吐出量を調整する斜板１の上下に制御シリンダ15とバイアスピストン16の球状先端部15a，16aをそれぞれ圧接させ，制御シリンダ15をサーボ弁20を介して吐出ライン２に接続し，圧抜弁18をバイアスピストン16に圧接させ，斜板１が負方向に傾転した時に，バイアスピストン16を介して圧抜弁18を右方に押圧し，第１の圧抜孔18bを開放させて圧力作用室R1内の圧油を排出し始め，最大傾転位置近傍で制御シリンダ15が第２圧抜孔10bを開口させて降圧時の応答性を向上させる．

特許情報プラットフォーム[1)]から経過情報の出願情報を参照すると，付与されているFIは下記である．

①F04B1/20
②F04B1/26，101
③F04B49/00，331
④F04B1/32
⑤F04B49/12

①，②，④はテーマコード3H070の往復動ポン

プ⑴である．3H070の最上位のFIがF04B1/00である．その下位にF04B1/12があるが，F04B1/12はF04B1/20の上位である．すなわち，F04B1/20はこれらを満たす内容である．なお，下位になるほど内容説明の先頭の・の数が増える．

F04B1/00　シリンダの数または配列に特徴のある多シリンダ機械またはポンプ

F04B1/12・主軸軸線に対して同軸または平行または傾斜したシリンダ軸線を有するもの

F04B1/20・・回転シリンダブロックを有するもの

　F04B1/26，101も同様に下記のようになる．

F04B1/26の上位が前述のF04B1/12であるので，F04B1/26以下を示す．

F04B1/26・・制御

F04B1/26,101・・・送り出し圧力によるもの

　F04B1/32は直前の上位がF04B1/30，さらに上位がF04B1/26である．

F04B1/30・・・回転シリンダブロックを有する機械またはポンプのためのもの

F04B1/32・・・・回転斜板およびシリンダブロックの相対的な位置を変えることによるもの

　③のF04B49/00，331はテーマコード3H045容積形ポンプの制御であるが，このテーマコードは2007年に廃止され，3H145に変更されている．3H145にはこのFIと同じ記号はないが，⑤のF04B49/12が3H145容積形ポンプの制御である．

F04B49/00　グループF04B1/00 ～ F04B47/00に分類されない，または上記グループにはない，機械，ポンプまたはポンプ装置の制御または安全手段

F04B49/12・作動部材の行程のの変更によるもの

　上に述べている上位，下位については表１，２を参照されたい．

　また，これらのテーマコードにはFタームがある．本文献に付与されているFタームを表３，４に示す．

　表３，４では上位下位の・記号を省略している．例えば，AA04の表現を上位から表記すると・ポンプの型式は，・・容積形で，・・・往復ピストンで，・・・・斜板・斜軸形となる．

　尚，本文献のFI，Fタームは請求項，構成等から適切と考えられる．

表１　テーマコード3H070の抜粋

F04B1/00シリンダの数または配列に特徴のある多シリンダ機械またはポンプ（F04B3/00が優先；流体駆動ポンプF04B9/08；往復動機械またはポンプの制御一般F04B49/00）
F04B1/02・２つのシリンダを有するもの（Ｖ形配列F04B1/04）
F04B1/04・星形またはファン形配列のシリンダを有するもの
F04B1/06・・制御
F04B1/07・・・二つの部材，例．カムと駆動軸，の間の相対的な偏心性を変えることによるもの
F04B1/08・・・送り出し圧力により調整されるもの
F04B1/10・・可動シリンダ，例．回転形
F04B1/12・主軸軸線に対して同軸または平行または傾斜したシリンダ軸線を有するもの
F04B1/14・・固定シリンダを有するもの
F04B1/16・・・２組以上のシリンダまたはピストンを有するもの
F04B1/18・・・自動分配用部材をもつもの，すなわち作動流体により動くもの
F04B1/20・・回転シリンダブロックを有するもの
F04B1/22・・・２組以上のシリンダまたはピストンを有するもの
F04B1/24・・・・主軸軸線に対して傾斜しているもの
F04B1/26・・制御
F04B1/26，101・・・送り出し圧力によるもの
F04B1/26，102・・・機械操作によるもの
F04B1/28・・・固定シリンダを有する機械またはポンプのためのもの
F04B1/29・・・・回転斜板およびシリンダブロックの相対的な位置を変えることによるもの
F04B1/30・・・回転シリンダブロックを有する機械またはポンプのためのもの
F04B1/32・・・・回転斜板およびシリンダブロックの相対的な位置を変えることによるもの
F04B1/34・グループF04B1/02 ～ F04B1/32の単一グループに分類されない制御

表２　テーマコード3H145の抜粋

F04B49/00グループF04B1/00 ～ F04B47/00に分類されない，または上記グループにはない注目すべき，機械，ポンプまたはポンプ装置の制御または安全手段
F04B49/00@AA駆動源としてエンジンを用いるもの
F04B49/00@ZZその他のもの
F04B49/02・停止，始動，無負荷または空転の制御（電気的に制御されるものF04B49/06）
F04B49/03・・弁によるもの
F04B49/04・フロートにより調整するもの（F04B49/025が優先）
F04B49/06・電気を用いる制御（フロートが電気スイッチに働いて調整するものF04B49/04）
F04B49/08・送り出し圧力による調整
F04B49/10・他の安全手段
F04B49/12・作動部材の行程の長さの変更によるもの

F04B49/14・・往復運動の経路にある接合点を調整するもの	
F04B49/16・作動室の空所容積の調整によるもの	

表３　3H070のFターム

作動流体	AA01	油
型式	BB04	アキシャル型（例，斜板）
	BB06	可動シリンダ型
目的，効果	CC11	制御
	CC12	容量制御
	CC21	ポンプ能力，効率向上
	CC37	その他
構成	DD55	流体アクチュエータによる

表４　3H145のFターム抜粋

ポンプの態様	AA04	斜板・斜軸形
	AA13	多シリンダ
	AA24	油（含，燃料）
	AA33	可変容量形ポンプのため
	AA35	開回路用
制御目的	BA16	カットオフ制御
	BA28	制御系自体としての改善
	BA32	省エネ
制御信号	CA03	吐出側の圧力
	CA28	操作・指令
制御形態	DA25	斜板・斜軸の制御
制御系各部構成	EA41	出力部
油圧回路用ポンプのための構成	GA22	容量制御部材の制御信号
	GA23	ポンプ吐出圧

3. 特許文献２

もう一つの特許文献は特開平5-196001サーボモータドライブ油圧ポンプの流量・圧力制御装置に関するものであり，簡単な構成で降圧時の応答性を良好にし，中立位置付近での制御性と省エネ性を向上させることを目的としている．請求項１，代表図，要約に記載の構成を示す．

【特許請求の範囲】

【請求項１】油圧ポンプと，該油圧ポンプを駆動し，その１回転当たりの吐出量を基準として該ポンプの回転数を制御してその吐出量を制御するサーボモータと，該サーボモータを駆動する増幅器と，前記サーボモータの回転数の検出によって油圧ポンプの吐出流量を検出する流量検出手段と，前記油圧ポンプの吐出圧力を検出する圧力検出手段とを備え，流量指令値と前記流量検出手段による吐出量検出値との偏差を第１の補償要素を介して前記増幅器に入力させて流量制御を行なう第１の閉ループ系と，圧力指令値と前記圧力検出手段による吐出圧力検出値との偏差を第２の補償要素を介して前記増幅器に入力させて圧力制御を行なう第２の閉ループ系とを形成すると共に，前記第１の補償要素の出力と前記第２の補償要素の出力のうち小さい方の出力のみを前記増幅器に入力させるようにして前記第１の閉ループ系と第２の閉ループ系とを切り換える制御系切換手段を設けたことを特徴とするサーボモータドライブ油圧ポンプの流量・圧力制御装置．

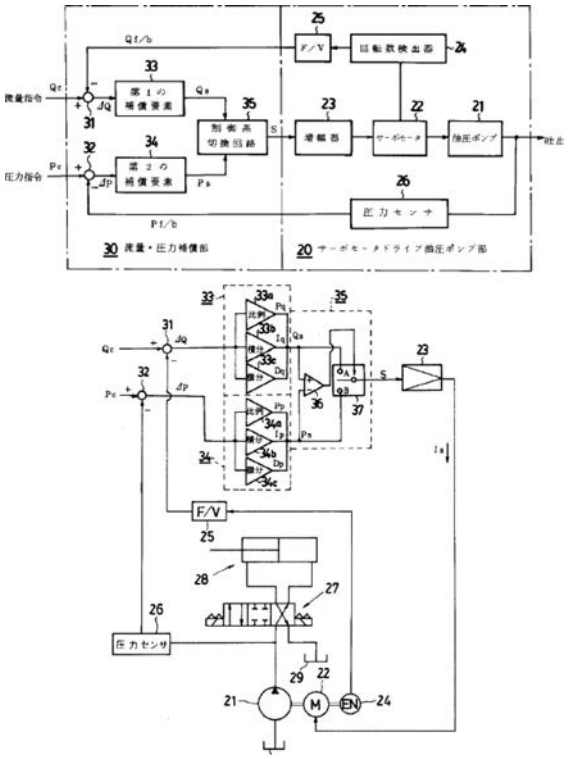


図２　基本油圧回路と制御ブロック

【構成】油圧ポンプ21の回転数を制御するサーボモータ22を増幅器23の出力電流によって駆動する．その油圧ポンプ21の吐出量と吐出圧力を検出し，流量指令値Qcと流量検出値Qf/bとの偏差ΔQを第１の補償要素33を介して増幅器23に入力させて流量制御を行なう第１の閉ループ系と，圧力指令値Pcと圧力検出値Pf/bとの偏差ΔPを第２の補償要素34を介して増幅器23に入力させて圧力制御を行なう第２の閉ループ系とを形成すると共に，制御系切換回路35によって，第１の補償要素33の出力Qsと第２の補償要素34の出力Psのうち値が小さい方の出力のみを増幅器23に入力させるようにして流量制御と圧力制御を切り換える．

付与されているFI，Fタームは下記の表５，６に示す．表の１行目にFI，２行目以降にFタームを示す．

表5　3H001　サーボモータ(1)

F15B9/00	追従動作をするサーボモータ	
目的・効果	AA06	安定化
油空圧制御回路の要素	AB02	多方弁（サーボ弁）
	AB06	流量制御弁（絞り弁）
	AB07	圧力制御弁
フィードバック方式	AC02	力フィードバック
	AC03	位置フィードバック
比較器への入力手段	AD04	電気，磁気的
フィードバック，流体機器の制御要素	AE11	電気，磁気的
	AE22	制御系の特性補償回路

