

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

May.2016 Vol.47 No.3

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「海洋開発・港湾建設に活用されるフルードパワー」

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

特集「海洋開発・港湾建設に活用されるフルードパワー」

【巻頭言】

「海洋開発・港湾建設に活用されるフルードパワー」発行にあたって 五嶋 裕之 104

【総論】

港湾における水中建設作業機械の現状と展望 平林 丈嗣 105

【解説】

空気を地盤に注入する新しい液状化対策工法 -Air-des工法- 山根 信幸 111

シールドマシンと油圧システム 酒井 義雄 114

循環泥水駆動によるコア採取装置 眞本 悠一 117

海洋掘削における噴出防止装置について 宮崎 英剛 121

【解説】

乗用管理機搭載式ブームスプレーヤのブーム垂直変位低減装置の開発 水上 智道 124

【会議報告】

計測自動制御学会・流体計測制御シンポジウムにおけるフルードパワー研究動向 中尾 光博 127

第13回 FLUCOME2015カタルーに参加して 香川 利春 129

ICMT2015におけるフルードパワー技術研究動向 巖 祥仁 131

【トピックス】

駐在員日誌 無錫奮闘記 眞野 茂 133

【研究室紹介】

足利工業大学 桜井研究室の紹介 岡本 拓也 137

【企画行事】

平成27年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告 中尾 光博 140

【会告】

平成28年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー	
「フルードパワーシステムを変えるIoT, ICTの最新技術」のお知らせ	143
平成28年度 第四回日中国際共同ワークショップのお知らせ	
The 4th Japan-China Joint Workshop on Fluid Power	
—Innovative Key Technology on Fluid Power—	143
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年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	143
共催・協賛行事のお知らせ	144
永年会員のお知らせ	146
その他	142, 146, 147, 148

■表紙デザイン：山本 博勝 (株)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

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "Utilization of Fluid Power Technology for Ports and Marine Construction"

[Preface]

On the Special Issue "Utilization of Fluid Power Technology for Ports and Marine Construction"	Hiroyuki GOTO	104
--	---------------	-----

[Survey]

Present Situation and Future Prospects of an Underwater Excavator in a Port-area	Taketsugu HIRABAYASHI	105
--	-----------------------	-----

[Review]

A New liquefaction Countermeasure by Air Injection -Air-des Method-	Nobuyuki YAMANE	111
Function of Hydraulic System for Tunneling Boring Machine (TBM)	Yoshio SAKAI	114
Core Sampling System by Drilling Fluid Circulation	Yuichi SHINMOTO	117
Blow Out Preventer for Offshore Drilling	Eigo MIYAZAKI	121

[Review]

Development of Device to Reduce Boom Vertical Displacement Due to Vertical Displacement of Vehicle for Crop Management	Tomomichi MIZUKAMI	124
--	--------------------	-----

[Conference Report]

Research Trend in The Fluid Measurement Control Symposium of SICE	Mitsuhiro NAKAO	127
Report on The 13th FLUCOME2015 on Qatar	Toshiharu KAGAWA	129
Researches on Fluid Power Technologies in ICMT 2015	EOM SangIn	131

[Topics]

A Journal of an Expatriate ~ Struggling in Wuxi ~	Shigeru MANO	133
---	--------------	-----

[Laboratory Tour]

Introduction for Sakurai Laboratory of Ashikaga Institute of Technology	Takuya OKAMOTO	137
---	----------------	-----

[JFPS Activities]

Report on Autumn Conference of Japan Fluid Power System Society 2015	Mitsuhiro NAKAO	140
--	-----------------	-----

[JFPS News]

142, 143, 144, 146, 147, 148

巻頭言

「海洋開発・港湾建設に活用されるフルードパワー」 発行にあたって

著者紹介



ごとうひろゆき
五嶋裕之

(一財)機械振興協会 技術研究所
〒203-0042 東京都東久留米市八幡町 1-1-12
E-mail: goto@tri.jspmi.or.jp

1987年神奈川大学大学院工学研究科修士課程、
2010年法政大学大学院システムデザイン研究科
博士後期課程修了。日立製作所を経て1990年機
械振興協会技術研究所、2011年同所産学官連携
センター長代理。現在に至る。環境対応油圧シ
ステム、などの研究に従事。博士（工学）。

国土の周辺を広い海に囲まれた海洋国家である我が国において、海洋は魚介類などの食料、海底油田やメタンハイドレートなどのエネルギー資源をもたらすほか、貿易を始めとする輸送や交通のルート、気候を調整する役割を担っており、私たちの暮らしに欠かせないものと言える。

近年の調査によって日本の領海・排他的経済水域（EEZ：Exclusive Economic Zone）の海底や大陸棚に、豊富なエネルギー資源や鉱物資源の存在が確認されており、近未来に日本が資源大国となる可能性を秘めている¹⁾。さらに、平成23年3月に発生した東日本大震災の津波による自然災害からの復興事業、例えば、海岸堤防や港湾の整備といった人命と財産を守るため、災害被害軽減を目的としたさまざまな取組、再開発プロジェクトが進められている。

これら海洋資源開発や社会基盤（港湾・空港、海岸・埋め立て、河川、道路、鉄道、通信設備、再生可能エネルギーなど）整備は、その多くが大規模なプロジェクトであり、個々の建築条件が大きく異なる。したがって、これらの建設・施工に利用される機械設備・装置も、一般の産業機械に比べ、多品種・少量生産で特殊環境での運用を前提に開発が行われるという特徴がある。また、新規開発の施工法に用途を限定した専門性の高い特殊機械装置などの開発も、大手ゼネコン、研究機関などを中心に取り組みが行われている。これらの機械装置では、油圧システムを中心にフルードパワー技術が多用されている。

本特集では、これらの海洋開発・港湾建築につい

てのトピックとフルードパワーの関わりについて平易に解説いただいた。本記事が今後のフルードパワー関連機器の研究開発にむけた、読者各位の参考になれば幸いである。

はじめに、平林丈嗣氏に「港湾における水中建設作業機械の現状と展望」と題して、これまでの技術開発の歴史を振り返りながら丁寧に解説いただくとともに、注目されている海底資源採掘商業化への展望について述べていただいた。つぎに山根信幸氏より、東日本大震災でも注目された地盤の液化化に対する、「空気注入不飽和化工法（Air-des工法）」について解説いただいた。本開発技術は、空気を地盤に直接注入することにより、フルードパワーで液化化対策を行う画期的な工法であり今後の普及が期待される。続いて酒井義雄氏より、欧州200年の夢と言われた英仏海峡トンネルプロジェクトなど、長大海底トンネル掘削で活躍する「シールドマシンと油圧システム」について、これまでの歴史と技術、今後の展望について解説いただいた。

続く二つの解説記事は、海洋研究開発機構が海底下の地質構造などの学術調査を目的として運用している科学掘削船「ちきゅう」に関する研究開発事例の紹介である。海洋地殻直下のマントルの岩石試料（コア）採取のために開発された、「泥水駆動によるコア採取装置」について、眞本悠一氏よりフルードパワー技術の応用である循環泥水駆動の原理や開発状況について説明いただいた。つぎに、宮崎英剛氏による「海洋掘削における噴出防止装置について」では、試掘中に海底から噴き出す恐れがある石油・ガスの噴出防止装置（BOP）について、油圧システムを用いたBOPの研究開発について説明いただいた。

末筆ながら、非常にご多忙中のところ、大変に貴重で興味深い解説記事をご寄稿いただいた執筆者の皆様様に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 海の未来－海洋基本計画に基づく政府の取組－、内閣官房総合海洋政策本部事務局、(2015-10)

(原稿受付：2016年2月10日)

港湾における水中建設作業機械の現状と展望

著者紹介



ひらばやし たけつぐ
平林 丈 嗣

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
計測・システム研究チーム
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
E-mail: hirabayashi@pari.go.jp

1995年運輸省第二港湾建設局に入省。98年より港湾技術研究所機械技術部（現新技術研究開発領域）に所属し、水中施工機械の遠隔操作に関する研究に従事。土木学会、日本ロボット学会、日本バーチャルリアリティ学会正会員。

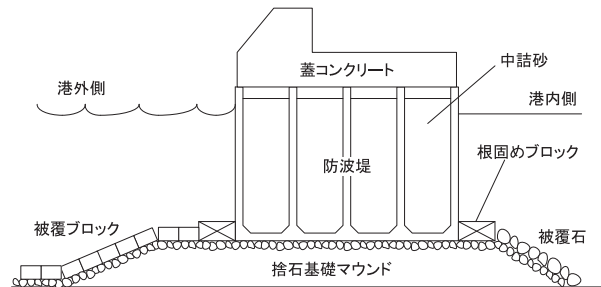


図1 防波堤断面図

1. 港湾工事における機械化

1800年台の小型高圧力蒸気機関の実用化は建設機械に大きな影響を与え、鉄道建設や運河などの大規模工事への現場投入により、その技術開発は大きく前進した。しかし、今日一般的に使用されている油圧ショベルの登場は比較的近年であり、1948年にイタリアのブルネリ社が開発した油圧ショベルが世界初と言われている。その後、新三菱重工業が技術導入したユンボY35（1961年）を経て、1965年に日立製作所が国産初の油圧ショベルUH03を開発した。

さらに河川の氾濫などの自然災害が多い我が国においては、これら建設機械の独自の進化が存在している。治水工事等の重要性から水中建設機械の開発が行われ、1968年には河川工事用の水中ブルドーザーが、1972年には水陸両用油圧ショベルが開発された¹⁾。

特に港湾施設はその大部分が水面下に構築されるためその工事等は水中作業となり、相当程度を潜水士等の人力に依存している。たとえば防波堤を設置する場合、海底面にあらかじめ平面に均した捨石基礎マウンド（図1）を構築する。このときマウンドに使用される石は海上の船から投入されるが、そのままでは平面にならないため現状では潜水士が素手や起重機船からのワイヤによって5～100kgの石を動かし、平面均し作業を行っている（図2）。このような港湾工事における作業を一層安全で効率的



図2 潜水士による捨石基礎マウンド築造

に行うことができる技術が必要であった。

1990年台に入ると、港湾工事の急速施工への対応と水中作業の安全性向上のため、海洋土木会社各社が完全水没型水中油圧ショベルを開発²⁾し、主に基礎マウンド均し作業で使用されてきた。こういった水中油圧ショベルはエンドエフェクタを変更することで様々な作業に適応することができることも利点の一つとして挙げられる。たとえば東京湾での安全な航路確保を目的として実施された第三海堡撤去工事では、エンドエフェクタとしてウォーターエゼクタを搭載しており、堆積土砂の除去作業に使用された実績（図3）がある。

他にも地盤を破碎するためのブレーカやカッターヘッドなどさまざまなエンドエフェクタアタッチメントが開発³⁾され、水中工事におけるさまざまな重作業に使用されている。



図3 ウォーターエゼクタを搭載した水中建機



図4 船上から油圧を供給する方式の水中建機

2. 水中油圧ショベルの構造

水中油圧ショベルの基本的な構成は陸上用と同様であり、機体フレーム、走行クローラ部、油圧シリンダ、走行用油圧モータなどは陸上用のものを使用している場合が多い。また作動油漏れの対策として、生分解性の作動油を使用している。

初期の水中油圧ショベルでは、油圧発生源を支援船に設置し、油圧ホースで作動油を供給するタイプ(図4)も存在したが、水中での移動を考慮すると100m程度の送り側・戻り側のホースが必要であることからホースの取回しや圧力損失に難があった。

このため近年では、水中電動モータを機体に搭載(図5)し、その回転力で油圧ポンプを回し油圧を発生させるタイプが主流となっている。ただし水中電動モータへ電力を供給するために有索となるほか、電力供給や投入揚収のための支援船が必要である。

機体の油圧系統についても陸上用と大きな違いは無く、運転席操作レバーで制御されるパイロット油圧でメインスプール弁を開閉し、各シリンダや油圧モータへ作動油を供給し駆動している。ただし、運転席側で水中モータの運転停止を行うことができず、潜水士搭乗降車時に不意に操作レバーに接触すると危険であるため、パイロット油圧経路を遮断するバルブを運転席に設置している場合が多い。

また水中作業の安全性向上のため、遠隔操作に対応した機体も存在する。遠隔操作のためには、陸上機と同様にパイロット油圧を比例電磁弁で制御する方式が一般的であり、電磁弁とバルブコントローラを防水筐体に格納している。なお、水中では電波の減衰が大きく無線通信が困難であるため、信号線による有索操作となる。

ただし港湾域は一般的に透明度が低く、さらに水中における施工では、作業時に発生する濁りにより視界が極端に悪化するため、光学映像を利用し地形



図5 水中電動モータにより油圧を発生させている

など対象物の形状認識を行うことは困難である。

さらに施工精度が必要となる防波堤マウンド築造においては、作業機械近傍のマウンド高と目標となる基準高をリアルタイムに認識できる技術が必要である。気中であればレーザーレンジファインダやステレオカメラなどの光波測量器を用い高精度の計測が可能⁴⁾であるが、水中では減衰が大きくなるため、超音波を用いた計測が一般的である。しかし超音波の波長は光波と比較して非常に長く指向性も低いため、分解能が低くなる欠点が存在する。このような外界計測に関する技術的課題が水中作業機械による施工効率低下の要因となっている。

3. 水中施工を想定したインタフェース

水中施工において外界計測および情報の呈示方法は重要である。ただし作業の目的や施工方法によって、操作者が必要とする情報は異なる。ここでは、狭歪部での浚渫作業、マウンド均し作業を対象としたインタフェースを紹介する。

3.1 浚渫用水中油圧ショベル

水中油圧ショベルはその車体重量により、潮流に

強いとされている。しかしそういった現場条件において潜水士が搭乗操作を実施することは安全確保が困難となるため、無人化が必要である。そこで水流がある場所で堆積する土砂などの浚渫作業を実施する浚渫用水中油圧作業機械⁵⁾(図6)が開発されている。エンドエフェクタにはロータリー式浚渫ヘッドが装備されており、遠隔操作で作業を実施することが可能となっている。作業対象が浚渫であるため、操作者が必要とする情報は「堆積物が存在するかどうか」を判断できることが重要となる。そのため外界計測については前面のソーナールによる断面形状計測が行われている。また、堆積土砂が残っている状況で浚渫ヘッドを下げた場合、車体前方が浮き上がるため、車体の傾斜を検出し運転席を傾斜させている(図7)。これらの情報により現在の作業状況を認識し、視覚情報を利用せずに遠隔操作作業を実現している。

3.2 マウンド均し作業

施工後の出来型(均し精度)が重要となるマウンド築造工事において、操作者が必要とする情報は、マウンドの目標高と現形状をリアルタイムに比較できる情報である。そこで濁水中における地形の認識

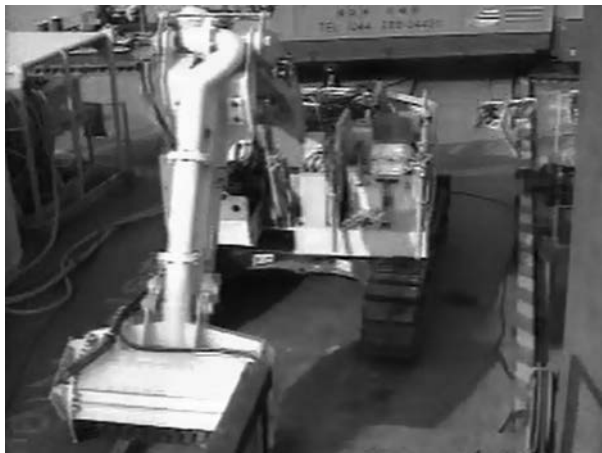


図6 浚渫用水中油圧作業機械



図7 車体傾斜呈示運転席

については触像を利用することが提案されている。つまり、バケットの接触座標を蓄積し画面に描画して接触情報を視覚的に呈示することで、操作者は掘削などの作業により変化したマウンド形状をリアルタイムに認識可能となる。さらに設計形状を重畳して表示することで、形状の比較を常時行ないながら作業できるものである。

図8に相似型操作インターフェース構成を示す。この遠隔操作支援システムは、水中油圧ショベルフロント部の操作入力のほか、バケットの反力情報(掘削手応え)、および、実機体の関節角度を認識するディスプレイとしての機能も有している。

制御系については、単純で安定性の高い位置対称型バイラテラル制御を基本としている。しかし位置対称型バイラテラル制御で反力を呈示する場合、変位と力の間に比例と見なせる関係が成立している必要がある。つまり油圧作業機械において小さな負荷ではMaster-Slave間で変位が生じないため、接触の認識が困難である。また油圧ショベルに利用されるシリンダは一般にストローク速度が遅いため、力逆送型バイラテラル制御では無負荷時にMaster-Slave間で相似の関係を保つことが難しい。そこで本システムでは、無負荷時には位置対称型バイラテラル制御を行い、接触センサにより接触を認識した場合には位置拘束ゲインを高めることで負荷の認識を容易

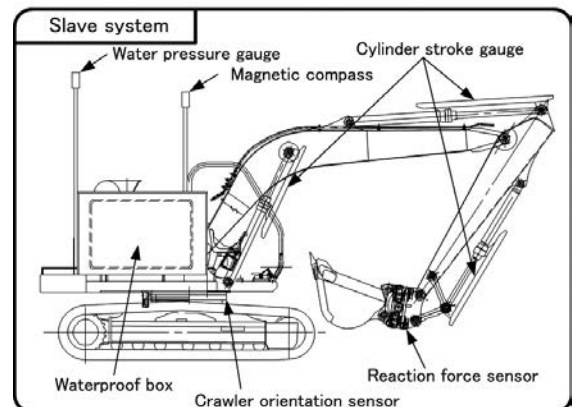
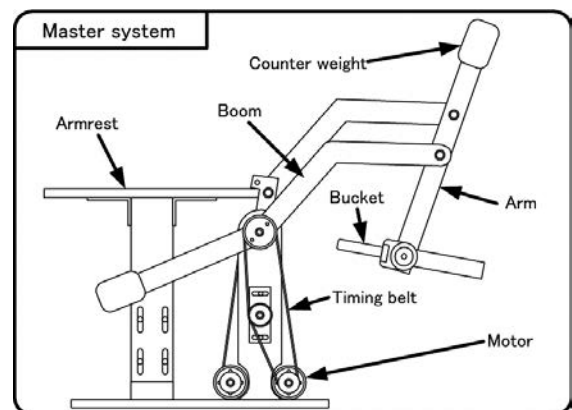


図8 水中油圧ショベル遠隔操作支援システム構成

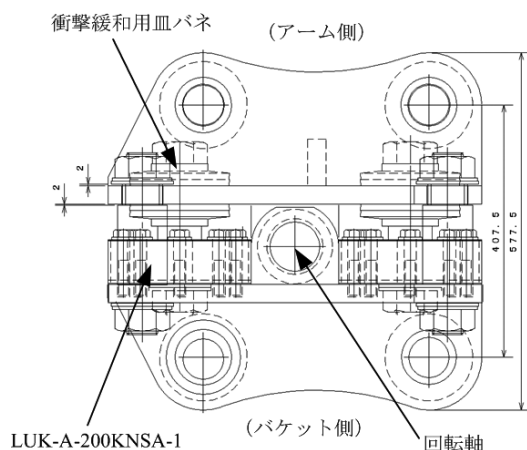


図9 反力センサアタッチメント

としている。

内界センサについては、シリンダストローク量を直動型磁歪センサにより検出し、その関節角度から先端座標を算出する。機体の傾斜および方位はジャイロと地磁気方位計により検出しており、機体位置については超音波による測位システムにより船舶との位置関係を検出する。ただし超音波による測位システムのみでは、位置精度が±30cm程度となるため、水深方向のみ高精度水圧計により補正している。これらの情報を合わせ、接触座標をグローバル座標系に変換し記録する。なお接触負荷の検出については、バケット部にロードセルを用いたアタッチメント(図9)を設置しており、バケットにかかるピッチングトルクを検出している。

また各関節を独立して制御することが容易な電動モータと異なり、単体の油圧ポンプからの作動油を各シリンダに分配するため、弁を同時に開いた場合、重力加速度方向など動きやすい関節から動作してしまいエンドポイントの追従性が低くなる。この問題に対しては、フロント部の重心位置によりバルブ開度の補正值を変化させる重力補償制御のほか、遅延の発生しているシリンダへ作動油を供給するため他のシリンダのバルブ開度を絞りなど、シリアルリンク機構である油圧ショベルの先端座標の追従性を向上させる工夫がなされている。

このように本支援システムでは、視覚情報の劣化に対応するため、人間が暗中で手探りで状況を把握するように、バケットに取り付けた力センサの接触情報とそのときの接触座標から、油圧ショベルの周囲の地形を図化しモニタ上に表示するものである(図10)。

4. 海底資源採掘のための課題

海洋資源開発においても過去に技術開発がなされ

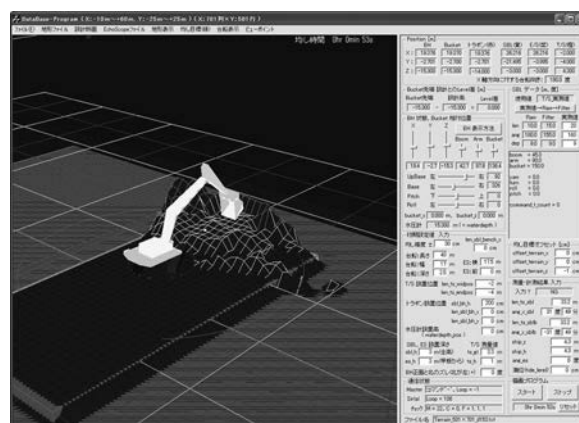


図10 接触高さから地形を図化する

ている。1981年からは、工業技術院の大型プロジェクト「マンガング塊採鉱システムの研究開発」が開始され、牽引型マンガングジュールコレクターにより試験的にではあるが集鉱が成功した実績⁶⁾がある。また、近年では2012年に独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構から採掘要素技術試験機の建造を受注した共同企業体が沖縄本島北西の水深1,600mの海底熱水鉱床で試掘試験に成功し、サンプル採取に成功している⁷⁾。さらに実採掘に関する検討も開始されており、経済産業省の2013年度ニュースリリースにおいて公表されている「海底熱水鉱床開発計画第1期最終評価報告書(平成25年7月5日)」⁸⁾では目標掘削量5,000wt/日とした採鉱機の検討について記載されている(図11)。

海外においてはオランダに本社のあるIHC MERWEDE社がSubsea Mining Crawlersを専用船舶とセットですでに3機製作しており、同じグループ内のIHC Marine and Mineral Projectによって実際の商用化につながっている。これはダイヤモンド掘削を目的としたものであり、施工水深は-300mと比較的浅海域での施工機械である。また多国籍開発ベンチャーのNautilus Minerals社が海底熱水鉱床をターゲットにした開発プロジェクトを進めており、数年の内に実施されることが予想されている。図12はBulk Cutterと呼ばれる自走型の地盤破砕機であり、このような深海高圧環境下において高出力が必要となる作業機械に油圧駆動を利用することは非常に有効であるものと考えられる。

しかし商業化のためには大量の採取が必要である。今まではSMT(Seafloor Mining Tool)単体の開発が注視されてきた感があるが、実際には大規模かつ広範囲の水中無人化施工について現実的な施工法について検討し、その施工法に合致した自由度や性能を持つ機体の開発が必要であると考えている。

