

日本フルードパワーシステム学会誌

JOURNAL OF THE JAPAN

FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

フルードパワー システム

July.2015 Vol.46 No.4

日本フルードパワーシステム学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

特集「食品の加工と生産に活用されるフルードパワーの技術」

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「食品の加工と生産に活用されるフルードパワーの技術」

【巻頭言】

「食品の加工と生産に活用されるフルードパワーの技術」発刊にあたって 村松 久巳 152

【総論】

食品加工の特徴と食品工学 安達 修二 153

【解説】

高圧技術を用いた食品加工 山本 和貴 159

緑茶の亜臨界水抽出による苦渋味改善製品の開発 衛藤 英男 165

食品用超高圧処理装置 山内 孝紀 168

植物工場に活用されるフルードパワー 谷尾 和彦 171

ADSを搭載した食肉加工機 佐藤 郁也 175

【トピックス】

特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム…特許電子図書館のサービス終了 木原 和幸 179

フルードパワーシステム出前講義 香川 利春 182

【随想】

我がさまよえる油圧人生 一柳 健 186

【研究室紹介】

大阪大学 吉灘研究室 篠原 啓 188

【企画行事】

平成26年度ウインターセミナー開催報告

「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」 名倉 忍 191

【会告】

第34期 通常総会終了	194
共催・協賛行事のお知らせ	195
平成27年度 特別教育講座のお知らせ	
「油圧システムのモデリングの基礎をつかむ—ブロック線図とパワーフロー—」	197
平成27年度 オータムセミナーのお知らせ「アクアドライブシステムの産業利用の現状」	197
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27年秋季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	197
平成27年度 日中若手研究者交流事業 徐兵教授（浙江大学）特別講演のお知らせ	
「建設機械のシングルポンプ—マルチアクチュエータにおけるモーションコントロールシステムに関する研究」	197
その他	193, 196, 198

■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 Food Processing and Food Production"

[Preface]

On the Special Issue "Utilization of Fluid Power Technology for Food Processing and Food Production"	Hisami MURAMATSU	152
--	------------------	-----

[Survey]

Feature of Food Processing and Food Engineering	Shuji ADACHI	153
---	--------------	-----

[Review]

Food Processing by High Hydrostatic Pressure Technologies	Kazutaka YAMAMOTO	159
Improvement of the Bitterness and Astringency of Green Tea by Sub-critical Water Extraction	Hideo ETOH	165
High Pressure Processor	Takanori YAMAUCHI	168
The Fluid Power Utilized for Plant Factory	Kazuhiko TANIO	171
Meat Processing Machine Equipped with ADS	Ikuya SATO	175

[Topics]

Investigation of the Patent Documents/ Japan Platform for Patent Information	Kazuyuki KIHARA	179
.....Service end of the Patent Virtual Library	Toshiharu KAGAWA	182
Delivery Lecture on Fluid Power System with Experimental Equipment		

[Essay]

My Wandering Hydraulic Life	Ken ICHIRYU	186
-----------------------------	-------------	-----

[Laboratory Tour]

Introduction of YOSHINADA Laboratory	Kei SHINOHARA	188
--------------------------------------	---------------	-----

[JFPS Activities]

The Report of Winter Seminar in the Fiscal Year of 2014 'The Fluid Power Technology of Large-scale Machines and Plants'	Shinobu NAGURA	191
---	----------------	-----

[JFPS News]

193,194,195,196,197,198

巻頭言

「食品の加工と生産に活用されるフルードパワーの技術」 発刊にあたって

著者紹介



むら まつ ひさ み
村 松 久 巳

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

1989年東京理科大学大学院工学研究科博士課程修了。現在沼津高専教授。空気圧工学の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本音響学会、日本機械学会、ターボ機械協会の会員、工学博士。

2015年5月から開催されているミラノ国際博覧会ではテーマ「地球に食料を、生命にエネルギーを」のもとに、食に関する最新の情報を世界に向けて発信している。日本館においてはテーマ「共存する多様性」を掲げて、「日本の農林水産と食文化」の中で、世界と未来に貢献する技術の取組事例が紹介されている。新しい食料・エネルギー生産技術の提案、新しい食品加工技術の提案、安心・安全な食の提供に関する展示が行われている。一方、国内の食品加工の動向を調査すると、農林水産・食品産業技術振興協会「平成25年度 新分野のJAS規格化事業報告書」において、品質管理、特定用途分野および新技術分野における食品の規格化が検討されている。特に新技術の分野においては、高度な加工技術を用いて製造された食品を企画し、食品の製造技術の向上を図る分野が挙げられている。真空凍結乾燥技術、膜技術、高圧加工技術、過熱水蒸気処理技術を用いた食品などが具体的なものである。

これらの動向に鑑みるとフードパワーは豊富に蓄積された工業技術の知見に基づいて、食に関する技術に貢献できると推察される。そこで本特集では、特集題目「食品の加工と生産に活用されるフルードパワーの技術」を設定した。特に高圧技術を用いた食品加工と植物工場について着目し、これらの分野において最新の研究・開発を進めている、あるいは

製品展示に豊富なご経験を有する著者に興味深い内容を解説していただいた。

はじめに総論において安達修二氏には「食品加工の特徴と食品工学」を解説いただいた。はじめに、食品科学と食品工学の相違を述べられた。つぎに医薬品と比較した食品の特徴を説明いただき、可能性探究型と基盤強化型の食品研究の流れと、著者による2つの型の豊富な研究事例を紹介いただいた。続く各論では、5つの記事を取り上げている。山本和貴氏には「高圧技術を用いた食品加工」を解説いただいた。食品の高圧加工の歴史と研究開発の動向、高圧加工による食品の物性変換と単位操作としての利用事例、高圧加工による微生物の不活性化、および食品高圧加工装置を説明いただいた。衛藤英男氏には「緑茶の亜臨界水抽出による苦渋味改善製品の開発」を説明いただいた。緑茶を加圧抽出すると高濃度のカテキンを含むが苦渋味を抑制できること、さらにその機構を説明いただいた。山内孝紀氏には「食品用超高圧処理装置」を解説いただいた。高圧処理装置の構成・高圧発生の原理と、横型食品用超高圧処理装置の特徴について説明いただいた。谷尾和彦氏には「植物工場に活用されるフルードパワー」を解説いただいた。植物工場の種類と成功事例、植物工場に必要な制御対象と制御用機器について説明いただいた。佐藤郁也氏には「ADSを搭載した食肉加工機」を説明いただいた。従来型の食肉スライサーの種類、その動作と機構、新たに開発したADS搭載のスライサーについて説明いただいた。

末筆ながら、著者の皆様にはご多用の中、ご快諾いただき多大なご協力とご支援を賜り、厚く御礼申し上げます。読者の皆様においては、本題目に関する新しい技術の開発や研究動向の情報の提供に役立てることができれば幸いである。

(原稿受付：2015年5月25日)

食品加工の特徴と食品工学

著者紹介



あだち しゅうじ
安達修二

京都大学農学研究科食品生物科学専攻
〒606-8502 京都市左京区北白川追分町
E-mail: adachi@kais.kyoto-u.ac.jp

1976年京都大学大学院農学研究科修士課程修了、京都大学工学部助手、新居浜高専助教授、静岡県立大学食品栄養科学部助教授、京都大学農学部助教授を経て、2003年京都大学農学研究科教授、現在に至る。食品工学の研究に従事、日本食品工学会などの会員、農学博士。



図1 京都大学農学部の学科構成と農学部のミッション

1. はじめに

我が国の食品製造業は売上高で全製造業の10%以上を占める大きな産業分野である。しかし、自動車、機械、電気などの産業分野に比べて、一般に企業規模が小さい。したがって、日々の食事やグルメなどの料理には関心があっても、食品に関する科学と産業については関心と馴染みがない人が多い。機械工学分野の方々も同様であろう。そこでまず、食品の特徴とそれを研究対象とする食品科学について概説する。つぎに、食品に固有の問題を紹介したのち、食品研究の動向について概観する。最後に、筆者が手掛けている食品に関する工学的な研究の例を紹介する。

2. 食品科学と食品工学

食品製造業に勤務する技術者や研究者には農学系の卒業生が多い。同じ応用学である工学系の方も含めて、農学部は世間の人々には分かり難い学部であろう。そこでまず農学部について、筆者が所属する大学を例に紹介し、その中で食品系学科の位置づけとミッションについて述べる。

農学は生物資源を人々の豊かな暮らしに活かす基礎科学である。京都大学農学部の学科構成を例として、農学がカバーする教育・研究分野を紹介する(図1)。なお、現在の学科名は内容が分かり難い面があるので、以前の名称をカッコ内に示す。一次生産(生物資源)を生物学の観点から支えるのが資源

生物科学科(農学科, 畜産学科, 水産学科)である。一方、土木工学や機械工学の観点から一次生産の場を支えるのが地域環境工学科(農業工学科)である。一次生産物を食品として利用するのが食品生物科学科(食品工学科)であり、化学的な手法により化成品や医薬品などに利用するのが応用生命科学科(農芸化学科)である。また、森の恵みを活用するのが森林科学科(林学科, 林産工学科)である。さらに、生物資源を利用するシステムを社会科学、とくに経済学の視点から扱うのが、食料・環境経済学科(農林経済学科)である。

食品を摂取することにより健康で豊かな暮らしに貢献するための学問分野を食品科学(food science)といい、生物資源を加工して食品または食品素材をつくる領域(加工学, 製造工学などの「口に入るまでの科学」とそれらを摂取したときに体内で起こる現象を解明する領域(栄養学, 生理学などの「口に入ってから科学」)を包含する。後者はどのような食品をつくるか、前者はそれらをいかにつくるかの科学である。これらが調和して進展することにより、人々の健康で豊かな生活の実現に貢献できる。

食品の加工に関する科目は、食品加工学(food technology)と食品(製造)工学(food engineering)に大別できる。前者は、牛乳、豆腐などの個別の食品をつくる流れに沿って教育・研究する分野である。一方後者は、たとえば牛乳の殺菌やアイスクリームの凝

固は操作法や目的は異なるが、熱が移動するという点では共通しており、伝熱操作として扱える。このようにそれぞれの加工プロセスに共通する操作について教育・研究するのが食品工学である。

3. 食品加工の特徴

工業的な物質生産では、一定の品質をもつ製品を大量にかつ安価に製造しなければならない。加工食品についても同様である。しかし、食品や食品素材の原料は、季節、地域、年などによって品質が異なることが多い。また、原料や製品は、いわゆる“生もの”であり、腐敗や変色が起こりやすく、品質が劣化するだけでなく、ときには食中毒などを引き起こすこともある。さらに、食品または食品素材は、一般に多くの成分を含み、それらが物理的、化学的または生物学的に相互作用していることが多い。また、多くの成分は均一に存在することは少なく、微量な成分が味や匂いなどに対して重要な役割を果たすことが多い。このようにかなりの幅をもつ原材料から一定の品質を満たす製品をつくらなければならない。さらに、食品は長期にわたり（常識的な範囲で）大量に摂取しても、絶対に安全でなければならない。ハラルのように宗教的な制約があることもある。

このような食品の特性を、食品と同じように経口摂取する飲み薬（錠剤）と比べてみる（表1）。医薬品は賦形剤などを除くと基本的には単一成分であり、食品に比べて品質劣化の時間スケールが長いものが多い。また、病状によっては、多少の副作用（毒）も許され、高価であってもよい。一方、食品は美味しくなければならないが、美味しさの基準は国や地域、世代などによって大きく異なる。食品には栄養素の補給による生命の維持（一次機能）、色、味などの嗜好（二次機能）に加えて、生体防御、体調リズムの調節、老化制御、疾患の防止などの生体を調節する機能（三次機能）をもつ。食品の三次機能による効果は一般的には緩慢であり、医薬品のように短期に奏効することは少ない。

表1 食品と薬の比較

	食品	薬
成分数	多い	単一
味	美味しい	不味い
価格	安価	高価
安全性	絶対に安全	毒

このように食品と医薬品には大きな相違点があるが、いずれかに優劣があるものではない。重篤な疾病に対して特効を示す医薬品がもたらす福音は患者

にとって計り知れない。しかし、その福音にあずかる人の数は、通常は多くない。一方、食品は三つの機能を通じて、万人がその恩恵にあずかることができる。幸せが強さと数の積で扱えると仮定すると、医薬品と食品では強度と数に違いがあるが、その積には大差がなく、いずれも人類の健康で豊かな生活に貢献する。

4. 食品研究の二つの流れ

研究には、可能性探索型と基盤強化型の二つのタイプがある¹⁾。前者は、先が見えないハイリスクな先端的研究と、中短期である程度の成果が得られると期待される研究を包含する。一方後者は、何となくわかったつもりでも、深く考えると的確に答えられない現象を解明するための疑問解決型の研究と、基礎物性値の精確な測定のような地道な研究が含まれる。ほかの分野と同様に、食品についても両方のタイプの研究があり、いずれのタイプの研究を行うかは、組織に与えられたミッションと研究者の志向による。新しい分野や概念の創出や商品開発を達成するには、両者の融合が大切である。また、華々しさはないが、合理的なプロセスの改善・改良による生産性の向上も大きな成果であり、これにも二つの観点からの取り組みが必要であろう。

食品科学は応用的な学問であるので、その研究動向は社会の動きを反映する。我が国は65歳以上の高齢者が全人口の25%を越える超高齢化社会を迎えた。医療等の発達により平均寿命は男79歳、女86歳であるが、健康上の問題がなく日常生活を普通に送れる状態の健康寿命は男70歳、女74歳である²⁾。両者の差の10年前後は介護などの人の手助けが必要となる。介護食やユニバーサルデザインフード³⁾の生産は増加しており、その基礎となる咀嚼や嚥下に関する研究が活発になされている。また、生活習慣病の一つである肥満は、男は30%前後、女は50歳を越えると20%以上に及ぶ⁴⁾。肥満のメカニズムとそれを抑制する食品の研究も多い。これらは比較的中短期である程度の成果が期待できる可能性探索型の研究である。

上記は口に入ってから現象に対する研究である。一方、食品の製造について最近では、原理的に新しい加工法の開発はないように感じるが、生活スタイルの変化に基づく新しい商品が開発されている。ある企業の方は、代表的な例として、冷凍麺と無洗米を挙げられた。冷凍は新しい技術ではないが、デンプンの老化（硬くなる原因）に対する理解とそれを制御する技術により美味しさを保った冷凍麺が開発された。また、無洗米にはいくつかの製法がある⁵⁾が、

いずれも原理的には新しい訳ではない。ある製法ではデンプンを使用するが、これもデンプンの特性の理解に基づいて開発されたものと推測する。これらはいずれも、現象や食材を深く理解する基盤強化型の研究に基づく成果であろう。

ナノテクノロジーは多くの分野で関心をもたれており、食品の分野も例外ではない。約10年前からフードナノテクノロジーに関する研究が進められている^{6,7)}。これらはややリスクのある可能性探索型の研究であるとともに、微細化することによりどのような現象が起こるかを理解するための基盤強化型の研究でもある。

5. 食品研究の事例

食品工学研究の動向を俯瞰し予測する力量はない。筆者が手掛けている基盤強化型と可能性探索型の研究を紹介し、食品加工に関する工学的研究の一端を理解いただければ幸いである。

魚油や植物油などの液状の脂質を多糖など（包括剤）の濃厚水溶液で乳化したO/Wエマルジョンを噴霧乾燥などにより急速に脱水して微小な油滴を包括剤の乾燥層で被覆して粉体にする技術を脂質の粉末化という（図2）。粉末化する利点の一つに、脂質の酸化の遅延が挙げられる。粉末化した脂質（粉末油脂）は、保存初期に急激に酸化が進行したのち、あるレベルに達するとほとんど酸化が進行しない、または著しく遅くなるという特徴的な過程を経て進行する（図3）。脂質の酸化には酸素が必要であるので、粉末化による脂質の酸化の遅延は、包括剤の乾燥層における酸素の拡散速度が遅くなることに起因すると考えるのが一般的である。しかし、脂質の酸化速度と酸素の拡散速度を連立した拡散-反応モデルでは実測値の傾向を表現できない⁸⁾。すなわち、包括剤による拡散抵抗だけでは現象を説明できないことを意味する。

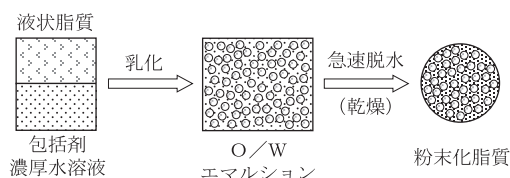


図2 油脂の粉末化の概念図

そこで、粉末中で脂質は多様な状態で存在し、酸化されやすさに難易があると考えた。その難易を脂質の酸化過程に対する活性化自由エネルギーの正規分布で表現できると仮定すると、図3の曲線で示すように、粉末化した脂質の酸化過程の実測値をよく表現した⁸⁾。では、酸化されやすさの難易は何に起因

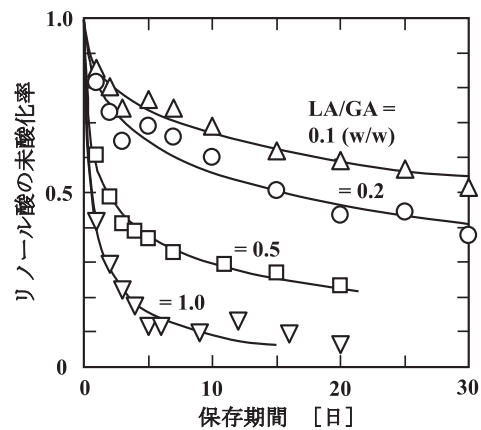


図3 噴霧乾燥法によりアラビアゴム（GA）で粉末化したリノール酸（LA）の37℃、相対湿度12%における酸化過程と、活性化自由エネルギー分布モデルによる計算結果の比較

するのかという疑問が生じる。この点については十分に検討できていないが、それが解明されれば分散系固体食品中での脂質の酸化に対する理解が深まる。

上述したように、食品の分野でもナノテクノロジーに対する関心が高まっている。そこで、O/Wエマルジョンや粉末油脂中の油滴を微細化すると、脂質の酸化速度はどのようになるかを考察した。油滴を微細化するには脂質にかなりのストレスがかかるので、ほかの条件はまったく同じで、油滴径のみが異なる条件での検討は実験的に困難な面がある。そこで、コンピュータ・シミュレーションに基づいてそれらの点を検討した。

粉末油脂中の油滴を小さくすると、粉末の表面に露出している脂質の割合である表面油率が低下し⁹⁾、油滴を微細化する利点の一つである。油滴を小さくすると表面油率が低下する理由を浸透理論に基づくモデルにより説明した¹⁰⁾。

O/Wエマルジョン系で油滴を微細化すると脂質の比表面積が増大するので、酸化が促進されるとの考えがある。これは油水界面での酸素の物質移動が律速な領域では妥当であろうが、油滴がある程度微細化すると十分な量の酸素が供給されるので、それ以上微細化しても酸化速度は変わらない、すなわち反応律速になると予測するのが一般的であろう。しかし、水中に分散した1個の油滴をイメージすると、油滴は親水部が水相に、疎水部が油相に配向した界面活性剤（乳化剤）分子で覆われている（図4(a)）。乳化剤の疎水部は酸化され難い成分である。油滴を微細化すると、油相に配向した疎水基が油滴中で占める体積分率が大きくなり、酸化され難い疎水基で脂質が希釈される。その効果は油滴が小さいほど顕著であり、反応物質である脂質の濃度が低下するので、酸化速度は遅くなると予測される。実験的にも

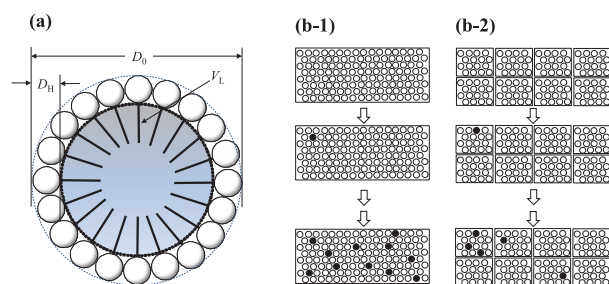


図4 O/Wエマルジョン系における油滴の微細化による酸化の遅延を予測する(a)希釈モデルと(b)隔離モデルの概念図

そのような結果が得られた¹¹⁾。

油滴を微細化すると酸化が遅延されると予測されるもう一つの理由がある。脂質の酸化はラジカルの発生（開始反応）が引き金となって進行する。100個の脂質分子を考え、これが一つの塊（油滴）として存在するとき、10分割したときを考える（図4(b)）。ある瞬間にラジカルが発生し、1個の脂質分子が酸化される（図中の黒丸）と、そのブロックに存在するすべての脂質の酸化が進行する。一方、酸化した脂質分子（黒丸）はほかのブロックには影響を及ぼさず、ほかのブロックの脂質は酸化されない。このような考え（効果）に基づくコンピュータ・シミュレーションにより油滴を微細化すると脂質の酸化が遅延されることを予測した¹²⁾。

スパゲッティなどの乾燥パスタは安価に売られ、茹でて日常的に喫食されている。乾燥パスタを工業的に製造する条件は豊富な経験に基づいて決定されているが、任意の条件で生起する現象を合理的に予測するという観点からは、まだ工学として完成していないように思われる。茹で過程についても同様である。生パスタを乾燥して品質のよい乾燥パスタを製造し、それを美味しく茹でるには、1本のパスタの中での水の動きを知る必要がある。茹でスパゲッティ内の水分分布は、一般的には核磁気共鳴画像法(MRI)により測定されるが、装置が高価で誰でも使える訳ではない。また、原理的に含水率の低い領域は測定できない。そこで筆者らは、乾燥パスタを茹でると色が薄くなる現象に着目して、市販のデジタルカメラを用いて水分分布を高い解像度で求める方法を開発した¹³⁾。

この方法により測定した茹で時間の異なるスパゲッティ内の含水率分布（図5）には、吸水初期に表面付近に急峻な分布がある、表面の含水率が茹で時間とともに徐々に増加する、表面付近に含水率が一定の領域ができる、などの特異な点がある。このような現象は、水の拡散係数の含水率依存性を考慮しても、単純な水の拡散方程式では説明できない。

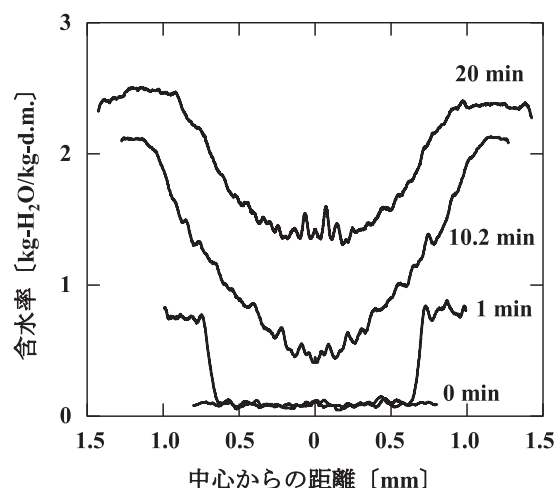


図5 茹で過程におけるスパゲッティ内の水分分布の変化

水の拡散速度の影響がないパスタの吸水挙動は、表面の含水率が茹で時間とともに徐々に増加する現象を考察するヒントになる。これは、無限に細い、すなわち太さが0 mmのパスタの吸水過程を測定すればよいが、そのようなパスタは現実には存在しないので、種々の太さのパスタの吸水過程を測定し、ある時間での吸水量を太さゼロに外挿して推測した。また、小麦粉中のタンパク質であるグルテンだけで作製したパスタ様のものの吸水過程も測定すると、平衡吸水量で規格化した吸水挙動は両者でよく一致した¹⁴⁾。パスタ中ではグルテンネットワークの網目に包埋されたデンプン粒の吸水（糊化）は迅速な過程である。したがって、吸水の律速段階はグルテンネットワークの弛緩であり、網目が広がると同時にデンプン粒が水を吸い込み、含水率が上昇するという機構を示唆する。このように組成の簡単なスパゲッティを茹でるという日常的な操作で起きる現象もまだ完全には理解できていない。この現象に対する理解が深まれば、組成がもっと複雑な食品の乾燥や復水（吸水）過程が合理的に設計できるようになると期待される。

水は、食品加工でもっとも広く使われる溶媒であり、また多くの食品に高い割合で含まれる成分である。水の状態図のうえにいくつかの食品加工操作を示す（図6）。大気圧のもとでは0℃以下で水は固体（氷）になる。ジュースなどに含まれる水だけを凍らせると濃縮できる。この操作を凍結濃縮といい、風味の損失が少なく、エネルギー的に有利な濃縮法である。また、凍結した物体に応力を加えると破断（冷凍破断）できる。凍結した状態で減圧して水を除去する操作が凍結乾燥であり、インスタントコーヒーや乾燥野菜の生産に実用されている。大気圧のもとで加熱すると100℃以上で気体（水蒸気）とな

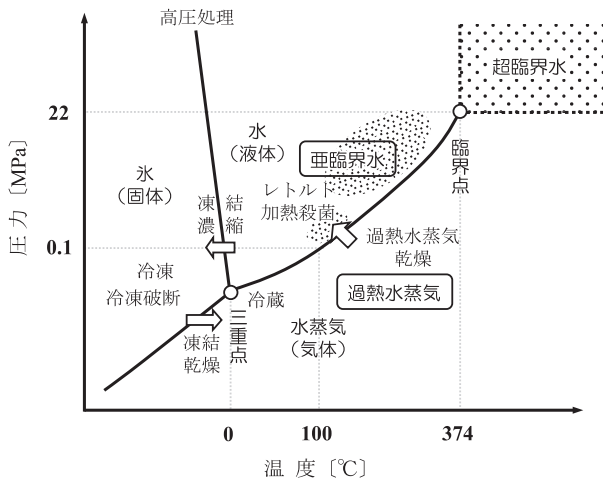


図6 水の状態図と食品加工

る。これをさらに加熱すると、過熱水蒸気となり、近年食品加工への利用が着目されている。大気圧よりやや高い圧力に保ち100℃以上で殺菌して保存期間を延長する操作は缶詰やレトルト食品などの生産に使われている。このような圧力と温度よりもう少し高い領域で液体状態を保った亜臨界水に関心がもたれている。さらに高温高压で臨界点(22.1 MPa, 374℃)を越えた超臨界水は廃棄物の処理などへの応用が検討されているが、食品の製造には活用し難い領域と思われる。

可能性探索型に位置づけて、亜臨界流体の食品加工への適用の可能性について検討している。常温常圧の水に比べて、比誘電率が低く有機溶媒に似た性質を示し、またイオン積が大きく酸または塩基触媒となり得るという二つの特徴をもつ亜臨界水を食品加工に使う可能性を探るために、応用と基礎の両面で検討した例を紹介する。脱脂米糠を亜臨界水で処理すると抗酸化性や乳化性をもつ成分が得られ¹⁵⁾、釣餌などに利用されているアミエビ(イサダともいう)を亜臨界水の条件で処理するとエビ風味の調味成分が得られた(図7)¹⁶⁾。また、速度論の観点から亜臨界水の反応特性を系統的に検討している。亜臨界条件下では、加水分解や熱分解だけでなく、縮合や異性化などの反応も進行する。このような基礎的な検討の中で、亜臨界状態に保持したアルコールと水の混合液中では糖の異性化反応が進行しやすく、自然界の存在量が少ない希少糖を効率的に生産できる可能性を見出した(図8)¹⁷⁾。

6. おわりに

食品という言葉からは喫食したときの美味しさや健康によいなどの面を想像される方が多いであろう。これらも食品に関する研究の大切な一面である。しかし、食品に関する研究はそれだけではない。生物

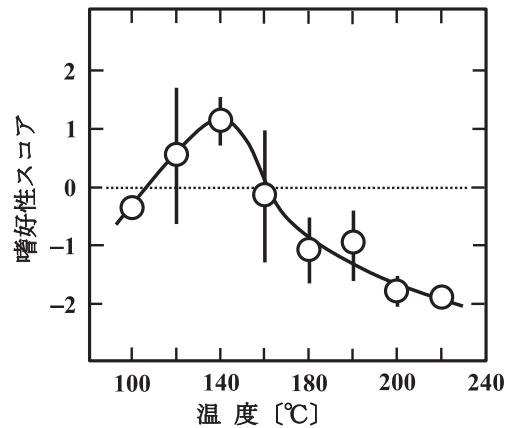


図7 亜臨界水処理によるアミエビ(イサダ)抽出液の嗜好性に及ぼす処理温度の影響

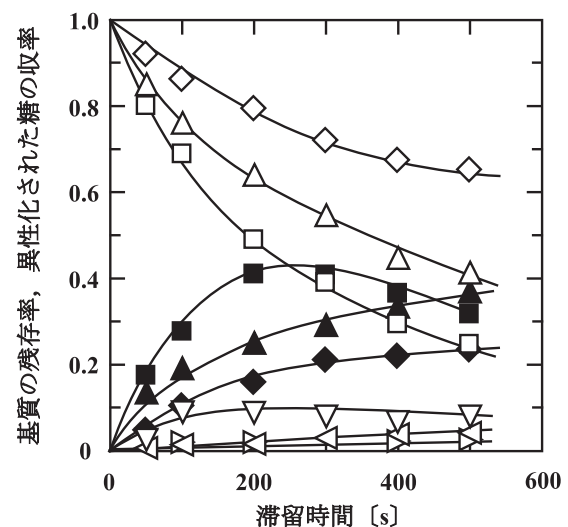


図8 含水エタノール中での単糖の異性化(80% (v/v)エタノール, 180℃). (◇) ガラクトース, (◆) タグトース, (◁) タロース; (□) リボース, (■) リブローース, (▽) アラビノース; (△) キシロース, (▲) キシルロース, (▷) リキソース

資源を活用して人々の健康で豊かな生活に貢献するには、加工技術やそのための装置の進展も欠かせない。加工に関する研究は華やかさに欠けるためか、最近では志向する研究者が少ないように感じる。食品製造のような応用的な研究・開発は、多くの分野の協同によってはじめて目的が達成される。食品加工機械を製造する企業数は多く、日本食品機械工業会が開催する国際食品工業展には毎年、多くの食品加工機械メーカーが出展し、参加者も10万人に及ぶと聞く。しかし、我が国の大学には、食品機械学を研究・教育する分野と研究者のいずれも少ないように思われる。特異な力学特性をもつ食品を加工する機械の開発には、機械工学だけでなく食品の特性をよく理解する必要がある。食品科学の立場から機械工学に関心をもつとともに、機械工学の基盤に基づいて食品を手掛けようと思う方が増えることを期

待する.