表6　3H145　容積形ポンプの制御

F04B49/06,321@A	回転速度制御	
ポンプの態様	AA02	容積形
	AA12	単数台
	AA24	油（含，燃料）
	AA33	可変容量形ポンプのため
	AA35	開回路用
制御目的	BA16	カットオフ制御
	BA19	流量制御
	BA20	圧力制御
	BA28	制御系自体としての改善
	BA37	容量変更時
	BA38	音・振動の低減
制御信号	CA03	吐出側の圧力
	CA09	回転速度・回転数
	CA29	設定値
制御形態	DA05	回転速度制御
	DA48	記憶した特性による制御
制御系各部の構成	EA17	回転状態
	EA26	電気的信号
	EA37	関数的関係を記憶・発生
油圧回路用ポンプのための構成	GA15	電動機との関係

3H001の技術の概要は参考文献[9]でも紹介したが，油圧シリンダ，油圧モータの位置を制御するものにおいて，油圧シリンダ，油圧モータの位置を検出し，その検出値を比較器にフィードバックして設置値と検出値を比較し，位置制御を行うものとされているが，本テーマコードにはF15B9/08@Cの力フィードバックなども含まれているので，やや曖昧である．ただし，本特許文献はアクチュエータに絡むフィードバックではないので，あまり一致していない．圧力のフィードバック制御があるので，やや関係する程度である．なお，FタームのAB02，AB06，AB07は間違っていると考えられる．

3H145はほぼ適切であるが，本特許文献の実施例は固定ポンプをサーボモータで回転速度制御をするものに対する制御方法であるので，AA33の可変容量形ポンプに限定するのではなく，AA34の固定容量形ポンプのFタームも必要である．

3. おわりに

本稿で紹介した特許文献はポンプに関するものであるが，特許文献２のポンプのサーボモータによる回転数速度制御はテーマコード3H001は参考程度と考え，主に3H145の容積形ポンプの制御が適切ではないかと判断した．このようにやや疑問と思える文献へのFI等もある．類似文献を調べるために，キーワード検索をする場合は複数の文献から，FI，Fタームを推定するのがより確実である．

本稿をより良く理解するために，参考文献[2)〜10)]に示す特許文献を調べるを参照されたい．

参考文献

1）特許情報プラットフォーム　http://www.j-platpat.inpit.go.jp/web/all/top/BTmTopPage
2）木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用１…特許の基本，フルードパワーシステム，Vol. 44, No. 4, p. 241-243（2013）
3）木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用２…特許の基本，フルードパワーシステム，Vol. 44, No. 6, p. 362-364（2013）
4）木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用３…日本の分類・テーマコード１，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 2, p. 81-83（2014）
5）木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用４…日本の分類・テーマコード２，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 4, p. 184-186（2014）
6）木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用５…類似文献の検索１，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 6, p. 285-287（2014）
7）木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用６…類似文献の検索２，フルードパワーシステム，Vol. 46, No. 2, p. 90-92（2015）
8）木原和幸：特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…特許電子図書館のサービス終了，フルードパワーシステム，Vol. 46, No. 4, p. 179-181（2015）
9）木原和幸：特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…アクチュエータと流体回路，フルードパワーシステム，Vol. 46, No. 6, p. 270-272（2015）
10）木原和幸：特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…特許文献を見る１，フルードパワーシステム，Vol. 47, No. 2, p. 82-84（2016）

（原稿受付：2016年４月４日）

研究室紹介

沼津工業高等専門学校　村松・前田研究室

著者紹介

村松久巳（むらまつひさみ）

沼津工業高等専門学校機械工学科
〒410-8501 静岡県沼津市大岡3600
E-mail : muramatu@numazu-ct.ac.jp

1989年東京理科大学大学院工学研究科博士課程修了，現在，沼津工業高等専門学校教授，空気圧工学の研究に従事，日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，日本音響学会，ターボ機械協会の会員，工学博士

前田篤志（まえだあつし）

沼津工業高等専門学校機械工学科
〒410-8501 静岡県沼津市大岡3600
E-mail : maeda@numazu-ct.ac.jp

2012年新潟大学大学院自然科学研研究科修士前期課程修了後，同校後期課程に入学，2015年沼津工業高等専門学校助教，浮力噴流における特異流入現象に関する研究に従事，日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会の会員

1. はじめに

沼津工業高等専門学校は昭和37年に５年生一貫教育の高等教育機関として開校した．開校時には，機械工学科と電気工学科でスタートしたが，改組と追加の設置が行われ，現在，機械工学科，電気電子工学科，電子制御工学科，制御情報工学科および物質工学科から構成されている．高等専門学校は中学校卒業を入学資格としており，早期からの技術者教育を行っている．本高専では豊かな人間性を備え，社会の要請に応じて工学技術の専門性を創造的に活用できる技術者の育成を行い，もって地域の文化と産業に寄与することを教育目的としている．平成８年に３専攻で構成される専攻科が設置された．さらに平成26年に技術の高度化と産業構造の変化に対応できる技術者を育成するために，総合システム工学専攻の１専攻に改編された．この専攻内に本科の５学科を複合融合した環境エネルギー工学，新機能材料工学および医療福祉機器開発工学の３コースを設けている．環境エネルギー工学コースでは，環境と新エネルギー，エネルギー変換工学及びエネルギー応用工学など，新機能材料工学コースでは，鉄鋼・非鉄・セラミックス材料，生体材料など，医療福祉機器開発工学コースでは，医用機器工学，福祉機器工学などを学修する．本研究室では，本科の学生４名と専攻科学生１名が所属しており，村松教授と前田助教が卒業研究と専攻科研究を指導している（図１）．本稿では研究テーマと研究室の活動を紹介する．

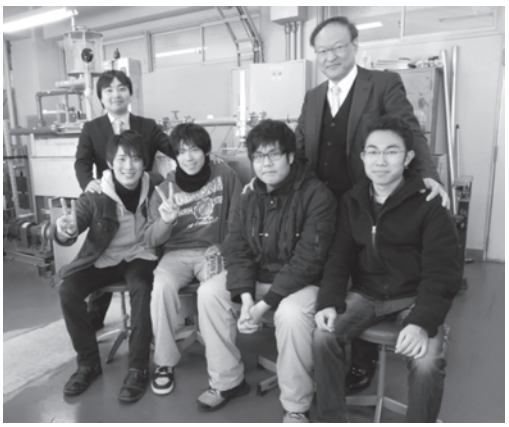


図１　研究室のメンバー

2. 研究紹介

2.1　環境エネルギー工学に関する研究テーマ

空気圧騒音の評価とその低減化と，浮力噴流の流動状態に関する研究を行っている．空気圧騒音の評

図２　半無響室と音響分析装置

価とその低減化に関する研究では，半無響室内に設置した空気圧機器から発生する音の物理的な評価と心理的な評価を行い，その低減化に取り組んでいる（図２）．物理的な評価には複数のマイクロホンを使用した音響特性の解明，音響インテンシティによる音源探査と音響パワーレベルの算出に特徴があり，高性能な空気圧用消音器の開発に役立てている．またラウドネス，シャープネス，変動強度，ラフネスなどに代表される音質評価が実施できる．物理的な評価とともに音質メトリクスの評価を行うと，高品位な空気圧機器の開発に役立てることができる．現在，酸素濃縮器用消音装置の開発に取り組んでいる．この消音装置は上流に置かれた層流化素子と多孔質材からなる消音器で構成されている．酸素濃縮器用消音器は在宅酸素療法に用いるため，静寂な室内の音環境にいる使用者の近傍に設置して長時間運転される．このため要求される低騒音のレベルは生産現場の労働安全衛生規則と大きく異なる．半無響室により暗騒音の影響を抑えることができるため，本研究の研究遂行に大きな役割を担っている．発生する騒音が使用者に不快とならない性能が得られるようにさらに研究を進めている．

浮力噴流の流動状態の研究について説明する．浮力噴流には特異流入現象が発生する．図３に示すように特異流入現象は，ノズルから水槽内へ密度の異なる流体の噴流を発生させるとき，水槽内の周囲流体がノズル内部へ逆流する現象である．本研究では粒子イメージ流速計測法PIVやレーザー誘起蛍光法LIFなどの可視化技術を用いる．これら２つの可視化法を用いた画像解析の結果から速度，濃度および圧力の分布が測定でき，逆流現象や交換流の発生原因，下流への影響を明らかにすることができる．この解明は発電所における温排水の拡散や効率的な空調システム，プラントにおける冷却用気体と周囲空気との混合爆発の抑止などに役立てることができる．

2.2　医療福祉機器開発工学に関する研究テーマ

平均寿命から健康寿命を高める視点に保健の考え方が変化している．高齢者の生活の質を確保するためには健全な身体機能を有することが大切である．そこで，本研究室では高齢者のリハビリテーションを目的にして立位保持装置，重心移動装置，これらを組み合わせた空気圧装置を開発している．空気圧装置は静止立位の姿勢の保持，前後・左右方向への重心移動，外乱が加えられた場合のステッピングなどが訓練できる機能を有している．空気圧装置には空気圧ゴム人工筋肉が複数取り付けられており，柔軟な支援を長所としている．支援の効果を実験的に明らかにするために，図４に示す医療福祉機器開発用計測機器を用いている．重心動揺計を使用して圧中心を計測し，身体の揺らぎから静的平衡機能を評価できる．シート式下肢加重計を用いて足裏の圧分布と圧中心の移動が計測でき，動的なバランス機能が評価できる．加えてモーションキャプチャーシステムにより，３次元の動作分析が可能となっている．臥位，座位，立位の姿勢の保持や姿勢の変化，歩行，上肢や下肢の運動などに対してフルードパワーが取り組むテーマは多いと考えられる．本研究で開発した空気圧装置に新たな機能を追加して，身体機能の回復や維持に役立つように研究を進めている．

3.　学校公開における研究室の活動

学校公開での研究室の活動を紹介する．本高専では低学年において工学分野への興味を深めて，かつ学習意欲を向上することを目指して，ミニ研究を前期に実施している．教員が提案した研究テーマを学生が自由に選び，所属学科の枠を超えてチームを編

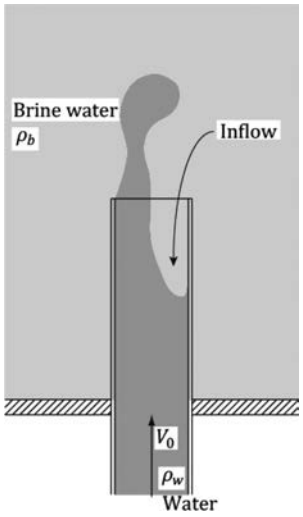


図３　浮力噴流の流動状態の模式図

図４　医療福祉機器開発用計測機器

成して課題を解決する．この研究成果をポスターセッションの場で発表して，教職員が聴講することに加えて保護者に公開している（図５）．本研究室では，「音の視覚化」，「信号音の調査とその音響特性の評価」，「音のイリュージョン！耳に錯覚はあるか」のテーマの研究を実施してきた．本科の高学年において振動工学や応用物理の授業で振動の内容を学習した後に，専攻科において音響工学を学ぶ．学生は音響について興味を強く持っているが，低学年では学修する機会がないため，音楽好きの学生に人気がある．ミニ研究の発表会では，クントの実験，学生が自作した信号音の試聴，会話における音素修復を実演した．来校した保護者は学生の学習の様子を見学することができるとともに，研究内容に触れられるよい機会となっている．

