

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワー

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

システム

Mar. 2021 Vol. 52 No. 2

特集「持続可能社会とフルードパワー」

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「持続可能社会とフルードパワー」

【巻頭言】

「持続可能社会とフルードパワー」発行にあたって	佐々木大輔	52
-------------------------	-------	----

【解説】

風力が望むフルードパワー	中村 雅英	53
波力発電を支えるフルードパワー技術	栗林 直樹	56
五島の奈留瀬戸における浮沈式潮流発電システムの研究開発	経塚 雄策	60
上水道施設を利用した水力発電	大池 真悟	66
超臨界水を利用した地熱発電技術	浅沼 宏	71

【会議報告】

FPMC2020におけるフルードパワー関連技術の研究動向	伊藤 和寿	75
日本機械学会2020年度年次大会におけるフルードパワー技術研究	吉田 和弘	77
IFK2020におけるフルードパワー関連技術の研究動向	清水自由理	79

【トピックス】

Youは日本をどう思う？第16回：ベトナムから日本に留学して	ダオ・ミンフォン	81
--------------------------------	----------	----

【研究室紹介】

津山工業高等専門学校 趙研究室（介護・福祉ロボットシステム研究室）	趙 菲菲, 加藤 圭晟	83
-----------------------------------	-------------	----

【会告】

理事会・委員会報告	86
学会誌電子版 学会HP（会員ページ）への毎号掲載のお知らせ	87
第40期通常総会 学会創立50周年記念式典・記念特別セミナー開催のお知らせ	87
共催・協賛行事のお知らせ	88
会員移動	89
お詫びと訂正	89
次回予告	90

■表紙デザイン：浅賀 美希 勝美印刷株

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 "Fluid Power for Sustainable Society"

[Preface]

On the Special Issue "Fluid Power for Sustainable Society"	Daisuke SASAKI	52
--	----------------	----

[Review]

Hydraulic Equipment Desired by the Wind Power	Masahide NAKAMURA	53
Fluid Power Technology to Support Wave Power Generation	Naoki KURIBAYASHI	56
R & D of a Floating/Submersible Tidal Current Turbine System in Naru Strait, Goto	Yusaku KYOZUKA	60
Hydropower Generation using Water Works Facilities	Shingo OIKE	66
Geothermal Power Generation using Supercritical Fluid from Geothermal Systems	Hiroshi ASANUMA	71

[Conference Report]

Research Trends on Fluid Power System in FPMC2020	Kazuhisa ITO	75
Researches of Fluid Power Technologies in Mechanical Engineering Congress, 2020, Japan	Kazuhiro YOSHIDA	77
Research Trend of Fluid Power in IFK2020	Juri SHIMIZU	79

[Topics]

What do you think of Japan? 16th : Coming to Japan from Vietnam	Dao Minh Phuong	81
---	-----------------	----

[Laboratory Tour]

National Institute of Technology, Tsuyama College, Nursing and Welfare Robot System Laboratory	Cho Feifei, Keisei KATO	83
--	-------------------------	----

[JFPS News]

86, 87, 88, 89, 90

「持続可能社会とフルードパワー」発行にあたって

著者紹介



さ さ き だい すけ
佐々木 大 輔

香川大学創造工学部
〒761-0396 香川県高松市林町2217-20
E-mail: sasaki.daisuke@kagawa-u.ac.jp

2003年岡山大学大学院博士後期課程中退。同大学助手、助教を経て、2015年香川大学講師、2016年同准教授。現在に至る。空気圧ソフトウェアを使ったウェアラブルロボットの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、IEEE、日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。博士（工学）。

われわれを取り巻くさまざまな環境が保全され豊かな生活を送ることのできる社会いわゆる持続可能な社会を実現するには、社会活動の基盤となるエネルギーそのものが持続可能である必要がある。そのような中で、自然エネルギーを中心とした再生可能エネルギー技術やエネルギーの有効活用技術が重要となる。

本特集では、「持続可能社会とフルードパワー」と題して、再生可能エネルギーやエネルギーの有効利用技術など持続可能社会のためのフルードパワー技術の最新情報を提供する。各種再生エネルギー、エネルギーの有効利用に関するフルードパワー技術をご紹介いただくことで、フルードパワーの発展につなげることが本特集の目的である。

はじめに、中村雅英氏（秋田大学）に「風力が望むフルードパワー」と題して風力エネルギーに関してご執筆いただいた。本解説では、まず風力エネルギーの利用法として頻繁に話題にのぼる洋上風力発電の現状についてご説明いただいた。そのうち、風力エネルギーを直接利用することを目的に開発した水質浄化システムについて、実際に開発した実験装置ならびに実際の風況下で実験を行った結果などに関して解説いただいた。

つづいて、海洋におけるエネルギー資源に関連し波力発電、潮流発電に関してご寄稿いただいた。まず、「波力発電を支えるフルードパワー技術」と題して、栗林直樹氏（川崎重工業株式会社）に解説いただいた。本解説では、波力発電システムの概要お

よび久慈、平塚波力発電所など同社が関連する海域実証試験について述べられている。また、波力発電におけるフルードパワー技術として油圧動力変換部のシステム構成、制御技術に関してご解説いただいている。経塚雄策氏（長崎大学）には、「五島の奈留瀬戸における浮沈式潮流発電システムの研究開発」と題してご執筆いただいた。潮流発電の国内外のこれまでの取り組み、現状についてご紹介いただいた後、浮沈式潮流発電システムの特徴について解説いただき五島市の奈留瀬戸での実海域実験についてご説明をいただいた。海洋資源が豊富な我が国において、両氏の取り組みは今後のさらなる発展が期待される技術である。

大池真悟氏（東京発電株式会社）には、ほかの再生可能エネルギーと比較して、高いエネルギー密度・安定・ライフサイクルにおける二酸化炭素発生量が少ないという特徴を持つ水力発電に関し、同社が取り組む上水道施設を利用した水力発電について解説いただいた。既存施設を活用した技術であり再生可能エネルギー技術の社会実装という観点からも非常に興味深い内容である。

最後に、浅沼宏氏（産業技術総合研究所）に「超臨界水を利用した地熱発電技術」と題して解説をいただいた。マグマの周辺に蓄えられている相当量の高温・高圧の水いわゆる超臨界水を利用し、2040年代の商用発電に向け研究開発が行われている超臨界地熱発電の課題や将来展望に関してご説明いただいた。火山国である日本において地熱エネルギー資源の有効活用は今後も注目したい分野である。

本特集で紹介した事例の、今後ますますの発展を期待するとともに、クリーンなエネルギー技術が社会インフラとして実装されることで、われわれの生活がより豊かなものとなることを期待する。

最後に、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深く感謝するとともに、厚く御礼申し上げる。

（原稿受付：2021年1月21日）

解説

風力が望むフルードパワー

著者紹介

なか むら まさ ひで
中村雅英秋田大学大学院理工学研究科
〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町1-1
E-mail: mnakamu@akita-u.ac.jp1980年東京工業大学大学院総合理工学研究科
修士課程修了。日立製作所、秋田大学助手、講
師、助教授、教授を経て、2016年同大学理工学
研究科教授。数値流体力学、再生可能エネル
ギー等の研究に従事。日本機械学会などの会員。
工学博士。

1. はじめに

風力エネルギーの利活用は多岐にわたるが、現在最も多くの話題にあがっているもののひとつは洋上風力発電であると思われる。洋上風力発電は、風況が良くかつ広いという我が国の海洋が利用できるため、近年特に活発な動きを見せている。経済産業省と国土交通省は、洋上風力発電設備を30年の長期にわたって優先的に整備できる促進区域の指定を進めており、現時点において、長崎県五島市沖、秋田県能代市・三種町・男鹿市沖などの5か所が促進区域に指定されている。さらに、促進区域の前段階である有望な区域に指定されている区域もあることから、今後促進区域はさらに増え、洋上風力発電は急速に広がっていくことが予想される。

洋上風車の場合、陸上風車よりアクセスが困難で、修理や部品交換が困難になることはあきらかである。そのため、より信頼性または堅牢性が高い機器が求められる。風車を構成する機器のうち、故障の頻度が相対的に高く修理が高額になるもののひとつとしてブレードと発電機とを結ぶドライブトレインに関連した機器があげられる¹⁾。そのため、洋上風車の信頼性を確保し稼働率を上げるには、より優れたドライブトレインが必要となるが、そのための方法として、油圧の活用が試みられていることは注目に値する²⁾。もちろんこれ以外でも、風車の制御などで油圧機器は多く用いられているが、これらのことはフルードパワー技術が風力の利活用、特に洋上風力

の発展において重要な役割を演ずることを示唆しており、今後のさらなる発展が強く期待されていることを意味している。

このような動きとは別に、風力エネルギーを直接利用するという試みも古くからおこなわれており、風力発電が主流となった現代においても、井戸水やかんがい用水のくみ上げといった場面において見られている³⁾。このような風力エネルギーでポンプなどを直接駆動させるシステムは、電気エネルギーに変換する際に生じる損失がないため、全体としてのエネルギー効率が優れたものになるため、今後さらに重要になる可能性がある。さて近年、環境意識の高まりから水質浄化に対する関心が強くなり、その必要性も年々増大している。本稿では、風力エネルギーを直接利用した水質浄化システムを試作し、その基本特性を調べた結果⁴⁾について紹介する。詳細は後述のとおりであるが、この装置でもフルードパワー技術は重要な役割を担っている。

2. 風力エネルギーによる水質浄化システム

2.1 実験装置

今回用いた装置の模式図を図1に示す。この装置の概要は以下のとおりである。

- 1) ポンプ（ダイヤフラムポンプ）を直接駆動させるために用いた風車はサボニウス風車である⁵⁾。実験で用いたサボニウス風車を図2に示す。サボニウス風車は、エネルギー変換効率は低いが、特に低回転数の時に大きなトルクを発生させることができる。そのため、ポンプなどを直接駆動させる時には有利である。さらに起動トルク（停止状態で風から得られるトルク）も大きいいため、起動装置も不要で、垂直軸型であるため方向制御装置も不要という優れた特徴がある。なお、サボニウス風車でも、風の方向によっては起動しないことがある。本装置ではそれを防止するため、二段とした（図2）。これによって、すべての方向からの風に対して風車は起動する。なお図の風車では、バケットのオーバーラップはないという構造になっているが、これ

は発生させるトルクを大きくするためである。今回は特に「メンテナンスフリー」ということを意図として設計したが、このあたりの設計については、今後のさらなる検討が必要になるかもしれない。

- 2) 水質浄化を行う必要がある場所は風況が良いとは限らない。そのため、風況が悪い場所に設置せざるを得ないこともあり、その場合は風力から大きなエネルギーを獲得することは難しい。さらに、あまりに小さなエネルギーを利用することは現実問題として困難である。そのため、何らかの方法で風力エネルギーを貯蔵し、利用可能なレベルにまで到達させることが必要になる。この装置では、ポンプによって送られる水は、まずはアキュムレータに貯められる。すなわち、風力エネルギーを圧力の形で貯蔵するのである。このように、風力エネルギーの貯蔵ということを試みていることも本装置の大きな特徴である。

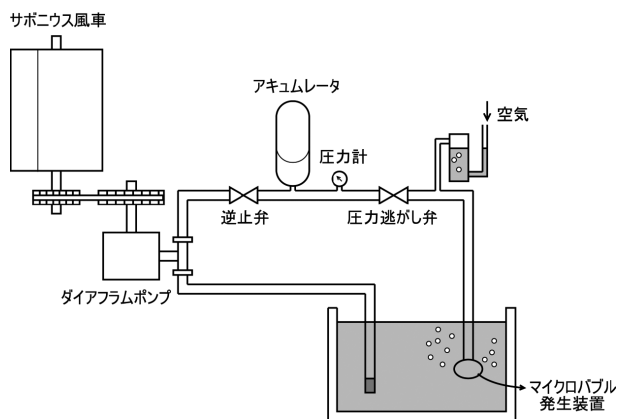


図1 実験装置の模式図



図2 サボニウス風車

- 3) 水質浄化を行う方法として、今回はマイクロバブル⁶⁾を用いている。マイクロバブルとは、ミクロンオーダーの微細な気泡のことを示している。微細であるため、気相と液相の界面を介した酸素などの物質輸送が促進される。さらに気泡上昇速度は小さくなるので、長時間水中に漂うことになり、このことも物質輸送の促進を示唆する。このようにマイクロバブルはさまざまな性質を有しており、水質浄化、特に貧酸素状態にともなう水質低下を改善する際に有効な手段になりうるものと思われる⁶⁾。今回の装置では、アキュムレータの圧力が規定値に達すると圧力逃がし弁が開き、下流側で流れが発生する。その流れにより負圧が発生し、空気を自吸し気液二相流が発生する。そしてマイクロバブル発生装置の中で気泡が分断されマイクロバブルが生成されるようになっている。

なお、今回の装置では圧力逃がし弁の動作時においてのみ電力が必要となる。そのため、運転時に要する電力はきわめて小さく、クリーンかつエコな装置といえる。

2.2 実験結果

この装置を製作し、実際の風況下で実験を行った結果の一例を図3に示す。設置場所は秋田大学の手形キャンパス内である。図3は、アキュムレータ内の圧力、風車回転数、そして風速（10分間での平均値）の変化を示している。まずはアキュムレータ内の圧力に注目する。風車の回転のためアキュムレータ内の圧力は時間の経過とともに増加し、蓄圧が進んでいることがわかる。そして圧力逃がし弁が作動する圧力（今回の実験では0.30MPaに設定されている）に到達すると、圧力が急激に低下しているが、これは弁が開いて下流側に流れが生じてマイクロバブルが生成されたことを示している。このような変化がくりかえし発生し、マイクロバブルが間欠的に生成されていることがわかる。つぎに風速について考える。この図から風速は1 m/sから3 m/sの間で複雑に変化していることがわかるが、通常の風車の起動風速は4 m/s程度であることに注意してほしい。すなわち、この程度の風速では通常の風車は起動しないのである。以上のことより、この装置は通常の風車では起動しないような悪い風況下でも駆動することができ、マイクロバブルを発生させることが可能であるということがわかる。

近年、通常では利用されることのなかった弱いエネルギーに注目し、それを活用する試みが積極的に行われており、エネルギーハーベスティング⁷⁾と呼ばれている。本研究は、通常では利用されることの

ない低風速の領域での風力エネルギーの利用に着目しているため、エネルギーハーベスティングに属する研究ととらえることもできる。今後、よりエネルギーハーベスティングに適した機器が開発され、エネルギーハーベスティングがさらに発展することを望んでいる。

図4は、マイクロバブルの発生頻度（1時間当たりの発生数）と風速との関係を示している。なおこの風速は、アキュムレータへの蓄圧が行われている時間内での平均値である。この図から、マイクロバブルの発生頻度は風速の3乗に比例することが分かる。一般に、任意の固定された面を通過する風のエネルギーは風速の3乗に比例する。このため、マイクロバブルの発生頻度が風速の3乗に比例することはきわめて妥当な結果であるといえる。今後、さら

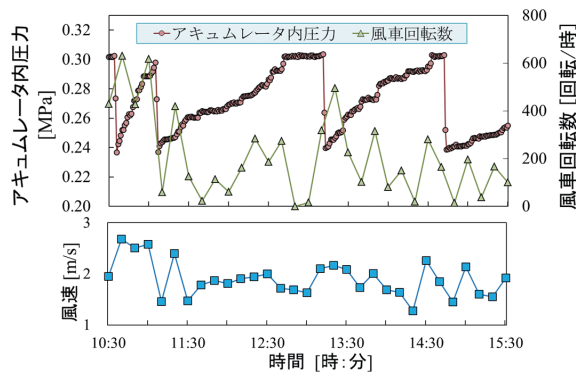


図3 アキュムレータ内圧力、および風車回転数の変化

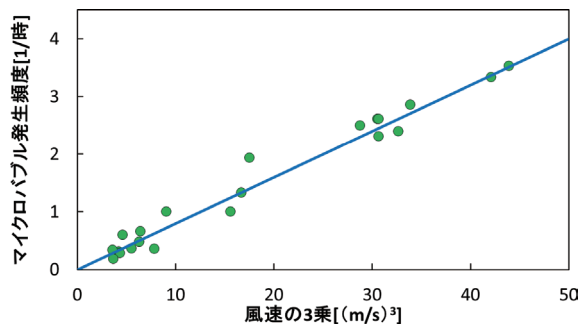


図4 マイクロバブル発生頻度と風速との関係

に装置を改良し発生頻度を増やす工夫が必要となるが、その時には、フルードパワー技術に期待することが多いものと思われる。

3. おわりに

風力エネルギーを電気エネルギーに変換せずに直接利用した例として、風力による水質浄化システムについて紹介した。このシステムでは、圧力による風力エネルギーの貯蔵ということも行われており、そこではフルードパワー技術が重要な役割を果たしている。風力の利活用に関して、フルードパワー技術が重要な役割を演ずるのはこれだけではない。たとえば、より信頼性または堅牢性が求められる洋上風力発電ではフルードパワー技術が今後さらに重要な役割を果たす可能性がある。この解説がきっかけとなって、風力の利活用にも関心を持っていただけたら幸いである。

参考文献

- 1) 西沢良史：洋上風車の信頼性，日本風力エネルギー学会誌，Vol. 36，No. 3，p. 458-462 (2012)
- 2) 宇摩谷雅英，野口俊英，内田満也，柴田昌明，河合康裕，納富良介：風力発電（洋上風車の開発状況），三菱重工技報，Vol. 50，No. 3，p. 49-55 (2013)
- 3) Hammad, M.Ahmad：Photovoltaic, wind and diesel. A cost comparative study of water pumping options in Jordan, Energy Policy, Vol. 23, No. 8, p. 723-726 (1995)
- 4) 本郷博邦，杉山渉，田村オリエ，中村雅英：風力エネルギーによる水質浄化システムに関する実験的研究（第1報，低風速域における特性改善），日本機械学会論文集 B編，Vol. 78，No. 787，p. 598-606 (2012)
- 5) 澤田雅，中村雅英，鎌田信：サボニウス風車の翼に作用する力の測定と翼まわりの流れの可視化，日本機械学会論文集 B編，Vol. 51，No. 471，p. 3743-3747 (1985)
- 6) 南川久人，道奥康治，山田哲史，安田孝宏：酸素マイクロバブルを用いた貯水地深層曝気実験における水質改善効果の検討，実験力学，Vol. 10，No. 1，p. 39-44 (2010)
- 7) 篠原真毅：バッテリーレス社会に向けたエネルギーハーベスティング技術，電子情報通信学会誌，Vol. 92，No. 8，p. 695-699 (2009)

