

〔 連 載 〕

流量計測の歴史

< 11 . 19 世紀末から 20 世紀初頭へ >

(株)オーバル 小川 胖
Yutaka Ogawa

1 . 粘度計測

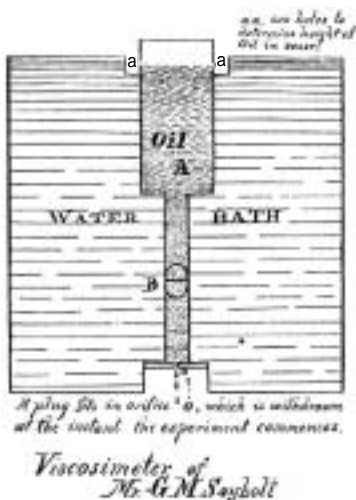
前号からの続きであるが、1887年にデントン (James E. Denton、米) が ASME 学会誌に粘度計に関する論文⁽¹⁾を載せている。これによると、過去10年の間に油製造業者と販売者が、「粘度」として知られている油の特性を測定することを実施している。この性質を測定する計器は「粘度計」と呼ばれるもので、一つの単純な貯油槽があり、ある量の油が小さなオリフィスから流出する時間から粘度を計測するものである。第1図はセイボルト (G. M. Saybolt、米) によって作られた計器で、彼はスタンダード・オイル会社の製品に組織的にこれを使用するようにした。彼による粘度の測定はまったく完璧であり、同じ油のサンプルではその全時間は全く変わらなかったという。

この図について説明すると、ガラス製の水槽の中にベッセルAが保持されておりこの中に4オンス(113.4

グラム)の油を入れることができる。このベッセルの下部には約1/16インチ(1.6mm)径の出口Oがあり、可能な限り完全に水槽に覆われるように調整されている。Aの下には細いガラス管がつながっている。最初aaの位置に油面を設定しておき、最下部のOから油が流出し始めた瞬間にストップウォッチをスタートさせ、油面がラインBに達した瞬間に時間計測を終了する。

水槽の温度は凝縮蒸気で調整されるようになっていく。セイボルト粘度計の他に、ダビッドソン粘度計及びパーキンス粘度計も紹介されている。この内パーキンス (G.H.Perkins) は、第2図のような粘度計を作った。これは適当な加熱槽中の円筒形ベッセルAと、ピストンBから成っており、ピストンBは円筒より2/1000インチ(0.05mm)小さくできている。

ベッセルに油を満たし、ピストンを離すと下降していく。ロッドのC点が上部横線を通りかかるときにスト



第1図 セイボルトの粘度計



第2図 パーキンスの粘度計

アップウォッチをスタートさせ、下部横線を通してときにストップさせ、その時間を測定する方式のものである。この三種類の粘度計によって計測した各種の油粘度の比較表が第1表に示されている。Col.2がセイボルト粘度計、Col.3がダビッドソン粘度計、Col.4がパークキンス粘度計による測定結果である。

第1表 167 F(75)の温度における粘度計測比較

DESCRIPTION OF OILS	VISCOSITY IN SECONDS			RATIO OF VISCOSITIES		
	Col.2	Col.3	Col.4	For Col.2	For Col.3	For Col.4
1 Heavy cylinder oil, pure petro.	346	138	523	1.000	1.000	1.00
2 Mixed oil { 90% " " 10%Neatsfoot	} 237	73	372	0.68	0.53	0.71
3 Castor oil		71	356	0.60	0.51	0.67
4 " " { 70% Petroleum 30% Animal	} 215	62	261	0.62	0.45	0.50
5 Mixed oil { 33% Light paraffine 67% Heavy petro		55	...	0.47	0.40	...
6 Lard	79	42	114	0.23	0.30	0.22
7 Tallow	...	40	0.29	...
8 Sperm	63	35	81	0.18	0.26	0.15
9 Spindle oil paraffine	53	31	53	0.15	0.23	0.10

粘度計測は、動力機械の軸受の磨耗防止のため、潤滑油の送油量と粘度の関係を把握するために必要になってきたと記されている。

2. 再びニュートンのこと

粘度計測といえば「流量計測の歴史 < 6 . 産業革命からフランス大革命へ >」2004年4月号423. Vol.32. No.5で「ニュートンの粘性法則」が「プリンキピア第2巻 粘性媒体内における物体の運動と流体力学」に記述されていると記したが、今回中野猿人氏の「プリンシピア⁽²⁾」を調べて見た。しかし題名は第II編「抵抗を及ぼす媒質内での物体の運動」となっており、その中で、媒質内を動く球体の受ける抵抗について、次のように定義している。

