初等流体問題の解決メカニズム*

(第1報, 流体物性値問題解決の試み)

渡 辺 崇^{*1}, 中 村 育 雄^{*1}

Solving Mechanism for Elementary Problems in Fluid Mechanics (1st Report, Fluid Property Problem Solver)

Takashi WATANABE and Ikuo NAKAMURA

This study investigates an application of the knowledge engineering to problems in fluid mechanics. This study is also expected to reveal information about the structure of the solving process of human beings in this field. As the first step, this paper describes the system written in lisp, which is developed to solve problems of fluid properties. This system simulates the student's way of processing. Data of three kinds are assumed: concept data, equation data and inference data. Concept, equation and inference data cover quantities associated with fluid properties, equations relating quantities, and decision about the use of general knowledge and default values, respectively. These data are written independently of the simulation system. The system uses equations to relate the unknowns with knowns, and tries to solve problems. When this process fails, general knowledge and/or default values are evaluated if necessary.

Key Words: Fluid Mechanics, Knowledge Engineering, Problem Solving, Production System, Lisp, Properties of Fluids

1. は じ め に

計算機上で人間の知的活動を代行しようとする試みがいくつかの方面で検討され, 特定領域を対象とした場合には, 専門家と同等以上の機能をもつシステムも報告されている⁽¹⁾. これにともない, 機械工学においても人工知能の応用である知識工学の研究が, 診断, 設計, 製造, 制御などの分野で活発に行われるようになってきている⁽²⁾.

本研究は, 工学における他の対象領域として流体工学を具体的に取り上げ, そこに現れる教科書的問題の解を見いだす際の人間の解決手順を計算機上で模倣することを通して, この分野における知識工学の適用, 発展をはかるものである. 著者らはすでに流体問題への計算機の非数値的応用として, 次元解析を行う際の支援システムを構成し, その有用性を示した⁽³⁾. 本研究ではシミュレーションにより問題解決法の構成を試みる. このことは, この分野における知識構造および解決における人間の思考過程そのものを明らかにするとともに, 体系的教授法についての寄与も期待され

る.

与えられた数理文章問題を解決する先駆的なシステムは Bobrow⁽⁴⁾らにより作られた. その後, 初等力学問題を対象としたシステム⁽⁵⁾⁽⁶⁾や, 簡単な算数, 数学問題を対象としたシステム⁽⁷⁾⁽⁸⁾が報告されている. また, 問題解決システムを計算機支援の教育に向けて利用しようとする考えのもとでの研究⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾も進められている.

このような状況のもとで, 本報では研究の第1段階として, これまでには対象とされていないと思われる流体工学の物性値問題を取り上げ, その解決を目指した. これらはほとんどすべての流体工学演習書においてその冒頭で扱われ, 永年の経験から最も初歩的, 基礎的な問題と考えられる. 以下にこの解決機構の詳細について述べる.

2. 物性値問題解決の基本的な考え方

ここでは, 流体の比体積を求めるという比較的簡単な問題に対して, 流体工学を学ぶ学生が行う思考を振り返り, モデル的な解法を見いだしてみよう. ここで, モデル的というのは, あくまで考えるうえでの一つの例としたことを意味し, 一般的なものではないことを示す. 学生は各術語や記号の意味することはすでに知

* 昭和62年8月20日 第65期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年1月29日.

*1 正員, 名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町).

っており、問題を理解する空間をもっているとする。すると与えられた問題を理解した時点で、その問題で求める目標となる量、既知の量などについての一つの概念が形成されるだろう。そしてこれは各個人がもつ、理解された問題の集まりで作られる空間の1要素となるであろう。さて、問題中に比体積が与えられていれば問題は解けたことになる。求める比体積 $v(\text{m}^3/\text{kg})$ が与えられていない場合、例えば密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ より