（原稿受付：2020年11月13日）

解説

波力発電を支えるフルードパワー技術

著者紹介



くりばやし なおき
栗林直樹

川崎重工業株式会社精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ディビジョン 技術総括部
〒651-2239 兵庫県神戸市西区榎谷町松本234
E-mail: kuribayashi_n@khi.co.jp

1989年川崎重工業株式会社に入社、航空機、船舶搭載型視軸安定ジンバルを始めとする各種電動サーボシステムの開発に従事。近年は東京大学との共同研究において波力発電システムの開発にも従事。計測自動制御学会会員、日本フルードパワーシステム学会フェロー

1. はじめに

かつて高度成長期に社会問題となった大気汚染、海洋汚染、土壌汚染などでは有毒物質の排出により四大公害病を始めとした直接的な健康被害が多発したため、公害対策基本法が1967年に制定され、その後1971年に環境庁が設置されたころから本格的に公害対策の取り組みが行われるようになり現代では高い水準で環境が改善されるまでになったが、一方過剰な温室効果ガスの排出により新たに地球温暖化問題がクローズアップされて久しい。このまま高い排出量が続くと、図1に示すように21世紀末には平均気温が2.6～4.8℃上昇し¹⁾、干ばつ、強風、洪水、高波、生態系影響など今以上の甚大な被害が予測されている。

現時点でCO₂排出量を0にしたところでディレイ

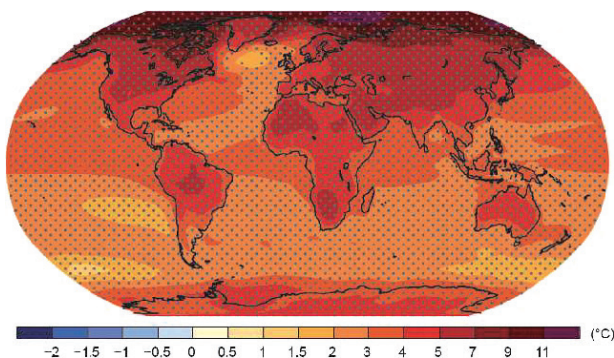


図1 21世紀末(2081-2100年の平均)の気温変化の予想¹⁾

があるため即座に効果が出るものではないとの見方もあるが、少しでも地球環境の延命を図るために再生可能エネルギー開発は急務であり、現在の最優先課題であると捉えなければならない。環境を崩してきたわれわれまでの世代の責任であり後世に美しい地球環境を残すことはわれわれの義務である。

そのような思いの中、当研究グループで開発中の有望な再生可能エネルギーのひとつである波エネルギーを利用した波力発電システムに適用したフルードパワーの概要について解説を行う。現段階では定量的成果やデータは控えて定性的な表現に終始した内容であることをお断りしておきたい。

2. 波力発電システムの概要

2.1 波力発電システムの動向

波力発電は文字通り海に存在する波のエネルギーを電気エネルギーに変換するシステムであるが、その方式にはさまざまな形態があり世界中で開発が進められている。代表的な例として、海上に浮体を浮かべ波の水位変動による浮体の上下動と固定支柱の相対動作からリニア発電機やラック&ピニオンなどの伝達装置を介して発電機を回転させる上下動浮体式、岸壁に海水が出入り可能な空気室を設け、波による水位変動で押し出される空気室の空気流速でタービンに接合した発電機を回転させる振動水柱式、海上にいくつかの屈曲関節を有する細長い浮体を浮かべ、浮体が表面波形状に屈曲する際に関節に設けられた油圧シリンダロッドが伸縮することで発生させた油圧で油圧モータに接合した発電機を回転させる屈曲浮体式、高速回転させた慣性マスをピッチ、ロールに自由度を持たせたジンバルを介して浮体に搭載し、慣性マスの保持姿勢と表面波で揺動する浮体との相対動作からジャイロモーメントによる駆動力を得て発電機を回転させるジャイロ式、越波させた海水をタービン水路に導入しその水流でタービン発電機を回転させる越波式などがあげられる。それら各方式の模式図を図2に示す²⁾。

当研究グループで採用している方式は、振り子式と称し、寄せては返す波の水平方向の往復流れを波

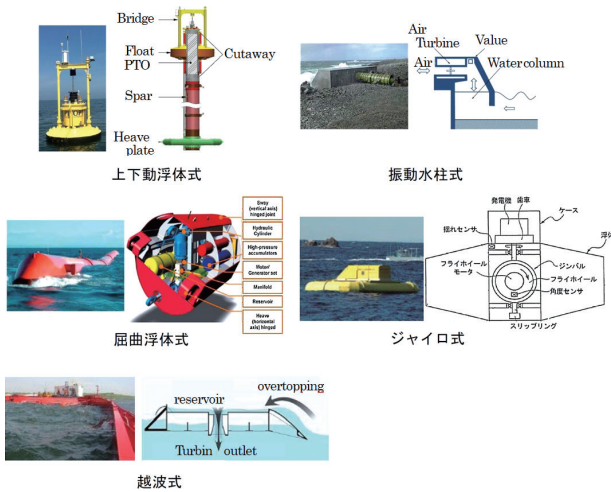


図2 各種波力発電方式の模式図
2) から引用し編集

受け板で受け、機械的回転力に変換したのちにさらに油圧変換のうえ油圧モータに直結した発電機を回転させるものである。

岸壁近傍に設置するため、設置費用が安価、送電に海底ケーブルが不要、漁場への影響が少ない、などのメリットがあり、平塚漁港に設置した実証機では大型の黒鯛、石鯛やスズキなどが、波受け板に付着しているフジツボなどの海洋生物を餌として群れており、漁礁の効果があることも分っている(図3)。



図3 波受け板に群がる黒鯛

2.2 振り子式波力発電システムの概要

波の進行を防波堤などの全反射面で遮った場合、進行波と反射波が重なった定常波となり、この時の水粒子の動きは、波の波長 λ に対し反射面から0, $1/2$, 1λ の位置では腹となって上下方向の往復振動流が、そして $1/4$, $3/4\lambda$ の位置では節となり水平方向の往復振動流がそれぞれ発生し楕円軌道を描く(図4)。

振り子式波力発電システムの波受け構造は、回転軸から垂らした波受け板が水粒子の動きを受けて回転軸を中心とした揺動運動を行い、水粒子の軌道半

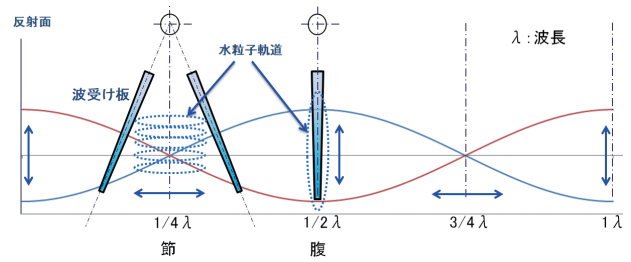


図4 波の共振現象

径と回転軸中心から波受け板に発生する波力中心までの成す角(回転軸回りの角度)が揺動角となり波エネルギーが機械エネルギーに変換されるため、図4に示すように節の位置に設置することで効率よくエネルギーを取り出すことができる³⁾。

回転軸にはシリンダ式のポンプが接続されており、回転軸の揺動運動に合わせて作動油が吐出され油圧エネルギーに変換される。吐出された作動油は単振動的に脈動を含んでいるため、蓄圧器を通して平滑化したのち圧力調整弁による圧力制限および流量制御弁による流量制限をかけたうえで、油圧モータを回転させ直結した発電機により電気エネルギーに変換することで発電を行う。一旦油圧エネルギーに変換することで容易に脈動を整流できる、過剰なエネルギーが入力した場合圧力調整弁で容易に逃がることができるなどのメリットがある。波を受けて発電するまでの流れを図5に示す。

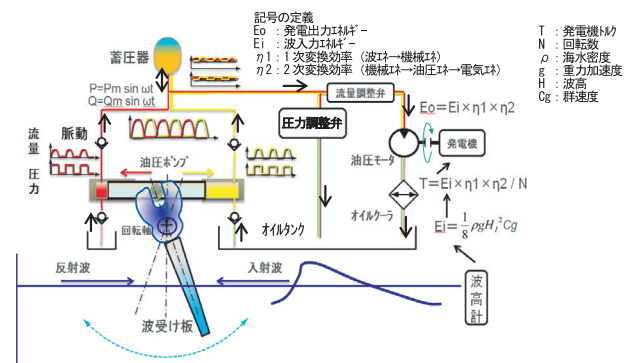


図5 波を受けて発電するまでの流れ

3. 海上実証試験機の紹介

2016年、岩手県久慈市玉の脇漁港に国内初の系統接続された実証試験機1号機を設置した。作動原理の確認を行う目的であるため、装置の破損を回避する方法として台風などで到来する最大波を定格発電波高として定格電力を発電する仕様とした。設備容量は43kWで一般家庭約10世帯分である。図6に運用時の状況を示す。



図6 久慈波力発電所運用状況

図7に発電所内部の油圧動力変換部の外観を示す。



図7 久慈波力発電所油圧動力変換部外観

久慈波力発電所の運用試験評価で振り子式波力発電の原理についての妥当性が評価できたため、つぎのフェーズとして商用時に必要な発電電力量（電力×時間）を目指し、風力発電の設備利用率および効率をベンチマークとしたシステムの開発を行うこととした。設備容量は45kWで1号機とほぼ同一であるが、波受け板面積を拡大し定格発電波高を通常到来頻度の高い波高に引き下げることで、発電電力量を実用レベルに向上させる仕様とした。図8に平塚波力発電所の運用状況を示す。



図8 平塚波力発電所運用状況

ただこの場合、台風などによる最大波が到来するとシリンダ式ポンプのストローク限界を超えてポンプが破損するため、相当する揺動角を超えると波受け板と回転軸を接続しているアームを屈折させ波力が油圧動力変換部に伝達されない安全装置を付加した。風力発電で行われるフェザリングに近い機能である。図9にアーム屈曲部を示す。



図9 アーム屈曲式安全装置

2020年には実証試験機2号機を完成させ平塚新港に設置のうえ発電評価を行いながら改良を進めているところである。

4. 油圧動力変換部の概要

4.1 機器の構成

主要構成部品はタンク、油圧ポンプ、蓄圧器、圧力調整弁、流量調整弁、油圧モータ、冷却装置で、各機器は極力一般的に流通しているコマーシャル品を採用することで発電システムに開発負荷を向けている。図10に適用機器の構成を示す。また主要な機器の概念について以降に示す。

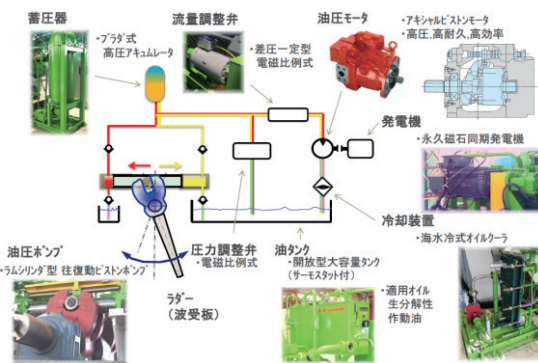


図10 適用機器の構成

4.1.1 油圧ポンプ

船舶用舵取機として量産されているラムシリンダを流用している。通常アクチュエータとして使われる物でシリンダに油圧を導入し駆動力を発生させるが、逆に波受け板の揺動でラムを駆動しシリンダから作動油を吐出させポンプとしている。本設備容量において、約1,500rpmで発電機（油圧モータ）を回転させるためのピーク流量は数百l/minにも及び、波力による非常に長い揺動周期でダイレクトにポンプを駆動する場合、回転型ポンプで押しのけ容積換算すると約200l/revにもなるため、0.5l/rev程度の流通品を適用する場合は増速機構またはダイレクト駆動の場合は大容量ポンプの新規開発が必要であった。舵取機のラムシリンダ流用でポンプの新規開発を省略

することができた。舵取機の適用状況を図11に示す。

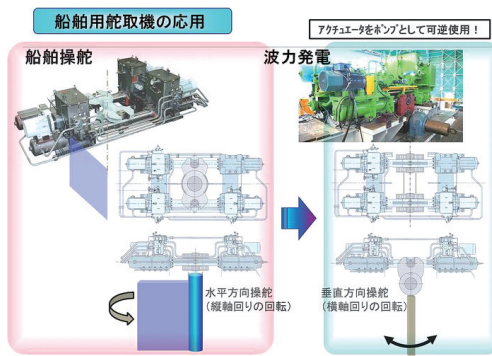


図11 船舶用舵取機ラムシリンダの適用

4.1.2 蓄圧器

往復運動している波エネルギーからダイレクトに油圧ポンプで作動油を吐出しているため、作動油の流れは圧力流量ともに単振動的に脈動を持っていることは先に述べた通りである。この流れで直接発電機（油圧モータ）を回転させると、発電機の最適効率回転数を常時キープできないこと、ピーク回転数が上昇するために過剰な発電機および油圧モータ仕様となること、ピーク流量を考慮した過剰な油圧回路となることなどの問題があるため、蓄圧器で整流したうえで発電機を回転させている。波エネルギーは、一定ではなく変化するため、それに応じて圧力流量も変化する。蓄圧器は充填されたガス圧に対するライン圧力の大小で流入出させることで整流するが、充填ガス圧力の3倍程度が適用範囲となり、1種類のガス圧力ではライン圧力変化幅に対応できない。図12に示すように複数の異なるガス圧力の蓄圧器をライン圧力に応じて切換弁で選択する方法で、ライン圧力の変動幅に対応させた。

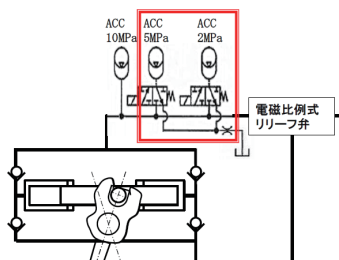


図12 蓄圧器の構成

4.1.3 流量制御

先に述べたさまざまなに変化する波エネルギーに応じて変化する圧力流量に対し、急峻な変化に対しては蓄圧器で整流後も脈動が大きく残り発電機回転数の上限を超える場合がある。発電機および油圧モータの保護を目的の一つとして、差圧一定型電磁比例弁を用いて流量ピークカットを行っている。

4.1.4 冷却装置

タンクから吸い込まれ油圧ポンプから吐出された作動油で発電機を回転させるまでには管路抵抗や各機器の流路形状による種々の抵抗により圧力損失が発生し熱に変わる。また波エネルギーの過剰入力に対し圧力調整弁が作動してリリーフした場合も発熱し作動油の温度上昇につながるため、作動油および各機器の温度仕様上限を超えないようにオイルクーラが必要となる。何らかの原因で故障が発生し制御用電源を喪失した場合にも波エネルギーは継続的に入力する。その時の波受け板の過剰な振幅を抑制するためにリリーフ圧を立て波受け板に負荷を与えるが、同時に作動油も発熱する。電源喪失状態でも冷却を行うために、図13に示すような海水を冷媒としたオイルクーラを適用し、循環作動油で油圧モータに直結した海水循環ポンプを駆動しオイルクーラに供給する方式を考案した。

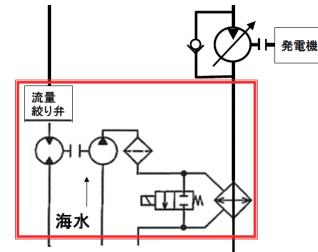


図13 電源喪失時の冷却回路

5. おわりに

周囲を海に囲まれた我が国は、豊富な波力エネルギーの賦存量があり、立地条件も好適と考えている。今後も改良を重ね設備利用率や効率向上など実用化に向け邁進すると同時に、本記事を読まれた方が少しでも地球温暖化に対する危機感を共有していただき、何らかの行動を起す意思を持たれることにつながれば幸いである。

なお久慈波力発電所と平塚波力発電所の開発・実証は、それぞれ「文部科学省 東北復興のためのクリーンエネルギー研究開発推進事業」、「環境省 CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の補助を受けて実施している。

参考文献

- 1) 気象庁：IPCC第5次評価報告書、第1作業部会報告書、(2013年)
- 2) 井上俊司、石田茂資ら：海洋開発工学概論、海洋再生可能エネルギー開発編、改訂第1版、P. 138-150 (2018年)
- 3) 渡部富治、近藤俊郎：波力発電、パワー社、P. 48 (2005年)

(原稿受付：2021年1月15日)

解説

五島の奈留瀬戸における浮沈式潮流発電システムの研究開発

著者紹介



きょう づか ゆう さく
経塚 雄 策

長崎大学海洋未来イノベーション機構
〒852-8521 長崎市文教町1-14
E-mail: kyozuka@nagasaki-u.ac.jp
URL: <http://www.nagasaki-u.ac.jp/marine/research/>

1973年大阪大学工学部造船学科卒業、1977年同大学院博士前期課程修了、同年防衛大学校助手1985年九州大学応用力学研究所助教授、1990年九州大学大学院総合理工学研究科教授、2016年長崎大学海洋未来イノベーション機構教授、海洋工学、海洋環境の研究に従事、日本船舶海洋工学会の会員、工学博士。

1. はじめに

潮流は太陽、地球、月などの天体運動による潮汐力によって発生する海の流れであり、特徴は予測可能であることである。潮汐発電はフランスのランスにおいて1967年から実用化されているが、潮汐発電はダムを作るための費用と環境面での問題があり、その後、普及していない。

現在の潮流発電とは、自然地形のままで潮流が速い所に直接タービンを設置して発電しようというものである。この方式によって現在、世界の潮流発電をリードしているのは英国、特にスコットランドである。この背景には、地球温暖化対策としてCO₂削減、再生可能エネルギーの拡大と同時に、北海油田の埋蔵量が減少しつつあるという事情も絡んでいるといわれている。2015年から開始されたMeyGenプロジェクトは、完成時には総発電量が398MWとなる予定であるが、いくつかのフェーズに分けて計画的に実施されており、着実な進展を遂げている。Phase-Iaでは定格1.5MWの着床式潮流発電装置4基が設置されて各種の実験が行われており、2019年の年間総発電量は13.8GWhであったと報告されている。

一方、我が国においても2012年度からNEDO、2014年度から環境省が支援して複数の潮流発電事業が行われてきたが、それらのほとんどがフィージビリティのみで終わってしまい実証までには至って

いない。現在、2019年度から環境省潮流発電技術実用化推進事業としてK社などが潮流発電の実証実験を計画¹⁾である。これは、長崎県五島市の奈留瀬戸において、MeyGenでも使われているS社の500kWのタービン¹⁾を設置して各種のデータ取得を行うものであり、ブレード直径は18m、装置の総重量は約1,500トンという大きなものである。このような大型装置が可能となるためにはいくつかの条件を満たす必要があるが、もっとも基本的な条件は潮流速であり、一般的には大潮時の最大流速が6ノット(3m/s)以上とされている。我が国にはこの条件を満たす海峡や瀬戸は少なくないが、その他の条件として航路指定のないところ、漁協の承認が得られること、環境影響が少ないこと、なども必要である。