たとえばレアアース堆積物の場合、レアアース含

項目	要 目
主寸法	約10.5mL×5.4mW×4.5mH
重量	空中約120t, 水中約100t
総馬力	1,150kw 浚渫ポンプ450kW 油圧ポンプ350kW×2
掘削装置	油圧駆動式ドラムカッター 掘削量 70m ³ /h (5,000t/日) 掘削ブーム 旋回・俯仰機能
浚渫装置	浚渫ポンプ 660m ³ /h×130m水頭
移動装置	油圧駆動 4クローラー 登坂能力35°以上 スラスト (水中移動用)
調査観測装置	TVカメラ, ライト, 超音波ソナー, 航海センサ, レスポンダ (音響測位用), 計装・状態監視用センサ

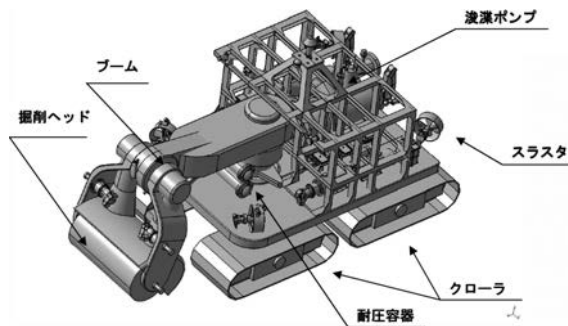


図11 海底熱水鉱床採鉱機イメージ
(経済産業省資源エネルギー庁「海底熱水鉱床開発計画 第1期最終評価報告書 (平成25年7月5日)」⁸⁾より引用)

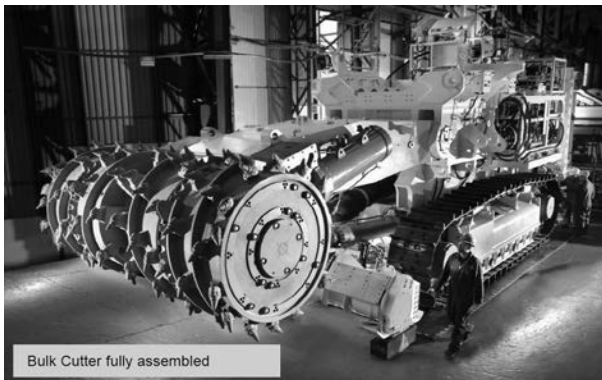


図12 Nautilus Minerals社のSeafloor Mining Tool
(「Nautilus Minerals Investor Update (November/19/2014)」⁹⁾より引用)

有率が高い部分は海底面表層から10m程度の範囲とされている。海底面にシルト状堆積物が存在する場合、Bucket Wheel Excavatorのような強大な機械が投入できないため、幅広クローラーの小型機が有効であると想定される。しかし小型機では海底を10m程度掘り下げるには表層部から平面的に数回に分けて掘削することが必要となる。このような現

場条件において小型掘削装置が走行するためには、各施工面の精度を確保する必要があると考えられ、海底面形状の計測が必要である。

また、銅の含有率が比較的高い熱水鉱床については傾斜地の中腹にある程度密集して存在する(図13)ことが確認されている。一般に熱水鉱床は、地下のマグマで熱せられた熱水が通過途中の岩石の鉱物や元素を溶かし、温度や圧力の低下などで含まれていた鉱物が岩石の亀裂部分に結晶化して形成された鉱脈である。チムニー(煙突)状の堆積物のほか、そのチムニーが倒壊し周囲に堆積する地形状況となっており、このような場所を有索クローラで移動することは非常に困難であるものと想像できる。また、資源についてはグラントレベルより深い場所にも存在することが予想され、鉱山における床掘に似た施工方法が必要となる可能性が存在する。

コバルトリッチクラストについても平頂海山の中腹に多く存在することが確認されており、急傾斜地の地形条件となる。図14に平頂海山の模式断面図とクラスト分布概念を示す。このような急傾斜地において任意の位置に移動する機構や、法面作業を遠隔操作で安定して実施できる施工方法について、詳細に検討する必要があるものとする。

さらに言う海洋鉱物資源開発における採掘は深海での作業となり、こういった非常に厳しい現場条件における大規模な施工を完全無人化で実施する必要がある。

つまり深海底での施工における技術的課題は耐圧・防水性能だけでなく、目視や光学センサによる地形形状の把握が困難であること、さらに動力ケーブルなど有索機械であり輻輳を避けるため複数台の運用が困難であること、それに関連し採掘した資源の移送方法の検討などが必要である。

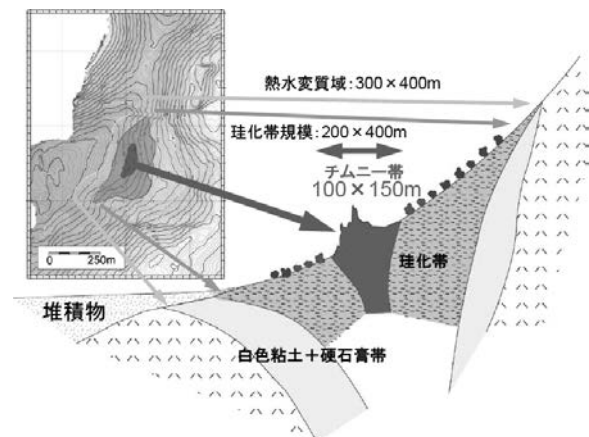


図13 ベヨネース海丘鉱床断面イメージ図
(経済産業省資源エネルギー庁「海底熱水鉱床開発計画 第1期最終評価報告書 (平成25年7月5日)」⁸⁾より引用)

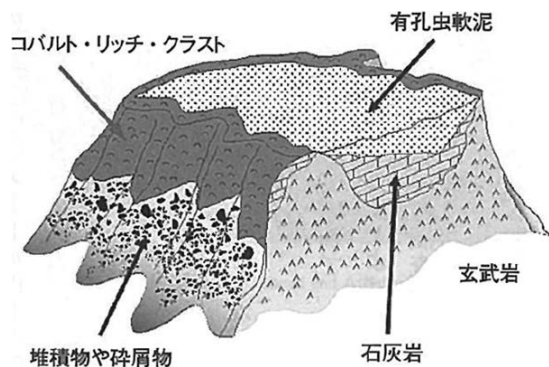


図14 平顶海山の模式断面図とクラスト分布概念
(谷口正次「オーシャン・メタル 資源戦争の新次元」東洋経済新報社¹⁰⁾より引用)

現在、我が国における深海探査技術は世界でもトップレベルにあり、石油天然ガス・金属鉱物資源機構や海洋研究開発機構が中心となり、海洋鉱物資源に関するさまざまな調査が行われている。しかし、採鉱に関して言えば、それぞれ単独のサブシステムを海洋試験しているに過ぎず、採鉱機・揚鉱システム・採鉱船・輸送というトータルシステムの技術開発を早急に進めるべきである。

5. 水中作業機械の将来展望

海洋国家である我が国において、海洋の開発および利用等を基本理念とした海洋基本法が平成19年に成立された。さらに平成25年度の海洋基本計画見直しでは、平成30年台後半にメタンハイドレート・熱水鉱床について民間主導の商業化を目指すことが明記された。特に熱水鉱床は、世界的に枯渇問題が懸念されている銅について含有量が多いとされており、パプアニューギニア領海のビスマルク海で世界初の商業化を目指したNautilus Minerals社（カナダ）のSolwara-1プロジェクトが注目されている。

しかし深海底での大量の鉱物資源採掘を考えた場合、不陸のある広大な範囲を対象に、難視界という条件下での完全な無人化作業が必要である。つまりマイニングツールの開発には、施工方法や作業手順等から必要な自由度や機能等を検討し、そして採算性という非常に高いハードルを越えるために無人化

施工の作業効率の向上が重要である。

海底資源採掘の商業化の可能性に関しては、輸送や精錬に係るコストや世界的な需要量に変動する資源価値なども要因として存在し、また生態系への影響についても結論が出ていないため、断言することはできない。しかし海洋資源国家を目指す我が国において、少なくとも技術的な部分については実現可能なだけの技術力を有しておくことが重要であると考えている。

そのためには、災害現場における無人化施工技術、深海探査技術、水中施工技術、そして油圧施工機械といったさまざまな分野の知見を集結させ、海底資源採掘のための技術開発をすすめてゆくべきである。

参考文献

- 1) 大川聰, “写真でたどる建設機械200年”, 三樹書房
- 2) 金山裕幸: “水中施工機械「水中バックホウ・ビッグクラブ」による施工コスト削減対策について”, 第16回港湾技術報告会概要集, 1999
- 3) 東亜建設工業株式会社HP, <https://www.toa-const.co.jp/techno/civileng/harbor/c03/index.html> [Supporting online material: accessed on 2016/01/28]
- 4) 山元弘, 邵輝, 茂木正晴, 大槻崇, 他4名: “油圧ショベルによるIT施工システムに関する研究”, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp. 5-10, 2008
- 5) 熊谷崇信: “遠隔操縦対応型水中バックホウの施工事例と有効性”, 建設の施工企画2011年3月号, pp. 41-45, 2011
- 6) 猪熊, 岡田, 尾山, : “国家プロジェクト「マンガン団塊採鉱システム」”, 資源と素材Vol. 112 p. 174-983, 1996
- 7) JOGMECニュースリリース, “海底採掘要素試験機による海底熱水鉱床の採掘試験に成功”, <http://www.jogmec.go.jp/news/release/release0431.html> [Supporting online material accessed on 2016/01/28]
- 8) 経済産業省資源エネルギー庁, “海底熱水鉱床開発計画第1期最終評価報告書” <http://www.meti.go.jp/press/2013/07/20130705003/20130705003-2.pdf> [Supporting online material: accessed on 2016/01/28]
- 9) “Nautilus Minerals Investor Update Nov/19/2014” <http://www.nautilusminerals.com/IRM/PDF/1459/ConferenceCallPresentation> [Supporting online material: accessed on 2016/01/28]
- 10) 谷口正次, “オーシャン・メタル 資源戦争の新次元”, 東洋経済新報社

(原稿受付: 2016年2月3日)

解説

空気を地盤に注入する新しい液状化対策工法 —Air-des工法—

著者紹介



やま ね のぶ ゆき
山 根 信 幸

東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター
〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町1-3

1991年山口大学理学部地質学鉱物科学科卒、
2008年広島大学大学院工学研究科博士後期課程
修了、1991年東亜建設工業株式会社入社、技術
研究開発センターにて地盤関係の研究開発に従
事、地盤工学会、土木学会会員、博士（工学）。

1. はじめに

我が国の人口と資産のほとんどは、ひとたび地震が発生すれば液状化する可能性の高い低平地に集中している。このような液状化リスクの高い地域の面積は広大で、そこには膨大な数の構造物が存在している。1995年の兵庫県南部地震、2011年の東北地方太平洋沖地震他を経験し、重要構造物に対する耐震対策、液状化対策は進められてきたが、その対策進捗率は決して高くないのが現状である。

空気注入不飽和化工法（Air-des工法）は、液状化が発生する可能性がある飽和した砂質地盤に対して、空気を直接注入することにより地盤を不飽和化させ、その残留空気により地盤の液状化強度を増加させる液状化対策工法である。当技術は、使用材料が空気であるため経済面や環境面で非常に優れており、我が国の人口と資産のほとんどが集中する低平地の広範囲な領域を、効率的かつ安価に液状化対策できるものとして期待されている。

本報告は、本工法の特長を概説し、空気注入による不飽和化の効果をまとめたものである。

2. Air-des工法の原理

一般的に液状化とは、図1に示す様に「飽和した砂地盤に、地震動等の繰返し荷重が作用し、それにより地盤中の間隙水圧が上昇し土粒子が間隙水に浮いた状態となり、地盤がせん断応力を失う現象」と言われている。

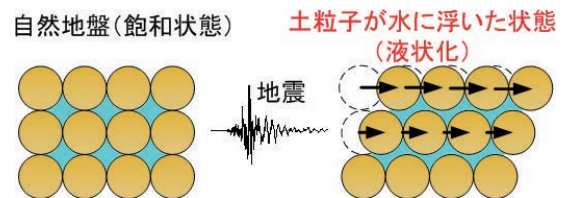


図1 地震による液状化のイメージ

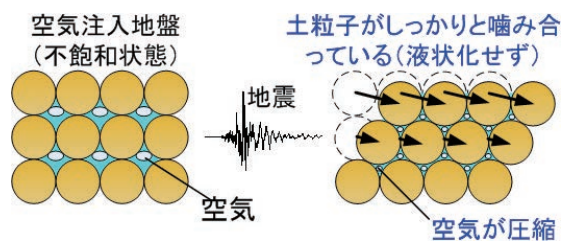


図2 空気注入による液状化強度増加のイメージ

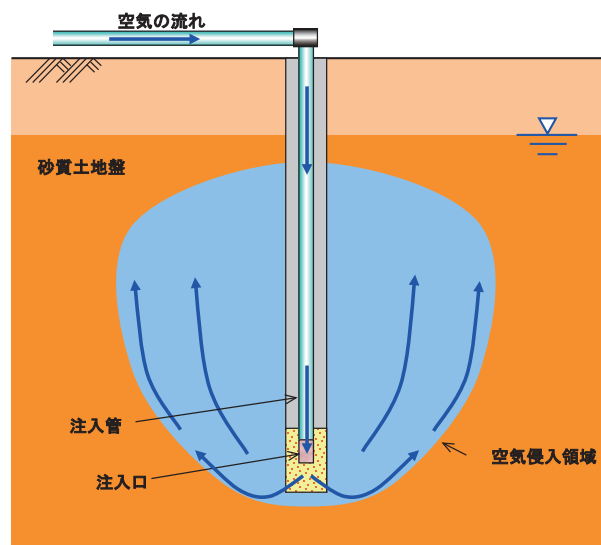


図3 空気注入のイメージ（埋込み式注入方法）

Air-des工法は、地盤内に直接注入した空気により、地震時の間隙水圧の上昇を抑制させることにより液状化強度を高める液状化対策工法である。図2に空気注入を行った地盤の液状化強度増加イメージを示す。注入により空気が間隙水中にトラップされた砂質地盤に、地震動が作用した際、間隙空気の体積が圧縮することで過剰間隙水圧の上昇が抑制され、

液状化に対する抵抗が増加する。

図3に空気注入のイメージを示す。本工法は、地盤中に設けた注入口から空気を注入することで地盤を不飽和化させるものである。空気の侵入範囲は、飽和透水係数や注入時間により、球状もしくは下に凸の半楕円状となる。空気注入停止後、余剰な空気は地盤上部から自然に排出されるがある程度の空気は地盤中にトラップされておおむね85～95%程度の飽和度 S_r となる¹⁾。

岡村ら²⁾は過剰間隙水圧が有効上載圧力 σ'_v と同値になるとき（液状化が発生するとき）の体積ひずみを体積ひずみポテンシャル ε^*_v （式(1)）と定義し、 ε^*_v は液状化強度倍率IR（不飽和状態での液状化強度比/飽和状態での液状化強度比）とユニークな関係（図4）にあることを示している。

$$\varepsilon^*_v = \frac{\sigma'_v}{P_0 + \sigma'_v} \left(1 - \frac{S_r}{100}\right) \frac{e}{(1+e)} \quad (1)$$

ここに、 P_0 ：静水圧（絶対圧），

σ'_v ：有効上載圧力， S_r ：飽和度（%），

e ：土の間隙比

この関係を用いれば、空気注入によって低下した S_r から液状化強度を一義的に推測することが可能である。そのため、ある地盤における液状化対策を検討する際、必要となる液状化強度の値から S_r を算定し、その S_r が空気注入によって実現可能である場合、当工法が適用できると判断される。また、この関係は、 σ'_v が大きいほどIRが大きくなることを示し、ある程度の σ'_v が期待できる地盤深部や盛土直下地盤などではその改良効果が大きい。

3. Air-des工法の特長

本工法の施工は、1) 空気注入管設置のための削孔、2) 注入管の設置・埋戻し、3) 空気注入、4) 不飽和化領域のモニタリング、5) 改良地盤の評価の手順で行われる。なお、本工法の設計に関しては、文献3を参照されたい。

Air-des工法の注入設備を図5に、施工状況を写真1～3に示す。一般的なコンプレッサーを用いて供給される空気は、空気注入量を計測管理しながら圧力制御にて地盤中に注入される。注入時の空気圧力は、空気侵入による地盤の割裂破壊を防止するため、 σ'_v の1/2と静水圧の和を超えない圧力で設定している。本工法の特長を下記に示す。

(1)他の液状化対策工法に比べて安価

本工法の使用材料は大気中の空気であること、また、施工機械は、注入管設置のための削孔機、空気供給のコンプレッサー、および空気注入管理・制御のための管理装置等である。このため小規模な設備で施工が行え、低コスト化が実現できる。

(2)施設を供用中のまま施工可能

地盤の骨格構造を変化させずに空気を間隙水と置き換える工法であるため、施工中に地盤の変形が生じず、施設を供用したままの施工が可能となる。

(3)施工に伴う環境負荷を軽減

使用材料が空気であることから材料に起因した環境負荷は極めて少ない。また、施工に大型機械を必要としないため、騒音・振動の影響も小さい。

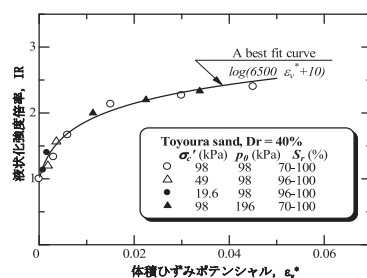


図4 体積ひずみポテンシャルと液状化強度倍率の関係

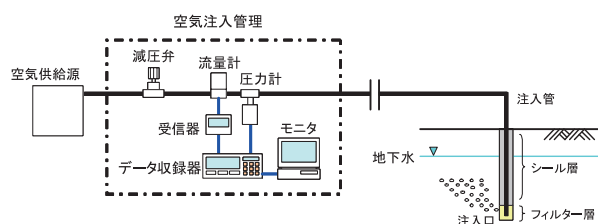


図5 空気注入設備



写真1 空気注入管理システム



写真2 空気供給源（コンプレッサー）



写真3 空気注入状況

(4)狭隘なスペースでも施工可能

削孔機が設置できる作業範囲が確保できれば施工が可能のため、狭隘な場所でも施工が可能である。

4. 不飽和地盤の評価と改良効果の確認

本工法の施工において最も重要な管理項目は、現場における不飽和領域の拡大状況の確認と改良地盤の品質評価である。施工中の不飽和領域の拡大状況の確認としては、空気注入による地盤の比抵抗値の変化に着目し、式(2)によって評価している。

$$\text{比抵抗変化率}(\%) = ((\rho_2 - \rho_1) / \rho_1) \times 100 \quad (2)$$

ここに、 ρ_1 ：空気注入前の比抵抗（初期値）、

ρ_2 ：空気注入中の比抵抗

図6に実規模空気注入実験での比抵抗計測結果を示す。また、同図には対象地盤の概略の土層構成と後述する空気注入後に実施した凍結サンプリングによる S_r の測定結果も併せて示してある。空気注入による改良対象範囲は、地下水位（G.L.-3.3m）から空気注入深度（G.L.-6.5m）までである。この改良範囲内にて施工中に計測された比抵抗変化率は経時的に増加する傾向を示し、比抵抗変化率により空気注入による地盤の不飽和化の進行状況をモニタリングできることが認められた。

空気注入後の改良地盤の品質評価は、サンプリング等により地盤の S_r を直接評価する方法と、地盤のP波速度 v_p を計測し定性的に地盤の不飽和状態を確認する方法⁴⁾がある。

図6の凍結サンプリングによる S_r 測定結果では、G.L.-5.0m以浅の一部で S_r の低下が小さい部分が認められるが、それ以外では概ね95%以下を示しており、改良対象外の S_r と明瞭に異なり、空気注入により地盤が確実に不飽和化されていることが確認された。

本工法の改良効果を確認するため、盛土直下に本工法を適用した遠心模型実験⁵⁾を実施した。

実験結果として図7に最大せん断ひずみの分布を示す。全域飽和地盤（無対策地盤）では液状化層のほぼ全域で最大せん断ひずみが0.1以上を示し、間隙水圧の状況から地盤の液状化が認められた。空気注入を行ったケースでは最大せん断ひずみが抑制され、液状化を防止することができた。また、空気注入地盤は無対策と比較して盛土天端沈下量を1/10以下に低減できるなど顕著な改良効果が確認された。

5. おわりに

地盤に空気を注入するという極めて簡易な作業に

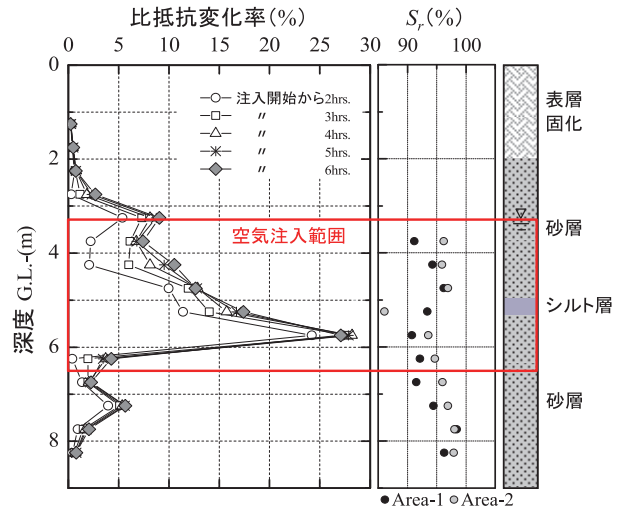


図6 現地土層構成および比抵抗・飽和度計測結果

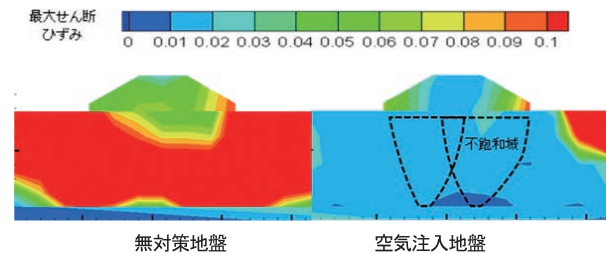


図7 最大せん断ひずみの分布

よって液状化対策を行うAir-des工法は、国土交通省四国地方整備局、愛媛大学他、企業4社の共同研究により開発されたものである。現段階でいくつかの技術的課題もあるが、「空気注入不飽和化工法（Air-des工法）技術マニュアル（Air-des工法研究会編）」にその設計・施工に関する考え方をまとめている。今後、更に研究開発を進め、適用範囲の拡大やコストダウンを図る所存である。

参考文献

- 1) 田村直登ほか：保水性試験の吸水過程における吸水速度が残留飽和度に及ぼす影響，第17回土木学会四国支部技術研究発表会，(2011)
- 2) Mitsu Okamura et al., : Effects of pore fluid compressibility on Liquefaction resistance of partially saturated sand, Soils and Foundations Vol. 46, No. 5, pp. 695-700, (2006)
- 3) 小泉勝彦ほか：空気注入不飽和化工法の開発その8：設計法の概要，第67回土木学会年次学術講演会，pp. 505-506 (2012)
- 4) 山田直之ほか：P波速度検層による不飽和状態の持続性確認，第68回土木学会年次学術講演会，pp. 163-164, (2013)
- 5) 富田雄一ほか：道路盛土直下への空気注入による液状化対策効果の実験的検討：第67回土木学会年次学術講演会，pp. 619-620, (2012)