$$\rho = 1/v \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係式を通して求めることができ、密度が与えられていれば問題が解ける。密度が与えられていなければ密度を求めるための副問題が設定され、この解決がはかられる。そして、密度がわからない場合には逆に、この関係式を用いては比体積を知ることはできないことになる。一方、気体に対しては、比体積 v は圧力 $p(\text{Pa})$ 、一般ガス定数 $R(\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}))$ 、物質の単位モル当たりの質量 $M(\text{kg}/\text{mol})$ 、絶対温度 $T(\text{K})$ について、関係式

$$pv = RT/M \quad \dots\dots\dots (2)$$

から知ることができ、この式を介し、問題は圧力、ガス定数、物質単位モル当たりの質量、絶対温度を副目標とする問題に分解される。このように、問題はいくつかの関係式を通して副問題に書き換えられていく⁽⁷⁾。そして、各副問題がすべて解けるようになったところで、元の問題も解決されることになるが、副問題が解かれない場合には別の方法を捜す必要がある。つまり、この問題解決においても、式(1)を用いたときに解法が見いだせるか、そして別な方法として、式(2)の場合についてはそれから派生する副問題の解が得られるかを調べる探索の手順が要求される。

さて、式(1)により、密度を求める副問題が設定されるが、一般に密度は、考えている「もの」としての流体に固有な量として、便覧や例えば文献(12)のような教科書の表などに記載されている。このため、必要とあらばあらかじめ登録されている値を参照することにより求めることができる。流体固有の量として顕著なものに、単位モル当たりの質量がある。

式(2)からの副問題の一つとして、絶対温度を求める必要がある。このとき、絶対温度があらかじめ与えられていればよいが、そうでなければ解法の探索が続けられる。しかし、与えられたデータからは絶対温度が決定できない場合、一般的な環境ではセルシウス温度 $\theta(^{\circ}\text{C})$ が $15(^{\circ}\text{C})$ であると仮定すれば、関係式

$$T = \theta + 273.15 \quad \dots\dots\dots (3)$$

を用い T を得たうえで、解決することもあるであろう。ここで、 θ を $15(^{\circ}\text{C})$ としたのは、その問題の状況

に応じた一種の判断(常識的判断とよぶことにする)であるとみなせる。同様なことは、圧力についても考えることができる。

次に、同じ式(2)の副問題の一つとして、一般ガス定数 R を知る場合を見てみよう。このガス定数や、例えば重力加速度という量は実験定数であるが、問題解決の過程において、実際に実験を行い定めることは困難である。このような問題は、ここで対象としている問題領域の外にあるとする。普通、実験定数は、あらかじめ問題に規定されておらず、他の方法からも得られないならば、それが用いられる状況が適切な場合には、すでに与えられているものとして便覧などから参照できる値を用いるであろう。このような判断も問題を解くうえでは暗黙的に必要となってくるものと考えられる。

しかし、常識や暗黙的な判断というものは、あくまで問題中に直接与えられていない場合あるいは得ることができない場合に利用するものであり、問題解決過程において、それがどのようなときに起動されるかについては注意が必要であると考えられる。

さて、一般には式(1)、(2)などは、単に比体積を知るためばかりに使われるわけではなく、例えば式(1)は密度を求める問題において用いられる可能性がある。つまり、あくまでこれらの式は、そこに現れる物理量間の関係を表しているといえ、求める物理量に応じて関係式はさまざまに利用される。しかし、関係式を適用するにあたっては、気体の状態方程式である式(2)は、考えている流体がほぼ理想気体とみなせる空気の場合はよいが、水のような場合には用いることができないのは当然である。

問題解決には、このように物理量間のさまざまな関係が用いられるが、一方で、物理量の与え方、求め方は任意の単位系で行われるかもしれない。このため、関係式を適用し、目的の量を得るには、適時単位の一をしなければならない。

流体の物性値問題を解くこのような過程の要点を概念的に図1に示す。空間 X は問題において目標あるいはデータとなりうる量を要素とする。理解された問題で、目標となるものはそれぞれ1要素からなる集合を作る。ここではその一つを S_0 とする。また、問題中で与えられた量および常識的、暗黙的に与えられる量の作る集合をそれぞれ P 、 Q とする。 Q の範囲については、どこまでを常識的、暗黙的に考慮するかを体得している教官のもつものが、学生のもつものよりも明確であろう。 S_0 からはじまり目標の集合は順次関係式を通しての変換 h_i を受けることにより新たな目標(副