一方、我が国は島嶼国であり有人離島数は400を超えているが、本土からの電力網から外れた離島ではディーゼル発電などによって電源を確保しているので、コスト的にも環境的にも問題がある。ところが、離島は四方を海に囲まれているので海流、潮流は普通に存在する。そこで、大型装置は無理であっても、中程度の潮流を利用して発電できないかという発想が生まれる。われわれは、大潮時の最高流速として3ノット(1.5m/s)程度の潮流による発電を目指しており、“レンズ風車²⁾”を参考にして大型のディフューザーを用いる潮流発電装置と設置費用を低減するためにロープ係留を用いる浮沈式潮流発電システムを提案している。

2. 浮沈式潮流発電システムの二つの特徴

長崎県の島数は594(有人島72)であり、全国で一番多い。われわれは長崎海域において、潮流シミュレーションを実施して浮沈式潮流発電システムが可能となる海域を調査した。図1は対馬の南端付近の海域の75日間の潮流速シミュレーションの結果である。この海域では、島による流れの増速効果により、大潮時の最高流速は1.8m/sを超えることがわかる。このような海域において高効率の潮流発電を行うことを考える。

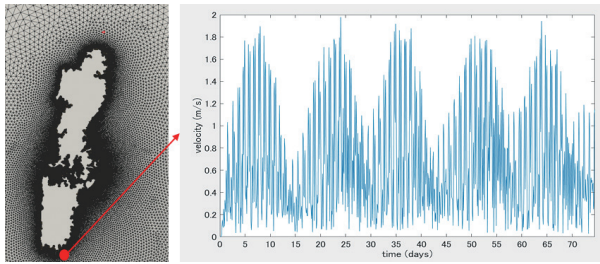


図1 対馬における潮流シミュレーション結果

そのために、参考にしたのは“レンズ風車”である。ただし、“レンズ風車”には強い風を受けるためにできるだけ高い位置に設置したいという要求と、そうするとトップヘビーになって支柱の強度が問題となるというジレンマがあってディフューザーの大きさに制限があるが、われわれの場合にはロープ係留とするのでその制限はない。大型ディフューザーに厚さを持たせることによって発生する浮力を利用すれば海中重量を容易に制御できる。大型ディフューザーを用いる利点はタービン位置での流速を大幅に増大することができるので結果的にタービンのカットイン流速を下げることができる。

ディフューザーおよびタービンの最適設計には ANSYS-CFX 19.1を用いたCDFとVKI (Von Karman Institute for Fluid Dynamics) で開発された2レベルタイプの最適化システムを用いた^{3), 4)}。ここでは65の翼形状を初期形状として与え、RANS解析により初期データベースを構築し、次いで人工神経回路網 (ANN: Artificial Neural Networks) の教師信号として初期データベースの値を与えて誤差逆伝搬学習を行う。学習されたメタモデルを用いて最適化ループ (Level 1 Loop) を実行し、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithms) により最適解の候補を得る。最適解の候補の中から代表6個体に対してCFDによる精度の高い評価 (Level 2 Loop) を行い、データベースの再構築およびメタモデルの再学習を行う。メタモデルによるレベル1のループおよびCFDによるレベル2のループを繰り返すことによって高い精度で最適解を見出すことができるようになる。

図2は、そのようにして得られた最適タービンとディフューザーである。この検証として、直径0.3mのタービンとディフューザー模型を作り実験を行った。図3は回流水槽において模型がセットされた時の写真である。図4はこの実験結果であり、ディフューザーの有無によるタービン出力 (C_p) を比較した。横軸は周速比で C_p はディフューザーの有無によらずタービン面積をベースとしている。この結果から、ディフューザーがある場合の出力は C_p の最

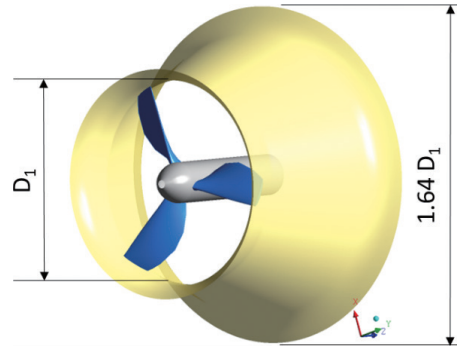


図2 最適タービンとディフューザー

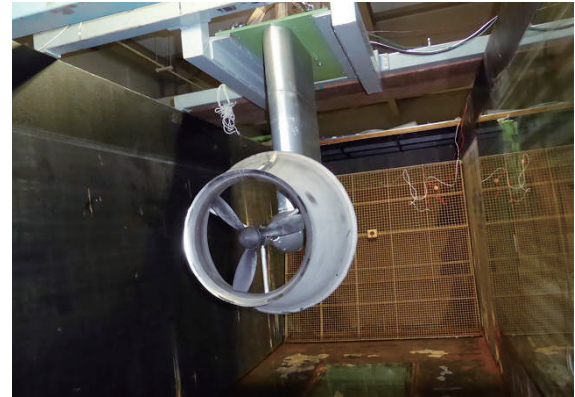
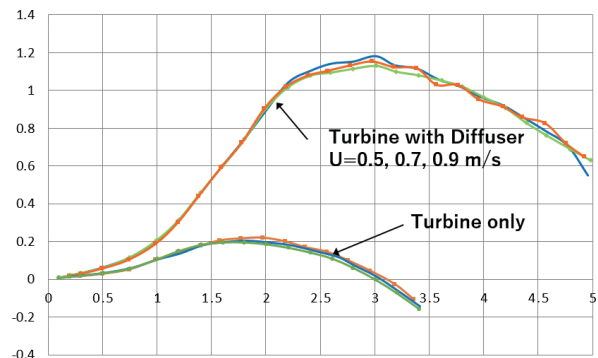


図3 回流水槽における性能試験


図4 ディフューザーの有無による発電性の比較
出力係数 C_p vs. 周速比

高値は1.2ほどであり、ない場合に比べて約6倍大きく、Betz限界の約2倍であることが分かる。一般に、タービン単独で高性能なものは $C_p=0.4$ ほどであるので、それとの比較でも約3倍の性能となる。この結果により、タービン出力に与えるディフューザーの効果は大きく、周速比の小さな領域でも C_p は大きくなるのでカットイン流速についても効果的であると言える。

つぎに、浮沈式潮流発電システムのもう一つの特徴は、ロープ係留を採用したことである。これは、着床式は基本的に重いので設置・回収時やメンテナンス時には大型クレーン船が必要となり、海上工事費が大きくなってしまいが、図5のようにロープ係

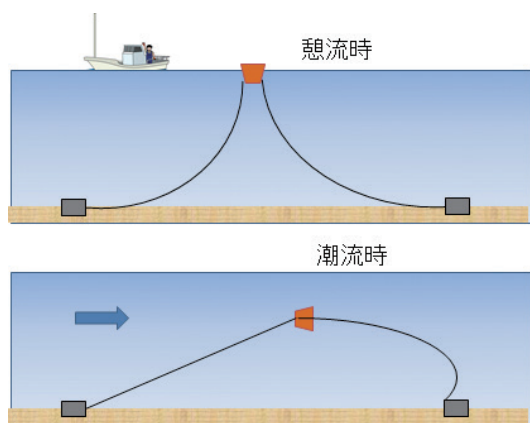


図5 ロープ係留方式

留を採用すれば大型クレーン船は必要ないので海上工事費を大幅に下げることができると考えられる。図5の潮流が止まる時（憩流時）は、装置の浮力によって海面に浮かぶが、潮流がある時は装置の抵抗によって没水し、流れに正対するようにしてやれば発電可能となる。装置のメンテナンスが必要な時には、憩流時に海面に浮かんだ装置のロープ等を外して港まで曳航することができるので、低コスト化に貢献できる。

図6は、潮流の上潮、下潮に対応した相対流を曳航水槽で実現するために曳引車を正弦的に運転した時の模型実験の水中写真である。この実験によって、流れの中でディフューザーが受ける流体力によって係留された模型は受動的に流れに正対することが確かめられた⁵⁾。

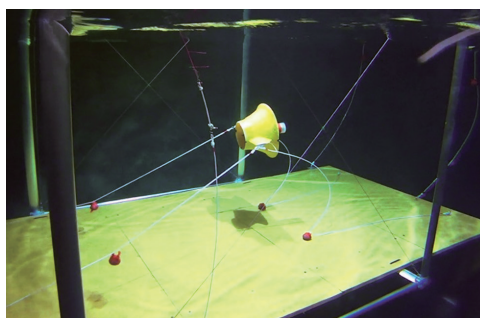


図6 曳航水槽における浮沈式システムの模型実験の写真

3. 奈留瀬戸における実海域実験

五島市の奈留瀬戸は、五島の久賀島と奈留島との海峡であり、2014年に内閣府海洋総合政策本部によって潮流発電の実証サイトに認定された強潮流の場所である。われわれが実験場所として選んだのは奈留島の篝火崎灯台から約85mの水深約12mの地点である。この設置点の付近の水深20m地点において2017年5月18日から11月12日までの潮流

と波浪観測を実施した。図7はこの期間中の潮位と流速の観測結果である。また、図8は水面下10m位置での潮流速の最大値を流向ごとに示したものである。これらの結果から、この地点では大潮時には流速が約6ノット（3m/s）であること、上潮と下潮の流向が一直線にはないこと、下潮時の流速の方が上潮時よりも大きいことなどがわかる。

このような観測と並行して、実証実験装置の開発を行った。表1は当初の主要な諸元である。タービンブレードはアルミを切削して作ったが、スパン長は切削機の長さ制限によって決まった。ディフューザーは内側をステンレスの薄板を用いて曲線を出し、外側はウレタンフォームとFRPで製作した。全長は当初にはもっと短くする予定であったが製作途中で

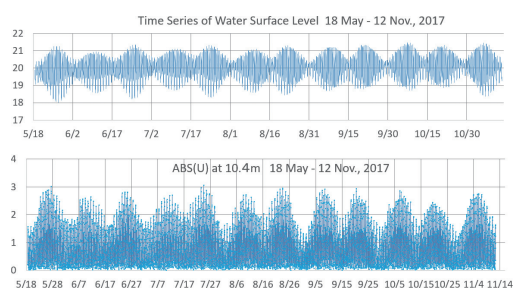


図7 奈留瀬戸・篝火崎における潮位と流速観測結果 2017.5.18-11.13

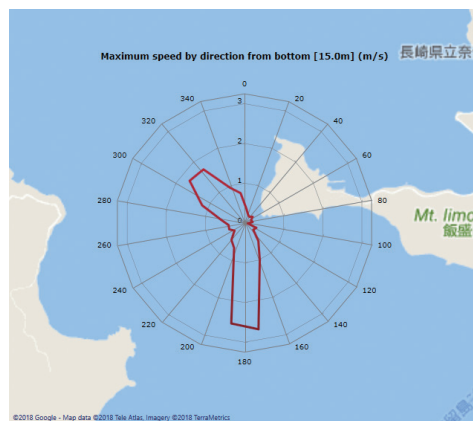


図8 流速観測場所と水面下10mでの最大流速の流向

表1 実証機諸元(当初)

全長	1.9m
全幅	1.05m
重量	370kg
タービン直径	0.64m
ディフューザー直径	1.05m
発電機出力	5kW
定格回転数	600rpm

浮力が足りないことが判明したので長くなった。発電機は定格出力5kW、定格回転数600rpmの多極発電機（重量45kg）を用いた。

図8のような潮流の特性を考慮して、実海域におけるアンカーを図9のように配置した。すなわち、上潮時の平均流向は北西方向312°であり、下潮時は南方向186°であるので、2組のアンカーをそれらの角度に合わせて配置した。

本潮流発電システムは浮沈式で、憩流時には水面に浮上する計画であったが、地元の漁協からの要請で憩流時にも水面下3m以下に留めるようにした。ロープ係留の具体案は、最終的には図10のように、



図9 アンカー設置位置と電力線敷設

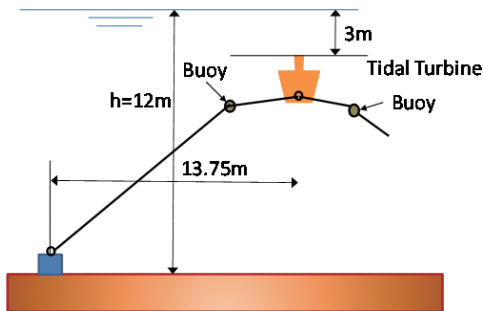


図10 係留ロープの最終形

中間ブイを用いることとなった。

本実海域実験では、図11に示すように流速、波浪、発電量、浮体深度、方位角、トリム角、ヒール角および水温・ナセル内気温などを計測した。これらのうち実時間でモニターするのは発電量のみで、その他についてはナセル内に小型データロガーを置いて記録し、実験終了後に回収した。発電量については、WiFiを用いて遠隔地からモニターした。

実海域実験を開始したのは2019年3月からであるが、当初は浮力材がトラブルの元であった。潜水士による設置工事に作業においては装置を一旦海底（約12m）まで沈める必要があるが、ディフューザーで用いたウレタンフォームが圧縮強度不足だったり、設置後に発泡スチロールが水圧によって縮小し浮力不足になったりした。幸い、ウレタンフォームには圧縮強度の大きなものがあるのでそれに変えた。

今回の実験を通じて問題となっているのは、潮流中でナセルのピッチ角が大きすぎるために発電効率が悪いということである。このことは、装置の製作中からある程度予想されていたが、装置前部が重すぎるのが根本的な問題である。装置は潮流の中で中層に留まって発電を行う必要があるが、そのためには装置自身が重量よりも大きな浮力を持つ必要がある。ナセル後部を大きくし、浮力を稼ぐとともに浮力材も付加したが、それによって重心位置と浮心位置が離れてしまい、流れの中でも頭下げの姿勢が安定してしまった。これを改善するために、尾翼の新設、ディフューザーに“つば”を付ける、係留ロープに浮力を付けるなどを行ったが、結果としてはピッチ角で10度以上の頭下げ角が残っている。

表2に2020年8月までに行った実験の期日と主なメモをまとめて示す。第5回目には台風17号が付近を通過したために陸上施設が損傷を受けて通信不能となったが、装置そのものは特に問題はなかった。第6回目の実験では、電力線が破損してそこから浸水したが、その海水がナセル本体にも入ってし

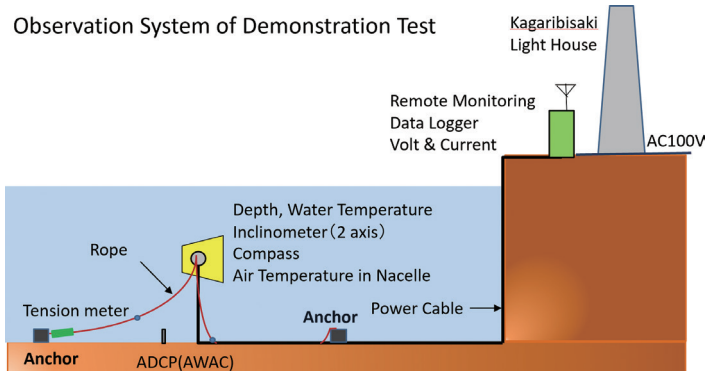


図11 実海域実験における計測システム

表2 実海域実験の記録

回	日付	メモ
1	2020/3/16	ウレタンフォームの耐圧強度不足
2	4/13 ~ 19	発泡スチロールの変形による浮力消失
3	5/10 ~ 19	装置ピッチ角の過大
4	6/23 ~ 7/14	最大126W (ピッチ角過大)⇒尾翼新設
5	9/14 ~ 10/6	最大480W (台風17号による施設損傷)
6	11/22 ~ 12/3	電力線破損によるナセル部浸水事故
7	2020/3/2 ~ 3/28	最大714W (2週目以降発電量低下)
8	7/2 ~ 7/16	回転軸ベアリング錆, パワコン不調
9	7/29 ~ 8/30	最大663W, 1か月間の安定した発電

まい最大の事故となった。第7回目には、最初の大潮時には予想通りの発電量だったが、つぎの大潮時には予想通りではなかった。装置の回収時に分かったのは、係留ロープが尾翼と絡まってしまい2回目の大潮時には正常な状態ではなかったことである。この問題を解決するために、図12のようにディフューザー端部から尾翼端部に細い線を張って、係留ロープがこの部分に入らないようにした。これが功を奏して第9回目の安定した発電となった。

図13は第9回目の実験期間中の1日当たりの発電量 (Wh/day) および最高発電量 (Max W) である。この期間中に2回の大潮があり、それにより発

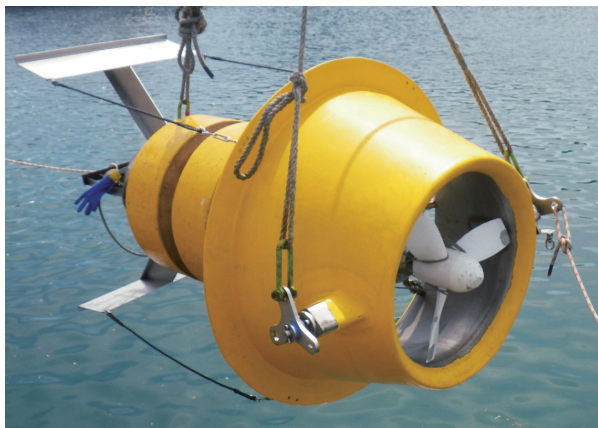


図12 第9回目の装置 (設置前)

電量が大きくなっていることが分かる。最大の発電量は8月6日の663Wであったが、日当たり発電量の最高値は8月20日の919Wh/dayであった。

図14は、8月20日の流速 (推定値)、発電量、潮位とナセルの没水深度、ナセルのピッチ角とロール角の変化を示したものである。流速は設置した

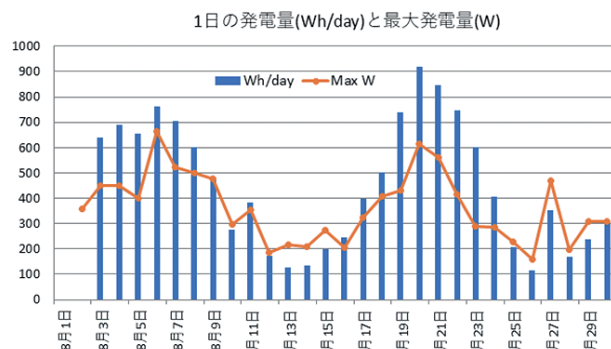


図13 日当たりの発電量と最大発電量 (ピーク値)