(原稿受付：2016年2月6日)

解説

シールドマシンと油圧システム

著者紹介



さか い よし お
酒 井 義 雄

川崎重工(株)プラント・環境カンパニー
産機プラント総括部土木機械部
〒650-8670 神戸市中央区東川崎町3-1-1
E-mail: sakai_yoshi@khi.co.jp

1994年九州大学大学院工学研究科修了し、同年川崎重工(株)入社。以来シールドマシンの開発、設計に携わる。技術士(機械部門)、日本機械学会正員。

1. はじめに

シールドマシンと聞いて、ピンと来ない読者も多いかと思うが、現代社会におけるインフラ整備に不可欠な産業機械である。身近なところでは、地下鉄や下水道トンネル、道路トンネルなどに用いられている。トンネルを構築するために、地上から掘削することなく、つまり地上の構築物はそのままに地中にトンネルを構築できる便利な機械である。

本稿では、シールドマシンの概要を述べた後、油圧システムとシールドマシンとの関わり、続いて海底トンネル掘削のための要求性能、プロジェクト紹介について説明した後、最後に油圧システムの今後の課題(要望)について述べたい。

1.1 シールドマシンとは

一般的なシールドマシンの側面図を図1に示す。

円筒状の鋼殻(いわゆるシールド)の先端に地山を掘削するための刃物(以下カッタ)を取り付けたカッタヘッドが取り付けられ、それを回転させながら、推進ジャッキによってシールドマシンを前進させることにより地山を掘削していく。マシンの後方にはエレクタと呼ばれる装置があり、一定距離を掘削した後、セグメント(分割されたトンネルの壁に相当するもの)を組み立てることにより、安全にトンネルを構築することができる。マシンの大きさは、下水道向けの直径1 mクラスから、道路トンネル向けの16 mまであり、使用用途に応じて多岐にわたっている。

2. シールドマシンと油圧システム

シールドマシンには、回転運動するカッタヘッド、スクリュウコンベヤ(土砂を排土する装置)、往復運動する推進ジャッキや中折れジャッキ、回転と往復運動の両方を行うエレクタ装置などの可動部分が多くあり、そのどれもが非常に重要な役割を占める。回転系には油圧モータが、往復動系には油圧ジャッキが用いられ、それぞれに対して、必要な推力や運動速度、負荷変動に応じた設計がなされた油圧バルブと配管が組み合わされることで、はじめて機械として成り立つ。

推進ジャッキや中折れジャッキは2,000 ~ 3,000 kNのものが使用される場合が多いが、大口徑

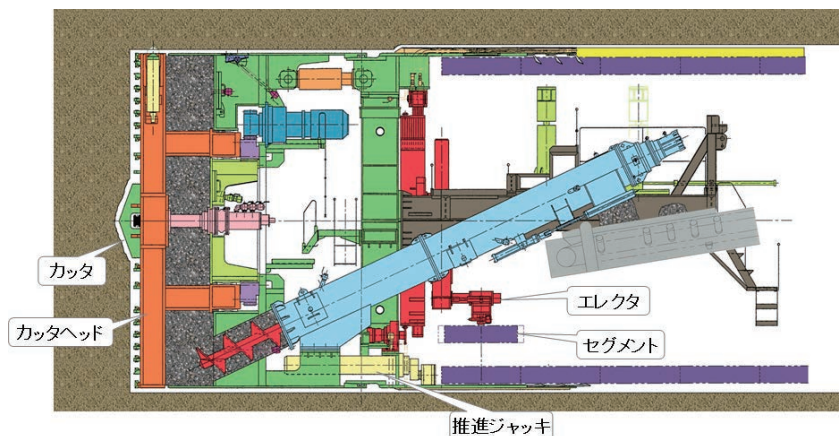


図1 シールドマシン

では5,000kN クラスも使用される。

カッターヘッド回転には、スペースの制約がある小口径を除いて、電動モータが用いられる場合が多い。油圧モータは速度調整が容易であるが、効率が悪く発熱も問題となるのが欠点となっており、電動モータのインバータ制御が一般化した今日では、小スペース、低速回転の特殊条件を除き、油圧モータのメリットが見出せない状況であり、改善が望まれるところである。

比較的低速回転での使用となるスクリュウコンベヤやエレクタの回転系には基本的に油圧モータが使用される。電動モータ使用の場合には大きな減速比をもつ減速機が必要となるためである。

エレクタ回転については、回転角度により絶えず負荷が変動するためカウンターバランス弁が用いられる。またセグメント位置決め of の正確性が求められる場合には、サーボ弁によるサーボ制御を行う場合もある。

3. 海底トンネルへのシールドマシンの適用

海底トンネルにおいても、函型のコンクリートを沈めてトンネルを構築する沈理工法の適用が難しい大深度や、船航路のため海上スペースに制限がある場合等に、シールドマシンによるトンネル構築が有用となる。

3.1 マシンへの要求機能

一般に大深度となるため、高水圧対応のマシンとすることが必要である。そのためマシン内部を外部圧力から止水している各シールド類の耐圧にその配慮が必要となる。カッターヘッド駆動についても、大深度の場合岩盤掘削となる場合が多く、その場合には高速回転、つまり大動力とする必要がある。推進ジャッキについても、受圧面積にかかる圧力が高くなり、その分必要推力が増すので、大容量化する必要がある。

トンネルの躯体となるセグメントも高水圧に耐えるべく厚みが増すため重量増となり、エレクタ装置の各機器も大出力化する必要がある。このようにほぼすべての機能について、仕様アップが必要となる。

その一方でシールドマシン内部の、スペースは限られているため、高出力だからといってその分のスペースアップが許容されるわけではなく、このあたりの設計についても難易度が増す。油圧モータやジャッキ類のよりコンパクト化された機器の開発が望まれる。

つぎに重要な点は、塩分対策である。基本的にシールドマシンは密閉構造ではあるが、地上からの送風に塩分が含まれていたり、セグメントと本体の間を止水している部分から、若干の海水が漏れる場

合もあるため、発錆対策が必要となる。またジャッキ表面のメッキについても、通常の方法ではメッキ腐食を起こす可能性があるもので、その種類、厚さについて十分検討を行う必要がある。

3.2 プロジェクト紹介

3.2.1 ドーバー海峡トンネルプロジェクト

1994年5月に開通した20世紀最大のプロジェクトと言われた上記プロジェクトについて紹介する。

フランス側から掘削した直径8.78mの2台のマシンは、海面下100m、海底下40mのところを、それぞれ20km、19km掘削した。図2にその外観写真を、図3にトンネル位置、表1にプロジェクト概要を示す。19世紀頃からトンネルの計画があったといわれるが、それ以降幾度となく計画されては頓挫することを繰り返し、やっとこのプロジェクトで実現に至った。

表2に示すように、従来機と比較して高い要求仕様であったが、それを実現する機能を有するマシンを設計、製作し、プロジェクトを成功裡に終わらせることができた。

3.2.2 シンガポール/PUBプロジェクト

シンガポールのPUB (Public Utility Board) 上水道向けのトンネルについても、一部海底部の掘削を行った。図4にそのφ6.78mシールドマシンの外観写真を、図5にトンネル路線図を示す。シンガポール本島とジュロン島を結ぶトンネルであり、こ



図2 ドーバープロジェクト向けマシン



図3 トンネル位置図
(フランス側)

表1 プロジェクト概要

マシンタイプ	シールドTBM×2機	
マシンサイズ	φ8.78m×13.745m	
トンネル用途	鉄道	
場 所	英仏海峡(ドーバー海峡)	
施 主	EURO TUNNEL	
施 工	T.M.L.	
掘削延長	20,009m	18,857m
掘削時期	1988年12月～1991年5月	1989年3月～1991年6月
工 区	T2	T3

表2 従来実績との要求性能比較

	要求性能	従来実績
長距離掘削	16km	4 km
腐食耐用期間	3 年	1 年
耐水圧	12bar	4 bar
高速掘削	530m/月	300m/月



図4 PUB向けシールドマシン

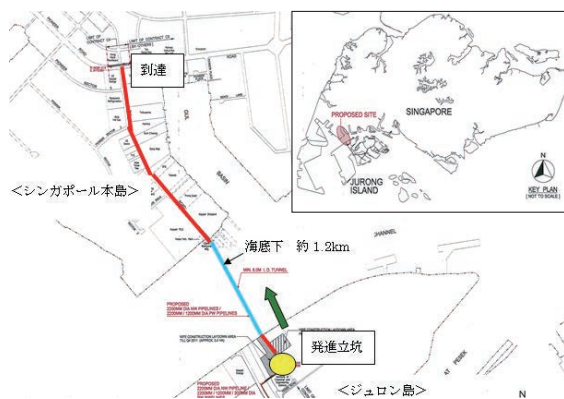


図5 トンネル路線図

の海峡は頻繁に船が行き来するため、シールドマシンでのトンネル構築は有用であった。

条件的には、やはり大深度のため高耐水圧仕様、岩盤掘削対応であった。2012年から2013年にかけて施工され、成功裡にプロジェクト完了した。

4. 油圧システムの今後の課題

今後の機能を考える上で、大深度、超長距離が要求仕様のキーワードになり、油圧システムに求められるものは下記となると考える。

① 油圧システムの高効率化、コンパクト化

上述のように、今後のトンネルはさらに深い地下

に構築するようになるため、すべての機器に大出力化が求められる。限られたスペースに設置するため、コンパクト化、高効率化（これが実現されれば、コンパクト化できる）した油圧機器の開発が望まれる。使用圧力の高圧力化もひとつの方法と考える。

② 対環境性能の向上

昨今では対環境性能の向上は必然となっているが大きく分けて自然環境とマシンの中で作業するものへの作業環境に大別される。前者については、作動油の生分解性、長寿命化（低劣化）、難燃性が求められる。後者については、油圧機器からの発熱の減少化や低騒音化が求められる。いずれにしても自然と人にやさしいマシンにしていく必要がある。

③ メンテナンス性の向上

油圧システムは、性質上作動油の性状管理（油が汚れていないか、水分が含まれていないか等）を定期的に行う必要があり、また油漏れについても点検する必要があり、工事従事者にとっては通常の作業にこれらのメンテナンス作業が付加されることになる。もちろん油圧システムの正常な性能発揮のためには必然であることは言うまでもないが、省労働化が求められている中で、メンテナンスフリー化もしくはそれに近づけば、油圧システムの魅力が向上すると考える。

5. お 結 び

最近では、対環境性から従来油圧を使用していた機器が電動化される事例があるが、まだまだ油圧システムの自由度は魅力的なものがあると思う。シールドマシンにおいても、特に推進系の油圧ジャッキは必然である。

国内のシールドマシン需要は一巡した感があるが、海外に目を向ければ、今後発展していく国々の地下鉄や上下水道、道路トンネルなどのインフラ構築にシールドマシンは欠かせないものであり、需要はまだまだ続くと思われる。これらの需要に対応するためにも、油圧システム性能のブレークスルーによる高性能シールドマシンを設計できれば、電動化に負けず、新たな局面が開けるように思う。このような形で、さまざまな業界の技術を結集して、世界各国の社会の発展に貢献していきたいと考える所存である。

（原稿受付：2016年2月5日）

解説

循環泥水駆動によるコア採取装置

著者紹介



しん もと ゆう いち
眞 本 悠 一

国立研究開発法人 海洋研究開発機構
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
E-mail: shinmotoy@jamstec.go.jp

2002年横浜国立大学大学院工学研究科博士前期課程修了。シュルンベルジュ株式会社を経て、2007年海洋研究開発機構入社、現在に至る。地層試料採取機器・掘削同時検層手法等の研究に従事。修士（工学）。

1. はじめに

科学掘削船「ちきゅう」（図1）は、海洋地殻直下のマントルへの到達およびその岩石試料（コア）を採取することを目指して建造された。従来のコア採取の方式では、船体中心にある櫓内のトップドライブ式モーターで、最大約10,000メートル（空中重量約500トン）分の鉄製パイプの先端にドリル刃先を取り付けて回転させ、10m程度のコアを円柱状に削り採る。しかし、海底下の掘削深度が深くなるほどパイプと坑壁との摩擦が増大し、回転力が鈍り¹⁾、良質な円柱コアを採取することが困難になる。そこで、当機構では、ドリルパイプ全体を回転せず、船上の高い吐出圧力（50MPa）を有する泥水ポンプの送水により坑底でタービンモータを回転させ、ピストン圧力により刃先を押し出すことによりコアを採取する循環泥水駆動コア採取装置を開発した。本



図1 科学掘削船「ちきゅう」

報では、開発した装置（実機）を用いた要素性能および陸上における岩石コアの採取結果について紹介する。

2. コア採取装置

2.1 全体構成

図2にタービン駆動コアリングシステム（TDCS：Turbine driven coring system²⁾）の全体構成を示す。

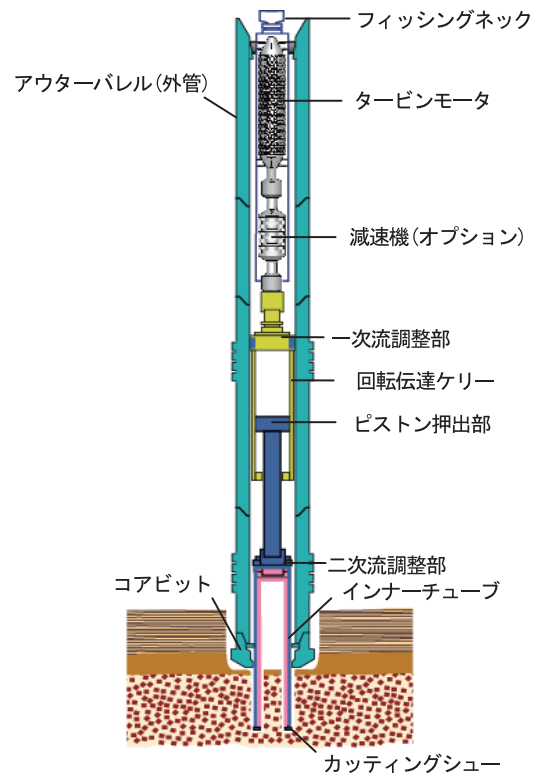


図2 タービン駆動コアリングシステム(TDCS)の概念

TDCSは、船上から数千メートルのドリルパイプを継ぎ足しアウターバレルと呼ばれる外管と接続したコアビットを坑底に接地する。タービンモータおよびオプションとして使用する減速機³⁾、一次、二次流量調整部を含むピストン押出部、コアを削り出す先端のカuttingシュー（外径：約95mm）と呼ばれる刃先およびコアが格納されるインナーチューブを含むインナーアセンブリを船上より自由

落下により投下する。船上から投げ込んだインナーアセンブリは、平均分速200m程度で落下し、アウターアセンブリに嵌合する。その後、船上の泥水ポンプから清水や掘削用の泥水をドリルパイプ内へ送水・循環することにより、押出部のピストン作用によりコアビットの先端中心部の孔（直径 約98mm）から刃先とインナーチューブを押し出しつつ、タービンモータの回転をケリー（角ステム）部によって伝達させ坑底を掘進し、円柱コアを削り出す。また、インナーアセンブリ上部のフィッシングネックに船上からワイヤーアセンブリを降下し接続・嵌合させ、インナーチューブに格納されたコアを含むインナーアセンブリを揚収することで、ドリルパイプ全部を船上に揚収せずに、効率的にコアを採取・回収することが可能になる。

2.2 タービン駆動部

図3にタービン駆動部の概要を示す。駆動部ケース内部には22枚の羽根（外径：約78mm）で構成された静翼部（ステータ）と動翼部（ロータ）を1組・段とし、10段分を1ユニットとしてシャフトが回転する。タービンモータユニット上部に、約1000時間連続運転することが可能な耐久性を有するPCD（焼結ダイヤモンド素材）スラストベアリング、上下に同素材のラジアルベアリングを配置した。本タービンユニットを繋ぎ合わせ、2～3ユニットにすることより吐出ポンプ流量500～1,000l/min (lpm) に対してタービンの定格回転数：3,500～8,000rpmとなるような設計としている。オプションで減速機（減速比：1/3および1/9）を使用することで、回転数400～2,600rpm程度、最大2,000N・m程度の回転トルクを出力することが可能となる⁴⁾。



図3 タービンモータ（左）、静翼と動翼部（右）

2.3 ピストン押出部

タービンユニットから流出した泥水を分岐し、ピストン部に圧力をかけて押出す必要がある。図4にタービンユニット（減速機を含む）直下にある一次流調整部の概念を示す。一次流量調整部には流出用ノズルが環状に最大6個均等に配置されている。ピストンを押出すスラスト荷重は、ポンプ圧力とノズ

ル寸法（直径）および開放個数（流出面積）によって決定される。つまりノズル全体の流出面積が大きいほど、ピストンにかかる圧力が低下し、スラスト荷重も減少する。また、ボール型の嵌合ロック機構を設けることにより、泥水ポンプによる送水前にピストンのストロークが伸びないように工夫されている。

図5にピストン押出部の下部、インナーチューブへの流入口直上にある二次流調整部の概要を示す。二次流調整部には、流入ノズルが1個設置することができ、カッティングシュー先端方向へ流れる流体およびコアビットから坑内側に流れる流体を分岐している。ノズル寸法を大きくすることで、カッティングシューへの流入量を増やし、地層の掘進に伴う掘屑（カッティングス）を効率よく揚排出することができる。さらに、ピストンのストロークが伸びきった際に船上で泥水ポンプ圧の上昇を検知することができるように、ストロークエンドで流路が狭くなる機構を設けている。

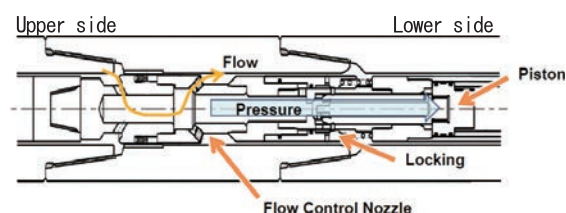


図4 一次流調整部

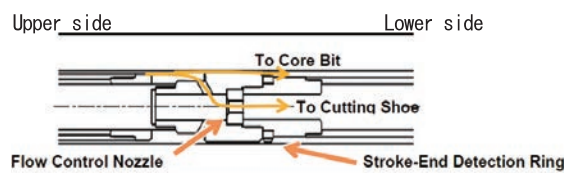


図5 二次流調整部

3. 要素部品の性能

3.1 タービン駆動性能

陸上で、循環駆動によるタービンモータの回転数やトルク等の性能を把握するため、実機のタービンモータ（2ユニット分）を繋ぎ水平にし、送水ポンプ（最大吐出量：約1,400 (lpm)，最大吐出圧：約7 MPa）から清水を送水した。また、電磁ブレーキシューをタービン回転シャフト部に接続し、回転数を制御し、かつトルクメータ（最大10,000 N・mまで測定可能）を同回転部に接続し、出力トルクを計測した。図6に本実験から得られたタービンモータの性能曲線を示す。平均的な循環流量として480, 685, 720, 860, 930, 1000 (lpm) で設定し、タービンの回転を電磁ブレーキでおよそ50～

100rpm毎に制御した結果、岩石の掘進に必要な回転数：1600～1800rpmおよび定格出力：12～38kWを得ることができた。

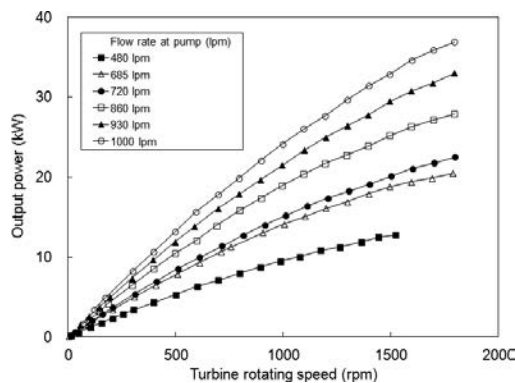


図6 タービンモータ性能曲線

3.2 ピストン押出力の推定

タービンモータの回転だけでは、最大約4.5mの岩石での掘進は難しく、スラスト荷重が必要となる。そこでピストン押出部の上部にある一次流量調整部の流入ノズルの流路断面積（Total Flow Area：TFA）を変更し、一次流量調整部上部の外管に圧力計を設置し、ピストン押出部に掛かる断面積よりカッティングシュー部にかかるスラスト荷重をリアルタイムで計測した。図7に、各流入ノズルのTFAにおける送水ポンプの平均的な流量に対し、換算したカッティングシュー先端にかかるスラスト荷重の関係を示す。ノズルの流路面積を小さくするほど、ピストンにかかる圧力が増加し、スラスト荷重の増加率（傾き）が大きくなることがわかった。また、TFA：300mm²では、約800lpmの流量に対してスラスト荷重が最大で約10kN得られることが分かった。万が一コアが4.5m採取されていない場合、TFAをできるだけ狭める設定とし、スラスト荷重を増加することで、硬岩においても最大採取長での掘進が可能になると考えられる。

つぎに、二次流調整部の分岐用ノズルによりカッ

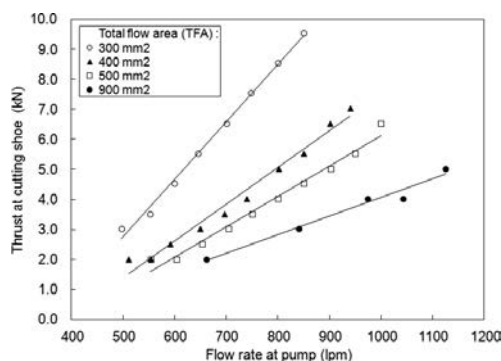


図7 送水ポンプ流量とスラスト荷重の関係

ティングシュー側にどの程度の掘削流量が流れるかを検証した。分岐用ノズルは1個（2種類のノズル径12mmおよび17mm）装着することが可能である。図8に送水ポンプ流量に対するカッティングシューとコアビット側へ流れる流量の関係を示す。全体送水流量480～880lpmに対して、カッティングシューへは常時概ね80～120lpm流れ、排土に必要な流量（100lpm）を確保することがわかった⁵⁾。

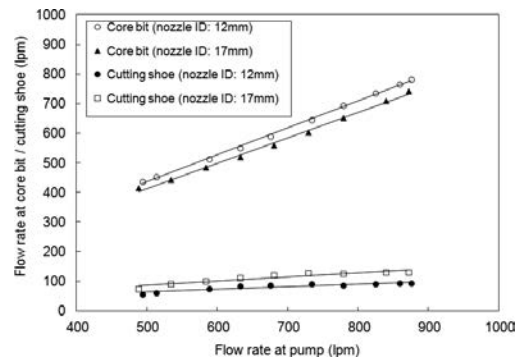


図8 送水ポンプ流量と流出量の関係

3.3 陸上でのコア採取結果

図9に各性能試験を実施したタービンモータ等を組み合わせたTDCSを用いた陸上におけるコア採取試験の様子と採取したコアの写真を示す。TDCS全体を鉛直にし、約4.8mの岩石ブロック（白色大理石）を試験孔に入れ、循環駆動させコア採取を実施した。「ちきゅう」によるマントル掘削ではかんらん岩や安山岩等の硬岩を採取するためできるだけ硬く脆く割れる岩石を選定した⁶⁾。その結果、一部掘進時にカッティングシューの振れ回り等によって、コアに亀裂が発生することがあるが、最大のコア採取長（4.5m）を採ることができ、海上での掘削試験を実施する準備が概ね整った。



図9 コア採取試験（左）、採取したコア（右）

4. ま と め

本報では、開発した循環泥水駆動によるコア採取装置の要素（タービン、一次および二次流量調整部）性能および陸上における岩石コアの採取状況について紹介した。今回実施した陸上でのコア採取の

結果から、従来のロータリー式採取装置等に比べて、品質の良いコアを採取できる可能性が高いことがわかった。今後、科学掘削船「ちきゅう」で海上試験を早急に実施し、船上コア採取の常用装置の一つとして実用化し、来るマントル掘削プロジェクトへ備える予定である。

参考文献

- 1) (社)全地連：ボーリングポケットブック第4版—ダウンホールモータ, pp. 129-130, 2004.
- 2) 眞本悠一, 宮崎英剛, 児玉伸一, 鈴木智明：タービン駆動コアリングシステムの開発, 全地連「技術フォーラム2011」, A-5, 現地調査, 2011.
- 3) 宮崎英剛, 眞本悠一, 和田一育, 児玉伸一, 鈴木智明：タービン駆動コアリングシステムの耐久性向上に関する検討, 平成23年資源・素材学会—秋季大会, [A1] 岩石力学応用・開発機械, 2011.
- 4) Tiraspolsky, W. : Hydraulic Downhole Drilling Motors-Turbodrills and Positive Displacement Rotary Motors, III. 8 Turbocorers, the Institut Francais du Petrole (IFP), pp. 204-209, 1985.
- 5) Shinmoto, Y. and Miyazaki, E. : Performance Analysis of Turbo-corer for Deep-sea Drilling, The 8th Japan Fluid Power System (JFPS) International Symposium on Fluid Power, New Industrial Applications of fluid power systems-1, 1A3-4, 2011.
- 6) 眞本悠一, 宮崎英剛, 児玉伸一, 鈴木智明：タービン駆動コアリングシステムの掘削効率とコア品質に関する実験的研究, 岩の力学に関するシンポジウム, 130003, 2012.