参考文献

- 1) 安達修二：食品の製造・加工技術の進展への二つの道。食品と開発, 49, 13-17 (2014) .
- 2) http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/dl/chiiki-gyousei_03_02.pdf
- 3) <http://www.udf.jp/about/index.html>
- 4) <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/seikatu/himan/number.html>
- 5) http://www.musenmai.com/staticpages/index.php/musenmai_method
- 6) 中嶋光敏, 杉山滋監修：フードナノテクノロジー, シーエムシー出版, 2009年.
- 7) 安達修二, 中嶋光敏, 杉山滋監修：食品素材のナノ加工を支える技術, シーエムシー出版, 2009年.
- 8) E. Ishido, Y. Minemoto, S. Adachi, and R. Matsuno : Heterogeneity during autoxidation of linoleic acid encapsulated with a polysaccharide. *J. Food Eng.*, 59, 237-243 (2003).
- 9) A. Soottitantawat, H. Yoshii, T. Furuta, M. Ohkawara, and P. Linko : Microencapsulation by spray drying : Influence of emulsion size on the retention of volatile compounds. *J. Food Sci.*, 68, 2256-2262 (2003).
- 10) K. Kikuchi, S. Yamamoto, H. Shiga, H. Yoshii, and S. Adachi : Surface oil content of microcapsules containing various oil fractions and oil-droplet sizes. *Jpn. J. Food Eng.*, 14, 169-174 (2013).
- 11) H. Imai, T. Maeda, M. Shima, and S. Adachi : Oxidation of methyl linoleate in O/W micro-and nanoemulsion systems. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 85, 809-815 (2008).
- 12) K. Kikuchi, S. Yamamoto, H. Shiga, H. Yoshii, and S. Adachi : Effect of reducing oil droplet size on lipid oxidation in an oil-in-water emulsion. *Jpn. J. Food Eng.*, 15, 43-47 (2014).
- 13) T. Ogawa and S. Adachi : Measurement of moisture profiles in pasta during rehydration based on image processing. *Food Bioproc. Technol.*, 7, 1465-1471 (2014).
- 14) T. Ogawa, A. Hasegawa, and S. Adachi: Effects of relaxation of gluten network on rehydration kinetics of pasta. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 78, 1930-1934 (2014).
- 15) J. Wiboonsirikul, Y. Kimura, M. Kadota, H. Morita, T. Tsuno, and S. Adachi : Properties of extracts from defatted rice bran by its subcritical water treatment. *J. Agric. Food Chem.*, 55, 8759-8765 (2007).
- 16) I. Koomyart, H. Nagamizu, P. Khuwijitjaru, T. Kobayashi, H. Shiga, H. Yoshii, and S. Adachi : Characterization of products from subcritical water treatment of raw krill and their potential use as food additives. *Intl. J. Food Sci. Technol.* (印刷中)
- 17) D.M. Gao, T. Kobayashi, and S. Adachi: Production of rare sugars from common sugars in subcritical aqueous ethanol. *Food Chem.*, 175, 465-470 (2015).

(原稿受付：2015年4月15日)

解説

高圧技術を用いた食品加工

著者紹介



やま もと かず たか
山本和貴

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所食品工学研究領域食品高圧技術ユニット
〒305-8642 茨城県つくば市観音台2-1-12
E-mail: kazutaka@affrc.go.jp

1994年東京大学大学院博士課程修了後、農水省入省、スイス連邦工科大学チューリッヒ校研究員、同省農林水産技術会議事務局研究調査官を経て、食品高圧科学、澱粉科学等の研究及び食品安全性の行政・教育に従事、趣味はゴルフ。

1. はじめに

有史以来、食品の調理・加工といえば、火すなわち熱を利用することであった。よって、食品の調理・加工操作に関する日本語では、焼く、炒める、煮る、蒸す、煎るなどの漢字は、火偏、連火などの「火」を表現する偏旁を部首として含む。人類は、火による加熱操作により、食品に焼き目、焦げ目を付けて独特の風味を醸し出して美味しくしたり、殺菌して保存期間を長くしたりしてきた。現代社会では、火に変わって電子レンジ、電気オーブンが利用されるようになったが、これらも加熱を積極的に利用した熱的操作である。

一方、食品加工への圧力の利用は、ナポレオンの時代からなされている。フランス軍の長期遠征のために、ガラス瓶に食べ物を入れて密封加熱することにより、長期保存を可能にした。密封して加熱すると同時に、瓶内の蒸気により圧力が数気圧上昇し、滅菌されていたと考えられる。これを基盤として、現在の食品工場では密封した容器を加圧下で加熱することによるレトルト食品（滅菌食品）が製造されており、家庭では圧力釜による加圧加熱で調理時間が短縮されている。しかし、これらの加圧は、密閉系での加熱により、常圧よりも数気圧程高くしているだけの消極的加圧に過ぎない。つまり、従来の食品加工における圧力利用は、加熱操作の補助的役割が主流であった。

しかし、1980年代後半に状況は一変した。数千気圧（数百MPa）の高圧力を、食品加工で積極的に利用することが提案された。熱を積極的に利用しないという意味で、広義の非熱的（nonthermal）操作といえる。1987年、当時京都大学助教授の林力

丸博士が、高圧力の食品加工への利用についての提言を和文で投稿¹⁾して以降、食品高圧加工の研究開発が日本で盛んになり、この流れは世界へと広がった。日本において芽吹いたこの革新的な加工技術、食品高圧加工技術により、圧力が新たな食品加工操作パラメータとして加わった。

2. 非熱的食品加工技術としての高圧処理

食品の加熱により、色素成分、香気成分などの加熱生成物が生じたり、分子結合が切れて有用成分が失われたりするなど、さまざまな化学反応が起きる。これにより、加熱食品に成分変化が起こり、独特な風味や色合いが醸し出される。

一方、圧力での処理においては、化学反応は原則的には促進されず、分子の巨視的・微視的な物理的变化が起こる。たとえば、巨視的には、気泡分散系では気体の液体への溶解による均一化で気泡が消失し、微視的には、分子運動が制約を受けつつ、分子と分子との間にある空隙を埋めるように分子は詰め込まれる。特に蛋白質のような巨大分子では、分子内水素結合などが切れ、各種分子により分子内の空隙が埋められて元の立体構造が崩れ、変性が起こる。

食品の高圧加工においては、この特異な物理的变化を利用する。高圧処理は、積極的な加熱は行わなくても、加圧時には断熱圧縮による温度上昇、減圧時には断熱膨張による温度低下があるため、非加熱の操作ではなく、厳密には非熱的操作でもない。しかし、放射線照射処理、低温プラズマ処理などの新しい食品加工技術と同様に、広義での非熱的操作に分類される。

食品高圧加工処理における加圧・減圧時の温度変化は、加圧・減圧速度、容器形状、圧力媒体の圧縮率などに左右される。食品の構成成分であり、食品加工の圧力媒体として用いられる水の圧縮率は数%程度で、気体のそれより遙かに小さいため、加圧時・減圧時の温度変化は、気体を圧力媒体とする場合と比べて遙かに少ない。しかしながら、高圧加工条件によっては、断熱圧縮による10℃程度/100MPaの温度上昇が観測されることもある。一方、圧縮率が大きい空気の混入による温度上昇が懸念されるが、食品は一般に含水率が高いので、空気は加圧時に食品中の水に溶解込み、温度変化への寄与が著しく減少する。よって、食品高圧加工における空気混入は、断熱圧縮よりも、圧縮時間の増加による

加工回数の減少として問題となる。安く大量に作ることを使命とする食品加工においては、空気の混入は避けるのが賢明である。

3. 食品高圧加工の歴史

食品加工においては、食品成分の変化、微生物の不活性化などが重要である。長年の研究成果の蓄積により、食品への熱処理の影響に関しては、知見が多く、現在も日々蓄積している。しかし、高圧処理の影響については、知見が少ない。

高圧力が生物・生物素材に及ぼす影響についての基礎科学的な研究は、19世紀末から行われており²⁾、1912年には高圧下での水の状態図³⁾が、1914年には卵白の変性⁴⁾が報告され、同じく1914年に野菜、果物の微生物学的保存性と高圧処理との関連について報告されている⁵⁾。

食品加工への実用的利用に関する研究は、1987年の林¹⁾による応用提言までは活発とはいえ、食品・生物関連の高圧研究は、これ以降著しく進展した。また、これ以前には、セラミックス加工などに用いられてきたHIP（熱間等方圧加圧：Hot Isostatic Press）およびCIP（冷間等方圧加圧：Cold Isostatic Press）が食品高圧加工用として利用されることはなかった。当時の食品科学者にとって、熱以外の操作パラメータの利用は革新的であり、高圧力利用という一種のブームに湧いていた。農林水産省では、1989年から4ヶ年計画で食品製造業11社および機械装置・計測器・包装資材製造業10社からなる食品産業超高圧利用技術研究組合を運営し、11の研究課題を遂行した⁶⁾。卵黄・卵白の物性変化・殺菌、低温殺菌・細胞損傷、包材への影響、カカオマス殺菌・カカオ脂テンパリング・カカオ後発酵、高粘性食品の高圧処理、蜂蜜殺菌、水産物の高圧処理、緑茶飲料の殺菌、乳・乳製品製造、解凍・不凍結低温貯蔵・鮮度保持、食肉加工、麴菌の高密度培養が課題であった。同時に、温度制御が可能で、衛生確保の工夫を施した食品加工用高圧装置の開発も行われた。

4. 食品高圧加工における研究開発

1990年には、世界初の高圧加工食品が日本でジャムとして実現した^{7,8)}（図1）。食品衛生法では高圧殺菌が認められていないために、所定の熱殺菌との同等性を示し、個別に認可を得る必要があった。また、酵素失活する条件でないために酸素が残存することなどから冷蔵流通されたが、生の風味を損なうことなく微生物を不活性化した画期的な新規食品として着目を集めた。ここで、「殺菌」ではなく「不活性化」という用語を用いるのは、高圧処理では微生物が致死的に殺菌される場合もあるが、亜致死的に損傷を受けて回復しうる損傷菌として残存する可能性があることを加味しているからである。また、高圧処理した蓬を練り込み、新鮮な色調・風味を残した蓬餅⁹⁾も市販されている（図2）。高圧処

理により米粒に水を含浸させてから炊き上げる高圧浸漬無菌包装米飯も各種実用化している¹⁰⁾（図3）。この米飯を、密閉した容器に発熱体とともに入れ、水を注いで発熱させるだけで米飯30食を暖めて供することを可能とした非常用米飯が開発されており、長期保存可能でおいしくて暖かいご飯が、災害時などの緊急時にも供給できる（図4）。

高圧加工食品開発当初は、殺菌に主眼がおかれたが、その後、納豆菌のように孢子を形成して環境ストレスに耐える芽胞菌については高圧殺菌が困難であること、装置の初期設備投資が大きく中小企業に



図1 世界初の高圧加工食品「ジャム」（イチゴ、リンゴ、ブルーベリー）⁵³⁾



図2 高圧加工した蓬を練り込んだ餅⁵³⁾



図3 浸漬工程に高圧処理を利用した高圧浸漬無菌包装米飯⁵³⁾



図4 高圧浸漬無菌包装白飯を利用した非常食 (30食, 5年間保存可能)⁵³⁾

は普及しづらいことなどから、食品高圧加工技術開発を断念したり市場から撤退したりする企業も徐々に増え、研究も一時の勢いを失ってしまったかに思えた。

しかし、高圧力が生体成分もしくは生物に及ぼす影響についての研究は、国内外で着実に進められ、生物素材に及ぼす高圧力の影響についての国際会議が1992年のフランスを皮切りに、1995年日本、1996年ベルギー、1998年ドイツで開催された。以降、高圧バイオサイエンス・バイオテクノロジー国際会議 (International Conference on High Pressure Bioscience and Biotechnology: HPBB) として定期開催となり、2000年に日本 (京都) で第1回のHPBBが開催されて以降、2002年 (ドイツ・ドルトムント)、2004年 (ブラジル・リオデジャネイロ)、2006年 (日本・つくば)、2008年 (米国・サンディエゴ)、2010年 (ドイツ・フライジング)、2012年 (日本・大津)、2014年 (フランス・ナント) と開催されてきた。2016年にはカナダのトロントで開催される予定である。

日本国内では、生物関連高圧研究会が活発に活動し、また、高圧討論会では、2004年の第45回以降、物理、化学、材料、地学といった従来からの高圧科学に加えて、食品・生物関連のセッションが設けられるようになった。2014年は、生物関連高圧研究会が高圧討論会と合同で開催された。

5. 食品物性変換

澱粉は、水の共存下で加熱すると熱糊化するが、高圧処理のみで糊化する現象 (圧力糊化) が明らかとなり、各種澱粉を対象に、圧力および温度の影響が調べられた¹¹⁾。圧力糊化澱粉の酵素受容性向上¹²⁾や特異な粘弾性挙動^{13, 14)}も調べられ、また、高圧処理直後から観測される老化 (急速老化) も発見された¹⁵⁾。しかし、この圧力糊化を系統的に把握するための研究は少なく^{16, 17)}、詳細な検討は十分でなかった。筆者らは、系統的理解のため、高圧処理した馬鈴薯澱粉の状態図を作成した^{18, 19)}。

食品蛋白質に関しては、乳、卵、畜肉、魚肉の蛋

白質について検討がある。 α -ラクトグロブリン、 β -ラクトグロブリン、分離ホエー蛋白質といった乳蛋白質のゲル化などの物性変化²⁰⁾、卵蛋白質の加圧によるゲル化²¹⁾、卵白アルブミンの加圧によるゾル-ゲル転移²²⁾、加圧によるミオシンの状態変化²³⁾、アクトミオシンのゲル-ゾル変換²⁴⁻²⁶⁾、魚肉蛋白質のゲル化²⁷⁾などが広く研究されている。高圧処理のみではゲル化しない α -ラクトグロブリンは、システイン添加によりゲル化する²⁸⁾。

チョコレートなどの油脂系食品の成分、あるいは微生物の細胞膜構成成分である脂質の高圧力による相転移についても知見が集められ、カカオ脂、大豆油、パーム油、コブラ油などの固-液相転移²⁹⁾やリン脂質二分子膜のゲル液晶相転移^{30, 31)}などが温度および圧力によって制御できることがわかっている。

6. 単位操作としての利用

蛋白質のX線構造解析には結晶化が不可欠だが、蛋白質自体が結晶化しにくいものであり、格子欠陥の少ない良質な結晶を作るのは難しい。しかし、蛋白質の中には、高圧下で結晶化が促進されるもの (例: グルコースイソメラーゼ) があること、静水圧であれば系内に速やかに均一に伝播する操作性の利点が結晶化制御に適しており、高品質結晶の育成に圧力制御が有効であることから、圧力は新たな晶析操作パラメータとしての可能性を秘めている^{32, 33)}。

200 MPaまでの加圧下では、水の融点が圧力上昇に伴って低下するので、圧力移動凍結技術が興味深い。たとえば、 -10°C で凍結している食品を100MPa以上に加圧すると氷が融解し、逆に 0°C 以上で100MPaに加圧した水は、加圧したまま -10°C 付近に冷却することで漸く凍結する。これらを利用して、豆腐³⁴⁾、寒天ゲル³⁵⁾、カラギーナン³⁵⁾の高圧凍結変性についての研究がある。

乾燥穀類を水に浸漬するプロセスでは、長い吸水時間が問題となる。たとえば、大豆では16～18時間が必要であるが、高圧液体含浸プロセスにより短縮できる。高圧含浸無菌玄米飯では、吸水に12時間程度が必要な玄米を高圧処理し、精白米と同等の30分で吸水を完了させることができる³⁶⁾。

また、高圧処理による低アレルギー化も可能である。米のアレルゲン蛋白質を高圧処理によって抽出する技術により、低アレルギーご飯および低アレルギー米パンが開発されている³⁷⁾。

さらに、高圧処理により、牡蠣の二枚貝が開き、身が簡単に落ちることが知られており³⁸⁾、高圧処理は二枚貝の開殻、ロブスターの開殻簡易化に用いられ、日本でも、牡蠣、アサリなどの二枚貝の高圧開殻が実用化されている。従来は専用の治具を使って二枚貝を開殻し、さらに貝柱を削いで身を脱殻して加工用牡蠣としていたが、高圧処理ではこれら操作が同時に行え、なおかつ手作業の際に解決できなかった殻破片の混入クレーム問題を最小化でき

る。近年は、開脱殻作業者の確保が困難になりつつあることから、高圧処理による開脱殻の自動化に注目が集まっている。開殻・脱殻の機構については、未解明である。

100MPa程度の中高圧下では、雑菌は死なずとも増殖抑制されるので、酵素活性を抑制する食塩を添加せずに酵素活性を著しく高めることができる。この原理を利用して、塩無添加での魚醤促成製造法^{39, 40)}が提案され、無塩醤油の製造が実現している。酵母による醗酵がないため独特の香気に欠けるが、高級醤油を少量添加した減塩醤油として販売されている。同様の酵素反応促進による商品開発の進展は顕著であり、健康食品・化粧品として豚プラセンタを効率的に酵素分解して得たプラセンタエキスのみならず、スッポンエキス、ニンニクエキスなどの各種エキス利用製品が実用化されている。

7. 微生物不活性化

微生物、特に細菌の不活性化についての研究は、1899年¹⁾以降、食品高圧科学においてもっとも歴史が長く、食品高圧加工が実用化して以降、知見が飛躍的に増大した。特に、高圧処理による微生物の損傷・回復に関連した研究は、近年盛んであり、高圧処理により細菌コロニーが検出されないことが、殺菌のほかに損傷を意味しうることが注目されている⁴¹⁾。

食品高圧加工においては、香気成分、色素成分、栄養成分、機能性成分の損失を最小化しつつ、細菌類を不活性化することで、高品質で安全な最小加工食品を生産することができる。高圧処理による微生物不活性化を活用した実用化事例としては、高圧加工ジャムのほかに、高圧加工肉製品がある⁴²⁾(図5)。肉製品の製造では、まず熱処理によって一次殺菌を行うが、食品添加物を加えない場合は、ハムのスライス、ソーセージの切断、それらの包装の際に混入した乳酸菌等の腐敗菌が保存中に増殖するために、賞味期限が短くなる。そこで、包装後に二次処理として高圧処理を導入し、腐敗菌を不活性化し、食品添加物を加えずに賞味期限を延長することが可能である。近年は、米国大手コーヒーチェーンが、420L容量の食品高圧加工装置4台により600MPaで各種果汁を処理し、絞りたての生ジュースのようであり



図6 米国大手コーヒーチェーンで販売されている高圧処理ジュース

ながら一ヶ月前後の賞味期限を保証した高圧処理ジュース(図6)を、全国12,000店舗以上で展開することを発表した。高圧処理ジュース市場は、欧米、韓国、台湾など、国外で伸びており、一方、国内では高級生搾りジュースの店頭販売が人気を呼んでいることもあり、日本に輸出を希望する企業、日本国内生産を目論む企業も現れている。しかしながら、日本の食品衛生法の基準を満たすためには、熱殺菌との同等性を示して個別認可を得る必要があることから、海外各社は苦慮している。目下のところ、高圧処理ジュースの国際規格が存在しないので、世界貿易機関(World Trade Organization)における今後の非関税障壁問題を回避する目的で、国際食品規格委員会(Codex Alimentarius Commission)における国際規格の策定が求められてくる可能性がある。

納豆菌のような芽胞形成菌の芽胞殺菌は困難で、1GPaでも完全には死滅させられないが、急速減圧する際の衝撃波(shockwave)を利用したShock-wave殺菌法の有効性が指摘されている⁴³⁾。一方、100～200MPaでの中高圧処理または500～600MPaでの高圧処理によって、芽胞の発芽が誘導される⁴⁴⁾。発芽後の栄養細胞状態では、通常の細菌と同様の条件で殺菌できるので、中高圧処理により発芽誘導してから殺菌する方法、発芽させつつ同時に殺菌する自滅的発芽を誘導する方法がある⁴⁵⁾。

予測微生物学は、pH、温度、塩濃度などさまざまな環境条件における残存微生物の増殖挙動、殺菌工程における死滅挙動について実験データを集積し、予測式で挙動を記述し、食品の殺菌における増殖・死滅挙動を予測して、操作条件の最適化に活かす学問である。細菌の増殖・死滅の経時変化を予測する動力学的予測手法に加え、高圧処理した細菌の生存/死滅境界線を記述する統計的予測手法⁴⁶⁾が提示されており、今後さらに、予測微生物学的手法により微生物の高圧不活性化を評価し、活用することが期待される。

一方、高圧による微生物不活性化機構の解明に向けて、高圧力が生体に及ぼす影響について研究が進められている。大腸菌、枯草菌、酵母などのゲノムが解明され、近年もっとも着目に値するのは、これ



図5 熱処理(一次殺菌)後に高圧処理により二次殺菌した肉製品

らゲノム情報を元に遺伝子発現や遺伝子構造を網羅的に解析する技術、ジェノミクス (genomics) である。ジェノミクスの核となるのはDNAマイクロアレイであり、これは数cm²のスライドガラス基板に数百から数万種類のDNAプローブ (DNAの短鎖) を配置させたもので、高圧処理した微生物のmRNAを抽出して、特異的に発現した遺伝子、もしくは逆に発現が抑制されてしまった遺伝子を特定することができる⁴⁷⁾。この手法は、深海微生物などの高圧力耐性機構解明においても威力を発揮する。

8. 高圧処理が食品成分量に及ぼす影響

野菜や果実を高圧処理することによって栄養成分であるビタミンC⁴⁸⁾や血圧降下効果のある機能性成分のGABA (γ-アミノ酪酸)⁴⁹⁾が増強されることが近年明らかとなりつつある。この増強機構については解明されていないが、高圧処理における減圧時に細胞組織が破壊されることで、細胞内外の基質・代謝酵素の相互作用が高まることに起因すると考えられている。

9. 食品高圧加工装置

食品高圧加工においては、概して100～600MPaの高圧力が用いられる。1990年代から、工業用の高圧加工装置が食品加工用として改良されて利用されるようになった。高圧加工装置としては、高圧容器にピストンを圧入して容積を減少させて加圧する直接加圧法によるものと、高圧容器に高圧力の圧力媒体を圧入して加圧する間接加圧法によるものがある。食品加工用の実用化装置は、間接加圧法を採用している。また、食品加工用実用化装置には、縦型と横型とがある (図7)。従来は、縦型が主流であったが、近年は、大容量を実現する横型が普及しつつある。食品加工では、大量処理で処理費用を抑制することが重要なため、食品高圧加工においても、処理費用削減のために容器の大型化が望まれる。容器大型化のためには、容器径または容器長を増す選択があるが、容器径を増すと、指数関数的に容器壁を厚くする必要があり、大幅なコストアップになる。装置製造コスト抑制のために、容器長を増して対応するのが理想的である。しかし、縦型で容積

長を増すと、処理品が入ったカゴを、最低でも容器長の倍程度の高さから釣り上げて取り出さなければならず、天井高さに制約される。一方、横型では、設置場所の最大長に応じて如何様にも容器長を増せる利点があるが、容器の開放時に圧力媒体の水をすべて取り出し、容器密閉時に水を再度大量に入れるという縦型では不要な操作が必要である。よって横型では、圧力媒体圧入用ポンプ以外に、高速で圧力媒体を流入させる目的のポンプを併用することによって、この問題点を解決している。横型の食品高圧加工装置は、最大処理量が525 Lのものが開発されており^{50, 51)}、今後ますます普及する可能性がある。

また、食品産業界では、中小企業または小規模事業者数は、全体の事業者数の99.7%を占めていることが特徴であり、それゆえに、食品高圧加工装置のような大規模な設備投資ができない事業者がほとんどである。そこで着目に値するのが、有償加工 (toll processing / tolling) である。装置のみを保有する企業が、食品企業から持ち込まれた包装食品を、一回処理当たり、kgなどの単位当たりで課金して処理する業態である。有償加工は、米国、カナダ、中国、台湾、ニュージーランド、オランダ、スペイン、アイルランド、イタリア、ドイツ、イギリス等で事業化されている。日本国内でも有償加工は一部可能であり、中高圧処理 (100MPaまで)、高圧処理 (600MPaまで) の受託生産が実施されている。中小企業への食品高圧加工技術普及のためには、有償加工のさらなる普及が不可欠である⁵²⁾。

10. おわりに

近年の国際会議での食品高圧加工に関する発表では、国外では依然として殺菌および保存期間延長を目的とした研究が盛んである。一方、国内では、高圧加工ジャムおよびこれを利用したジャムパン、液体含浸促進効果を利用した無菌包装米飯類、牡蠣の開殻脱殻、効率の酵素分解による促成製造無塩醤油などが実用化しており、殺菌目的以外の研究も盛んである。

食品高圧加工の分野においては、殺菌を含めた従来課題を解決する手段としてのみならず、新しい食感、味などを実現する新たな食品を開発する手段としても研究開発を深化させることが重要である。これにより、新たな実用化技術が生まれ、基礎科学における新知見も続々と発見されるであろう。

参考文献

- 1) 林力丸：食品と開発, 22, 55-62 (1987)。
- 2) B.H. Hite, *Bull. West Virginia Univ. Agric. Exp. Station*, 58, 15-35 (1899)。
- 3) P.W. Bridgman : *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.*, 47, 441-558 (1912)。
- 4) P.W. Bridgman : *J. Biol. Chem.*, 19, 511-512, (1914) 。
- 5) B.H. Hite, N.J. Giddings, C.E. Weakley, Jr., *Bull. West Virginia Univ. Agric. Exp. Station*, 146, 3-67 (1914)。
- 6) 食品産業超高圧利用技術研究組合編, “食品産業の未来

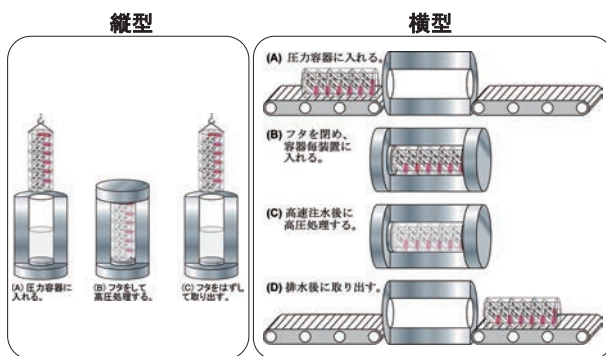


図7 縦型・横型の食品用高圧加工装置⁵⁴⁾

- を拓く高圧技術と高密度培養”, (1993, 健康産業新聞社).
- 7) 堀江雄, 木村邦男, 井田雅夫, 吉田泰博, 大亀邦仁, 日本農芸化学会誌, 63, 975-980 (1991).
 - 8) K. Kimura, M. Ida, Y. Yoshida, K. Ohki, T. Fukumoto, *Biosci., Biotechnol. Biochem.*, 58, 1386-1391 (1994).
 - 9) 山崎彬, 笹川秋彦, 杵淵美倭子, 山田明文, “高圧バイオサイエンス”, 功刀滋, 嶋田昇二, 鈴木敦士, 林力丸編, p. 328-335 (1994, さんえい出版).
 - 10) 山崎彬, 笹川秋彦, 日本農芸化学会誌, 74, 619-623 (2000).
 - 11) K. Yamamoto, K. Kawai, K. Fukami, S. Koseki, *Food*, 3 (SI 1), 57-66 (2009).
 - 12) R. Hayashi, A. Hayashida, *Agric. Biol. Chem.*, 53, 2543-2544 (1989).
 - 13) M. Stolt, N.G. Stoforos, P.S. Taoukis, K. Autio, *J. Food Eng.*, 40, 293-298 (1999).
 - 14) H. Katopo, Y. Song, J.-L. Jane, *Carbohydr. Polym.*, 47, 233-244 (2002).
 - 15) R. Stute, R.W. Klingler, S. Boguslawski, M.N. Eshtiaghi, D. Knorr, *Starch/Stärke*, 48, 399-408 (1996).
 - 16) J.P. Douzals, J.M. Perrier-Cornet, J.C. Coquille, P. Gervais, *J. Agric. Food Chem.*, 49, 873-876 (2001).
 - 17) B.A. Bauer, D. Knorr, *J. Food Eng.*, 68, 329-334 (2005).
 - 18) K. Kawai, K. Fukami, K. Yamamoto, *Carbohydr. Polym.*, 67, 530-535 (2007).
 - 19) K. Kawai, K. Fukami, K. Yamamoto, *Carbohydr. Polym.*, 87, 314-321 (2012).
 - 20) 菅野長右門, 木泰華, 萩原敏夫, 飴谷美智子, 東徳洋, “高圧生物科学と高圧技術”, 鈴木敦士, 林力丸編, p. 109-116 (1997, さんえい出版).
 - 21) 本間一男, 芳賀紀之, “生物と食品の高圧科学”, 林力丸編, p. 325-330 (1992, さんえい出版).
 - 22) 土井悦四郎, 清水篤, 北畠直文, “生物と食品の高圧科学”, 林力丸編, p. 171-177 (1992, さんえい出版).
 - 23) 山本克博, 化学と生物, 37, 375-380 (1999).
 - 24) 鈴木敏郎, 松本信二, 鴨居郁三, “生物と食品の高圧科学”, 林力丸編, p. 288-292 (1992, さんえい出版).
 - 25) Y. Ikeuchi, H. Tanji, K. Kim, A. Suzuki, *J. Agric. Food Chem.*, 40, 1751-1755 (1992).
 - 26) Y. Ikeuchi, H. Tanji, K. Kim, A. Suzuki, *J. Agric. Food Chem.*, 40, 1756-1761 (1992).
 - 27) 又平芳春, 良知昭吾, 坂口幸政, 山口孝司, 坂井和男, 石川正人, “高圧バイオサイエンス”, 功刀滋, 嶋田昇二, 鈴木敦士, 林力丸編, p. 288-295 (1994, さんえい出版).
 - 28) 和勁松, 佐藤和寛, 萩原敏夫, 東徳洋, 菅野長右門, 日本農芸化学会大会講演要旨集, 263-263 (2005).
 - 29) 安田篤史, 望月恵三, 清水孝雄, 鈴木敦, “高圧科学と加圧食品”, 林力丸編, p. 176-180 (1991, さんえい出版).
 - 30) 金品昌志, 松木均, 高圧力の科学と技術, 4, 223-230 (1995).
 - 31) 金品昌志, 松木均, 高圧力の科学と技術, 9, 213-220 (1999).
 - 32) Y. Suzuki, G. Sasaki, T. Matsui, K. Nakajima, K. Tamura : *J. Phy. Chem. B*, 109, 3222-3226 (2005).
 - 33) 鈴木良尚, 佐崎元, 澤田勉, 宮下哲, 小松啓, 田村勝弘, 高圧力の科学と技術, 13, 149-156 (2003).
 - 34) 淵上倫子, 高圧力の科学と技術, 9, 191-198 (1999).
 - 35) M. Fuchigami, A. Teramoto, “Advances in High Pressure Bioscience and Biotechnology”, ed. H. Ludwig p. 493-496 (1999, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg).
 - 36) 山崎彬, 高圧力の科学と技術, 6, 182-186 (1997).
 - 37) 山崎彬, 高圧力の科学と技術, 6, 236-241 (1997).
 - 38) 室越章, 日本水産学会誌, 70, 671-673 (2004).
 - 39) 岡崎尚, 重田有仁, 青山康司, 食品と容器, 48(8), 436-440 (2007).
 - 40) 岡崎尚, 重田有仁, 青山康司, 食品と容器, 48(9), 508-516 (2007).
 - 41) S. Koseki, K. Yamamoto, *Int. J. Food Microbiol.*, 110, 108-111 (2006).
 - 42) 田邊学, 食品と容器, 48, 628-635 (2007).
 - 43) I. Hayakawa, S. Furukawa, A. Midzunaga, H. Horiuchi, T. Nakashima, Y. Fujio, Y. Yano, T. Ishikura, K. Sasaki, *J. Food Sci.*, 63, 371-374 (1998).
 - 44) E.P. Black, J. Wei, S. Atluri, D.E. Cortezzo, K. Koziol-Dube, D.G. Hoover, P. Setlow, *J. Appl. Microbiol.*, 102, 65-76 (2007).
 - 45) K. Yamamoto, K. Morimatsu, L. Zhong, H. Baum, T. Inaoka, K. Kimura, Book of Abstracts, 8th International Conference on High Pressure Bioscience and Biotechnology, Nantes, France, 15-18 July (2014).
 - 46) S. Koseki, K. Yamamoto, *Int. J. Food Microbiol.*, 116, 136-143 (2007).
 - 47) 岩橋均, 環境技術, 31, 679-685 (2002).
 - 48) 笹川秋彦, 山崎彬, 山本美穂子, 佐藤悠子, 山田明文, 第45回高圧討論会講演要旨集, p. 66-66 (2004).
 - 49) 杵淵美倭子, 関谷美由紀, 山崎彬, 山本皓二, 日本食品科学工学会誌, 46, 323-328 (1999).
 - 50) <http://avure.com/>
 - 51) <http://www.hiperbaric.com/en/>
 - 52) 山本和貴, ソフト・ドリンク技術資料, 171, 1-18 (2013).
 - 53) 山本和貴, 小関成樹, 農業技術, 63, 69-77 (2008).
 - 54) 山本和貴, 小関成樹, 食品と容器, 48, 150-154 (2007).

