

〔 連 載 〕

流量計測の歴史 第18回

<オートメーション、コンピュータ時代の幕開け>

小川 胖
Yutaka Ogawa

1. 面積式流量計の歴史

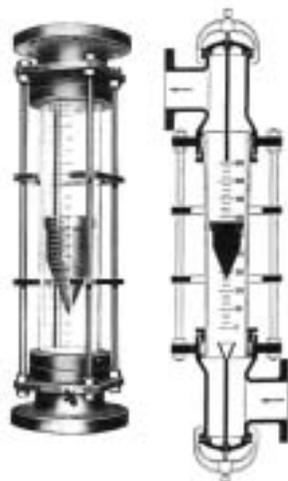
面積式流量計 (Area Meter) の歴史は1868年のエドモンド・オウグスティン・キャメロイ (Edmond Augustin Chameroy) が米国特許を取ったのに遡る⁽¹⁾。そうであるが、円筒及びピストンによる面積式流量計は1928年以前にニュージャージー・メータ (New Jersey Meter) によって、製品化された。1928 ~ 1938年の10年間にピッツバーグ社 (Pittsburgh Equitable) がガス用の指示計内蔵のもの、エクリプス航空 (Eclipse Aviation) が航空機燃料ライン用の指示計内蔵のもの、ランバート・メータ (Lambert Meter) がガス用の記録計内蔵のもの、ブラウン計器 (Brown Instrument) が遠隔用電気式 (誘導バランス原理) のものをそれぞれ開発した。

この10年間の初期にシャット&コーティング (Schutte & Koerting) が第1図に示すようなロータメータとして知られるフリー・フロート型を製作した。

このフロートの頂上には螺旋状の溝が切られており、流体が流れるとフロートが回転するため、フロートは流れの中央に位置し、壁との摩擦による誤差を少なくしたという。

従って精度が良く、流量範囲は1:200が可能なほど広いものであった。

形も非常にシンプルで、テーパ・ガラス管



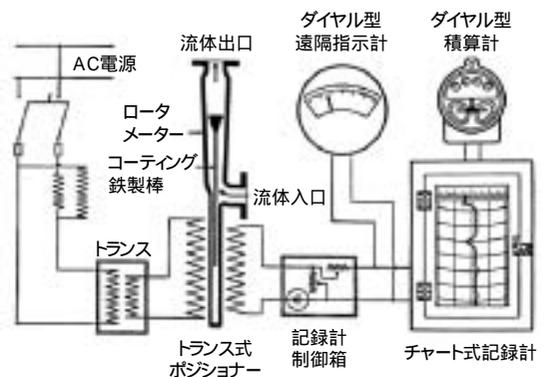
(a) 垂直流型 (b) 水平流型

第1図 Schutte & Koerting社のロータメータ⁽²⁾

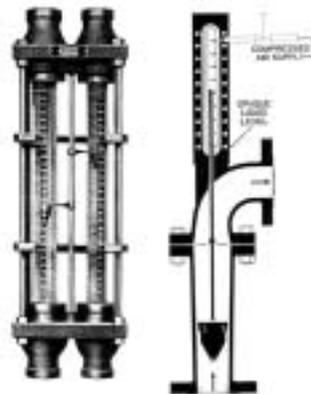
は普通の温度及び圧力の清浄な液体又は気体に適していた。

第2図は指示計・記録計・積算計を搭載する同社のロータメータ例を示すものである。

第3図左はゼネラル・エレクトリック社のガス炉で標準設備として装備された燃料 - 空気比用の双子型口



第2図 同社の指示・記録・積算型ロータメータ⁽²⁾



(a) GE社ファーンネス用 (b) 不透明液体用

第3図 当時のアプリケーション例⁽²⁾

ータメータの応用例であり右は不透明な液体用のものである。

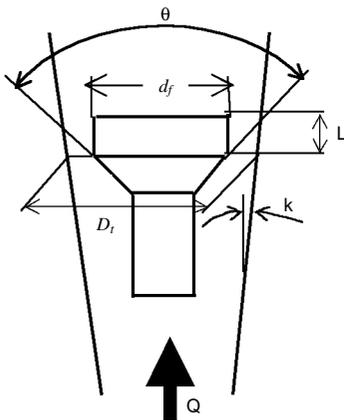
1937年頃からロータメータはフィッシャー&ポーター社 (Fischer and Porter Co.) によって大量生産されるようになった。