目標)の集合を形成していく。ここで $S_{i-1} (i \geq 1)$ に含まれる量は、 S_i に含まれる量が既知となれば求めることができる。ただし、すでに他の変換により除去した目標、副目標を新たにもたらす変換は適用できない。 S_i が P あるいは Q に含まれることにより問題は与えられたデータから、あるいは常識的、暗黙的な値を用いて解くことができることになる。一方、可能な変換を行っても P 、 Q に含まれない場合はその問題は解決できないことになる。

問題解決において、流体工学という個性は、このような変換の形式、常識の性質、暗黙の値に特に現れてくる。ここでは上述のいくつかの点を考慮していくことにより、実際に活動を行うシステムの構築を試みてみた。

3. システムの構成

試作したシミュレータは、図2に示す構成をしており、プログラムは Interlisp により記述されている。メインループは処理手順の大まかな流れを統制する。外部からの入力、簡単な文書解析が行われた後、それが意味のある問題と判断されたならば、与えられた問題を内部表現に書き換え、ワーキングメモリ (作業記憶) を更新する。便宜上、ここでは名詞に英単語を用いた日本文により入力を行うことにする。図3は入力の例であり、この問題文に対し図4(a)、(b)に示す内部表現が作成される。図4(a)と図4(b)は同じ情報を表すものとして扱うが、処理過程の段階に応じて使い分けられ、随時お互い等価となるように変換される。図4で、CONCEPT は今考えている「もの」、GOAL は求めたい値、DATA は与えられたデータ値を示す。なお、値についての単位を入力中で省略した場合には、システムの省略値が用いられる。図3では、圧力のみが PRESSURE 1.0 <bar> の入力により、陽に単位は bar であることが規定される。問題解決は、このようにして作られた作業記憶を介して行われる。入力に求める物理量の記載がなく、問題文ではないとされる場合には、問題解決は行われず、入力内容に応じて作業記憶の書き換えやアドバイス機能の起動などがなされる。問題が与えられた場合、まず問題を解くための計画である解法が組み立てられる。つまり、2章で述べたように副問題を設定していくことにより、求めたい量から出発し、既知の量に至る道筋を見いだす探索を行う。最終的にこの道筋が見いだせない場合には、その問題は解くことができないと判定される。解法が得られたならば、次にその計画に沿って実際の計算が行われ、目的の値が得られることになる。この

解法立案部、実行部は次に述べるいくつかのデータ部とは独立しており、データ部を拡充することによりこのシステムはより広範囲の同種問題にも対応できるようになる。

考えている対象としての「もの」に付随したデータ、物理量間の関係を表す方程式、そして常識的、暗黙的判断などを行うためのルール of いくつかそれぞれ Concept Data, Equation Data, Inference Data として登録される。解法の組み立て、計算の実行は、これらのデータを参考にしつつ進むことになる。図5には、

図1 関係式を通した解決過程

図2 システム構成の概念図

->ABSOLUTE TEMPERATURE 300.0, PRESSURE 1.0 <bar>
>>DENO WATER NO DENSITY, VISCOSITY NO MOTOME YO.