(原稿受付: 2015年4月30日)

解説

緑茶の亜臨界水抽出による苦渋味改善製品の開発

著者紹介



え とう ひで お
衛 藤 英 男

静岡大学非常勤講師
〒424-0901 静岡県静岡市清水区三保857-11
E-mail: srqe4yjl@qc.commufa.jp

1972年静岡大学大学院農学研究科修士課程修了。同年名城大学助手。1988年静岡大学助教授。1994年教授を経て、2013年静岡大学名誉教授。連続式亜臨界水抽出機の利用研究に従事。日本食品科学工学会会員。博士（農学）。

1. はじめに

緑茶 (*Camellia sinensis* L.) は、カテキンの効果が明らかとなり、抗酸化作用、癌抑制作用、コレステロール低下作用などがあげられる。そのため、カテキン摂取による健康効果が期待されている。市場には、ペットボトル飲料の緑茶が多種類あり、中には高濃度カテキン含有の製品もある。しかし、緑茶カテキンは強い苦渋味を有するため、それを抑制する加工技術の研究開発が盛んに行われている。添加剤としてサイクロデキストリン、キトサン混合物や大豆たんぱく質添加が報告されている。しかし、これらの添加素材は緑茶の味や香りに影響し、コストが大きくなるなどの問題点がある。高濃度カテキンを含有する緑茶抽出法として、熱水抽出、加圧抽出や酵素反応による抽出および有機溶剤（エタノールなど）抽出が報告されている。これらの方法においては抽出時間が長いことや高温の抽出であることなどから香気の抽出には不適當である。そこで、添加物等を使用しない亜臨界水抽出（SWE）の技術を用いて緑茶の味・香りの改善を行った。

SWEは、高温と圧力で液体状態を保ち、優れた抽出法である^{1),2)}。水は、374度、22 MPaで臨界点を示す。この臨界点以上の領域を超臨界水と呼び、これより低い領域を亜臨界水と呼ぶ（図1）。亜臨界水の領域では、水の比誘電率は常温常圧におけるメタノールやアセトンに等しく、イオン積も大きく酸または塩基触媒として作用する。水は、温度と圧力でイオン生成物となり、また有機溶剤の性質を持つ

ため、人体にとっても無害で環境にやさしい抽出方法である（図2）。

過去の研究で、SWEを用いた食品加工を報告したが、まだ多くの不明な点があり、より効果的な利用法を考案する必要がある。緑茶抽出へのSWEの利用は重要で、将来的には他の食品への応用や他分野への展開が期待される^{3),4)}（図3）。

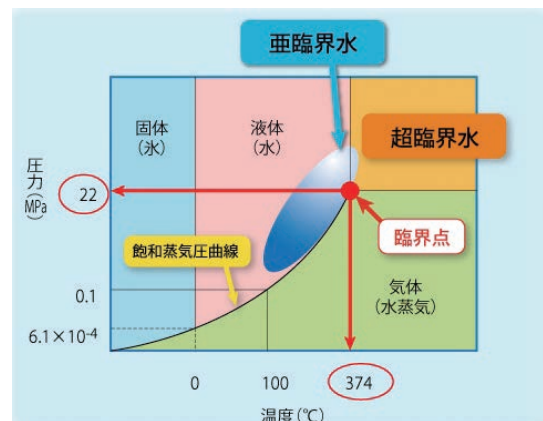


図1 水の状態図

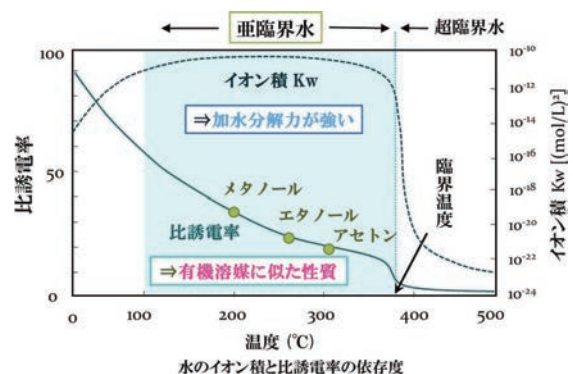


図2 亜臨界水の特徴

著者が行った研究では、一般の熱水抽出および加圧抽出と比較している。その結果、渋味を抑制していることがわかった。その要因を味覚センサー分析、におい識別分析、タンパク質、アミノ酸、総糖質、水溶性ペクチン、各カテキン類、カフェインを分析し、その機構を明らかにした。

2. カテキン抽出量とその特徴

緑茶(18g)中の総カテキン含量を各抽出法で調べた。その結果、熱水抽出では100ml中317mg、加圧抽出では333mg、SWEでは309mgで、各抽出法とも高濃度で緑茶からカテキンを抽出した。

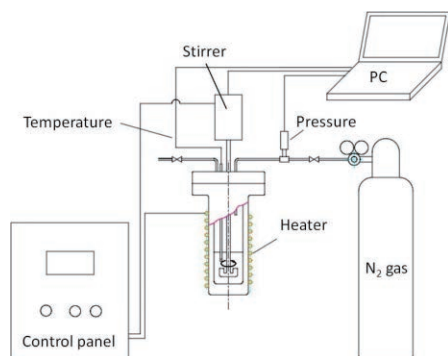


図3 バッチ式亜臨界水抽出装置

3. 官能評価

カテキン含有量を160mg/100mlになるように調整して、官能評価を12名の専門家によって行った。その結果、苦渋味は熱水抽出が強く、飲みやすさ、香りともにSWE、熱水抽出、加圧抽出の順であった(表1)。SWEは優れた抽出法であり、苦渋味の抑制効果を示した。

表1 官能評価での比較

	Hydrothermal extraction	Pressurized extraction	Sub-critical water extraction
Temperature	90℃	120℃	130℃
Pressure	—	0.2 MPa	3.0 MPa
Extraction time	10 min	15 min	1 min
Bitterness/Astringency	Strong	Strong	Weak
Ease of drinking	Normal	Bad	Very good
Fragrance	Normal	Bad	Good

4. 味覚センサー分析を用いた味の評価

抽出物の味を化学的に解明するため、緑茶の熱水抽出物を基準として、味覚センサーを用いて分析を行った。苦味、渋味、旨味および酸味のセンサーを用い、口に含んだ瞬間の味(先味)と飲み込んだ後に残る持続性のある味(後味)も評価した。加圧抽出物は、酸味0、苦味(先味)+0.18、渋味(先味)-1.9、旨味+0.56、苦味(後味)+0.40、渋味(後味)+0.78、コク+0.21であった。SWE抽出物は、酸味0、苦味(先味)-0.95、渋味(先

味)-5.04、旨味+0.22、苦味(後味)+0.19、渋味(後味)-2.22、コク+0.35であった(図4)。この結果、SWEは他の抽出法より渋味の先味および後味を大きく抑制していることがわかった。この結果は、官能評価とほぼ同じであった。

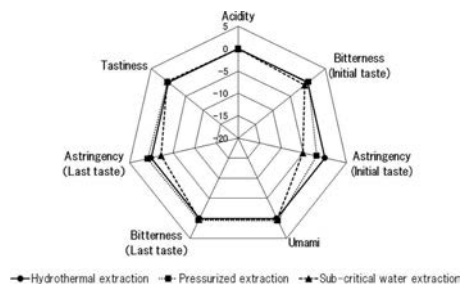


図4 味覚センサーによる味の評価結果

5. におい識別分析による香りの評価

におい識別分析装置を用いて、香りの評価を行った。9種の基準ガスを測定し、センサー出力を表現ソフトで評価した。その結果、硫化水素、アンモニア、有機酸のような不快な臭いは、加圧抽出で高かった。SWEの香りは熱水抽出と近似であり、類似した香気組成であることが示された(図5)。

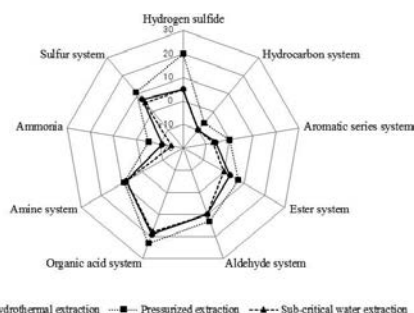


図5 におい識別分析の結果(各6回の平均値)

6. タンパク質およびアミノ酸量

各抽出物のタンパク質およびアミノ酸量を測定した。タンパク量は1mL中に熱水抽出で96.5mg、加圧抽出で100.9mg、SWEで87.1mgであった。SWEは、他の方法よりタンパク質量が低いのは、SWEにおける加水分解が起こっていることが考えられた。アミノ酸としてはセリンとアルギニンが増加した。アルギニンは緑茶中の重要なアミノ酸で味や美味しさに関係している。また、アスパラギン酸、テアニン、アラニン、チロシンおよびヒスチジンが減少した。

7. 全糖および水溶性ペクチン量

SWEでは、水溶性ペクチン量において熱水抽出

の約4倍、加圧抽出の約2倍であった。糖質と水溶性ペクチンは、カテキンの苦渋味をマスキングすることが報告されており、ポリフェノールの渋味の研究ではペクチンが抑制したという報告がある^{5),6)}。そのため、カテキン水溶液にペクチンを加えて、味覚センサーで分析したところ、明らかにガレート型カテキンのEGCGとECGの渋味を抑制していた。

8. カテキン類およびカフェイン量

各抽出物のカテキン類およびカフェイン量を測定した。SWEでは、機能性が高いとされるEGCGに減少は見られなかった。それに対して、美味しくないEGCは減少した。また、カフェインについては大きな変化は示されなかった（表2）。

表2 各抽出物に含まれるカテキン、カフェイン、アミノ酸および水溶性ペクチン量

	Hydrothermal extraction (mg/100ml)	Pressurized extraction (mg/100ml)	Sub-critical water extraction (mg/100ml)
EGCG	131.0±3.7	120.6±2.3	143.0±6.5
ECG	19.2±0.7	18.6±1.3	8.8±1.3
EGC	48.2±0.9	34.0±0.5	41.5±1.0
EC	36.0±0.2	29.8±1.2	15.8±0.4
GCG	31.1±0.8	53.1±2.1	18.9±0.9
CG	2.4±0.3	4.3±0.7	3.4±0.4
GC	37.6±1.2	57.5±1.2	62.5±1.5
C	6.1±0.9	9.7±0.9	11.7±1.8
Caffeine	37.8±1.1	39.6±1.3	36.4±1.1
Serine	14.3±0.2	15.1±0.1	19.1±0.1
Glutamic acid	28.8±0.5	29.3±0.3	24.7±0.2
Glycine	0.5±0.0	0.6±0.0	0.8±0.0
Arginine	15.4±0.2	17.1±0.1	22.1±0.3
Aspartic acid	4.0±0.1	4.0±0.1	2.6±0.1
Theanine	46.3±0.3	46.4±0.4	48.0±0.3
Alanine	11.7±0.4	11.9±0.6	10.6±0.3
Tyrosine	9.4±0.3	9.3±0.1	8.4±0.1
Histidine	1.8±0.1	1.8±0.1	1.3±0.0
Total sugar	197.4±4.9	201.9±7.2	269.7±7.2
Water-soluble pectin	6.1±0.3	13.7±0.8	23.5±0.9

9. おわりに

以上の結果をまとめると、緑茶の亜臨界水抽出は高濃度カテキン含有でありながら渋味は抑制されていた⁷⁾。カテキンの渋味抑制においては水溶性ペクチンによるマスキング効果であると考えられた。また、SWEは水との反応を利用したもので、コストが安く、安全性も高い加工方法である。味が良く機能性に富む緑茶の生産にとって効果的な新しい抽出法であることが示唆された。

近い将来、細胞レベルの分析によってカテキンの苦渋味抑制作用を明らかにし、そのメカニズムを解明したいと考えている。

参考文献

- 1) Kruse, T., Dinijus, E. : J. Supercritical Fluids, Vol. 39, p. 362 (2007)
- 2) Basile, A., Jimenes-Carmona, M.M., Clifford, A.A. : J. Agric. Food Chem., Vol. 46, p. 5205 (1998)
- 3) 植田充美, 近藤昭彦: エコバイオエネルギーの最前線, シーエムシー出版, (2005)
- 4) 吉田弘之: 亜臨界反応による廃棄物処理と資源・エネルギー化, シーエムシー出版, (2007)
- 5) Hayashi, N., Ujihara, T. and Kohata, K. : Bioshi. Biotech. Biochem., Vol. 69, 1306 (2005)
- 6) Narukawa, M., Kimata, H., Noga, C. and Watanabe, T. : Int. J. Food Sci. Technol., Vol. 45, 1579 (2010)
- 7) Miyashita, T., Etoh, H. : Food Sci. and Technol. Res., Vol. 19, p. 471 (2013)

(原稿受付: 2015年3月16日)

解説

食品用超高压処理装置

著者紹介



やま うち たか のり
山内孝紀

(株)神戸製鋼所

〒676-8670 兵庫県高砂市荒井町新浜2丁目3-1

E-mail: yamauchi.takanori@kobelco.com

1987年3月、東北大学 精密工学科卒業、同年4月(株)神戸製鋼所 入社現在に至る。HIP、CIP、プレス他高压装置の設計業務に従事。

1. はじめに

一般に食品加工には熱が用いられている。焼く、煮るなどの加工調理、凍結、解凍なども温度を変えることで行い、殺菌も加熱殺菌が主流である。一方で、自然界には状態を変える因子として、熱(T)のほかに圧力(P)がある。調理、加工などを熱に代わって圧力で行ったらどうなるか、と考えたのが、食品の超高压処理技術の始まりである。古くは生物、有機化合物に圧力をかけ、状態を観察した記録はあったが、実験室レベルにとどまっていた。1985年に出版された特許¹⁾には液状食品の殺菌装置、方法が示されており、1987年頃に超高压処理食品の研究が本格化した。1990年、世界初の超高压処理された食品であるジャムが日本で販売され、その後、食品の超高压処理技術は世界に広がり、今では、ジュース、ハム、米飯、魚醤などに超高压処理適用の可能性が広がっている。近年は貝の殻剥きなど、省力化にも適用範囲が広がり、食品の超高压処理技術は、今後、発展が期待される分野である。

2. 食品用超高压処理装置

2.1 CIP装置

食品の超高压処理には静水压加压装置(CIP装置)が用いられている。パスカルの原理に着目した特許が図1に示す1913年のH.D. Maddenの特許であり、これを応用して、米国のWestinghouse Lamp Co. が耐熱金属粉末からビレットを製作したことが冷間等方加压の最初の試みであったと言われている²⁾。CIP

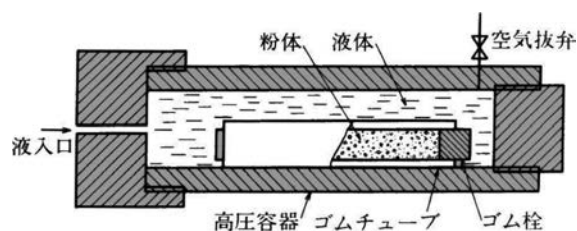


図1 H.D. Maddenの特許図

装置は、ゴム型の中に粉末を充填し、そのゴム型を高压容器の中に入れ、高压容器の中の流体の圧力を上げることによりゴム型の中の粉末に均等に力を加えて成形するので、密度が均一な成形体を得ることができる。工業的には50MPa～700MPaの圧力で使用され、研究機などにおいては1.5GPaの圧力の実績もある。CIP装置の構成を図2に示す。ゴム型を入れる空間は高压容器、上下蓋で構成され、この空間に増圧機で圧媒を押し込むことで、圧力を発生させる。発生した圧力の高压容器周方向の力は高压容器で支え、高压容器軸方向の力は上下蓋を介して枠型構造のプレスフレームで支えている。高压容器軸方向の力の支持方式には、高压容器と蓋に穴を設け、ピンで受けるピンクロージャ方式、高压容器と蓋にネジを加工し結合するネジ蓋方式などがある。ピンクロージャ方式、ネジ蓋方式は安価であるが、ピンやネジに応力集中が発生し、非常に大きい容器軸方向の力を支えるには強度設計、安全管理が非常に難しい。弊社では容器軸方向の力を枠型構造物で

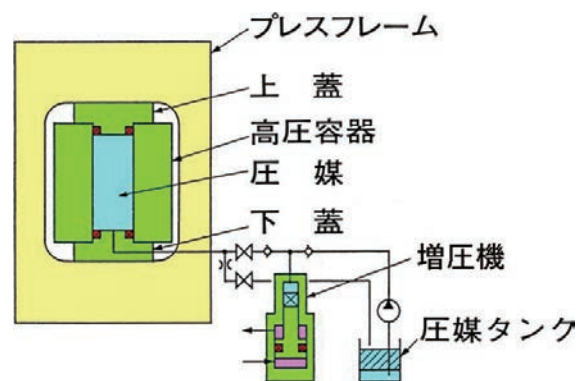


図2 CIP装置構成

支えるプレスフレーム方式を採用している。プレスフレーム方式は強度設計の精度が高く、高応力部の加工、点検が容易であり、安全管理上、非常に優れた方式である。

高压容器は圧力と直径、コスト面を考慮に入れ、単層、多層円筒を適切に選択している。高压容器内面に圧縮応力を発生させる多層容器は疲労寿命を同一にした場合、容器肉厚を薄くすることができ、装置全体のコストを低く抑えることができる。多層円筒は圧入方式、焼嵌め方式が用いられるが、装置が大型になった場合、高張力のピアノ線を内筒に巻きつける線巻方式が採用される。ピアノ線の張力を設計、制御することにより、ほかの方式より高压容器肉厚を薄くすることができ、プレスフレームの小型化にも適用でき、大型の装置におけるコスト低減効果は非常に大きい。

2.2 食品用高压処理装置

CIP装置を食品に適用するためには、清浄性が必要である。通常のCIP装置は高压容器、上下蓋などに鍛鋼品を使用しているため、防錆効果を目的として圧媒に水溶性の油などを添加している。食品用の高压処理装置では、清浄性の観点から圧媒に飲料水を用いるため、高压容器、上下蓋には高強度のステンレス鋼が使用される。包装された食品の高压処理では、圧媒に飲料水を用いれば十分なことが多いが、液状食品に直接圧力を作用させる場合は、高压シール部の摩耗粉などの混入の可能性があるため、処理物と圧媒を別々にするフリーピストン方式³⁾、可撓壁方式⁴⁾が考案されている(図3)。可撓壁方式では高压容器は加圧側の圧媒しか触れないため、加圧側の圧媒に水溶性の油を添加することが可能であり、高压容器、下蓋に従来の鍛鋼品を使用することができ、装置のコスト低減が図れる。

食品は製品単価が安いいため、初期費用として装置

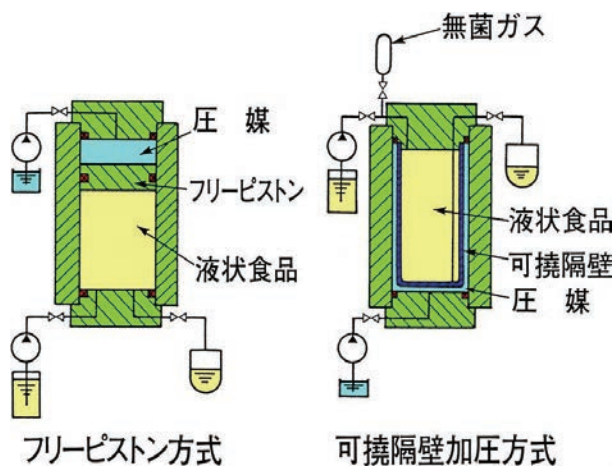


図3 フリーピストン方式と可撓隔壁加圧方式

価格の低減、ランニングコストの削減が重要となってくる。線巻技術による装置軽量化による装置価格の低減、差圧回収運転⁵⁾による省エネルギー化、バケット旋回方式⁶⁾によるハンドリングタイム、サイクルタイムの短縮などによりランニングコストの削減を行ったものが、図4に示す大量生産用食品超高圧処理装置である。圧力は100MPa～400MPa、高压容器容量は2筒で総量200リットル～300リットルの仕様範囲でシリーズ化している。圧媒の温度は4～80℃の処理が可能である。

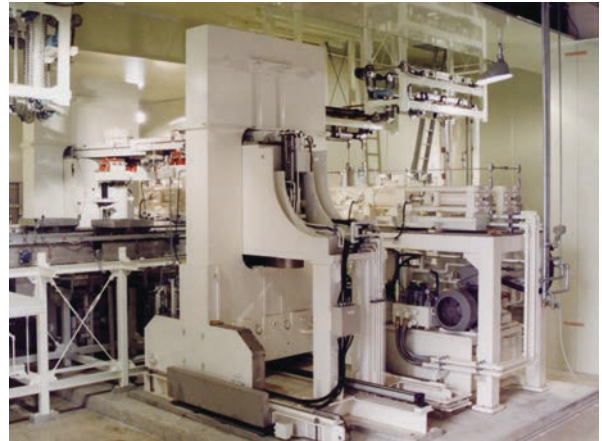


図4 大量生産用食品超高圧処理装置

3. 横型食品用超高圧処理装置

3.1 概 略

従来のCIP装置、食品用超高圧処理装置は圧力容器が鉛直方向に設置されることが一般的であった。圧媒が液体であることから、上蓋を開けることにより処理品を出し入れすれば、圧力容器内圧媒の給排水が最小限にできることが大きな理由である。ただ、圧力容器が鉛直である縦型は、装置が大型化すると、設置建屋の高さを高くするか、ピットを設置しなければならない。また、処理物のハンドリングのためのスペース、自動化のためのハンドリング装置を設置する場合はさらに建屋高さもしくは深いピットが必要になってくる。これらの問題点を解決するためには、圧力容器を水平方向に設置した横型のCIP装置が有用である。弊社では、2015年3月に貝の殻剥きを主用途とした横型食品用超高圧処理装置を食品加工会社に納入した(図5)。

3.2 特 徴

3.2.1 コスト低減

圧力容器が水平方向に設置されるため、装置が大型になると、設置面積は大きくなるが、高さ方向を低く抑えることができる。超高圧処理装置は高压に耐える圧力容器、プレス力量を支持するプレスフ



図5 横型食品用超高压処理装置

レームなどがあるため、質量は大きくなるが、設置面積が大きくなると縦型よりも基礎荷重は軽減され、トータルコストを低減することができる。超高压処理装置は圧力容器の断面積に圧力を掛けたいわゆるプレス力量が装置価格に大きな影響を与える。よって、同じ処理室容量では、圧力容器直径が大きく、圧力容器長さが短い物より、圧力容器直径が小さく、圧力容器長さが長い物の方が装置価格を低減できる。圧力容器が細長くなると縦型よりも横型の装置の方が圧力容器の倒れ防止の配慮が必要なく、ベース剛性などが確保しやすい。

3.2.2 清浄性、メンテ性

従来用途の横型装置では、処理品の出し入れ時に左右の蓋を開閉することで圧媒が排出される。そのことは短所であったが、清浄性を求める食品用高压処理装置は処理ごとに圧媒を交換することも多く、蓋の開閉で圧媒が一気に排出されることは長所となる。また、両方の蓋が開閉されるので、圧力容器内に圧媒溜まりができにくく、また、容器の洗浄も容易である。蓋に装着されている高压シール部は処理ごとに圧力容器から外されるので、高压シールの潤滑、清掃、メンテも容易である。

3.2.3 ハンドリング装置

縦型の装置は処理品の挿入、搬出は上蓋1箇所で行う。それゆえ、処理後の処理品を出すまでは新たな処理品を入れることができず、サイクルタイムは長くなる。横型の装置ではそれぞれの蓋から処理品

の搬出と挿入をほぼ同時に行うことができ、サイクルタイムの短縮が図れる。また、装置高さの利点同様、横型の装置の処理品ハンドリング装置は高さが低く、平面的に広いので、ハンドリング装置の剛性も高くすることができる。縦型の装置のハンドリング装置は上昇／下降と横行の2方向の移動が必要であるが、横型は左右の1方向、それも一方方向であるため、アクチュエータも簡便である。これらのことから、ハンドリング装置の製作コストを抑えることができる。

縦型の装置は処理品の挿入と搬出が同じところであるが、横型の装置は挿入、搬出がそれぞれ異なっており、しかも一定しているので、処理品のトレーサビリティが確保しやすい。

4. おわりに

弊社は圧力700MPa～1 GPaまで昇圧できる食品超高压処理装置を公的研究機関、大学などに20年以上販売しており、基礎研究を支援してきた。近年、実際の食品への適用、商品化が進んでおり、縦型の大量生産用食品超高压処理装置を開発し、市場に供給し、さらに今年、食品用超高压処理により適している横型食品用超高压処理装置を納入し、シリーズ機も整備した。今年8月には弊社テクニカルセンターにテスト対応、商品開発を目的として600MPa、50リットルの横型高压処理装置を設置する。今後も客先ニーズを的確に捉え、先進的な装置を創造し、食品高压処理の発展に微力ながら貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 日本国特許 No.2128334
- 2) 小泉光恵／西原正夫 編著：等方加圧技術，日刊工業新聞社（1988）
- 3) 日本国特許 No.2135806
- 4) 日本国特許 No.2774683
- 5) 日本国特許 No.1896765
- 6) 日本国特許 No.3997100

（原稿受付：2015年4月27日）

解説

植物工場に活用されるフルードパワー

著者紹介



谷 尾 和 彦

SMC株式会社
〒101-0021 東京都千代田区外神田 4-14-1
秋葉原UDXビル
E-mail : tanio@smcjp.co.jp

1992年SMC株式会社入社、営業開発部に配属。
1992年大宮営業所に出向、1995年営業開発部に
帰属、2007年営業企画部に異動、2012年植物工
場の市場を現場で調査GPECに出展、2014年マー
ケティング本部販売促進部に異動

1. はじめに

植物工場の普及は、2011.03.11忘れもしないあの出来事によるところも大きい。今なお続いている復興の一助として植物工場が食品の安心・安全、雇用の促進に寄与したことは記憶にも新しい。当時の東北地区の農業は、津波による塩害・原発による風評被害と2次災害とも言われる状況であった。このような背景の中、弊社は、施設園芸・植物工場展(GPEC)*¹に2度にわたり出展している。市場動向を見るには非常に良い機会となった。