1941年にはフィッシャー&ポーター社のK.フィッシャ、ブレックマンらによって「ロータメータによる流量計測における粘度誤差の削減」⁽³⁾の論文が発表されている。ブレックマン氏は今でも健在で、戦後、横河電機やオーバルのコンサルタントを長らく務め、少なからず日本の流体計測分野で貢献した人物である。

面積式流量計の流量測定原理はよく知られているが、簡単に述べることにしたい。第4図には代表的なテーパ管式を示すが、面積式は差圧式と同様にベルヌーイの定理を用いフロートの上下流の圧力差から次式が成り立つ。流量 Q は

$$Q = C_1 \frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_f^2) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad \dots(1)$$

で表される。



第4図 面積式の原理図

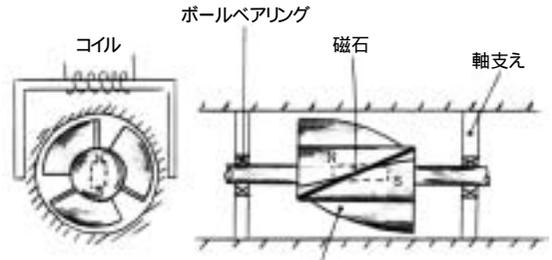
ここで P_1 、 P_2 はそれぞれフロート上流側及び下流側の圧力、 ρ は作動流体の密度、 C_1 は縮流係数、 D_i 、 d_f はそれぞれ図に示すシリンダー内径及びフロート外径である。

2. 戦前におけるその他の流量計の歴史

その他の流量計は戦前 (1945年以前) ではまだ実用化には至っていない。しかしタービンメータ、電磁流量計、超音波流量計などはその兆しが現れてはいたようである。

(1) タービンメータ

スコット (R. W. W. Scott)⁽⁴⁾によれば最初のタービンメータは1938年に米国で開発されている。この概略図を第5図に示すが螺旋羽根を有しており、空輸燃料の流量計測に使用されていた。当時ロケット・エンジンの寿命は短いので、軸受寿命が貧弱でも問題はなかったが、その後のアプリケーションには軸受特性の改善が必要であった。これは二つの異なる解決策によりなすとげられたのである。



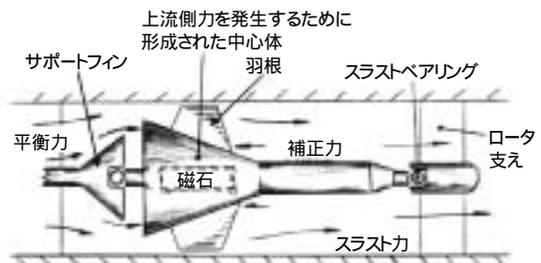
螺旋羽根ロータ

第5図 初期のタービンメータ (1938)⁽⁴⁾

最初の解決策というのは、スラスト荷重に耐えられ、寿命も許容できる材料によってスリーブ軸受 / スラスト球の組合せを使用したものである。その代表例として、小さなメータにはタングステン・カーバイドのボールベアリングと軸を使用し、大きなメータにはステライトのスリーブと、クローム鍍金とタングステン球を用いたのである。

第2の解決策というのは軸受摩擦とスラスト荷重を減少するために流体の力を利用するものである。

この考え方のすばらしいところは、軸周りに昇圧した液体薄膜を創生するジャーナル軸受にもあった。これは摩擦吸引トルクを減少し、性能改善に有意なスラスト荷重を最小にする効果がある。この設計の最初のもは第6図に示す、かの有名なポッターメータである。



第6図 初期のスラスト補正デザイン (Pottermeter)⁽⁴⁾

何故スラスト力が減少するかももう少し説明しよう。

流体が羽根にあると羽根は回転すると同時に、流れの方向にスラスト力を生じる。しかし図に示すように羽根を支える中心体の部分で最も流路が狭まるので、流速が最も早くなるが、ベルヌーイの定理によって、圧力が最も低くなる。すると下流側の圧力が高いため中心体は上流側に押されてスラスト力を軽減する力が生じるのである。この設計は現在のタービンメータにも生きているのである。