(原稿受付：2016年2月4日)

解説

海洋掘削における噴出防止装置について

著者紹介

みやざき えいごう
宮崎 英剛海洋研究開発機構地球深部探査センター技術部
〒236-0001 横浜市昭和町3173-25
E-mail: miyazakie@jamstec.go.jp

1992年東京大学大学院工学研究科修士課程修了。海洋科学技術センターに入所。現在に至る。地球深部探査船「ちきゅう」の建造に携わり、現在は、大水深掘削に関する技術開発に従事。日本船舶海洋工学会、石油技術協会の会員。

1. はじめに

石油や天然ガスの探鉱では、物理探査などによりそれらが胚胎している可能性が高いと判断された場合、試掘して石油・ガス層の存在やそれらの広がり、埋蔵量の調査が行われる。掘削中には、石油・ガス層を掘りぬいた場合、それらが地中から噴き出す恐れがあるため、それを防ぐ噴出防止装置（BOP：Blow Out Preventer）が用いられる。海洋掘削の場合は、BOPを海上の掘削リグから海底に降下し掘削坑上に設置して掘削作業を行う。

海洋研究開発機構では、主に海底下の地質構造などの科学的調査を目的とする掘削船「ちきゅう」を運用している¹⁾。本稿では「ちきゅう」のBOPを例として、海洋掘削の噴出防止装置について概説する。

2. 海洋掘削システムの構成

海洋掘削の一般的な掘削システムを図1に示す。海上の掘削船は、ライザーパイプという口径500mm程度の鋼製パイプで、海底に設置するBOPと接続される。掘削用のドリルパイプは、船上からライザー及びBOP内を通して海底下まで降下し、その下端のドリルビットで掘削を行う。ある程度掘進した後に、坑壁の崩壊を防ぐため、ケーシングパイプという鋼製パイプを坑内に降下してセメントで固定し設置する。その後、設置したケーシングより小径のドリルパイプを用いてさらに深く掘進する。このように掘削およびケーシング設置を繰り返して目標とする海底下深度まで掘削を行っていくこととなる。

ドリルビットを回転させて掘削する際は、比重や粘度などを調整した掘削流体（泥水〔でいすい〕）を、船上のマッドポンプによってドリルパイプ上端から下端のドリルビットまで送り噴射させる。ビットから噴射された掘削流体は、掘削により生じたカッティングス（掘りくず）とともに坑内を上昇し、BOPおよびライザーを通して船上に戻る。戻った掘削流体からカッティングスを除去し、比重や組成を再調整した上で、再びドリルパイプを通して坑底へ送る。このように掘削流体を循環させることで、坑内からカッティングスを除去しつつ掘削を進めていくこととなる。

また、掘削流体には、循環中にその成分が坑壁に張りつくことで坑壁崩壊が生じにくくなるという効果もある。さらに、掘削流体はドリルビットの冷却や潤滑効果も与える。これらにより、より効率的に掘削を行うことが可能となる。



図1 海洋掘削システム

3. 噴出防止装置 (BOP)

3.1 ウェルコントロール

掘削中は、掘削流体による船上からの水頭圧が坑底に加わる。通常の掘削では、地層内の石油やガスなどの地層流体が坑内に浸入しないようにこの水頭圧を地層圧より大きくし、また地層自体を破壊しないように地層破壊圧より小さくする。このような水頭圧の調整は、循環させる掘削流体の比重を船上で調整することで行う。

しかし、水頭圧以上の異常高压層が存在した場合、地層流体が坑内に浸入することとなる。これをキックと呼ぶ。このキックを放置すると、坑内に浸入した地層流体がライザーを通して上昇し、船上で噴出して制御できない暴噴状態となってしまう。これを防ぐため、早期にキックを検知することが非常に重要である。これは、掘削流体の船上への戻り量や掘進速度など、全般的な状況から掘削作業者が判断する。キックと判断された場合には、直ちに掘削を中止してBOPを閉鎖する。坑内に浸入した地層流体は、BOP及びライザーに付属して船上まで接続された小径パイプ (Choke Line) に通し、船上で流量を絞りながら少しずつ排出する。あわせて、坑底に送る掘削流体の比重を上げて水頭圧を地層流体の圧力より高め、坑内へのさらなる浸入を防ぐ。その後、BOPを開き、掘削を再開することが可能となる。

以上のような作業をウェルコントロールと呼ぶ。掘削作業では、このウェルコントロールを確実に行うことが必須であり、BOPはそのための重要な機器である。

3.2 BOPの構成

図2は、海洋研究開発機構の「ちきゅう」に搭載されているBOPである。これは大水深掘削に適用される標準的な形式のものであり、Annular BOPとRam BOPから構成される。それぞれが2～3段の形式が異なるBOPを段積みにしたものである。全体としては、これらを接続して積み上げた構成であるため、正確にはBOP Stackという。

図2右上のAnnular BOPの内部には、図3左のエラストマー製パッキングユニットが取り付けられており、冗長性としてこれが2段積みとなっている。掘削中は、中央の開口部をドリルパイプが通っているが、Annular BOPを作動させると、パッキングユニットが下側から油圧ピストンによって押されてドーム状のケーシングに押し込まれ、上部周囲の金属製の爪が締まることでエラストマー部が圧縮され、ドリルパイプ周囲が密封される。

ウェルコントロールでは、ドリルパイプができる

だけ坑底付近あるのが望ましい。Annular BOPはエラストマー製であり、閉じた状態でドリルパイプを押し下げることが可能であり、そのような場合に有効となる。最大坑内圧力は約70MPa (10,000PSI) まで適用できる。

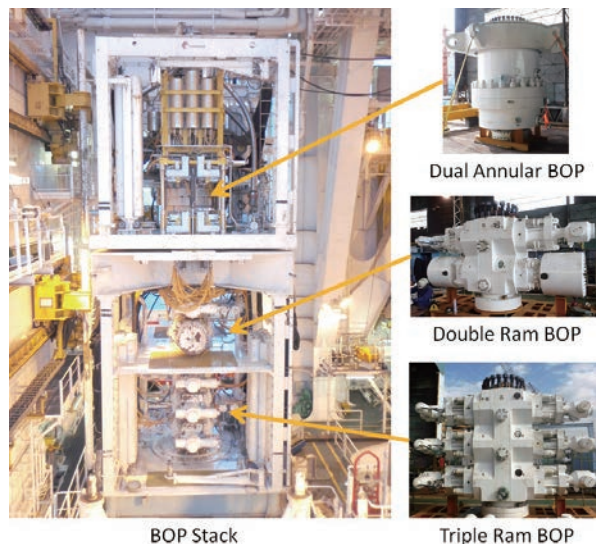


図2 噴出防止装置 (BOP)

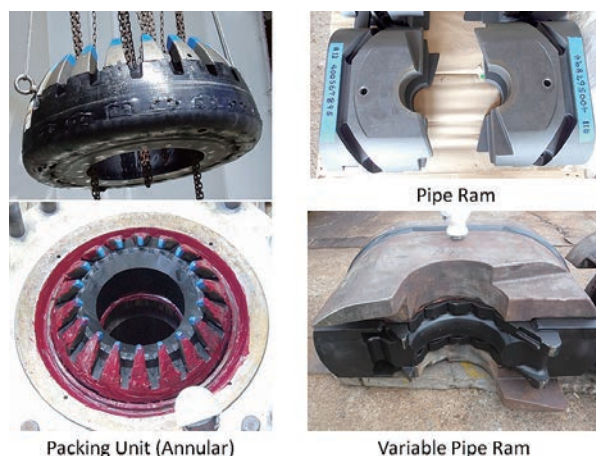


図3 BOPの密閉用ユニット

Ram BOPは、図2右中および下のように2段と3段のものがある。最大で約103MPa (15,000PSI) までの圧力を密封できる。

Triple Ram BOPでは、図3右のように中心部に開口部を有する鋼製密封ユニットでドリルパイプを挟んで密封する。これを3段積みとしている。図3右上のRamは、開口部の寸法が固定であり、それに対応する外径のドリルパイプ用である。一時的に作業を中断する場合に、このRamの上部でドリルパイプを切り離し、下側ドリルパイプを坑内に吊り下げておくことができる。図3右下は、パイプ外径に応じて開口部の外径が変化するRamであるが、ドリル

パイプを吊り下げることにはできない。

Double Ram BOPは、開口部のないBlind Shear Ramが上段に取り付けられる。これは、緊急時にドリルパイプを切断してそのまま密封するものである。ドリルパイプがない場合には、これを閉じるのみで密封することとなる。Double Ram BOP下段には、これも緊急時にケーシングパイプを切断する刃を有するCasing Shear Ramが取り付けられている。

BOP Stackは、その中央から下部のLower BOPと上部のLMRP (Lower Marine Riser Package) に分離できる。天候悪化などにより掘削を中断して船を退避させる場合は、Lower BOP部 (Triple/ Double Ram BOP) で掘削坑を密封し、LMRPから切り離してライザーも含めて船上に回収し退避する。天候回復後に、現場に戻りライザー及びLMRPを降下してLower BOPに接続し、掘削を再開することとなる。

以上のように、BOP Stackとしては数種類のBOPを積み重ねたものであり、目的に応じて作動させるBOPを使い分ける。

3.3 BOPの制御

BOPは、船上から送る油圧で作動する。油圧ラインには、ライザーに付随するステンレス配管、バックアップ用としてライザーに沿って取り付けられる油圧ホースが用いられる。作動圧は34.5MPa(5,000PSI)であり、船上のポンプでBOPまで送られる。ポンプにトラブルが生じた場合でも、BOP閉の動作のみはできるように、船上およびBOP Stackにアキュムレータが多数搭載され、常時蓄圧されている。

BOP Stackには、図4のような油圧マニホールドが搭載されており、各BOPの開閉や各種バルブ開閉、圧力調整など100個程度のファンクションを作動させるように作動油を分岐する。この油圧マニホールドは、冗長性確保のため2式搭載されており、一方に不具合を生じた場合でも、もう一方ですべてのファンクションを作動させることが可能である。

BOPの操作は、図5のような操作パネルで行われる。ビジュアル表示で各ファンクションを一つずつ操作できるようになっている。BOP Stackと船体は光・電気複合ケーブル (MUX Cable) で接続される。作動用の光信号送受信と、BOP Stack上の電子機器への給電は、このMUX Cableを通じて行われる。この信号・給電システムも冗長性確保のため完全二重化されている。さらにMUX Cableによる操作ができなくなった場合でも、船上からBOPへ海中を通して音響信号を送ることにより、BOP閉とすることができる。加えて、船上から降下させた無人機 (ROV: Remotely Operated Vehicle) の油圧ユニットで油圧ホースを接続してBOPへ直接油圧を送ることによ

り、作動させることもできる。

このように、安全性および冗長性確保のため、何重もの操作系統が設けられている。

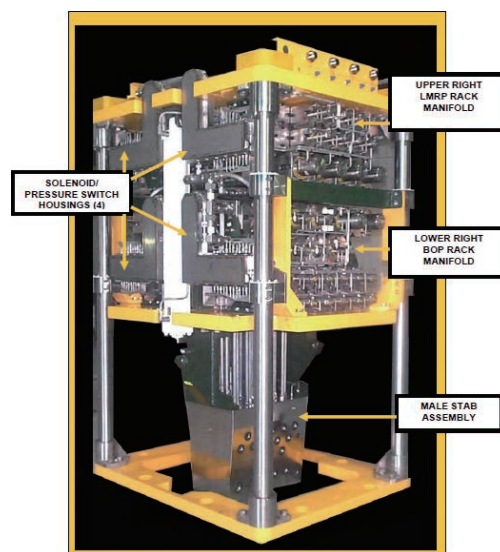


図4 BOP制御用油圧マニホールド



図5 BOP操作パネル

4. おわりに

本稿では、海洋掘削で用いるBOPの概要を紹介した。掘削作業では、BOPを正常に機能されることが極めて重要であり、そのために高い信頼性でさまざまな冗長性も有するシステムとなっている。2010年4月にメキシコ湾で稼働中の掘削リグが爆発炎上し、大規模な原油流出が引き起こされるという事故が発生したが、それもBOPを正常に機能させられなかったことが大きな原因の一つである。同事故以降、BOPの機能をさらに高め、Blind Shear Ramを二重化するなどの安全対策検討も進められている。BOPがより確実に機能するようになり、今後これまでに以上に安全に海洋掘削が行われることが望まれる。

参考文献

- 1) <http://www.jamstec.go.jp/cdex/j/>

(原稿受付：2016年2月5日)

解説

乗用管理機搭載式ブームスプレーヤの ブーム垂直変位低減装置の開発

著者紹介



みず かみ とも みち
水 上 智 道

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究
機構農業技術革新工学研究センター
〒331-8537 埼玉県さいたま市北区日進町1-40-2
E-mail: tmizukam@affrc.go.jp

2004生研機構入所2005農研機構生研センター
入所、現在に至る。農業機械（防除機）の研究
に従事。農業食料工学会、日本農作業学会、日
本農業学会などの会員。

1. はじめに

近年、農地の集約などによる経営規模拡大により、生産現場では大規模ほ場に対応した大型機械の導入が進んでおり、農薬散布機としてはブームスプレーヤが普及している。ブームスプレーヤは、地表面に凹凸や傾斜がある場合、高速作業や旋回などの際にブームが激しく揺れる。ブーム先端が地面に衝突し破損する危険性があり、農薬の均一散布が困難になるばかりではなく、目的外飛散（以下、ドリフト）による環境負荷が懸念される。

農薬を安全に効率的に利用するためには、適切なブーム高さから適切な量を散布し、作物に農薬を十分に付着させることが重要である。しかし、実際の作業時には、ブームが作物や地面に接触することを回避するために、過度にブーム先端を上げた状態で作業する場面が多く見られる。また、ブームの振動

を抑制するために、作業速度を遅くしている。今後、大規模化に伴い、省力的な農業経営を行うためには、作業速度の高速化が大変重要な課題である。

この問題に対応するため、生研センターでは、農業機械等緊急開発事業の下で、民間企業と共同でブーム振動制御装置の研究開発に取り組んだ。本開発では、乗用管理機搭載式ブームスプレーヤによる高速作業時において、ブームの挙動を安定化し、作業精度を維持・向上できる機構・装置を開発することを目標とした。そこで、本稿では、今回開発した乗用管理機搭載式ブームスプレーヤのブーム垂直変位低減装置について報告する。

2. 開発機の概要

乗用管理機搭載式ブームスプレーヤのブーム垂直変位低減装置（以下、HPS：Hydro Pneumatic Suspension）を搭載した開発機を図1、表1に示す。開発機は、13.9kWのディーゼルエンジンを動力とする水田・畑で併用できる乗用管理機搭載式ブームスプレーヤである。前車軸の懸架方式は、トラクタなどと同様、不整地でも車体を水平に保ち、操縦しやすく、輪距の調節が簡単なピボットピン方式である。この方式は、片方のタイヤで障害物を乗り越す場合、車体にロールが生じにくい。後車軸は、車軸懸架方式で左右の車輪が車軸でつながっており、ロールが生じやすい構造の懸架方式である。タンク容量600Lで、ブーム形式は2段スライド両ブーム



図1 乗用管理機搭載式ブームスプレーヤのHPSと回路

表1 乗用管理機搭載式
ブームスプレーヤの主要諸元

型式	RVH60YH/120K
全長×全幅×全高 (mm)	3290×1900×2950
輪距 (mm)	1320
車体質量 (kg)	1205
機関呼称出力 (kW/rpm)	13.9/3000
機関総排気量 (ml)	854
薬液タンク容量 (l)	600
ブーム形式	2段スライド両ブーム
散布幅 (m)	9.0～15.6

で、散布幅は9.0～15.6mの任意の長さに調節することができる。

HPSの主要諸元を表2に示す。本装置は、油圧シリンダ、アキュムレータ、減衰バルブ等から構成される。既存機のブーム昇降用油圧シリンダの代替として用いることで、両輪のタイヤから同時に入力される垂直方向の変位を絶縁し、変位がブーム本体に伝達しないようにする装置である。左右の単動油圧シリンダは、連結しているリンクアームによって、その独立性が規制される。このため、左右の単動油圧シリンダの相反する動作を想定しないことから、左右の単動油圧シリンダでアキュムレータおよびバルブブロックを共有する構造とした。両方のタイヤが障害物を乗り越す際、車体に垂直変位が生じる。その際、油圧ホースおよびバルブブロックなどを介して単動油圧シリンダと連結しているアキュムレータ内の窒素ガスが車体の垂直変位とともに生じるブームの垂直変位を吸収し、その変位をブームに伝達しないようにする装置である。

単動油圧シリンダの母機への搭載方法を検討し、単動油圧シリンダの取付け部軸受けの構造を変更した。単動油圧シリンダ下部側は円周方向に回転可能な軸受け、単動油圧シリンダ上部側は球面軸受けに変更することで、単動油圧シリンダ伸縮時の摩擦抵抗低減を可能とした。さらに、リンクアーム可動部の摩擦抵抗低減対策として、すべりブッシュの装着と表面摩擦係数の低い摺動ピン、さらに摩擦係数低減用のグリスを塗布した。これにより、アキュムレータによるばね定数を過度に高くする必要がなくなり、制振効果を維持した。なお、HPSのON/OFFは運転席のオペレータ手元のコントローラスイッチで行うことができる。

3. 障害物設置路面走行試験

開発したHPSの性能を確認するため、障害物設置路面の走行試験を行った(図2)。走行路に設置し

表2 HPSの主要諸元

	シリンダ形式	単動式
単動油圧シリンダ	チューブ内径 (mm)	φ44
	ロッド径 (mm)	φ30
	ストローク (mm)	156
バルブブロック	最大流量 (l/min)	6
アキュムレータ	ガス容積 (ml)	950

た木製の障害物は、標準法(ISO 22763:2006.)のField track blocksを参考とした。標準法内では、高さ55mmであるが、我が国では水田ほ場も想定する必要があることから、より厳しく約10%高い60mmに設定した。標準法(ISO 22763:2006.)は、定量的な測定を想定せず、目視による定性的な確認を主体においた試験であることから、標準法に定められた走行距離、障害物設置個数、障害物配置位置を省略し、定量的な基礎試験を目的として障害物1つを設置し開発機の性能評価を行った。最大散布幅15.6mに全開した左ブーム先端に超音波式変位センサヘッド(キーエンス社製UD-300)を取付け、超音波式変位センサアンプユニット(キーエンス社製UD-320)を介して、ユニバーサルレコーダ(共和電業社製EDX-100A-4H)によってサンプリング周波数500Hzでデータを記録した。超音波式変位センサアンプユニットの出力は電流出力であるため、ユニバーサルレコーダに入力する際に、250Ωの抵抗を用いて電圧出力に変換した。

HPSをON/OFFにした同一車両で試験を行った。HPSをONにしたものを開発機、OFFにしたものを既存機と表記する。開発機の左ブーム先端に超音波式変位センサを取付け、障害物(高さ60mm)を両輪で同時に乗り越す条件において、開発機、既存機でそれぞれ0.5および1.0m/sで走行し、ブームの垂直方向の変位を測定した。なお、標準法(ISO 14131:2005.)の試験方法に準拠し、薬液タンクは空の状態で行った。

4. 結果の概要

ブームの水平状態を0mmとし、上方への変位をプラス、下方への変位をマイナスとして示す。本装置を用いることによりブームの垂直方向の変位(全振幅)を低速0.5m/sでは約42%、高速1.0m/sでは約65%低減し、さらに変位の収束時間が短縮した(図3)。

5. おわりに

本研究は、平成23から25年度までの3年間で実



図2 障害物走行試験風景

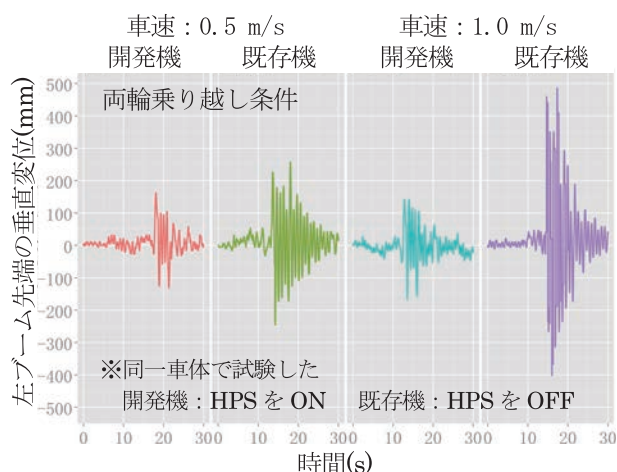


図3 HPSによる垂直方向の変位低減効果

施したものである。開発した乗用管理機搭載式ブームスプレーヤのブーム垂直変位低減装置の制振効果により、慣行作業に対して高速な作業が可能となることから、規模拡大や省力化にも貢献できると考えている。さらに、地面との衝突によるブームの破損事故、薬液の不均一散布およびドリフトのリスクを減らすことが可能となるため、修繕費の節減や環境