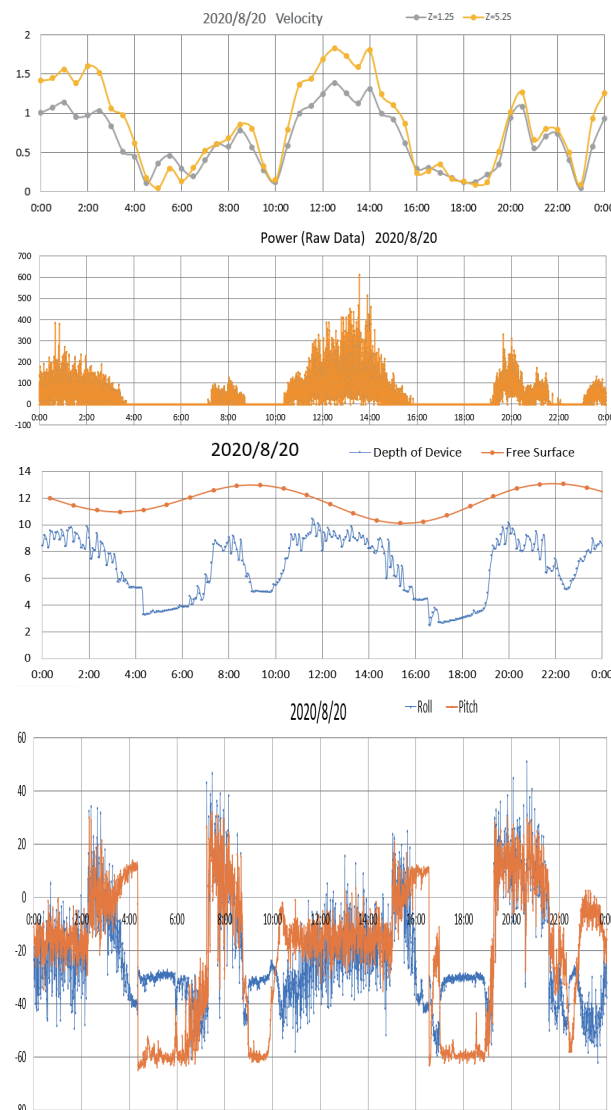


図14 8月20日の流速、発電量、潮位・装置水圧、ナセルのロールとピッチの観測値

AWACが不調だったため、2019年5月～7月までの同じポイントの観測値から推定したものである。この地点の潮流の特徴は図8でも分かるように上潮（8時と20時頃）は下潮（1時と13時頃）に比較して弱い。その下の図は、発電量の記録であるが、上記の潮流の特徴を反映して下潮時の方が発電量が多い。データのサンプリングは1ヘルツで行ったが、データが激しく変動していることがわかる。この変動の原因がすべて潮流の乱れによるものかどうかは現時点では不明であるが、今後、乱流観測なども行って明確にしたい。この発電量と潮流の記録を比較すると、本装置のカットイン流速は0.5m/s程度であることがわかる。

つぎに、その下の図は潮位と装置の水圧（ヘッド換算）の比較であり、両者の差は装置の海底からの高さを与えている。これによれば、発電量がもっとも大きかった13時頃の装置高さは海底から1～2mのところであり、その高さでは海底境界層により流速も小さくなっている（図15）。最後の図は、ナセルのロールとピッチ観測値である。発電量に大きく影響するのはピッチであるが、11:00～14:00頃のピッチは -12° 程度であり、これは頭下げとなって流れに正対していないと言える。

以上を総括すると、2020年8月の実験においては1か月間の安定した潮流発電には成功したが、発電量については不十分であったと言える。発電量が上がらなかった理由は、装置の深度が深すぎたこと、流れに対するピッチ角が大きすぎたことである。今

後の対策としては、これらの2点を解決することである。

3. おわりに

以上、本稿では低速の潮流中で低コストで設置可能な浮沈式潮流発電システムの研究開発および実海域での実験結果について紹介した。大学で実施するのは通常、模型実験までであろうと思われるが、本システムの実用化を加速するために実海域実験にも挑戦した。結果は、多くの失敗を繰り返したが多くの教訓を得た。ようやく9回目で1か月間の安定した運転を達成できたが、発電量については不十分であるといわざるを得ない。発電量については、今後改良のために継続研究の予定である。

なお、本研究は科学研究費補助金（基盤研究(B)（一般）課題番号19H02365）および長崎大学の校費によって実施された。また、多くの企業、団体からの協力と支援を受けた。関係各位に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) お知らせ：潮流発電技術実用化推進事業に係るEPC契約および協力協定の締結について、<https://www.q-mirai.co.jp/news/archives/187>
- 2) Y. Ohya, T. Karasudani, A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology, *Energies*, 3, 634–639, 2010.
- 3) 坂口大作, Huang Yu-Yu, 経塚雄策：レンズ水車型潮流タービンの多目的最適化設計, ターボ機械, 富山講演会 (2017)
- 4) D. Sakaguchi, M. Ishida, H. Hayami, L. Mueller, Z. Alsalihi and T. Verstraete, Multipoint Multi-objective Optimization of a Low Solidity Circular Cascade Diffuser in Centrifugal Blowers, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014 : Turbine Technical Conference and Exposition*, GT2014-26013, pp. 1–10, (2014)
- 5) Yusaku Kyojuka, Daisaku Sakaguchi, Makoto Sueyoshi and Changhong Hu : A floating/submersible shrouded tidal current turbine system applicable in low speed tidal flow, *Proceedings of the 13th European Wave and Tidal Energy Conference*, 1st–6th September 2019, Napoli, Italy.

（原稿受付：2020年12月11日）

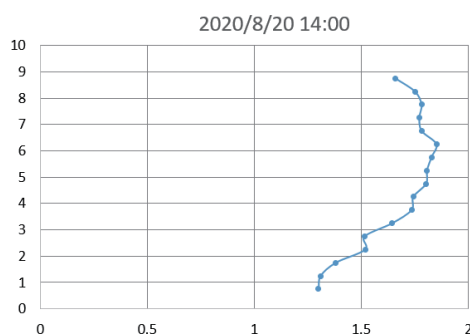


図15 潮流速度の鉛直分布

解説

上水道施設を利用した水力発電

著者紹介



おお いけ しん ご
大 池 真 悟

東京発電株式会社
〒110-0008 東京都台東区池之端 1-2-18
いちご池之端ビル 3階
E-mail : shingo.oike@touhatsu.tgn.ne.jp.ac.jp

1989年東京電力株式会社、2013年信州大学大学院総合工学系研究科システム開発工学専攻 修了、博士（工学）、2019年東京発電株式会社、水力発電所の運転保守、建設業務に従事。

1. はじめに

水力発電は、日本の主要電源として1891年に国内初の事業用発電所として蹴上発電所が運転を開始して以来、今日にいたるまで日本の電力需要を支え続ける電源である。また、昨今では再生可能エネルギーとしても注目されている電源である。水力発電は他の再生可能エネルギーに比べ①エネルギー密度が高い、②安定してエネルギーを得ることができる、③ライフサイクルCO₂発生量がもっとも少ない、といった長所を有しており、今後も脱炭素社会実現に向けその役割が期待される電源である。反面、国内では大規模開発適地の減少や奥地化、森林資源の破壊といった課題が内在しているため、従来のような開発とは異なる開発手法が望まれる。

今回、再生可能エネルギー利用の一つの方策として、当社が取り組んできた「上水道施設を利用した水力発電」について解説する。

2. 水力発電の概要

本項では水力発電の仕組みについて概要を解説する。水力発電の理論出力 P は $P=\rho gQH_e$ kWで示される。ここで、

ρ : 密度 kg/m³

g : 重力加速度 m/s²

Q : 体積流量 m³/s

H_e : 有効落差 m

を示す。

この式から水力発電を行うには水と落差が必要で

あり、言い換えると位置エネルギーを有する水を水車に与えて発電するというのが水力発電の基本原則であることがわかる。位置エネルギーを有する流体（水）が圧力ないしは速度エネルギーとして水車に作用することで水車を回転（機械的エネルギー）させ、水車と連結した発電機が最終的に発電（電気エネルギー）してエネルギーを変換、取り出している。

2.1 水力発電所の概要

つぎに、このエネルギーの変換を実現するために必要な主要設備構成について解説する。水力発電所の形態にはいくつか種類があるが、基本的な設備構成として流れ込み式水力発電所の例を図1に示す。

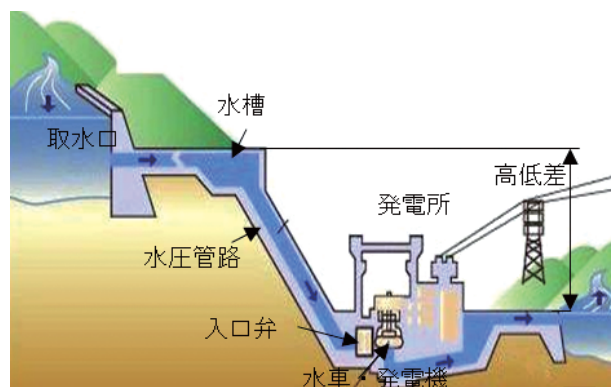


図1 流れ込み式水力発電所の設備構成例

水力発電所設備は水を水源から取り込み水車に導くための水路設備とエネルギーを電気に変換するための水車・発電機、これらを保護・制御する制御装置、電気を供給するための変電設備により構成されている。本項では、主に水路設備と水車について解説する。

取水口：水源（河川、ダムなど）から水を取りこみ水槽に供給する設備、取水口から水槽までの間を結ぶ水路を導水路という。

水槽：負荷変動時の水圧管流量の変化を調整する設備。水槽の水位と放水口水位が位置エネルギーの基準となる。

水圧管路：位置エネルギーをできるだけ損失を抑えて水車まで運ぶ圧力管路設備。

入口弁：水車の充水、止水をする役割を有する。

水車・発電機：位置エネルギーを電気に変換するための設備。（図1中の高低差から流水によって生じる摩擦他の損失を除いたものが有効落差 H_e として水車に作用する。）

放水口：水車でエネルギー回収が終わった水を河川に戻すための設備。

2.2 水車の種類

水車は位置エネルギーを主として速度エネルギーとして利用するか、主として圧力エネルギーとして利用するかにより大別される。速度エネルギーとして使用するものを衝動水車といい、圧力エネルギーとして利用するものを反動水車という。

衝動水車は水車の回転部（ランナという）に水をジェットにしてぶつけて回転させるもの、反動水車はランナにある羽根（ランナブレードという）の前面と背面の圧力差（揚力）によって回転させるものである。水車の選定は基本的に適用地点の落差、流量によって行われる。しかしながら、同じ落差、流量によっても、地点の条件によって適用制限があるので注意が必要である。その一つに吸出し高さの利用可否がある。吸出し高さは水車ランナの基準面と放水側の大気開放面との差であるが、衝動水車はランナを通過した水を大気に排出しなければならないため、吸出し高さを有効落差の一部として使用することができない。つまりパイプラインから分岐して水車に通水し、その水をパイプラインに戻す場合は衝動水車が利用できないので注意が必要となる。

衝動水車、反動水車の種類を表1に示す。それぞれ適用落差によって異なる型式の水車がある。水車の選定を行う際は、適用地点の落差と流量により決定するが図2に示す選定図を基に水車型式の候補を選定し立地状況や過去10年程度の流況（年間の取水可能量の傾向）分析結果に基づき発生電力量が最

表1 水車の分類

分類	水車型式	適用落差
衝動水車	ペルトン	200 ～ 1,000m
	ターゴインパルス	90 ～ 600m
	クロスフロー	30 ～ 80m
反動水車	フランシス	50 ～ 800m
	斜流	20 ～ 180m
	プロペラ	5 ～ 90m

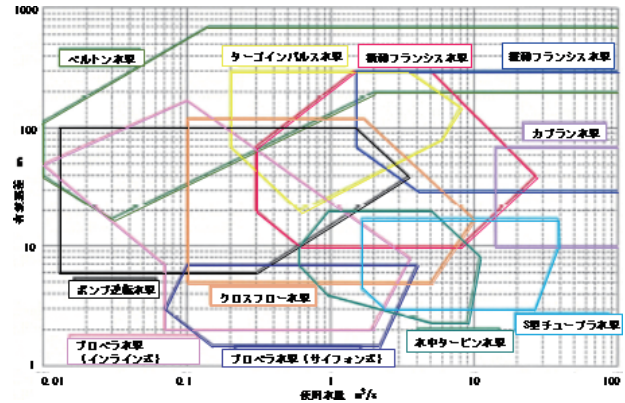


図2 水車選定図例¹⁾

大となる水車を選定する。

図3に衝動水車の代表例であるペルトン水車とランナを示す。ペルトン水車はニードルから流出するジェットをランナの外周部に付いている梔状のバケットに当てランナを回転させる水車である。高落差小水量地点に適する。

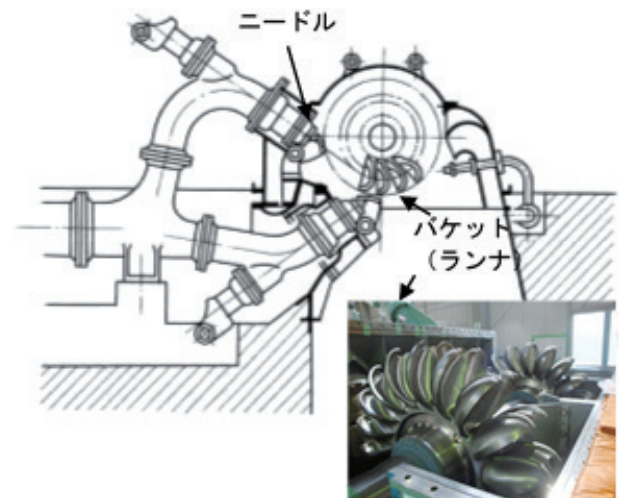
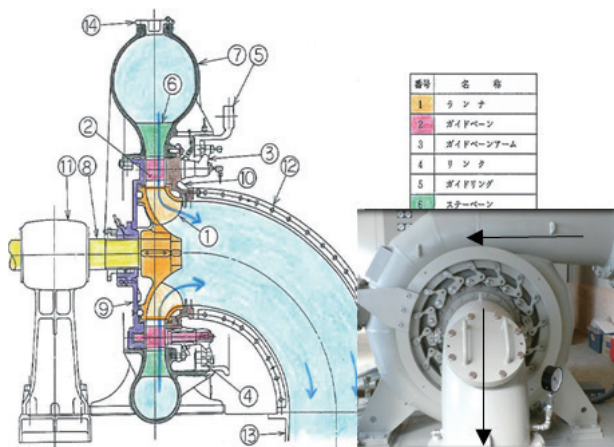


図3 ペルトン水車¹⁾

つぎに図4に反動水車の代表例であるフランシス水車を示す。図は横軸機を示すが、この水車の構造上の特徴は、水を通水するケーシングがランナの周りを渦巻状に配置されており、水が円周方向からランナに流入し鉛直方向に抜けていくことである。フランシス水車は適用落差帯が広く日本でもっとも多く採用されている。

図4 フランシス水車¹⁾

このほかに当社が上水道施設に採用した水車を以下に示す。図5はクロスフロー水車を、図6はプロペラ水車を示す。

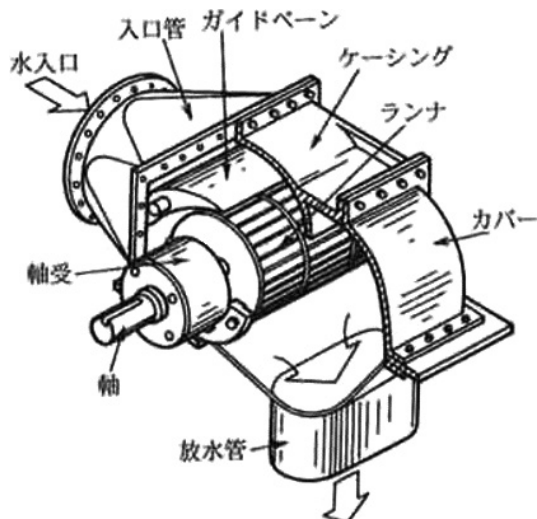
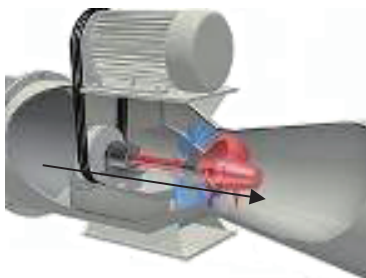
図5 クロスフロー水車²⁾

図6 プロペラ水車

クロスフロー水車は構造が簡易なため小規模水力地点の開発に適している。軸と直角方向から水が流入しランナに水が一度作用した後、ランナ内を通過して再度ランナに水が作用することからクロスフロー水車と呼ばれ反動水車と衝動水車の両方の原理を用いた水車である。プロペラ水車では水流は軸方

向に流れ、ランナ形状はプロペラ状である。低落差で流量が多い地点に適用される。ガイドベーン、ランナベーンの角度を変えることで変落差、変流量時でも効率低下を抑制した運転が可能なタイプもある。

3. 水道発電

再生可能エネルギー開発という視点で見ると、大規模な開発をとまなうことなく各所に分散しているエネルギーを活用することが望まれる。2.1項で水力発電所を構成する設備概要について述べたが、開発規模が小さい場合(0.5 MW未満程度)取水設備、水路設備といった水力発電に必要な設備を構築することが工事費の増大要因となり事業性が得られず、開発を断念せざるを得ない場合がある。

そこで着目したのが「別の目的で使われている水の利用」である。人間の生活、生産活動を振り返ると上下水道、工業用水、農業用水のように発電以外の目的で集められ、供給されている水が存在している。特に、上水、工業用水設備は水力発電に必要な取水設備、水路設備をすでに備えている。図7に上水道設備の例を示す。

水道施設の例

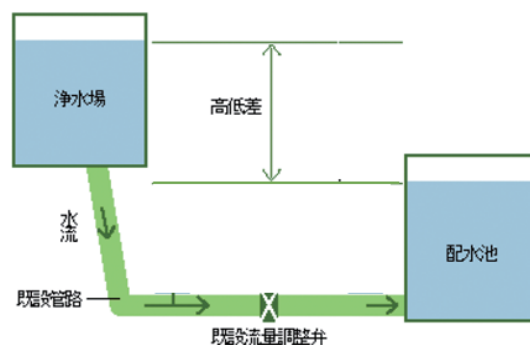


図7 流下式の水道施設設備構成概要

浄水場(水の生産箇所)から配水池(水の供給拠点)までを示しているが、この図7と図1を較べると共通点があることに気が付かれるだろう。浄水場は図1の取水設備や水槽であり、浄水場と配水池を繋ぐ導水管路が水圧管路になる。そして配水池が放水口に当たる。つまり、土木構造物を新たに形成するための工事を行わなくとも水車発電機を浄水場と配水池の間に設けることで水力発電ができることになる。