(2) 電磁流量計⁽⁴⁾

さて現在工業分野で最も需要が伸びている電磁流量計はどうであったのであろうか。

既に述べたようにこの歴史は古く1832年のファラデーのテムズ川での実験にまで遡る。1917年にはスミスとスレピアン (Smith and Slepian) が電磁石の船舶測程器用の特許を取っている。これは船体から水中に磁界を放射し、電極を船体に設置し船の速度を測るものであった。最初の流量計的な装置は1930年にウイリアムス (E. J. William) によって報告されているが、単に学術的興味の範疇を出ないものであったという。血流計測用の装置として最初に用いたのは1932年のファブレ (P. Fabre) である。1936年にはコリン (A. Kolin) が血液の速度を量的に測定する電磁流量計を発表したが、汎工業用としては戦後の発展を待たねばならない。

(3) 流速計 (Current Meter)⁽⁵⁾

工業用ではないが川の流速や風速を計るものとして古くから流速計があり、17世紀のフックの風速計に遡るものである (流量計測の歴史 < 6 . 産業革命からフランス革命へ > 参照のこと)。1900年代の米国では川の流速を測るものとして、大別するとコップ型とスクリュウ型があった。スクリュウ型を第7図に示すが上からハスケル (Haskell)、ホッフ (Hoff) 及びオツツ (Ott)メータである。これらのメータは流速が1ft/s (0.3m/s) 以上なら計測ができた。米国地質調査学会などが1901年頃からこれらの流速計を用いた論文を発表している。

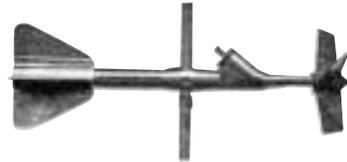
また風速計については、フリーズ (Friez) の遠隔指示型のものがすでに空港で用いられていた⁽⁸⁾。

3 . 自動制御とコンピュータの歴史

現在の工業プロセスでは温度、圧力及び流量制御が付き物である。現在自動装置のことをオートメーション (Automation) と言っているが、オートメーションの最初は18世紀に遡り、ジェームス・ワット



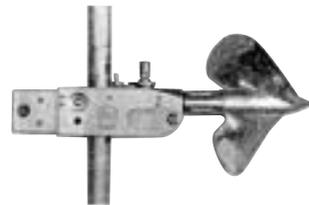
(a) ハスケル流速計



(b) ホッフ流速計



(c) オツツ流速計 TYPE V B



(d) オツツ流速計 TYPE V

第7図 1900年代の流速計⁽⁵⁾

(James Watt) が1788年に蒸気エンジンを速度制御するために、遠心力式调速機を設計したことが最初であると言われている。この调速機は若干改造されたものが現在でも使用されている。次は、1858年にブルーネル (Isambard K. Brunel) が海洋航海船の重量物を回転させるために、ステアリング・モータを発明したことである⁽⁶⁾。しかし近代自動制御理論が確立したのはかなり後で、1944年にオルデンブルグ⁽⁷⁾がラプラス変換を平易に導入し、制御の質に重点をおいた理論を展開した。あの第2次世界大戦でヒトラー率いるドイツ本土が壊滅的な爆撃を受けている最中のことであるのに驚く。従って本格的に発展するのは戦後を待つことになる。

流量計を調べている最中に、1938年1月号のInstrumentのピゴット (R. J. S. Pigott) が記した「工業流量計と自動制御」⁽⁸⁾に目がとまった。彼はガルフ研究開発社の主任技術者であり、1916年からASMEの流量計研究委員会の議長で、且つASMEの

複会長でもある重鎮であった。この論文中で自動制御の歴史が垣間見られる。この論文は

- ・ 量（容積式）メータ
- ・ 比率（推測式）メータ
- ・ 制御

から成り立っているが、 については前月号及び一部今月号で既に述べている。

まず序文では、

「過去10年間（1928～1938）に流体計測のあらゆる形体が相当進歩し、その工業的用途が倍増してきた。その理由は二つあり、一つは正確に量を知って、流体の値段を評価すること（水供給、電力及びガスに加えて計量することが必要な場所です）で評価された）；二つ目は流量計に対し、計測の商業的精度をより改善することであった。更にこの10年は工業用流体の自動制御から引出される優位性の評価が育ったことをも見逃されない。即ち、

- ① (a)重量及び(b)体積の遮断（著者注：現代用語のバッチに相当するものと思われる）
- ② (a)重量比率または(b)体積比率に応答する一次要素をもった流量の自動制御

である。ここでの4つの分類から明らかなように、制御系の性能が満足するかしないかは、1次計測要素に大きく依存するので、流量計測も自動的に進歩してしまうのである。」と述べている。