負荷の低減につながると考えられ、この面でも農家や地域社会に貢献できると期待している。

最後に、本研究の実施にあたり、㈱やまびこ、KYB㈱、KYBエンジニアリングアンドサービス㈱など、関係者各位には多大なるご協力を賜りました。ここに記して厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 水上智道, 吉田隆延, 田中庸之, 宮原佳彦, 伊藤達夫, 稲田隆則, 田中保雄, 徳田宏紀, 太田淳, 柴崎大樹, 森勲輝: 乗用管理機型ブームスプレーヤの機体の垂直変位に起因するブーム垂直変位低減装置の開発, 農業食料工学会誌, Vol. 78 No. 1, p. 54-63, (2016)
- 2) 水上智道, 吉田隆延, 田中庸之, 宮原佳彦, 伊藤達夫, 稲田隆則, 田中保雄, 徳田宏紀, 太田淳, 森勲輝, 柴崎大樹: 乗用管理機搭載式ブームスプレーヤのブーム上下振動低減装置, 農研機構研究成果情報 (2016)
- 3) 水上智道, 吉田隆延, 田中庸之, 太田淳, 柴崎大樹, 森勲輝, 伊藤達夫, 稲田隆則, 田中保雄, 徳田宏紀, 明石昌樹: ブームスプレーヤのブーム振動制御装置の開発, 平成25年度生研センター研究報告会, p. 1-10 (2014)

(原稿受付：2016年3月1日)

会議報告

計測自動制御学会・流体計測制御シンポジウムにおけるフルードパワー研究動向

著者紹介



なか お みつ ひろ
中 尾 光 博

鹿児島大学大学院
〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40
E-mail: nakao@mech.kagoshima-u.ac.jp

2011年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。その後、鹿児島大学助教を経て、2015年同大学准教授。現在に至る。空気圧管路の計算・計測に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

計測自動制御学会にはフルードパワーに関連した研究活動を行う流体計測制御部会が産業応用部門内にある。この部会が主催する流体計測制御シンポジウムが、平成27年10月26日(火)に東京工業大学・大岡山キャンパスにおいて産業応用部門大会と併設される形で開催された。本稿では、このシンポジウムにおける研究動向について報告する。

2. シンポジウムにおける研究動向

2.1 セッション1「応用」

「応用」のセッションでは4件の講演発表が行われた。

飯島らは、空気圧アクチュエータを用いて作業者の荷重を支持するロボットアームの概念設計を提案し、静力学解析により35kgの荷重を支持できることを示した(図1)。

渡邊らは、手術支援ロボットの吻合工程におけるスレーブ間での針の受け渡しの自動化に関する制御

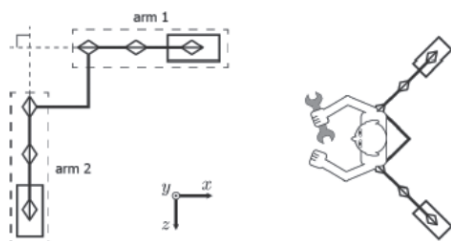


図1 荷重支持アームの概念図

手法を提案し、位置制御実験で針の受け渡しが可能なることを確認した(図2)。

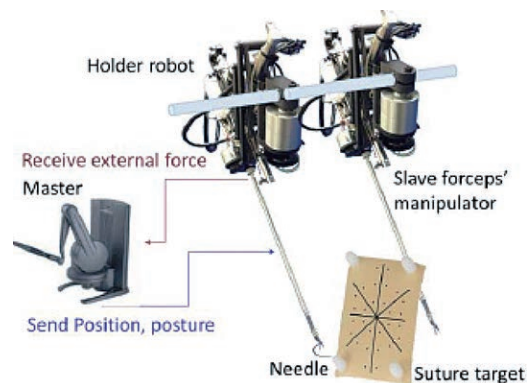


図2 針の自動受け渡しを実現するシステム

鈴木らは空気圧ゴム人工筋の内圧変化から装着者の歩行意図を検知するアシストスーツを作成し、アシスト歩行時の筋電計測結果より有効性を評価した(図3)。



図3 内圧から歩行意図を検知するアシストスーツ

石塚らは遠隔触診の実現を目的として、磁気粘性(MR)流体をアレイ化した硬さ分布提示用触覚ディスプレイを作成し、圧縮試験により従来を上回る5mmの解像度を有することを確認した(図4)。

2.2 セッション2「基礎」

「基礎」のセッションでは5件の講演発表が行われた。

永井らは、高圧水素の簡便な流量計測法として、

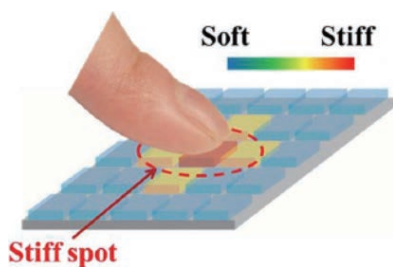


図4 MR流体を用いた硬さ分布触覚ディスプレイ

準等温化容器を用いた，温度変化を考慮した容器内の圧力による方法を提案し，実験によりその有用性を確認した（図5）。

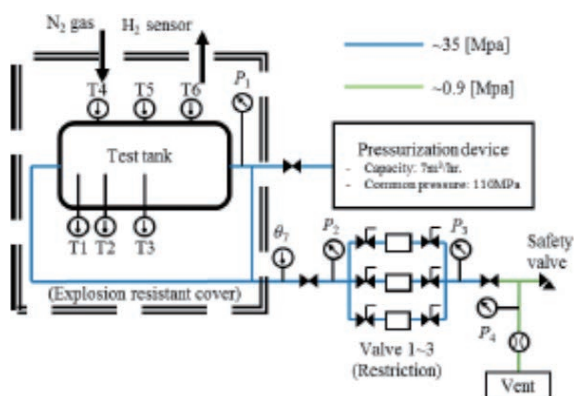


図5 高圧水素を用いた実験装置の概略

中尾らは，壁面圧力計測と数値計算による空気圧管路内の流量推定において，計算スキームによる計算誤差について比較検討した（図6）。

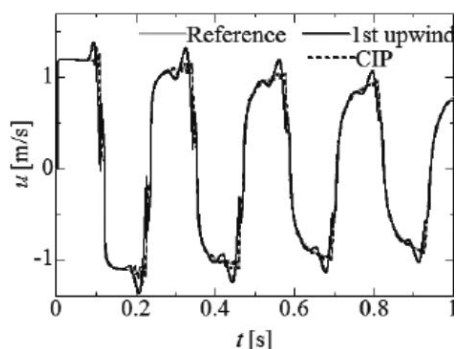


図6 各計算スキームによる流速推定結果の比較

岸らは，変速機入力軸の回転数制御において，油圧系の不確かさを考慮したスモールゲイン定理に基づくロバスト制御系の構築を提案し，シミュレーションにより有効性を検証した（図7）。

横田らは，非直線型流路形状MR流体ダンパの性能向上のために，磁場解析によりピストン部構造の検討を行い，流路の複数個所に磁束を集中させる構造を提案した（図8）。

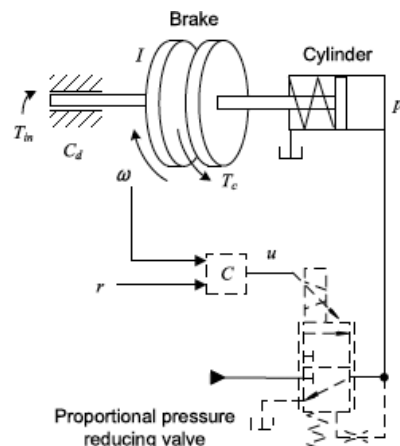


図7 回転数制御系の力学モデル

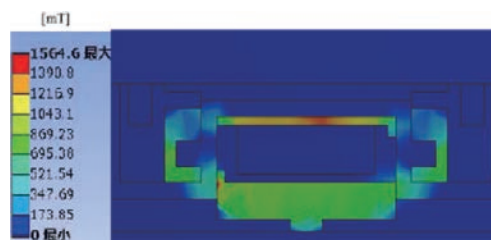


図8 改良型ピストン構造の磁場解析結果

柏木らは，サイクロン型ドレンセパレータの性能向上のために，CFD解析を用いてフィンの羽構造が流動状態に及ぼす影響について検討した（図9）。

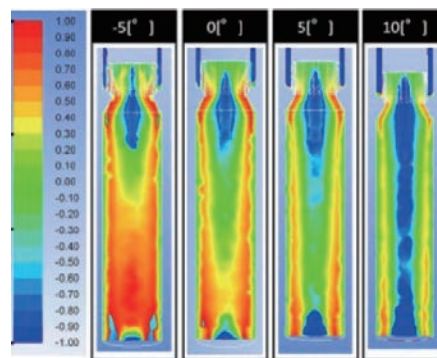


図9 フィン角度変化におけるスパイラル係数

3. おわりに

本稿では流体計測制御シンポジウムにおける研究動向について紹介させていただいた。研究内容は多岐に渡り，見ごたえのあるセッションであったように思う。本学会員の皆様に，本シンポジウムへのご参加を検討いただければ幸いである。

参考文献

- 1) 産業応用部門2015年度大会講演論文集（2015）

（原稿受付：2016年2月10日）

会議報告

第13回FLUCOME2015カタールに参加して

著者紹介



か がわ とし はる
香 川 利 春

会員 東京工業大学総合理工学研究科
メカノマイクロ工学専攻 教授
〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259

1974年東京工業大学制御工学科卒業。精密工学研究所およびメカノマイクロ工学専攻教授として自動制御・流体計測制御・生体計測の研究に従事。また本学会会長、計測自動制御学会理事、(株)日本機械学会フェロー。

第13回となったFLUCOME（流体計測制御と可視化に関する国際シンポジウム）は、2015年11月14日から18日まで中東カタールで行われた。開催会場はカタール大学でドーハ空港から約15キロの砂漠の中に存在した。開催規模は小さく、参加者は主催者発表で80名、参加国は20カ国であった。発表論文はノーショーが有るため厳密には不明であるが、60件程度であった。フルードパワーに関する研究も少なかった。文末に関連の研究発表を示す。

そもそもFLUCOMEとは日本発の国際会議で、1985年に虎ノ門にあった国立教育会館で中山泰喜先生を実行委員長として第1回目が行われた。当時は30年前のこともあり、半導体が発達しておらず、情報処理を流体の流れに乗せて処理するフルイディクス技術が全盛期であった。フルイディクス技術は散水機など現在でも利用され、流体計測制御と可視化に大きな影響を及ぼした。またFLUCOMEの重要



図1 カタール市内ソークワキフ

な応用分野であるフルードパワーシステムでは建設機械への応用のみならず、新しい燃料電池技術への応用の話題が取り上げられた。

中東でのFLUCOME開催は初めてであり、それなりに興味を持って参加した。カタール訪問はもちろん初めてで、知識としてはサッカーのドーハの悲劇位の認識であった。フライトは成田から12時間を要して、かなりの疲れが伴った。たまたま隣席が海洋研究所の職員で、色々な情報交換が行えた。カタール自体が小さい国であり、大きさは秋田県程度、人口は約180万人とのことであるが、ホテルや街中で働く人はほとんどが外国人労働者である。インド、フィリピン、ネパール、パキスタン、インドネシアからの出稼ぎで、本来のカタール人は28万人のみである。

15日の日曜日夕刻に会場のカタール大学でウェルカムパーティーが設定されていた。指定された図1のソークワキフ（砂漠の中のバザール）で大学からのバスの到着を待っていたが、いくら経過してもバスは現れなかった。ソークワキフ自体も店が500～600店あるような広い場所で、アナウンスされた位置が不明確であった。やむなく東京電機大学の藤田教授とタクシーで現地に駆け付けた。指定された場所は3か所であったが、どの場所でも待ち合わせは上手くいかなかったようである。やることが杜撰（ずさん）である。

カタール大学の図書館ホールにはFLUCOMEの参加者が誰もおらず、主催者とそのグループがいた。図2の写真は受付模様で、8割の女性が黒のブルカの衣装をまとっていた。右端の女性は目のみが空いているブルカだったが、目にアイシャドウの濃い化粧を行っていた。

16日から講演が平行で開始された。運営は場当たり的で、私の15分のキーノートスピーチ予定が、イタリアのカルマーニョ教授のインバイトスピーチの穴があいたから50分の講演をやってくれと、開始1時間前に依頼された。図3にinternational steering committee会合参加者を示す。従来のFLUCOMEの参加者では写真左端の台湾J.H. CHEN教授と私のみで



図2 受付の様子

あった。Y. Haike教授も台湾、奈良からの参加である。通常international steering committee会合では今後の運営、特に次回のFLUCOME開催の宣伝が行われるが、今回は未だ決まっていないとの返事であった。



図3 international steering committee会合参加者

講演の合間にカタール大学の機械工学科の見学を行った。会場で知り合ったムハンマド君の案内でワークショップや実験室を見せてもらった。研究はほとんど行われておらず、学生の実習が主であった。実行委員長の研究室を見せてもらいたいと聞いたが、UAEから移ってきたばかりで未だ準備中とのことであった。図4にカタール大学学生ムハンマド君のグループと懇談している様子を示す。日本アニメ「ワンピース」の大ファンで片言の日本語で色々教えてくれた。26歳のエンジニア志望で子供は1人で、アルバイトで生計を立てている。なんでも180万人の人口の内、純然たるカタール人は6パーセントで、教育費、医療費、税金はないという。

現在は原油安のためにカタール経済は活気が失われている。カタール大学にはGPS (Gas Processing Center) と称する外部資金による研究所が併設されていた。この施設を見学させて頂いた。カタール大学の機械工学科の数十倍の規模で元素分析装置など高価な装置が並んでいた。心なしか元気がなさそうなのは原油安でガスの値段も低迷している影響と考えられる。



図4 カタール大学学生との懇談

会議の参加者の9割はアラブ系の学者、エンジニアで米国やイギリスで働いている方々であった。会議終了後のツアーで海岸のリゾートとイスラム博物館の見学を行った。図5に集合写真を示す。

FLUCOME2015は13回目の国際会議として中東カタールで開催されたが、次回の予定も決まっておらず極めて難しい局面になっている。昨今のテロ事件の影響もあって、国際会議の開催は時期と場所を上手に選定する必要がある。

フルードパワーに関連した研究発表

- 1) T. Kagawa : Energy Considerations and Saving Technology of Pneumatic System
- 2) J. Peng, C. Youn, T. Takeuchi, T. Kagawa : Study on Gas Pressure Control System Using Linear Flow Rate Characteristics
- 3) K. Nagai, M. Aoyama, Y. Nakamura, T. Kagawa, C. Youn : Study on Temperature Characteristic of High Pressure Hydrogen Tank Using Semi-Isothermal Principle
- 4) I. Saito, T. Kagawa, K. Fujino, H. Kimoto, Y. hongho : Study on the Loss Coefficient at T-type Pipe Junction
- 5) H. Yoshiki : Evaluation Method of Condensation Heat Transfer Ratio of Impinging Steam Jet for Development of Surgical Device Using Steam Jet
- 6) R. Date, T. Fujita : H^∞ control of the pressure in chamber with pipe

(原稿受付：2016年4月6日)



図5 After Conference Tour

会議報告

ICMT2015におけるフルードパワー技術研究動向

著者紹介

おむ さん いん
嚴 祥 仁

精密工学研究所
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-R2-41
E-mail: sieom@pi.titech.ac.jp

2009年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。同年東北大学助教、2010年東京工業大学助教、流体マイクロマシン、機能性流体の研究に従事。JFPS、JSMEなどの会員、博士（工学）。

1. はじめに

ICMT (International Conference on Mechatronics Technology) はその名前からわかるようにメカトロニクス分野を中心として幅広い分野の研究発表が行われる国際会議である。今回のICMT2015は2015年11月27日から11月30日まで日本の東京工業大学の大岡山キャンパスで開催された。カンファレンスでは東京工業大学の岩附信行教授、金沢大学の浅川直紀教授、東京工業大学の進士忠彦教授の3人が共同で議長を務めた（図1）。基調講演4件と口頭講演79件の合計83件の講演が行われた。また11月27日の夜はWelcome Reception（図2）、11月29日はBanquet（図3）が開催され、会議参加者の親睦を深めるよい機会になった。11月30日はファナック株式会社、富士山、忍野八海においてConference Tourが行われ、日本に対しての理解を深めた。



図1 開会式の岩附信行教授（共同議長中1人）



図2 Welcome Receptionの様子



図3 Banquetの様子

2. フルードパワー関連の発表

国際会議ICMTはメカトロニクス分野が中心であり、フルードパワー関連はメインの分野ではないが、フルードパワー技術関連の発表がいくつかのセッションで行われた。特にRenewable Energy and Energy Saving Technologiesセッションで多くのフルードパワー技術関連の発表があったのでそのセッションを中心としてその内容を紹介する。

Doらは出力パワーおよび全体効率の向上するため、ブイの滑り角度が自動的に最適に調節される

SAST-WEC (Sliding Angle Self-Tuning Wave Energy Converter) を提案し、様々な波の条件で効果があることを実験的に検証している¹⁾。

Yuらは油圧ショブルのために新しいブームシステムを提案し、その制御方法を設計し、エネルギー再利用に効果があることをシミュレーションにより示している²⁾。

Dasらは新しい独立絞りの構成を提案し、そのシステムの性能および数学的なモデルを開発し、シミュレーション結果により提案した独立絞りが従来のものより高い性能であることを示している³⁾。

Leeらは油圧掘削機のエネルギー再利用システムの制御方法を提案し、シミュレーションにより従来のシステムよりエネルギー効率が高いであることを示している⁴⁾。

Chowdhuryらはアキュムレーター、2次システム、トランスフォーマーからなるエネルギー再利用システムのコンセプトを提案し、シミュレーションにより妥当性を検証している⁵⁾。

Tsunodaらは不安定な流体力を相殺するため、フィードバック制御システムを構築し、そのシステムが流体励起振動を効果的に抑制することを実験的に示している⁶⁾。

Baらはポンプ制御による位置制御のためPID制御システムを設計し、数学モデルとアルゴリズムを開発している。また、そのシステムと従来のPIDとのリアルタイム比較実験を行い、その有効性を示している⁷⁾。

Wangらは空気圧人工筋肉の精密運動のためのシンプルな制御器をデザインするため、フィードフォワード制御によりシステム性能を向上する方法を実験的に明らかにする研究を行っている⁸⁾。

Nguyenらは電気油圧式アクチュエータ (EHA) と無段変速機 (CVT) を結合したCVT-EHAのコンセプトを提案し、実験的に検証している⁹⁾。

Dangらは波力エネルギー変換器に用いられる油圧式フライホイールアキュムレータに関して動作原理を提案し、数学モデルにより性能評価を行っている¹⁰⁾。

Yoshidaらは多数に配置した平板円通電極を用いた交流電気浸透マイクロポンプを開発し、その特性を実験的に評価している¹¹⁾。

Suzukiは圧力補正弁と比例電磁弁を直列に配置しその間に中間絞りを設置することで、水圧用流量調整弁を開発している。数学モデルを構築し、シミュレーションと実験により特性を評価している¹²⁾。

3. おわりに

本稿では国際会議ICMT2015におけるフルードパ

ワー技術関連の発表の概要を紹介した。

参考文献

- 1) Hoang-Thinh Do, Seyoung Lee, Hyunggyu Park, Kyoungkwan Ahn : Proposition of a Sliding Angle Self-Tuning Wave Energy Converter, Proceedings of ICMT2015, C01 (2015)
- 2) Yingxiao Yu, Debdatta Das, Seyoung Lee, Minh-Truong Ngoc Bui, Hyunggyu Park, Kyoungkwan Ahn : Study on Energy Regeneration for Boom System of Hybrid Hydraulic Excavator, Proceedings of ICMT2015, C02 (2015)
- 3) Debdatta Das, Syed Abu Nahian, Seyoung Lee, Hyunggyu Park, Kyoungkwan Ahn : Development of a New Independent Metering Valve Circuit for Controlling of Hydraulic Actuators with Load Feedback, Proceedings of ICMT2015, C03 (2015)
- 4) Seyoung Lee, Minh-Truong Ngoc Bui, Juho Yoon, Hyunsu Lee, Hyunggyu Park, Kyoungkwan Ahn : Study on Swing Energy Recuperation System in Electro-Hydraulic Excavator, Proceedings of ICMT2015, 04 (2015)
- 5) Puja Chowdhury, Hyunsu Lee, Juho Yoon, Minh-Truong Ngoc Bui, Kyoungkwan Ahn : Designing of an Energy Saving Secondary Control Swing for Electro-Hydraulic Excavator and Comparison with Conventional System, Proceedings of ICMT2015, C05 (2015)
- 6) Wataru Tsunoda, Wataru Hijikata, Tadahiko Shinshi, Hiroyuki Fujiwara, Osami Matsushita : Suppression of Self-Excitation in Rotor-Oil Film Bearing System Utilizing Active Magnetic Bearing, Proceedings of ICMT2015, A06 (2015)
- 7) Xuanba Dang BA, Kyoungkwan Ahn : Advanced PID Control for an Electro-Hydraulic System, Proceedings of ICMT2015, A07 (2015)
- 8) Shaofei Wang, Kaiji Sato : Simple Controller Design for Precision Motion of Pneumatic Artificial Muscle Systems, Proceedings of ICMT2015, A08 (2015)
- 9) Minh Tri Nguyen, Kyoungkwan Ahn, Van Tho Hoang, Jinyoung Kim, Youngjin Yum : A Study on Continuously Variable Transmission (CVT) Using Electro Hydraulic Actuator (EHA), Proceedings of ICMT2015, C07 (2015)
- 10) Tri Dung Dang, Cong Binh Phan, Kyoungkwan Ahn : A study on Hydraulic Flywheel-accumulator Used in Wave Energy Converter system, Proceedings of ICMT2015, 09 (2015)
- 11) Kazuhiro Yoshida, Maho Watanabe, Joonwan Kim, Sang In Eom, Shinichi Yokota : Characterization of an AC Electroosmotic Micropump Using Plate-Cylinder Electrode Array, Proceedings of ICMT2015, C10 (2015)
- 12) Kenji Suzuki : Development and Performance Evaluation of Pressure Compensation Valve for Proportional Electromagnetic Valve for Small Flow Rate, Proceedings of ICMT2015, C22 (2015)

(原稿受付 : 2016年 3月 3日)

トピックス

駐在員日誌 無錫奮闘記

著者紹介



まの 茂
しげる

喜開理（中国）有限公司－CKD株式会社
中国江蘇省無錫市新区新華路21号
E-mail: s-mano@ckd.com.cn

1983年三重大学電子工学科学士課程修了。同年CKD株式会社に入社。技術部門、製造部門を経験し、2013年にCKDの中国生産拠点である喜開理（中国）有限公司に出向、現在に至る。



図2 中国地図

1. はじめに

私は1959年に生まれ現在56才。3年前に中国勤務を命ぜられ、初めて海外勤務を経験することになった。私の勤めるCKD株式会社の中国工場(図1)は中国の上海より車で2時間余り内陸に入った尾形大作の「無錫旅情」で有名な無錫市にある。1987年から中国に進出しているが、2013年に移転し、現在は無錫空港から車で5分、高速道路無錫ICから5分というアクセス環境に恵まれた場所に立地している。今回は私のここ中国無錫での生活を紹介する。

