

随 想

SMC高田賞受賞について*

中尾 光博**

*平成 26 年 6 月 5 日原稿受付

**鹿児島大学大学院理工学研究科，〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40

1. はじめに

このたびは栄誉ある日本フルードパワーシステム学会 SMC 高田賞を賜り，光栄至極である．共同研究者の東京工業大学の香川教授と東京医科歯科大学の川嶋教授をはじめ，これまでお世話になった皆様に深く感謝の意を表す．本稿では受賞対象論文の研究の経緯や概要などについて紹介する．

2. 研究の経緯

当該研究の発端は，大学院時代までさかのぼる．理学系の学部を卒業後，博士前期・後期課程の 5 年間香川・川嶋研究室でお世話になった．両先生の信念は「実際に社会の役に立ってナンボ」であり，真理の探究を目的とする理学部出身の私には衝撃的であった．修士 1 年のときに川嶋先生より理論と実験どっちがよいか問われ，迷わず理論と答えたところ，東北大学の早瀬教授がご提案されている計測融合シミュレーション¹⁾の応用に関するテーマをすることになった．ほかの同期は全員実験が良いと答え，空気圧サーボテーブルの制御やゴム人工筋を用いたパワーアシストに関するテーマなどをすることになった．自分のテーマを遂行するために数値流体力学（CFD）に関して勉強する一方で，ロボットなどにも興味があったため，同期のテーマに興味津々であった．特に空気圧サーボテーブルの制御では，管路の動特性が大きな問題となっており空気圧管路について調べてみたわけである．しかし決定版といえるものは見つからず，後述するような問題があることがわかった．

博士後期課程修了後，鹿児島大学の機械工学専攻に着任することになった．当専攻では，基本的に助教も研究室を単独で運営するため，自分のやりたいテーマをやることができた．さて何を研究しようか，と考えたとき頭に浮かんだのが学生時代から気になっていた上述の未解決問題である．

3. 研究の背景

空気圧機械が工場などで広く使われていることは周知の事実であり，近年ではリハビリ支援ロボットや手術用ロボットへの適用も試みられ，ますます活躍の幅は広がっている．ところで，空気圧機械の駆動には圧縮空気の伝送路である管路が不可欠である．この管路が厄介な代物で，管路への入力に対して出力は遅れたり，波形が減衰したり，場合によっては振幅が増幅したりする．つまり管路の特性が空気圧機械の動特性に大きく影響することになる．空気圧管路の特性を正確かつ実用的に把握するには，流れの詳細な現象解析およびその妥当な低次元化，できれば 1 次元モデル化が必要である．気体の管路内流れについての研究は古くから行われているが，現象解析の面では乱流遷移などの未解明な問題が残っている．また管路の 1 次元モデル化については液体管路を中心として盛んに研究され，完全解決に至っているわけではないが，実用上十分な精度で計算できるようになっており，OHC-Sim²⁾のような実用的なソフトが販売されている．しかし液体の場合に加えて圧縮性の影響も考慮しなければならない気体管路においては実用的なモデルは定常流の場合に限られ，非定常流において有効なモデルはいまだ存在しない．

4. 研究の概要

1 次元モデルで管路の非定常流を計算するために必要なのは流速分布に依存する非定常圧力損失の計算である．液体の円管内層流において解析解を導出したのが Zielke³⁾である．しかし Zielke の解析解は畳み込み積分を含むために時間発展に伴い計算時間が飛躍的に増大する．TriKha⁴⁾は重み関数を指数関数で近似するこ

とで計算時間を短縮したが、その近似精度に問題があった。香川ら⁵⁾は精度よく重み関数を近似する方法を示し、北川ら⁶⁾はそれを気体管路に適用した。これらの研究は微小振幅を仮定した支配方程式に基づくものであり、層流流れにしか適用できない。また微小振幅を仮定しない支配方程式への適用、すなわち気体管路の乱流および遷移流れへの適用は本質的に難しい。なぜなら数値解法として用いられた空間刻みと時間刻みが一意な関係をもつ特性曲線法において、それらの流れでは特性線が2本ではなく3本となる上、特性線の傾きが流れの状態に依存するため離散化の際に数値粘性が生じるからである。かといって単純に差分法を用いたとしても計算が不安定になってしまう。一方で圧縮性流体力学の分野では、衝撃波の計算のために古くから人工粘性を加えた計算スキームについて研究されてきた。特に現在主流である TVD (Total Variation Diminishing) スキームは非線形の人工粘性を加えることで、波形の不必要な減衰を最小限に抑える優秀なスキームである。統一的な1次元モデルは、当然ながら微小振幅領域も扱える必要がある。しかし微小振幅領域の計算に有効な高速高精度計算法は TVD スキームへの適用例がない。受賞論文は統一モデル構築への第一歩として、その適用法を示すとともに、計算精度や計算負荷について評価したものである。