また工業流体の自動制御は温度及び圧力に関するものが多く、ここ10年間（1928～1938）で急速に発展してきたとしている。その内流体量制御の一例としてアスカニアの体積計によって駆動される遠心式タコメータ機構と制御弁による流れ制御（Flow Control）をあげている。

流量制御（Flow-rate Control）については一般的に理解されることからはまだ程遠かったが、少なくとも前4半世紀におけるよりも直近の10～15年でははるかに広く発展してきた。

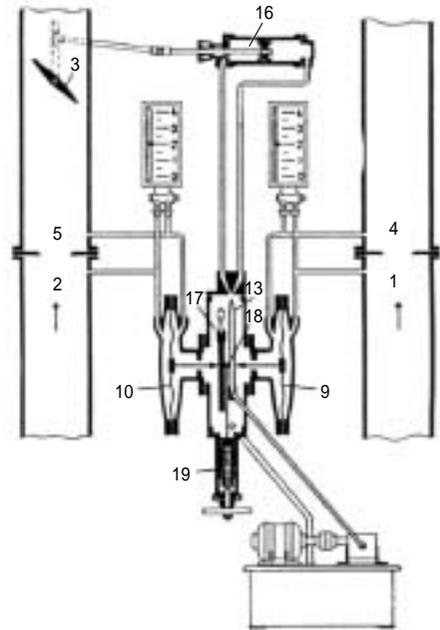
この分野に対して大きく貢献したのはH. C. Smootであった。この天才発明家は、感度、力、速度及び安定性が設計において基本的要素であることを明らかにし、推測を止め、数学的に計算すべきであることを認識した最初の人であった。彼の没後ですら数年間、あらゆるタイプの設計に影響を与えたという。

この頃シプレックスとビルダー（Simplex and Builder）は水道、濾過及び汚水に関する制御システムを作っている。更にビルダーは制御器の運転にクロノフロー（Chronoflo）伝送器を付加し、距離の長い

遠隔制御を可能とした。

アメリカン・メータは薄膜モータ制御弁に圧縮空気を受入れる、あるいはそれから排出するロータリ弁を作動するために、通常の差動記録計を用いた定流量制御器を製品化した。

アスカニアは第8図に示す比率制御システムを開発している。



第8図 アスカニアの比率制御装置⁷⁾

これについて説明すると、オリフィス4を通る「支配する」流れが増加すると、ダイヤフラム9により高い差圧がかかり、ジェットパイプ13とともども左へ動き、ジェットパイプから噴出する油がパワー・シリンダー16の左端に入るので、バルブ3が更に開く。結果的にオリフィス5を通る「制御される」流れが増加し、ダイヤフラム10をまたぐ差圧が増加して、右へ動き、ジェットパイプ13を平衡位置に戻す。比率の調整はジェットパイプ13と腕17の間を上下方向に動くスライダ18によって行われる。

この17の二つの腕は反対の位置で支点となっているので、二腕間の作動リンクであるスライダ18をシフトさせると、ダイヤフラム9と10間の負荷比率が変化する仕掛けになっている。

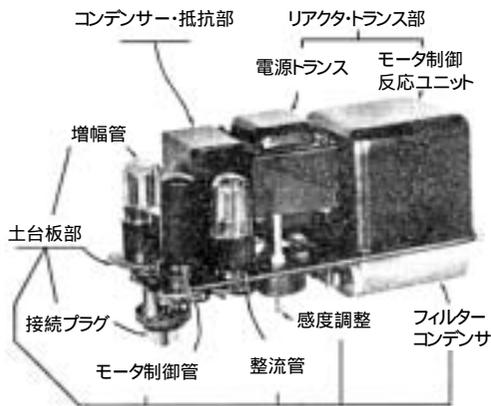
テイラー及びフォックス・ボロー社はそれぞれ独自の空気作動装置によって、流量制御分野に参入した。また両社とも実用的なバルブポジショナーを開発した。

すでに < 14. 差圧式流量計 > で一部紹介したが、1937年にスミス (ED S. Smith, Jr.) 他が「工業計器、その理論と応用」⁽⁹⁾で流量、レベル、圧力及び速度などの変数を計測する工業計器をニュートンの第2法則から慣性と機械的摩擦による特性に関し機械力学的に展開し、減衰係数を導入し、振動系の減衰特性などを論じている。この理論は1924年のドライブスデルによる、「電気計器 - 振動回転系の取扱い」⁽¹⁰⁾を参照しているが、そもそも振動工学は1917年のウィテーカーが「解析動力学」⁽¹¹⁾を記しているのが端緒であろう。