3.1 水道施設における水のエネルギー

水道施設の設備構成が水力発電に必要な設備構成と似通っていると述べたが、つぎに水道施設におけるエネルギーの回収方法について解説する。

まず、水道施設には浄水場から配水池に水を供給

するため、流下式であったり、ポンプ圧送であったりと立地条件に応じた送水方法が採用されている。流下式の場合は高低差が位置エネルギーとして存在し、ポンプ圧送の場合は余剰圧が圧力エネルギーとして存在する。余剰圧について補足すると、複数の立地条件が異なる配水池に送水する場合、最遠隔地に必要な水を送水することが責務となるため、これを満たす能力のポンプが選定される。このため浄水場から近い配水池には余剰圧が生じることになる。

つぎにエネルギーの回収方法であるが、配水池には受水量に応じた調整を行うための減圧弁、流量調整弁がある。概略図を図8に示す。弁の上流側（浄水場側）と下流側（配水池側）を一次、二次とすると弁を介して圧力差が生じる。この一次圧と二次圧の差が水力発電における落差となる。よって、流量調整弁の一次側から水車に分岐し水車を通過した水を二次側に戻す形がとられる。

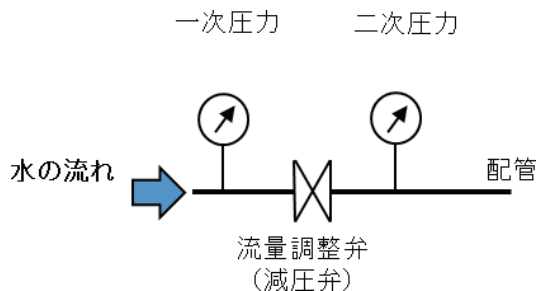


図8 流量調整弁と前後圧の関係

図9に図7に示した水道施設に水車を設置した場合の概略図を示す。この図からわかる通り、水力発電所を建設するための管路工事は分岐管だけで済むため、水車発電機を設置するスペースさえ確保できれば、通常必要となる土木工事、管路工事を最低限に抑えることができ、小規模でも経済性の改善が図られることから建設可能地点が増える可能性を持っている。

水道を利用したマイクロ水力発電のしくみ

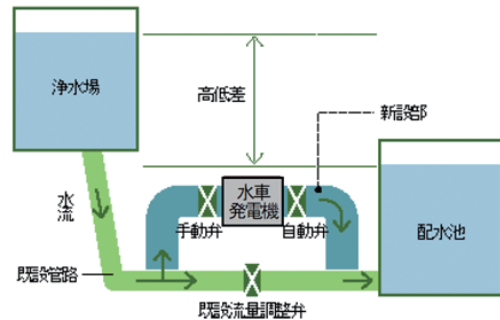


図9 水道施設におけるマイクロ水力の仕組み

4. 水道発電の設置事例

本項では上水道での設置事例を紹介する。当社は2004年以降、上・下水道、工業用水、農業用水などを利用した発電事業を手掛けている。この事業による上水道発電実績を表2に示す。

表2 上水道発電実績

県域	地点数	総出力 kW	年間発生電力量 kWh
神奈川	3	480	2,950,000
埼玉	5	463	3,160,000
千葉	3	885	4,020,000
群馬	2	133	1,060,000
山梨	1	180	900,000
新潟	1	198	860,000
福島	1	115	730,000

これらの地点の年間発生電力量によるCO₂削減効果は、排出係数を0.000462t-CO₂/kWh³⁾とすると約6,320t-CO₂/年に相当する。これは一般家庭一世帯での年間排出量を2,800kg-CO₂⁴⁾とすると約2,260世帯分の排出量を削減したことに相当する。

仮に表2の総出力と同じ太陽光発電設備と比較した場合、太陽光の利用率は12%程度であるので、排出量削減効果は約430世帯相当であり水力発電がCO₂の削減効果が高い電源であることがわかる。

続いて当社の事例を紹介する。

4.1 鷺沼発電所

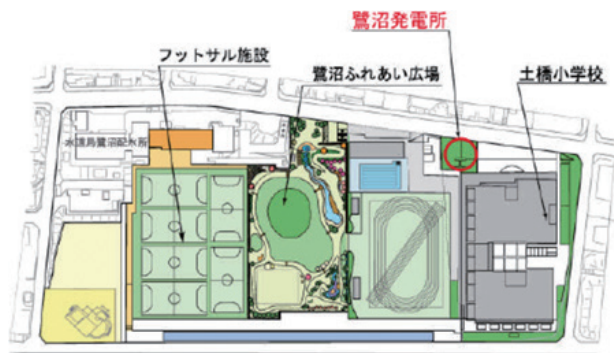


図10 鷺沼発電所位置図および水車発電機設置状況

【概要】川崎市上下水道局との共同事業として鷺沼配水池の再開発に合わせ導入。小学校、親水公園、フットサル場の一面にある流量調整弁室に設置され発電している。

運開年月：2006年9月

発電所諸元： $H_e=13.1\text{m}$, $Q=0.96\text{m}^3/\text{s}$, $P=90\text{kW}$

水車型式：横軸プロペラ水車（チューブラ水車）

4.2 若田発電所



図11 若田発電所水車発電機設置状況

【概要】高崎市水道局との共同事業として若田浄水場の減勢槽に導入。浄水処理前の原水を発電に利用している。取水口と浄水場間の標高差を利用し送水管内に発電に必要な水位を作り発電に利用している。

運開年月：2007年10月

発電所諸元： $H_e=20.0\text{m}$, $Q=0.52\text{m}^3/\text{s}$, $P=78\text{kW}$

水車型式：クロスフロー水車

4.3 妙典発電所



図12 妙典発電所水車発電機設置状況

【概要】千葉県上下水道局との共同事業として妙典給水場に導入。送水余剰圧を利用して発電している。

運開年月：2008年5月

発電所諸元： $H_e=37.0\text{m}$, $Q=1.00\text{m}^3/\text{s}$, $P=300\text{kW}$

水車型式：横軸フランシス水車

5. 終わりに

発電以外の目的で集められ利用されている水を発電に利用する水力発電として上水道発電の概要を解説した。水力発電所は継続的にエネルギーが得られる場所（地点選定）に限られるため、山間地での開発イメージが根強い。しかし、視野を広げてみると今回の紹介事例のようなエネルギー賦存か所はわれわれの生活エリアの中に多く存在している。水力発電は国が掲げる2050年の脱炭素社会実現に貢献できる再生可能エネルギーのひとつである。引き続き、多様な形態で賦存する水力エネルギーの活用努めていく。

参考文献

- 1) 新エネルギー財団新エネルギー人材育成研修会（水力発電コース）2020年テキスト, p. 173-192.
- 2) 一般財団法人新エネルギー財団水力地熱本部発行, 中小水力発電ガイドブックp. 102
- 3) R2. 1. 7環境省・経済産業省公表 電気事業者別排出係数（特定排出者の温室効果ガス排出量算定用）平成30年度実績 一般送電事業者排出係数
- 4) 環境省2020年4月発表2018年温室効果ガス排出量確報値 要因分析2.6家庭部門

（原稿受付：2020年11月18日）

解説

超臨界水を利用した地熱発電技術

著者紹介



あさ ぬま ひろし
浅 沼 宏
〒963-0298 福島県郡山市待池台2丁目2番9
E-mail: h.asanuma@aist.go.jp

1992年東北大学大学院工学研究科博士課程修了。同大学助手、准教授を経て2013年から国立研究開発法人産業技術総合研究所所属。現在、福島再生可能エネルギー研究所・再生可能エネルギー研究センター・総括研究主幹（兼）地熱チーム長。専門は地熱開発工学、地震学

1. はじめに

火山国である我が国の地下に大量の地熱エネルギーが存在していることは古くから広く認識されており、地下に天然に存在する地熱システムを利用した地熱発電が実現してきた。この中で、近年、海洋プレートの沈み込みに起源を有し、地下数kmに存在する、温度400～500℃の「超臨界地熱システム」が二酸化炭素排出量の大幅な削減に寄与可能で有望と位置付けられ、2040年代の商用発電の実現へ向けて政府主導で研究開発が行われている。本稿では、超臨界地熱システムの特徴や商用発電の実現へ向けた課題などについて記す。

2. 地熱発電の原理と課題

全地球的規模で地球の内部を見た場合、我が国は対流により地球内部を循環するマントルが冷却し、地球表面付近に存在する海洋プレートを巻き込みながら地球の中心へ向けて降下する「沈み込み帯」にある。沈み込み帯の深度150～200km付近では、圧力、地球内部から伝わる熱、およびプレートと一緒に地下へ移動した海水の相互作用により、岩石の融点が1,200℃程度まで低下し、固相・液相・気相の物質が混じりあった「マグマ」が生成する。マグマは周囲の岩との密度差により地上へ向けて年間数mm程度の速さで上昇し、10～20kmの深さで100年以上かけて冷却する。また、マグマの一部は直径数km～20km程度のバルーン状の形状を有して深度数kmまで上昇し、冷却するが、その上部に弱面など

がある場合、マグマが地上まで上昇し、火山活動を引き起こすこともある。

このようなマグマの近傍に、亀裂群（断層や破砕帯）が天然に存在し、さらに、その上部に透水性の低い領域（キャップ構造）がある場合、亀裂群の内部に雨水が蓄えられ、マグマからの熱により200～300℃に加熱される。これが、現在、地熱発電で使用されている「天然地熱貯留層」である。

地熱発電は他の再生可能エネルギーに比してCO₂排出量が少なく、また時刻や気象に影響されないといった優れた特徴を有している。しかし、現在、我が国の地熱発電の総容量は約55MWであり、一般の方が思い浮かべる値に比してかなり小さいのが現実である。これには、社会的要因も含めてさまざまな要因があるが、地球科学的にみると、天然の地熱貯留層の規模が小さいことや（20～30年の連続的な発電を想定した場合、20～30MW/地点が妥当な設備容量）、開発前の調査フェーズにおいて、熱水を蓄えた亀裂の位置や亀裂の傾きなどを正確に把握できない点などがあげられている¹⁾。

3. 超臨界地熱発電の概要

先に述べたように、我が国における地熱エネルギーの大部分はマグマが有する熱に起源を有する。これまで、マグマは天然地熱貯留層や温泉の熱源としてとらえられてきたが、筆者らは、冷却中のマグマ性岩体を直接エネルギー源として利用する方法についてさまざまな視点から検討を行ってきた²⁾。マグマの生成に海洋プレートとともに地下深部へ移動した海水が寄与していることについては前述したが、これにより、マグマ性岩体の内部には体積比で数%の海水が含まれていると考えられている。また、マグマ性岩体の上部にはシリカの沈積によって生じた不透水層が存在しており³⁾、浅部の水理系と分離されている可能性が高いというデータも得られている。一方、マグマ性岩体内部の温度については、Ogawa et al., (2014) が、自然電磁波を用いた比抵抗探査の結果と自然地震の震源分布を比較しており⁴⁾、内部に数%の海水を蓄えているマグマ性岩体上部の温

度が、花崗岩が歪エネルギーを蓄積できなくなり（塑性状態）自然地震が発生し難くなるとされている370℃以上であることを示唆している。このような温度領域での塩水の挙動については未解明の部分が多いが、われわれが想定している温度・圧力領域では塩と水が分離し、水は超臨界状態になっている可能性が高い。すなわち、このような地下数kmに存在するマグマ性岩体上部には天然状態において相当量の超臨界水が蓄えられていると考えるのが妥当である。

筆者らはこのような地熱系を「超臨界地熱システム」（図1）と名付け、それを熱源として利用する発電方式である「超臨界地熱発電」により得られるエネルギー量を概算したところ、超臨界地熱システム内に存在する超臨界水の10%を利用できれば、ひとつの超臨界地熱システムあたり数GWの発電を30年間程度行うことができるとの結果を得た⁵⁾。

一方、海洋プレートの湧き出し帯にあり、地質学的条件は異なるものの、地下が我が国と同様に高温であるアイスランドでは、2009年に500℃程度の超高温地熱資源への到達を目指して掘削が行われた（IDDP-1井）。不運にも、この坑井は事前の調査では見つかっていなかった1,000℃に近い溶融したマグマに突っ込み、最終的に井戸を廃棄することになったのだが、噴気試験を行ったところ、一つの坑井で約36MWの発電が可能な蒸気が生産された⁶⁾。我が国の通常の地熱井の生産能力が最大でも3MW程度であることと比べると10倍以上の生産能力を示しており、超臨界地熱発電の優位性が示された例として知られている。この噴気試験結果はわれわれが実施したシミュレーション結果とおおむね一致している。

我が国における詳細な超臨界地熱資源量の評価は未実施であるが、われわれは超臨界地熱システムは東日本、九州地方を中心に主として第四期火山（約260万年前以降に噴火して形成された火山）、カルデラの下部に存在していると考えている。それらの総数はゆうに100を超える⁷⁾ことから、国内に多数存在する超臨界地熱システムを用いて各々1GWの発電を可能にするならば、超臨界地熱発電の国内総容量が石炭火力発電所の総容量と同等の50GWに達することも夢ではない。この時、二酸化炭素排出量削減効果は約1.8億t-CO₂/年となり、我が国の脱炭素社会の実現に大きく貢献できることになる。このような一連の試算の結果を受けて、超臨界地熱発電は内閣府が2020年1月に策定した「革新的環境イノベーション戦略」の中で、革新的発電技術のひとつと位置付けられ⁸⁾、現在、国のプロジェクトとし

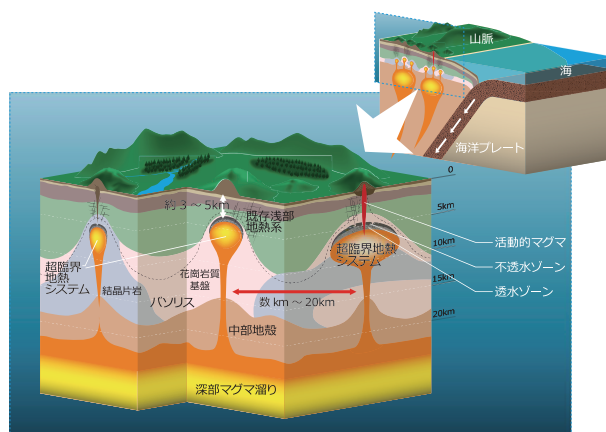


図1 我が国における超臨界地熱システムの概念図

て研究開発が行われている。

4. 超臨界地熱発電の実現へ向けた課題

これまで述べてきたように、超臨界地熱システム、内部に蓄えられた海水起源の超臨界水を利用する超臨界地熱発電は、低炭素な国産エネルギーを安定に供給可能な技術として非常に魅力的である。しかしながら、克服が必要ないくつかの課題があるため、今すぐに商用発電を行うことは困難である。政府もこの点を認識しており、2040年以降の商用発電の実現を目指している。

これらのうち、最初に解決すべき課題は、超臨界地熱システムから発電に資する量のエネルギーを取り出せるのかという点である。これまで、筆者らが国などからの委託を受け行ってきた調査では、既存の浅部坑井から得られたデータや電磁波、地震波により得られたデータをもとに超臨界地熱システムの存在位置や物性値を間接的に推定してきたが、ここには多くの仮定が加わっており、現実の超臨界地熱システムの性状を推定するためには、試掘と試掘井を用いた一連の試験が不可欠である。我が国では、1998年に高温のマグマ性岩体を目指して掘削が行われ、500℃を超える岩体へ到達した。しかしながら、本坑井から流体を産出することはなく、穴は埋め戻されてしまった⁹⁾。これは、当時、天然地熱貯留層下部にあるマグマ性岩体は単なる熱源であり、内部に天然に熱水系が形成されているという概念がなかったことに加え、この坑井が、現在、われわれが同地点で想定している超臨界地熱システム端部の低透水ゾーンを通過したためと考えている。超臨界地熱システムへの掘削は、温度・圧力条件が既存技術の限界に近い条件で行わざるを得ないので、非常に高価なものとなる。今後、超臨界地熱システムへの試掘を行う場合には、事前に掘削位置を十分に検討するとともに、高温の岩体へ穴が到達した後に、

超臨界地熱資源の存在を実証するために実施すべき一連の試験計画を緻密に立案する必要がある。われわれは、現在、2020年代半ばの試掘実現を目指して、有望地点での調査を行うとともに、科学的・技術的視点から計画の立案を行っている。

超臨界地熱開発における第二の課題は腐食と溶存物質の存在である。先に述べた、アイスランドでのIDDP-1井の噴気試験では、詳細な生成メカニズムが未解明であるものの、海水中のNaClが変性したとみられるHClが蒸気中に大量に含まれており、結露後に高い腐食性を示した。我が国の超臨界地熱システムにおいても、内部の超臨界流体の起源が海水であることより、HClの生成を想定するのが妥当であると考えている。腐食の問題を解決するためには、高級金属材料やセラミックスに代表される非金属材料を使用することが一つの解決策になり得るが、価格や力学的性質、特に熱膨張特性を考えると、大量に導入することは困難であると判断している。よって、今後、複合材を含む新素材の開発を進めるとともに、坑内、地上配管内での流体の化学的挙動をシミュレートし、適材適所で使用する素材を決定するのが望ましいと考えている。一方、IDDP-1井から生産された蒸気には大量のシリカが含まれており、大気開放された際に大量のシリカ微粒子が発生した。このことは坑井から噴出した蒸気をそのままタービンに導入することが困難であることを示している。これに対する対策として、遠心分離や液体を用いて腐食性物質と同時に浄化を行うことが考えられるが、浄化プロセスによる熱エネルギーのロスを最低限に抑えた手法の構築が重要となる。

第三の課題は井戸の掘削と仕上げである。現在、掘削機器・掘削に関する技術開発の大部分は石油・天然ガス分野において行われているが、そこで想定されている最大温度はおおむね250℃であり、超臨界地熱開発における想定最大温度である500℃との間には大きなギャップがある。500℃の岩盤への掘削自体は掘削時に坑内を循環させる泥水を十分冷却し、さらに、使用資機材や工程を緻密に事前検討することにより実現可能であると判断しているが、何らかのトラブルが発生した場合の選択肢がきわめて限られてくる。また、坑井の崩落を防ぐためのケーシング管固定用のセメントについてみると、既存品の使用上限温度が350℃程度であるために、500℃環境下で30年程度性能を保持可能なセメント材が必要となる。このため、現在、金属セメントを中心とした新素材の開発を行っている。

