

## ガラス融液の流れ [ I ]

日本電気硝子株式会社

長尾 向季

### Flow Pattern in Glass Melts [I]

Hisatoshi Nagao

Senior Manager  
Research and Development Division  
Nippon Electric Glass Co., Ltd.

#### 1. ガラス融液の流れは層流 (laminar flow) である。

図1はスロート窯でのガラス融液の動きを、速度ベクトルで表わしたものである。左の溶解室からスロートに入った高温のガラスが右の作業槽に入って浮かぶ様子や、作業槽底部のガラスが溶解室に逆流している様子がわかる。ただ、この表示方法 [速度ベクトル表示] は流れのイメージを間違えて与えてしまう可能性をもっている。たとえば作業槽の速度が見えていないときはスロート内を前進するガラスは作業槽に入ってその方向を変えずに直進してしまうような気になるだろう。流れの速さや方向を同時に正しく表わすという意味では速度ベクトル表示は間違いないだろうが、ほんやりしていると間違った流れのイメージをインプットされかねない。

電解水溶液を用いて電気溶融炉での通電の様子を模型実験として調べる 'ついでに'、その水溶液に流れを与えてガラス融液の流れる様を見てみようという気持ちがあることもありう

る。しかし電解水溶液を墨流しで可視化したような流れのイメージでガラス融液の流れを捉えると間違いのもとになる。水とガラス融液とではさらさら度が大きく違うからである。流体のさらさら度を動粘性で評価すると水は空気以上にさらさらである。(表1)

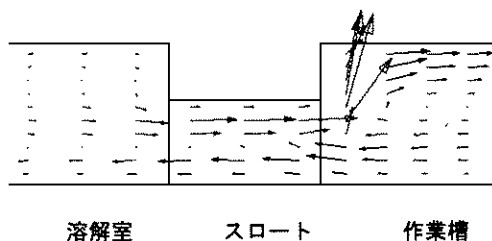


図1 スロート周りのガラスの流れ  
流れを速度ベクトルで表すと、動きが直線的なイメージになる。

表1 動粘性係数 [cm<sup>2</sup>/s]

空気	30°C	0.15
水	30°C	0.08
水銀	30°C	0.001
グリセリン [90wt%]	30°C	1.0
ガラス	1500°C	400前後

## 2. 速度の小さな粘性流の中にも渦が生じることがある。

ガラス融液の動きは水の流れの如くさらさらと渦が生まれては消える不安定な流れとは違い、飴職人が取り扱っている水飴のようなイメージに近い。さらさらとした流れでは建物の陰に起るつむじ風のように、渦が容易に生じるのはよく理解できる。(図2)

一方、ガラス融液の動きのようにゆっくりとした粘っこい流れでは渦が生じないように思われるが、邪魔物があるとその前後に渦が出来るのは驚くべきことである。ガラス溶融炉の構造によっては渦が生じている場所があり、い

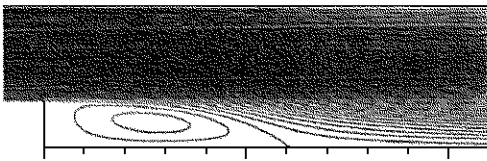


図2 バックステップ流れ

ステップ高さと同流入最大速度で採ったレイノルズ数は46000で乱流域の流れである。ステップ後方に渦が生じることが示されている。数値流体力学 P252「東京大学出版会」

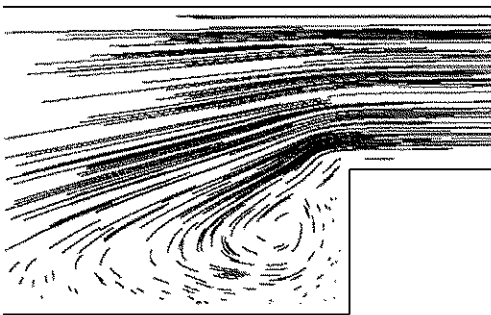


図3 フォアハース内のガラスの流れ

ガラス深さ 40 cm  
ステップアップ 20 cm  
平均速度 2.5 m/hr  
ガラス深さと平均速度で採ったレイノルズ数は0.003で層流域の流れである。ステップアップのコーナーにデッドゾーンが生じる。