さらに、1940年にはベックが「温度計の時間遅延」⁽¹²⁾を発表しており、すでにその議論の中で電気系のCR等価回路を用いて過渡特性などが論じられている。

温度計の時間遅延については1912年のハーバの論文⁽¹³⁾に遡ることができる。1941年にはピーターズが「自動制御の実験研究」⁽¹⁴⁾を、1944年にはディッケイが「工業プロセス用電気式計器」⁽¹⁵⁾を発表している。

その中で第9図は当時温度、流量、レベルなどに使用された60Hz AC用の電子式増幅器の例である。真空管時代なので現在の増幅回路に比べいかに大きな寸法である。



第9図 当時の電子増幅ユニット⁽¹⁵⁾

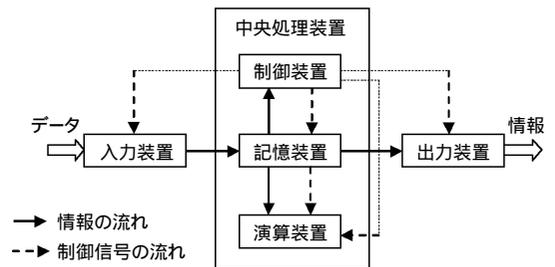
さて現在の自動制御ではコンピュータが付き物であるが、コンピュータの歴史をざっと見てみよう⁽¹⁶⁾。

計算機の元祖はエジプトや中国で紀元前に既に使われていたソロバンである。機械的に加減算を行うことができた最初の本当の計算機は1642年にフランスの科学者パスカル (Blaise Pascal) によって発明されたものである。同じ17世紀にドイツの哲学者で且つ数学者であったライプニッツ (Gottfried Wilhelm von Leibnits) は加減算のみならず、掛け算、割り算及び平方根の計算ができる機械を開発した。

1812年になって、英国オックスフォード大学で、数学教授のバベッジ (Charles Babbage) が階差機関 (Difference Engine) と呼ぶ計算器を設計し、11年後には解析機関 (Analytical Engine) と呼ぶ別の計算器を考案した。どちらも商品化はしていないがバベッジの設計は第10図に示す今日のコンピュータの基本機能をすべて考慮した驚くべきものであった。近代の電算機は彼の先駆者的機構に負うところが大きい。



写真1
チャールズ・バベッジ⁽¹⁶⁾



第10図 今日のコンピュータ基本機能⁽¹⁶⁾

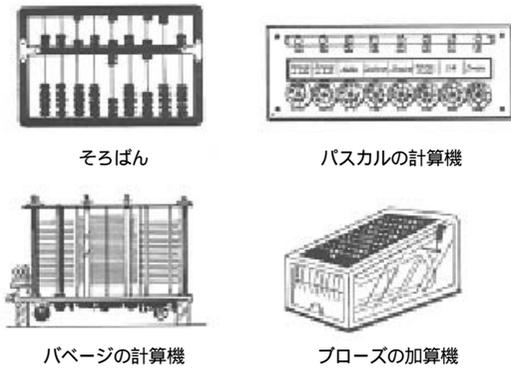
1885年にフェルトが発明したキー操作型計算機が商品として成功した最初の加算器であった。数年後パロース (W. S. Burroughs) が印字機構の付いた金銭登録機を製作し、商業界に革命をもたらした。今日では勘定計算とレシート発行のできる金銭登録機を使用していない商店はほとんどないであろう。

第11図にこれらの歴史的な計算器を示す。

1887年にはヘルマン・ホレリス (Hermann Hollerith) がパンチカード方式を使用した。

電氣的データ処理が本領を発揮するのは第2次世界大戦中であつた。新しく開発した武器に関し極めて重要な弾道計算が必要であつた。このためにブッシュ (Vannevar Bush) が開発したアナログ・コンピュータが一般的に使われた。この種のコンピュータは政府の契約の下で数多くの大学で成功裏に製作された。

しかしあるケースでは、アナログ・コンピュータよりももっと早くて正確な計算ができるコンピュータが必要となり、デジタル・コンピュータが開発されるようになった。ハーバート大学のエイケン博士 (Dr. H. H. Aiken) は自動連続制御計算機またはハーバード・マーク と呼ばれる半電氣的機械を兵器海軍工廠