- 球体の抵抗は、もし他の事情が同一ならば、速度の二乗と直径の二乗と媒質の密度との積に比例する。

粘性の法則については定義されていないが、しかし次のような文章がある。

「すみやかに運動する物体の抵抗が、その中で運動する流体の密度にほぼ比例することはすでに述べたことから十分明らかである。私は正確な言い方をしているのではない。というのは、たとえ密度が同じでも、ねばり気の強い流体は、流動性のより大きな流体よりもいっそう大きく抵抗するであろう事は疑いのないこ

とであり、たとえば、冷たい油は温かい油よりも、また温かい油は雨水よりも、また水はアルコールよりもいっそう大きく抵抗するといった具合である。」と粘度が大きいほど受ける抵抗が大きくなることを述べている。従って「ニュートンの粘性法則」は他の論文で定義されたものようであるので、文献を調べてみたが分からず終いである。

ここに誤りについてお詫び申し上げたい。

ところで筆者は今回ニュートンがなぜ流体力学、特に運動物体が流体から受ける抵抗に関心があったのが遅まきながら解った。それは必然であったのである。第III編 世界体系の中で、

命題10 . 定理10 天空における諸惑星の運動は、きわめて長時間にわたって存続しうること。

とあり、「第II編、命題40において、凍結して氷になった水の球体が、われわれの大気中を自由に運動しつつあるとき、その半径の長さを描く時間のうちに、空気の抵抗によってその運動の1 / 4,586だけ失うことを示した。(中略)第II編、命題22の注において、地上200マイル(約322km)の高いところでは、空気は地表におけるよりも75兆分の1の比で希薄になることを示した。そこでその超上空の空気と同じ密度の媒質内を公転しつつある木星は媒質の抵抗により、100万年の間にその運動の100万分の1をも失わないであろう。」

従って先の命題10 . 定理10が言えるのである。つまりニュートンは天空の太陽の周りを回る惑星や地球の周りを巡る月の運動が不変であることを立証するために、媒質内を運動する物体の受ける抵抗について必然的に論じなくてはならなかったのである。「プリンキピア」の原書はラテン語で書かれており、また定理の立証が数式をあまり用いず、幾何学で証明しているため読みづらく、現代の物理研究者には不人気であるという。しかし中野猿人氏は重要なところは解説で近代数学を用いて説明しているのだから、興味のおありの方は一見に値する書物である。

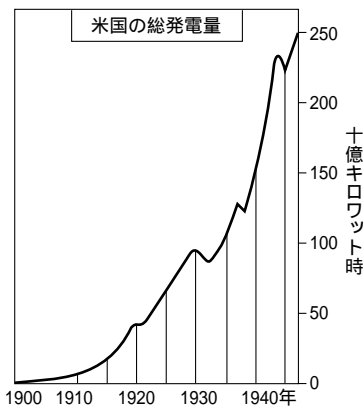
3. 科学技術大飛躍の20世紀

さていよいよ時代は20世紀へと移っていくが、20世紀は2回にわたる世界大戦が勃発し、世界を混乱と破壊の時代へと巻き込んでいくが、一方科学及び技術が大飛躍を遂げ、今日の高度な文化を築くこととなる。第2次世界大戦が終了する1945年までを一区切りとすると、科学面では1905年のアインシュタインの

特殊相対性原理と1900年のプランクに始まる量子論が、従来の古典力学観を大きく変えていく。1901年にはノーベル賞が制定され、これ以降毎年、物理、化学、文学、医学及び平和の各分野で顕著な功績のあった人々に報奨金が与えられるようになった。一方技術面では、1901年にマルコーニが大西洋横断無線通信に成功し、今日の情報通信の端緒を切り開いた。1903年にはライト兄弟が初めて飛行機を飛ばし、航空技術の発展を促し、その後世界の時間的空間を縮めることとなる。また同じ年にフォード会社が設立され、米国に自動車の大量生産の拠点が築かれる。1907年には3極真空管が発明され、この著しい進歩に伴い1923年から各国で無線放送が開始され、1925年には実用的テレビジョンが発明される。1940年から1945年の第二次世界大戦中の科学技術のエポックな出来事は、何と云っても戦勝国側のレーダ及び原子爆弾の実用化であったであろう。しかしドイツが戦時中に開発したV1、V2ロケット機も20世紀後半の宇宙開発に役立っていることは見逃せまい。