中学生とその保護者を対象として夏季休業期間に一日体験入学を行っている．本研究室ではウインドカーを製作し，走行の実演をするとともにその原理を流体力学に基づき説明を行った（図６）．プロペラ

図５　ミニ研究のポスターセッション

図６　ウインドカーの走行とその原理の説明

図７　回流水槽を用いた翼周りの流れの可視化

形とサボニウス形のウインドカーを製作し，扇風機に向かって前進する様子を観察した．２種類のウインドカーの走行の違いを確認し，車の推進力が揚力または抗力によって生じることを理解して，風力エネルギーの利用について理解を深めることができた．

11月に開催された高専祭において研究室展示を行った．ヘルショーの流線観測装置と回流水槽を用いて，物体周りの流れの可視化を実施した（図７）．研究室に所属する卒業研究の学生は説明と実演を担当し，流線からわかる流体の運動，翼形の名称，カルマン渦の発生，トレーサの種類など授業で学んだ内容を熱心に説明していた．

4. おわりに

本稿では，環境エネルギー工学と医療福祉機器開発工学に関する研究内容を紹介した．学会での研究発表を目指して，学生はこれらの研究に積極的に取り組んでいる．またフルードパワーに直接関係しない分野であるため言及しなかったが，小型風力発電用風車の開発や小規模水力発電の技術相談を行っている．地域の企業や社会から高専の活躍を求められており，学校全体での技術相談は年々増加している．小学校・中学校への出前授業や市からの夏休みセミナーの講師依頼があり，研究室の学生とともにこれらの企画を担当させていただいている．これらの活動が科学技術に興味を持つ生徒と児童が増えて，将来の技術者や研究者を目指すことに役立つことができれば幸いと考えている．

最後に，紙面を拝借して研究室の紹介をさせていただき，深く感謝申し上げる．

（原稿受付：2016年３月31日）

企画行事

平成27年度ウィンターセミナー開催報告「フルードパワー技術を支える要素技術」

著者紹介

兵藤訓一（ひょうどうのりかず）

東京計器株式会社
〒327-0816 栃木県佐野市栄町１－１
E-mail : n-hyoudou@tokyo-keiki.co.jp

1993年株式会社トキメック（現　東京計器株式会社）入社．油圧機器・システムの開発・設計に従事．日本フルードパワーシステム学会会員

1. はじめに

平成27年度ウィンターセミナー「フルードパワー技術を支える要素技術」が平成28年３月18日（金）に機械振興会館地下３階B3-１において開催された．本稿では，本セミナーの趣旨および当日行われた４件の講演内容の概要について報告する．

2. 開催趣旨

産業のあらゆるシーンを支える油空圧機器には，いろいろな要素技術が使われている．

そこで本セミナーでは，「フルードパワー技術を支える要素技術」というテーマで企画し，４名の講師に油空圧機器に使用される要素技術について講演をいただいた．

3. 講演の概要

3.1　空気圧電磁弁のソレノイド

はじめに，株式会社コガネイの寺木功一氏より「空気圧電磁弁のソレノイド」について講演をいただいた（写真１）．

寺木氏からは空気圧電磁弁の種類について体系的に解説いただいた．使用されているソレノイドについては１）平板形，２）プランジャ形，３）支点形について，それぞれの動作原理を各ポートからの空気の流れ，そして空気圧力のバランスなどを丁寧に説明いただいた．特徴的な電磁弁としては，プランジャ形比例ソレノイドについてその磁束密度を考慮したソレノイド形状の説明，支点形ソレノイドを応用した超小形電磁弁についてレバー比の検討が設計の要になる点，超高速電磁弁についてはその応答が1,000Hzもの高速で切換え可能なことなどを紹介いただいた．

まとめとして，「電磁弁に必要な性能を満足するためには，トレードオフを解決したソレノイドを設計する必要がある」という貴重な設計指針を教示いただいた．

写真１　講演される寺木氏

3.2　自動車油圧システムとソレノイドバルブ

つぎに，日本電産トーソク株式会社の佐貫宏典氏より「自動車油圧システムとソレノイドバルブ」について講演をいただいた（写真２）．

佐貫氏からは，自動車用のトランスミッションやエンジンに使用されている油圧制御用のソレノイドバルブについて「駆動系」，「操舵系」，「制御系」それぞれについて，求められる機能や設計についてご解説いただいた．特に駆動系油圧システムにおいては，１）自動変速機の種類，２）ATの概要と動作原理など詳しく解説いただいた．またそれらに使用されるソレノイドバルブには変速性能向上のため，DUTY弁から比例弁が使用されるようになり，信頼性（耐コンタミネーション性の向上）が重要であることなどについて説明いただいた．

そして，装置の組立技術としては，今までとは異なり圧力がかかる部分にも樹脂化を進めることにより装置組立の簡素化による低コスト化と軽量化に貢献しているなど，貴重な講演をいただいた．

写真２　講演される佐貫氏

3.3　油圧機器の転がり軸受について

つぎに，日本精工株式会社の千葉全紀氏より「油圧機器の転がり軸受について～農業機械向けHST用軸受けのご紹介」について講演をいただいた（写真３）．

千葉氏からは農業機械の市場動向・トレンドをご紹介いただいた。市場動向が世界人口増加により食料需要が増していること，そしてバイオ燃料などにより食用以外の需要増加により農業機械の需要が増し，そのなかで農業機械の変速装置，とくに高出力のHST（無断変速機）が増加しているとのこと．このHST用スラスト玉軸受けについて実際に発生した課題に対する開発案件を興味深く解説いただいた．

写真３　講演される千葉氏

3.4　ホッピング用低摺動パッキンの開発について

最後に，三菱電線工業株式会社の東吉夫氏より「ホッピング用低摺動パッキンの開発」について講演をいただいた（写真４）．

東氏からはテレビ番組で放送された「空気圧を動力としたホッピングを制作し，プロのホッピング選手がギネス記録に挑戦した」内容について，空圧シールの改良や番組の裏話などを紹介いただいた．講演のなかではシール（パッキン）の歴史，０リングの概要やリップパッキンと比較した場合の長所・短所，そして今回開発したパッキンのポイントなどの興味深い説明をいただいた．なお，三菱電線工業株式会社殿からはシール材のハンドブックを提供いただいた．

写真４　講演される東氏

4. おわりに

セミナー参加者は，油圧機器メーカ，空圧機器メーカなど幅広い層に参加いただいた（写真５）．セミナー参加者からのアンケート結果では，「要素技術のセミナーは機会が少ないため，大変有意義であった」との感想が多く寄せられた．また，「実際に発生した課題に対して，どのように解決したかなどの内容をセミナーで聞くことができたので，とても参考になった」などの意見をいただくことができた．

要素技術はフルードパワーを支える重要な基幹技術である．本セミナーが参加いただいた方々の業務に活かしていただければ幸いである．

写真５　セミナー集合写真

最後に，本セミナーの企画・運営にあたり，貴重な講演をいただいた講師の方々，並びにご協力いただいた関係各位に感謝の意を表し，報告を終える．

（原稿受付：2016年４月７日）

会　告

〈理事会・委員会日程〉

7月 5日	委員長会議
7月22日	企画委員会
7月25日	基盤強化委員会
8月 4日	編集委員会
9月28日	情報システム委員会
—	理事会

〈理事会報告〉

5月27日　11：00～13：00　機械振興会館
地下3階B3—2号室（出席者20名）
1）総会の準備状況について
2）評議員会開催状況について
3）平成27年度決算のみなし決議について
4）福岡の次の国際シンポジウムの委員長の推薦について
5）第10回国際シンポジウム福岡の進捗状況について
6）春季・秋季講演会の開催準備状況について
7）会員の推移と入退会者について
8）学会財務基盤の強化の進捗状況について
9）各委員会からの報告
10）その他

〈委員会報告〉

平成28年度第1回情報システム委員会
6月2日　16：00～17：30
法政大学市ヶ谷キャンパス（出席者10名）
1）会員や登録の管理システムの更新状況について
2）今年度の委員会委員について
3）会議報告担当について
4）今後のHP更新作業について
5）メイリングリストの配信管理について
6）会員カードの作成について
7）アーカイブ用講演論文集の掲載について
8）研究者リストの更新作業について
9）英語版HPについて
10）その他

平成28年度第1回編集委員会
6月6日　14：00～17：00　東京工業大学田町CIC
5階リエゾンコーナー501（出席者17名）
1）学会誌発行報告
2）学会誌編集計画
・Vol.47 No.4「フルードパワーを支える作動油の劣化と対応」
・Vol.47 E1（電子出版号）「緑陰特集」
・Vol.47 No.5「フルードパワーを活用した大規模研究開発（仮）」
・Vol.47 No.6「機能性流体を活用したフルードパ輪技術の実用化最前線（仮）」
・Vol.48 No.1「柔軟構造のフルードパワー・アクチュエータ（仮）」
3）その他
・会議報告
・トピックスについて
・今後の特集企画について

会　告

第35期　通常総会終了

1．日　時　　平成28年5月27日(金)
　　15時00分～ 16時40分
2．場　所　　東京都港区芝公園3丁目5番地8号
　　機械振興会館　研修1号室
3．議事の経過および結果

15：00開会，事務局より出席者および委任状の数を報告し，ついで築地徹浩会長が定款第15条「総会の議長は、会長がこれにあたる」に基づき議長となり，議事録署名人として，CKD株式会社和田重伸殿，KYD株式会社成田晋殿を指名したのち議事に入る.

(報告事項)

報告1　平成27年度事業報告（平成27年度事業報告書）の件

報告2　公益目的支出計画実施報告（公益目的支出計画実施報告書・公益目的支出計画実施報告書に関する監査報告）の件

報告3　平成28年度事業計画（平成28年度事業計画書）の件

報告4　平成28年度収支予算（平成28年度収支予算書）の件

報告1～4に対し庶務委員会小山委員長，会計担当佐藤理事から説明および報告があった.

(議案)

第1号議案　平成27年度決算（貸借対照表，正味財産増減計算書（内訳表を含む），財産目録（財務諸表に対する注記含む），監査報告）の件

第1号議案に対し庶務委員会小山委員長から説明および報告があり，全会一致で可決承認された.

第2号議案　役員交代（平成28、29年度理事及び監事候補）の件

第2号議案に対し築地委員長から説明および報告があり，全会一致で可決承認された.

以上で総会を了し，日本フルードパワーシステム学会賞などの授賞式および学術論文賞・技術開発賞受賞者による受賞記念講演が行われた.