図3 問題文の入力例

```
((CONCEPT WATER)
(GOAL (DENSITY kg/m**3)
(VISCOSITY kg/m/s))
(DATA (ABSOLUTE-TEMPERATURE 300.0 K (GIVEN))
(PRESSURE 1.0 bar (GIVEN))))
```

(a) 内部表現(その1)

```
((CONCEPT WATER)
(GOAL DENSITY kg/m**3)
(GOAL VISCOSITY kg/m/s)
(DATA ABSOLUTE-TEMPERATURE 300.0 K)
(DATA PRESSURE 1.0 bar)))
```

(b) 内部表現(その2)

図4 図3の入力に対して作業記憶に登録される問題の内部表現

「もの」としての水に付随したデータの一部分が示してある。ここで、密度はある手続き (PROCEDURE) により求められ、そこでは、単位 (UNIT) は kg/m^3 、求めるために知る必要がある数 (VARIABLES) はセルシウス温度 θ の値であることに続き、この手続きが使われる際の条件 (CONDITIONS), 求める方法 (METHODS), 用いるデータ (DATA) が記述されている。また圧縮率には、特別な (SPECIAL) 場合としてセルシウス温度 20°C 、圧力 101.325 (kPa) における値が与えられている。

関係式を表すデータを図6に示す。関係式には、先に述べた実験定数のような暗黙的な (DEFAULT) 数と、他の任意の (ARBITRARY) 数があると、現れる変数を分類して表す。関係式 EQ 1 においては、密度 ρ 、比体積 v は任意の数であり、この式を使用するための条件 (CONDITION) として ρ, v に具体的な数値が得られているならばそれらは零以上であること、関係 (RELATION) は式 (1) の $\rho=1/v$ で与えられることが表されている。関係式は数式処理され、例えば求める量の比体積が式 (1) から得られる。関係式 EQ 2 は状態方程式である。この条件部における (P EQ 2. RULE 1...) は OPS 5⁽¹³⁾ の書式に合わせた簡単なプロダクションシステムのルール作成命令である。そして、考えている物が水であり、作業記憶に (CONCEPT WATER) がある場合には、この関係式は適用できない (NOT APPLICABLE) ことを示している。

図7は推論データである。問題についての常識的な判断や暗黙の値についての処理法が、プロダクションシステムのルールとして記述される。解法を探索する際に、副問題として新たに求める量である副目標 (SUBGOAL) が作業記憶内に生成されていく。そして解法を見いだす過程に応じ、関係式の暗黙の (DEFAULT) 値あるいは常識的な (GENERAL) 値の探索と状態が変化する。図中、例えば RULE 1 は副目標がガス定数であり、暗黙的な値を求めるときにこの値として 8.314 J/mol/K を用いてよいならば、これを新たにデータとして加えることができることを示している。ここで DEFAULT-ASKING は Lisp 関数であり、暗黙値の採用の可否を問い合わせる。

解法にあたっては、いくつかのレベルが考えられる。つまり、はじめは与えられたデータだけを用いて解を得ようとし、もし得られなければ、省略されたデータを補いながら進めるであろう。ここではこのレベル準位として、はじめは与えられたデータのみから、第2段階でガス定数などの暗黙値を採用し、第3段階で一般常識を、そして最後に特別な状況のもとで与え

られているデータを用いるように定めた。

4. システムの作動

空気の比体積を求めてみよう。図8で(a)が問題の入力である。データとしてはあらかじめなにも与えな

```
(NAME
(DENSITY
  (PROCEDURE (UNIT kg/m**3)
    (VARIABLES (CELSIUS-TEMPERATURE THETA C)
      IF-FAIL (at celsius temperature 20 "[C]")
      (VALUE 998.2 kg/m**3))
    (CONDITIONS ((>= THETA 0.0)
      "Because water is solid"))
    (METHODS ((>= THETA 0.0)
      (<= THETA 100.0))
      (FIRSTINT DATA1 (THETA)))
      ((>= THETA 100.0))
      (FIRSTINT DATA2 (THETA))))
    (DATA1 (0.0 999.9)
      (5.0 1000.0)
      (10.0 999.7)
      (15.0 999.1)
      (20.0 998.2)
      (30.0 995.7)
      (40.0 992.2)
      (60.0 983.2)
      (80.0 971.8)
      (100.0 958.4))
    (DATA2 (80.0 971.8)
      (100.0 958.4))))
(COMPRESSIBILITY
  (SPECIAL (at celsius temperature 20 "[C]" and
    pressure 101.325 "[kPa]")
    (VALUE 4.845E-10 1/Pa))))
```