20世紀技術の特徴を一言で表せば、先にも述べたように19世紀を「蒸気の世紀」とすれば、20世紀は「電気の世紀」である。1880年代からの独占的産業確立の過程において、旧来の蒸気エネルギーと新興の電気エネルギーとがあい並んで活動していたが、20世紀に入ると電気は蒸気を追い越してしまう。

第3図は米国の総発電量を示すグラフである。



第3図 米国の総発電量の推移

4. 鉄道の発達

20世紀初頭の世界と日本の技術レベルについて調べてみよう。第3図のグラフからすると1900年の総発電量は0となっている。ところがASME学会誌⁽²⁾を調べ

てみると1899年のボストン南駅で使用されている機械装置について、127ページにも及んで写真入で紹介されているが、すでに電気機械がふんだんに使用されている。写真1にボストン南駅舎、写真2に20車線以上のレールの敷かれた操車場風景を示す。ボストン南駅は写真3に示すように動力室のエンジンに石炭抱焚きボイラーから蒸気を送り発電している。



写真1 ボストン南駅舎



写真2 ボストン南駅操車場風景



写真3 動力室に設置された蒸気エンジンの発電機

蒸気によりエンジンを動かして発電し、配線を通じて、操作上のレールの切替えポイントと信号は全部電氣式にし、駅舎及び工場の照明はアーク灯及び白熱灯

を用い、冷暖房を完備するなど、現在にほとんど近い技術レベルに到達している。その熱水や蒸気配管は今と全く変わらないインシュレーション（断熱材）が施されている。その当時の技術が相当に進んでいるのには驚かされる。まさに当時の技術の粋を集めたといつてよい。第4図はその頃アメリカで活躍した蒸気機関車の図である。これは英国で1900年に発刊された“Engineering” Vol.70に掲載されていたもので、日本の明治、大正時代に発刊されている技術誌に比べると紙質はもとより、美的な写真、図面を含めた印刷術には雲泥の差がある。



第4図 60-Ton Heisler Geared Locomotive, U.S.A

さてこの時代の日本はどうであったのであろうか。日本に初めて電燈がもったのは1882年(明治15年)、東京銀座である。第5図は銀座に初めて灯ったアーク燈を人々が驚嘆しながら見物している図である。



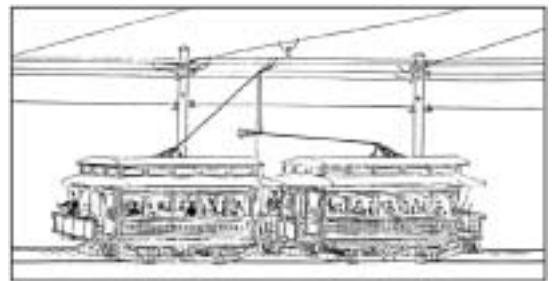
第5図 東京銀座通電氣燈建設之図⁷⁾

1872年(明治5年)に新橋・横浜間の鉄道開通を皮切りに、技術導入が着々進められ、1889年(明治

22年)には東海道線、1891年には東北本線が開通している。写真4は徳川慶喜公が1893年～1897年の間に撮影された安倍川鉄橋を渡る列車であるという。それからわずか8年後の1890年(明治23年)に上野の博覧会で電車が走った(第6図参照)



写真4 安倍川鉄橋を渡る列車⁸⁾



第6図 『風俗画報』1890年6月10日号⁷⁾

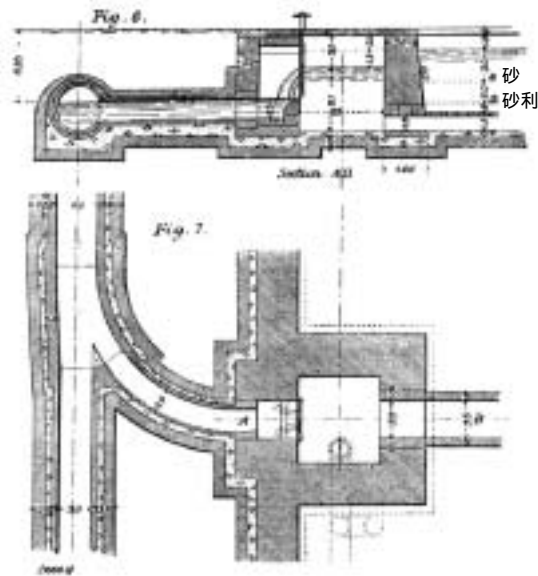
英国で始めて蒸気機関車が誕生してから日本で鉄道が開通するまで30年の歳月が経っているのに比べ、電車がドイツに登場してからわが国にもたらされるまでの時間は11年と意外に短い。日本は国策として欧米に追いつけ追い越せで近代化が急ピッチで進められ、実用の電気鉄道は1893年の京都を皮切りに、1904年には東京でも電車網が拡充していった。このように19世紀末から20世紀初頭の鉄道技術を示す写真や図から当事の世界と日本の技術水準が垣間見られる。