(名誉員推挙)

・東京工業大学名誉教授　横田 眞一　殿

(フェロー称号授与)

・CKD株式会社　和田 重伸　殿
・上智大学　築地 徹浩　殿

(学会賞表彰)

学術論文賞

・岡山理科大学　赤木 徹也　殿，堂田 周治郎　殿，Ying ZHANG（瑩 張）殿

技術開発賞

・株式会社ジェイテクト　安藤 寛之　殿，安藤 淳二　殿，津田 拓也　殿

技術功労賞

・株式会社　小松 隆　殿

学術貢献賞

・東京工業大学特任教授　香川 利春　殿

SMC高田賞

・岡山理科大学　小林 亘　殿

公益財団法人 油空圧機器技術振興財団顕彰

・関西大学　廣岡 大祐　殿，山口 智実　殿，古城 直道
・東京工業大学　鈴森 康一 殿
・岡山大学　神田 岳文　殿

(最優秀講演賞)

講演会で特に優秀な講演をされた方に最優秀講演賞を授与している．昨年11月に開催された秋季講演会で選考された受賞者を，総会後の技術懇談会で表彰した.

・社会人部門　株式会社KYB　吉田 太志　殿
「水圧電磁比例制御弁の設計パラメータが周波数応答特性へ及ぼす影響」
・学生部門　東京工業大学　石田 靖昌　殿
「ピンチ型空気圧サーボバルブの開発」
・学生部門　足利工業大学　岡本 拓也　殿
「異なった内径を有する管を組み合わせたメッシュ電極型ECFポンプ」

(学会賞受賞記念講演)

技術懇談会に先立って，学術論文賞受賞者の赤木徹也殿および技術開発賞受賞者の安藤寛之殿の受賞記念講演が行われた.

第35期通常総会は多数の出席者を得て盛会裡に終り，17時00分より恒例の技術懇談会が開かれ，なごやかな雰囲気のうちにすべての行事が終了した.

会　告　詳細は学会ホームページ（http://www.jfps.jp/）をご覧ください

平成28年度　特別教育講座のお知らせ
「油圧システムのモデリングの基礎をつかむ―ブロック線図とパワーフロー ―」
開催日時：平成28年９月６日（火）９時～ 17時

開催趣旨：

油圧システムのモデル化に必要なシステムの具体的分析力の向上を目標とし，従来のブロック線図とパワーフローに着目した図的表現法に基づく油圧システムのモデル化について，平易に解説します．さらに，演習を通してこの力の向上を図ります．本講座は油圧システムの動特性のコンピュータシミュレーションに対して入門的な位置付けを持ちます．

開催場所：機械振興会館本館地下３階B3-2
（東京都港区芝公園３－５－８）

皆様の積極的なご参加をお待ちしております．

詳細は学会ホームページに随時掲載いたします．

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会　共催
平成28年秋季フルードパワーシステム講演会のお知らせ
開催日：平成28年10月19日(水)，20日(木)

開催趣旨：

平成28年秋季フルードパワーシステム講演会は平成28年10月19日（水）・20日（木）に青森市文化観光交流施設ねぶたの家ワ・ラッセ（http://www.nebuta.jp/warasse/ 青森駅から徒歩１分）で開催されます．本講演会は通常の一般講演およびフルードパワーの魅力にフォーカスした基調講演やオーガナイズドセッション，特別講演，技術懇談会などによる構成を予定しています．詳細は学会ホームページに随時掲載いたしますので，ご確認いただきますようお願いいたします．皆様の積極的なご参加をお待ちしております．

平成28年度　オータムセミナー
「生産技術に貢献するフルードパワー inトヨタ産業技術記念館」のお知らせ
開催日時：平成28年11月25日（金）９：30 ～ 17：00（日時は予定）

開催趣旨：

平成28年のオータムセミナーは，いつもの東京の機械振興会館を飛び出して，日本のものづくり集積地のひとつ中部地区，名古屋市で開催いたします．

私たちの身の回りにあるさまざまな製品や部品，これらを作る生産技術の分野でも，フルードパワーがたくさん使われています．このようなものづくりに色々な形で貢献している事例を第一線で活躍されている企業の方々に具体例を交えてご講演いただきます．

また，セミナー会場となるトヨタ産業技術記念館は，自動車生産と織機の歴史を数多くの展示品で紹介している素晴らしい博物館です．今回は，ぜひ研究者や技術者の皆様に見ていただきたいと考え，午前に館内の自由見学時間を設け，午後から講演形式のセミナーを行います．

皆様の積極的なご参加をお待ちしております．

共催・協賛行事のお知らせ

共催行事

キャビテーションに関するシンポジウム（第18回）
主　　催：日本学術会議　第三部（予定）
　　第18回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会
　　（委員長：理化学研究所理事，東京大学名誉教授・松本洋一郎）
開 催 日：2016年12月8日(木)～9日(金)
会　　場：九州大学医学部百年講堂（〒812-8582 福岡市東区馬出3丁目1番1号）
連 絡 先：九州大学大学院工学研究院　安東　潤　教授
　　TEL：092-802-3449（直通）　FAX：092-802-3368
　　e-mail：cav18@nams.kyushu-u.ac.jp

協賛行事

第44回可視化情報シンポジウム
開 催 日：平成28年7月19日(火)～20日(水)
開催場所：工学院大学 新宿キャンパス　東京都新宿区西新宿1-24-2
ホームページ：http://www.visualization.jp/event/detail/symmp2016.html

日本機械学会関西支部 第344回講習会　実務者のための騒音防止技術（展示，簡易実習付き）
開催日時：2016年7月27日(水)～28日(木)，9：00～17：00
会　　場：大阪科学技術センター4階401号室
　　大阪市西区靱本町1-8-4／電話（06）6443-5324／地下鉄四つ橋線「本町」駅下車　北へ400m
関西支部ホームページ：http://www.kansai.jsme.or.jp/

日本混相流学会混相流シンポジウム2016
主　　催：日本混相流学会
開 催 日：2016年8月8日(月)，9日(火)，10日(水)
会　　場：同志社大学 今井出川キャンパス（京都市上京区）
ホームページ　http://www.jsmf.gr.jp/mfsymp2016/

Dynamics and Design Conference 2016　～交わりは解を導く～
開 催 日：2016年8月23日(火)～26日(金)
会　　場：山口大学常盤キャンパス（山口県宇部市）
WEBページ：http://www.jsme.or.jp/conference/dmcconf16/
講演申込締切：2016年2月22日　申込方法・募集分野：上記ホームページにてご確認ください.
発表採択通知：2016年3月中旬（予定）
論文提出締切：2016年6月中旬（予定）
問合せ先：D&D2016実行委員会　dd2016@jsme.or.jp
　　実行委員長　渡辺　　亨（日本大学）
　　幹事　高崎　正也（埼玉大学）

第34回日本ロボット学会学術講演会
主　　催：一般社団法人 日本ロボット学会
会　　期：2016年9月7日(水)，8日(木)，9日(金)
場　　所：山形大学 小白川キャンパス（〒990-8560 山形市小白川町一丁目4-12）
　　ホームページ　http://rsj2016.rsj-web.org/

トライボロジー会議 2016秋新潟
開 催 日：2016年10月12日(水)，13日(木)，14日(金)
会　　場：朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター（〒950-0078 新潟県新潟市中央区万代島6-1）
申込み・問合せ：一般社団法人日本トライボロジー学会 事務局
　　（〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8機械振興会館407-2号室）
　　TEL 03-3434-1926　FAX 03-3434-3556　E-mail jast@tribology.jp
　　申込みはホームページ http://www.tribology.jpから可能です.

No.16-14　第59回自動制御連合講演会
開 催 日：2016年11月10日(木)，11日(金)，12日(土)
会　　場：北九州国際会場（北九州市）
申込締切：2016年8月1日(月)（7月5日から受付開始予定）
講演申込先及び方法：ホームページからのオンライン申し込みになります。
http://www.jsme.or.jp/conference/rengo59/

エコデザイン・プロダクツ＆サービスシンポジウム（EcoDePS）2016
開催日時：2016年12月7日(水)
開催場所：東京理科大学森戸記念館（東京都新宿区神楽坂1-3）
主　　催：エコデザイン学会連合
後　　援：エコプロダクツ大賞推進協議会（予定）
幹事団体：特定非営利法人エコデザイン推進機構
組織委員長：細田　奈麻絵　物質・材料研究機構グループリーダー／東京大学教授
実行委員長：木下　裕介　産業技術総合研究所研究員
事 務 局：エコデザイン推進機構／エコデザイン学会連合事務局（イートレイ㈱）

21016年度 計算力学技術者（CAE技術者）資格認定事業
（固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者）
実 施 日：認定試験 2016年12月10日(土)
申　　込：2016年8月1日(月)～8月17日(水) 17時
申込方法・申請書類等の詳細は，http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm 参照

会　員　移　動

会員の種類	正　会　員	海外会員	学生会員	賛助会員
会　員　数 （6月10日現在）	960	16	150	134
差　引　増　減	＋24	±0	＋9	±0

正会員の内訳　名誉員14名・シニア員35名・ジュニア員181名・その他正会員730名

正会員

古城　直道（関西大学）
神田　岳文（岡山大学）
望月　雄介（旭エシコ株式会社）
永仮　光洋（昭和シェル石油株式会社）
伊達　亮汰（SMC株式会社）
櫻井　幹己（SMC株式会社）
山本　将寛（SMC株式会社）
藤原　勇登（SMC株式会社）
柿山　　稜（SMC株式会社）
河本　貴大（SMC株式会社）
松元　謙治（SMC株式会社）
笠原　和磨（SMC株式会社）
濵口　　純（SMC株式会社）
潮來　真広（SMC株式会社）
西川　理仁（豊橋技術科学大学）
山口　智実（関西大学 ）
東嶋　元気（アイシン精機株式会社）
佐野　裕介（住友重機械工業株式会社）
池田　拓央（SMC株式会社）
出井　圭輔（SMC株式会社）
藤原　従道（SMC株式会社）
山城　達將（SMC株式会社）
森本　貴文（SMC株式会社）
鈴木　貴大（SMC株式会社）
山森さつき（SMC株式会社）
石橋　俊和（SMC株式会社）
馬場　　稔（SMC株式会社）
藏上　大輔（SMC株式会社）
久保　博史（SMC株式会社）

学生会員

楊　　凡（東京工業大学）
ジン　ジョンフン（東京工業大学）
古橋　勇希（芝浦工業大学）
稲田　　諒（芝浦工業大学）
助川　真絢（東京電機大学）
雨宮　将太（東京電機大学）
佐藤　直紀（東京電機大学）
阿佐美　理（東京医科歯科大学）
庄司　将記（東京医科歯科大学）
長谷川高志（東京医科歯科大学）
長妻　明美（東京電機大学）
菅野　直樹（東京工業大学）
東島　権弥（福岡工業大学）
浮田　貴宏（東京工業大学）
金澤　直弥（東京電機大学）
中澤　友宏（東京電機大学）
中山　遥助（東京電機大学）
渡邉　賢吾（東京医科歯科大学）
岩井　拓也（東京医科歯科大学）
内藤　圭翼（東京医科歯科大学）
佐藤　明美（東京電機大学）