超臨界地熱システム内では水が亜臨界から超臨界へ相変化するのみならず、岩石の変形が弾性変形か

ら塑性変形へ推移する。さらに岩石の破壊もぜい性破壊から延性破壊へ変化する。開発の各ステージにおいて岩体内や井戸の中の状態はこれらの領域をまたいで刻々と変化するという計算結果が得られているため、生じ得る現象について単一の線形方程式を解くことにより予測することは困難である。このためには熱・水・力学・化学連成（THMC）シミュレーション技術を構築することが必要である。ここでは温度・圧力条件に応じて複数の非線形方程式の解を安定に見出す方法や物性値データベースの構築などが重要な研究開発課題となっている。

これらに加え、超臨界地熱システムの探査・資源量評価技術、超臨界地熱システム内の透水性が低い場合の透水性改善技術、坑内の特定の区間から生産や注水を可能にする区間加圧技術、超臨界地熱システムキャラクターゼーション・モニタリングのための各種計測技術、環境影響評価・モニタリング技術の開発などが商用化へ向けた重要課題としてリストアップされている。

5. 今後の展望

超臨界地熱発電技術研究開発に参画している研究者らは、2040年代半ばの商用発電の実現を目指しているが、そのなかでもっとも重要となるのが試掘井の掘削である。われわれは国内最有望地点数か所で試掘を行い、超臨界地熱システムの存在を実証するとともに、超臨界地熱システムから商用発電に資するエネルギーを採取可能であることを示すのが第一目標であると認識している。これに加え、既存および新資機材、技術の適用可能性を評価し、商用発電の実現へ向けた技術開発ロードマップを策定することも重要である。さらに、試掘井を通じて取得したデータを用いて、調査段階で導入したAI資源量評価システムや探査技術の性能評価も実施する計画である。

これら一連の試掘・試験などを2020年代末までに終了し、成果を総合評価した上で、商用化の可能性を最終的に判断し、その後の研究開発に結び付けたいと考えている。

6. おわりに

超臨界地熱発電は、我が国の低炭素化、エネルギーセキュリティの確保、関連産業の育成などの視点から非常に魅力的な技術である。しかし、本論で述べてきたように、実現までには相当の壁を乗り越えなければいけない。われわれは全体を俯瞰しながら緻密に研究計画を練り上げ、商用発電の実現というゴールへ到達したいと考えている。また、同時に、このチャレンジングな課題を実施する上で、アイス

ランドやニュージーランドといった国々と連携し、科学的知見の共通などを通じて、迅速な目標達成を図りたいと考えている。

謝辞

本稿で紹介した成果の一部はNEDO「超臨界地熱発電技術研究開発」の一環として得られたものであることを記し、関係各位に謝意を表する。また、同研究開発に参画している皆様日頃の御尽力によりプロジェクトが円滑に遂行され、着実に目標を達成していることも記し、参画者の皆様への謝意を表したい。

参考文献

- 1) NEDO, TSC Foresight「地熱発電分野の技術戦略策定に向けて」(2016)
- 2) 村岡, 浅沼, 伊藤, 延性帯地熱系の把握と涵養地熱系発電利用への展望, 地学雑誌, p. 343-362 (2012)
- 3) Saishu, H., Okamoto, A., The significance of silica precipitation on the formation of the permeable-impermeable boundary within Earth's crust, Terra Nova, <https://doi.org/10.1111/ter.120> (2014)
- 4) Ogawa, Y., Ichiki, M., Kanda, W., Mishina, M., and Asamori, K., Three-dimensional magnetotelluric imaging of crustal fluids and seismicity around Naruko volcano, NE Japan, Earth Planets Space, 66:158 (2014)
- 5) Asanuma, H., Mogi, T., Tsuchiya, N., Watanabe, N., Naganawa, S., Ogawa, Y., Fujimitsu, Y., Kajiwar, T., Osato, K., Shimada, K. Horimoto, S., Sato, T., Ito, T., Yamada, S., Watanabe, K., Gotoh, Y., Nagasawa, Y. and Kohyama, A., Status report on the Japanese Supercritical Geothermal Project for FY2017. Geothermal Resources Council Transactions, 42, 23402344 (2018)
- 6) Armannsson, H., Fridriksson, T., Gudfinnsson, G.H., Olafsson, M. Oskarsson, F. and Thorbjornsson D., IDDP-The chemistry of the IDDP-01 well fluids in relation to the chemistry of the Krafla geothermal system. Geothermics, 49, p. 66-75 (2014)
- 7) https://gbank.gsj.jp/volcano/Quat_Vol/index.html
- 8) <https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo6-2.pdf>
- 9) Ikeuchi, K., Doi, N., Sakagawa, Y., Kamenosono, H. and Uchida, T., High-temperature measurements in well WD-1A and the thermal structure of Kakkonda geothermal system, Japan. Geothermics, 27, p.591-607 (1998) [http://doi.org/10.1016/S0375-6505\(98\)00035-2](http://doi.org/10.1016/S0375-6505(98)00035-2).

(原稿受付：2020年12月7日)

会議報告

FPMC2020におけるフルードパワー関連技術の研究動向

著者紹介



いとう かず ひさ
伊藤 和 寿

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

新型コロナウイルス肺炎が世界中で感染拡大を続ける中、Bath大学とアメリカ機械学会との共同開催となるBath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control FPMC2020が、9月9日から11日に渡り初のオンライン形式で開催された。発表者は15分間に収まる長さの動画を作成し、指定サイトに学会の10日前までにアップロードすることが事前に要請された。参加者はそれを公開期間中にオンデマンドで視聴し、学会開催期間中はMicrosoft Teams上で質疑を行うセッションのみが行われた。セッションは30分間で1日当たり3つが組まれ、プログラム上はセッション間の休み時間は30分間取られていたが、Chairからの質問も含め実際はこの休み時間のほとんどは質疑の延長時間にあてられた。これは一論文当たり10数分の質問時間を設けたことに対応しており、オンライン開催となってもこの学会の特徴的なところは踏襲されていた。この学会を創設され、今年4月20日に逝去された故Cliff Barrows名誉教授も天国から納得されているものと思う。ただし、オンライン開催は複数のタイムゾーンに跨っており、毎日のセッションが始まるイギリス標準時間の14時は北米中部標準時では8時、日本時間では22時にあたる。今後オンライン開催の国際学会は一般化する可能性があると考えられるが、実に14時間の時差にどう対処するかは、来年函館の国際シンポジウムの準備を考える上

でも大変参考になった。

2. 研究動向の分析

今回の学会では56件の論文が採択となっていた¹⁾。図1および図2にその内訳を示す。

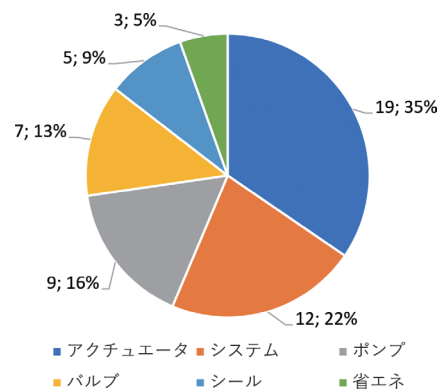


図1 分野別論文数

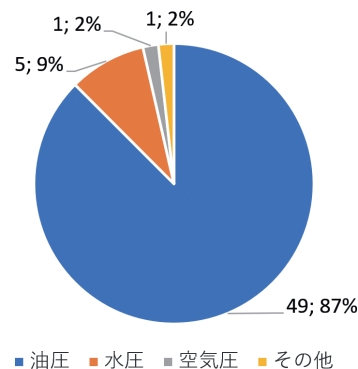


図2 作動流体別論文数

研究分野としては、新しいハードウェアおよび制御手法の研究も含むアクチュエータについての論文がもっとも多く、次いでシステム解析手法、ポンプ、バルブの順となっている。一方で作動流体としては、ヨーロッパ開催の学会ということを背景に90%近くが油圧に関する研究内容であるが、個人的には水圧関連の論文、しかも人工筋の解析および制御に関するものが5件含まれていたのは参考になった。また、新たな研究の流れとして、Bath大学の研究グループから油圧駆動によるリハビリテーションシステム

の開発に関する報告²⁾が行われたことは注目に値する。具体的には脳性麻痺児童の足首のアシストを対象とし、片足あたり1.5kg程度に抑えて設計された油圧シリンダによる外骨格型装具を装着して歩行する様子が公開された。トルクはサーボ弁により制御され、足首角度の軌道が健常者のものとほぼ一致するような結果が得られている。なお、パワーソースはユニットとして別置きになっており、介助者が押して被験者の後ろから帯同する形式となっている。

以下では、私が参加したセッションの代表的な論文の成果を簡単に報告する。

Haghら³⁾は、慣性負荷が水平に接続された単純な油圧サーボシリンダの位置制御系に対して新たなスライディングモード制御系の構成法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認している。提案手法では積分型の終端値型滑り面を導入することにより、従来この制御系が持っていた入力特異点問題を回避し、有限時間整定性と安定性を保証するものである。さらに、得られた入力をニューラルネットワークで学習することで入力の不連続性によるチャタリングの問題も解決しており、今後の実験による有効性の確認が待たれる。

Liら⁴⁾は、一般的なシリンダ制御系において4つの比例弁を組合せてサーボ系を構成した際、不感帯などの非線形な流量特性を4次の多項式で近似して適応制御を行う設計法を提案している。多項式係数が入出力間の全単射が保たれる範囲内で同定することが重要な点で、実験結果より良好な流量特性の再現が行われていることが確認できる。実際の適応系の設計にはBackstepping手法を用い、適応則にはパラメータ制約付き射影法を採用して安定性の確保を行うと同時に構造的および非構造的な不確かさに対するロバスト化も行っている。実験結果では、振幅800mmの台形型目標値に対して最大誤差が1mm以内に抑えられていることが確認できる。

Chen⁵⁾らは、一本の柔軟軸の中に3本の水圧駆動人工筋を通してそれぞれを独立に収縮させることで自由に先端角度を制御できる小型柔軟マニピュレータと、それを支える大型の柔軟マニピュレータとを組合せた水中用アクチュエータを開発し、その制御成果を検証した。双眼カメラからの画像・深度情報と変位センサの情報を多重フィードバックすることで操作性を向上させている。実験では、与えられたタスクに対してどちらのマニピュレータを制御するかを学習アルゴリズムが適切に判断できていることを検証している。

Ito⁶⁾らは、水道水圧駆動されたマッキベン型人工筋をヒステリシス特性も含めて表現するために

Bouc-Wenモデルでモデル化し、それに対して適応モデル予測制御系を構成する設計手法を提案した。従来法では評価関数重みの決定が試行錯誤的になることが問題となっていたが、逆最適化および適応モデルマッチングを組合せることでこれを解決している。シミュレーションでは振幅35mmの正弦波目標値に対して3mm程度の過渡的な誤差が見られるが、定常応答では非常に良好な制御性能が得られることが示された。今後は実験による性能評価が待たれる。

3. むすびに

Bath大学はこの学会を1988年から独自に開催しており、今回で33回目を数えるが、オンラインという形式に変更しながらも学会を中止しなかったNigel Johnston教授をはじめとするオーガナイザの方々のご苦勞は大変なものであったろうと推察する。また、音声の不具合や特に中国からの著者は数件がセッションに現れないなど、回線状態を不安視する状況も見受けられたことも付しておく。

なお、学会2日目の冒頭にはアメリカ機械学会より横田眞一東京工業大学名誉教授へのRobert E. Koskiメダル の授与式が行われた。日本人として初の受賞であり、非常に名誉ある賞を受賞されたことをお慶び申し上げます。手続きにご尽力された眞田会長ならびに川嶋表彰委員長にも感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Bath/FPMC Conference Programme 2020, Bath University (2020)
- 2) Durfee, W., Neubauer, B., Nath, J., Hashemi, S., Ries, A., Hydraulic Ankle Foot Orthosis Emulator for Children With Cerebral Palsy, FPMC2020-2791, Bath/FPMC Conference Programme 2020 (2020)
- 3) Hagh, Y. S., Asl, A. M., Handroos, H., Adaptive Integral Non-Singular Terminal Sliding Mode Control of a Servo-Hydraulic System, FPMC2020-2807, Bath/FPMC Conference Programme 2020 (2020)
- 4) Li, C., Chen, Z., Yao, B., Lyu, L., Helian, B., Motion Control of an Independent Metering System with Polynomial Approximations for Valve Flow Nonlinearity, FPMC2020-2714, Bath/FPMC Conference Programme 2020 (2020)
- 5) Yang C., Xu H., Li X., Wng. H., Yu F., Underwater Flexible Manipulator Double-loop Feedback Control Based on Built-in Binocular Vision and Displacement Sensor, FPMC2020-2730, Bath/FPMC Conference Programme 2020 (2020)
- 6) Ito K., Inada R., Model Predictive Displacement Control Tuning of Tap Water Driven Muscle with Adaptive Model Matching: Numerical Study, FPMC2020-2791, Bath/FPMC Conference Programme 2020 (2020)

(原稿受付：2020年11月21日)

会議報告

日本機械学会2020年度年次大会における フルードパワー技術研究

著者紹介



よし だ かず ひろ
吉田和弘

東京工業大学科学技術創成研究院未来産業技術研究所
〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259-R2-42
E-mail: yoshida@pi.titech.ac.jp

1989年東京工業大学大学院博士課程修了，同大学助手，助教授（准教授）を経て2015年4月教授。2008年10月～2009年3月米国UCSB客員研究員，2015年7月～9月米国MIT客員研究員。流体マイクロマシン，機能性流体の研究に従事。JFPS，JSME，IEEEなどの会員，工学博士。

1. ま え が き

2020年は世界的な新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受けて，多くの国内会議，国際会議が対面形式で開催することができず，オンライン開催となった。日本機械学会年次大会も同様で，大規模な講演会であるにもかかわらず，YouTubeとZoomを併用したオンライン開催となった。

日本機械学会2020年度年次大会は，9月13日～16日に，名古屋大学を中心とした実行委員会により，「Society5.0を支えるイノベーション」，「人・生物・機械の持続的調和社会の実現」，「超少子高齢社会を豊かにする次世代技術」を大会テーマとして開催された。講演会は合計26個のZoom講演室で開催された。講演者はZoom講演室に入室し，発表および質疑応答を行い，一般の聴講者はYouTubeでほぼリアルタイムで講演を聴講し，質問があればZoom講演室に入室して質問するという形式であった。

フルードパワー技術関連では，空気圧関連4件，機能性流体関連3件，マイクロデバイス関連5件，合計12件の発表があった。以下では，各発表について概観する。

2. 研究発表の概要

2.1 空気圧関連

空気圧関連では，アクチュエータ2件，応用2件，計4件の発表があった。

作間らは，空気圧人工筋肉に用いる形状記憶ポリマー繊維の製作方法を開発している¹⁾。形状記憶ポリマーは温度により形状固定性と形状回復性を有する高分子材料で，これを綿繊維に浸透させる製作方

法を提案，開発している。この繊維を用いたMcKibben型および軸方向繊維強化型の人工筋肉を試作し，初期形状を変更することで異なる動作を実現できることを実験的に確認している。

高橋および丸山は，ロケットエンジンのノズルに2次噴流を注入し主流を偏向させる流体式推力方向制御装置について，特性をシミュレーションにより解析している²⁾。デュアルスロートノズル内の流れをモンテカルロ直接シミュレーション法により解析し，2次噴流により推力偏向を制御できるノズル形状を求めるとともに，2次噴流の注入率変化に対しヒステリシスが見られないことを確認している。

田村らは，重量物を持ち上げる作業者を支援する，空気圧人工筋肉を用いた姿勢維持装置を開発している³⁾。開発した装置は，収縮用人工筋肉を背中側の肩から大腿部に固定し，人工筋肉の収縮により作業のため前方に傾いた上体を引き起こす構造である。試作装置について発生トルクおよび腰を押し出す補助荷重を計測，評価し，人体に過負荷にならない程度の支援ができることを確認している。

土井らは，耐環境性に優れ，軽量で柔軟性の高い伸長型の空気圧ゴム人工筋肉を用いた軽量の義手を開発している⁴⁾。設計，試作した義手の大きさは111×153×104mm³であり，質量は136gと軽量である。試作した義手を用い，さまざまな形状および材料の12種類の物体を空中，水中で把持，操作する実験を行い，その動作を確認するとともに，操作の可否を評価し，試作した義手の有用性を確認している。

2.2 機能性流体関連

機能性流体関連では，基礎1件，ポンプ1件，応用1件，計3件の発表があった。

田澤および山口は，ダンパなどの急縮小，急拡大部を流れる磁気粘弾性流体の流動特性について数値解析を行っている⁵⁾。磁気粘弾性流体とは，磁性流体と粘弾性流体を混合したもので，数学モデルを構築し，急収縮，急拡大部を中心に磁場を印加した場合について解析した結果，急収縮，急拡大部の圧力分布に振動挙動が見られることなどを明らかにしている。

小藪らは，EHD（電気流体力学）現象を用いた機械的可動部のない円管型電極対ポンプの特性解明のため，クーロン力を考慮したFEM（有限要素法）シミュレーションを行っている⁶⁾。対象のポンプは，

内径4mmの円筒型電極2個を間隔1mmで対向させたもので、フッ素系溶剤を作動流体としている。シミュレーションを行い、電圧分布および流速分布を解明し、渦をとまなう一方方向の流れを確認している。

鈴木らは、電界印加により流れが生じる電界共役流体（ECF）によるジャミング転移現象を用いたマイクログリッパを提案、開発している⁷⁾。提案するグリッパは、柔軟な膜内に粉体を封入した先端部を有し、ECFの運動により減圧させて形状を維持しつつ固体化するジャミング転移を発生させ、物体を把持する。直径13mm、長さ26mmの試作グリッパにより物体把持ができることを確認している。

2.3 マイクロデバイス関連

マイクロデバイス関連では、バルブ1件、ポンプ2件、センサ2件、計5件の発表があった。

三輪らは、マイクロリアクタなどのマイクロバルブとして、磁性ナノ粒子を分散した熱感応性ゲルを弁体とし、交流磁場印加時の発熱によるゲルの膨張により弁閉鎖を行う交流磁場応答マイクロバルブを提案している⁸⁾。高さ40 μ m、幅1mmの流路のバルブを試作し、水を作動流体としたとき、周波数2MHzの交流磁場印加でバルブが閉状態から開状態に変化することを実験的に確認している。

牧田らは、交流電圧印加で水の流れが生じる交流電気浸透を用いたマイクロポンプの高出力化を図るため、新しい数学モデルとそれによるポンプ最適設計について検討している⁹⁾。電気二重層の形成時間と非線形静電容量を考慮した新しい数学モデルを構築し、実験との比較によりその妥当性を確認するとともに、ポンプ最適設計を行い、シミュレーションにより高出力化の可能性を示している。