5. 当時の東京上水道⁽⁴⁾

さて1901年度版のEngineeringには東京上水道建設に関する貴重なレポートが掲載されているので概略をご紹介します。

東京への水は、徳川王朝のおよそ200年の間、運河と木製のパイプによってあちらこちらの水源から運ばれてきていた。新しい水供給システムが市議会の審議によって決定され、全て海外で実証されたものによる施工である。水の供給は東京市全区域にまたがるもの

で、現人口は約120万人であるが、一人当たり1日4ft³ (約0.11m³)として150万人分を賄える量とした。供給源は多摩川で、その水は非常にきれいで大都市に適している。沈殿槽は長さ220m、幅104m、深さ6mの大きさの3基で約25.5万立方メートルの容量があり、150万人の1日半分を供給することができる。水は3m / 日の濾過速度で砂によって濾されたがその濾過層を第7図に示す。



第7図 1901年の東京上水道の濾過層図

貯水所は淀橋、本郷及び芝にあった。水は高所には淀橋配水所からポンプによって送られ、低所には芝及び本郷貯水所から重力によって送られた。写真5に示すのは淀橋揚水所の風景である。306馬力のポンプが4機設置されており、1機の容量は24時間で1,000,000ft³ (約28,300m³)、ヘッドは80~100ft (約

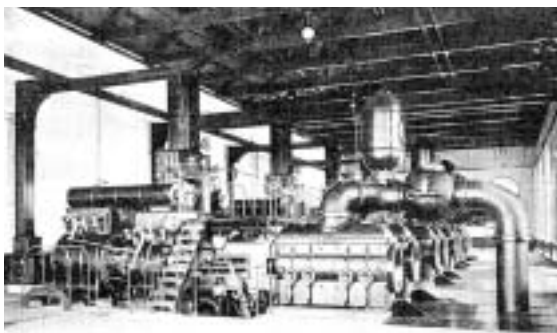


写真5 川崎重工業製の4機揚水エンジン

24~30m)である。これらのポンプは川崎重工業神戸で作られた。6基のボイラーがこれらのポンプを動作した。配管は100~1,100mm径の鑄鉄管各種、総長84.5万メートルがベルギー、英国及びスコットランドから約15,000トン輸入された。

大小2,250個のスルース弁と263個の消耗水メータが使われたが、後者は防火栓用としても使用された。

バルブ類はほとんどが海外から調達されたが、消耗水メータ、小さなバルブや防火栓などは日本で作られた。総工事費は850万円と見積もられている。現時点で2万所帯がこの水を使用しているが、全市民が水道を引くにはまだ少し時間がかかるだろう。

家庭用の継手は東京製の真鍮である。水道使用料は5人一戸所帯で年間5円であり、5人増えるごとに追加料金が取られる。水は水道メータで計量されるが、メータは借用が個人持ちのどちらでもよく、借用の場合12mm径のものは年間3円、250mm径のものは75円である。個人持ちの場合、サイズにより、各1~15円の試験費用が取られた。

計量水道料は一月100m³まで4.5円それ以上は1m³ごとに4.5銭が追加された(著者注:当時、小学校教員、大卒銀行員、上級公務員の初任給がそれぞれ12円、35円、50円、ビール大瓶が19銭といったところなので水道を持つことは結構な出費負担といえる)。

6. 飛行機の発明と近代流体力学の誕生

20世紀初期には汽車、電車は前述のごとく実用化されたが、1903年にライト兄弟が始めて飛行機を飛ばして航空機に対する関心が高まるにつれ、流体力学が脚光をあびるようになる。

プラントル(Ludwig Prandtl、独、1875~1953)は1904年に国際数学会議でわずか8ページからなる、流体運動に関する「境界層理論」を発表した。これが評価されて、ゲッチンゲン大学の応用力学の教授として招かれたのである。この「境界層理論」によって流体力学は飛躍的に進歩し、その後の航空機の発展に多大な貢献をする。