わゆるデッドゾーン(水力学でいう死水領域に対応するもの)があることに注意が必要である。(図3)

## 3. 層流は粘性流体の運動方程式を解いて求めることが出来る。

種子田定俊先生は、図4の流れについて「半円弧の直径でとったレイノルズ数は0.031, 注目すべきことは、半円弧の前方に一对の大きな渦巻きが形成されていることである。この流線模様は流れの向きを逆にしてもまったく変化しない。このような奇妙な流れは高レイノルズ数の流れの知識からは到底想像できないものである。」と述べておられる。感性豊かな種子田先生に尊敬の念をおぼえる。流れのパターンが随の移動する向きに依らないことで、慣性の影響が無い粘性だけの流れ(ストークス流)であると言うことであるが、このような場合でも渦が生じることを示す良い例である。

図5は手作りプログラムを用いて運動方程式と連続の式を連立して解いたものである。計算といえばレイノルズ数が小さい場合の円柱後方に生じる双子渦は、川口光年先生によって世界で初めて計算された。(Journal of the Physical Society of Japan Vol. 8, No. 6, 1953)(図6, 図7)未だ電子計算機が普及していない時で、川口先生は手回し計算機の操作では誰にも負けない熟練技能者でもあられたという。

質量と運動量の保存という自然法則を数式化した連続の式と粘性流体の運動方程式を解いて実在の流体の運動が再現できるケースが、コンピュータや周辺機器、ソフトの発達で急増している。粘性流体の運動方程式(ナビエ・ストークスの運動方程式)の完成度の高さに驚かされる。円柱や半円弧あるいは魚の形をした物体まわりの流れなど、求めるべき流れは千差万別であるが、実験は別にして計算で用いる微分方程式は同じものである。とすれば、ガラス融液の流れを含めて流体の流れの本質はほとんどこの

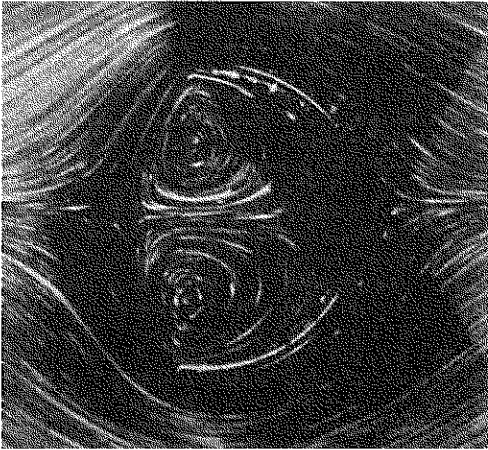


図4 半円弧桶まわりの流れ [実験]  
(画像から学ぶ流体力学, 種子田)

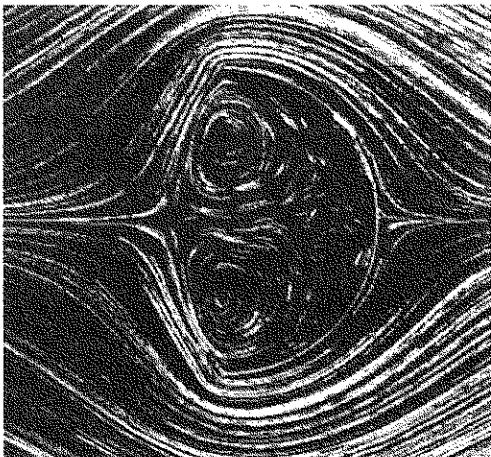


図5 半円弧桶まわりの流れ [計算]

微分方程式の中に隠されていると言えるのではないか。運動方程式を定式化した先人達にとっては、流体の流れはほとんどお見通しだったのではないかと想像される。

ニュートンは「プリンキピア」を完成する前にハレー彗星で名をとどめるエドモンド・ハレーの訪問に際し彗星の楕円軌道の導出方法を直ちに答えたというし、モーターや発電機の原理をあきらかにしたマイケル・ファラデーは数式化こそしなかったが電磁気的作用に関しては