*1 「施設園芸」と「植物工場」に特化した国内唯一の専門展示会。
2年に1回の開催。

2. 植物工場との出会い

我々がこの存在をビジネスと結びつけ始めたのは、リーマンショックの最中の2009年からである。某建設業界の営業マンから「工場の遊休地を有効活用しませんか?」「国の食品自給率を上げませんか?」「環境のため、屋上の緑地化、壁面の緑地化を考えませんか?」とのセールストークから、国の動き(農林水産省、経済産業省からの補助金、産学共同プロジェクト等)が次々と具体化、実施されていく様子が見えてきた時期でもあった。今回の執筆では、具体的な機器の仕様よりも研究途上にある植物工場とその分類や求められている概要にふれていく。

3. 植物工場の種類と分類

植物工場には、大きく2つの種類に大別分される。一つは、完全閉鎖型植物工場、もう一つは、太陽光併用型植物工場である。植物の成長に不可欠な『光』をどのように獲得、摂取させるか(しているか)の差になる。当然コストにも影響する。

また、規模においては表1のような見方もできる。大規模になると自動化・省力化の要求も大きなファクターとなってくる。

表1 植物工場の規模による分類

小規模	中規模	大規模
家庭菜園(ハウス メーカーが、エコハ ウス(スマートハ ウス)として家の 中で植物を育てら れるシステムを内 蔵。)	外食産業で、植物 育成ユニットを設 置し、お客様に収 穫してもらいそれ を料理する。	一般的な工場。製 造物が野菜。

4. 展示会に出展 広がりを実感

研究レベルから抜け出せない状況の2012年7月25日-27日『がんばろう!ニッポンの農業 つなげよう!施設園芸の絆』というキャッチコピーで実施されたGPEC2012に、弊社は、『工業技術を植物工場へ』を掲げ、養液管理・CO₂管理・省エネ、省工数とテーマ分類をして、フローセンサや電磁弁、プロセスポンプ、配管材をPRしている(図1)。



図1 GPEC2012でのパンフレット

徐々に実用化が進み、工場遊休地を有効に使用した例や、クリーンルームを植物工場へ返還を遂げた例が散見され、機能性野菜といった露地野菜との差別化が明確になってきた。2014年7月23日-25日『活かそう 日本の技術力!』をキャッチコピーに実施されたGPEC2014. にも連続の出展で、『高効率植物工場の実現に向けて』を謳い、前回以上の進捗を見せるため、環境制御・自動化省力化・ユニットシステムを提案した。使う側の要望に応え、見える化を実現するデジタル表示のセンサ類、システムを組んで具体的な用途例、工業技術の応用を訴えた(図2)。



図2 GPEC2014でのパンフレット

この2年間で大きく変わったのは、新規参入企業が増えた事である。また、表2のように業種も多岐に渡る事が実感としてある。そして、確実に実用化され経営として成り立つ業態に成長してきたことが非常に大きい。

表2 参入企業とその役割

ゼネコン	建屋
エンジニアリング企業	システム構築(環境制御)
資材関連企業	配管、関連パーツ
電気	『光源』としてLED
IT企業	情報収集、クラウド化
種苗メーカー	飼育野菜選別、品種改良
小売り	デパート、スーパー
その他	コンサルティング 他

5. 植物工場に必要な制御

植物工場には、環境制御と言われる三つの項目がある。①温湿度(空間および養液)②光(太陽光, LED, (色), 蛍光灯)③水(養液制御)これら三つをバランスよく、その植物に合った量をコントロールして与えると早く+大きく育つことになる。フルードパワー機器として活躍できる場は、図3で示す③の水(養液制御)の部分が多い。

- A. 圧送 …→養液の循環, 原液の希釈
- B. 濾過 …→循環養液の汚れ除去
- C. 成分調整…→N窒素 Pリン酸 Cカリウムの調合
- D. 温度管理…→養液温度管理

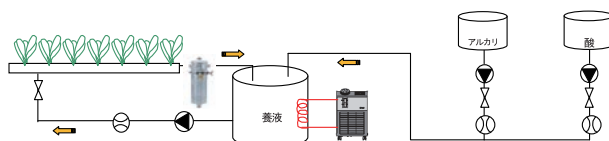


図3 一般的な養液制御略図

5.1 使用機器例

A. 圧送

●プロセスポンプ



図4 プロセスポンプ

養液は、原液を希釈して使用される。希釈する際にも使用できるし、循環用としても使用できる。弊社のプロセスポンプ(図4)は、通す液体の特性に合わせて材質を選択できるダイヤフラムポンプになっている。流量もサイズによって選択できるので使用しやすい。使用条件として、コンプレッサエア(0.2-0.7MPa)が必要である。

B. 濾過

●クイックチェンジフィルタ



図5 クイックチェンジフィルタ

養液を循環させていると植物の根や葉等のゴミが混ざってくる。取り除くことにより機器の寿命を延ばすことができる。図5のフィルタは、エレメント材質も選択でき、マイクロメッシュを選択すると洗浄し繰り返し使用できる。また、濾過度も選択することにより洗浄する頻度も変わる。エレメント交換も工具いらずで、簡単である。

C. 成分調整

●3色表示 デジタルフロースイッチ



図6 3色表示 デジタルフロースイッチ

各ポイントで瞬時流量、積算流量が確認でき、養液の成分分析の助けとなる。図6は、絞り弁付および温度センサ付も選択できるユニット製品である。数値化、見える化へ繋がる。カルマン渦方式である。

D. 温度管理

●サーモチラー



図7 サーモチラー

図7のサーモチラーは、軽量・コンパクトで設定温度範囲が5～40℃の間接温調タイプである。

シリーズによっては、屋外に設置できるものもラインナップしている。

E. 配管等

●Sカプラーステンレスタイプ (SUS304)



図8 Sカプラーステンレスタイプ (SUS304)

図8のSカプラーを、配管手法の一つとして紹介する。プラグとソケット両方にチェック弁を内蔵している。液だれ量は0.22～0.77m³/回である。ノングリース仕様で、サイズ1 1/4まで用意されている。

●FEPチューブ (フッ素樹脂)



図9 FEPチューブ (フッ素樹脂)

図9は、塩ビ配管の代わりに下記継手と合わせて使用できる配管材である。4色用意されており、成分により識別使用可能である。食品衛生法適合で、また、FDA (米国食品医薬品局) §177-1550溶出試験に適合している。



図10 SUS316ワンタッチ管継手

●SUS316ワンタッチ管継手

図10は、樹脂チューブがワンタッチで施工できる継手である。施工工数が大幅削減できる。ノングリース仕様で、食品衛生法に適合している。

F. その他

●2色表示デジタルフロースイッチ



図11 2色表示デジタルフロースイッチ

図11は、水周りでは無い、主に、完全閉鎖型植物工場で需要のある、CO₂の流量が直接計れる気体センサである。ボンベから注入されるCO₂の減り具合や、使用量を計測できる。

6. 成功している植物工場

●半導体工場のクリーンルームが実用化

国内の半導体メーカーの景気後退による遊休地の有効活用の一つに植物工場へ転換のニュースはいくつか報道されている。機能性野菜で成功した企業は、

生野菜が食べられない腎臓疾患者に着目し、低カリウム野菜を開発し販売している。最近では、メロンの栽培にも成功している。クリーンルームを活用し、塵埃を入れない、持ち込まない、発生させない技術が、植物工場の安心・安全・品質に活かされた形になる。今後、自動化・省力化が考えられアクチュエータの用途もこれから期待できる。人（作業員）が菌・埃の発生元であり、それらを排除する形になる。

また、安定供給で成功している例もある。テーマパークや遊園地のレストランでは、定食などにサラダが付いている。季節や天候によって提供できる内容やコストが変わっては不便であることから、そこに目を付けて流通を開発した。加工野菜にしてパッケージすれば皿に盛るだけでよく、便利なものとなっている。

7. まだまだ広がる植物工場

新興国では、経済成長や食の西洋化により、レタスやトマトなどの西洋野菜の市場が急速に拡大している。高い品質の農産物を安定して生産することができる植物工場の期待も高まっている。特に中東やモンゴルなどの乾燥地域、ロシアや中国北部などの寒冷地域、シンガポールなどのように需要に対して

農地の確保が難しい地域や土壌汚染が問題となっている地域などでは植物工場のニーズが期待できる。また、漢方薬の原料となる甘草は、使用できる大きさになるまで5-6年かかると言われている。環境制御により半年で収穫できるようになるという。

8. 最後 に

施設園芸が進化し、環境制御が整い植物工場へ発展していった経緯がある。すべての農業が植物工場になるわけではなく、必要なところで上手く活かされる技術である。まだまだ研究段階の項目もあるが、徐々に実用化されてきており、フルードパワー技術の提案できる部分が多く存在する。工業製品の品質、省エネ、省スペースを実現できる技術は、この分野でも十分に活用できる。今後、植物工場がもっと身近になり、まつたけやトリュフが安く食べられる日も近いかもしれない。

参考文献

- 1) 高辻正基：完全制御型植物工場 オーム社
- 2) 日本総合研究所 井熊均・三輪泰史：植物工場経営 明暗をわける戦略とビジネスモデル 日本工業新聞社

（原稿受付：2015年4月15日）

解説

ADSを搭載した食肉加工機

著者紹介



さとう いくや
佐藤 郁也

ワタナベフーマック株式会社 技術部
〒454-8527 名古屋市中川区露橋二丁目12番26号
E-mail : sato@foodmach.co.jp

1996年名城大学理工学部電気電子工学科卒業、
1996年ワタナベフーマック入社現在に至る。



図1 食肉の流通経路

1. はじめに

弊社は、昭和13年に食肉加工機械製作を事業とし設立された会社である。当初は欧州の手動式スライサーを研究し、スライサーの国産化を行った。現状では食肉加工機械メーカーとしてさまざまな機械を開発、製品化している次第である。

ここでは、「食肉流通」、「スライサーの種類と機構」を解説し、スライサーの技術とADS技術がどのように融合するかを「食品業界におけるADSの必要性」、「ADSを搭載した食肉加工機の開発」で解説する。最後に「今後の展望」について紹介する。

2. 食肉流通

食肉の流通経路としては、生体流通、枝肉流通、部分肉流通、精肉流通と4段階を経て消費者の元へ届いている(図1)。

生体流通とは生産者(農家)が育てた牛、豚など生きた状態での流通段階であり、生産者から家畜商、生産者団体などを経ていわゆると畜場へと体になるまでの流通経路のことである。

枝肉流通とは枝肉取引規格に基づいて行われる流通経路である。枝肉とは、と畜場でと殺された肉牛や肉豚を、血液や皮、頭部、内臓などを除去し、これを中心線に沿って背骨のところから2分割した半丸状のものである。

部分肉流通とは、肉の加工メーカーや問屋(卸工場)などで枝肉から部分肉へ加工された状態で流通される形態である。部分肉とは、枝肉を各部分に分

割して除骨後、余分な脂肪などを除去して整形したものでカット肉とも呼ばれる。

部分肉はさらに、厚切り、薄切り、かたまり、ひき肉など消費者の用途に合わせた精肉にカットし販売される。精肉化はさまざまな食肉加工工場で行われ消費者のもとへ届く¹⁾。

この最終段階が精肉流通であり、弊社の製品は主に精肉化される段階で使用される加工機械である。

3. スライサーの種類と機構

スライサーとは前述した精肉化される段階で使用される加工機械であり、用途に応じさまざまな種類が存在する。それは被加工物の状態(温度、大きさ)および消費者への最終商品形態により機械設計がなされる。

小売店やスーパーのバックヤードなどでは主にチルド状態の部分肉をスライスしトレイへ盛付けされたものが最終商品となるため、作業員自身が1台の機械を操作することになる。この機械は丸刃物が回転し、原料を搭載した肉箱が往復運動を行う。原料は肉箱が手前に戻った際に調整された厚みに機械的に送り出される。往復運動はインバータで速度を制御し作業員に合わせ運転を行う(図2)。

スーパーのバックセンターや飲食チェーンのセントラルキッチンなどの工場においては量産が求められる。そのため機械単体での生産量は勿論のこと、効率的なライン構成も要求される(図3)。

この機械は2枚の丸刃物をインバータで制御されたモーターで自転、公転させ原料のスライスを行う。

原料の送りについてはコンベアベルトをサーボモータで駆動し0.1mm単位の設定を行う。スライサーは、PLCで制御され原料をスライスする最適な速度で運転する(図4)。

冷凍食品加工においては冷凍原料(硬い肉)をスライスするための刃物と機構が必要となる。この機械は丸刃物が回転し、原料を搭載した肉箱が往復運動を行う。スライス厚みは肉箱が手前に戻った際に自重で落下し、厚みを決める板に落とす。この板は刃物と隙間を作りこのギャップでスライス厚みを設ける。往復運動はインバータで速度を制御し作業者に合わせ運転を行う(図5)。

とんかつなどの惣菜品に関しては一定重量でのスライスが要求されるため、単にスライス厚みの精度ではなく、重量精度を実現するための機構構築が要

求される(図6)。

この機械は前述した通りスライスした商品が一定重量になる機構を備えたスライサーである。スライス機構は、鎌状の刃物を回転させこの速度をインバータで制御する。原料送り機構については、サーボモータとボールネジを組み合わせて原料は演算された厚みで送る。

また重量を一定にする機構については、エアシリンダで原料を型に押し込み成形を行う。原料は個々の大きさが異なるため、型への押し込み量を自動で計測し、これを基にスライスする断面積を算出、送り量を決定する(図7)。

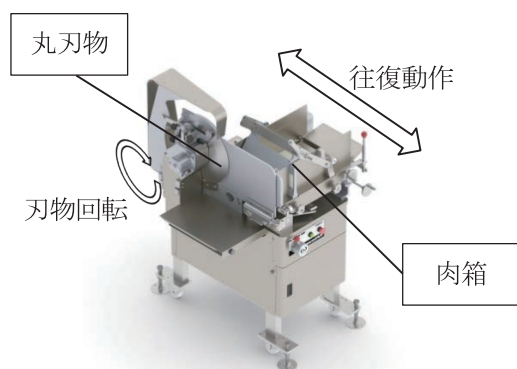


図2 生肉スライサー

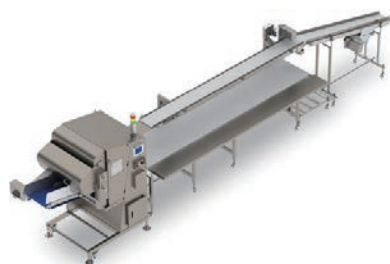


図3 量産生スライサー

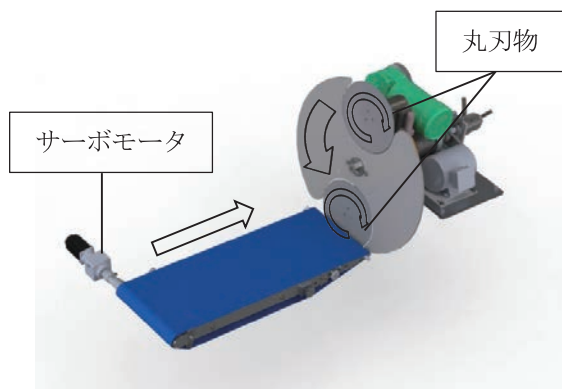


図4 量産生スライサーの機構



図5 冷凍スライサー



図6 定貫スライサー

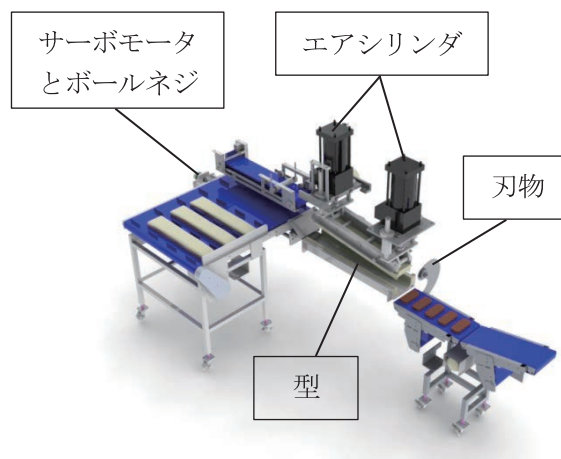


図7 定貫スライサーの機構

このようにスライサーは、さまざまな加工形態のニーズに合わせさまざまな種類、機構で対応する必要がある。

4. 食品業界におけるADSの必要性

「食の安心、安全」が叫ばれる中、機械の衛生面における安心、安全を確保するため衛生規格に適合した機械が必要になりつつある⁴⁾。

これらの規格については、HACCP、ISO22000、EHEDGなど、多くの衛生管理規格が存在しておりこれらの規格に適合した機械を製作する必要性が生じている。

HACCPは、Hazard Analysis Critical Control Pointの略である。危害をあらかじめ分析し(Hazard Analysis) その結果に基づき重要管理点(Critical Control Point)を定め監視する衛生管理手法である。ISO22000は、フードチェーン全体における食の安全を守るための仕組み。ISO9001とHACCPの二つの概念を融合し開発された規格である。

EHEDGは、European Hygienic Engineering & Design Groupの略である。欧州衛生工学設計グループ、本部はドイツにある。機械メーカー、食品メーカー、大学などの研究機関からなる協会である。ヨーロッパの規格作成に大きな影響力を持つ国際規格の原案である。

また、現状の食肉加工機で使用されている各駆動源の特質を比較してみると「電動」では防水・防滴などの対策でIP規格の規制を受けているが漏電などの問題が拭えない。「油圧駆動」では油漏れ、保守

時の油の流出対応。「空気圧駆動」ではコンプレッサーを含めるとエネルギー効率(駆動効率)はきわめて低く省エネルギーの観点から課題がある⁵⁾。

このような観点から、食肉加工業界において、さまざまなニーズに答えるため、「ADS」は食肉加工機に対し適していると判断した。

5. ADSを使用した食肉加工機の開発

5.1 ベースとなるスライサーについて

この機械は食肉加工品をスライスする加工機械である。スライサーは原料を投入するホルダー、丸刃物、厚みを決める板で構成され、この丸刃物を往復動作させることにより設定された厚みでスライスできる機械である。

スライス工程は図8の通りである²⁾。

- ① スライス厚み、スライス速度を設定する。
- ② 当て板を設定された厚みに移動させる。
- ③ 原料をホルダーに投入する。
- ④ 運転開始、丸刃物を回転させる。
- ⑤ 設定された速度で往復動作しスライスを行う。
- ⑥ スライスした商品は搬出コンベアで搬送される。

5.2 現行機の課題事項

- ① 洗浄工程におけるサニタリー性
防水対策を施していない箇所に、水がかからないように洗浄しなければならない。
- ② 衛生対策の腐心
作動油分による異物混入対策が必要。
- ③ 作業場の環境に起因する問題点
多湿・低温による防水、対策が必要。

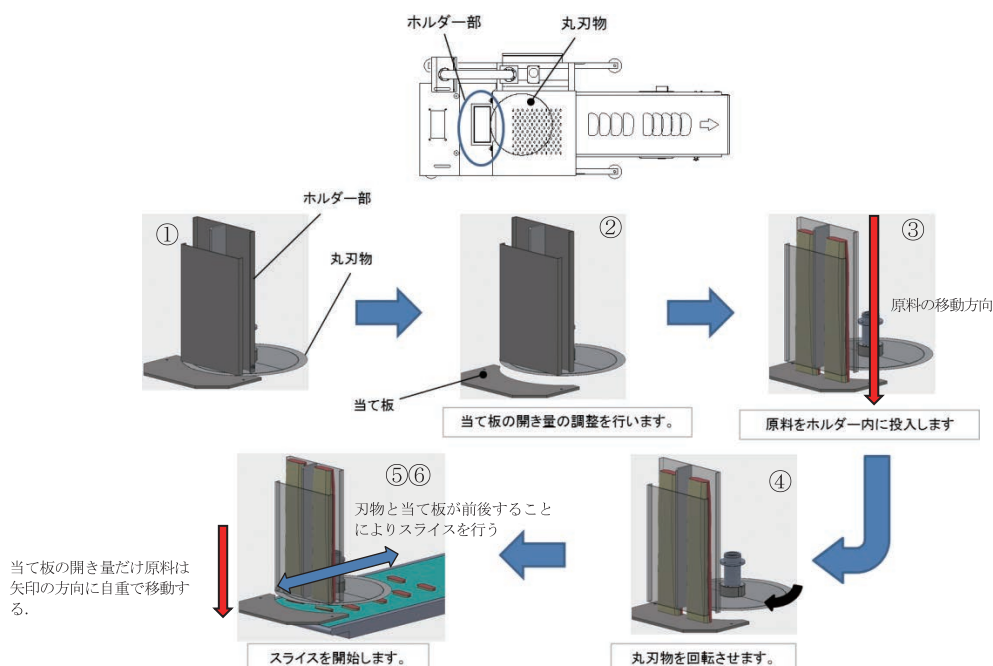


図8 スライス工程

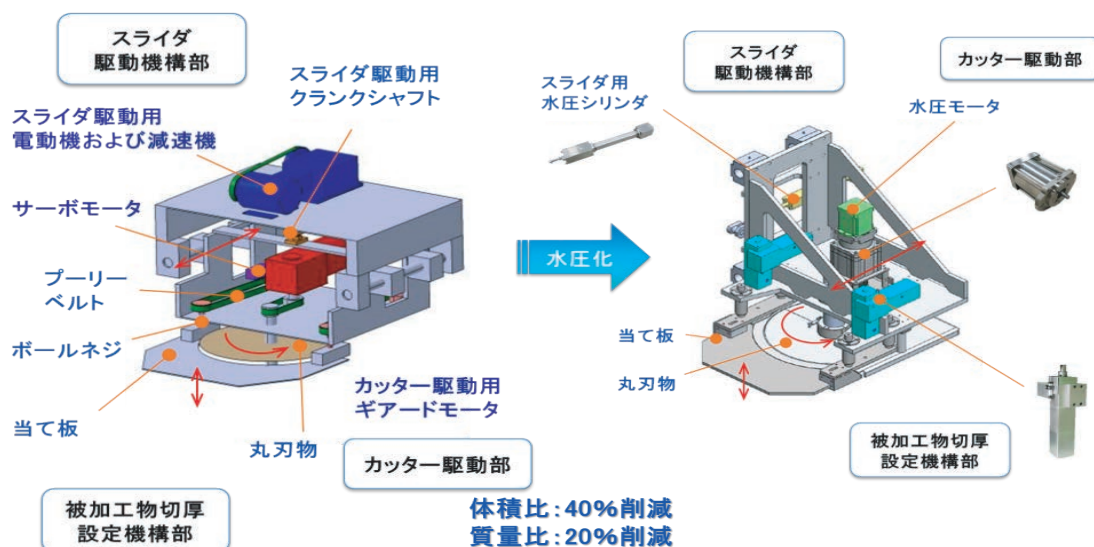


図9 機械概略図（現行機→ADS搭載機）

④ 機械的なロスの発生

各駆動部の電動機による回転運動を減速機やベルト掛けなどで行っているため機械的なロスが発生。

5.3 ADS搭載

図9に現行機を水圧化した各駆動部をイラストで示す。ADSを駆動源として搭載するスライサーを構築することで前述した課題事項を改善することが期待される。特に水圧シリンダを採用することにより直線方式で往復運動が得られ、回転運動と比較すると伝達効率の向上が期待できる。

5.4 ADS搭載スライサー総括

前述したADS駆動源としたユニット、アクチュエータを搭載したモニター機を製作し（図10）、基本的な動作、機能確認、およびユーザー様への持込みテストを実施した。結果は以下の通り

- ・現行機と遜色ないスライス状態を確認。
- ・洗浄工程におけるサニタリー性が向上。衛生規格（HACCP, ISO22000, EHEDGなど）に対応可能
- ・駆動部のスリム化を達成。スライダーユニット部体積比：40%削減 質量比：20%削減³⁾。

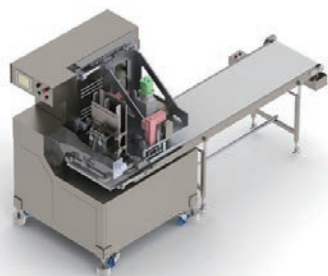


図10 ADS搭載スライサー

- ・液圧アクチュエータ搭載により、スライダーストロークの任意調整が可能（さまざまな商品に対応可能）

6. 今後の展望

食肉加工業界の社会的背景もここ数年で変化し、さまざまなニーズに答える必要性が上がってきた。このようなニーズに対応するためにも今までの技術だけではなく新しい食肉業界にあった技術を創出する必要がある。今回開発した機械でADSの可能性について理解することができた。今後はこのシーズを食肉業界のニーズにあわせるため、弊社のスライス技術とADS技術を融合させさらなる新機種を開発する予定である。なお今回開発したADS搭載スライサーは財団法人日本食肉生産技術開発センターの補助事業のもと、他企業と共同で実施した成果である。

参考文献

- 1) 「食肉がわかる本」 P20 財団法人日本食肉消費総合センター出版（2002年）
- 2) 宮川新平, 渡辺将博: ADSによるスライサーの開発 FOOMA技術ジャーナルVol. 8 No. 1 P 5-16 一般社団法人日本食品機械工業会（2011）
- 3) 大林義博, 佐藤郁也: ADSの食肉加工機への適用 平成25年春季フルードパワーシステム講演会 講演論文集, P 131-132 一般社団法人日本フルードパワーシステム学会（2013）
- 4) IFPEX 2014フォーラム 水圧セッション「ADSを搭載した食品加工機械の製品化」聴講資料
- 5) 公益財団法人日本食肉生産技術開発センター 食肉生産技術研究組合 平成26年度 研究開発成果発表会資料

（原稿受付：2015年4月13日）

トピックス

特許文献を調べる・特許情報プラットフォーム …特許電子図書館のサービス終了

著者紹介



き はら かず ゆき
木原和幸

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

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

1. はじめに

前稿までに国際特許分類（IPC）および日本における特許の分類の大まかな概要を紹介し、さらに、具体的な事例として、低騒音、高圧化に関する特許文献を検索する方法を示した。本稿は特許電子図書館の活用7として紹介する予定であった。検索システムは前稿まで特許電子図書館を参照し紹介してきたが、特許電子図書館のサービスが2015年3月23日で終了した。それにともない新たな特許情報サービスが特許情報プラットフォーム¹⁾として提供された。高度化、多様化するユーザーニーズに応えるべく、「特許電子図書館」を刷新したものとしている。従来と同等の活用はできるが、表示画面などが異なる点もあるので、以下に紹介する。

2. 検索画面

特許情報プラットフォームの最初の画面の主要なポイントは下記である。画面上には表示されていないが大分類と名付けて、表1に示す。

表1 大分類

特許・ 実用新案	意匠	商標	審判	経過情報
-------------	----	----	----	------

この大分類の下画面に特許・実用新案、意匠、商標の簡易検索があり、キーワードを入力して簡易検索ができる。これを活用するののも一つの方法である。表2に一例を示す。

表2 簡易検索によるキーワード検索

特許・実用新案を探す	ポンプ 高圧化
------------	---------

表2のようにポンプと高圧化をキーワードとして検索すると235,735件となり、一覧表示を選択すると、1,000件の文献番号が表示される。キーワードをピストンポンプと高圧化をキーワードとして検索すると3,184件である。前稿の検索例の表3に示す結果は7件である。要約+請求の範囲の限定の効果が大きいことがわかる。

表3 キーワードによる検索

要約+請求の範囲	高圧化
要約+請求の範囲	ピストンポンプ

特許情報プラットフォームで詳細な検索をするためには大分類を選択して詳細画面に入る。特許・実用新案にマウスを当てると下記13の選択項目が表示される。この表示は特許電子図書館とは異なっている。表4に比較を示す。

表4 比較

	特許電子図書館	特許情報プラットフォーム
1	特許・実用新案公報DB	特許・実用新案番号照会
2	特許・実用新案文献番号索引照会	特許・実用新案番号照会（英語版）
3	公報テキスト検索	特許・実用新案テキスト検索
4	公開特許公報フロントページ検索	特許・実用新案分類検索
5	特許分類検索	パテントマップガイダンス（PMGS）
6	パテントマップガイダンス（PMGS）	パテントマップガイダンス（PMGS）（英語版）
7	パテントマップガイダンス（旧）	PAJ検索（英語表示）
8	PAJ検索（英語表示）	FI/Fターム検索（英語表示）
9	FI/Fターム検索（英語表示）	外国公報DB
10	外国公報DB	審査書類情報照会
11	審査書類情報照会	コンピュータソフトウェアデータベース（CSDB）検索
12	コンピュータソフトウェアデータベース（CSDB）	中国文献番号紹介（特許庁関連サイトへ）
13		中国文献テキスト紹介（特許庁関連サイトへ）

異なる点は多々あるが、前稿まで紹介した方法と同様の検索は可能である。特許電子図書館の公報テキスト検索に替えて、特許情報プラットフォームの特許・実用新案テキスト検索を用いると従来と同様の詳細なテキスト検索ができる。入力画面の表示は異なっているが、同等である。表5に示す。

表5 キーワード入力画面

検索項目	含む 含まない	検索キーワード	検索方式 OR AND
------	------------	---------	-------------------

AND

検索項目	含む 含まない	検索キーワード	検索方式 OR AND
------	------------	---------	-------------------