編 集 室

次号予告
―特集「フルードパワーを活用した大規模研究開発」―

〔巻頭言〕「フルードパワーを活用した大規模研究開発」発行にあたって　佐藤　恭一
〔解説〕地球温暖化対策；海洋エネ発電（波力，潮力）の研究開発　丸山　康樹
フルードパワーによる実大三次元実験震動破壊実験　梶原　浩一
深海水槽及び高圧タンクによる海洋開発分野の研究開発　藤原　智，中島　康晴，岡本　章裕
フルードパワーを活用した鉄道車両試験装置および車両用機器開発　宮原　宏平
超高圧力下の物質合成技術　谷口　尚
圧縮空気を利用した地震探査　伊藤　誠
大規模波動地盤総合水路（大津波水路）による沿岸防災研究　鈴木高二朗
〔会議報告〕IFK2016におけるフルードパワー技術の動向　伊藤　隆
JSME基礎潤滑設計部門講演会におけるフルードパワー技術研究動　金　俊完
〔教室〕入門講座「エネルギ工学」第1回：日本のエネルギーと発電方式　江間　敏
〔トピックス〕産学協同という幻想　山田　剛志
台湾（台北）駐在日記　川口　敦史
〔研究室紹介〕岐阜大学工学部　機械工学科　山田宏尚研究室　山田　宏尚
〔企画行事〕平成28年春季講演会併設セミナー開催報告
「フルードパワーシステムを変えるIoT，ICTの最新技術」　成田　晋

平成28年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長　塚越秀行（東京工業大学）
副委員長　村松久巳（沼津工業高等専門学校）
委員　伊藤雅則（東京海洋大学）
上野朝嗣（CKD㈱）
内堀晃彦（宇部工業高等専門学校）
加藤猛美（㈱コガネイ）
加藤友規（福岡工業大学）
北村剛（油研工業㈱）
木原和幸（㈶工業所有権協力センター）
栗林直樹（川崎重工業）
五嶋裕之（機械振興協会）
佐藤恭一（横浜国立大学）
妹尾満（SMC㈱）
委員　中野政身（東北大学）
中山晃（日立建機㈱）
成田晋（KYB㈱）
藤田壽憲（東京電機大学）
丸田和弘（㈱小松製作所）
柳田秀記（豊橋技術科学大学）
山田真の介（㈱TAIYO）
山田宏尚（岐阜大学）
吉満俊拓（神奈川工科大学）
担当理事　伊藤和巳（KYB㈱）
編集事務局　藤谷秀次（学会事務局）
竹内留美（勝美印刷㈱）
（あいうえお　順）

会　告

複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので，本誌に掲載された著作物を複写したい方は，同協会より許諾を受けて複写してください．ただし（公社）日本複写権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません．したがって，社外頒布用の複写は許諾が必要です．

権利委託先：（一社）学術著作権協会
〒107-0052　東京都港区赤坂9−6−41　乃木坂ビル
TEL：03-3475-5618　FAX：03-3475-5619　E-mail：info@jaacc.jp

なお，著作物の転載・翻訳のような，複写以外の許諾は，学術著作権協会では扱っていませんので，直接本会へご連絡ください．

ISSN　1880-3121

日本フルードパワーシステム学会論文集

第47巻, 第 4 号（2016）

平成28年 7 月

目　次

研究論文

１．統合動作解析によるガス遮断器用油圧操作器の設計手法
瀬戸信治，橋本裕明，海老澤大輔，小野寺充　　23

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

ISSN 1880-3121

TRANSACTIONS OF
THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.47, No.4 July 2016

Contents

Paper

1. Design Method of Hydraulic Operating Mechanism for Gas Circuit Breaker Using Integrated Motion Analysis
Shinji SETO, Hiroaki HASHIMOTO, Daisuke EBISAWA, Michiru ONODERA 23

Published by
The Japan Fluid Power System Society
c/o Kikaishinko Building
3–5–22 Shiba-koen, Minato-ku, Tokyo, 105–0011, Japan

研究論文

統合動作解析によるガス遮断器用油圧操作器の設計手法*

瀬　戸　信　治**，橋　本　裕　明***，海老澤　大　輔****，小野寺　　充****

Design Method of Hydraulic Operating Mechanism for Gas Circuit Breaker Using Integrated Motion Analysis

Shinji SETO, Hiroaki HASHIMOTO, Daisuke EBISAWA, Michiru ONODERA

A gas circuit breaker (GCB) requires high speed motion and high reliability because it is a safety apparatus that protects devices by breaking a circuit instantly when an abnormal current flows in a power transmission line.

GCB motion must be analyzed to improve GCB development efficiency and reliability. Recently, a GCB has been developed that has a double-break and a single mechanism for ultra-high voltage. Thus, this GCB, which is driven at high speed by a large driving force, requires motion and load of each part to be accurately estimated.

Therefore, we focused on the difference in motion between an interrupter and a hydraulic operating mechanism and established a simulation model that divides moving parts between the interrupter and hydraulic operating mechanism into some portions and connects the portions by a non-linearity function of stiffness and a linkage mechanism. Moreover, we established GCB integrated motion analysis using hydraulic analysis of motion in the hydraulic operating mechanism, electromagnetic analysis in solenoids, puffer pressure analysis in the interrupter, and a simulation model of the interrupter and hydraulic operating mechanism. Using this integrated analysis, we confirmed this analysis can definitely analyze displacement of motion and load of each part with sufficient accuracy.

Furthermore, we established a method for designing an operating mechanism using this analysis and designed an operating mechanism to meet the required breaking performance and low load characteristic.

Key words：Simulator, Modeling, Fluid power system, Gas circuit breaker, Hydraulic operating mechanism

1. 緒　　言

ガス遮断器（GCB, Gas Circuit Breaker）は，送電ラインに落雷等で異常な電流が流れた際に，瞬時に回路を遮断して高圧受変電設備の機器を保護する安全装置である．GCBは，内部がSF_6ガスで充填され，操作器の駆動力で，パッファ室と呼ばれる部屋を形成するパッファシリンダを駆動し，パッファ室内のSF_6ガスを電極間に発生するアークに圧縮させながら吹き付けて速やかにそのアークを消滅させることで回路を遮断する方式が採られ，大容量器では駆動に油圧操作器が用いられる．

解析によって，事前にGCBの動特性や，各部の応力を推定できるようにすることで，開発効率向上や，製品の信頼性向上につながる．特に，開極時間（指令入力から電極が離れるまでの時間），遮断時の動作速度，制動特性が，適切な遮断性能を得るために重要である．

これに対して，油圧操作器の動作解析だけでなく，ソレノイドの電磁場解析や，遮断部のパッファ圧力（パッファ室内の圧力）解析との連携によって開極時間や遮断速度を高精度に解析する手法が開発されている[1)-3)]．

一方，超超高圧用のGCBにおいて，１台の操作器で，２つの遮断部を駆動する方式が開発されている[4)]．この方式が用いられた800kV50kA用GCBの外観をFig. 1に示す．このGCBでは，操作器から遮断部へ大きな駆動力を伝達し，かつ２つの遮断部への駆動力を分配するリンク機構部が必要となることから，従来の解析手法では，十分な解析精度が得られない可能性があった．

そこで，本報では，これに対応するためリンク機構部を複数の質点に分割し，これらの間の変形やリンク機構の非線形を考慮した解析手法と，これに電磁場解析，油圧解析，遮断部パッファ圧力解析を組み合わせたGCB統合動作解析手法について示す．さらに，遮断に必要な動作特性を満足する操作器の設計手法ついても説明する．

*平成27年７月17日　原稿受付

**株式会社日立製作所研究開発グループ制御イノベーションセンタ
（所在地：茨城県ひたちなか市堀口832－２）
（E-mail：shinji.seto.wd@hitachi.com）
***株式会社日立製作所研究開発グループ機械イノベーションセンタ
****株式会社日立製作所日立事業所国分生産本部
（所在地：茨城県日立市国分町一丁目１－１）

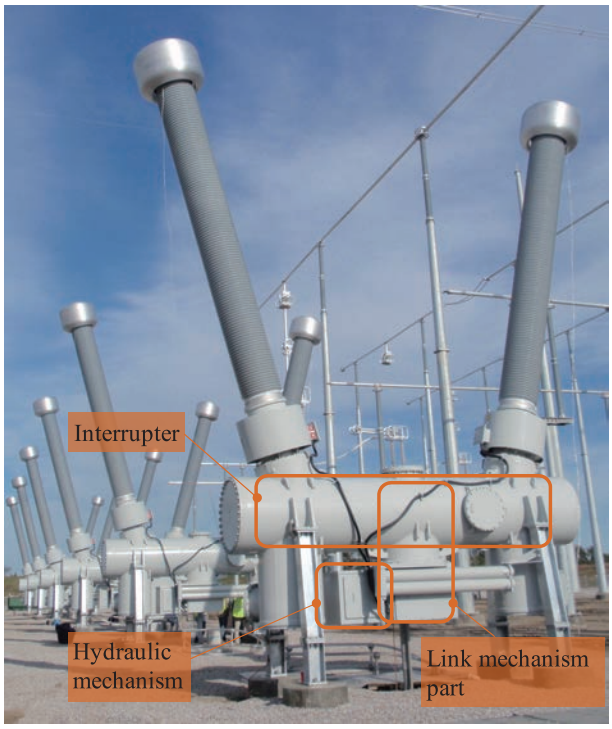


Fig. 1　800kV GCB

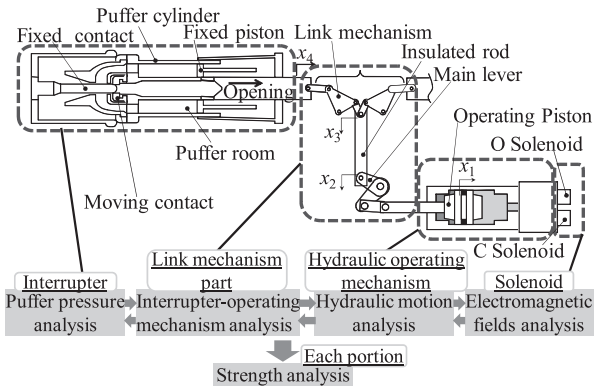


Fig. 2　Schematic diagram of GCB

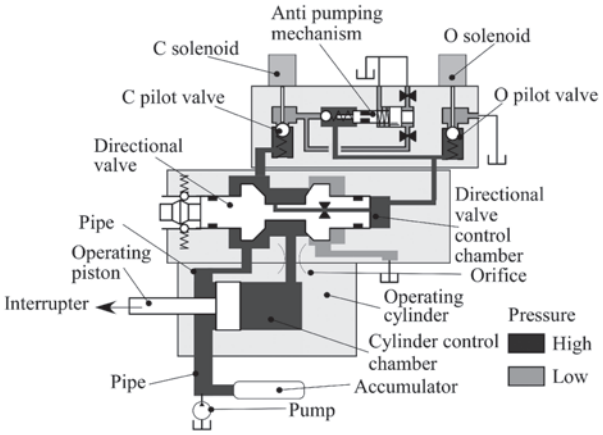


Fig. 3　Hydraulic operating mechanism

2. ガス遮断器の基本構造

油圧操作器を用いたGCBの構成をFig. 2を用いて説明する．Fig. 2に示すように，GCBは，遮断部，油圧操作器－遮断部間のリンク機構部，油圧操作器，ソレノイドから構成される．遮断部は固定電極，可動電極，パッファシリンダ，固定ピストンなどで構成される．油圧操作器は操作ピストン，弁などで構成され，ソレノイドで駆動される．リンク機構部は，絶縁ロッド，パッファシリンダと絶縁ロッド間のリンク機構，絶縁ロッドと操作ピストンを連結するメインレバーなどから構成される．