図5 水に付随したデータ

```
(EQ1 (NAME)
  (ARBITRARY (DENSITY RHO kg/m**3)
    (SPECIFIC-VOLUME V m**3/kg))
  (DEFAULT)
  (CONDITION (<= 0 RHO)
    (<= 0 V))
  (RELATION RHO=1/V))
(EQ2 (NAME EQUATION-OF-STATE)
  (ARBITRARY (PRESSURE P Pa)
    (SPECIFIC-VOLUME V m**3/kg)
    (MOLECULAR-WEIGHT M kg/mol)
    (ABSOLUTE-TEMPERATURE THETA K))
  (DEFAULT (GAS-CONSTANT R J/mol/K))
  (CONDITION (P EQ2.RULE1 (CONCEPT WATER)
    ---) (REMOVE 1)
    (MAKE NOT APPLICABLE))
    (<= 0 P)
    (<= 0 V)
    (<= 0 THETA)
    (<= 0 R))
  (RELATION P=V*R/M*THETA))
```

図6 関係式を表すデータ

```
(P RULE1 (SUBGOAL GAS-CONSTANT)
  (SEARCH DEFAULT)
  (DEFAULT-ASKING PROPERTY= GAS-CONSTANT VALUE= 8.31433 UNIT= J/mol/K)
  ---) (REMOVE 1)
  (MAKE DATA GAS-CONSTANT 8.31433 J/mol/K))
(P RULE2 (CONCEPT AIR)
  (SUBGOAL CELSIUS-TEMPERATURE)
  (SEARCH GENERAL)
  ---) (REMOVE 2)
  (MAKE DATA CELSIUS-TEMPERATURE 20 C))
```

図7 常識、暗黙値についてのデータ

い。このため、ガス定数などに関するプロダクションルールに従い問い合わせがなされる。問い合わせにすべて可として処理を続け、比体積について図9に示す2種類の解法が得られる。2番目の解法では、方程式データとして登録されている式のEQ7を用いて解決をしている。図8(b)で、このEQ7の内容を表示させる。図8(c)で、方法の2を選択し実行すると、比体積がそれに従い計算される。図8(d)は、セルシウス温度 25.0 (°C) における水の音速を km/h の単位で求めるよう指示する。温度から得られる密度と圧縮率から求まる体積弾性率より音速が算出される。

5. お わ り に

従来調べられたことのないようである流体工学の初等問題解決に基づいた知識工学の研究として、その第1段階といえる物性値問題を対象に取り上げた。考えるものとそれに付随した量、物理量間の関係式、そして暗黙、常識が介在するという構造として物性値問題をとらえ、関係式により展開された副問題解法の探索システムおよびプロダクションシステムを用いて問題解決のシミュレーションをはかった。類似の問題に対しても本システムはかなり有効であると考えられる。また、例えば流体物性値については知らない人が、その解法を見いだす手がかりを与えるという役割も大きいといえる。

具体的な問題をもとに構築される各種のシステムの正しさ、限界を理論的に解明することは非常に困難であると思われる。このため、システムをさまざまに動かしてみる、いわば実験がシステムの有力な評価法の一つになるものといえよう。これまでの経験では本システムは矛盾なく作動している。

より一般的、効率的な問題解決を行うために当面必要な検討事項として、次のようなことが考えられる。

構造化データ：データの有効利用のため、流体工学的発想やデータ間の関係を考慮した整理法。

状況の正確な表現：流体の状態やその変化、そして力学問題の場合⁽⁶⁾⁽¹¹⁾と同様に、流れ場を記述するための物の時空間的な位置や物相互間の関係の簡潔でかつ計算機に把握しやすい表現法の開発。

学習機能：例題や人間の支援を通して、適用性の高い知識を構成すること⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾および得られた解法を再利用するため、流体問題として見た場合に同種である問題を関連付けること。

メタ知識：対象に応じて解析方法や利用するデータの領域を随時制御し⁽⁶⁾⁽¹⁶⁾、より強力な探索、推論機能を設けること。

解の吟味：得られた解が流体工学的に妥当性をもつかを評価する機能

インタフェース：人間とのやりとりをスムーズにするための自然言語処理や視覚的対話機能の設計、強化。

最後に、本研究は文部省科学研究補助金（一般研究B）61460100の助成を受け行われたものであることを記し、謝意を表する。

I am ready to solve problems.