1 列目の検索項目は選択項目である。①要約+請求の範囲、②要約、③請求の範囲、④発明の名称、⑤公報全文（書誌を除く）、⑥IPC、⑦FI、⑧Fターム、⑨ファセット、⑩出願人／権利者、⑪申請人識別番号、⑫発明者、⑬代理人、⑭審査官、⑮出願番号、⑯出願日、⑰公開番号、⑱公開日、⑲公告番号、⑳公告日、㉑登録番号、㉒登録日、㉓登録公報発行日、㉔公表番号、㉕公表日、㉖再公表発行日、㉗公報発行日、㉘審判番号、㉙国際出願番号、㉚国際出願日、㉛国際公開番号、㉜国際公開日、㉝優先権主張国・番号指定国、㉞公開／国際公開日のいずれかを選択する。通常は発明内容の確認をする①から⑤までの項目を選択するが、特定の企業の特許を確認するのであれば⑩または⑪を選ぶ。発明者名から特許を確認するのであれば、⑫を選ぶ。2 列目も選択項目である。含むまたは含まないかのいずれかを選ぶ。3 列目はキーワードを自由に記載する。全角で100文字以内、半角で200文字以内である。4 列目の検索方式はORかANDを選択する。1 行目と2 行目はANDで接続されている。初期画面表示は2 行までである。行の追加は2 行目枠外の右下の追加ボタンを選択することにより行える。

そのほかに従来と特許電子図書館と異なる点として、検索対象に海外文献の和文抄録もある。種別としては以下に示す複数を選ぶことができる。

- ☐ 公開特許公報（特開・特表（A）、再公表（A1））
- ☐ 特許公報（特公・特許（B））
- ☐ 公開実用新案公報（実開・実表・実登（U）、再公表（A1））
- ☐ 実用新案公報（実公・実登（Y））
- ☐ 米国特許和文抄録
- ☐ 欧州特許和文抄録
- ☐ 中国特許和文抄録
- ☐ 中国実用新案機械翻訳和文抄録

項目を選択すると□内にレ点が表示される。
検索事例の一例を以下に示す。

3. 事例

耐コンタミ性能に関する特許文献の検索を表6に示す。

表6 事例1のキーワード検索

検索項目		検索キーワード	
要約+請求の範囲	含む	コンタミ	OR
要約+請求の範囲	含む	弁	OR
要約+請求の範囲	含まない	ポンプ	OR

これは弁とコンタミが含まれ、ポンプの記載がないものに限ることになる。ヒット件数は101件である。キーワードのポンプがない場合は157件である。弁の記載をバルブに改めると87件である。このようにキーワードの選択により、ヒット件数も異なる。なお、弁とバルブは表現が異なるのみであり、188件が関連する特許文献と判断できる。表7に文献の一部であるが、発明の名称のみを示す。

表7 検索結果、発明の名称

項番	発明の名称
1	船舶用の冷水生成システム及び船舶
2	生化学用カートリッジおよび生化学用送液システム
3	タンクローリーの荷卸し装置
4	変速機制御装置
5	高圧ガス充填出力システム
6	クッションバルブ装置、及びそれを備えるマルチクッションバルブユニット
7	高圧ガス充填・出力システム
8	流体制御弁
9	作業機械の油圧制御回路
10	燃料噴射弁の燃料供給口用フィルタ

表7に示すように弁は多様なシステムで使用され、それぞれの基本構造も異なる。類似文献を選択し、そのFI、Fタームを検索する前稿までの検索方法も一つの方式であるが、耐コンタミ性能のように、各種弁における目的・効果の欄に耐コンタミ性能と同等の異物対策のようなFタームがあるものは構造・機能分類であるテーマコードを推定し、そのFタームを特定するのも一つの方式である。表8に弁における例を示す。

たとえば、ソレノイド弁の耐コンタミ性能の向上に関する発明であれば、テーマコード3H106でFタームはEE42が特定できる。ステッピングモータ、電動モータで駆動する弁の耐コンタミ性能の向上であれば、テーマコード3H062でFタームはBB26である。圧電素子、形状記憶合金などを使用しているものも3H062である。

なお、テーマコード3H066の弁の細部（Ⅱ）に

表8 テーマコードと異物対策のFターム

テーマコード	テーマ名	Fターム
3H052	リフト弁	BA31
3H053	スライド弁	AA31
3H054	栓, コック	BB25
3H055	自動閉止弁・吸排気弁	自動閉止弁 DD37
3H055	自動閉止弁・吸排気弁	吸排気弁 GG37
3H056	流体駆動弁	BB41
3H057	感温弁	BB44
3H058	逆止弁	BB33
3H059	安全弁Ⅰ (リリーフ弁)	BB36
3H060	安全弁Ⅱ (平衡弁, 過剰流出防止弁)	CC35
3H061	安全弁Ⅲ (外部状況作動弁)	CC26
3H062	弁の操作一般; 電気駆 動弁	BB26
3H063	機械駆動弁	BB41
3H067	多方弁	CC54
3H068	フロート弁	BB81
3H106	磁気駆動弁	EE42

は耐コンタミ性能の向上に関わるFIがある。
F16K51/00@A 弁に異物除去機構を設けたもの
文献数 605
F16K51/00@B ・異物除去機構がストレーナであるもの
文献数 455

これらの文献数は合わせて1,060であるが、表8のFタームで検索しても、同じ文献がヒットするはずであるが、表8に含まれていない文献もあると考えられる。なお、FIであるので、基本的に請求項に記載されている発明事項であり、Fタームの異物対策よりも文献数は少ない。

4. おわりに

特許電子図書館が廃止となり、特許情報プラットフォームが特許情報サービスとして提供された。本稿では従来と同様に使用できることを紹介したが、新サービスのポイントは下記のことである。

①特許、実用新案、意匠、商標、審決の公報、外

国公報、非特許文献、審査経過情報等、知的戦略に必要な基本的な情報の検索・表示機能を広くサポート。(J-GLOBALとの連携機能を備えた公報テキスト検索、「色彩」や「音」等の新しいタイプの商標への対応、中韓文献翻訳・検索システムへのリンクなど)

②小学生から年配の方まで、直感的に使いやすい簡易なユーザーインターフェイス (トップページへの簡易検索入力ボックスの配置、入力ボックスへの入力例の表示、ステップチャートなど)

③中級者以上の方もストレスを与えないシンプルな操作性とエキスパート検索 (グローバルナビゲーション、入力ボックスのたたみ込み、論理式による検索、Fターム (テキスト) 検索の採用など)

本稿執筆時期は特許情報プラットフォームのサービス開始から10日間程度のため、前述のポイントは部分的に確認したのみであるが、従来使用していた人も抵抗なく使用できると判断する。なお、本稿をより良く理解するために、前稿までの特許文献を調べる・特許電子図書館の活用¹⁾、²⁾、³⁾、⁴⁾、⁵⁾、⁶⁾および⁷⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) 特許情報プラットフォーム <http://www.j-platpat.inpit.go.jp/web/all/top/BTmTopPage>
- 2) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 1…特許の基本，フルードパワーシステム，Vol. 44, No. 4, p. 241-243 (2013)
- 3) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 2…特許の基本，フルードパワーシステム，Vol. 44, No. 6, p. 362-364 (2013)
- 4) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 3…日本の分類・テーマコード1，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 2, p. 81-83 (2014)
- 5) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 4…日本の分類・テーマコード2，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 4, p. 184-186 (2014)
- 6) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 5…類似文献の検索1，フルードパワーシステム，Vol. 45, No. 6, p. 285-287 (2014)
- 7) 木原和幸：特許文献を調べる・特許電子図書館の活用 6…類似文献の検索2，フルードパワーシステム，Vol. 46, No. 2, p. 90-92 (2015)

(原稿受付：2015年4月6日)

トピックス

フルードパワーシステム出前講義

著者紹介



か がわ とし はる
香 川 利 春

東京工業大学大学院総合理工学研究科
メカノマイクロ工学専攻
〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259
E-mail : kagawa.t.aa@m.titech.ac.jp

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、(社)日本機械学会フェロー。

1. はじめに

フルードパワーシステムの更なる普及には教育が重要である。2009年から（一社）日本フルードパワー工業会と（一社）日本フルードパワーシステム学会の産学連携委員会の協力の基で、出前講義が開始された（図1）。空気圧システムの利用は産業機械の分野のみならず、血圧や眼圧計測などの生体計測にも利用されている。これは空気圧システムがきわめて容易に構成可能で、信頼性が高く、価格も手ごろであることや、作動流体が空気であるなどの理由により初期設備投資が低く、作動後は大気に放出すれば良いなどの利便性があるといえる。本出前講座では空気圧の単なる座学のみでなく、受講者が流体现象のデータを自らとって確認する卓上実験を考案して行っている。まず空気圧の基本であるベルヌーイの定理を確認する。つぎに、最大の特徴であ



図1 出前講義の様子

る圧縮性流体として、以下の特性を実験的に学習する。

2. 講義項目

《実験1》ベルヌーイの定理

本実験では、空気圧の非接触搬送にはボルテックスチャックとベルヌーイチャックがあるが、ベルヌーイチャックを取り上げ、ベルヌーイの定理に基づく圧力と実験値を比較する。実験で用いるベルヌーイチャックは、図2-1に示すように直径60mmの円形で、ここでは下部の円板と一定間隔0.3mmを隔てて固定されている。中心の供給口から供給された空気は2枚の円板間を流れ大気（大気圧 P_a ）に放出される。中心から3.5mmの位置に小さな圧力取出口が設けられており、ここに圧力計が接続される。

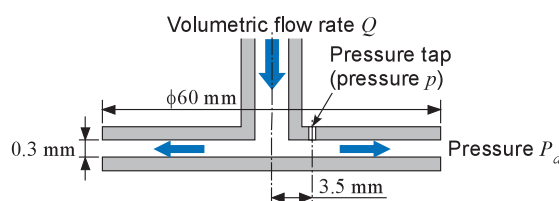


図2-1 ベルヌーイチャック

図2-2に実験装置を示す。空気圧源（最高圧力1 MPa(G)，最大流量100 NL/min）および減圧弁で圧力を調整した空気をベルヌーイチャックに流し、そのときの流量を面積式流量計（測定レンジ1～10 NL/min，測定精度 $\pm 5\%$ F.S.）により、圧力取出口における圧力を圧力計（測定レンジ0～10 kPa，測定精度 $\pm 1.5\%$ F.S.）により測定するようになっている。流量計の測定レンジを広げるため、流量計とベルヌーイチャックの間に可変絞りを挿入している。なお、空気圧源、減圧弁、流量計、圧力計などは、

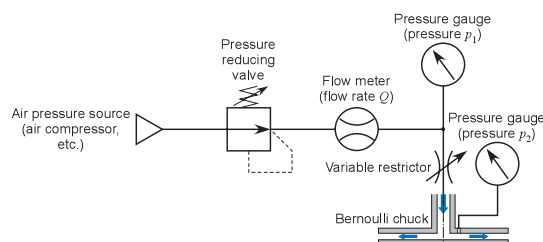


図2-2 ベルヌーイの定理実験装置

以降の実験でも共通して用いる。

《実験2》管路の圧力損失

図2-3に実験装置を示す。空気圧源および減圧弁により圧力を調整した空気を内径2mmのチューブに供給し、長さ0.2mにおける圧力損失を差圧計（測定レンジ0～10kPa、測定精度±1.5%F.S.）により、流量を面積式流量計により測定するようになっている。

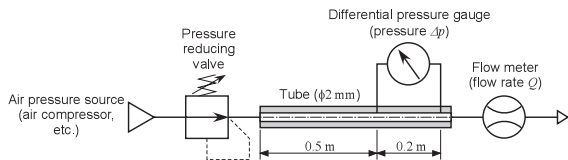


図2-3 管路の圧力損失の実験装置

《実験3》圧縮性流体の流量特性

圧縮効果がある流速範囲で、オリフィス形の流体抵抗要素とノズル形の流体抵抗要素の流量特性を測定する。実験4との関係から、オリフィス形は上流圧力一定、ノズル形は下流圧力一定の条件で測定する。

【3-1】オリフィス形流体抵抗要素の流量特性

図2-4にオリフィス形流体抵抗要素の実験装置を示す。空気圧源および減圧弁により上流圧力を一定とした空気をオリフィス形流体抵抗要素に供給し、下流圧力を下流側の可変絞りにより調整する。オリフィス形流体抵抗要素の流量 Q は面積式流量計により、上流および下流の圧力 p_1 および p_2 は2個の圧力計（測定レンジ0～0.6MPa、測定精度±1.6%F.S.）により測定できるようになっている。

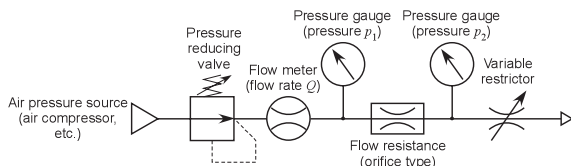


図2-4 オリフィス形流体抵抗要素の実験装置

【3-2】ノズル形流体抵抗要素の流量特性

図2-5にノズル形流体抵抗要素の実験装置を示す。空気圧源および減圧弁により上流圧力を調整した空気をノズル形流体抵抗要素に供給し、そのときの流量 Q を面積式流量計により、ノズル形流体抵抗要素上流側の圧力 p_2 を圧力計（測定レンジ0～0.6MPa、測定精度±1.6%F.S.）により測定する。

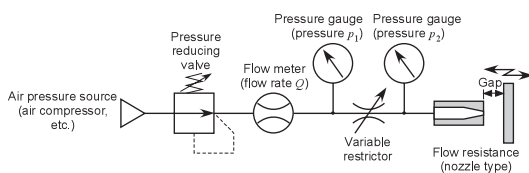


図2-5 ノズル形流体抵抗要素の実験装置

ノズルにはフラップが取り付けられており、その間隔をマイクロメータヘッドにより変化できるようにになっている。

《実験4》圧縮性流体の圧力制御

図2-6に、実験3で用いたオリフィス形流体抵抗要素およびノズル形流体抵抗要素を用いた圧力制御装置を示す。ノズルのフラップの間隔をマイクロメータヘッドにより調整することにより、圧力容器（容積 $V=0.41$ および 0.81 ）の圧力 p_c を制御する。圧力 p_c は圧力センサ（測定レンジ0～1MPa、測定精度±0.5%F.S.、バンド幅100Hz以上）で測定し、デジタルオシロスコープに記録できるようになっている。

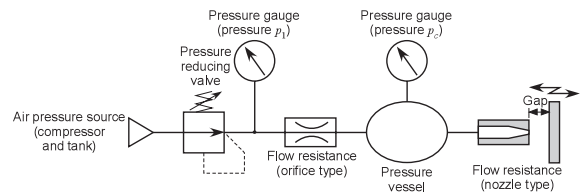


図2-6 圧力制御の実験装置

《実験5》空気圧シリンダの構造学習

図2-7に使用する空気圧シリンダの外観を示す。本空気圧シリンダはクッション機構を有する。クッション機構とは、シリンダストロークの端部において、慣性力に基づく衝撃力を吸収し、シリンダの強度低下や操作上の不安定性を除くものである。シリンダ内径40mm、シリンダストローク200mmの空気圧シリンダとシリンダ内径32mm、シリンダストローク100mmの空気圧シリンダを用いる。



図2-7 空気圧シリンダ

《実験6》空気圧シリンダ室内の空気の状態変化

図2-8に、圧縮時の空気の状態変化を調べるために行う実験装置を示す。2本の空気圧シリンダは、最高使用圧力1.0MPa、シリンダ内径32mm、シリンダストローク250mmである。図2-8(a)において上側の空気圧シリンダの圧縮側の室内には、直径70μmの銅線が111.9g充填されている。これにより、圧縮時の室内を等温とすることができる。各シリンダにはストップが取り付けられており、圧縮側の室内の体積の最大値を V_1 、最小値を V_2 とすると、2本の空気圧シリンダともに、 $V_1/V_2=1.99$ と設定している。

図2-8(b)に空気圧回路を示す。減圧弁（圧力調整範囲0～1MPa(G)）により圧力が一定に調整さ

れた空気が、電磁弁を開くことによりシリンダ左側から供給され、ピストンの移動により空気が圧縮される。このときの圧縮された空気の圧力変化を、圧力センサ（測定レンジ0～1 MPa(G)，出力電圧1～5V）で測定し、デジタルオシロスコープに記録できるようになっている。

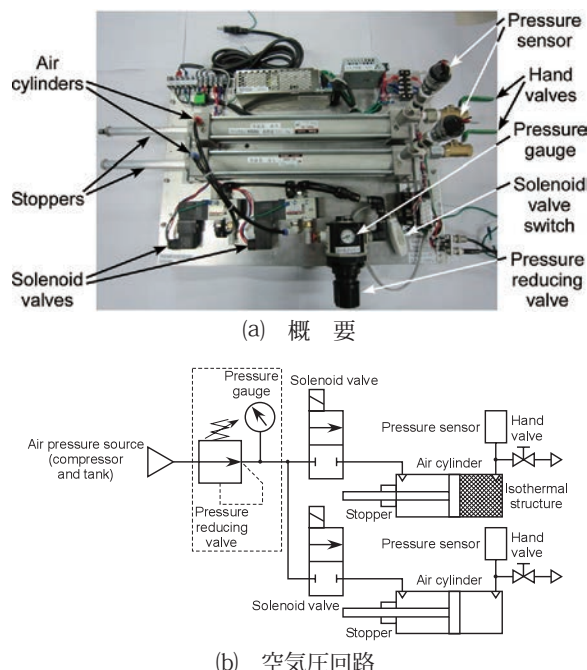


図 2-8 空気圧シリンダ室内の空気の状態変化の実験装置

3. 実験方法

《実験 1》ベルヌーイの定理

- (1) 実験装置（図 2-2）を用いる。
- (2) 可変絞りを閉じ、減圧弁を調整し、圧力 p_1 を0.5MPa(G)とする。
- (3) 可変絞りにより体積流量 Q を変化させながら、圧力取出口における圧力 p_2 を測定する。最大流量は20NL/min以下とする（このとき、マッハ数0.3以下であり、空気の圧縮性を無視することができる。なお、体積流量は、圧力 p_1 および室温を用い補正する。
- (4) 得られた結果は、図 3-1 に示すようなグラフに整理する。

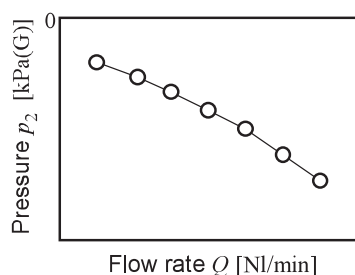


図 3-1 ベルヌーイの定理の実験結果を整理したグラフ

《実験 2》管路の圧力損失

- (1) 実験装置（図 2-3）の配管を行う。チューブはできるだけ真直になるように支持する。
- (2) 減圧弁により供給圧力を調整し、体積流量 Q を変化させながら、圧力損失 Δp を測定する。ただし、空気を非圧縮性流体として取扱えるように、流速はマッハ数0.3以下とする。
- (3) 得られた結果は、図 3-2 に示すようなグラフに整理する。

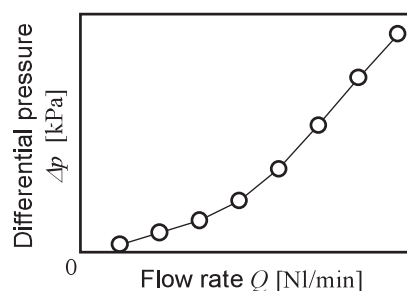


図 3-2 管路の圧力損失の実験結果を整理したグラフ

《実験 3》圧縮性流体の流量特性

【3-1】オリフィス形流体抵抗要素の流量特性

- (1) 実験装置（図 2-4）の配管を行う。容量の異なる 2 個の圧力容器に対して実験する。
- (2) 減圧弁により上流側圧力 p_1 を0.5MPa(G)一定に調整する。
- (3) 下流側の可変絞りにより下流圧力 p_2 を調整し、体積流量 Q を測定する。なお、体積流量は、圧力 p_1 および室温を用い補正する。
- (4) 得られた結果は、図 3-3 に示すようなグラフに整理する。

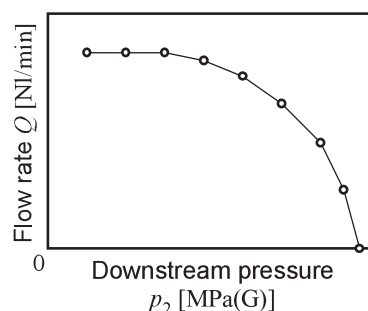


図 3-3 オリフィス形流体抵抗要素の実験結果

【3-2】ノズル形流体抵抗要素の流量特性

- (1) 実験装置（図 2-5）の配管を行う。
- (2) 減圧弁により上流側圧力を調整し、体積流量 Q を変化させながら圧力 p_2 を測定する。これをフラップの位置 2 箇所に対して行う。なお、体積流量は、圧力 p_1 および室温を用い補正する。
- (3) 得られた結果は、図 3-4 に示すようなグラフに整理する。

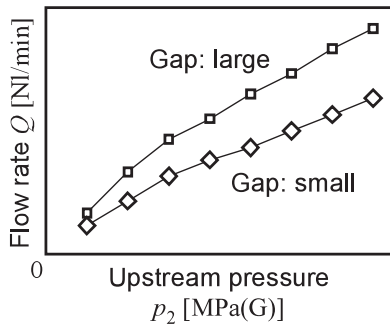


図3-4 ノズル形流体抵抗要素の実験結果

《実験4》圧縮性流体の圧力制御

- (1) 実験装置（図2-6）の配管を行う。
- (2) 減圧弁により上流側圧力 p_1 を0.5MPa(G)一定に調整する。
- (3) ノズルのフラップの位置を実験3（3-2）(2)と等しい2箇所に設定し、それぞれ圧力 p_c を測定する。
- (4) ノズルのフラップを実験3（3-2）(2)の間隔の狭い位置から広い位置にごく短い時間で移動させ、圧力 p_c の図3-5のような時間変化をA/D変換器（サンプリング周波数100Hz）を介してPCにより記録する。

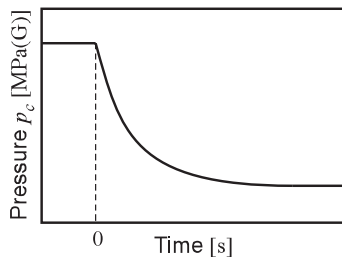


図3-5 圧力応答波形

《実験5》空気圧シリンダの構造

空気圧シリンダの構造を理解するために、班ごとに空気圧シリンダ（図2-7）の分解および組み立てを行う。とくに、クッション機構の構造と動作原理に注意する。

《実験6》空気圧シリンダ室内の空気の状態変化

本実験は、1台の実験装置（図2-8）を用いて、全班共通で行う。

- (1) 電磁弁のスイッチが切れており、閉じていることを、電磁弁のランプが点灯していないことにより確認し、減圧弁を調整して供給圧力を0とする。
- (2) 圧力センサ横のハンドバルブを開いた状態で、ピストンロッドを図2-8の左端に移動させ、ハンドバルブを閉じる。
- (3) 空気を供給し、減圧弁により供給圧力を調整する。供給圧力の値は0.5MPa(G)と0.3MPa(G)の2種類について行う。
- (4) 電磁弁のスイッチを入れてピストンを運動させ、圧縮された空気の圧力の図3-6のような時間変化をデジタルオシロスコープにより記録する。
- (5) 電磁弁のスイッチを入れた状態で空気の供給を停止し、減圧弁を調整し、供給圧力を0とする。電磁弁のスイッチを切る。

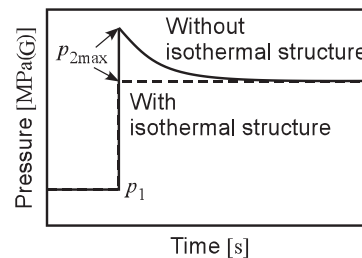


図3-6 圧力応答波形

4. む す び

フルードパワーシステムの良さは実際に機器に触れるとその特徴が理解できる。空気圧の特徴は簡便性、環境性であるが、解析的理解の難しさは作動気体の体積が圧力と温度によって変化することにある。質量流量に対して、標準状態の体積流量と基準流量が表記され混乱を招く可能性が高い。本出前講義は面倒な計算式だけに目を奪われるだけでなく、空気圧システムの面白さを体感し、自分でチョークなどの現象を目の当たりにし、また空気圧システムを使って見ようとの意識が向上すれば幸いである。

最後に日本フルードパワーシステム学会、日本フルードパワー工業会の産学連携委員の皆様へ深謝する。

（原稿受付：2015年5月19日）

我がさまよえる油圧人生

著 者 紹 介



いち りゅう けん
柳 健

株式会社菊池製作所のづくりメカトロ研究所
〒192-0152 東京都八王子市美山町2161-12
E-mail: ichiryu@kikuchiseisakusho.co.jp

1959年名古屋大学工学部機械工学科卒業、同年株式会社日立製作所日立研究所入社、1981年同社機械研究所へ転籍、1986年株式会社日立建機技術研究所転属、1997年東京工科大学工学部教授、2006年菊池製作所のづくりメカトロ研究所所長、現在に至る、工学博士。

1. 緒 言

わが油圧人生の前半は、サーボ弁等各種油圧機器を自分で設計製作したり、国際会議に論文発表し世界の油圧企業を訪問、油圧クレージ列伝を書いたりした時期でもっとも油圧に没頭した時代であった。しかし、後半は大学でロボット、NC工学を教える必要もあり電気駆動にも興味を持ち6軸パラレルリンク式3次元ベンダにおいては小型電動、大型油圧と住み分けた。しかし、今やボールねじ径が大きくなるにしたがって出力による住み分けは意味がなくなった。今や油圧、電動の住み分けの基準が明確に定義できない時代であり各自に任さざるを得ない混沌の時代に入ったといえるであろう。油圧は機械の主流で歴史があり原理原則は変わらないが開発テーマは時代の要請によって新しく現れてくる。電動しか知らない技術者に対して、油圧工学を知る技術者の方が新しい領域を開く可能性があることも事実であるので若人は自信をもって油圧のテーマに取り組んでもらえると思う。

以下、手短に自分の過去を振り返り大きな時代の流れの中でさまよってきたわが油圧人生を概観したいと思う。

2. 我がさまよえる油圧人生

日立製作所がまだあらあらしかった野武士の時代に入社したので自分の道は自分で決めて油圧の世界に入った。多くの先達に恵まれもまれたのは幸せであった。最初は水戸工場高橋氏に油圧エレベータ、次いで日立工場梶原技師長〈当時〉、益田、木下両氏に圧延機の油圧圧下装置、さらに土浦工場藤原氏

に地震シミュレータにつき指導していただいた。とくにフォースモータ型サーボ弁を用いたHYROP-Fは世界の冷延ミルに多数採用され日立圧延機のシンボルとなった。

2.1 油圧サーボの世界

フォースモータ駆動の油圧サーボ弁を試作したのが始り。ついで早稲田大学加藤先生の指導でつくば万博向けに油圧式2足歩行ロボットを展示することになり油圧部分を担当した。当時の代表的なノズルフラップ式サーボ弁はリークが多い事を理由に超小型のフォースモータサーボ弁を開発した。なんとか動作はしたもののトラブル続発で苦労した。その当時の仲間が早大 藤江先生、高西先生であり今もロボット開発で指導をうけている。ノズルフラップ式は航空機で沢山使われていることから安定で使いやすいことは間違いない。そのサーボ弁専門の東京精密測器が買収されて中田先生が指導された国産サーボ弁メーカーが市場から姿を消したのはいかにも残念なことであった。中田子息、田村、中西、星氏達との交誼は消えることはない。その頃から油圧企業が元気を失い日欧では電気でない駄目という風潮になった。しかし、米国では油圧サーボ技術が残りとえばSARCOSサーボ弁がUTA大学の油圧HUMANOIDロボットに使用されているのを法政大田中先生の案内で知った。今やサーボ弁の調達には海外の方が容易という逆転現象が生じている。もともと芸の細かいことを特色とする日本人が油圧サーボで負けるわけではないと思っていたので不思議である。あるいは、わが国がバブル崩壊後世界に遅れ「内向き志向」となったためか。いずれにしても情けない話である。

2.2 油圧の本場

少しばかり日立で油圧エレベータ、油圧GCB、大型振動台、試験機、圧延機で産業機械の油圧制御、油圧バルブ、ポンプの製作の経験をしていたので特別な違和感はなく日立建機の建設機械の世界に入れた。油圧の本場は建機メーカーであろう。建機では(故)安部副工場長、岡部氏に油圧ショベル、米谷氏からはショベルの油圧機器につきご指導いただき建機油圧につき勉強した。油圧ショベルの油圧技術は量産技術であるとともに高圧大流量ハイパワーで迫りに溢れ面白い。

1990年頃、電子油圧ロードセンシングショベルの

開発に参画し設計陣と苦楽を共にした。開発自体は成功とは言い難かったが油圧ショベルの世界に始めて本格的電子制御技術を持ち込んだ先進性は開発者の誇りであり後世まで語り継いでいくべきものである。当時の建機にはショベルの虫、油圧の虫が綺羅星のごとくいたので世界に冠たる油圧ショベルが出来たのであろう。日立建機は当時まだ企業規模は小さく何をするにも外注企業に協力してもらわなければ製品が纏まらない状況であったのでよく勉強のために見学に出かけたものである。また建機マーケットは世界であるので海外出張も多くその点開放的で人間味に溢れていた。日立の場合は超大企業で系列企業に取り囲まれておりすべて自前にならざるを得ず系列外の企業の接触は少なかった。また大学との関係も同じで共同研究もほとんどなく唯我独尊になる危険があったが日立建機はそんな事はなく建機の制御を研究している世界の大学とお付き合いすることができた。LINKOPING工科大学、中国ZHEJIANG大学、Tampere工科大学、Aachen工科大学、Hannover工科大学、Bath大学、UTAH大学、北京理工大学、吉林大学、ハルビン工業大学、上海交通大学といったところである。特に前2者は大規模な共同研究を実施した。

2.3 大学時代から現在まで

その後東京工科大に移り6軸パラレルリンク、4クローラロボット車両Mr. Armadillo (図1)、ウオータジェット作業車両、CPSフライホイール車両等の本格的油圧システムに取り組んだ。喜多先生にはCPS油圧システムにつき長く学生のご指導をいただき、フライホイールCPS車両向けにFFCモータを提供いただいた。CPS車両の研究開発は上智大池尾先生一東工大横田先生とともに約10年にわたり共同研究をした。油圧システムは複雑で制御は難しく本当に大変であったが学生と寝泊りして走行実験を行ったのは楽しい思い出である。製品化までは行かなかったがフライホイール付油圧トランスミッションというハイテック技術に挑戦したことで悔いはない。喜多先生はCPS車両の完成を思いながら逝ってしまったのは痛恨の極みである。せめてFFCの実用化の志を引き継いでいきたいと思っている。