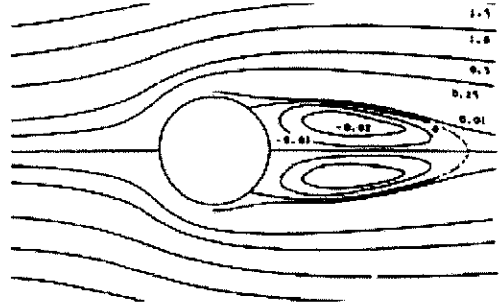


図6 円柱後方に生じる双子渦 (流線)

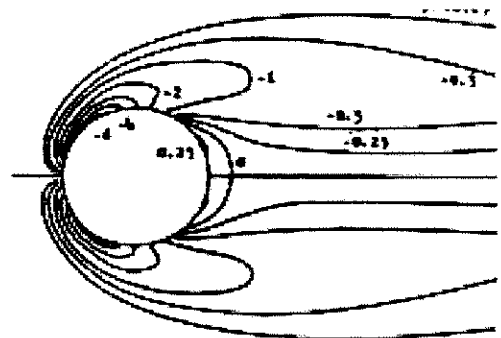


図7 円柱後方に生じる双子渦 (等渦度線)

流体の回転する速さ (渦度) は円柱の斜め前方で大きい。流れのパターンからは回転速度をイメージできない。可視化実験から渦度を求めるためには速度をもとにした計算が必要になる。

すべてお見通しであったという。(大自然科学史; ダンネマン; 安田徳太郎訳)

レイノルズ数の小さな流れの計算を最新のツールであるコンピュータを使って行い、実用面で役立つ結果が出される時代に入ってきているが、それらの成果の多くがこの方程式を導いたナビエ (1822 年) やストークス (1845 年) の域を出ておらず 21 世紀の今でも 150 年前に確立した方程式をあれこれいじっているにすぎず、こっけいな見方をすれば、お釈迦様の指の間を飛び回っている孫悟空のようなものなのかも知れない。

ただ粘性流体の運動方程式を穴のあくほど眺めても、それだけでは流れのイメージがなかなか湧いてこない。理解を深めるには、粘性項を

導入したナビエやストークス、運動方程式を定式化したオイラーやニュートン、慣性力をみつけたガリレオ・ガリレイや圧力を見つけたベルヌーイやさらにはトリチェリにさかのぼって、これら天才達の生涯をかけた努力や深い思索の一端に触れる必要があるのかも知れない。さいわい流体力学の専門書には原典よりもわかり易く要約された解説がなされており（より平易に説明し直すことも大学の先生方の任務の一つであるということらしい）、それらを読んで少しでも理解を深めることが大切であろう。

#### 4. モデル実験と数値計算

自動車工学が専門で模型実験手法を UCLA で講義された江守一郎先生が、日本に帰ってきて開かれた講習会を受講したことがある。(1973年頃)先生の「パイナバー(無次元数)法」は模型実験条件を導く方法としては次元解析法よりはるかに簡便で明瞭な手法で、①; 個々の物性値が力や熱量などの物理量に1対1に対応していること、②; 現象に拘わる物理量を枚挙することでモデル実験に必要な無次元数

が簡単に得られること、などを教えていただき大変有用な講習会であった。(著書; 模型実験の理論と応用) その講習会で長身白髪 of 紳士の姿を見かけ、後で江守先生が感慨深げに述べておられたのはその紳士がゼロ戦の風洞実験で有名な堀越二郎さんであったということである。

講習会に出席する以前には、ガラス浴融炉のモデル実験として元岡山大学学長の高橋克明先生の博士論文に書かれている手法、すなわち「運動方程式やエネルギー式の各項の大きさをそのまま縮尺したらよい。」という手法に馴染んでいた。江守先生の手法がなかなか理解できず再三にわたって愚問を呈し、ご迷惑をおかけした。先生からはその都度「もし現象が微分方程式で記述できているほどわかっているのなら、その微分方程式を計算すればよい。わざわざ模型実験をする必要は無い。」とお答えいただいた。当時は3次元の運動方程式や連続の式を連立して解く計算方法を知らず、そのお答えに戸惑うばかりであったが、その後の流体計算の発展は著しく今日では広く一般に広まっていることを思うと、お答えいただいた江守先生の先見性がいまだに強く思い出される。