(a) ->AIR NO SPECIFIC VOLUME WO MOTOME YO.
May I use default value 8.31433 [J/mol/K] for GAS CONSTANT?
YOKINI HAKARAE.

I found 2 schemes to obtain SPECIFIC VOLUME.
(b) S>EQ7 WO SHIME SE.

Equation EQ7
Arbitrary variables are
ABSOLUTE TEMPERATURE: ABSTEMP
CELSIUS TEMPERATURE: CELSTEMP
Relation
ABSTEMP=CELSTEMP+273.15

(c) S>2 WO JIKKOU SEYO.

Default value of GAS CONSTANT is 8.31433 [J/K/mol].
I assume CELSIUS TEMPERATURE is 20 [C].
ABSOLUTE TEMPERATURE has been calculated as 293.15 [K].
MOLECULAR WEIGHT has been referred as 28.97 [g/mol].
I assume PRESSURE is 101.325 [kPa].
SPECIFIC VOLUME has been calculated as .8303325 [m**3/kg].
SPECIFIC VOLUME is .8303325 [m**3/kg].
I finished.

(d) ->CELSIUS TEMPERATURE 25.0 NO TOKI NO
>>WATER NO SONIC VELOCITY <km/h> HA.

CELSIUS TEMPERATURE has been given as 25.0 [C].
DENSITY has been referred as 996.95 [kg/m**3].
COMPRESSIBILITY has been estimated as 4.845E-10 [1/Pa] at celsius temperature 20 [C] and pressure 101.325 [kPa].
BULK MODULUS has been calculated as 2063903400 [Pa].
SONIC VELOCITY has been calculated as 1438.853 [m/s].
SONIC VELOCITY is 5179.871 [km/h].
I finished.

図8 空気の比体積、水の音速を求める実行例

図9 空気の比体積に対して得られた複数の解法

文 献

- (1) Nilson, G. L., *Introducing Artificial Intelligence*, (1984), 175, NCC Publ.
- (2) 特集・機械工学における AI 応用, 機誌, 86-815 (昭 61).
- (3) 渡辺・中村, 機論, 51-465, B (昭 60), 1678.
- (4) Bobrow, D. G. (Minsky, M. L. ed.), *Semantic Information Processing*, (1968), 146, MIT Press.
- (5) Novak, G. S., *Proc. 5th IJCAI*, (1977), 286.
- (6) Bundy, A., ほか 4 名, *Proc. 6th IJCAI*, (1979), 1017.
- (7) 桜井・志村, 情報処理学会 知識工学と人工知能研究資料, 34 (昭 59), 34-3.
- (8) 高木・ほか 4 名, 情報処理学会 知識工学と人工知能研究資料, 39 (昭 60), 9.
- (9) Sleeman, D. H., *Artificial Intelligence*, 16-2 (1981), 171.
- (10) 安西・ほか 2 名, 情報処理学会 知識工学と人工知能研究資料, 41 (昭 60), 103.
- (11) 安西・ほか 4 名, (鈴木編), オブジェクト指向, (昭 60), 204, 共立出版.
- (12) 中村・大坂, 機械流体工学, (昭 57), 共立出版.
- (13) Hayes-Roth, F., ほか 2 名 (AIUEO 訳), エキスパートシステム, (昭 60), 350.
- (14) Silver, B., *Proc. 8th IJCAI*, (1983), 429.
- (15) 桜井・志村, 情報処理学会 知識工学と人工知能研究資料, 46 (1986), 41.
- (16) Bundy, A. and Welham, B., *Artificial Intelligence*, 16-2 (1981), 189.