以上が電動を横目で見てすべて油圧で行こうと突っ張っていた時代である。また当時は油圧の鋭才

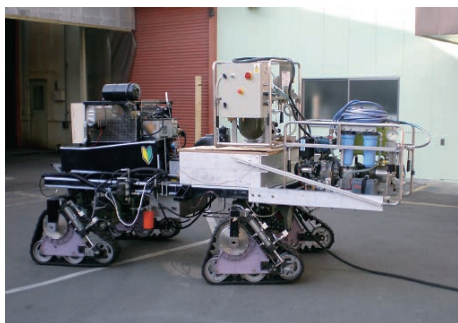


図1 ウオータジェット装置を装備した (MR. ARMADILLO)

が続々現れた時代でもある。Bo Andersson氏のLego Valve (スウェーデン)、INNAs BVのP. Aachten氏のFree Piston Engine (オランダ) が忘れられない。

大学で10年教えて産学協同研究をしていた菊池製作所に小さな研究所を作った。これが現在大きくなり企業の土台を支えるに至った。大学の研究を延長して小型は電気、大型は油圧との考えで2種類のパラレルリンク式パイプベンダを製作した。電動パラレルリンクは横型配置にし、トラニオン構造のアクチュエータとした。油圧パラレルリンクは直交配置にして使い勝手を良くした (図2)。いずれも弊社の福祉機器の開発に重宝されている。

現在、福島災害ロボットプロジェクトの資金を得て早大と共同で油圧式4腕ロボットを開発した (図3)。製作は工苑、IMECなど長年お付き合いした企業の協力を得た。油圧機器の調達が大変だという話があったが短期間に画期的な油圧ロボットが出現した。IRロボット、BOSTON DYNAMICSの走るロボットなど米国ロボットが注目を浴びている折、国産災害ロボット (図4) が名乗りをあげたところである。

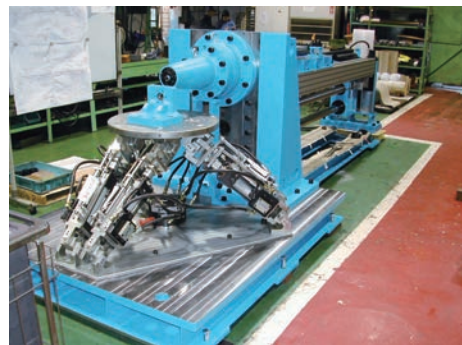


図2 パラレルリンク式6軸ベンダ (油圧出力20TON)



図3 試作したオクトパス (全油圧駆動)



図4 東京消防庁へ納入のレスキューロボット

(原稿受付：2015年4月24日)

研究室紹介

大阪大学 吉灘研究室

著者紹介



しの はら けい
篠原 啓

大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻
博士前期課程2年
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1
E-mail: shinohara@jrl.eng.osaka-u.ac.jp

2014年大阪大学工学部応用理工学科卒業、同年博士前期課程に進学、建設機械遠隔操作の研究に従事、日本機械学会会員。

1. 研究室の紹介

吉灘研究室（コマツ共同研究講座）は大阪大学大学院工学研究科に2006年に開設された共同研究講座である。共同研究講座とは、外部の企業などから資金提供を受け、大阪大学内に設置する研究組織である。本講座は㈱小松製作所との提携により設置された。図1に共同研究講座の概要を示す。出資企業から資金のほかに研究者などを受け入れ、大阪大学の教員と出資企業からの研究者とが対等の立場で共通の課題について共同して研究を行うことにより、優れた研究成果が生まれることを促進する制度である¹⁾。この大阪大学発の産学連携制度「共同研究講座」の取り組みは第12回「産学官連携功労者表彰文部科学大臣賞」を受賞している²⁾。

本講座の構成を紹介する。現在研究者、教員は企業から吉灘裕特任教授、深野亮特任助教の2名を迎え、大学側から倉鋪圭太特任助教、近藤大輔特任助

教、谷本貴頌特任研究員の3名の計5名が所属し、学生4名を加えた計9名がひとつの部屋で研究に取り組んでいる。また兼任の大学教員が6名いる（図2）。大学と企業が共通の関心を持つ研究テーマを、大学の教員と企業からの研究者、学生が密接な連携をとりながら研究を行う点が本講座の最大の特徴であり、大学、企業関係なく全員で議論を交わし、常により良い研究成果を目指している。

通常、共同研究講座は研究に専念することが多いが、本講座では学生の育成も行っている。大学教員からの指導だけでなく、企業の研究者視点からの指導も受けることができる。時には現場で働く企業のひととの意見交換や、企業の設備を用いた実験を行うこともあり、学生にとって貴重な経験をえられる講座でもある。



図2 研究室メンバー

2. 研究の紹介

本講座では現在「建設機械遠隔化・無人化の研究」に取り組んでいる。建設機械のオペレータは振動、騒音といった過酷な環境にさらされる上、地面の崩落や車体の転倒といった危険とも隣り合わせである。近年、建設機械オペレータのこの安全性や快適性の観点から、建設機械を遠隔操作や自律で作業させる無人化施工の要求が高まっている。雲仙普賢岳や福島第一原発など人間の立ち入ることのできない危険な環境で既に無人化施行は導入されているものの、無人化施行は通常の搭乗操作時に比べて作業

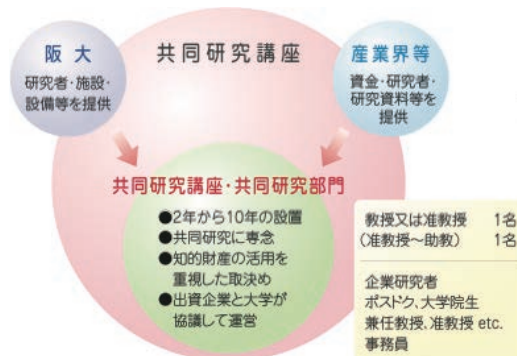


図1 共同研究講座の概要

効率が大きく低下することが知られている。しかしこの作業効率低下の原因はいまだはっきりとは解明されていない。

この作業効率低下を改善するため、本講座では作業効率低下に影響する要因の究明や、搭乗時と同等以上の作業効率を得るための遠隔操作システムの研究開発を行っている。研究は建設機械の遠隔操作と自律走行の二つのチームに分かれて進められている。遠隔操作の主なテーマは、油圧ショベルやブルドーザといった建設機械の作業効率や操作性の向上、遠隔操作に対する視覚情報（画像解像度、立体感）の影響についての研究である。自律走行は画像認識に基づいた車両自律走行の研究に取り組んでいる。次項ではこれらのテーマの中から、油圧ショベル遠隔操作の研究と画像認識に基づいた車両自律走行の研究にフォーカスして紹介する。

2.1 油圧ショベル遠隔操作の研究

作業現場でもっとも使用されている建設機械の一つに油圧ショベルが挙げられる。油圧ショベルのおもな作業は土砂の掘削積込みであるが、これらの作業は掘削する手順や位置の決定にオペレータの高度な判断が要求される。そのため油圧ショベルの無人化は自動化ではなく、遠隔操作が現実的な手段として採用されている。しかし前述したように、建設機械の遠隔操作は作業効率が大きく低下する。この作業効率低下の要因を研究するため、本講座では遠隔操作用オペレータインターフェースと建設機械模型を組み合わせた遠隔操作実験システムを構築して研究を行っている。

図3にオペレータインターフェースを示す。オペレータインターフェースは、建設機械模型に搭載されたカメラからの画像を表示する画像提示装置、模型を操作するための実機操縦席、作業環境の音を再現する音響システムからなる。とくに遠隔操作の作業効率に与える影響が大きい要因であると予想される画像提示装置には注力しており、さまざまな実験を行うことができる環境を整えている。たとえば5枚のディスプレイを組み合わせることにより広視野（垂直105 [deg]、水平180 [deg]）を実現しており、視野の広さが作業効率に与える影響を評価できる。またディスプレイは高解像度表示（最大4k画質表示）や3D表示にも対応しており、解像度の変化や3D表示が作業効率に及ぼす影響を評価できる。図4に遠隔操作対象である油圧ショベル模型を示す。本来、操作対象は本物の油圧ショベルであることが望ましいが、安全性や実験環境の整備、システム開発の容易さといった観点から模型を採用している。模型ではあるが作業機は油圧で駆動され、実際の油圧ショベ

ルと同等の構成となっている。オペレータ席の位置には複数カメラが設置されており遠隔オペレータに搭乗者視点の画像を提供する。またこの模型のコントローラにむだ時間や実機特性を組み込むことで、通信遅延の模擬やさまざまなサイズの油圧ショベルのダイナミクスを再現することが可能である。さらに建設機械模型をブルドーザに置き換えることにより、油圧ショベルのような定置作業だけでなく、走行作業を行う建設機械の遠隔操作実験システムへと容易に変更可能であり、同時に研究が進められている。

作業効率低下の要因を解明するだけでなく、作業効率を搭乗時と同等以上にするシステムの検討もこの遠隔操作実験システムを使用して行われている。たとえば油圧ショベルの作業機の動きをオペレータにあわせてコントローラからアシストする半自動システムといったテーマが検討されている。巨大な実機を半自動化するには多大な工数が必要で、また安全面でも、ちょっとした実験にも細心の注意を要する。一方模型を利用した場合、実験環境の安定性や安全性の高さによって、試作したシステムを容易にテストすることができ、これらの試行錯誤を要求する挑戦的な研究に適した実験環境となっている。

遠隔操作に効率低下をもたらす決定的な要因の把握や効率的な遠隔操作システムの形はまだ得られていないものの、この遠隔操作実験システムを通じて日々精力的な研究が行われている。

2.2 車両自律走行の研究

作業にオペレータの高度な判断が要求される建設



図3 遠隔操作用オペレータインターフェース



図4 建設機械模型（油圧ショベル）

機械では遠隔操作が導入されている。一方で、ダンプトラックのようなあらかじめ決められた道を走行するだけの建設機械では自動化が適していると考えられる。すでに鉱山での鉱石の輸送に大規模な無人ダンプトラック運行システムが導入され、商品化もされている³⁾。これらの車両が走行するためのセンサ情報として、GPSの情報が不可欠である。しかしGPSは電波状況によっては取得不可能な場合があり、この状況に陥ると自律走行できなくなる。そこで本講座の自律走行研究はGPSではなくステレオカメラを主たるセンサとして、画像認識に基づいた自律走行システムの研究を行っている。ステレオカメラを使用する利点は、画像が色や形状、奥行き、明るさといった非常に多くの情報を潜在的に含んでいることである。この画像の豊富な情報から必要な情報を抽出し、事前情報や外部からの通信をなるべく用いずに自律走行を行う手法に挑戦している。車両が走行する道路では緑石や白線、わだちといった道路に沿った直線が存在する。人間が目で見えて道を歩くと同様に、カメラから取得した画像からそれらの直線を検出して、その直線に沿って走行することで、事前情報なしでも道なりに走行することが可能となる。このような方法を既存技術と組み合わせることで、たとえGPSによる位置情報を喪失しても、道なりに走行し続けられるため、GPSの復旧まで運行を維持することができる。

この画像認識に基づいた自律走行の研究のために、本講座では「つくばチャレンジ」に参加している。つくばチャレンジとはつくば市内の遊歩道などの実環境を移動ロボットに自律走行させる公開ロボット走行実験である⁴⁾。市民が歩き回り日常生活を送っている歩道や公園でロボットが自律走行を行う点が最大の特徴である。決められたコースの走行のほかに、一定のエリアを探索して目標物を発見するというタスクも設定されている。

つくばチャレンジに参加した本講座の自律走行ロボット「Vision Based Autonomous Robot (ViBAR)」の概要を図5に示す。自律走行のための主センサとなるステレオカメラの他に、補助的な自己位置同定のセンサとしてレーザー距離計や慣性計測装置(IMU)を搭載している。GPSは自己位置記録を行うのみで走行には使用しない。つくばチャレンジの練習会の様子を図6に示す。本番走行までに10回近く週末に大阪からつくばまで出張して走行実験を行うのは非常に大変であるが、教員、学生がチーム一丸となって問題点の解決や改良に取り組む活動は非常に貴重な体験である。本年度の本番走行の結果は走行距離87[m]で、完走はできなかった。画

像認識に基づく走行は成功したものの、画像認識に不適な環境に侵入した際、補助のセンサによる自己位置同定に失敗したためである。このように他のシステムとの連携に加え、将来の目標である画像から道なり走行だけでなく曲がる位置も決定するなどといった課題が多くあるが、来年度の競技会にも参加予定であるので本講座の自律走行ロボットの進化に期待していただきたい。

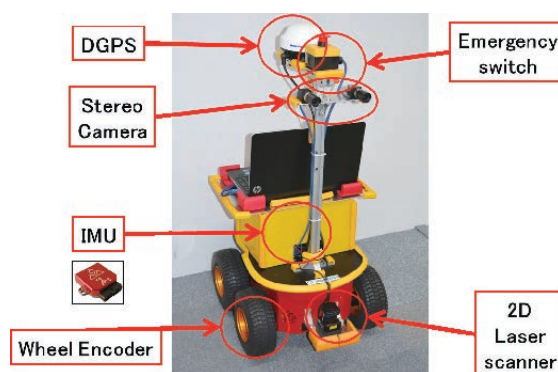


図5 自律走行ロボット：ViBAR



図6 つくばチャレンジ練習会

3. おわりに

吉灘研究室の共同研究講座の取り組みと、おもな研究テーマである建設機械遠隔操作の研究、自律走行車両の研究について紹介した。遠隔操作実験システムの模型を操縦してみたい、自律走行ロボットを見たい、という方の研究室見学は、いつでも歓迎しているのでぜひご連絡を。

参考文献

- 1) <http://www.uic.osaka-u.ac.jp/rules/cooperation.html>
- 2) <http://www.komatsu.co.jp/CompanyInfo/press/2014082914194409951.html>
- 3) Autonomous Haulage System http://www.komatsu.co.jp/CompanyInfo/profile/product_supports/
- 4) つくばチャレンジ2014 <http://www.tsukubachallenge.jp>

(原稿受付：2015年2月4日)

企画行事

平成26年度ウインターセミナー開催報告 「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」

著者紹介

なぐら しのぶ
名 倉 忍

コマツ

〒323-8558 栃木県小山市横倉新田400
E-mail: shinobu_nagura@komatsu.co.jp

1997年東京工業大学大学院修士課程修了。同年コマツ入社。現在に至る。油圧装置／システムに関する研究開発に従事。日本フルードパワーシステム学会会員

1. はじめに

平成27年3月2日（月）午後、平成26年度ウインターセミナー「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」が、機械振興会館において開催された。本稿では、本セミナー開催の様子および当日行われた講演内容の概要について報告する。

2. セミナーの概要

平成25年度に実施したウインターセミナー「大型機械と油圧技術」は、大変好評をいただいた。その第二弾として、本セミナーでは大型機械や大型施設で活躍する液圧技術を取り上げて、現状と今後の可能性について展望すべく、企業や研究所の方々が講師となり、それぞれの分野で活用されている液圧技術を紹介していただいた。



写真1 セミナー会場の様子

セミナーは、4件の講演で構成され、1件あたり45分間の講演が行われた。参加人数は、聴講者33名に講師4名を加えた合計37名で、聴講者の内訳は、大学教員等3名、企業人30名であり、そのなかでも油圧に携わる企業人が多数を占めたが、フルードパワー以外の分野を専門とする方々も数名ではあるが参加されていた（写真1）。

3. 講演内容

3.1 E-ディフェンスの装置性能と活用事例

独立行政法人防災科学技術研究所の中村いずみ氏により、世界最大の三次元震動台E-ディフェンスについて、設立の目的、施設の概要、また活用事例について講演いただいた（写真2）。



写真2 講演中の中村氏

今回の講演では、E-ディフェンスの油圧システムの解説の後、ビデオを交えて建物倒壊実験の様子を解説していただいた。また当初の兵庫県南部地震を再現するシステムの確立後に、長周期地震に対応するための油圧システムの改造内容と、それを利用した倒壊実験についても解説していただいた。現状のシステムは、動力源に3,175kWのガスエンジン4台を用いて、30kL/minのポンプユニットと、24kLのアクムレータを用いて、20m×15mの振動テーブルを駆動するシステムとなっているとのことであった。

3.2 シールド掘進機における油圧システム

川崎重工業株式会社の酒井義雄氏により、シールド

ド掘進機について、基本構成と油圧システムについて講演をいただいた。またそのほかに高機能油圧システムとして異形断面に対応したシールド掘進機や、東京湾横断道路の建設に活躍したシールド掘進機とそのセグメント自動組み立て装置についても解説いただいた（写真3）。



写真3 講演中の酒井氏

シールド掘進機の油圧駆動部には、ジャッキ装置、カッタ駆動装置、セグメント組み立て装置、スクリュウコンベヤ装置等があるが、カッタ駆動については電動モータ駆動と油圧モータ駆動の場合のそれぞれのメリット、デメリットについて解説があり、中型～大型のシールド掘進機については、通常電動モータ+減速機が採用されており、油圧モータは小口径のものに限られているとの解説があった。

3.3 ガス遮断器用油圧操作器の開発

株式会社日立製作所の瀬戸信治氏により、変電所等で用いられる大電流用のパuffa式ガス遮断機の油圧装置とその動作解析技術についての講演をいただいた（写真4）。

遮断機の動作解析においては、油圧回路のモデル、負荷となるパuffa圧力のモデル、ソレノイドの電磁場モデルを統合するのみでは不十分で、リンク機構のレバー弾性変形、シリンダストロークエンド



写真4 講演中の瀬戸氏

クッション形状までを考慮することで解析と実測が一致し、設計手法を確立することが出来たと解説いただいた。

3.4 トンネル掘削機及び特殊機械の紹介

カヤバシステムマシナリー株式会社の川井貴史氏により、トンネル掘削機およびその他の特殊機械について講演いただいた（写真5）。



写真5 講演中の川井氏

トンネル掘削の工法には、シールド工法、開削工法、埋設工法、山岳工法があるが、本講演では山岳工法について、またその中でもブームの先端に掘削機を装備した自由断面掘削機について、その作動と油圧システムについて動画を交えて紹介いただいた。本掘削機のカッタ駆動には電動式が用いられていると解説があった。またそのほか、軟弱地盤向けのシールド掘削機や自走式ゴミ検査機等の特殊機械についても紹介いただいた。

4. おわりに

各講演とも、それぞれの分野で活用されているフルードパワーの概要と装置の構造を判りやすく解説していただき、改めて油圧の魅力を再認識するとともに、適用箇所によっては電動モータのほうが有利となる場面もあった。また油圧でしか成立しないような場面でもメンテナンス性等の改善が望まれており、更なる改善が必要であることも改めて認識することができた。

また参加者からのアンケートでは、様々な分野での油圧システム・装置の活用事例が聞けて有意義だった、未知の分野の機械のことを知る良い機会となった等の好評をいただいた。

最後に、御多忙の中、講演を引き受けてくださった講師の皆様、ならびにセミナー開催にあたり御協力いただいた関係各位に深く感謝申し上げ、セミナー開催の報告を終える。

（原稿受付：2015年4月6日）

会 告

〈理事会・委員会日程〉

6月30日	基盤強化委員会
7月2日	企画委員会
7月3日	情報システム委員会
7月28日	委員長会議
8月5日	編集委員会
8月20日	理事会

〈第1回理事会〉

5月29日 14:00～16:00 機械振興会館

地下3階B3—9号室（出席者21名）

- 1) 総会資料について
- 2) 第10回国際シンポジウム福岡の準備進捗報告
- 3) 専任職員の給与・賞与・退職給与内規の別表改定について
- 4) 電子的複製に係わる権利委託契約について
- 5) 会員の推移と入退会者について
- 6) 学会財務基盤の強化の進捗状況
- 7) 各委員会からの報告
- 8) その他

〈委員会報告〉

第6回企画委員会

3月26日 15:00～17:00 機械振興会館

地下3階B3—3号室（出席者15名）

- 1) 平成26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実施報告
 - ・その他
- 2) 平成27年度実施の事業に関する報告・審議事項
 - ・平成27年春季講演会及び併設セミナーについて
 - ・平成27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

・研究委員会の新規設置・継続について

・その他

3) その他審議・確認事項

- ・平成27年春季講演会・併設セミナー会告及び当日の準備状況について
- ・平成27年度秋季講演会の予告会告について
- ・平成27年度オータムセミナーの予告会告について
- ・その他

第5回基盤強化委員会

4月21日 15:00～17:00 機械振興会館

地下3階B3—7号室（出席者11名）

- 1) 会員サービス、会員数増加について
- 2) 外部への情報発信について
- 3) フルードパワー道場について
- 4) フルードパワー・バーチャルミュージアムについて
- 5) 研究委員会について
- 6) その他

第1回編集委員会

5月21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14名）

- 1) 学会誌特集号の現状と企画について
 - ・Vol.46 No.4「食品の加工に活用されるフルードパワー技術」
 - ・Vol.46 No.E1(電子出版号)「緑陰特集」
 - ・Vol.46 No.5「フルードパワー歴史探訪～温故知新～」
 - ・Vol.46 No.6「水素燃料自動車とフルードパワー技術(仮題)」
 - ・Vol.47 No.1「農業に貢献するフルードパワー(仮題)」
 - ・Vol.47 No.2「アジアにおけるフルードパワー産業(または研究)アジアにおけるフルードパワーの最新状況(案)」
- 2) その他
 - ・会議報告
 - ・トピックスについて

会 告

第34期 通常総会終了

1. 日 時 平成27年5月29日(金) 15時00分～16時40分

2. 場 所 東京都港区芝公園3丁目5番地8号 機械振興会館 研修1号室

3. 議事の経過および結果

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

(報告事項)

報告1 平成26年度事業報告(平成26年度事業報告書)の件

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

報告3 平成27年度事業計画(平成27年度事業計画書)の件

報告4 平成27年度収支予算(平成27年度収支予算書)の件

報告1～4に対し庶務委員会小山委員長、会計委員会西海委員長から説明および報告があった。

(議案)

第1号議案 平成26年度決算(貸借対照表、正味財産増減計算書(内訳表を含む)、財産目録(財務諸表に対する注記含む)、監査報告)の件

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

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

(名誉員推挙)

・東京工業大学名誉教授 北川 能 殿

(フェロー称号授与)

・SMC株式会社 北畠 多門 殿

・川崎重工業株式会社 肥田 一雄 殿

・東京工業大学 香川 利春 殿

(学会賞表彰)

学術論文賞

・千葉大学 宮本 寛之 殿 東京工業大学 高山 俊男 殿、小俣 透 殿 山形大学 大泉 弘幸 殿

技術開発賞

・油研工業株式会社 大阪 一人 殿、服部 至 殿、長野 卓 殿、藤澤 誠 殿、阿部 賢一 殿

・KYB株式会社 江川 祐弘 殿、杉本 潤一郎 殿、福田 俊介 殿、瓶子 司 殿、小林 将之 殿

技術功労賞

・東京工業大学 井上 淳 殿

学術貢献賞

・東京工業大学 横田 真一 殿

SMC高田賞

・法政大学 坂間 清子 殿

公益財団法人 油空圧機器技術振興財団顕彰

・株式会社ガスター 土屋 順裕 殿 東京工業大学 ウーレイレイ 殿、尹 鍾皓 殿、香川 利春 殿

(最優秀講演賞)

講演会で特に優秀な講演をされた方に最優秀講演賞を授与している。今年度は、昨年10月に国際シンポジウムが開催されたため、昨年5月に開催された春季講演会で選考された受賞者を、総会後の技術懇談会で表彰した。

・社会人部門 株式会社日立製作所 伊藤 貴廣 殿 「樹脂部品を用いた高圧対応ギヤポンプ」

・学生部門 岡山理科大学 大野 歩 殿 「チューブの屈曲を利用した低コスト・ウェアラブルサーボ弁の改良」

・学生部門 東京工業大学 矢島 拓実 殿 「揺動型EHDアクチュエータを用いた多関節ロボットの開発に関する基礎的研究」

(学会賞受賞記念講演)

技術懇談会に先立って、学術論文賞受賞者の宮本寛之殿および技術開発賞受賞者の大阪一人殿、江川祐弘殿の受賞記念講演が行われた。

第34期通常総会は多数の出席者を得て盛会裡に終り、17時00分より恒例の技術懇談会が開かれ、なごやかな雰囲気のうちにすべての行事が終了した。

共催・協賛行事のお知らせ

協賛行事

一般社団法人日本機械学会関西支部 第338回講習会 実務のための振動基礎と制振・制御技術 開催日：2015年7月28日(火) 9:10～16:40 29日(水) 9:10～16:40 会 場：大阪科学技術センター8階 中ホール 大阪市西区靱本町1-8-4 / 電話 (06) 6444-5324 / 地下鉄四つ橋線「本町」駅下車 北へ400m
日本混相流学会混相流シンポジウム2015 主 催：日本混相流学会 開催日：2015年8月4日(火), 5日(水), 6日(木) 会 場：高知工科大学 (高知県香美市土佐山田町) URL: http://www.jsmf.gr.jp/mfsymp2015/
No.15-7 Dynamics and Design Conference 2015 総合テーマ：「結束を新たに,未来を拓く」 主 催：一般社団法人機械学会 機械力学・計測制御部門 開催日：2015年8月25日(火)～28日(金) 会 場：弘前大学 (青森県弘前市文京町1番地) URL: http://www.jsme.or.jp/conference/dmccconf15/
第33回日本ロボット学会学術講演会 開催案内 主 催：一般社団法人日本ロボット学会 会 期：2015年9月3日(木), 4日(金), 5日(土) 場 所：東京電機大学 東京千住キャンパス (〒120-8551 東京都足立区千住旭町5番) URL: http://rsj2015.rsj-web.org/
2015年度 計算力学技術者 (CAE技術者) 資格認定事業 (個体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者) 後 援：日本機械工業連合会, 日本産業機械工業会, 日本電機工業会 URL: http://www.jsme.or.jp/cee/cmrintei.htm (「学会TOP」→「資格・認証・認定」 →「計算力学技術者の資格認定」)
国際トライボロジー会議 東京2015 (ITC TOKYO 2015) 開催日：2015年9月16日(水)～20日(日) 会 場：東京理科大学 葛飾キャンパス (〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1) 問合せ：一般社団法人日本トライボロジー学会 事務局 (〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 機械振興会館 407-2号室) TEL 03-3434-1926 FAX 03-3434-3556 ホームページ http://itc2015.com
産業応用部門2015年度大会 主 催・企画：計測自動制御学会 産業応用部門 共 催：(一社)日本フルードパワーシステム学会 計測自動制御学会 制御部門 期 日：2015年10月27日(火) 会 場：東京工業大学 (東京都目黒区大岡山2-12-1)
第58回自動制御連合講演会 (神戸) 主 催：システム制御情報学会 (幹事学会), 計測自動制御学会, 日本機械学会, 化学工学会, 精密工学会, 電気学 会, 日本航空宇宙学会 共 催：神戸大学 工学研究科・システム情報学研究科 期 日：2015年11月14日(土), 15日(日) 場 所：神戸大学 六甲キャンパス 工学部教室棟 (神戸市灘区六甲台町1-1)
International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS 2015) (2015年知的情報処理と生物医科学国際会議) 主 催：琉球大学, 沖縄科学技術大学院大学, 沖縄高等工業専門学校 連絡先：2015年知的情報処理と生物医科学国際会議事務局 実行委員長 玉城 史朗 〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地 琉球大学工学部情報工学科 Tel: 098-895-8720 FAX: 098-895-8727 E-Mail: shiro@ie.u-ryukyu.ac.jp

EcoDesign 2015 第9回環境調和型設計とインバースマニュファクチャリングに関する国際シンポジウム

主 催：エコデザイン学会連合、産業技術総合研究所

会 期：2015年12月2日～12月4日

開催場所：東京国際フォーラム（東京都千代田区丸の内3丁目5-1）

事 務 局：東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻梅田研究室EcoDesign2015事務局

第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会

主 催：公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門

開催時期：平成27年12月14日(月)～16日(水)

事 務 局：〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学航空・機械研究実験棟3階310室

SI2015 実行委員長 新井 史人 E-mail：arai@mech.nagoya-u.ac.jp

SICE事務局：部門協議会担当 E-mail：bumon@sice.or.jp TEL：03-3814-4121

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 (6月10日現在)	935	15	127	133
差 引 増 減	+ 6	0	+ 3	0

(注1) 正会員の内訳 名誉員12名・シニア員37名・ジュニア員138名

正会員

福田 俊介 (KYB株)

桑山 明規 (株)デンソー

松川 豊 (長崎総合科学大学)

大野 歩 (ダイヤ工業株)

糟谷 修史

大野 信吾 (株式会社ブリヂストン)

山本 久嗣 (富山高等専門学校)

細川 哲朗 (住友精密工業株)

池田 智浩 (ダイヤ工業株)

小林 亘 (芝浦工業大学)

大塚 宏行 (油研工業株)

菱沼 康郎 (上海七洋液圧機械有限公司)

学生会員

鶴 大地 (鹿児島大学)

古田 優悟 (芝浦工業大学)

由 龍 (芝浦工業大学)

八木澤 遼 (芝浦工業大学)

赤羽 里夢 (富山高等専門学校)

周 東博 (東京工業大学)

小野 光博 (東京工業大学)

高山 智大 (東京工業大学)

櫻井 遥 (東京医科歯科大学)

吉田 翔 (東京医科歯科大学)

直井 誠 (東京電機大学)

甲斐 新平 (東京電機大学)

三塚 亮 (東京電機大学)

川上 親久 (鹿児島大学)

家山 奨男 (神奈川工科大学)

渡邊 賢吾 (芝浦工業大学)

矢部 直樹 (芝浦工業大学)