清水および上辻は、新ムーニー型圧電アクチュエータを用いたバルブレスポンプ・ミキサについて、圧電・流体連成解析を行っている¹⁰⁾。新ムーニー型圧電アクチュエータは圧電バイモルフに金属キャップを設置し大きな変位を得るもので、バルブレスポンプ・ミキサにはY字流路を用いている。解析の結果、従来の圧電バイモルフを用いた場合と比べ約19倍の送液量が得られることなどを確認している。

吉田らは、超小型フローベクトルセンサの高風速域の飽和特性を解明するため、3次元流体・固体連成伝熱解析を行っている¹¹⁾。対象のセンサは2 $\times$ 2 $\times$ 0.4mmサイズの基板中央にマイクロヒータを、その周囲に8個のサーモパイルを配置した構造で、それらの計測温度から風速および風向を計測するものである。3次元数学モデルを構築し、シミュレーションを行い、その特性を明らかにしている。

笠井らは、熱式MEMSフローセンサの多結晶シリコン製マイクロヒータの熱負荷試験を行っている¹²⁾。マイクロヒータに連続通電または間欠通電を

行い自己発熱させ、その温度をヒータの抵抗値から求めることで、恒温槽による加熱に比べ加速した試験を行っている。試験の結果、連続通電で寿命が10年以上であること、間欠通電でも同等の寿命であることなどを明らかにしている。

3. あとがき

日本機械学会2020年度年次大会におけるフルードパワー技術関連の研究発表について概観した。オンライン開催は会場に移動することなく参加できるなどの利点もあるが、著者は対面でのディスカッションが望ましいと考えている。2021年度の講演会は9月上旬に開催されると思われるが、その頃には新型コロナウイルス感染症の影響が収まっていることを切に願っている。

参考文献

- 1) 作間祐仁, 脇元修一, 松下航也, 神田岳文: 人工筋肉への適用を目的とした形状記憶ポリマー繊維の製作と評価, 機学2020年度年次大会講論集 (Web), J11117, (2020)
- 2) 高橋遥一朗, 丸山祐一: 流体式推力方向制御装置の性能解析 (ヒステリシス現象の確認), 同上, J19115, (2020)
- 3) 田村脩, 山田祐士, 野村高広, 則次俊郎: 空気圧人工筋肉を用いた姿勢維持装置の開発, 同上, J16316, (2020)
- 4) 土井拓斗, 山田祐士, 野村高広, 則次俊郎: 空気圧人工筋肉を用いた義手の開発, 同上, J16318, (2020)
- 5) 田澤拓也, 山口博司: 急縮小・急拡大部を流動する磁気粘弾性流体と磁場との関係, 同上, S05305, (2020)
- 6) 小藪栄太郎, 築地徹浩, 加賀谷浩太, 見藤歩, 蘇武栄治: EHD現象を利用した円管内流れの数値シミュレーション, 同上, S05433, (2020)
- 7) 鈴木竜太, 田中豊, 枝村一弥, 横田真一: 電界共役流体を用いたマイクログリッパの設計と試作, 同上, J11113, (2020)
- 8) 三輪大貴, 櫻井淳平, 秦誠一, 岡智絵美: 磁性ナノ粒子の発熱を利用した新規マイクロバルブの作製, 同上, J22204, (2020)
- 9) 牧田耀, 吉田和弘, 嚴祥仁, 金俊完: 交流電気浸透マイクロポンプの高出力化に関する研究, 同上, J11101, (2020)
- 10) 清水啓貴, 上辻靖智: 圧電バルブレスポンプ・ミキサに関するマルチフィジックス連成解析, 同上, J11116, (2020)
- 11) 吉田薫平, 木綿隆弘, 小松信義, 木村繁男, 金岡佳充: 超小型フローベクトルセンサの3次元伝熱シミュレーション: 高風速域のセンサ出力特性, 同上, J05230, (2020)
- 12) 笠井隆, 桃谷幸志, 中野優, 中尾秀之: 熱式MEMSフローセンサに用いられるマイクロヒータの信頼性の検討, 同上, J22314, (2020)

(原稿受付: 2020年12月28日)

会議報告

IFK2020におけるフルードパワー関連技術の研究動向

著者紹介



しみず じゅり
清水 自由理

株式会社日立製作所
〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口832-2
E-mail: juri.shimizu.fx@hitachi.com

2009年早稲田大学大学院創造理工学研究科博士前期課程修了。同年日立製作所入社。2020年早稲田大学大学院先進理工学研究科博士後期課程修了。油圧システムの研究・開発に従事。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）



図1 オンラインプラットフォーム

1. はじめに

2020年10月12日～14日にかけて第12回フルードパワー国際会議（IFK2020）がオンラインで開催された。本会議は、当初同年3月9日～11日にドイツのドレスデンで開催予定だったが、世界的なCOVID-19の流行によりドイツ国内でのイベントの開催が困難となり延期となっていた。当初オンサイトでの開催が予定されていたが、COVID-19の収束の兆しが見えないことから、完全オンラインでの開催となった。

この会議はAFK（Aachener Fluidtechnisches Kolloquium）として1974年に初めて開催されてから続く、欧州ではもっとも伝統のあるフルードパワーシステムに関する国際会議の1つである。今回は、IFKの長い歴史において初のオンラインでの開催であり、ここでは、オンライン開催での模様や、研究動向について報告する。

2. オンライン開催の概要

今回の開催では、IFK2020専用のオンラインプラットフォームが使用された（図1）。オンラインプラットフォームは、プレゼンテーションの聴講のみならず、参加者が個別でチャットできる機能を備えており、オンサイトで行われるようなロビートークも実施可能であった。さらに、スマートフォン専用アプリも提供され、開催中のスケジュールの確認や、各自で聴講スケジュールを組み立てられるようになっていた。

プレゼンテーションは、オンラインプラットフォームに設けられた各セッションのページで実施された。基本的には、リアルタイムでプレゼンテ-

ションが実施されたが、発表者側のネットワークトラブルが発生した場合は、あらかじめ提出されていたバックアップのビデオプレゼンテーションが流された。発表者に合意を得た内容については、会議終了後にアーカイブが公開された。並行したセッションで聴講できなかった場合や、聴講者のネットワークトラブルがあった場合でも、後から聴講できるのは大変親切な仕組みであると感じた。各プレゼンテーションの最後には質疑応答の時間が設けられ、聴講者は質問専用チャットに直接投稿し、座長または発表者がそれを読み上げ、回答していた。各発表のリアルタイムの聴講者は100～200名程度であり、質疑も活発に行われていた。また、発表後に30分程度、追加で質疑応答する時間が設けられた。セッション中に議論しきれなかった質疑は、そちらで議論された。特に注目度の高い発表については、追加の質疑も盛り上がっていた。

3. 研究論文発表の動向

本会議では、発表者の51%がAcademic分野から、49%が企業からの参加であった。また、発表者の出身は、多い順からドイツ（62%）、欧州（20%）アメリカ（12%）、アジア（6%）であり、日本から発表は1件のみであった。

本会議では、21のトピックが扱われ、全27セッションが設けられた（表1）。発表件数は108件であり、12件の講義と13件のポスター発表があった。特にMobile applicationsのセッションの発表件数が多く、小型建設機械の電動化に関する研究¹⁾や、環境負荷低減技術として燃費低減のみならず温室効果ガス低減に注目する研究²⁾が目立った。

加えて、さまざまな分野で応用されている機械学

表1 講演論文の分野別件数

Session Topics	Session Number	Paper Number
Material	1	3
System design & integration	1	3
Novel system solution	1	3
Additive manufacturing	1	4
Components	2	8
Intelligent control	1	4
Fluids	1	4
Pumps	1	4
Mobile applications	4	17
Fundamentals	1	3
Pumps	1	4
Digital system	1	6
Novel displacement machines	1	4
Industrial applications	1	4
Predictive maintenance	1	4
Electro-hydraulic actuators	1	4
Pneumatics	1	5
Special domains	1	4
Novel system architectures	1	5
Actuators & sensors	2	7
Safety & reliability	1	3
Poster	1	13

習を活用した研究として、比例弁の通過流量を予測するANNモデル³⁾や、作業腕でつかんだ丸太の重量を予測する研究⁴⁾など7件が紹介されていた。

また、プラットフォーム内に14の企業展示ブースが設けられ、製品紹介ビデオや、技術者とのディスカッションができるチャットページが用意されていた。個別で参加者がコンタクトを取っていた可能性はあるが、オープンチャットをみる限りではそれほど盛り上がってはいなかった印象であった。特に機器メーカーの新製品紹介では、現物が確認できなかったため物足りなさを感じた。

ベストペーパーの授賞式もオンラインで実施された(図2)。本年度のベストペーパーは、Matteo Pellegrini氏の“Applying a multi-service Digital Displacement® pump to an excavator to reduce valve loss”⁵⁾が受賞した。本論文では、油圧システムの省エネ化を実現可能なDigital Displacement®



図2 Best paper授賞式の様子(左上:Jürgen Weber教授, 左下:Matteo Pellegrini氏, 右:Andrew Plummer教授)

pumpを開発し、ショベルに実装した結果、従来システムより30%以上の燃費低減効果を実現したことが紹介された。本論文は、その革新的な油圧ポンプのコンセプト、およびそれをショベルに実装し効果検証した点が高く評価され、今回の受賞に至った。

4. おわりに

本稿では第12回IFK2020の概要について報告した。オンライン開催ということで、盛り上がりには欠けるかと懸念していたが、発表時の質疑応答も活発であり、運営側の事前準備が入念であったため本番中に大きなトラブルもなく、盛況に終わった印象である。セッションが並行して聴講できなかった発表をアーカイブで後から聴講できたことや、海外から気軽に参加できるという点では、オンライン開催の利点は享受できた。一方で、研究者同士の直接交流ができなかった点は物足りなさを感じた。開催委員会は、今後はオンサイトとオンラインの並行開催も選択肢として考えているようである。なお次回のこの会議は2022年の3月にアーヘンで開催予定である。

参考文献

- 1) A. Opgenoorth, S. Quabeck, R. Doncker, K. Schmitz : Challenges and possibilities of the integration of electric drives in mobile machinery, 12th IFK Conference Proceedings Vol. 1, pp. 471-480 (2020)
- 2) S. Tikkanen, M. Heikkilä, M. Linjama, K. Huhtala : Emission reduction by hydraulic hybrids, 12th IFK Conference Proceedings Vol. 3, pp. 93-102 (2020)
- 3) A. Sitte, O. Koch, J. Liu, R. Tautenhahn, J. Weber : Multidimensional flow mapping in proportional seat valves, 12th IFK Conference Proceedings Vol. 1, pp. 231-240 (2020)
- 4) C. Geiger, N. Maier, F. Kalinke, M. Geimer : Assistance system for an automated log-quality and assortment estimation based on data-driven approaches using hydraulic signals of forestry machines, 12th IFK Conference Proceedings Vol. 3, pp. 83-68 (2020)
- 5) M. Pellegrini, M. Green, J. Macpherson, C. McKay, N. Caldwell : Applying a multi-service Digital Displacement® pump to an excavator to reduce valve loss, 12th IFK Conference Proceedings Vol. 2, pp. 59-68 (2020)

(原稿受付:2020年12月9日)

What do you think of Japan? (Youは日本をどう思う?)

第16回 ベトナムから日本に留学して





著者紹介

ダ オ ミ ン フ ォ ン
Dao Minh Phuong

株式会社 ジェイテクト
田戸岬工場 駆動テクニカルセンター
駆動事業本部 駆動システム開発部 CAE開発G
〒444-1323 愛知県高浜市田戸町1丁目5番地3
E-mail : minhphuong_dao@jtek.co.jp

1. はじめに

○自己紹介

私はベトナム ハイズオン省で生まれ育った。

高校を卒業後、母国で1年間日本語を勉強し初めた後、日本に留学しに来た(写真1)。来日してから、10年以上経過しており、現在愛知県に在住している。

愛知県には8年以上住んでいるため、自分の第2の故郷のようである。

○来日の理由

親戚が以前日本に留学しに来たため、帰国の度に私に日本のことをよく話してくれていた。私はそれから日本のことを好きになった。

一方、中学校の頃から私が車に興味を持ち、車の雑誌などをよく集めていた。将来、車に関する仕事をしたいという夢をあ頃から持っていた。

高校の時、自分の夢と親戚のアドバイスから考え、日本の先進技術を勉強して、日本および世界の自動車産業に貢献したいという希望で日本に留学しに来た。

○現在の所属機関とその研究/仕事内容

現在、私は株式会社ジェイテクト駆動システム開発部CAE開発グループで勤めており、担当業務は流体解析である。駆動製品を用いて、シミュレーションで実際の流体の流れを再現し、事前に製品に関する問題を評価・予測する仕事である。

かなりハードルが高い仕事をしていると感じるが、解析精度向上および製品開発の工数・費用短縮への



写真1 日本に留学しに来る直前(右が筆者)
(ベトナム・ホーチミン市)

貢献を心掛けている。

2. 日本の印象

2.1 来日直後の第一印象

○来日直後の日本の第一印象は?

日本に来たばかりの頃は、左側通行のことに驚いた。母国では右側通行であるため、最初はなかなか慣れず、移動に困難であった。

2.2 研究室 / 職場に関して

○日本人の考え方や働き方で驚いたこと

日本に来たばかりの頃、「日本人の謝る文化」に対して驚いた。たとえば、スーパーで二人が軽くぶつかったら、二人ともすぐに「すみませんでした」と言い出す。母国では、同じケースであれば、軽くぶつかる時、謝る必要がない、もしくは謝るのは悪かった側だけである。

長い間、日本で生活をするうちに、それはコミュニケーションのひとつではなく、自分のミスあるいは失敗から逃げずに、認めて克服することであるとよくわかるようになってきた。

○日本に滞在中に自分が最も変わった点は?

日本に滞在中、「感謝」と「謝罪」のことをよく理解できるようになっていたため、自分の考えもよ

く変わってきた。

来日してから今まで、多くの支えがあった私は感謝の心、感謝の気持ちで人と接触するようになって、ボランティア活動、ベトナム留学生会などに積極的に参加してきた（写真2）。



写真2 名古屋シティハンディマラソン大会のボランティア活動
（2列目左が筆者）

2.3 生活に関して

○日本の生活で困ったことは？

私費留学生として日本に来て、日本語学校（2年）、大学（4年）、大学院（2年）で勉強していた。各学校の学費一部は親から送金してもらったが、生活費は自分で支払っていた。アルバイトをしながら学校を通っていたため、経済的、時間的に余裕がなかった。

そして、外国で一人暮らしをしている私は病気、ホームシック、ストレス、疲れなどの時もあったが、誰にも頼れず、自分自身で解決しないといけなかった。

しかし、苦しかった時期のおかげで、自分がより成長でき、体も、心もより強くなってきたと感じる。

○日本の生活でよかったことは？

私には日本は安全・安心・便利・清潔だと思い、日本の教育、医療、交通、環境…には総合的に満足している。

特に、日本では留学生を支援するさまざまな機構もある。私は今まで奨学金給付、就職活動サポート、異文化交流などのさまざまのご支援をいただいていた。

一方、県内、大学内でも同じ国の人（先輩、友達、後輩）も居るため、お互いに助け合うことができ、そして、皆が集まって母国の伝統的な文化などを一緒に過ごすことができた（写真3）。

○最も興味ある日本の文化

私は日本文化の中、もっとも興味を持っているのは日本古来の風習の花見である。

来日して、初花見をしたときの思い出であるが、日本語学校のクラスメイトと一緒に桜を見に行き、全員外国人の私たち全員が感動しすぎて言葉が出なかった。



写真3 同じ国の親友で旧正月を過ごした
（2列目右から6番目が筆者）

毎年愛知県の鶴舞公園で花見をしている。満開の桜の下で春の嬉しさを感じながら家族や友人と食事やお酒を楽しむのが最高だと感じる（写真4）。



写真4 日本語学校のクラスメイトとの初花見（佐賀市）
（1列目左から2番目が筆者）

3. 抱負と日本の方々へのメッセージ

○今後はどんな予定？出身国に戻るのはいつ？

私は今後自動車部品、CAEに関する多くの専門知識を身に付け、CAEスキル、言語スキルなどをアップさせ、弊社および自動車産業にもっと貢献していきたいと思う。

将来、母国に帰国する計画はあるが、現在、詳細に計画をまだ立てていない状況である。

○日本人へのメッセージ

私は来日して今まで、多くの日本人の方々に支援していただき、心から感謝している。

今後も、日本の会社で勤め続け、基本的に日本人の方々と一緒に仕事をするため、仕事の面、生活の面もお互いに助け合うことができたらと思う。

一方、まだしばらく日本に在住するため、日本の社会、日本のものづくりに貢献し続けたいと思う。

（原稿受付：2020年12月17日）

研究室紹介

津山工業高等専門学校 趙研究室 (介護・福祉ロボットシステム研究室)

著者紹介



ちょう ふえい ふえい
趙 菲菲

津山工業高等専門学校
総合理工学機械システム系
〒708-8509 岡山県津山市沼624-1
E-mail: cho@tsuyama-ct.ac.jp

2011年岡山理科大学大学院博士課程後修了、津山工業高等専門学校助教を経て、2018年同学准教授、現在に至る。メカトロニクス、組み込み制御など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）。



か とう けい せい
加 藤 圭 晟

津山工業高等専門学校
機械・制御システム工学専攻
〒708-8509 岡山県津山市沼624-1
E-mail: s-kkb726@tsuyama.kosen-ac.jp

2020年津山工業高等専門学校電子制御工学科卒業、同年同学機械・制御システム工学専攻入学。現在、専攻科1年生。研究室では、寝たきり高齢者の移乗におけるローラ式自動空気圧移乗シーツの新規支援システムに関する研究に従事。

1. はじめに

津山工業高等専門学校は国立高等専門学校機構、51の国立高専のひとつであり、1963年に創設された。中学校卒業者を対象とした5年間（専攻科の場合は7年間）の一貫教育において、実験や実習を非常に重視した教育カリキュラムを特色としており、一般教養と専門科目をバランスよく効率的に学ぶことができる教育機関である。2016年に既存の専門分野である機械、電気電子、電子制御、情報工学科を統合し、生物・化学を含む基礎科学分野を追加し、ひとつの融合した総合理工学科に改組した。学生は1年次の融合学年を経て、2年次に先進科学系、機械システム系、電気電子システム系、情報システム系に配属され、融合教育型授業を受け、異分野融合力とその基盤となる基礎科学をしっかりと学ぶことができる。

津山高専は現在、中国・四国地区高専の国際交流教育を推進する拠点校とし、日本人学生の海外派遣や海外学生の受入れ、海外の協定大学と連携した国際的な研修やグローバル教育などに取り組んでいる。

