

圧力計技術の発展の系統化調査

Historical Development of Pressure gauges Technologies

清水 明雄

Akio Shimizu

■ 要旨

世界で初めてつくられた圧力計は、イタリアのトリチェリが17世紀に発明した「水銀気圧計」である。これは、現在、水銀液柱形圧力計、あるいは、マノメータと呼ばれ、『液柱形圧力計』に分類される。その後、18世紀から19世紀にかけて、ピストンと重錘でシリンダに圧力を発生させる『重錘形圧力計』がドイツで、現在の『アネロイド形圧力計』（JIS圧力計規格で「ブルドン管、ベローズ、チャンバ、ダイヤフラムなどの弾性素子を圧力計の受圧部にもつもの」）に分類される、金属の弾性を利用した「アネロイド形気圧計」と「ブルドン管圧力計」がフランスで、ピストンとばねを用いた記録式圧力計『エンジンインジケータ』の原型がイギリスで、各々発明された。

気圧計から始まった圧力計の歴史の中で特に重要なのは、構造原理の異なるこれら、『液柱形圧力計』『重錘形圧力計』『アネロイド形圧力計』『エンジンインジケータ』の4つの圧力計である。

『液柱形圧力計』はトリチェリが発明した気圧計から発展し、後に、血圧計や高度計などへ応用された。わが国では、1920年のブルドン管圧力計の検定開始とともに、検定に用いる「基準液柱形圧力計」として規定され、以降、特に産業分野における低圧の圧力計の校正や検査に広く用いられている。

『重錘形圧力計』はブルドン管圧力計の検定に使用する「基準重錘形圧力計」として、液柱形圧力計と同時に規定された。第二次大戦後の産業界では、圧力の高精度化、高圧化に伴い、さまざまな「重錘形圧力計」が開発され、現在は、低圧から超高圧まで、ブルドン管圧力計をはじめとした圧力計測機器の校正や検査に幅広く使用されている。

『アネロイド形圧力計』は受圧部に弾性素子を用いた圧力計である。この内、弾性素子にブルドン管以外を用いたものは「アネロイド形気圧計」から発展した微圧用で、一方、ブルドン管を用いたものは、用途への適応性に優れ、低圧から超高圧までを網羅する。発明と同時にまたたく間に工業先進国に広まったブルドン管圧力計は、それまで用いられていた『液柱形圧力計』から次々と置き換わり、イギリスから始まった世界の近代工業化の発展に大いに貢献した。

『エンジンインジケータ』は世界初の記録式圧力計である。用途が限定的で、一般にはあまり知られていないが、イギリスの産業革命で蒸気機関の実用化に果たした功績は非常に大きい。現在、機械式インジケータは、世界では日本の圧力計メーカー1社のみによる製造とされ、用途も特殊で生産量も少ないが、その技術史的価値は高い。

わが国で初めてブルドン管圧力計の研究開発を行ったのは、1896（明治29）年に和田計器製作所を創業した和田嘉衛である。富国強兵と工業化による近代国家を目指し、軽工業から重工業への移行を強力に推進した明治政府の下、ヨーロッパから大量に輸入された蒸気機関車などの蒸気機械に、圧力計が装着されていた。和田は独力でそれらの国産化に成功した。

大正時代に入ると、わが国の工業化は、軍勢力増強、植民地化による海外進出を伴って隆盛し、進展した。その後、関東大震災という未曾有の危機に見舞われるが、第二次世界大戦直前まで産業機械の生産は拡大の一途をたどった。国産のブルドン管圧力計の需要の伸びも著しく、わが国の圧力計メーカー数は当初の数社から、1930年代には100社にまで達したとされ、ブルドン管圧力計は工業化の振興と経済発展を支えた。

第二次世界大戦でわが国の工業は壊滅的な状況に陥ったが、戦後は朝鮮動乱特需で息を吹き返した。そして、高度経済成長期には新たな産業が勃興し、圧力計のニーズも多様化、高度化し、新技術による製品が次々に開発された。戦後、誕生した「電気式圧力計（アナログ指示）」は、ブルドン管を用いて圧力を電気量に変換する圧力計である。しかし、コンピュータ時代の到来により、圧力指示を不要とするコンピュータ制御が主流になり、「電子式圧力計（デジタル表示）」や「圧力発信器」が開発されると、「電気式圧力計」は使用されなくなった。