このうち油圧操作器，ソレノイドの詳細をFig. 3に示し，油圧操作器を中心にその動作を説明する．以下の説明でOは開路（遮断），Cは閉路（投入）を示す．

油圧操作器はO，C各ソレノイド，ソレノイドによって駆動されるO，C各パイロット弁，パイロット弁によって駆動される２位置３方向弁の切換弁，切換弁によって操作される操作ピストン，圧力を供給するポンプ，アキュムレータなどから構成される．なお，アキュムレータはポンプにより約30MPaに蓄圧される．

O動作は以下の順で行われる．

⑴O指令によりOソレノイドが駆動し，Oパイロット弁が開口する．

⑵Oパイロット弁開口で切換弁制御室が低圧側と接続する．

⑶切換弁が動作し，シリンダ制御室が低圧側と接続する．

⑷操作シリンダロッド側の高圧により可動電極につながる操作ピストンが電極を離す方向に動作する．

⑸可動電極とパッファシリンダが一体となって動作し，可動電極が固定電極から離れると同時に，パッファシリンダと固定ピストンで形成されるパッファ室のSF_6ガスをアークに吹き付けて電流を遮断する．

C 動作は以下の順で行われる．

⑴C 指令によりCソレノイドが駆動し，C パイロット弁が開口する．

⑵C パイロット弁開口で切換弁制御室がアキュムレータにつながる高圧側に接続する．

⑶切換弁が動作し，シリンダ制御室が高圧側に接続する．

⑷シリンダ制御室の高圧により，操作ピストンが電極を接触させる方向に動作する．

⑸可動電極が固定電極と接触し通電状態に至る．

3. 統合動作解析手法

統合解析は油圧操作器動作解析，遮断部パッファ圧力解析，ソレノイド電磁場解析と，次章で示すリンク機構部解析から構成される．これらはFig. 2に示すように油圧操作器動作解析を中心に連携している．

すなわち，ソレノイド電磁場解析で出力される駆動力計算結果を油圧操作器動作解析の入力としている．

また，パッファ圧力解析は，油圧操作器動作解析の中ではひとつのブロックでサブルーチン化されており，時間刻

みごとにパッファシリンダ変位を入力としてパッファ圧力を出力している．それぞれの解析の詳細を以下に示す．

(1)　油圧操作器動作解析

油圧操作器動作解析では，Fig. 4に示すようにFig. 3に対応する油圧操作器の部品ごとにブロックを作り，これらのブロックを組み合わせて全体解析モデルを構築する手法を採っている．各ブロックの下に記してある名称がFig. 3の油圧操作器の構成に対応している．計算にはブロック線図の組み合わせでの計算が容易なMATLAB*/Simulink*を用いる．ブロックの中身は要素に分解でき，Fig.4では中身となる要素の一例として管路とオリフィスの部分について示している．これら要素には以下に示す計算式が用いられている．

各部品間をつなぐ管路内の運動は，集中定数系による運動方程式と圧縮の効果の式から次式のように表される[5]．

$$\rho L\frac{dq_i}{dt}=a(p_i-p_j)-\rho LR_f q_i \tag{1}$$

$$q_i-q_j=\frac{aL}{B}\frac{dp_i}{dt} \tag{2}$$

ここで，p：圧力，q：流量，ρ：密度，L：管路，a：管路断面積，R_f：流動抵抗係数，B：体積弾性係数である．添え字のi，jは管路の始端，終端を示す．

未知変数は管路の始端および終端の圧力と流量であるから，p_i，p_j，q_i，q_jの４つのうち２つを入力，２つを出力にして，式(1)，(2)より未知変数を算出する管路の方程式を導出できる．また，シリンダ内など各圧力室の圧力計算は上記(2)式のみで表される．

弁部，あるいはオリフィスとなる部分の流量計算には，次式に示すオリフィスの式を用いた．

$$q=ca_v\,\mathrm{sign}\,(p_i-p_j)\sqrt{\frac{2|p_i-p_j|}{\rho}} \tag{3}$$

ここでc：流量係数，a_v：流路面積である．

流量係数は，流量係数がある程度一定とみなせるレイノルズ数が高い範囲で用いられることから一定値としている．またその値は，影響の大きい弁部で値を変化させて，実測の操作ピストン速度と一致するように決定し，0.7としている．

操作ピストンや弁のスプールなどは，質点の運動方程式を持ち（操作ピストンでの運動方程式は後述），圧力pを入力し，圧力室要素と接続するための流量qを出力する．

以上述べた各要素の計算式は，それぞれ一つの要素ブロックとし，これらの要素ブロックを組み合わせて，より大きなブロックを作成する．たとえば，操作シリンダでは，操作ピストンに関する運動方程式の要素ブロックと，圧力室の圧力計算を行う要素ブロックを用いて，圧力計算を行うブロックには運動方程式の結果得られる流量が入力され，運動方程式のブロックには圧力計算で得られる圧力が入力されるように要素ブロック同士を接続し，それらをまとめてひとつの操作シリンダブロックを構成する．同様にアキュムレータ，操作シリンダ，切換弁，パイロット弁などのブロックを作成し，各ブロック間で圧力，流量などの受け渡しを行って計算を実行する．また，後述のパッファ圧力解析のルーチンもこの中のブロックの一つとして扱う．またソレノイド解析による駆動力の結果も一つのブロックとして表される．こうして，Fig. 4に示すように油圧操作器動作解析モデルを中心とした遮断器解析モデルができる．これにより，各部の圧力，流量，シリンダ変位，弁体の変位などを出力することができる．

(2)　遮断部パッファ圧力解析

Fig. 5に示すように，パッファ圧力解析ブロックは，シリンダストロークの位置を入力としてパッファ室（V1）および可動側排気空間（V2）のSF_6ガスの流入出を計算しパッファ圧力上昇によるパッファ反力を出力する．全体モデルの中ではFig. 4の左下部に示すように一つのブロックとして表わされる．このとき，発生するアークによるガスの加熱およびノズル材のアブレーション（アーク光による蒸発）を考慮する．アークの計算にはエンタルピーフローモデルを改良したものを用いる[6]．この際，アーク熱がパッファ室の圧力に変換される割合であるアーク効率を求めておく必要があるが，過去の経験からこの値を0.25としている．

また，前述のようにパッファ圧力解析は油圧操作器動作解析にリンクして使えるようにサブルーチン化している．これにより，油圧操作器動作解析にリンクすることができ，この段階でリンク機構部の変形等を考慮しない形での遮断部パッファ圧力と油圧操作器の統合解析を可能とした．この統合解析の一例をFig. 6に示す．パッファ圧力は，実測値と解析値がほぼ一致した傾向が見られる．実測が解析よ

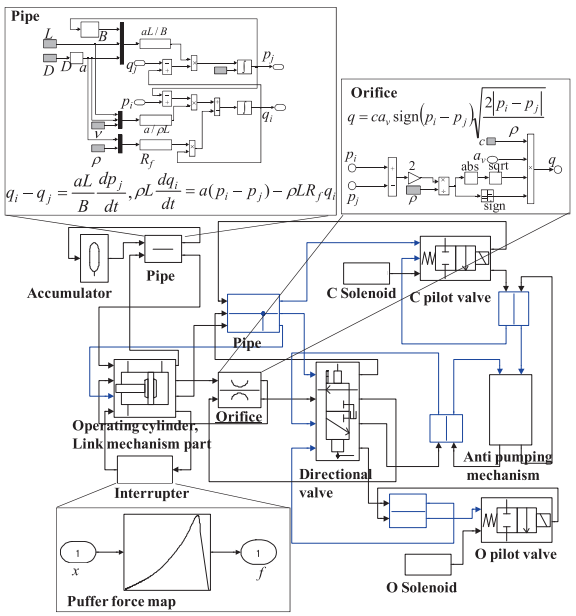


Fig. 4　Simulation model of GCB integrated analysis

*MATLAB/Simulinkは，米国The MathWorks, Inc.の登録商標である．

り遅れて圧力が上昇しているが，ピーク値において解析値は実測値の約95%となっている．この誤差は，パッファ圧力による力が油圧力に比べ小さいため，動作特性にはほとんど影響しない程度のものである．したがって，十分な精度で解析できていると言える．

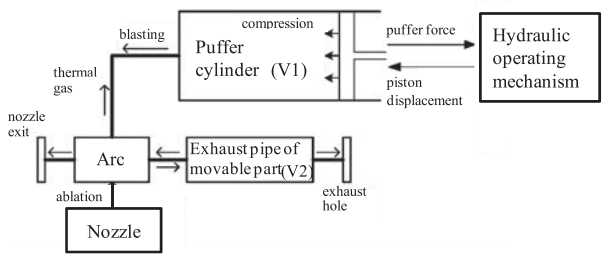


Fig. 5　Puffer pressure analysis

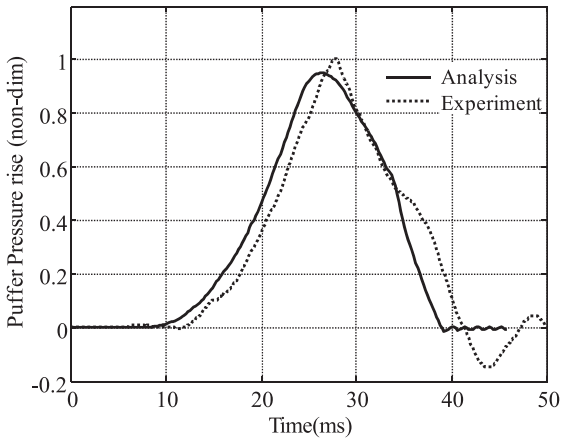


Fig. 6　Result of puffer pressure analysis

(3)　ソレノイド電磁場解析

油圧操作器のパイロット弁駆動はソレノイドを使っているため，パイロット弁動作開始までの時間を見積もるにはソレノイド解析が重要である．Fig. 7に示すように，ソレノイドは，コイル電流により発生する電磁力によりプランジャを動作させる．解析では電圧指令により電気回路から発生する電流とそれにより発生する磁束を求め，この磁束から駆動力，プランジャ変位を求めることができる．油圧操作器動作解析ではこのソレノイド解析による駆動力を入力している．