さらに、企業などと協力した産学官連携教育、課外活動を通じた教養教育、ロボコンを始めとするさまざまなコンテストへの参加、国内外の学会などでの研究発表などの活動より、未来の科学技術を担う実践的・創造的技術者としての資質を養うための取組を推進している。津山高専の技術者教育プログラムは、日本技術者教育認定機構の審査に合格しており、世界標準を満たしていることが認定されている。

2. 研究紹介

近年、世界では医療技術の進歩による平均寿命の延長と少子化の進行により、高齢化社会を迎えた。また、在宅身体障害者の人口割合は上昇している。このようなことから、高齢者および障害者介護に関する問題は深刻な社会問題となった。以上に対し、当研究室の主な研究内容は社会問題の改善を目指し、介護環境の整えや身体障害者の自立補助などを最終目標とし、介護・福祉ロボットシステムに関する研究開発を行っている。本研究室の主な研究テーマを以下のように紹介する。

2.1 介護者のための上半身支援システムの開発

高齢化社会の進行による要介護者の増加にともない介護者の需要が高まっている。また、介護者が高齢者や障害者を介護する際、要介護者を持ち上げたり運んだりすることで腰に大きな負担がかかり、腰痛を発症する問題が発生している。それらの問題により、高齢者や障害者の日常生活の支援・介護を行うロボットの開発が行われている。

しかし、これらの装置は外骨格などで構築されているため、安全性、人間親和性に課題が残っている。また、高価なものが多く、一般の家庭が購入できるような価格でないため、いまだに普及していない。装置の装着が面倒、装置自体が重すぎるといった実用性の不十分さも指摘されている。これらの問題から、本研究では外骨格などは使用せず、衣服のように軽くて簡単に着用でき、安全かつ使用しやすいパワーアシスト装置の開発を目指している。

設計・製作されたパワーアシスト装置の全体図を図1に示す。総重量は約2.0kgであり、人間工学を

もとに腰痛の発症を防ぐパワーアシスト装置を設計した。このパワーアシスト装置には2種類の空気圧柔軟アクチュエータを用い、伸長型空気圧柔軟アクチュエータと積層型アルミフィルムアクチュエータが組み込まれている。サポート動作のイメージとしては、図1のように腰を湾曲させた際に伸長型空気圧柔軟アクチュエータに空気圧を印加し、軸方向に伸ばす。また、空気圧を排気し収縮する際に発生する引張力を利用し、前傾した上体を持ち上げるという仕組みである。積層型アルミフィルムアクチュエータに空気圧を印加することでモーメントの増加を果たす。伸長型空気圧柔軟アクチュエータが短くなり、収縮するときに発生する引張力に加え、さらに発生力を生み出すことができる。制御方法はPID制御などで行って実験している。

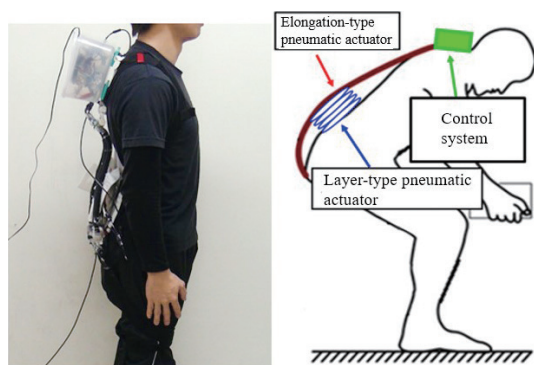


図1 上半身支援システムの全体図

2.2 視覚障害児用歩行訓練システムの開発

現在、日本では視覚障害者数に対して視能訓練士の数が非常に少ないため、1人当たりの負担が大きい。さらに、今後の視覚障害者数増加が予測されるため、さらなる負担増加が懸念される。加えて、先天性盲目の子供は単独歩行が困難であり、それをサポートするシステムが必要であるが、現場のニーズを満たす訓練支援装置がない。そのため本研究では、視覚障害児の歩行訓練における支援装置の開発を目標とする。本研究の目的は、視能訓練士の負担軽減、および視覚障害児が空間的問題の解決を体験できるようにするために歩行訓練におけるサポートシステムの開発である。図2に装置の全体を示す。

製作装置は歩行訓練における初期段階、および中期段階の使用を想定した腰部装着型の障害物検出装置である。設計は視覚障害児でも安全に使用可能なことや低コスト、扱いやすいことをコンセプトとして製作を行った。装置の性能を実際の現場で評価するために盲学校での実地テストを行った。図3に実地テストの環境、表1に実地テスト結果、表2に生徒や教員、保護者のヒヤリング結果を示す。実地実

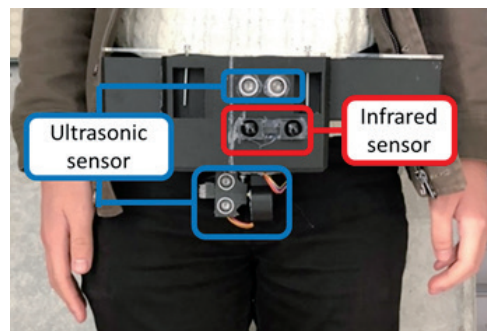


図2 歩行訓練システム全体図

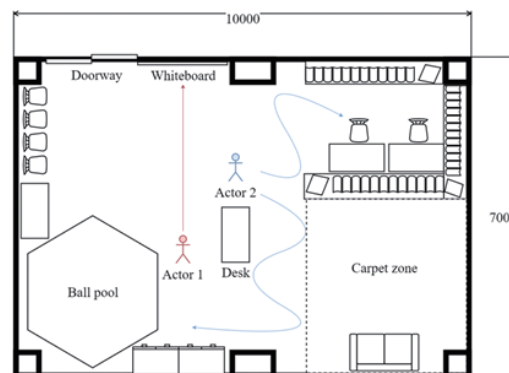


図3 実験環境

表1 実験結果

Target	Advance to the wall		Free action	
	Slow speed	Normal speed	Slow speed	Normal speed
Student A	success	success	success	failure
Student B	success	success	success	failure
Student C	success	success	success	success

表2 ヒヤリング結果

Target	Wear ability	Appearance	Weight	Size
Student A	×	—	○	—
Student B	×	—	○	—
Student C	○	—	○	—
Teacher	○	×	○	×
Parents	○	×	×	×

験では盲学校の生徒3名に協力していただき、壁への前進および自由行動をそれぞれ低速歩行と通常歩行の2種類の歩行速度で行った。

3. 学生から見た研究室

(機械・制御システム工学専攻1年 加藤 圭晟 君)

3.1 研究室の概要

当研究室は機械システム系に属しており、おもに柔軟アクチュエータや関節機構、各種センサーを用いた福祉・生活支援に関する技術開発研究を行っています。趙研究室はとてもアットホームな雰囲気

研究活動を行うことができ、疑問点や提案などがあれば気軽に趙先生や研究員のメンバーに相談することができます。また研究時間を指定されている日もありますが、基本的に自分が研究したいときに研究をすることができ、モチベーションが高い時に研究を進めることができとても効率的です。その分、自己管理能力も求められるので、趙研究室は技術者としても学生としても成長できる研究室です。図4は2020年度趙研究室のメンバーです。専攻科生4人、本科5年生3人、本科4年生3人、合計10人で、楽しく研究活動を行っています。



図4 趙研究室メンバー

3.2 先生について

趙先生は研究室メンバーのお母さんの存在であり、さまざまな研究活動のサポートのほかにも、就職・進学のアドバイスや、学生生活の相談などにも優しく応じてくださいます。そのため研究室の雰囲気も明るく、とてもアットホームです。

3.3 研究室に入った理由と現在の自分の研究

私が当研究室を選択した理由としては、高専入学時から福祉医療の分野を支えるロボットやシステムの開発を行う技術者になりたいと考えていたからです。近年、少子高齢化の深刻化が日本のみならずさまざまな先進国で問題となっています。これに対して介護現場では、専門的知識の必要な介護者の数が少なく、また、介護者が介護を行う中で腰痛を発症するなどの身体的負担による問題も多く発生しており、これらの問題を解決するためには、コンパクトで扱いやすい移乗装置が必要となると考えました。このことから、本研究では寝たきり高齢者のベッドからベッド、ベッドからフルリクライニング

車いすへの移乗におけるローラ式自動空気圧移乗シーツの新規支援システムを開発することを目的としています。また、この移乗装置はローラ部分を空気圧アクチュエータにすることで、空気圧の印加を時間的に制御することで、シーツと背中との接地面を変え、床ずれの防止も期待できます（図5）。移乗方法としては、空気圧アクチュエータに圧力を印加し、モーターでアクチュエータを回転させ要介護者をスライドさせて移乗します。以上のコンセプトをもとにイメージ図の設計を行いました（図6）。今後の研究の予定としましては、プロトタイプを製作し、動作確認・評価を行う予定です。

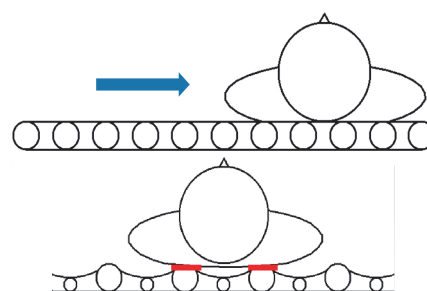


図5 移乗・床ずれ防止イメージ図

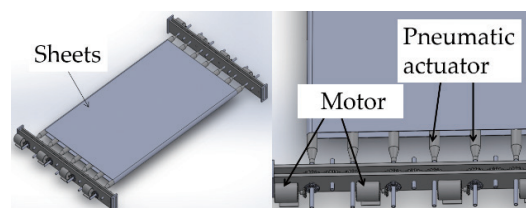


図6 装置の全体図

私は今後、より深く福祉医療機器の研究を行うため大学院に編入し、趙研究室で学んだ知識や技術をさらに深化させ、福祉医療の分野を支える技術者になるという目標を達成するために尽力したいと考えています。

4. おわりに

研究室紹介依頼をいただき、恐縮ながら執筆させていただくことで、日々を振り返ることができ、津山工業高等専門学校に着任して十年という充実した時間は長くも短くも感じた。高専専門教員として、実践的な工学教育における「ものづくり」の理論と技術を身につけるとともにグローバルな視点から多面的物事を理解し判断する能力を備えた工学人材を育成することを常に心掛け、学生の主体性を伸ばし、彼らが自発的に研究を進めることができるように今後も気を付けていきたい。

（原稿受付：2020年12月15日）

会 告

〈理事会・委員会日程〉

1月19日	理事会
1月12日	企画委員会
2月6日	編集委員会

〈理事会報告〉

2020年度第4回理事会

1月19日 15:00～17:00

Web開催（参加者20名）

- (1) 国際シンポジウム函館2020の開催準備状況
- (2) 学会創立50周年記念事業について
- (3) 2020年秋季講演会（岡山）の開催報告
- (4) 2020年度学会賞・フェロー推薦受付状況
- (5) 会員の推移
- (6) 各委員会からの報告
- (7) その他

〈委員会報告〉

2020年度第5回企画委員会

1月12日 15:00～17:00

Web開催（参加者24名）

- (1) 2020年度オータムセミナー開催報告
- (2) 2020年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告
- (3) 2020年度ウィンターセミナー準備状況
- (4) 2021年春季フルードパワーシステム講演会準備状況
- (5) 研究委員会の申請
- (6) その他

2020年度第5回編集委員会

2月9日 10:00～12:00

Web開催（参加者16名）

- (1) 会誌特集号の現状と企画
 - 1) Vol.52 No.2「持続可能社会とフルードパワー」
 - 2) Vol.52 No.3「超大型機械を支える油圧技術」
 - 3) Vol.52 No.4「スポーツ分野における流体力低減技術（仮）」
 - 4) Vol.52 No.E 1「電子出版号ー緑陰特集号」
 - 5) Vol.52 No.5「フルードパワーシステムとIoT・スマートファクトリー（仮）」
- (2) その他
 - 1) 会議報告
 - 2) トピックスについて
 - 3) 今後の特集について

会 告

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

学会誌電子版 学会HP（会員ページ）への毎号掲載のお知らせ

一般社団法人日本フルードパワーシステム学会では、現在、学会誌1年分の電子版（PDF）を年1回まとめて学会HPの会員ページに掲載してきました。この度、会員サービスの一環として、第52巻第1号（2021年1月号）より、学会誌が発行される都度、電子版（PDF）を学会HPの会員ページに掲載することといたしました。

これにより、学会誌が手元になくても、電子端末があればいつでも最新の学会誌を閲覧することが可能となります。

また、学会誌の電子版は、目次から記事へのリンク機能や掲載記事の図表をカラーで見ることができるなど、学会誌の記事を便利に、よりわかりやすく読んでいただくことが可能となります。ぜひ、ご活用ください。

学会ホームページURL： <http://www.jfps.jp/index.html> から、会員ページへログインいただき、会員専用メニューの「学会誌バックナンバー」からご覧ください。

一般社団法人日本フルードパワーシステム学会
編集委員会

第40期通常総会 学会創立50周年記念式典・記念特別セミナー開催のお知らせ

開催日：2021年6月24日（木）、25日（金）

2020年に日本フルードパワーシステム学会は創立50周年を迎えました。これを記念して延期しておりました右記行事を開催します。詳細は学会ホームページをご覧ください。皆様のご参加をお待ちしております。

- ・ 6月24日（木）午後：記念特別セミナー
「50年間の製品から観るフルードパワー技術史」
- ・ 6月25日（金）午後：第39期通常総会
- ・ 6月25日（金）午後：記念式典

いずれもオンライン開催

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

連続講習会（全4回）「機械—電気の統合モデルによるモデルベース開発」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 交通・物流部門

開 催 日：2021年3月5日(金)、4月5日(月)、5月10日(月)、6月7日(月)

会 場：オンライン開催

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/21-5/

ロボティクス・メカトロニクス講演会2021 in Osaka (ROBOMECH2021 in Osaka)

主 催：一般社団法人 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門

開 催 日：2021年6月6日(日)～6月8日(火)

会 場：大阪南港ATCホール（大阪府大阪市住之江区南港北2-1-10）

U R L：https://robomech.org/2021/

日本混相流学会 混相流シンポジウム2021

主 催：日本混相流学会

開 催 日：2021年8月22日(日)～8月24日(火)

会 場：関西大学千里山キャンパス（大阪府吹田市山手町3-3-35）

U R L：http://www.jsmf.gr.jp/mfsymp2021/

第26回フルードパワー国際見本市 (IFPEX2021)

主 催：フジサンケイビジネスアイ、一般社団法人 日本フルードパワー工業会

開 催 日：2021年10月6日(水)～10月8日(金)

会 場：東京ビッグサイト 南1,2ホール（東京都江東区有明3-11-1）

U R L：https://www.ifpex.jp/

エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム2021

主 催：エコデザイン学会連合（幹事団体：特定非営利活動法人 エコデザイン推進機構）

開 催 日：2021年12月1日(水)～12月3日(金)

会 場：奈良県コンベンションセンター（奈良県奈良市三条大路1-691-1）

U R L：http://www.ecodenet.com/ed2021/index.html

新型コロナウイルスの影響で協賛行事の開催予定が変更になっている場合があります。
各行事の最新情報は、主催者のホームページまたは各行事のURLからご確認ください。

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 (2月10日現在)	883	12	111	128
差引き増減	± 0	± 0	± 0	± 0

正会員の内訳 名誉員14名・シニア員48名・ジュニア員118名・その他正会員703名

〈新入会員〉

正会員

中村 則雄 (パーカー・ハネフィン日本株式会社)

阿部 和典 (株式会社ファインシンター)

お詫びと訂正

本学会誌52巻、第1号(2021年1月)巻頭言におきまして、以下のような記載ミスがありました。

【誤】

船木達也氏(産業技術総合研究所)には、～飛田哲夫氏(関西大学)には、～鈴木高二郎(港湾航空技術研究所)には、近年の巨大台風が起こした高波・高潮の被害について紹介いただく。

【正】

船木達也氏(産業技術総合研究所)には、～飛田哲男氏(関西大学)には、～鈴木高二郎氏(港湾空港技術研究所)には、近年の巨大台風が起こした高波・高潮の被害について紹介いただく。

関係各位に大変ご迷惑をおかけしたことを深くお詫び申し上げ、ここに訂正させていただきます。

〈編集委員会〉

編集室

次号予告

—特集「超大型機械を支える油圧技術」—

【巻頭言】「超大型機械を支える油圧技術」発行にあたって

中山 晃

【解説】

超大型油圧ショベルの油圧システム

石井 伸弘

オフロードダンプトラックのブレーキシステム紹介

星野 佑太

鍛圧機械用高圧大流量機器の紹介

服部 智秀

三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）

出口 晶規, 久家 誠

大型ミキサ用油圧装置

木本 恵介

ダム・水門用油圧装置の設計指針と高付加価値の採用

大塚 宏行

【会議報告】

第21回流体計測制御シンポジウムにおけるフルードパワー関連技術の研究動向

藤田 壽憲

山梨講演会2020におけるフルードパワー関連技術の研究動向

吉田 和弘

【トピックス】

学生さんへ先輩が語る

賀集頭太郎

駐在員日記

松本 敏士

【研究室紹介】

奈良工業高等専門学校 櫛研究室紹介

神 孝典, 櫛 弘明

2020年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 柳 田 秀 記（豊橋技術科学大学）

副委員長 山 田 宏 尚（岐阜大学）

委員 飯 尾 昭一郎（信州大学）

飯 田 武 郎（株式会社小松製作所）

伊 藤 雅 則（東京海洋大学）

猪 飼 暢 崇（CKD株式会社）

加 藤 友 規（福岡工業大学）

窪 田 友 夫（KYB株式会社）

栗 林 直 樹（川崎重工業株式会社）

五 嶋 裕 之（株式会社工苑）

齋 藤 直 樹（秋田県立大学）

佐々木 大 輔（香川大学）

佐 藤 恭 一（横浜国立大学）

委員 妹 尾 満（SMC株式会社）

寺 澤 達 士（油研工業株式会社）

中 野 政 身（東北大学）

中 山 晃（日立建機株式会社）

藤 田 壽 憲（東京電機大学）

丸 田 和 弘（株式会社小松製作所）

村 岡 裕 之（株式会社コガネイ）

山 田 真の介（株式会社TAIYO）

吉 満 俊 拓（神奈川工科大学）

担当理事 伊 藤 和 巳（KYBエンジニアリングアンドサービス株式会社）

学会事務局 成 田 晋

編集事務局 竹 内 留 美（勝美印刷株式会社）

（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。

〒105-0011

東京都港区芝公園三丁目五-21 機械振興会館別館101 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 東京00-110-3123690

東京都文京区白山1-23-7 アクア白山ビル5階
印刷所 勝美印刷株式会社