金谷 航葵 (富山高等専門学校)

小川 拓 (東京工業大学)

水谷 千春 (東京工業大学)

石田 靖昌 (東京工業大学)

瀧澤 昂志 (東京医科歯科大学)

西脇 卓海 (信州大学)

長瀬 広明 (東京電機大学)

武井 裕輔 (東京電機大学)

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27年度 特別教育講座のお知らせ
「油圧システムのモデリングの基礎をつかむーブロック線図とパワーフローー」
 開催日：平成27年8月25日（火）9時～17時

開催趣旨：

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

ンに対して入門的な位置付けを持ちます。

開催場所：機械振興会館本館地下3階B3-2

（東京都港区芝公園3-5-8）

皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。

平成27年度 オータムセミナーのお知らせ
「アクアドライブシステムの産業利用の現状」（仮題）
 開催日：平成27年11月6日（金）

開催趣旨：

水道水を作動流体とするアクアドライブシステムに関心を持たれてきています。本セミナーでは一昨年のウインターセミナーを受け、具体的に利用されている産業分野を紹介するとともに課題について理解することで、さらなる応用を考える機会にしたいと思います。

開催日時：平成27年11月6日（金）午後13時～17時

開催場所：機械振興会館本館：6階 6D-4

（東京都港区芝公園3-5-8）

詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。

皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

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27年秋季フルードパワーシステム講演会のお知らせ
 開催日：平成27年11月26日（木）・27日（金）

開催趣旨：

平成27年秋季フルードパワーシステム講演会は鹿児島県鹿児島市ジェイドガーデンパレスで開催されます。本講演会では、一般講演に加えて、日中若手交流事業の一環として実施する招待講演（徐先生、浙江大学）・特別講演・オーガナイズドセッション・技術懇談会などを企画する予定です。本講演会に関する詳細なアナウンスは日本フルードパワーシステム学会のホームページ (<http://www.jfps.jp/index.html>) で行う予定です。特に企業様からの講演発表をお願いできればと思っております。皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

ション・技術懇談会などを企画する予定です。本講演会に関する詳細なアナウンスは日本フルードパワーシステム学会のホームページ (<http://www.jfps.jp/index.html>) で行う予定です。特に企業様からの講演発表をお願いできればと思っております。皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

平成27年度 日中若手研究者交流事業 徐兵教授（浙江大学）特別講演のお知らせ
「建設機械のシングルポンプマルチアクチュエータにおけるモーションコントロールシステムに関する研究」
 開催日：平成27年11月（秋季講演会にて）

開催趣旨：

2015年度日中若手研究者交流事業の一環として、中国から徐兵教授（浙江大学）を招聘し、研究者および開発者との研究交流を図るとともに、秋季講演会において特別講演会を開催いたします。建設機械を中心とした省エネルギー性および制御性の向上を目的とする制御系設計に関するご講演ですので、多くの皆さまのご参加をお待ちしております。

くの皆さまのご参加をお待ちしております。

詳細は学会ホームページに随時掲載いたします。

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

編集室

次号予告

—特集「フルードパワー歴史探訪～温故知新～」—

〔巻頭言〕「フルードパワー歴史探訪～温故知新～」発行にあたって

山田 宏尚

〔解説〕古代のフルードパワー技術—続・ヘロンの謎—

小山 紀

空気圧制御弁の推移

長岐 忠則

油圧ショベルの歴史を振り返り

布谷 貞夫

機能性流体の歴史

中野 政身

協会創成から学会揺籃期の思い出

中野 和夫

〔会議報告〕ICMDT 2015におけるフルードパワー技術研究動向

田中 豊

ROBOMECH 2015におけるフルードパワー技術研究動向

高岩 昌弘

〔トピックス〕海外の産学連携（米国の事例）

平工 賢二

インドネシア駐在員日記

田中 大慶

〔研究室紹介〕東北大学流体科学研究所 早瀬・白井・宮内研究室

早瀬 敏幸

〔企画行事〕平成27年春季講演会併設セミナー開催報告「フルードパワーにおける故障予知技術」

内堀 晃彦

平成26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）

委 員 中 野 政 身（東北大学）

副委員長 塚 越 秀 行（東京工業大学）

成 田 晋（KYB株）

委 員 伊 藤 雅 則（東京海洋大学）

藤 田 壽 憲（東京電機大学）

内 堀 晃 彦（宇部工業高等専門学校）

丸 田 和 弘（株コマツ）

小 倉 弘（日立建機株）

村 松 久 巳（沼津工業高等専門学校）

加 藤 猛 美（株コガネイ）

柳 田 秀 記（豊橋技術科学大学）

加 藤 友 規（福岡工業大学）

山 田 真の介（株TAIYO）

北 村 剛（油研工業株）

吉 満 俊 拓（神奈川工科大学）

木 原 和 幸（財工業所有権協力センター）

担当理事 伊 藤 和 巳（KYB株）

栗 林 直 樹（川崎重工業）

山 田 宏 尚（岐阜大学）

五 嶋 裕 之（機械振興協会）

編集事務局 藤 谷 秀 次（学会事務局）

佐 藤 恭 一（横浜国立大学）

竹 内 留 美（勝美印刷株）

妹 尾 満（SMC株）

（あいうえお 順）

多 田 昌 弘（CKD株）

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46巻, 第4号 (2015)

平成27年7月

目次

研究論文

1. 重み関数モデルを用いた特性曲線法の気体管路内微小振幅波の
計算誤差

中尾光博, 香川利春 23

TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

Vol.46, No.4

July 2015

Contents

Paper

1. Numerical Error in Method of Characteristics with Weighting Function-Based
Model for Small Amplitude Wave in Gas Pipeline

Mitsuhiro NAKAO, Toshiharu KAGAWA 23

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

研究論文

重み関数モデルを用いた特性曲線法の気体管路内微小振幅波の計算誤差*

中尾 光博**, 香川 利春***

Numerical Error in Method of Characteristics with Weighting Function-Based Model for Small Amplitude Wave in Gas Pipeline

Mitsuhiro NAKAO, Toshiharu KAGAWA

The method of characteristics is suitable to calculate small amplitude wave in gas pipeline. The method is superior in a case that the boundary conditions have many frequency components, while requires a computation of unsteady friction terms. The unsteady friction terms include convolution integral of which calculation is time-consuming. Reduction of the computation load with maintenance of its accuracy, which is essential for a practical computation, requires a weighting function-based (WFB) approximation which approximates the weighting functions by sums of exponential terms, and of convolution integrals. However, even the WFB model contains approximation errors which sometimes cause computation error. The approximation errors in liquid pipeline have been evaluated in Fourier domain. However, the errors in gas pipeline have not been evaluated. In this paper, we present a discussion and quantification of the numerical errors that occur when using the method for the simulation of small amplitude wave in gas pipeline. Comparisons of numerical error caused by approximations are made in the Fourier domain where exact solutions can be determined.

Key words : Unsteady friction, Weighting function, Gas pipeline, Small amplitude wave, Error analysis

1. 緒 言

気体管路では、しばしば微小振幅波が発生する。Brown¹⁾は十分長く真直で断面形状が一定である円管において妥当な1次元支配方程式を示し、過渡応答解析のためのラプラス領域のモデルを示した。Katz²⁾や吉岡ら³⁾は、そのラプラス領域のモデルの逆変換により過渡応答を計算した。周波数特性に基づく過渡応答計算法は特性曲線法と比較して複雑な境界条件の扱いが困難である。一方、特性曲線法を用いた解析のためには、非定常層流圧力損失の計算が必要である。

液体管路においてはZielke⁴⁾がラプラス領域で求めた非定常層流圧力損失を時間領域の値へと逆変換する方法を示した。しかし時間領域の解は畳み込み積分を含む形であるため、時間の経過とともに計算時間が増大し、短時間の計算にしか適用できないという欠点があった。Tripathi⁵⁾は重み関数を3つの指数関数の和で近似することで計算負荷を低減する方法を示した。しかし、関数の近似精度が十分でな

かったために計算精度が悪く、その決定方法も示されていないという問題があった。香川ら⁶⁾は重み関数の近似級数の決定法を示し、計算対象の無次元時間に応じて項数を増やすことで、計算精度をほとんど低下させることなく計算負荷を低減した。鈴木ら⁷⁾はZielkeの方法を効率化し、無次元時間によって香川らの方法と切り替える方法を提案した。Schohl⁸⁾は費用関数の最小化による近似級数の決定を試行し、5つの指数関数の和で重み関数を近似した。Vardyら⁹⁾は簡易な級数決定法として代数的な方法を示した。Vítkovskýら¹⁰⁾は香川らの方法にSchohl⁸⁾の方法を適用することで同じ項数でも高精度化できることを示した。さらにVítkovskýら¹¹⁾は重み関数モデルを用いた液体管路における過渡応答計算の誤差要因について総括し、評価基準として重み関数の近似誤差、畳み込み積分の近似誤差、格子分離誤差の3つを挙げている。

一方気体管路においては、北川ら¹²⁾がBrown¹⁾の解析解に香川らの高速高精度計算法⁶⁾を適用し、特性曲線法を用いて計算した。しかし、上述の液体管路においてなされたような誤差要因の解析例はない。本論文では、十分長く真直で断面形状が一定である円形気体管路における気体微小振幅波の計算誤差について、重み関数の近似誤差、畳み込み積分の近似誤差、格子分離誤差の観点から評価する。

2. 主 な 記 号

c : 音速

*平成26年12月25日 原稿受付

**鹿児島大学 大学院理工学研究科機械工学専攻
(所在地：鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)
(E-mail: nakao@mech.kagoshima-u.ac.jp)***東京工業大学 精密工学研究所
(所在地：神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

D	: 管路の内径
D_n	: 無次元直径 ($L/(cT)$)
E	: 重み関数近似の残差
E_{Cf}, E_{Cg}	: 畳み込み積分の近似誤差
E_{Gf}, E_{Gg}	: 格子分離誤差
$f(t), g(t)$	: 非定常層流圧力損失項
i	: 虚数単位
k_f, k_g	: 近似項数
M	: 残差計算のデータ点数
m_f, m_g	: 重み関数の係数
n_f, n_g	: 重み関数の係数
p	: 圧力
Pr	: プラントル数
t	: 時間
T_f	: 時間無次元化パラメータ ($\rho D^2/(4\mu)$)
T_g	: 時間無次元化パラメータ ($Pr\rho D^2/(4\mu)$)
u	: 管路断面平均流速
$W_f(t), W_g(t)$	: 重み関数
$w_f(\tau_f), w_g(\tau_g)$	: 重み関数の無次元時間表記
x	: 管路軸方向座標
κ	: 比熱比
Δt	: 時間刻み
Δx	: 格子刻み
ν	: 動粘性係数
ρ	: 密度
τ_f	: 無次元時間 (t/T_f)
τ_g	: 無次元時間 (t/T_g)
ω	: 角周波数
ω_{grid}	: 格子の角周波数 ($2\pi/\Delta t$)

添字

— : 平衡点における値

 app : 近似値

3. 計算方法

3.1 支配方程式

真直で断面形状が一定である円管において流れが軸対称であり、管路壁面が剛体かつ等温であると仮定すると、気体の微小振幅波は次の運動方程式とエネルギー方程式で記述できる^{1), 12)}。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{32\bar{\nu}}{D^2} \left\{ u + \frac{1}{2} f(t) \right\} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \bar{\rho} c^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{16(\kappa-1)\bar{\nu}}{Pr D^2} g(t) = 0 \quad (2)$$

ただし、 $f(t)$ と $g(t)$ は非定常層流圧力損失に対応した項であり、それぞれ以下の式で表わされる。

$$f(t) = \int_0^t \frac{\partial u}{\partial t}(z) W_f(t-z) dz \quad (3)$$

$$g(t) = \int_0^t \frac{\partial p}{\partial t}(z) W_g(t-z) dz \quad (4)$$

$W_f(t)$, $W_g(t)$ は重み関数であり、それぞれ無次元時間 τ_f , τ_g を用いて以下の式で表わされる⁶⁾。

$$\begin{aligned} & \text{if } \tau_f > 0.02 \\ & w_f(\tau_f) = e^{-26.3744\tau_f} + e^{-70.8493\tau_f} + e^{-135.0198\tau_f} \\ & \quad + e^{-218.9216\tau_f} + e^{-322.5544\tau_f} \\ & \text{else} \\ & w_f(\tau_f) = 0.282095\tau_f^{-1/2} - 1.250000 \\ & \quad + 1.057855\tau_f^{1/2} + 0.937500\tau_f \\ & \quad + 0.396696\tau_f^{3/2} - 0.351563\tau_f^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } \tau_g > 0.03 \\ & w_g(\tau_g) = e^{-5.78321\tau_g} + e^{-30.4713\tau_g} + e^{-74.8870\tau_g} \\ & \quad + e^{-139.040\tau_g} + e^{-222.932\tau_g} + e^{-326.563\tau_g} + e^{-449.934\tau_g} \\ & \text{else} \\ & w_g(\tau_g) = 0.282095\tau_g^{-1/2} - 0.250000 - \\ & \quad 0.0705237\tau_g^{1/2} - 0.0625000\tau_g - \\ & \quad 0.0734622\tau_g^{3/2} - 0.101563\tau_g^2 \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 重み関数モデルにおける畳み込み積分の近似法

重み関数モデルは式(5), (6)の重み関数を式(7), (8)のように近似することで計算負荷の低減を図るモデルである。

$$w_f(\tau_f) \approx w_f(\tau_f)_{app} = \sum_{j=1}^{k_f} m_{f,j} e^{-n_{f,j}\tau_f} \quad (7)$$

$$w_g(\tau_g) \approx w_g(\tau_g)_{app} = \sum_{j=1}^{k_g} m_{g,j} e^{-n_{g,j}\tau_g} \quad (8)$$

Trikha⁵⁾はこの近似を用いることで式(3)の畳み込み積分が式(9)のように近似できることを示した。

$$f(t)_{app} = \sum_{j=1}^N y_{f,j}(t) \quad (9)$$

ただし、 $y_{f,j}$ は式(10)で定義される。

$$y_{f,j}(t+\Delta t) = e^{-n_{f,j}\Delta\tau_f} y_{f,j}(t) + m_{f,j} \{u(t+\Delta t) - u(t)\} \quad (10)$$

Trikhaの方法は計算時間の低減には成功したが、計算精度が低いことが指摘されている。

香川ら⁶⁾は重み関数の高精度な近似方法を示し、さらに畳み込み積分の近似として、式(10)の代わりに式(11)の近似を用いている。

$$y_f(t+\Delta t) = e^{-n_f\Delta\tau_f} y_f(t) + m_f e^{-n_f(\Delta\tau_f/2)} \{u(t+\Delta t) - u(t)\} \quad (11)$$

北川ら¹²⁾は、香川らの方法を式(4)に適用し、式(12), (13)を得ている。

$$g(t)_{app} = \sum_{g=1}^N y_g(t) \quad (12)$$

$$y_g(t+\Delta t) = e^{-n_g\Delta\tau_g} y_g(t) + m_g e^{-n_g(\Delta\tau_g/2)} \{p(t+\Delta t) - p(t)\} \quad (13)$$

Schohl⁸⁾は最適化アルゴリズムを用いた重み関数の近似方法を示し、さらに畳み込み積分の中の加速度項が時間ステップの間で一定であると仮定して積分することで、式(14)

を導出している.

$$y_f(t+\Delta t) = e^{-n_f \Delta t} y_f(t) + \frac{m_f(1 - e^{-n_f \Delta t})}{n_f \Delta t} \{u(t+\Delta t) - u(t)\} \quad (14)$$

3.3 計算の誤差要因

Vítkovský¹¹⁾は、液体管路過渡応答解析における重み関数モデルの誤差要因は重み関数の近似、畳み込み積分の近似、格子分離の3つであると指摘し、実際にそれらの誤差を評価している. しかし気体管路における検討例はない. 以下の章では気体管路における3つの誤差を評価する.

4. 重み関数の近似誤差

4.1 近似重み関数の決定法

重み関数モデルを用いて実用的な計算を行うには、式(7)、(8)の形で重み関数を近似する必要がある. 提案者であるTrihka⁵⁾は具体的な決定方法を示しておらず、香川⁶⁾は重み関数の近似級数の決定法を初めて示した. しかし、定量的な方法ではなく、最適値ではないことが示されている¹⁰⁾. Schohl⁸⁾は目的関数を最小化する最適化アルゴリズムで未知係数を決定した. Vítkovský¹⁰⁾はさらに良好な近似を得たい無次元時間の範囲でSchohl⁸⁾の方法を試行している. Vardy⁹⁾は簡易な代数的な重み関数の決定法を示しているが、

近似精度が低いことが知られており、本論文では扱わない.

本論文では、Vítkovský¹¹⁾と同様に、式(15)で表わされる目的関数を最小化する最適化アルゴリズムにより未知係数を求め、その近似精度を評価する.

$$E = \sum_{j=1}^M \left[\frac{w(\tau_j) - w_{f,app}(\tau_j)}{w(\tau_j)} \right]^2 \quad (15)$$

ここで M は無次元時間領域の分割数で、分割は $\log(\tau)$ 上で均等であり、近似項数の10倍とした. 本研究では、最適化アルゴリズムにWolfram Research社のMathematicaに搭載されているFindMinimum関数を用いた.

4.2 重み関数の近似誤差評価

重み関数 $w_f(\tau_f)$ は10項の指数関数で近似した. Fig. 1に示すのは香川らの近似、香川らと同程度の誤差での近似(Wide range)、香川らと同程度の適用範囲での近似(Accurate)の真値に対する相対誤差である. Schohlの方法では、香川らの近似と同程度の近似誤差では適用可能な無次元時間の範囲が広く、同程度の適用可能な無次元時間範囲では近似誤差が小さいことがわかる.

重み関数 $w_g(\tau_g)$ は12項の指数関数で近似した. Fig. 2に示すのは北川らの近似、北川らと同程度の誤差での近似(Wide range)、北川らと同程度の適用範囲での近似

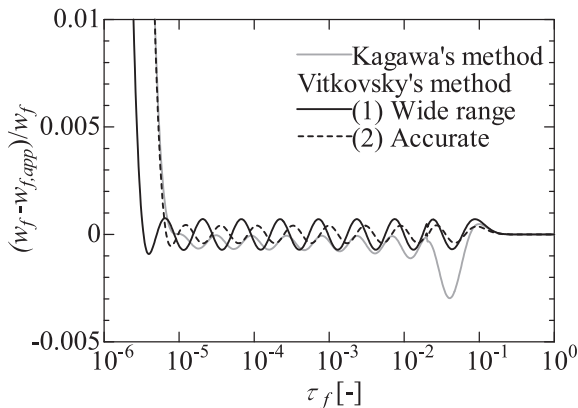


Fig. 1 Comparison of the relative errors between Kagawa's method and the optimized approximation with 10 terms

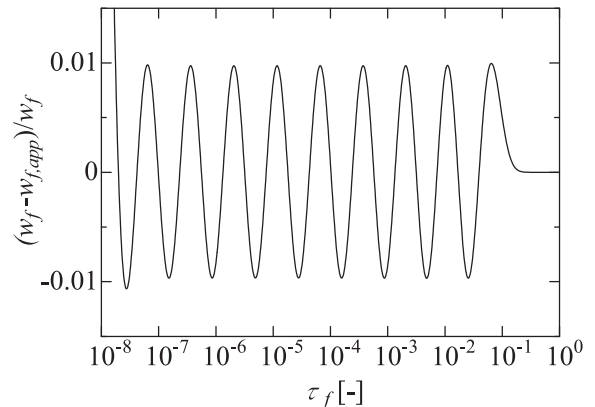


Fig. 3 Relative error in 1% approximation of weighting function, Eq. (5), with 10 exponential terms

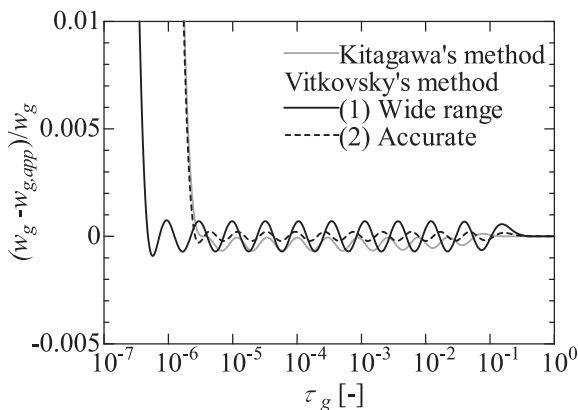


Fig. 2 Comparison of the relative errors between Kitagawa's method and the optimized approximation with 12 terms

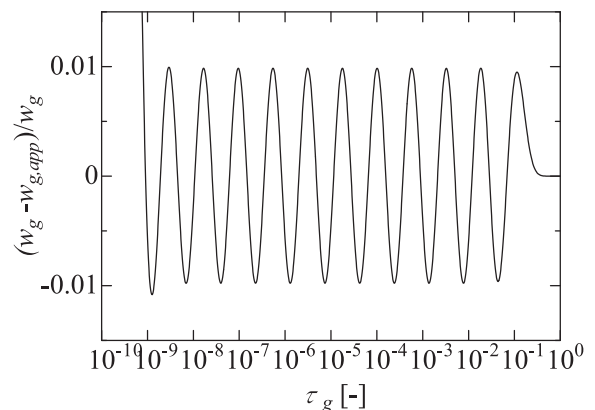


Fig. 4 Relative error in 1% approximation of weighting function, Eq. (6), with 12 exponential terms

(Accurate) の真値に対する相対誤差である。重み関数 $w_f(\tau_f)$ の近似と同様にSchohlの方法では北川らの近似と同程度の近似誤差では適用可能な無次元時間の範囲が広く、同

Table 1 Obtained coefficients used in Fig. 1

j	Accurate		Wide range	
	$m_{f,i}$	$n_{f,i}$	$m_{f,j}$	$n_{f,j}$
1	1.00000×10^0	2.63744×10^1	1.00000×10^0	2.63744×10^1
2	1.09354×10^0	7.20405×10^1	1.13707×10^0	7.26891×10^1
3	1.83984×10^0	1.67512×10^2	2.05770×10^0	1.78755×10^2
4	3.39614×10^0	4.41445×10^2	3.92340×10^0	5.08620×10^2
5	6.02602×10^0	1.25876×10^3	7.20538×10^0	1.56617×10^3
6	1.05729×10^1	3.71113×10^3	1.31088×10^1	4.98372×10^3
7	1.85002×10^1	1.11195×10^4	2.37984×10^1	1.61102×10^4
8	3.23583×10^1	3.36076×10^4	4.31910×10^1	5.25088×10^4
9	5.68078×10^1	1.02207×10^5	7.86054×10^1	1.72088×10^5
10	1.04260×10^2	3.16886×10^5	1.48767×10^2	5.73682×10^5

Table 2 Obtained coefficients used in Fig. 2

j	Accurate		Wide range	
	$m_{g,j}$	$n_{g,j}$	$m_{g,j}$	$n_{g,j}$
1	1.00000×10^0	5.78321×10^0	1.00000×10^0	5.78321×10^0
2	1.03392×10^0	3.07303×10^1	1.08027×10^0	3.11372×10^1
3	1.42464×10^0	8.54166×10^1	1.72854×10^0	9.55323×10^1
4	2.42016×10^0	2.28703×10^2	3.18861×10^0	2.98067×10^2
5	4.10415×10^0	6.32312×10^2	5.80858×10^0	9.60680×10^2
6	6.91416×10^0	1.77016×10^3	1.05368×10^1	3.12909×10^3
7	1.16309×10^1	4.97936×10^3	1.91014×10^1	1.02349×10^4
8	1.95594×10^1	1.40384×10^4	3.46241×10^1	3.35462×10^4
9	3.28922×10^1	3.96278×10^4	6.27614×10^1	1.10073×10^5
10	5.53439×10^1	1.11963×10^5	1.13791×10^2	3.61421×10^5
11	9.36108×10^1	3.17093×10^5	2.06932×10^2	1.18846×10^6
12	1.66549×10^2	9.15436×10^5	3.91528×10^2	3.96734×10^6

Table 3 Obtained coefficients of 1 % approximation

j	$m_{f,j}$	$n_{f,j}$	$m_{g,j}$	$n_{g,j}$
1	1.00000×10^0	2.63744×10^1	1.00000×10^0	5.78321×10^0
2	1.64085×10^0	8.14040×10^1	1.47206×10^0	3.54106×10^1
3	4.33824×10^0	3.20471×10^2	3.57203×10^0	1.78260×10^2
4	1.05803×10^1	1.60234×10^3	8.59542×10^0	9.82252×10^2
5	2.53198×10^1	8.67661×10^3	2.05558×10^1	5.54119×10^3
6	6.04379×10^1	4.83920×10^4	4.91359×10^1	3.14977×10^4
7	1.44209×10^2	2.73138×10^5	1.17449×10^2	1.79579×10^5
8	3.44073×10^2	1.54932×10^6	2.80738×10^2	1.02511×10^6
9	8.21146×10^2	8.80719×10^6	6.71051×10^2	5.85481×10^6
10	1.98675×10^3	5.03605×10^7	1.60403×10^3	3.34467×10^7
11	—	—	3.83527×10^3	1.91109×10^8
12	—	—	9.29845×10^3	1.09762×10^9

程度の適用可能な無次元時間範囲では近似誤差が小さいことがわかる。

Schohlの方法の特徴は精度よく近似する無次元時間の範囲を自由に設定できる点にある。Fig. 3, Fig. 4は真値に対する相対誤差1%で重み関数 $w_f(\tau_f)$, $w_g(\tau_g)$ を上記と同じ項数で近似した時の結果である。本章で求めた重み関数の係数はTable 1, Table 2, Table 3にまとめる。

5. 畳み込み積分の近似誤差

畳み込み積分の計算は周波数領域では単純な掛け算で表わされるため、畳み込み積分の近似誤差は周波数領域で評価する。式(3)の近似誤差は式(16)で定義され、計算においては $u = \sin(\omega t)$ とおく。

$$E_{CF}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega)_{app}}{\hat{f}(\omega)} \quad (16)$$

分子は式(9)に式(11)や式(14)を代入することで得られる無限級数をフーリエ変換することで計算できる。香川らの方法の畳み込み積分の近似誤差は式(17)、同様にSchohlの方法では式(18)のようになる。

$$E_{CF}(\omega) = \frac{i(1-e^{-i\omega\Delta t}) \sum_{j=1}^{k_f} \frac{m_{f,j} e^{-0.5n_{f,j}\Delta t/T_f}}{n_{f,j}/T_f + i\omega}}{\omega\Delta t \hat{w}_f(\omega)} \quad (17)$$

$$E_{CF}(\omega) = \frac{i(1-e^{-i\omega\Delta t}) \sum_{j=1}^{k_f} \frac{m_{f,j} T_f (1-e^{-n_{f,j}\Delta t/T_f})}{n_{f,j} \Delta t (n_{f,j}/T_f + i\omega)}}{\omega\Delta t \hat{w}_f(\omega)} \quad (18)$$

式(4)の近似誤差は式(19)で定義され、計算では $p = \sin(\omega t)$ とおく。

$$E_{CG}(\omega) = \frac{\hat{g}(\omega)_{app}}{\hat{g}(\omega)} \quad (19)$$

式(16)と同様の手順に従うと、北川の方法、Schohlの方法での近似はそれぞれ式(20)、(21)のようになる。

$$E_{CG}(\omega) = \frac{i(1-e^{-i\omega\Delta t}) \sum_{j=1}^{k_g} \frac{m_{g,j} e^{-0.5n_{g,j}\Delta t/T_g}}{n_{g,j}/T_g + i\omega}}{\omega\Delta t \hat{w}_g(\omega)} \quad (20)$$

$$E_{CG}(\omega) = \frac{i(1-e^{-i\omega\Delta t}) \sum_{j=1}^{k_g} \frac{m_{g,j} T_g (1-e^{-n_{g,j}\Delta t/T_g})}{n_{g,j} \Delta t (n_{g,j}/T_g + i\omega)}}{\omega\Delta t \hat{w}_g(\omega)} \quad (21)$$

式(17)、式(18)との差異は重み関数と無次元化パラメータである。

近似誤差 E_{CF} , E_{CG} は複素数であり、真値と近似値の比率であるから、近似値が正確なほどそれらの絶対値は1に、偏角は0に近づく。Fig. 5は香川らの方法とSchohlの方法で近似した場合の近似誤差 E_{CF} の絶対値と偏角である。無次元時間刻み Δt は 1.0×10^{-2} , 1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-6} の3通り、重み関数の近似はaccurateと1%の2通りである。なお、グラフ横軸はサンプリング定理により定まる時間刻み Δt での最大角周波数周波数 ω_{grid} で無次元化した角周波数である。Schohlの近似は僅かながら香川らの近似よりも近似精度が

高い。いずれの結果でも無次元化角周波数が1に近づくにつれて絶対値が0に近づき、偏角が0から遠ざかることがわかる。また無次元化角周波数が小さな領域では、絶対値はほぼ一定値をとり、その値は無次元時間刻み $\Delta\tau_f$ が小さいほど1に近い。ただし、accurateの場合のみ $\Delta\tau_f=1.0\times 10^{-6}$ の場合により粗い $\Delta\tau_f$ の場合よりも近似精度が低下している。この原因は重み関数の近似範囲である。Fig. 1からわかるようにaccurateでは高精度で近似している無次元時間 τ_f の範囲が約 1.0×10^{-5} 以上である。そのため無次元時間刻みが近似範囲外の 1.0×10^{-6} の特に高周波数領域において近似誤差が低下した。なお、無次元時間刻みが同じで時間刻みが異なる場合についても検討したが大きな差は見られなかった。畳み込み積分の近似では、強い非線形性を有する重み関数に対して単純な短冊形で近似しているが、この近似が近似誤差の主因であることを意味している。