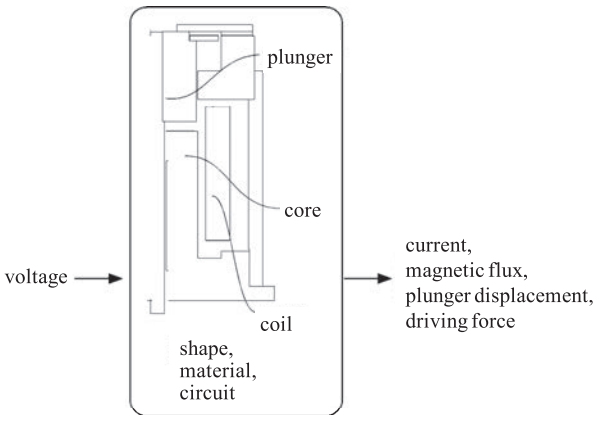


Fig. 7　Solenoid analysis

ソレノイド部の電磁場解析した結果の一例をFig. 8に示す．指令開始からプランジャ動作開始までの時間や動作特性，電流特性などは，ほぼ実測値と解析値が一致していることがわかる．たとえば，プランジャが動作開始するまでの時間はどちらも1.5msで一致している．

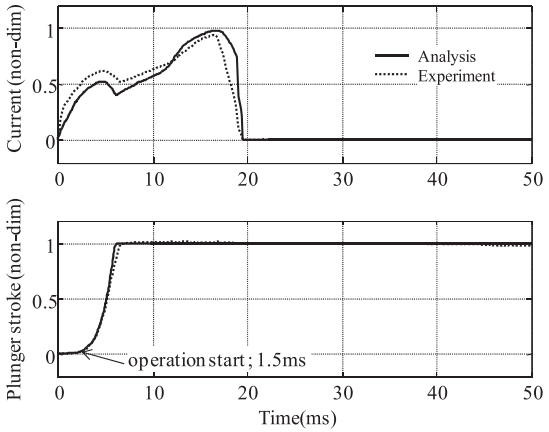


Fig. 8　Result of solenoid analysis

4. リンク機構部解析

操作器の操作ピストンと遮断部の可動部であるパッファシリンダが剛結合と仮定できる範囲であれば，前章までの解析を統合して解析できる．しかし，高駆動力の操作器では，遮断部と操作器間の弾性変形により，遮断部と操作器間との間で動作に違いが発生する．剛結合では，この動作の違いを解析できず，設計上必要なこの間の応力等も精度良く解析できない．

そこでFig. 9に示すように，リンク機構部を複数の質点に分割することとした．その際，各部の剛性を計算し，剛性が低い部分の前後で質量を分割するようにする．具体的には，操作器側から操作ピストン，メインレバー，パッファシリンダに分割する．この際，メインレバーの回転運

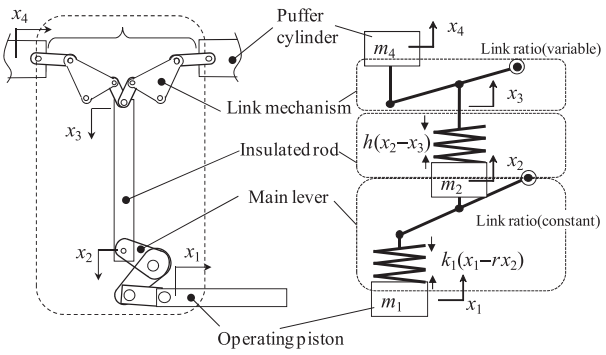


Fig. 9　Schematic diagram and analysis model of link mechanism part

動は，等価な直線運動に変換している．このため，質点m_2は，メインレバーの慣性モーメントから変換した等価質量を表す．

つぎにこれらの接続について説明する．まず，操作ピストンとパッファシリンダの間の弾性変形について説明する．弾性変形を考慮するため，各部のばね定数を計算するが，複雑な形状については３次元FEMを用いて求める．

操作ピストン，絶縁ロッド間のメインレバーに関しては，Fig. 10に示すようにFEMを用いて，リンク接続部に荷重を入力した際の変形量を求め，ばね定数k_1を求める．FEMにおける境界条件は，実際の動作であるメインレバーの回転軸中心が固定され，操作ピストンおよび絶縁ロッドから力が付加される状況を考慮し，メインレバーの回転軸中心を変位拘束し，操作ピストン側および絶縁ロッドにつながる部分に力を入力するものとしている．

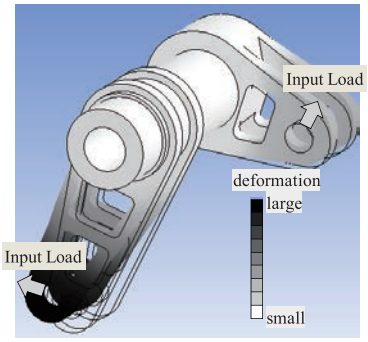


Fig. 10　Deformation analysis of main lever

この結果からメインレバーにかかる力f_mは

$$f_m = k_1(x_1 - rx_2) \tag{4}$$

と表わされる．ここで，rは操作器側のストロークx_1と絶縁ロッド側のストロークx_2のリンク比である．ここでk_1は７×10^7N/mといった値をとる．

つぎに絶縁ロッドについて示す．絶縁ロッドの弾性については次式で示す．

$$f_{ir} = h(x_3 - x_2) \tag{5}$$

このhは（$x_3 - x_2$）の関数であり，引張と圧縮で定数が異なることやガタを考慮した非線形の式であり，Fig. 11に示すような関係となる．ここで縦軸の力は定格圧力時に油圧ピストンが受ける駆動力で正規化している．

つぎに，絶縁ロッドとパッファシリンダ間のリンク機構について説明する．このリンク比は幾何学的に決まる非線形な式となり，簡易的に以下のように表わす．

$$\frac{dx_4}{dx_3} = g(x_3) \tag{6}$$

たとえば，Fig. 9に示すようなリンク機構では，Fig. 12に示すような，横軸の絶縁ロッドストロークと縦軸のリンク比の関係となる．なお，操作ピストンと絶縁ロッド間のメインレバー部分も非線形となるが，その影響は小さい．

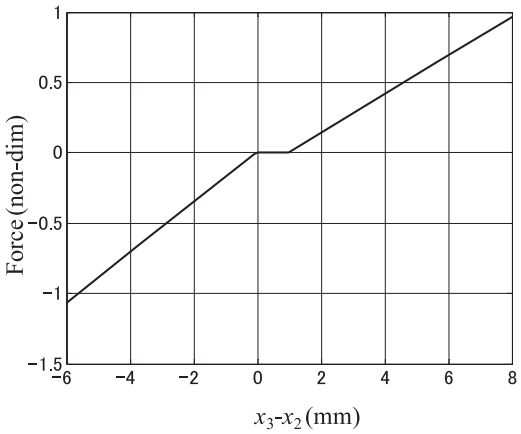


Fig. 11　Spring characteristics of insulated rod

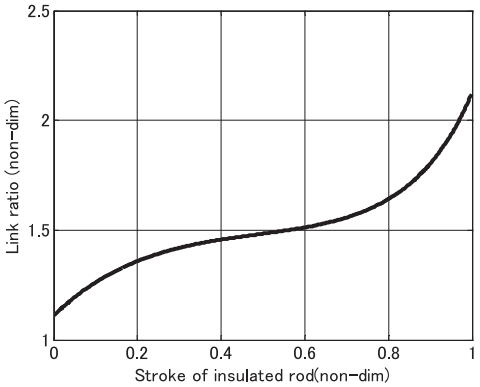


Fig. 12　Link ratio of link mechanism

以上から，m_1は主に操作ピストン，m_2は主にメインレバー，m_4は主にパッファシリンダ質量としてそれぞれの運動方程式を立てる．

まず，操作ピストンの運動方程式は次式で表わされる．

$$m_1\ddot{x}_1 = p_s S_1 - p_c S_2 - p_d S_3 - f_m \tag{7}$$

ここで，p_sは操作ピストンの高圧側の圧力，S_1は操作ピストンの高圧側受圧面積，p_cは制御室側の圧力，S_2は制御室側の受圧面積，p_dは後述するダッシュポット室の圧力，S_3はダッシュポット室の受圧面積を示す．この式から，ピストン速度と断面積の積で流量を算出できる．

また，メインレバー（x_2はメインレバーの絶縁ロッド側の直線方向ストロークを示す），パッファシリンダの運動方程式は

$$m_2\ddot{x}_2 = rf_m - f_{ir} \tag{8}$$

$$m_4\ddot{x}_4 = g(x_3) f_{ir} - f_p \tag{9}$$

と表わされる．f_pはパッファ圧力上昇によるパッファ反力である．

これらの式を連立させて，リンク機構部の弾性変形，リ

ンク機構による変換を考慮した解析が可能となり，前章の各部の解析と統合し，GCB全体の動作解析が可能となる．

このGCB全体での動作解析結果の一例をFig. 13に示す．これはパッファシリンダx_4と操作ピストンx_1の変位を示したもので，フルストロークで正規化している．これにより，動作開始から制動に至る全域にわたり誤差が小さく解析できることがわかった．

この際，操作ピストンx_1に関しては，後述のダッシュポット（Fig. 17の当初の形状）により，振動的な動きがなく制動できている．しかし，パッファシリンダx_4が振動的に動作し，所望の制動特性とはなっていない．そこで，パッファシリンダの制動特性を決定する方法について次章で示す．