2. 無錫の紹介

私が住んでいる無錫市は上海市から西へ約130kmの所に位置し、上海浦東と南京のほぼ中間にあたる(図2)。日本からの交通手段は、主に飛行機で上海浦東空港に入り、地下鉄・新幹線を乗り継ぎ、待ち時間を合わせると6時間程度で無錫に到着する。大



図1 CKD中国工場

阪からは無錫空港に直行便があり、西隣の常州市の空港からの便も増え増々便利になっている。無錫の南には琵琶湖の面積の3.4倍にも及ぶ広大な湖「太湖」があり、クルージングを楽しむことができる。太湖近くの「鼋頭渚」は日本から寄贈されたさくらが有名で、開花シーズンには1万人以上の中国人の花見客が訪れる。しかし、日本のご飯を敷いてワイワイ酒を飲む姿はなく、たださくらを見て歩いて楽しむという非常に上品な花見である。ビールを探して屋台を見て回ったが見つめることができなかった。中国人は酔うと大変になるため酒を置いていないと思われる。また、住宅区域に行くと30階を超えるマンション群が立ち並び、日本の大都会を思わせる。中国では余り大きくないこの無錫市でも640万人もの人が住んでおり、横浜市370万人の1.5倍にものぼる。中国の人の多さが伺える。

3. 中国人との仕事の仕方

まず初めに中国人と一緒に仕事をする事になって、私が感じた中国人の習性について話をします。

第1に仕事の優先順位が少しずれている。仕事を与えるとすぐにその仕事に取りかかってくれるため、「言ったことは直ぐにやってくれる」と感心していた。しかし、彼らにとっては最後に言われたことが最優先の仕事となり、今やっている仕事や重要な仕事は後回しになる。ひどい場合は忘れられたりする。層別をして優先順位を付けるQC的な考えは持っていない。常に優先順位を決めてやる必要がある。

る。また、問題が発生すると、自分の仕事をそっちのけで、関係ない人まで集まって来てみんなでワイワイ議論が始まる。これは好奇心が旺盛なのか、喋ることが好きなのか、仕事をさぼりたいのか分らないが、大きな声で訳の分からないことを言い合っている。早めに解散させないといつまでも仕事をしないで討論をしている。

2つ目に自分が失敗しても決して自分が悪いとは言わない。言い訳から話が始まる。明らかに人為的なミスなのに、まずは他人のせいにする。それも休暇を取っている同僚や辞めた社員、次に設備や治具・部品の寸法や気温とありとあらゆる要因を話してくる。これをまとめれば立派な特性要因図ができるほどである。まともに聞いていると嫌になる。話を打ち切って、こちらからイエスかノーかの質問をしても相変わらず言い訳が返ってくる。再び話を打ち切り、「イエス、ノー」と強い口調で話をするとやっとイエスノーの回答が返ってくる。事情聴取はこの作業の繰り返しである。非常に時間がかかるが、結局本当のことを聞き出すことができない。

3つ目に平気で嘘をつく。そのひとつの例を紹介する。通訳を募集するため面談を実施した。日本の大学で4年間勉強したとの卒業証書があったこと、日本語の話し方も非常に優れていたこと、容姿も私好みだったことも考慮し、採用する方向で進めた。最後に念のために日本の大学に卒業の問合わせをしたところ、大学側からは「こんな名前の方が在籍していたことはない」との報告を受け、こんな卒業証書までも偽造が横行しているのかと唖然とした。

中国人にはこのような悪い面もあるが、良いところも沢山ある。単身で来ている我々日本人に気を使ってくれ、非常に情が深い面がある。また、新しいことを吸収しようとする意欲は日本人以上にある。このような中国人を使って仕事をする時には、仕事の基本に戻り100%信用しないこと、証拠を必ず確認することが大事なことになる。

4. 休日の過ごし方

つぎに私の休日の過ごし方を紹介する。駐在者の中には仕事に没頭する方も見えますが、私はできるだけ余暇を楽しむことにしている。その一つがゴルフである(図3)。しかし、思っていたよりプレー代が高い。私の住んでいた名古屋地区でゴルフをする場合、安いところを探せば昼食付きで1万円程度であるが、中国ではプレー代だけでおよそ1000元(2万円)かかる。毎週プレーをする方は会員となり安くできるが、それでも500元(1万円)程度である。中国のゴルフは、9ホール終了時の休憩がな



図3 中国のゴルフ場 片側に池があるコースが多い

く、18ホール連続でプレーをすることが一般的である。そのため昼食のパンを持参して空腹に対処している。コースは平坦な地形であるため、ウォーターハザードや砂をふんだんに使いコース難度を上げている。コースの半数以上がコースの片側に池が作ってある。山の斜面がOBを救ってくれる日本のコースと比べると、私はOBの連発である。さらに中国独特の「砂道」というものがある。これはバンカーのようなハザードではなく、通常のフェアウェイの扱いだが地面が芝生ではなく砂である。この「砂道」が帯の様にフェアウェイに沿ってつながっている。これもスコアを落とす原因である。私にとっては日本の方が合うようだ。

その他にはソフトボールクラブに入って体を動かしている(最近さぼりがち)。毎週日曜日の午前中に野球場で練習をしている。ランニングから始まり守備練習・バッティング・練習試合と結構真剣に練習をしている。春から秋にかけては近郊の蘇州や昆山のソフトボールチーム5チームで年間20試合のリーグ戦を行っている。ルールが特別で、基本はスローピッチだが、ピッチャーはボールを最上点1.8m以上高く投げて、ホームベース(60cm×1m程度の長方形)上に落ちればストライクという投球のルールがある。5m以上高い山なりのボールを投げるピッチャーもいて、長い間日本で野球をやっていた私でも中々打てない。空振りや内野ゴロが関の山である。練習が終わればみんなで乾いた喉にビールを流し込みながら反省会を行う。日本のように車の運転の心配をしなくてもいいため、アルコールは何時でもOK(ほとんどの日系企業は車の事故の危険性が高いことや事故時の言葉の問題から、運転を認めていない)。この点は酒好きな私にとっては日本にいる時と比べれば夢のようだ。

休日の過ごし方の3番目は観光地巡りである。中国は知っての通り4000年の歴史を持つ国で、有名な史跡や名所は全国各地にある。遠く北京では雄大な「万里の長城」、ラストエンペラーで有名な「故



図4 蘇州の世界遺産の庭園後ろのある太湖石が特徴

宮」, 100万人が集会出来る「天安門広場」。一度は行って見たい所である。「西安」は昔「長安」と言われ始皇帝ゆかりの史跡が沢山ある。無錫近郊では少し足を延ばせば世界遺産に指定されている9カ所の庭園を持つ「蘇州」がある(図4)。すべての庭園を見学したが、すべて同じような雰囲気、変わった格好の太湖石と池と柳が定番のアイテムである。有名な「拙政園」か「留園」を観光すれば9カ所を回る必要はない。南京まで足を延ばせば、中華民国発足の地、孫文のお墓である「中山陵」や「明孝陵」、日本人の過去の残虐な行為を遺した「南京大虐殺記念館(図5)」は日本人ならば一見する価値がある。日本で言うと広島平和公園のような感じである。中国は広くまだ行ったことがない所が沢山ある。神秘的な景色の「九寨溝」や雄大な山々の「黄山」、水墨画の「桂林」、三国志が好きの人にはいたるところに史跡がある。無錫周辺の鎮江にある「北固山公園」には劉備と孫権が石を刀で切りつけ合った石を見ることができる。三国志ファンにはたまらない所である。これからもガイドブック片手に史跡巡りをしていく予定である。



図5 南京大虐殺記念館

休日の過ごし方の最後は食べ物巡りである。色々なローカル食を味わっている人もいるが、中々屋台のようなローカル食は食べられないので、もっぱら日系のレストランを回っている(図6)。最近無錫

にも日系のレストランが次々に進出してきた。うどんの「讃岐うどん」、洋食の「サイゼリア」、牛丼の「すきや」、カレーの「COCO壺番屋」等である。新しい店ができるたびに駐在員の中で話題となり、わざわざバスに30分も揺られ、カレーを食べに行くこともある。駐在者のささやかな楽しみである。日本にいれば、「COCO壺番屋」のカレー等は当たり前のことであるが、ここでは日本の馴染みの味は中々食べられない。3年前まではほとんど日系のチェーン店は無錫にはなかった。今後もどんどん出店して欲しいものだ。

5. 夜の無錫

我々無錫の駐在員はほとんどが夕食には「暇日広場」と呼ばれる場所で食事をする。日本食の食堂や居酒屋が約50軒、韓国系の食堂やクラブ・マッサージ店も並んでいる。ここでは中国語が喋れなくてもほとんど問題はない、店のママさん達はうまい日本語で応対してくれる。私のような工場勤務者は、昼間通訳が近くにいて、夜はこの広場で食事をとっているため中国語を話す必要はなく、その結果中国語は中々マスターできない。私もこの中で軒件の馴染みの店を見つけて食事をしている。味は日本の居酒屋と変わらず、おいしい。食事が終わると駐在者の皆さんは色々な楽しみ方をしているようである。この先の話題はここまでにしておく。



図6 暇日広場 日本語の看板が目に入ります

6. 最後に

色々なことを書いたが、海外勤務は日本ではない楽しいことや辛いことが色々ある。それに非常に危険な場所である。人が倒れていても物見の人は集まってくるが、救急車を呼ばない群衆(救急車は有料のため、呼んだ人が支払うことになる)。マナーの悪い車や歩道でもどこでも走る電動バイク。サイ

レンを鳴らして走る救急車に誰も道を譲らないドライバー。考えると不安なことだらけである。しかし、それ以上に貴重な体験をすることができる。日系企業のスタッフの人は海外に来ることが当たり前の世の中になってきている。どうせ来るのなら若いうちに海外を経験した方がいい。特に語学の習得に関しては、若ければ若いほど上達が早い、56才を超えた今では中々習得できず、やっとHKS3級を取得し

た次第である。海外勤務の可能性ある方はぜひ自分から進んで行くことをお勧めする。来るだけの価値は十分にある。私のこの日記を読んでもらって、少しでも海外に出たいと思っていただければ幸いである。ありがとうございました。

(原稿受付：2016年2月13日)

研究室紹介

足利工業大学 桜井研究室の紹介

著者紹介



おか もと たく や
岡本拓也

東邦車輛株式会社 群馬製作所
〒370-0614 群馬県邑楽郡邑楽町赤堀4120番地
E-mail : monkey.monster540@gmail.com

2014年、足利工業大学工学部機械工学科卒業、同年、同大学大学院工学研究科に入学。電解共役流体（ECF）を用いた冷却システム用ポンプ、同システムのIDマルチドメインソフトウェア Amesimを用いた冷却シミュレーション回路の研究に従事。2016年4月、東邦車輛㈱入社

1. はじめに

本稿では、足利工業大学桜井研究室についてご紹介いたします。1章では足利工業大学について、2章では桜井研究室についてご紹介し、3章では、桜井先生が今まで取り組んできた研究と現在の研究テーマについてご紹介いたします。

足利工業大学は、日本最古の大学とも称される足利学校がある足利市の、市内の17ヶ寺により組織された足利仏教和合会が1925年に足利実践女学校（現：足利短期大学附属高校）を開校したのに始まり、1967年に工業系単科大学として5学科体制（機械、電気電子、建築、都市環境（土木）、情報システム）で開学いたしました。本学の建学の理念として、聖徳太子が制定した「17条の憲法」の第1条にある「和の精神」があります。これは、「人と人」、「工学と自然環境」、「工学と社会環境」の調和を目標に、「和の精神」を持ったエンジニアを育て社会貢献をするというものです。また、2014年4月からは足利工業大学と同じ法人内にある短期大学の看護学科が4年制に昇格し、看護学部看護学科が開設され、キャンパスがより一層華やかさを増しました。

2. 桜井研究室のについて

2.1 研究室の概要

桜井研究室は、工学部創生工学科機械分野機械工学コース、大学院工学研究科情報・生産工学専攻機械システム工学専修における研究室の一つです。平成27年度では、著者を含めた大学院2年2名、大

学院1年2名、学部4年生7名の計11名の学生が在籍しており、桜井先生のご指導の下、日々研究を行っています。また、平成27年度は中国からの留学生が7名と、国際色豊かな研究室となっております。写真1は、前期に行われた卒業研究発表会における全体写真です。

また、本学では、3年生の後期から研究室に配属された学生を対象としたゼミが週に1回行われます。写真2は、平成28年度に卒業研究を行う3年生のゼミの風景です。これは、卒業研究に着手する前段階で、研究室のメンバーとして親睦を深めるとともに、就職希望の学生に対しての就職指導も兼ねているものです。そのため、春休み期間中であっても必ずゼミを行っていただいております。

ここで、桜井研究室の最大の特徴は、配属された学生が卒業研究を行う1年間、および修士課程では3年間、「社会人0年生」というスタンスで研究を



写真1 前期卒業研究発表時の全体写真



写真2 3年生のゼミ風景

行うことです。これは、桜井先生と私たち学生が、実際の会社における開発部門の「上司と部下」という立場で研究を行います。そのため本研究室では、桜井先生と学生の間で活発な議論が行われており、桜井先生のご考案されたアイデアとともに学生自身が考えたアイデアが次々に研究に反映されています。そのため、実際の会社における開発部門に似た雰囲気、実社会において要求されるような製品を作り出すことを念頭に研究を行っております。

2.2 桜井先生について

桜井先生はユーモアに富んでおり、なおかつ、常に学生のことを気にかけてくれる優しいです。ご担当されている講義においてユーモアに富んだお話をしており、学生間でも人気があります。たまに講義室が氷河期を迎え、小鳥たちのさえずりが聞こえることもあります。お前たち、笑ってくれよ…」の一言で笑いの渦が起こります。

桜井先生は学会関係の出張や、企業における講習会で講師を務められることも多いため多忙ですが、大学院生、4年生、3年生のゼミを行う時間を、毎週1回確保してください。このゼミは、基礎的な勉強、研究の進捗報告および就職活動の報告を行います。この時、学生の研究、または就職活動が行き詰っている場合において、ゼミの時間以外に相談に乗ってください。著者も研究、就職活動に行き詰った時、ご多忙の中、桜井先生がお時間を確保してください。相談に乗っていただき、ありがたいご助言をいただきました。また、大学院生が学会で発表を行う機会を設けてください。著者は平成27年度、3回学会にて発表をさせていただき、他大学の先生および学生とも交流を深められる機会に恵まれました。学会に参加させていただいた時に良い思い出になったことがありました。それは、鹿児島で行われた平成27年度秋季フルードパワーシステム講演会において行われた、鹿児島大学客員教授鮫島吉廣先生の特別講演を拝聴できたことです。著者も桜井先生もお酒が好きなので、鮫島先生のご講演はとても参考になりました。

また、桜井先生は人と人のつながりをとても大事にされる先生です。研究室に在籍している間のみならず、学生が卒業したあとにおいても仕事上の悩みなどがあった場合、親身になって相談に乗るとともにご助言をさせていただきます。そのため、研究室を卒業したあとも桜井先生と強く繋がっており、毎年年末に開催されているOB会が待ち遠しいと、OBの方々も口を揃えて言っております。

2.3 研究室に入った理由と現在の自分の研究テーマ

桜井先生の講義において、流体力学の面白さを感じたのが大きな理由です。これは、大学2年生の頃に桜井先生の講義を受講し、流体力学における要所を理論的かつ簡潔に教えていただけたこともあり、

ぜひとも研究を行ってみたいと考え桜井研究室を希望いたしました。そして研究テーマは、「ECFポンプ」の研究を希望いたしました。その後、修士課程に進学してからも、ECFポンプに関する研究を行ってまいりました。

3. 取り組んできた研究と現在の研究テーマ

3.1 今まで取り組んできた研究

桜井先生は、本学へ2000年4月に着任されてから、フルードパワーに関係する研究を行ってきました。初めの頃は、ボンドグラフ法、油空圧に関する研究を行っており、その後、油空圧の研究を行いつつ、機能性流体の一種であるECFの研究を行ってまいりました。次節では、現在、本研究室において行っている研究についてご紹介いたします。

3.2 現在の研究テーマ

3.2.1 電解共役流体（ECF）関係の研究

ECFは機能性流体の一種で、電圧を印加するのみでその流体を流動させることができることから、単純な構造で、無音、無振動のポンプが開発可能となります。そこで、ECFの特徴を生かし、現在、発熱量の増加が問題となっているパソコン用CPUの無音、無振動の液冷式冷却システムを実現するための研究を行っております。ここで、平成27年度の研究において、本研究室で開発するECFポンプの最終形態と考えている、異径管接合ECFポンプ¹⁾が完成いたしました（図1）。このポンプは、従来のECFポンプの中で最も小さく、部品点数が少なくなっているのが大きな特徴です。そこで、将来的にこのポンプを用いた液冷式冷却システムを実現しようと、現在、企業で主流となりつつあるMBD（モデルベースデザイン）を研究に取り入れ、この分野でよく利用されるソフトウェアであるAmesim²⁾を用いて、ECFポンプを用いた液冷式冷却システムのモデルベースデザインに挑戦しました（図2）。私の修士論文が、この異径管接合ECFポンプの開発とAmesimによるECFポンプを用いた液冷式冷却システムのMBDでした。

3.2.2 油圧関係の研究

油圧関係の研究として、圧力低下抑制素子の研究を行っております。これは、油圧システムの長所の一つとして、密閉された空間に作動油を閉じ込めると、一定の圧力を発生し続けるという点があります。しかしながら、パイロット操作のチェック弁あるい

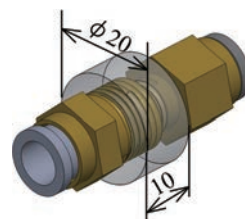


図1 異径管接合ECFポンプ

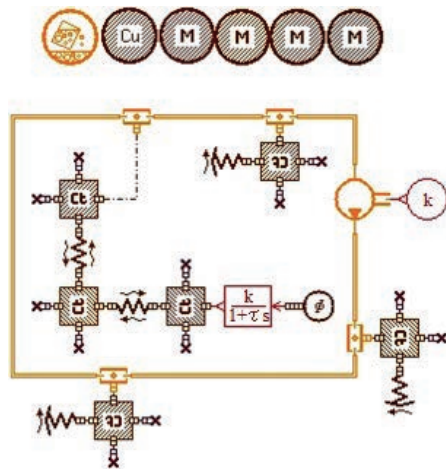


図2 ECFを用いた液冷式冷却システムのシミュレーションモデル

はストップ弁により作動油を密閉された空間に封入した場合、この弁の漏れにより作動油の圧力が低下してしまう問題点があります。そこで、過去に提案した、油温上昇による密閉容器内の圧力上昇を防ぐ圧力変化抑制素子³⁾(図3)を応用し、封入された作動油の圧力を一定時間同じ値に保つ、単純な構造で安価な圧力低下抑制素子の研究を現在行っております。

3.2.3 空気圧関係の研究

空気圧の研究として、歯学と機械工学の連携を最終目標に、顎関節症の治療に用いる頭蓋療法(スカルケア)⁴⁾の力計測用センサの研究を行っております。これは、顎関節症の治療において整体を利用したスカルケア(頭蓋骨を手の平で押す手技と左右の歯茎内側を同時に指で外側に押す手技)を用いた顎関節症の治療法が開発されましたが、この治療法は、開発した歯科医の手技に依存しているのが現状です。そこで、開発した歯科医以外でも簡単にスカルケアを行うことを可能にするために、この治療法を開発した歯科医の手技を模倣するシステムの開発が必要

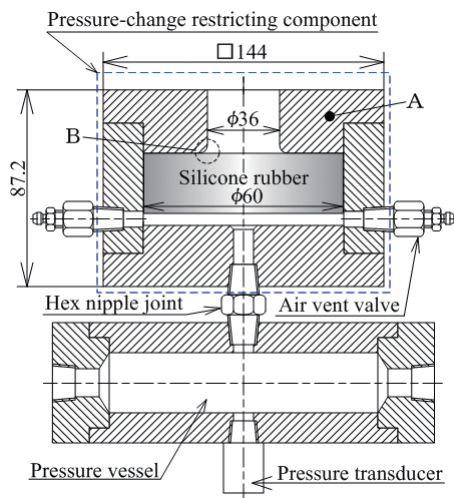


図3 圧力変化抑制素子

となります。そこで、現在、スカルケアに必要な静的および動的な力を計測するための2種類のセンサ、すなわち、図4に示す手の平用センサと図5に示す指押しセンサの開発を行っております。

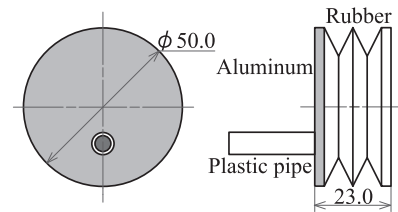


図4 手の平センサ

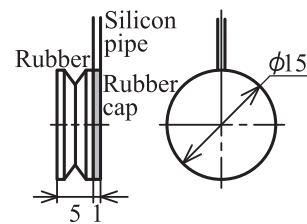


図5 指押しセンサ

4. おわりに

本稿では、足利工業大学桜井研究室について紹介いたしました。読者の皆様に本研究室の魅力をお伝えできたなら幸いに存じます。ホームページもごさいますので、ご興味のある方は是非ともご覧ください(<http://www2.ashitech.ac.jp/mech/sakurai/>)。

本研究室では、本稿でご紹介したように、学生たちが日々より良い製品を作り出すという意気込みで研究を行っております。また、研究で得られた体験を基に、社会でも活躍しようという意気込みを持ち巣立っていきます。

最後に、本稿を執筆する機会を与えていただいた東京電機大学教授藤田壽憲先生に謝意を表して本稿の結びといたします。

参考文献

- 1) 岡本拓也, 桜井康雄, 中田毅, 枝村一弥: 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, 平成27年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2015), pp. 5-7
- 2) LMS Imagine.Lab Amesim (http://www.plm.automation.siemens.com/ja_jp/products/lms/imagine-lab/amesim/)
- 3) 桜井, 鈴木, 饗庭, 吉成, 川島, 木原: 油圧作動油の温度上昇に起因する圧力変化抑制素子の提案, 日本機械学会論文集 (C編), 78-788, 1163/1168 (2012)
- 4) 本戸蔵知, スカル・ケアによる顎関節症の治療, 歯界展望別冊, 110-1 (2007), pp. 154-162

(原稿受付: 2016年2月5日)

企画行事

平成27年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告

著者紹介



なか お みつ ひろ
中 尾 光 博

鹿児島大学大学院
〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40
E-mail: nakao@mech.kagoshima-u.ac.jp

2011年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。その後、鹿児島大学助教を経て、2015年同大学准教授。現在に至る。空気圧管路の計算・計測に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

平成27年秋季フルードパワーシステム講演会は平成27年11月26日(木)、27日(金)の2日間にわたってジェイドガーデンパレス（鹿児島県鹿児島市上荒田町19-1）にて開催された。本講演会では、以下のとおり3種類のオーガナイズドセッション（OS）と3種類の一般セッションが企画され、計38件の講演発表が行われた。