写真6 プラントルの肖像画

その後、超音速流れ、衝撃波理論、翼理論などの業績で近代流体力学の創始者といわれている。

プラントルの教授の下に、員外教授のカルマン (Theodore von Karman、独、1881～1963) が、長軸の座屈の実験を行っている時、同僚のヒーメンスがプラントルの命令で水槽を使って円筒の流速による抵抗を測っていた。円筒の後ろには渦が互い違いに発生し、円筒が流れに前後して振動してうまく測定できずに居た。プラントル教授に「円筒の真円度が悪いのだろう。」と言われ、彼は研磨仕上げをして苦労していた。カルマンはそれを見て、ヒーメンスの実験が悪いのではなくて、渦列のために振動が起こるのが本来の自然の姿ではないかと思った。そこで週末の休日に渦の並び方の理論解析を行い、第8図の(b)のような対象配列の渦は不安定で、ヒーメンスの実験で目撃した(a)の現象は(c)の非対称配列の渦で、上下の渦間隔 h と渦の流れに沿ったピッチ ℓ の比が、

$$h/\ell = (\operatorname{arccosh}\sqrt{2})/\pi \quad \dots(1)$$

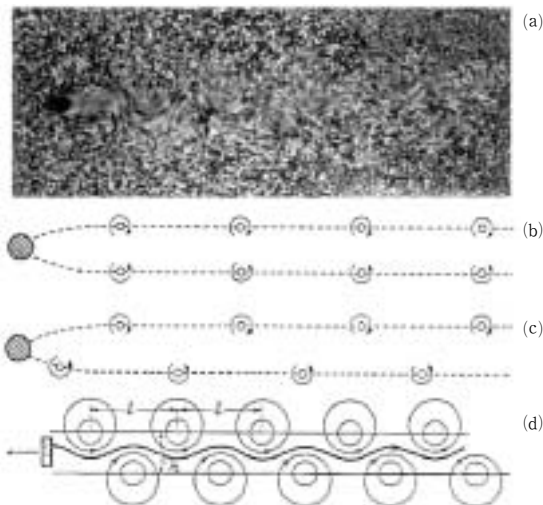
の場合に安定することを解明した。これを振動数 f [Hz] で表せば、

$$f = v/\ell = 0.281v/h \quad \dots(2)$$

となり、周波数は流速 v に比例し、渦の上下の間隔 h に反比例するという重要な公式を導き出したのである。



写真7 テオドール・フォン・カルマンの肖像画



第8図 カルマン渦列

そして次の月曜の朝、結果をヒーメンスとプラントルに見せたら、プラントルは厳肅に「ゲッチンゲンのアカデミーに紹介するから、すぐ論文にまとめなさい。」と言われた。1911年のこの論文が後世に残った出世論文であり、その後このような千鳥状の渦列はカルマン渦列と呼ばれるようになった。

カルマンの業績を讃えるためにベルリンに「カルマン通り」という名の通りができたが、後年1930年の国際応力力学会議のとき、フランスのアンリー・ベナール教授が、多年コロイド液で交互の渦を観察していたから「カルマン通り」にねたみを持っていたらしくクレームをつけたそうです。カルマンは「渦の挙動を見ただけなら、昔私もイタリアのボローニャ教会で、聖クリストファーが幼いキリストを抱いて小川を渡る絵を見たが、その裸足に交互の渦が流れているのを見たし、その後も多くの研究者が写真に撮っていますよ。ロンドンやベルリンにカルマン通りがあるなら、どうぞパリではアンリー・ベナール通りとお呼びになったらいかがですか」と言ったそうである。なかなかユーモラスな返答であるが、後年両氏は親友になったそうである。

このカルマン渦列は航空機の飛行には妨げとなるものであり、如何にこれを弱めるかが、性能アップにつながる。しかし、このカルマン渦列は20世紀後半に開発されるカルマン渦流量計の原理になっており、こちらでは如何にこれを強めるかがキーとなるのである。

<参考文献>

- (1) 湯浅光朝「科学文化史年表」, 筑摩書房
- (2) James E. Denton "The mechanical significance of viscosity determinations of lubricants" Transactions of ASME, Vol.9, 1887
- (3) Walter C. Kerr "The mechanical equipments of the new south station, Boston, Mass" Transactions of ASME, Vol.21, 1899
- (4) Tokyo city water works, Engineering Vol.7, 1901
- (5) 細井 豊「流れの力学(上)」, 東京電気大学出版局
- (6) 中田 孝「カルマン博士のこと」オーバル, Specialty No.8, 1990
- (7) 湯本豪一「図説 明治事物起源事典」柏書房
- (8) 三宅俊彦「鉄道古写真帖」新人物往来社
- (9) アイザック・ニュートン, 中野猿人訳, 「プリンシピア」, 講談社

【筆者紹介】

小川 胖
 (株)オーバル 技術顧問
 〒236-8645 横浜市金沢区福浦1-9-5
 TEL : 045-785-7259