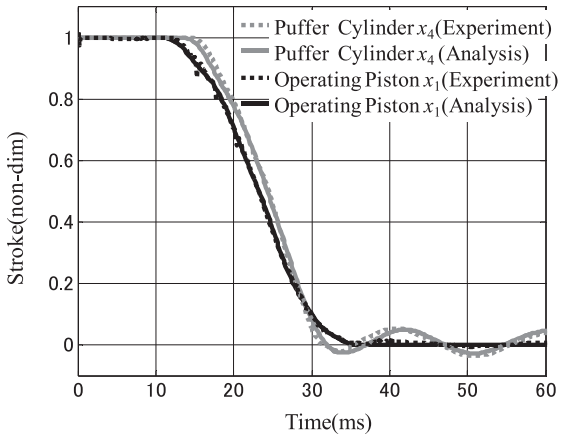


Fig. 13　Integrated motion analysis result

5. 制動特性の決定

遮断動作終盤の制動動作は，Fig. 14に示すダッシュポットによって行われる．すなわち，操作ピストンがストロークエンドに近づくと，操作ピストンに備えられたダッシュポット部がガイドの内周部に入り込み，ダッシュポット絞りとダッシュポット室が形成され，ダッシュポット室内の圧力p_dが上昇することで，操作ピストンに制動力が作用する．したがって，ダッシュポット部の形状を決めることで制動特性を決めることができる．このダッシュポット圧力はダッシュポット絞りを通過する流量Qの式から決まる．

$$Q=\dot{x}_1 S_3=cS_d\,\mathrm{sign}\,(p_d-p_c)\sqrt{\frac{2|p_d-p_c|}{\rho}} \tag{10}$$

cが流量係数，S_dがダッシュポット部とガイド部間の流路面積で，ダッシュポット形状によって決まる．

この式を前述の統合解析に組み込むことで，パッファシリンダ動作特性を解析できる．

Fig. 15にダッシュポット圧力上昇の解析と実測の比較を示す．なお，この結果はFig. 13のものとは異なる操作器で測定用のものであり，圧力は初期状態の高圧側圧力で正規化している．この結果から，最大圧力の誤差が1.3%程度であり，ダッシュポット圧力は十分な精度で解析できていることを確認した．

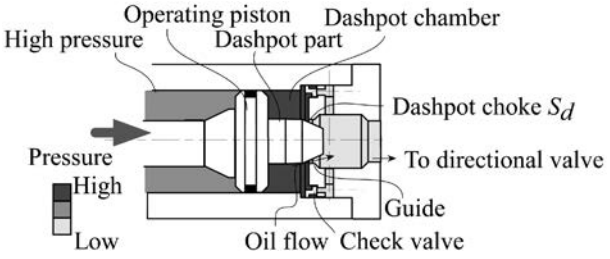


Fig. 14　Dashpot mechanism

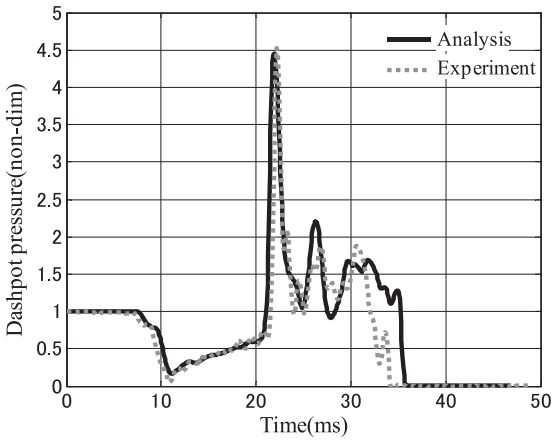


Fig. 15　Dashpot pressure of experiment and simulation

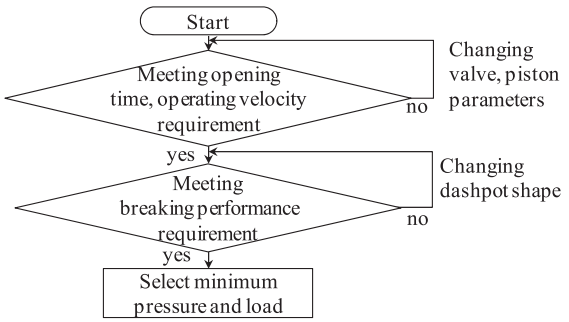


Fig. 16　Flow chart of designing the operating mechanism

つぎに，油圧操作器の諸元決定のフローについてFig. 16を用いて説明する．パッファシリンダの動作により，SF_6ガスをアークに吹き付けて，アークを消すことから，その動作特性が重要となるが，規格で決められた遮断特性を満足するように，必要な開極時間，最大速度，制動特性が決まる．

フロー前半では，この必要な開極時間，最大速度から，ソレノイド特性，ピストン径，弁開口量等を決定する．

フロー後半では，遮断動作終盤の制動特性を決定するがその方法について説明する．

前述のようにダッシュポット形状を決めれば，パッファシリンダ動作特性を解析できる．一方，達成したいパッファシリンダ動作特性から単純な計算でダッシュポット形

状を求めるのは困難である．そこで，ダッシュポット形状を当初の直線形状から，複数の直線をつなぎあわせた形状に変更し，各直線の長さと傾きをパラメータにして制動特性や圧力への影響を把握し，これによって，発生圧力や応力が小さくなるものを最終的なダッシュポット形状（新形状）とした．

当初の形状と新形状の違いをFig. 17に，新形状のときの動作特性の結果をFig. 18に示す（当初の形状の動作はFig. 13）．新形状とすることで，パッファシリンダの振動が抑えられる制動特性が得られることを確認した．振動的な動きが抑えられたのは，ダッシュポット部を複数の直線で形成したことでパッファシリンダが振動原因となるオーバーストロークをしないように操作ピストンの動きを調整することが可能となったためである．

また，Fig. 17に示すように，最初にガイドに挿入する部分の径を当初よりも大きくし，ダッシュポット部が挿入した直後に大きな圧力を発生させる形状とし，その後のより大きな圧力上昇を抑えるような構造としている．この結果，Fig. 19に示すようにダッシュポット圧力の最大値は当初に比べ約13%低減できる．このダッシュポット圧力は当初の形状ではシール性能の限界を超える可能性があったが，新形状により誤差を考慮してもシール性能は十分なものとなり，信頼性向上に寄与できる．

また，質量を分解して解析しているので，各部品ごとにかかる力も予測できる．一例として絶縁ロッドにかかる力の実測と解析を比較した結果をFig. 20に示す．ここに示すように，解析の誤差は圧縮方向最大値で約９%，引張方向最大値で約５%であり，強度設計が可能なレベルの解析が可能なことを確認した．

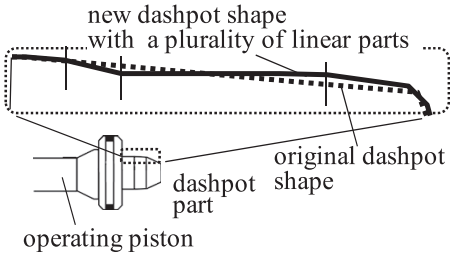


Fig. 17　New dashpot shape

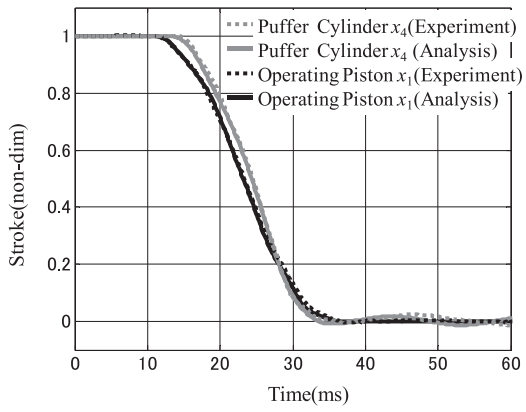


Fig. 18　Motion characteristic using new dashpot

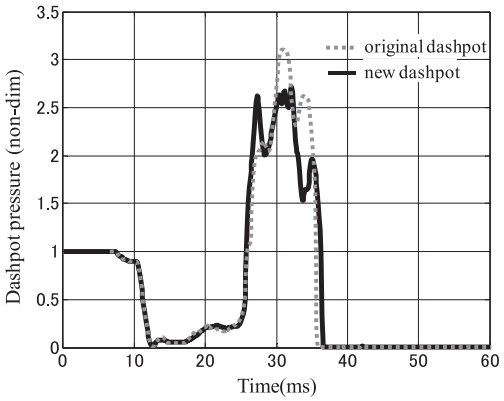


Fig. 19　Dashpot pressure analysis using new dashpot

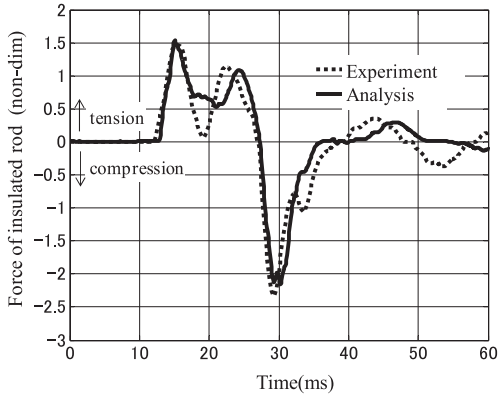


Fig. 20　Force of insulated rod in opening

6. 結　　言

ガス遮断器（GCB）の高精度解析を実施するため，リンク機構部を考慮した統合動作解析を検討し，以下の結論を得た．

⑴リンク機構部の剛性およびリンク機構のリンク比の非線形性を考慮した解析モデルを作成し，油圧系動作解析，ソレノイド電磁場解析，遮断部パッファ圧力解析との統合動作解析により高精度で解析できることを確認した．

⑵必要なパッファシリンダ制動特性を満足する，操作器のダッシュポット形状決定方法を示し，本方法で求めた形状にて所定の特性を満足することを確認した．

参 考 文 献

１）浦井一，ほか５名：ガス遮断器のパッファ圧力と操作機構の統合解析手法，平成15年電気学会全国大会論文集，No. 6-220，p. 378-379（2003）

２）Liu W, Yang H Y, Xu B, et al. : Simulation study on the control valve in hydraulic operating mechanism of the high voltage circuit breaker, Proceedings of 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and

Exposition, Vol. 5, p. 151-158 (2008)
3）Liu W, Yang H Y, Xu B, et al. : Study on the opening characteristics of high voltage circuit breaker with hydraulic operating mechanism, Proceedings of the BATH/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control (FPMC 2008), p. 411-422 (2008)
4）Wei Zhang et al. : Development and Delivery of 800kV 50kA Gas Circuit Breaker with Double-Break and Single Mechanism, National Convention record IEE Japan, No. 6-274, p. 492 (2014)
5）市川常雄，日比昭：油圧工学，p. 81-86，朝倉書店 (1979)
6）吉岡芳夫，ほか３名：パッファ式ガスしゃ断器のしゃ断時消弧室圧力とその計算法，電気学会論文誌B，Vol. 98，No. 12，p. 963-970 (1978)

フルードパワーシステム Vol.47 No.4

昭和47年10月19日第４種学術刊行物認可
平成28年７月15日発行　　（奇数月）

〒105―0011
東京都港区芝公園三丁目五―二二　電話（〇三）三四三二―八四四一　FAX（〇三）三四三二―八四四二
編集兼発行人　一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会　振替口座　東京〇〇一一〇―三―一三三六九〇

東京都文京区白山一―一三―七　アクア白山ビル五階
印刷所　勝美印刷株式会社

本紙広告取扱　株式会社 産業企画　東京都港区新橋6-22-2 佐藤ビル　〒105-0004
TEL. 03-3437-0057　FAX. 03-3437-9868　www.sanki.asia　E-mail　sanki@sanki.asia