OS「フルードパワーとシミュレーション」：9件

OS「自動車の発展に寄与するフルードパワー」：3件

OS「メリットを意識したアクアドライブシステム」：5件

一般セッション「機能性流体」：4件

一般セッション「油圧」：4件

一般セッション「空気圧」：13件

また、11月26日の午後には特別講演、27日の午前には国際特別講演が開催された。本稿では両日の講演会について、概要を報告する。

2. 各セッションの概要

2.1 OS「フルードパワーとシミュレーション」

本OSはフルードパワーにおけるシミュレーション技術の一層の発展を目指して、熱流体過渡現象解析、機器・システムなどのフルードパワー分野におけるシミュレーションやその周辺技術を紹介することを趣旨として、中田毅先生（東京電機大学）と

田中和博先生（九州工業大学）がオーガナイザーとなり開催された。空気圧システムのボンドグラフ法による動特性シミュレーション、最適化有限要素モデルの低次元化、などが報告された。

2.2 OS「自動車の発展に寄与するフルードパワー」

本OSは自動車に関わるさまざまなフルードパワー研究開発の成果を発信し、今後の自動車におけるフルードパワー技術の展望を紹介することを趣旨として、佐藤恭一先生（横浜国立大学）と五嶋裕之氏（機械振興協会）がオーガナイザーとなり開催された。金属ベローズ空気ばねサスペンション、キャビテーション噴流の可視化などが報告された。

2.3 OS「メリットを意識したアクアドライブシステム」

本OSは食品加工、リハビリテーション、半導体加工をはじめとする多くの分野にその応用を広げ始めているアクアドライブシステムが今後、さらに用途の拡大を図るために、このシステムの持つメリットを意識した研究テーマを紹介することを趣旨として、伊藤和寿先生（芝浦工業大学）と鈴木健児先生（神奈川大学）がオーガナイザーとなり開催された。水圧用ロータリー型サーボ弁の静特性解析、人工筋モデルのヒステリシスパラメータ同定などが報告された。

2.4 一般セッション「機能性流体」

本セッションでは、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、多孔型電極対を用いたEHDポンプの特性、揺動型EHDアクチュエータの多関節ロボットへの応用、自己整合によるマイクロ鋳型を用いたECFマイクロポンプに関する研究が報告された。

2.5 一般セッション「油圧」

本セッションでは、1自由度油圧アームのオンラインパラメータ同定実験、油圧閉回路におけるアクチュエータ駆動開始時のショック抑制制御、ヘルムホルツ型油圧サイレンサにおける扁平な容量部の弾性変形が減衰特性に与える影響、パワーショベルの可動範囲の制約を考慮したモデル予測追従制御の実

験的検証に関する研究が報告された。

2.6 一般セッション「空気圧」

本セッションは、本講演会中最多の全13件の講演がなされた。入力飽和を考慮したラバーレス人工筋肉ロボットアームの姿勢制御や空気圧駆動型人工指による材質認識システムなど、近年注目を集める空気圧システムの医療・福祉方面への応用だけでなく、風力空気圧縮機、ボルテックスカップ、バルブなどの空気圧システムそのものに関する研究も多かったのが印象的であった。

3. 特別講演

鹿児島大学より、鯨島吉廣客員教授をお招きし、「知ってほしい！本格焼酎の話 ～歴史・文化・飲み方～」の演題でご講演いただいた（写真1）。ご講演の概要は以下のとおりである。「一口に“焼酎”と言ってもいろいろな種類があります。米焼酎の歴史は500年、芋焼酎の歴史は300年、この間、芋焼酎の製造法はサツマイモと南国の暑さの制約を受け、独自の変貌を遂げてきました。芋焼酎の味わいは風土と原料サツマイモのハンディを克服する中で生まれたものです。本講演では、焼酎の歴史・文化・飲み方などを紹介します。お湯割りの飲み方、酒の肴、飲酒の生理などの話題を通じてダレヤメ（焼酎を飲む晩酌の意味）の癒しの世界を楽しんでください。」

鯨島先生は文化研究から製造法、商品開発にいたるまで、焼酎のプロフェッショナルであらせられ、ご自身の経験と実績に基づいた非常に濃密な内容のご講演をされた。大変興味深い内容であり、大盛況であった。



写真1 特別講演の様子

4. 国際特別講演

中国のZhejiang UniversityよりProf. Xu Bingをお

招きし、“Research on the Motion Control System for Mobile Machinery with Single Pump and Multiple Actuators”の演題でご講演いただいた。

講演では、先生がご提案された制御方式であるIndependent Metering Control System (IMCS) についてご紹介いただいた。IMCSは、従来の制御系で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、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、多くのメリットが確認されている。さらに、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およびその省エネルギー性と制御性の向上についてもご紹介いただいた。



写真2 国際特別講演の様子

5. おわりに

平成27年8月に桜島の噴火警戒レベルが4に引き上げられ、講演会の開催を危ぶむ声もあった。しかし幸いにも10月以降噴火活動は見られず、上記のように平成27年秋季フルードパワーシステム講演会は多くの皆様にご参加いただき、盛況のうちに終えることができた。筆者の心残りは、鹿児島名物である、「噴煙をあげる桜島」をお見せできなかったことである。

なお、筆者は本学会企画委員として、本講演会の主査を担当させていただいた。この場をお借りして、本講演会にご協力いただきました皆様に厚く御礼申し上げます。

（原稿受付：2016年2月10日）

会 告

〈理事会・委員会日程〉

5月 9日	基盤強化委員会
5月27日	理事会
6月 2日	情報システム委員会
6月 6日	編集委員会
7月 5日	企画委員会
—	委員長会議

〈理事会報告〉

3月29日 14:00～16:00 機械振興会館

地下3階B3—2号室（出席者20名）

- 1) 平成28年度の予算案について
- 2) 評議員会開催準備状況について
- 3) 第10回国際シンポジウム福岡の進捗状況について
- 4) 春季・秋季講演会の開催準備状況について
- 5) ベトナムとのMOU締結について
- 6) 日中若手研究者交流事業派遣対象者公募について
- 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27年度第4回委員長会議

3月10日 15:00～17:00

機械振興会館地下3階B3—7号室（出席者6名）

- 1) 評議員会
- 2) 国際シンポジウム福岡の開催準備状況について
- 3) 春季・秋季講演会の開催準備について
- 4) ベトナムとのMOU締結について
- 5) 学会の財務基盤の強化の進捗状況について
- 6) 各委員会からの報告
- 7) その他

平成27年度第4回情報システム委員会

3月25日 15:00～17:30

法政大学市ヶ谷キャンパス（出席者9名）

- 1) 会議報告担当者について
- 2) HP更新作業状況報告
- 3) 会員管理システムの更新作業状況について
- 4) 保守契約と来年度予算について
- 5) 英語版ホームページについて

6) 研究者リストの更新作業について

7) その他

平成27年度第6回編集委員会

4月1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.3「海洋開発・港湾建設に活用されるフルードパワー」
- ・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「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「柔軟構造のフルードパワー・アクチュエータ（仮）」「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）」

3) その他

- ・会議報告
- ・トピックスについて
- ・資料一覧

平成27年度第5回企画委員会

3月31日 15:00～17:00 機械振興会館

地下3階B3—9号室（出席者21名）

1) 平成27年度実施の事業に関する報告・審議事項

- ・ウインターセミナーについて
- ・その他

2) 平成28年度実施の事業に関する報告・審議事項

- ・平成28年春季講演会併設セミナーについて
- ・平成28年春季講演会について
- ・第4回日中国際共同ワークショップについて
- ・平成28年秋季講演会について
- ・オータムセミナーについて
- ・ウインターセミナーについて
- ・その他

3) その他審議・確認事項

- ・会誌5月号予告、会告について
- 平成28年度春季講演会併設セミナー
- 平成28年春季講演会
- 第4回日中国際共同ワークショップ
- ・会誌7月予告会告、会告について
- 平成28年度秋季講演会
- 平成28年度オータムセミナー
- ・その他

会 告

(一社)日本フルードパワーシステム学会
賛助会員一覧表

アイシン・エイ・ダブリュ(株)
 (株)明石合銅
 (株)曙ブレーキ中央技術研究所
 アズビル(株)湘南工場
 アズビルTACO(株)
 (株)アドヴィックス
 アネスト岩田株式会社
 イートン(株)
 (株)IHI
 出光興産(株)
 イナバゴム(株)
 イハラサイエンス(株)
 (株)インターナショナル・
 サーボ・データ
 (株)打江精機
 SMC(株)
 SMC(株)中国
 (株)荏原製作所
 (株)大阪ジャッキ製作所
 大瀧ジャッキ(株)
 (株)オプトン
 鹿島通商(株)
 KYB(株)
 KYBエンジニアリング・
 アンド・サービス(株)
 KYB-YS(株)
 (株)桂精機製作所
 神威産業(株)
 川崎重工業(株)
 川重商事(株)
 (株)神崎高級工機製作所
 キャタピラー・ジャパン(株)
 旭東ダイカスト(株)
 協和シール工業(株)
 極東開発工業(株)
 (株)クボタ
 (株)クレアクト・インターナショナル
 クロダニューマティクス(株)
 (株)ケンチク舎
 (株)古河製作所
 (株)工苑
 甲南電機(株)
 (株)コガネイ
 コスモ石油ルブリカンツ(株)
 (株)小松製作所
 (株)小松製作所試験センタ

(株)小松製作所研究本部
 (株)小松製作所油機開発センタ
 (株)阪上製作所
 (株)鷺宮製作所
 佐藤金属株式会社
 三和テック(株)
 三輪精機(株)
 CKD(株)
 (株)島津製作所
 (株)ジェイテクト
 勝美印刷(株)
 JX日鉱日石エネルギー(株)
 ジヤトコ(株)
 新日鐵住金(株)交通産機品カンパニー
 住友建機(株)
 住友重機械工業(株)
 住友精密工業株式会社
 制御機材株式会社
 千住金属工業(株)
 第一電気(株)
 (株)TAIYO
 タイヨーインターナショナル(株)
 (株)タカコ
 (株)タダノ
 ダイキン・ザウアーダンフォス(株)
 ダイキン工業(株)
 ダイワ(株)
 大生工業(株)
 調和工業(株)
 (株)都筑製作所
 TMCシステム(株)
 (株)TNK
 テラル(株)
 天竜丸澤(株)
 トーヨーエイトック(株)
 東京メータ(株)
 TOHTO(株)
 東北特殊鋼(株)
 東明工業(株)
 DOOSAN CORPORATION
 同和発條(株)
 東京計器(株)
 東京計器パワーシステム(株)
 特許機器(株)
 特許庁
 豊興工業(株)

(株)豊田自動織機
 中西商事(株)
 中村工機(株)
 長津工業(株)
 長野計器(株)
 ナブテスコ(株)
 ニッタ(株)
 日新沪器工業(株)
 日本アキュムレータ(株)
 (株)日本アレフ
 日本機材(株)
 日本クエーカー・ケミカル(株)
 日本工業出版(株)
 日本精器(株)
 日本電産トーソク(株)
 (一社)日本フルードパワー工業会
 日本ムーク(株)
 (株)野村商店
 (株)ハイダック
 日立建機(株)
 (株)日立建機テイエラ
 (株)日立建機カミーノ
 (株)日立製作所
 日立住友重機械建機クレーン(株)
 廣瀬バルブ工業(株)
 ピー・エス・シー(株)
 フジサンケイビジネスアイ
 フェスト(株)
 (株)フクダ
 (株)不二越
 二見屋工業(株)
 ボッシュ・レックスロス(株)
 昌富工業(株)
 マサモト(株)
 (株)増田製作所
 マックス(株)
 三菱電線工業(株)
 ヤマシンプイルタ(株)
 ヤマハモーターハイドロリック
 システム(株)
 油研工業(株)
 理研精機(株)
 リバーフィールド(株)
 ワールドインシュアランス
 ブローカーズ(株)

会 告

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 (4月10日現在)	937	16	141	134
差 引 増 減	-15	-1	-4	+1

正会員の内訳 名誉員14名・シニア員35名・ジュニア員156名・その他正会員732名

賛助会員

リバーフィールド株式会社

正会員

岡本 拓也 (東邦車輛株式会社)
 安藤 淳二 (JTEKT North America)
 安藤 寛之 (株式会社ジェイテクト)
 宮原 宏平 ((公財) 鉄道総合技術研究所)
 野武 久雄 (ジヤトコ株式会社)
 宮下 武志 (株式会社コガネイ)
 矢島 丈夫 (株式会社コガネイ)
 遠山 宗雄 (株式会社コガネイ)
 菊池 宏 (CKD株式会社)
 今井 康貴 (佐賀大学)
 山野 顕彰 (株式会社産業企画)

張 瑩
 津田 拓也 (株式会社ジェイテクト)
 安達 隆広 (小松製作所)
 田 瞳菲 (東北大学)
 郡司 浩 (株式会社コガネイ)
 武石 敏男 (株式会社コガネイ)
 齋藤 真一 (株式会社コガネイ)
 宮沢 一喜 (株式会社コガネイ)
 三宅 功一 (コマツ)
 戸森 央貴 (山形大学)

学生会員

北島 優一 (明治大学)
 清水 貴太 (上智大学)
 山木涼太郎 (東京電機大学)

木村 大地 (明治大学)
 松井 保子 (岡山理科大学)
 邱 実 (慶應義塾大学)

会 告

永年会員のお知らせ

当学会では長年学会を支えてくださった会員の方々に感謝して、永年会員を制定することとなりました。これは20年以上継続して正会員であり、かつ、満60歳以上の方にお贈りする名称であります。

永年会員の皆様は当該年度学会費支払いをお済ましの場合、春季・秋期フルードパワーシステム講演会に付随して開催される懇親会、および当学会主催セミナーに登録料不要でご入場いただけます。

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

トライボロジー会議2016春 東京

開催日：2016年5月23日(月)～25日(水)

会場：国立オリンピック記念青少年総合センター（〒151-0052 東京渋谷区代々木神園町3-1 センター棟）

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）

TEL03-3434-1926 FAX03-3434-3556 E-mail jast@tribology.jp

申込はホームページ <http://jast@tribology.jp> から可能です。

ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 ROBOMECH2016 in Yokohama

未来社会を創造するロボティクス・メカトロニクス

会 期：2016年6月8日(水)～11日(土)

8日(水)：ワークショップ, チュートリアル(横浜市開港記念会館)

部門登録者総会, ウェルカムパーティ(赤レンガ倉庫)

9日(木)：ポスターセッション, 企業展示(パシフィコ横浜)

特別講演, 懇親会(大さん橋ホール)

10日(金)：ポスター講演, 企業展(パシフィコ横浜)

11日(土)：公開講座(横浜開港記念会館)

主 会 場：パシフィコ横浜(ポスター講演)

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/sympmp2016.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/dmccconf16/>

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）
 TEL03-3434-1926 FAX03-3434-3556 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。

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㈱）

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

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年春季フルードパワーシステム講演会 併設セミナー 「フルードパワーシステムを変えるIoT, ICTの最新技術」のお知らせ

開催日時：平成28年5月25日（水）13：00～16：45

開催趣旨：

平成28年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナーを、平成28年5月25日（水）に機械振興会館（東京都港区）で開催いたします。本併設セミナーでは、今後、フルードパワーシステムを発展させていくための重要な基幹技術の一つとなるIoT, ICTについて解説いただくとともに、その基盤技術となる情報センシング技術、情報通信技術、遠隔制御技術についての解説、さらに

生産設備や建設機械における具体的な事例について解説していただきます。詳細は学会ホームページにて、ご確認をお願いいたします。

なお、日本フルードパワーシステム学会誌47巻2号（2016年3月号）が当日の講演資料となりますので、各自ご持参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 第四回日中国際共同ワークショップのお知らせ The 4th Japan-China Joint Workshop on Fluid Power —Innovative Key Technology on Fluid Power—

開催日時：平成28年5月25日（水）13：00～17：00（時間は予定）

開催趣旨：

日本フルードパワーシステム学会では、中国機械工程学会流体伝動及制御分会と共同で、日本と中国のフルードパワーに関する国際共同ワークショップ（The Japan-China Joint Workshop on Fluid Power）を開催しています。第4回の今回は日本での開催です。ワークショップのテーマは「Innovative Key Technology on Fluid Power」で、日中の研究者・技術者が集い、フルードパワーに関する最新の研

究や技術および市場動向の紹介を通して、情報交換と相互交流を図る学術講演会です。参加費および参加申し込み要領については、学会ホームページ上でご案内しています。どうぞ奮ってご参加いただきますよう、お願い申し上げます。特に学生会員の方の参加は無料です。

お問合せ：国際交流委員・企画委員

伊藤和寿（芝浦工業大学 システム理工学部）

E-mail：kazu-ito@shibaura-it.ac.jp

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年春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5月26日（木）・27日（金）

開催趣旨：

平成28年春季フルードパワーシステム講演会は平成28年5月26日（木）・27日（金）に機械振興会館（東京都港区）で開催されます。本講演会では、一般講演に加えて、特別講

演・オーガナイズドセッション・製品技術紹介セッションや技術懇談会などを企画しました。詳細は学会ホームページに掲載いたしましたので、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。

編集室

次号予告

—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

〔総論〕作動油の劣化とその対策について

風間 俊治

〔解説〕作動油の劣化とトラブル事例

田崎 博之

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

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

水分による油の劣化とフィルトレーション

森永由一郎, 生井 映久

油圧作動油と気泡

坂間 清子, 田中 豊

状態基準保全 (CBM) を実現するオイル分析

山中 克浩

〔ニュース〕日中若手研究者交流事業報告

伊藤 和寿

〔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

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

〔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

〔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

平成27年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 吉田 和弘 (東京工業大学)
 副委員長 塚越 秀行 (東京工業大学)
 委員 伊藤 雅則 (東京海洋大学)
 上野 朝嗣 (CKD(株))
 内堀 晃彦 (宇部工業高等専門学校)
 小倉 弘 (日立建機(株))
 加藤 猛美 (株コガネイ)
 加藤 友規 (福岡工業大学)
 北村 剛 (油研工業(株))
 木原 和幸 (財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(株))

委員 中野 政身 (東北大学)
 成田 晋 (KYB(株))
 藤田 壽憲 (東京電機大学)
 丸田 和弘 (株コマツ)
 村松 久巳 (沼津工業高等専門学校)
 柳田 秀記 (豊橋技術科学大学)
 山田 真の介 (株TAIYO)
 吉満 俊拓 (神奈川工科大学)
 担当理事 伊藤 和巳 (KYB(株))
 山田 宏尚 (岐阜大学)

編集事務局 藤谷 秀次 (学会事務局)
 竹内 留美 (勝美印刷(株))

(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。

日本フルードパワーシステム学会論文集

第47巻, 第3号 (2016)

平成28年5月

目次

研究論文

1. DDVC方式燃料噴射装置による船用ディーゼルエンジンの
噴射量制御

眞田 一志 15

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.47, No.3

May 2016

Contents

Paper

1. Control of the Quantity of Fuel Injection for Marine Diesel Engine by
DDVC Fuel Injection System

Kazushi SANADA 15

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

DDVC方式燃料噴射装置による船用ディーゼルエンジンの噴射量制御*

真 田 一 志**

Control of the Quantity of Fuel Injection for Marine Diesel Engine
by DDVC Fuel Injection System

Kazushi SANADA

Feedback control of the quantity of fuel injection for marine diesel engine using a direct drive volume control is proposed. A cylinder is connected to a fixed-displacement oil-hydraulic pump driven by an AC servo motor. A plunger pump is pushed by the cylinder piston and fuel is pressurized to be injected through an injection valve. The fuel injection is controlled by a drive signal of the AC servo motor. A mathematical model of the fuel injection system is built to estimate the quantity of fuel injection. The estimated quantity of fuel injection is compared with the target value. Proportional control action computes a control input signal which updates a crank angle to stop fuel injection. Simulation study demonstrates that the proposed feedback control system of the quantity of fuel injection successfully works.