計算対象としたのは図1のような真直な円管内の流れであり、入口において初期圧力差を与えたときの流れについて検討している。圧力と流速の初期値はそれぞれ大気圧、0とし、入口における初期圧力差は微小振幅波となるように設定している。TVD スキームにさまざまな手法があるが、比較的簡単な Chakravarthy-Osher スキーム⁷⁾の3次風上差分に相当する場合(3rd CO)を用い、特性曲線法(MOC)と比較した結果の一例が図2である。また、同様の比較を CIP 法⁸⁾と MOC について行ったのが図3である。どちらの図でも格子分割数 n の増加に伴って計算解は MOC の解に近づいているが、いずれの管路無次元直径 D_n ($=4\mu L/(\rho c D^2)$) についても 3rd CO の計算精度面での優位性は明らかである。なお、TVD 化していない3次精度の風上差分でも CIP 法と同様に波形が減衰することは確認しており、計算精度の差は人工粘性の差である。図4では異なる格子分割数における計算精度を評価しており、 $n=40$ の 3rd CO と $n=100$ の CIP 法とを比較すると前者の計算精度が高いことは明らかである。格子分割数が同じ場合、3rd CO の計算負荷は CIP 法の2倍程度であるが、格子分割数が0.4倍でも計算精度で上回っていることから、同程度の計算精度では計算効率がよいことになる。

5. おわりに

本稿では受賞論文について簡単に紹介した。今後は統一的モデルの完成とその実問題への応用について取り組む予定である。統一的モデルの完成にはあらゆる流れに対応した非定常圧力損失項を導出する必要があり、この課題については複数のアプローチから迫っている。実問題への応用についてもすでに着手しており、近い将来その成果を紹介できると思う。

参考文献

- 1) Hayase, T., Hayashi, S.: State Estimator of Flow as an Integrated Computational Method with the Feedback of Online Experimental Measurement, Trans. ASME J. Fluids Eng., 119 (1997) pp. 814/822.
- 2) 油圧システムのモデリングと解析手法：日本フルードパワーシステム学会 (2011).
- 3) Zielke, W.: Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow, Trans. ASME J. Basic Eng., 84 (1962) pp. 109/115.
- 4) Trikha, A. K.: Efficient method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow, Trans. ASME J. Fluids Eng., 97 (1975) pp. 97/105.
- 5) 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, 49 (1983). pp. 2638/2644.
- 6) 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, 20 (1984). pp. 648/653.
- 7) Chakravarthy, S. R., Osher, S.: A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws, AIAA paper 85-0363 (1985).
- 8) Ogata, Y., Yabe, T.: Shock Capturing with Improved Numerical Viscosity in Primitive Euler Representation,

Computer Physics Communications, 119 (1999) pp. 179/193.

著者紹介



なかお みつひろ

中尾 光博 君

2006年東京工業大学生命理工学部卒業, 2011年同大学院総合理工学研究科博士後期課程修了. 同年鹿児島大学助教となり現在に至る. 流体の数値計算・計測およびその融合技術に関する研究に従事. 日本フルードパワーシステム学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, 精密工学会の会員. 博士(工学).