Fig. 6は北川らの方法とSchohlの方法で近似した場合の近似誤差 E_{Cg} の絶対値と偏角である。無次元時間刻み $\Delta\tau_g$ は 7.0×10^{-3} 、 7.0×10^{-5} 、 7.0×10^{-7} の3通り、重み関数の近似はaccurateと1%の2通りである。この条件は時間刻みを E_{Cf} の場合と同じとし、プラントル数を0.7とした場合に相当する。全体的な傾向は E_{Cf} の場合と同じであるが、最大の違いは同じ時間刻みに対して近似精度が高いことである。この原因は無次元化パラメータ T_g が T_f にプラントル数を掛けたもの

であるために、無次元時間刻みが小さくなるからである。

6. 格子分離誤差

特性曲線法では長方形格子と菱形格子のいずれかが用いられる。Fig. 7に長方形格子の例を示すが、白丸の格子点で形成される菱形格子1と黒丸の格子点で形成される菱形格子2の2つが重なった構造である。格子点を結ぶ斜め線はリーマン不変量が伝播する特性曲線を表している。ある時刻の非定常層流圧力損失の計算では、同一 x 座標上における同時刻と1つ前の時刻の流速と圧力が用いられる。そのため、それぞれ異なる境界条件に由来した値が交互に用いられることになり、これが誤差要因となることがある。

この誤差は特に過渡応答の計算において顕著に表れる。Fig. 8のようなサンプリング間隔 Δt で、ある時刻で急激に圧力が Δp だけ降下する過渡応答の計算を考える。このとき、真の流速履歴は式(22)で与えられる。

$$V(t)=\{u_1(t), u_2(t-\Delta t), u_1(t-2\Delta t), u_2(t-3\Delta t), \dots\} \quad (22)$$

ただし格子1と格子2上の流速をそれぞれ u_1 、 u_2 とする。これは Δt だけずれた2つの過渡応答が重なったものであるから、格子1と格子2に含まれる周波数成分の振幅は等しく位相が Δt だけずれている。つまり $u_1 = \sin(\omega t)$ とすると $u_2 = \sin(\omega(t+\Delta t))$ である。周波数 ω の成分に着目すると格

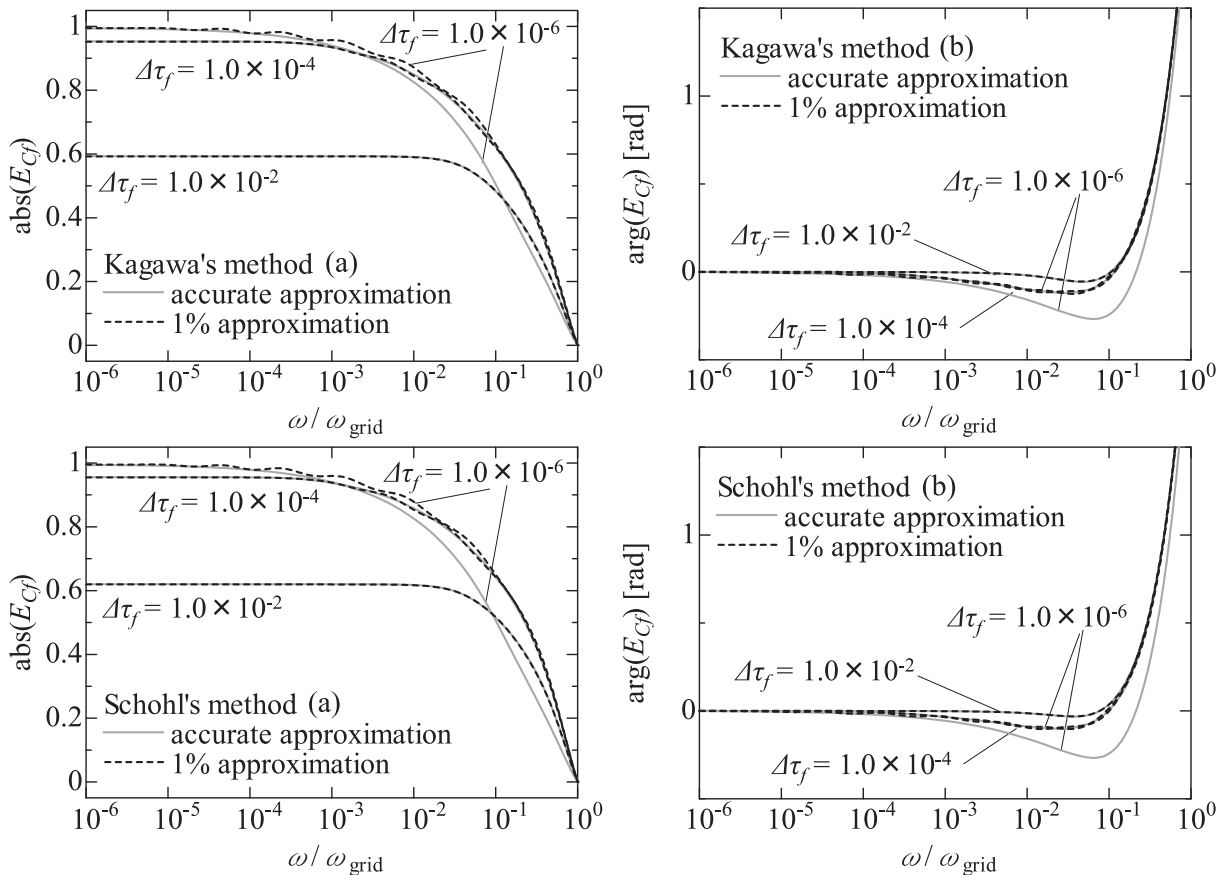


Fig. 5 Convolution approximation errors of Eq.(3) : (a)magnitude; (b) phase error

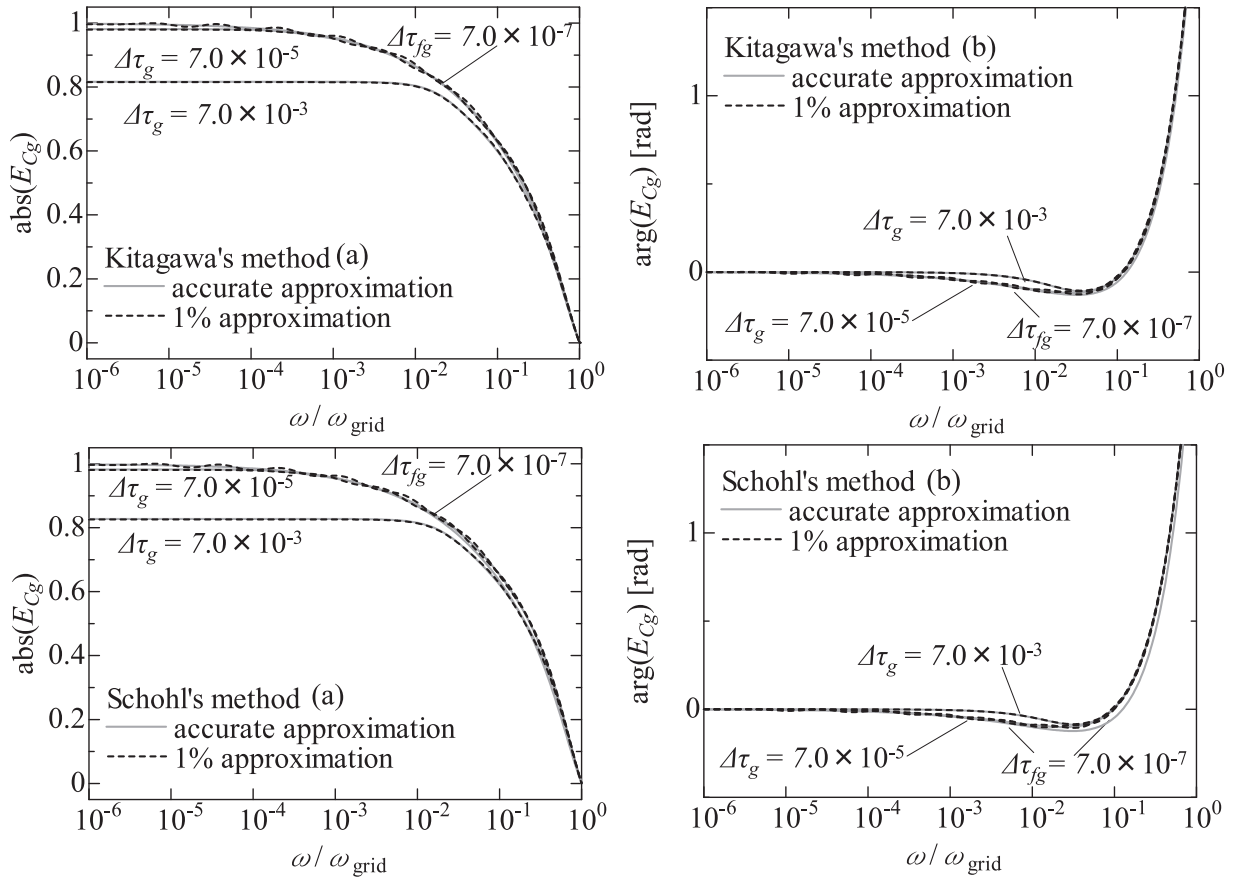


Fig. 6 Convolution approximation errors of Eq. (4) : (a) magnitude; (b) phase error

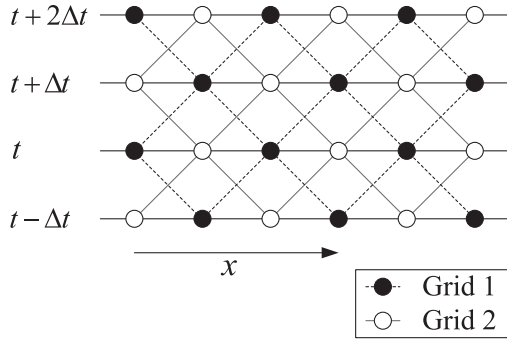


Fig. 7 Rectangular-type characteristic grid

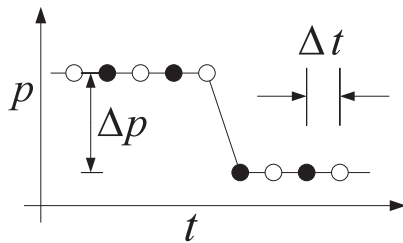


Fig. 8 An example of step response

子1と格子2において実質的に扱う条件はそれぞれ式(23), 式(24)ようになる。

$$V_1(t) = \{u_1(t), u_1(t-2\Delta t), u_1(t-2\Delta t), u_1(t-4\Delta t), \dots\} \quad (23)$$

$$V_2(t) = \{u_1(t), u_1(t), u_1(t-2\Delta t), u_1(t-2\Delta t), \dots\} \quad (24)$$

格子1, 格子2における非定常損失はそれぞれ式(23), 式(24)を式(9)に代入することで得られる。本来これらは同一の現象を扱っているのと同じ値をもたなければならない。そこで格子分離に伴う誤差を式(25)で定義し, これは複素数であるから誤差が小さい程絶対値は1に, 偏角は0に近づく。

$$E_{Gf}(\omega) = \frac{\hat{f}(V_2, \omega)_{app}}{\hat{f}(V_1, \omega)_{app}} \quad (25)$$

式(3)の格子分離誤差は, 香川らの方法では式(26), Schohlの方法では式(27)になる。

$$E_{Gf}(\omega) = \frac{e^{i\omega\Delta t} \sum_{j=1}^{k_f} \frac{m_{f,j} e^{-1.5n_{f,j}\Delta t/T_f}}{n_{f,j}/T_f + i\omega}}{\sum_{j=1}^{k_f} \frac{m_{f,j} e^{-0.5n_{f,j}\Delta t/T_f}}{n_{f,j}/T_f + i\omega}} \quad (26)$$

$$E_{Gf}(\omega) = \frac{e^{i\omega\Delta t} \sum_{j=1}^{k_f} \frac{m_{f,j} T_f (1 - e^{-n_{f,j}\Delta t/T_f}) e^{-n_{f,j}\Delta t/T_f}}{n_{f,j} \Delta t (n_{f,j}/T_f + i\omega)}}{\sum_{j=1}^{k_f} \frac{m_{f,j} T_f (1 - e^{-n_{f,j}\Delta t/T_f})}{n_{f,j} \Delta t (n_{f,j}/T_f + i\omega)}} \quad (27)$$

Fig. 9は香川らの方法とSchohlの方法の格子分離誤差 E_{Gf} の絶対値と偏角である。無次元時間刻み $\Delta\tau_f$ は 1.0×10^{-2} , $1.0 \times$

10^{-4} , 1.0×10^{-6} の3通り, 重み関数の近似はaccurateと1%の2通りである. グラフ横軸は時間刻み Δt での最大角周波数周波数 ω_{grid} で無次元化した角周波数である. 畳み込み積分の近似誤差とは異なり, 香川らの方法の方がSchohlの方法よりも僅かながら差が小さい. 偏角は無次元時間刻みや重み関数の近似精度にあまり依存しない. また $\Delta \tau_f = 1.0 \times 10^{-6}$ の場合にaccurateの方が1%近似よりも誤差が小さいことから, 格子分離誤差を低減するには近似範囲を広げるよりも近似精度を上げる方が有効であることがわかる.

同様に式(4)の格子分離誤差は, 北川らの方法では式(28), Schohlの方法では式(29)になる.

$$E_{Gg}(\omega) = \frac{e^{i\omega\Delta t} \sum_{j=1}^{k_g} \frac{m_{g,j} e^{-1.5n_{g,j}\Delta t/T_g}}{n_{g,j}/T_g + i\omega}}{\sum_{j=1}^{k_g} \frac{m_{g,j} e^{-0.5n_{g,j}\Delta t/T_g}}{n_{g,j}/T_g + i\omega}} \quad (28)$$

$$E_{Gg}(\omega) = \frac{e^{i\omega\Delta t} \sum_{j=1}^{k_g} \frac{m_{g,j} T_g (1 - e^{-n_{g,j}\Delta t/T_g}) e^{-n_{g,j}\Delta t/T_g}}{n_{g,j} \Delta t (n_{g,j}/T_g + i\omega)}}{\sum_{j=1}^{k_g} \frac{m_{g,j} T_g (1 - e^{-n_{g,j}\Delta t/T_g})}{n_{g,j} \Delta t (n_{g,j}/T_g + i\omega)}} \quad (29)$$

Fig. 10は北川らの方法とSchohlの方法で近似した場合の格子分離誤差EGgの絶対値と偏角である. 無次元時間刻み $\Delta \tau_g$ は 7.0×10^{-3} , 7.0×10^{-5} , 7.0×10^{-7} の3通り, 重み関数の近似はaccurateと1%の2通りである. この条件は時間刻みを E_{Gf} の場合と同じとし, プラントル数を0.7とした場合

に相当する. 全体的な傾向は E_{Gf} の場合と同じであり, 重み関数の近似誤差と同様に無次元化パラメータの差異のために同じ時間刻みに対して近似精度が高い.

格子分離誤差は菱形格子を用いることで回避できる. しかし計算の時間刻みを Δt とした場合でも, 同一x座標の格子点上の値は $2\Delta t$ 間隔でしか計算されない. そのため, 時間刻みを2倍にしたときと等しい重み関数の近似誤差を有する点に注意する必要がある.

7. 結 言

本報では気体管路内微小振幅波の計算における重み関数モデルを用いた特性曲線法の計算誤差を定量的に評価するために非定常層流圧力損失の重み関数の近似誤差, 畳み込み積分の近似誤差, 格子分離誤差を周波数領域で評価した. 重み関数はSchohlの方法を用いることで北川らの結果よりも精度よく近似できる. またその近似精度も必要に応じて設定できる. エネルギー方程式の非定常損失の畳み込み積分の近似誤差は, 運動方程式における近似誤差よりも小さい. これは無次元化パラメータにプラントル数を含むためである. また僅かながらSchohlの方法の方が精度がよい. 近似誤差を低減するには重み関数の近似精度よりも近似範囲を広くした方がよい場合がある. 同様の理由によりエネルギー方程式の非定常損失の格子分離誤差は, 運動方程式における誤差よりも小さい. また僅かながら北川らの方法

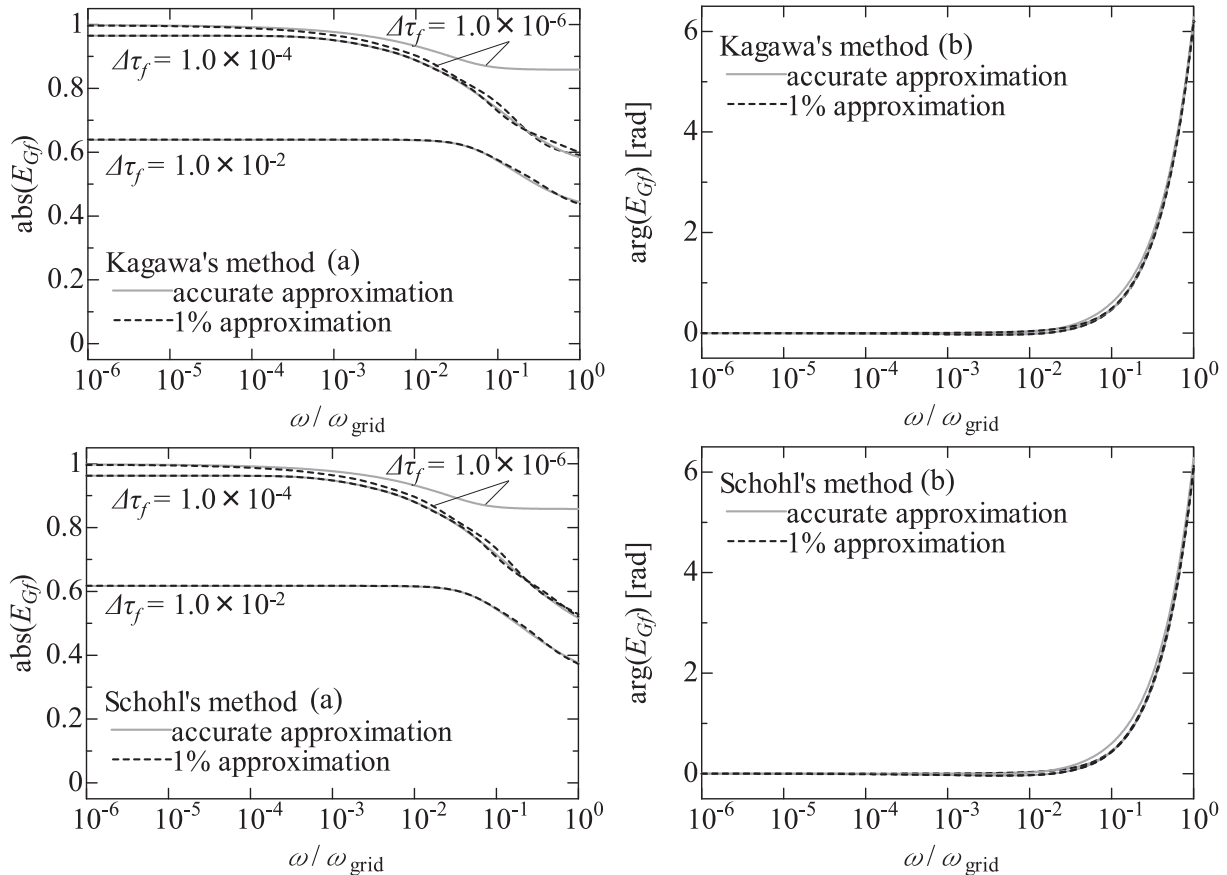


Fig. 9 Grid separation errors of Eq. (3) : (a) magnitude; (b) phase error

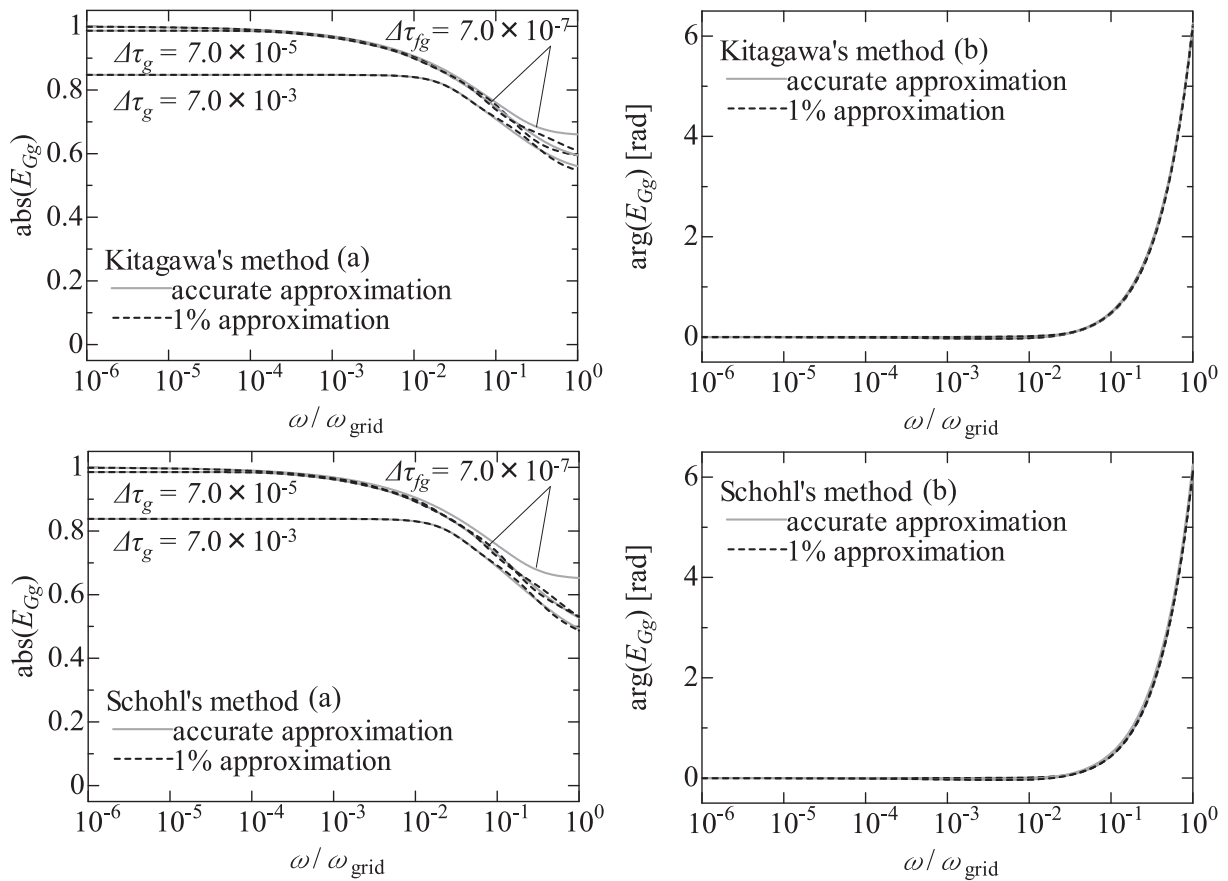


Fig. 10 Grid separation errors of Eq. (4) : (a) magnitude; (b) phase error

の方が精度がよい。近似誤差を低減するには重み関数の近似範囲よりも近似精度が重要である。

本研究で得られた結果により、計算誤差が周波数や重み関数の近似項数、格子分割数にどのように依存するかが明らかとなった。これらの結果は解析対象に含まれる周波数成分によっては従来の特性曲線法が正確な解を与えないことを示唆する。一方で得られた結果を用いると、含まれる周波数に応じて重み関数の近似項数や格子分割数を調整することで計算精度を保証することができる。また、近年ではカルマンフィルタを用いた管路の状態推定に関する研究が行われている^{13), 14)}。カルマンフィルタの利点は準実時間処理にあるが、これらの研究で問題となるのは、行列の次元が著しく大きくなるために計算負荷が大きくなり、準実時間処理が難しい点である。行列の次元は重み関数の近似項数に依存するため、本研究で示した方法により実用上十分な計算負荷を維持しながら重み関数の近似項数を削減できれば準実時間処理が可能となる可能性がある。

参 考 文 献

- 1) Brown, F.T. : A Quasi Method of Characteristics with Application of Fluid Lines with Frequency Dependent Wall Shear and Heat Transfer, Journal of Basic Engineering, Vol. 91, No. 2, pp. 217-227 (1969)
- 2) Katz, S. : Transient Response of Fluid Lines by Frequency Response Conversion, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 99, No. 4, pp. 310-313 (1977)
- 3) 吉岡宗之, 森川敬信 : 容量で終端された空気圧伝送管路の過渡応答, 計測自動制御学会論文集, Vol. 17, No. 9, pp. 920-926 (1981)
- 4) Zielke, W. : Frequency-Dependent Friction in Transient pipe Flow, Journal of Basic Engineering, Vol. 90, No. 1, pp. 109-115 (1968)
- 5) Trikha, A.K. : Efficient Method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow, Journal of Fluids Engineering, Vol. 97, No. 1, pp. 97-105 (1975)
- 6) 香川利治, 李一永, 北川能, 竹中利夫 : 特性曲線法における非定常層流圧力損失の高速高精度計算法, 日本機械学会論文集B編, Vol. 49, No. 447, pp. 2638-2644 (1983)
- 7) Suzuki, K., Taketomi, T., and Sato, S. : Improving Zielke's Method of Simulating Frequency-dependent Friction in Laminar Liquid Pipe Flow, Journal of Fluids Engineering, Vol. 113, No. 4, pp. 569-573 (1991)
- 8) Schohl, G.A. : Improved Approximate Method for Simulation Frequency-dependent Friction in Transient Laminar Flow, Journal of Fluids Engineering, Vol. 115, No. 3, pp. 420-424 (1993)
- 9) Vardy, A.E., and Brown, J.M. B. : Efficient Approximation

- of Unsteady Friction Weighting Functions, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130, No. 11, pp. 1097-1107 (2004)
- 10) Vítkovský, J.P., Stephens, M.L., Bergant, A., Lambert, M.F., and Simpson, A.R. : Efficient and Accurate Calculation of Zielke and Vardy-Brown Unsteady Friction in Pipe Transients, Proceedings of the 9th International Conference on Pressure Surges, Vol. 2, pp. 405-419 (2004)
- 11) Vítkovský, J.P., Stephens, M.L., Bergant, A., Simpson, A.R., and Lambert, M.F. : Numerical Error in Weighting Function-Based Unsteady Friction Models for Pipe Transients, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 7, pp. 709-721 (2006)
- 12) 北川能, 香川利春, 竹中利夫 : 空気圧管路の過渡応答の特性曲線法による高速高精度計算法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No. 7, pp. 648-653 (1984)
- 13) 小澤明, 眞田一志 : 管路動特性の最適化有限要素モデルを用いたカルマンフィルタに関する研究, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 42, No. 5, pp. 89-94 (2011)
- 14) 中尾光博, 西村悠樹, 近藤英二 : 線形カルマンフィルタを用いた気体管路における微小振幅波の圧力推定, 日本機械学会論文集C編, Vol. 79, No. 804, pp. 2830-2840 (2013)

会 員 各 位

平成27年 7月15日

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

平成27年度会費納入のお願い

拝啓 時下益々ご清祥のこととお慶び申し上げます。

さて、平成27年度（自平成27年4月1日～至平成28年3月31日）の会費を、下記の通りご納入賜わりたくお願い申し上げます。なおすでにご納入くださいました場合は、何卒ご容赦ください。

敬 具

記

平成27年度
正 会 員 会 費 8,000円
(40歳未満で入会された方は、入会から
5年間にかけ4,000円となります。)
学生会員会費 2,000円

お 願 い

- ・26年度以前の会費を未納の方は、新年度分（平成27年度）と併せてお振り込みくださいますようお願い申し上げます。
- ・会員名を必ずご記入ください。
- ・便利な自動振り込みは手数料が不要です。ご希望によりお申し込み書をお送り致しますので、FAXまたはE-mailにてご一報いただきたく、宜しくお願い申し上げます。

以上

00東京

口座番号 (右詰めにご記入ください)

001103133690

金 額

千 百 十 万 千 百 十 円

※

加入者名

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

料 金

特殊 取扱

該当するものに○をつけ、お振込の内容をご記入ください。

1. () 年度 () 会費

企 業 名・[]

会 員 名・[]

2. () の代金

払込人住所氏名

※ (郵便番号)

(電話番号 - -)

裏面の注意事項をお読みください。(郵政事業庁) (私製承認第23957号)

払 込 取 扱 票

各票の※印欄は、払込において記載してください。

切り取らないで郵便局にお出ください。

払込票兼受領証

口座番号

001103

右詰めにご記入ください

133690

加入者名

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

金 額

千 百 十 万 千 百 十 円

※

払込人住所氏名

料 金

(消費税込み)

受 付 局 日 附 印

円

特殊取扱

お振り込み先金融機関一覧

1. 郵便振替貯金 00110-3-133690

* 下の振替用紙をご利用いただけます。

(なお、この振替用紙は会費納入・資料購入・セミナー等受講料など総てにご利用いただけます。)

2. 三井住友銀行 日比谷支店 (普) 7611417

(注) * 口座名はいずれも「社団法人 日本フルードパワーシステム学会」です。

* 誠に恐れ入りますが、振り込み手数料はご負担くださいますようお願い申し上げます。

* 上記2をご利用の方で、会社名・大学名にてご送金の方は、個人名・内容・振込金融機関名を、ファクシミリまたはE-mailで学会宛にご連絡くださいますようお願い申し上げます。

この受領証は、郵便局で機械処理をした場合は郵便振替の払込みの証拠となるものですから大切に保存してください。

ご注意

この払込書は、機械で処理しますので、口座番号及び金額を記入する際は、枠内に丁寧に記入してください。

また、下部の欄（表面及び裏面）を汚したり、本票を折り曲げたりしないでください。

(日本郵政公社)

〒105
|
0011 東京都港区芝公園三丁目五―三二 電話(〇三)三四三三―八四四一 FAX(〇三)三四三三―八四四二
編集兼発行人 一般社団法人日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京〇〇―一〇―三一―三三六九〇

東京都文京区白山一―十三―七 アクア白山ビル五階
印刷所 勝美印刷株式会社