第11図 歴史的な計算機の数々⁽⁶⁾

のために設計した。マーク は国際商業用機械会社 (IBM) と共同で建造され、1944年完了した。

一方ペンシルベニアのモア技術大学で1943年にモークリー博士 (Dr. J. W. Mauchly) が最初の汎用設計の全電気式コンピュータを思いついた。この装置は ENIAC コンピュータ (Electric Numerical Integrator and Calculator) と呼ばれ、1945年に完成した。写真2はエニアックの一部であるが、世界最初の計数形電子計算機とされている。左から起動ユニット、除算器兼開平器累算器及び2台の高速乗数パネルである。エニアックではおよそ18,800本の真空管、1,500個のリレー、70,000個の抵抗、6,000個のスイッチが使用されていた。しかし計算速度はマーク の約1000倍も早かったので、「エニアックはマーク をまるで水車のように古めかしい存在にしてみました。」と言わしめたのである。

エニアックの能力は当時として画期的なものであったが、演算素子に真空管を使用していたため故障率が高く、性能が不安定であった。真空管 (第1世代のコンピュータ) がやがて姿を消し、トランジスター (第2世代のコンピュータ) が取って代わるのも時代の趨

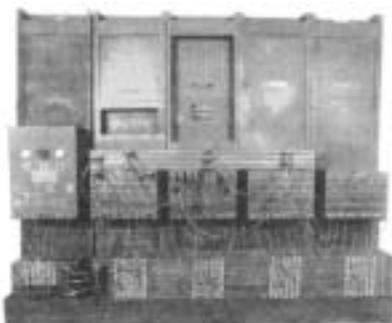


写真2 世界最初の計数形電子計算機⁽⁷⁾

勢であった。

他の先駆者としてノイマン博士 (Dr. John von Neumann) が挙げられる。彼は「つむじ風 (Whirlwind)」と呼ばれるコンピュータに貢献し、国家標準局が SEAC (Standards Electronic Automatic Computer) としてこれを建造した。また彼はプログラム内蔵方式を着想した一人でもあった。

このようにデジタル・コンピュータは終戦直前にやっと緒に付いたばかりの状態と言ってよい。しかし自動制御技術とコンピュータ技術が結合して、工業界が飛躍的に躍進することは想像にかたくないことであった。

以上で戦前 (1945年以前) の「流量計測の歴史」はほぼ調べつくしたように思われる。

さてこれからはいよいよ「第2次世界大戦後の流量計測の歴史」に話しは移るわけであるが、オートメーションとコンピュータによる全世界的な戦後復興が始まり、流量計測もその潮流に乗って大躍進を遂げることになる。

<参考文献>

- (1) 「流量計測 A to Z」, 日本計量機器工業連合会編
- (2) M. F. Behar "Flow Measurement and Control" Instrument, 1933 Dec.
- (3) Kermit Fisher Seymour Blechman "Elimination of the Viscosity Error in Flow Measurement with Rotameters" Instruments 1941 March
- (4) R. W. W. Scott "Developments in Flow Measurement", Applied Science Publishers
- (5) Floyd A. Nagler "Use of Current Meters for Precise Measurement of Flow" Transactions of A. S. M. E, 1933
- (6) "Popular Science" Vol.9, 10, Grolier
- (7) R. C. Oldenbourg, H. Sartorius "Dynamik selbsttätiger Regelungen" Oldenbourg München 1944
- (8) R. J. S. Pigott "Industrial Fluid Metering and Automatic Control" Instrument, 1938 Jan.
- (9) ED S. Smith "Industrial Instruments, Their Theory and Application" Transaction of A. S. M. E, 1937
- (10) V. Drysdale "Electrical Measuring Instrument-Treatment of oscillating rotational systems" Ernst Benn, Ltd., London, 1924
- (11) E. T. Whittaker "Analytical Dynamics" 1917
- (12) Rudolf Beck "Thermometric Time Lag" Transaction of A. S. M. E, 1940
- (13) D. R. Harper "Thermometric Time Lag" 3rd, U. S. Bureau of Standards, Bulletin No.185, 1912, p.659
- (14) J. C. Peters "Experimental Studies of Automatic Control" Transaction of A. S. M. E, 1941
- (15) P. S. Dickey 他, "Electronic-Type Instruments for Industrial Processes" Transaction of A. S. M. E, 1944
- (16) 小田 徹: 「コンピュータ史」, オーム社, 1983
- (17) 渡辺了介訳: 「デジタル計算の道具史」, ジャスト・システム, 1995