Key words : Fuel injection, Direct drive volume control, Hydraulics, Feedback control, Simulation

1. 緒 言

船用ディーゼルエンジンは、自動車用エンジンと比較して、低速、大出力かつ長ストロークを特徴とする¹⁾。船舶による汚染の防止のための国際条約附属書IV (MARPOL 73/78 Annex IV)²⁾により、船用ディーゼルエンジンの排気ガス規制がより厳格化されるため、排気ガス清浄化技術が注目されている。船用ディーゼルエンジンの燃料噴射装置として、従来からFig. 1に示す機械式燃料噴射装置が用いられてきた。エンジンの回転をリンク機構とカムによって伝達してプランジャーポンプを押下し、燃料を加圧して噴射する。機械式であるため、厳格化する規制に対応するために必要な燃料噴射の高度な制御には適さない。これに対して、Fig. 2に示す自動車用コモンレールシステムが開発され、船舶用エンジンにも適用され始めている。高压燃料をコモンレールに蓄え、電子制御燃料噴射弁により柔軟な噴射制御が可能なることを特徴としている。船用エンジンの場合、高压のコモンレールが大形化する。また、燃料噴射で生じる圧力脈動がコモンレールを伝播し、次に噴射する燃料噴射弁の入口圧力を変動させ、噴射量制御の制御精度を劣化させる技術課題³⁾があり、マップを用いるなどの複雑な補正動作を制御に組み込む必要がある。

一方新しいアクチュエータ技術として、Direct Drive

Volume Control (DDVC)⁴⁾⁵⁾が提案されている。DDVCは、固定容量形油圧ポンプ、油圧シリンダとACサーボモータからなり、ACサーボモータの駆動信号によってDDVCを制御することができる。例えば文献4)では、船舶用操舵装置に応用されている。DDVCのシリンダがラダー操舵装置を駆動し、ラダー角度をフィードバックして比例制御を行う。また、DDVCを船用ディーゼルエンジンの燃料噴射装置に適用した研究^{6)~8)}も報告されている。DDVC方式燃料噴射装置は、従来のプランジャーポンプをそのまま使用することができ、また気筒間の干渉も少ないことから、新しい燃料噴射装置として期待されている。しかし、従来の研究では、燃料噴射が可能であることが示された段階であり、燃料噴射量の制御に関する研究は行われていない。燃料噴射量は、エンジンが発生するトルクや動力に密接に関係するため、エンジン制御における主要な制御量の一つである。

従来の文献⁷⁾⁸⁾では、DDVC方式燃料噴射装置によって燃料噴射が可能であり、ACサーボモータの駆動信号のパルス幅と振幅によって燃料噴射量を調整できることが実験ならびにシミュレーションにより示されている。しかし、実際の運用においては、燃料となる重油が積み出し港ごとに異なること⁹⁾、エンジン回転数が変化すること、燃焼室内の圧力が燃焼過程により変化することなどの変動要因があり、文献で行ったオープンループの燃料噴射では、燃料噴射量の制御精度が劣化すると考えられる。そこで、燃料噴射量のフィードバックが有効であると考えられるが、DDVC方式ではこの点についての研究は見当たらない。そこで、本研究では、燃料噴射量と目標値との偏差にもとづ

*平成27年8月9日 原稿受付

**横浜国立大学大学院工学研究院

(所在地：神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

(E-mail: ksanada@ynu.ac.jp)

いて噴射停止角の更新を行うフィードバック制御方式を考案し、フィードバック制御によって燃料噴射量が目標値に一致することを、シミュレーションによって明らかにする。

第3章で、DDVC方式燃料噴射装置の概要を説明し、第4章で数学モデルについて述べる。第5章で燃料噴射量のフィードバック制御手法を提案し、第6章でシミュレーション結果を示したうえで考察を加える。第7章では、本研究で得られた成果をまとめる。

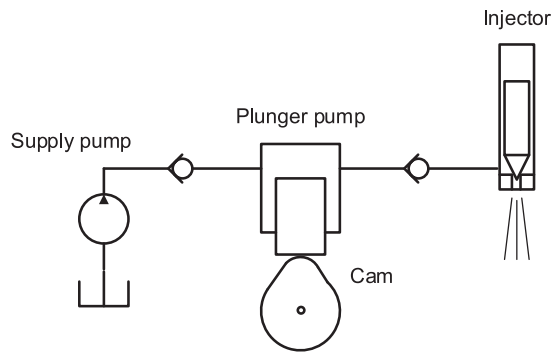


Fig. 1 Cam-mechanism fuel injection system

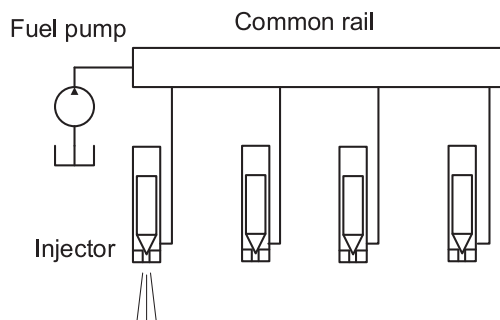


Fig. 2 Common rail system

2. 主な記号

c_3	流量係数
c_4	流量係数
A_h	ピストンのヘッド側受圧面積
A_p	プランジャーポンプ受圧面積
A_r	ピストンのロッド側受圧面積
A_1	閉鎖時の噴射弁受圧面積
A_2	圧力 p_i が作用する受圧面積
A_3	噴射弁の開口面積
A_4	噴射孔面積
D	油圧ポンプの押しのけ容積
K	油圧作動油の体積弾性係数
K_{inj}	燃料の体積弾性係数
K_p	比例ゲイン
k	燃焼サイクル番号
L_p	燃料ポンプの押し込み量

m_c	ピストン質量
m_{inj}	噴射弁の質量
p_c	燃焼室圧力
p_h	シリンダヘッド側圧力
p_i	燃料噴射弁の開口部と噴射孔の中間圧力
p_{inj}	燃料圧力
p_r	シリンダロッド側圧力
Q_{in}	シリンダのヘッド側に流入する作動油流量
Q_{inj}	噴射される燃料の流量
Q_{out}	シリンダのロッド側から流出する作動油流量
r	噴射量の目標値
t	時間
u	噴射停止角更新量
V	ACサーボモータの駆動信号
V_h	シリンダのヘッド側作動油体積
V_f	燃料噴射量
V_p	燃料体積
V_r	シリンダのロッド側作動油体積
V_0	ACサーボモータ駆動信号の振幅
x_c	シリンダピストン変位
x_{inj}	噴射弁変位
α	噴射孔上流側圧力を決める係数
θ	クランク角
θ_s	噴射停止角
ρ	燃料の密度
ω	ACサーボモータ（油圧ポンプ）回転数

3. 燃料噴射装置の概要

DDVC方式燃料噴射装置の概要をFig. 3に示す⁸⁾。燃料噴射弁とプランジャーポンプは、従来から機械式燃料噴射装置で用いられているものをそのまま利用する。DDVC方式燃料噴射装置では、プランジャーポンプを油圧シリンダで押下する。油圧シリンダは、ACサーボモータに直結した固定容量形油圧ポンプで駆動される。そのため、ACサーボモータの駆動信号（電圧信号）によって、燃料噴射のタイミングと噴射量を制御することができる。この装置は気筒ごとに独立して設置されるため、気筒間の干渉を受けることはより少ない。

Fig. 1のカム式の場合、エンジン回転軸の運動がカムとリンクを介して伝達され、燃料が加圧されて噴射される。運動を伝達するのはカム・リンク機構であり、その応答性は主としてカム・リンク機構の幾何学的な形状と各部の質量、慣性モーメントなどの力学的条件による。DDVC方式の場合、1回の噴射を行うためには、油圧シリンダのピストンが燃料ポンプとの間を往復する必要がある。燃料ポンプの押し込み量 L_p 、油圧シリンダピストンの受圧面積 A_h 、 A_r 、油圧ポンプ押しのけ容積 D を用い、ポンプ回転数 ω は一定で、油圧ポンプの流量が全て油圧シリンダに供給される

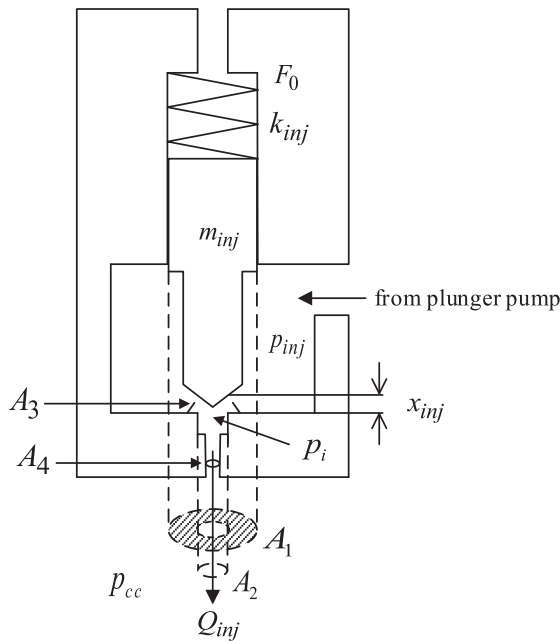


Fig. 4 Injection valve

弁体と座面の間の開口面積 A_3 を通過する流量 Q_{inj} は、オリフィスの式で近似する.

$$Q_{inj} = c_3 A_3 \sqrt{\frac{2(p_{inj} - p_i)}{\rho}} \quad (8)$$

一方、噴射孔を通過する流量は次式で表される.

$$Q_{inj} = c_4 A_4 \sqrt{\frac{2(p_i - p_{cc})}{\rho}} \quad (9)$$

これらの流量は等しいため、両式を等値することで圧力 p_i を次式の通り求めることができる.

$$p_i = \frac{p_{cc} + \alpha p_{inj}}{1 + \alpha} \quad (10)$$

ここで、係数 α は次式で表される.

$$\alpha = \left(\frac{c_3 A_3}{c_4 A_4} \right)^2 \quad (11)$$

Table 1 Main parameters of DDVC

A_1	35.3	mm^2
A_2	28.3	mm^2
A_3	2.1	mm^2
A_4	25.5	mm^2
A_h	3120	mm^2
A_p	490	mm^2
A_r	2,130	mm^2
D	56.2	cc/rev.
K	0.8	GPa
K_p	1	deg/g
F_0/A_i	42	MPa
ρ	850	kg/m^3

5. 燃料噴射量のフィードバック制御

噴射された燃料が燃焼することでエンジンはトルクを発生する. 噴射する燃料の質量, すなわち燃料噴射量を制御することはエンジン制御の重要な項目の一つである. 本論文では, 4 サイクル中速ディーゼルエンジンを対象とし, クランクの2回転(720度)で燃焼サイクルが一巡するものとする. 燃焼噴射のタイミングはクランク角をもとに決められ, 噴射開始角を, 一例として, 350度とした. 燃焼停止角は, 必要な燃料噴射量に応じて調整する必要がある. 本論文で提案する制御手法によって, 燃焼サイクル(クランク角で720度)ごとに噴射停止角 θ_s を更新する. クランク角が350度で燃料噴射が開始され, 噴射停止角 θ_s で燃料噴射が停止するように, DDVCのACサーボモータの駆動信号をFig. 5に示すパターンで与えた. 駆動信号の振幅を V_0 とする. 噴射開始角350度から噴射停止角 θ_s の間, 油圧シリンダはプランジャーポンプを押下し, 噴射停止角 θ_s 以降は油圧シリンダが引き戻されて元の位置に戻るようにする.

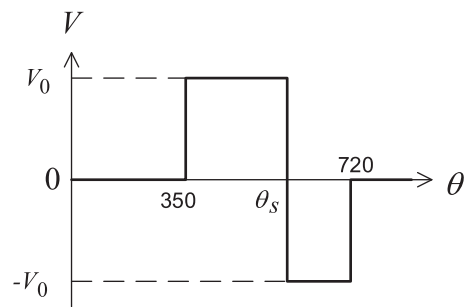


Fig. 5 Drive signal of an AC servomotor

油圧シリンダがプランジャーポンプを押下し, 燃料噴射弁に送り出した燃料が燃料噴射量の相当部分を占める. しかし, 燃料は加圧されて圧縮されることから, 油圧シリンダによる押下量から燃料噴射量を推定するためには, 燃料の圧縮性¹⁰⁾を考慮する必要がある. そこで, 本論文では, 燃料噴射量 V_f は式(2)から式(11)で示した数学モデルを用いて算出した.

本論文で提案する燃料噴射量のフィードバック制御系をFig. 6に示す. この図で, 制御入力 u をもとに噴射停止角 θ_s を更新し, Fig. 5に示したACサーボモータ駆動信号 V の1周期分の信号を発生させて燃料噴射装置を駆動し, その結果として燃料噴射量 V_f が決まる. 目標噴射量 r に対して, 燃料噴射量 V_f をフィードバックし, 偏差 e を求める.

目標値 r と燃料噴射量 V_f の偏差に比例ゲイン K_p をかけて

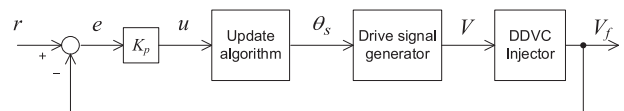


Fig. 6 Feedback control of the quantity of fuel injection

制御入力 $u(k)$ を求める。

$$u(k) = K_p (r(k) - V_f(k)) \quad (12)$$

ここで、引数 k は、燃焼サイクルごとに付与された番号である。ただし、エンジン回転数によって燃焼サイクルの周期が異なるため、一周期の時間は一定ではない。次に、前回の噴射停止角 $\theta(k)$ にここで求めた制御入力 $u(k)$ を加えて新しい噴射停止角 $\theta(k+1)$ を求め、更新する。

$$\theta_s(k+1) = \theta_s(k) + u(k) \quad (13)$$

噴射停止角 θ_s が決まれば、Fig. 5に示したパターンに従って駆動信号 V を発生し、ACサーボモータに印加して、油圧シリンダを駆動する。

6. シミュレーション結果と考察

前節で提案した燃料噴射量のフィードバック制御について、シミュレーションを行い、考察を加える。エンジン回転数を300rpmとし、シミュレーションした結果をFig. 7～Fig. 9に示す。Fig. 7では、上から順に、ACサーボモータ駆動電圧 V 、油圧シリンダピストン変位 x_c 、油圧シリンダヘッド側圧力 p_h 、燃料圧力 p_{inj} を示す。また、Fig. 8に、燃料噴射量 V_f （目標値 r を破線で示した）、制御入力 u 、および噴射停止角 θ_s を示す。時刻0sから動作が開始されているが、はじめはシリンダピストンの変位 x_c が10mm程度と小さいため、プランジャーポンプで加圧された燃料圧力 p_{inj} は20～30MPa程度と低く、燃料噴射弁が開くことなく、燃料も噴射されない。燃料噴射量の目標値 r は1gとした。従って、偏差 e ははじめ1gである。比例ゲイン K_p を1.0 (deg/g)としたため、この時点の制御入力 $u(k)$ は1度となる。噴射停止角 $\theta_s(k)$ の初期値を400度としたが、サイクルごとに制御入力 $u(k)$ だけ更新されるため、噴射停止角 $\theta(k)$ は増加し、約411度に収束した。噴射停止角 θ_s が増加するにつれて、ピストン変位 x_c も増加し、燃料圧力 p_{inj} も増加して燃料噴射が行われるようになる。燃料噴射量 V_f は、はじめはゼロであるが、燃料が噴射されるようになることで増加し、目標値 r に収束することがわかる。それに従って、制御入力 $u(k)$ は徐々に減少している。約9s以降に制御入力 u が微小な上下変動を示している。これは、噴射弁が開く瞬間と閉じる瞬間を数値積分では厳格に把握することができないため、噴射流量を数値積分して求める燃料噴射量に微小なばらつきが生じるためと推察される。

Fig. 9は、ACサーボモータの駆動電圧 V 、回転数 ω 、油圧シリンダピストン変位 x_c 、油圧シリンダヘッド側圧力 p_h 、および燃料圧力 p_{inj} について、7sから8sの期間を拡大して示している。駆動電圧 V がFig. 5に従って矩形状になっているのにも関わらず、ACサーボモータの回転数 ω が三角波状になっているのは、ACサーボモータの速度変化率制限の機能による。すなわち、駆動電圧はステップ状に変化するが、

速度変化率が制限されるため、回転数は速度変化率制限で定められた最大変化率で増加あるいは減少する。数学モデルでは、速度変化率制限を1000/0.024rpm/sとし、ACサーボモータの最高回転数を2300rpmとし、電圧に対する回転数までのゲインを2300.0/5.75rpm/Vとした。また、油圧ポンプの容量は56.2 cc/rev.とした。これらの数値は、市販されている製品のカタログ値を参考にして設定した。回転数に従って油圧ポンプから吐き出された油圧作動油がシリンダのヘッド側に流入し、ピストンを変位 x_c させる。ピストンがプランジャーポンプを押下すると、燃料圧力が増加する。燃料圧力 p_{inj} は約40MPaまで増加し、シリンダ側ヘッド圧力 p_h は約6.5MPaまで増加しており、圧力増幅比は約6.2である。圧力増幅比は、ピストンヘッド側受圧面積 A_h とプランジャーポンプ受圧面積 A_p との比 $A_h/A_p=6.37$ におよそ等しい。ヘッド圧力 p_h の波形に微小な振動が見られ、またその結果として燃料圧力 p_{inj} にもわずかな振動が発生しているが、これらは油圧作動油の圧縮性に起因するものと推察される。

本論文で提案した制御手法は、DDVCのシリンダピストンの最高速度の影響を受けると考えられる。本装置では、燃料噴射が繰り返行われるためには、燃焼の1サイクルの間に油圧シリンダのピストンが往復して元の位置に戻ることが条件である。この条件を満たすためには、シリンダのピストンの最高速度が十分速いことが必要である。言い換えれば、本制御系はエンジン回転数の影響を受けるといえる。すなわち、エンジン回転数が低ければ、燃焼の1サイクルにかかる時間は比較的長くなり、シリンダピストンが往復して元の位置に戻ることができる。一方、エンジン

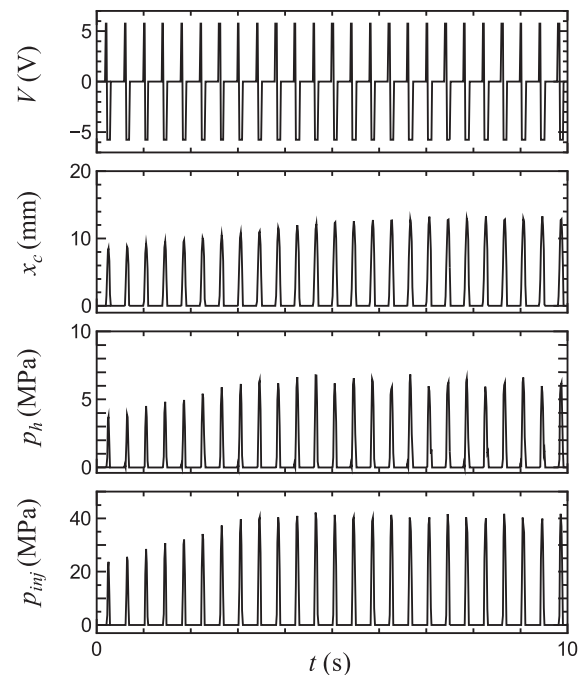


Fig. 7 Simulation results of drive signal, piston displacement, head pressure, and fuel pressure (engine speed = 300rpm)

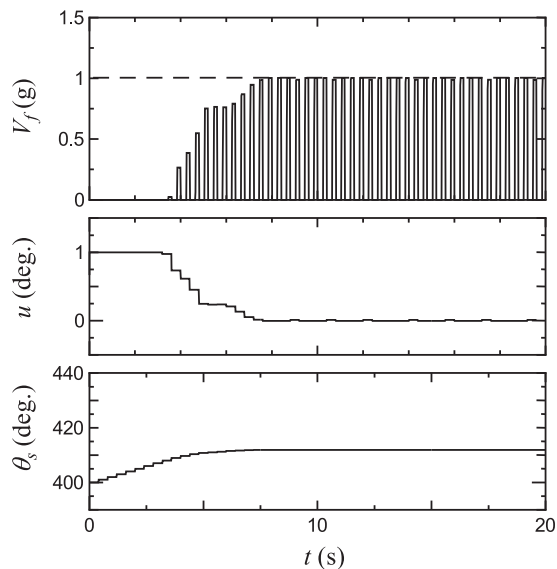


Fig. 8 Simulation results of fuel mass, update value, and stop angle (Engine speed = 300rpm)

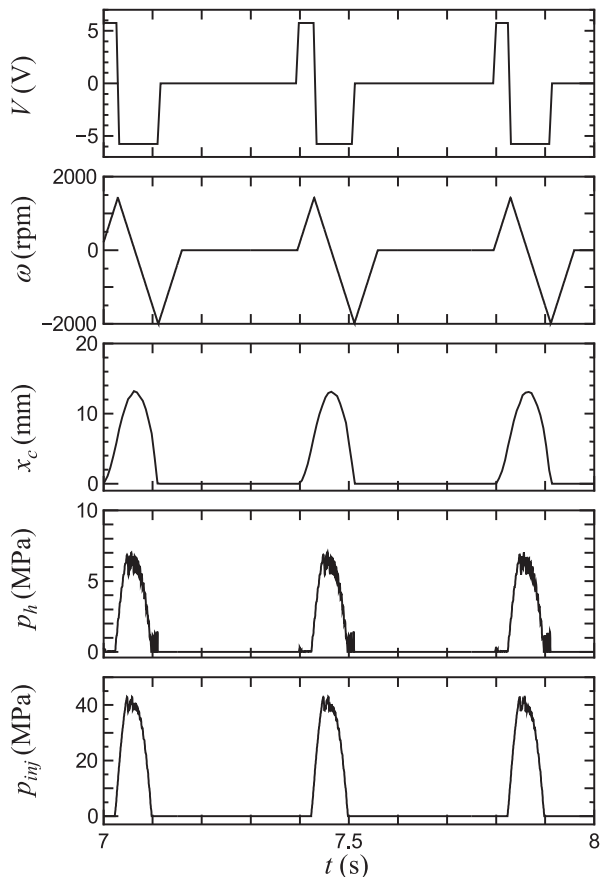


Fig. 9 Drive signal, motor speed, piston displacement, head pressure, and fuel pressure (Engine speed = 300rpm)

回転数が高いと、燃焼の1サイクルの周期が短くなり、ピストン速度が十分に速くないと元の位置に戻ることができず、燃料噴射を繰り返し実施することができなくなる。シリンダピストンの受圧面積は、プランジャーポンプの受圧

面積を前提とすれば、燃料噴射に必要な増圧比から必要な面積が決められる。そのため、ピストン速度を増速するためには、より大きな容量をもつ油圧ポンプを選定するか、あるいはACサーボモータの回転数や速度変化率制限がより大きな値のものを選定する必要がある。

7. 結 言

本論文では、DDVC方式燃料噴射装置を用いた燃料噴射量のフィードバック制御について検討した。具体的には、燃料噴射量の目標値との偏差に比例ゲインを乗じて制御入力を求め、それをもとに噴射停止角を更新して駆動信号を生成し、ACサーボモータを動かして燃料噴射を行う。燃焼の1サイクルの間に、油圧シリンダのピストンが往復し、燃料を十分加圧して燃料が噴射されることを示した。また、その燃料噴射量を目標値に合わせるために、噴射停止角を更新するアルゴリズムを示した。このように、本研究によって、DDVC方式燃料噴射装置による燃料噴射量のフィードバック制御が可能であることが示された。しかし、燃料の違いや、エンジン回転数の影響、燃焼室圧力の変化など、変動要因に対するロバスト性に関する検討が残されている。燃料が異なると、圧縮性や粘度が異なり、燃料噴射に影響すると推察される。一方、ピストンの往復時間が限られているため、エンジン回転数が早くなると、燃料噴射が1サイクル中に終わらない状況もあり得る。また、燃焼室圧力は燃焼により増減し、噴射流量に影響する。これらの変動要因を考慮した設計法や制御手法が、今後の課題としてあげられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京海洋大学の伊藤雅則名誉教授、章 非非教授の貴重なご助言を頂戴した。誌上を借りて謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Hasegawa, Y., Okabe, M., Sakaguchi, K., Kodama, T., Yamada, T.: Development of New Series in Mitsubishi UE Large Bore 2-Cycle Diesel Engines, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, Vol. 38, No. 3, p. 131-135 (2001)
- 2) Marpol 73/78 Annex 4, Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships, [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- 3) Akiyama, H., et. al: Precise Fuel Control of Diesel Common-Rail System by Using OFEM, SAE Technical Paper (2010-01-0876), (2010)
- 4) Ito, M., Sato, H., Maeda, Y.: Direct drive volume control of

- hydraulic system and its application to the steering system of ship, Proceedings of FLUCOME'97, Vol. 1, p. 445-450 (1997)
- 5) Hanawa, N., Itoh, M., Hirose, N., Satoh, H., Oda, H., Hyodo, H.: Direct drive volume control of hydraulic system and its application to the ship, Proceedings of the 5th JFPS International Symposium on Fluid Power, p. 493-498 (2002)
- 6) Narukawa, K., Feifei Zhang, Ito, M.: A new concept of diesel engine fuel injection system with DDVC hydraulic actuator, International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2008, p. 284-289 (2008)
- 7) 章菲菲, 生川杏子, 伊藤雅則, 廣瀬典樹, 佐藤寛: DDVC油圧アクチュエータによるディーゼルエンジンの新しい燃料噴射システム, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 44, No. 1, p. 127-132 (2009)
- 8) Haginiwa, A., Sanada, K.: A noble fuel injection using DDVC for marine diesel engines, SICE Annual Conference 2008, p. 3003-3007 (2008)
- 9) 西尾澄人, 他: マルチ燃料対応船用機関制御に関する研究 —バイオ燃料の燃焼技術に関する研究, 燃焼制御システムの構築及び実証実験—, 海上技術安全研究所報告, 第14巻, 第1号, p. 11-36 (2014)
- 10) 眞田一志, 嘉藤真英: DDVC方式燃料噴射装置の噴射量推定, 平成27年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 85-87 (2015)

〒105-0011 東京都港区芝公園三丁目五-22 電話(03)3433-8441 FAX(03)3433-8442
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 東京00110-31-33690

印刷所 勝美印刷株式会社
東京都文京区白山1-13-7 アクア白山ビル五階