E-mail: nakao@mech.kagoshima-u.ac.jp

URL: <http://www.mech.kagoshima-u.ac.jp/kenkyusitsu/nakao.html>

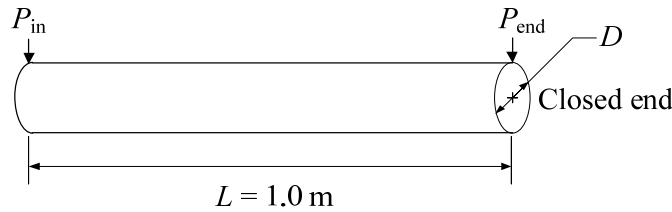


図1 計算対象とした管路

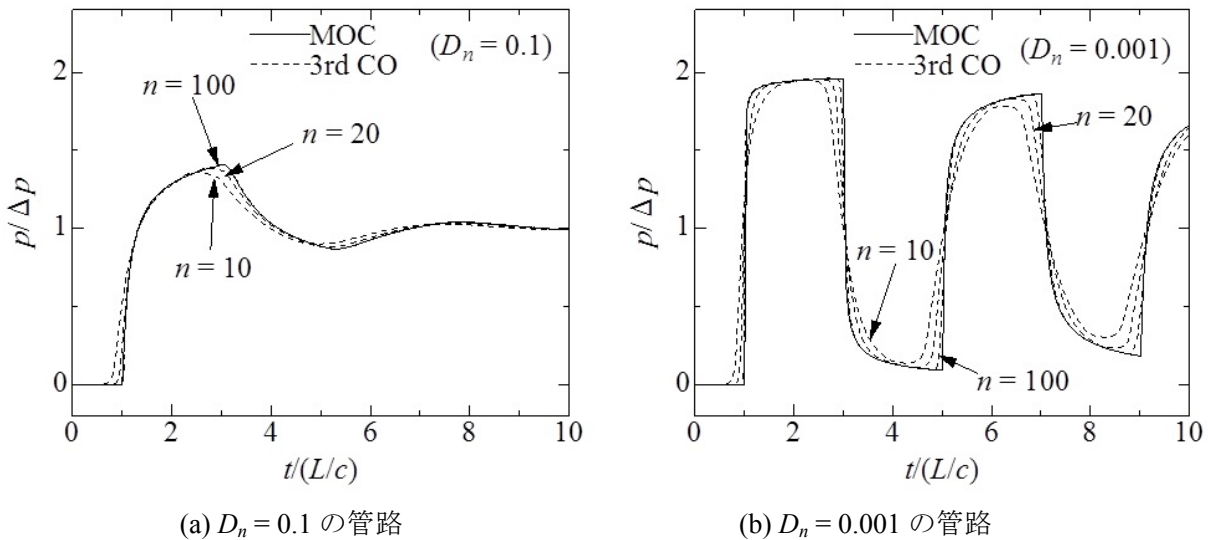


図2 3rd COスキームの計算精度評価

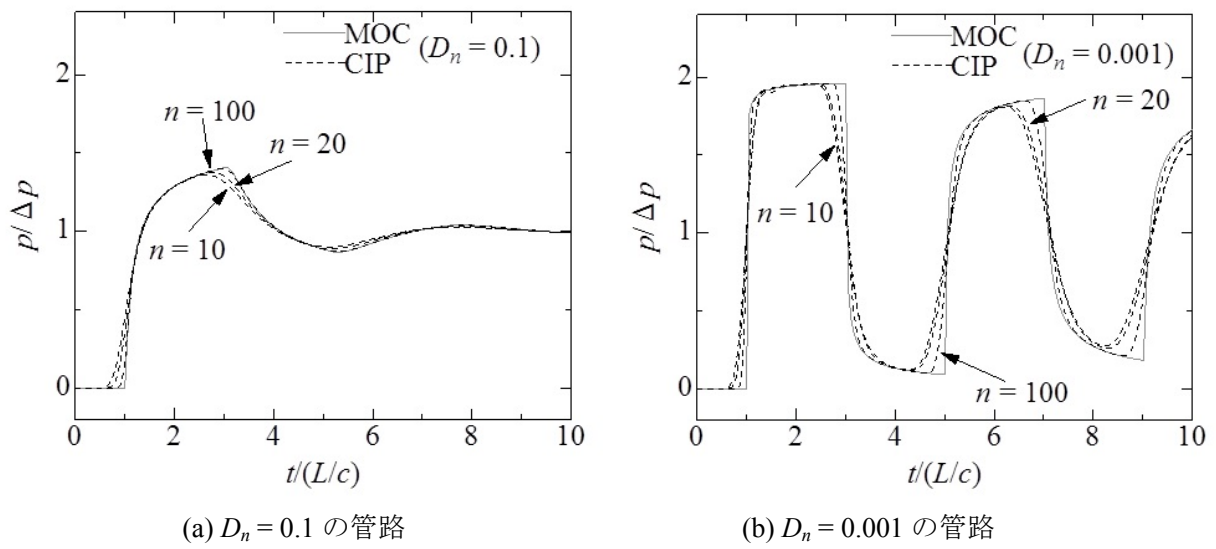


図3 CIP法の計算精度評価

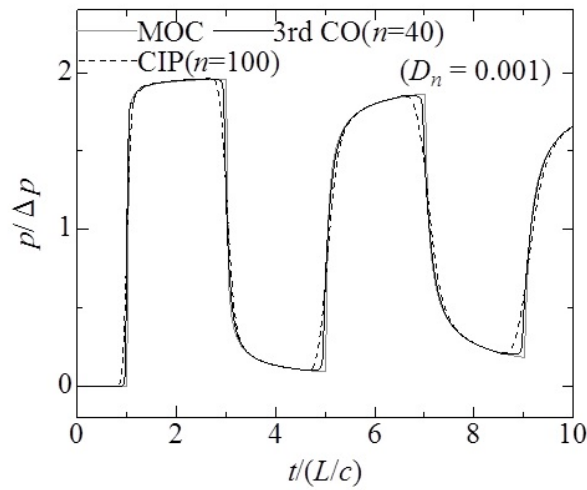


図4 3rd COスキームとCIP法の比較