その後、バブル崩壊を経て、平成時代になると、日本の圧力計メーカーが最新の半導体技術を用いて、長年、研究開発を重ねてきた「工業用圧力センサ」が急激に普及した。「工業用圧力センサ」は、日本がかつて圧力計を輸入していた工業先進国に逆輸出され、着実にその市場を拡大している。「工業用圧力センサ」は圧力計測技術の結晶であり、わが国の強みである。

しかし、戦後、さまざまな圧力計が誕生する中、国家検定が開始された1920（大正9）年の1万4千個から、2007（平成19）年の約900万個へと生産量を大きく伸ばし、現在の産業界でもっとも広く使用されているのは、圧力計の中でもっとも古い歴史をもつブルドン管圧力計である。震災や戦争を乗り越え、高度経済成長期以降の電子化にも揺らぐことなく、ブルドン管圧力計は、今なお、世界最高水準の超高圧ブルドン管圧力計が開発されるなど、技術を発展させながら、産業界に多大な貢献を続けている。

■ Abstract

The first pressure gauge in the world was a mercury barometer invented by the Italian Evangelista Torricelli in the 17th century. This device, which today is called a “mercury liquid-column manometer” or simply “manometer,” is classified as a “liquid column manometer.” Later, in the 18th and 19th centuries, the “dead-weight tester” that generates pressure in a cylinder using a piston and weight was invented in Germany, the “aneroid barometer” and “Bourdon tube gauge,” which exploit the elasticity of metal and are today classified as an “aneroid gauge” (which, according to JIS pressure gauge standards, has an elastic element like a Bourdon tube, bellows, chamber, or diaphragm in the pressure receiver of the gauge) were invented in France, and a model of a recording pressure gauge (engine indicator) using a piston and spring was invented in Great Britain.

In the history of pressure gauges beginning with the barometer, of particular importance are these four types of pressure gauges—liquid column manometer, dead-weight tester, aneroid gauge, and engine indicator—having different structural principles.

The liquid column manometer has progressed since the barometer invented by Torricelli, and today, it is used in blood pressure gauges, altimeters, and other devices. In Japan, a “standard liquid column manometer” was prescribed in 1920 for testing purposes in conjunction with the launch of a national certification system for Bourdon tube gauges. It has since come to be widely used for calibrating and inspecting low-pressure gauges in industry.

A “standard dead-weight tester” was also prescribed at the same time as the standard liquid column manometer for use in testing Bourdon tube gauges. After World War II, various types of dead-weight testers were developed as the demand for highly precise pressures and higher pressures increased, and today, dead-weight testers are being widely used in low-pressure to high-pressure applications and in the calibration and inspection of Bourdon tube gauges and other pressure measuring devices.

The aneroid gauge uses an elastic element in the pressure receiver. Gauges of this type that use other than Bourdon tubes for the elastic element have come to be used for micro-pressure applications, but those that use Bourdon tubes are quite adaptive covering the range from low-pressure to ultra-high-pressure applications. The aneroid gauge spread quickly to industrially advanced countries after its invention and came to replace many liquid column manometers that had been used up to that time. The aneroid gauge went on to make great contributions to the development of modern industry, which had started with Great Britain, throughout the world.

The engine indicator was the world’s first recording pressure gauge. Being limited in application, it is not well known, but its role in developing practical steam engines during the industrial revolution in Great Britain is immense. It is said that this type of pressure gauge is today made by only one company in the world: a Japanese pressure gauge manufacturer. Although it is used for only special applications and produced in limited quantities, its historical value is high.

In Japan, the first person to research and develop Bourdon tube gauges was Yoshihira Wada, who founded Wada Keiki Seisakusho in 1896. At that time, the Meiji government was actively promoting a transition from light to heavy industry to make Japan into a modern nation through prosperity, military strength, and industrialization. As part of this policy, steam locomotives and other types of steam engines equipped with pressure gauges were being imported from Europe in great numbers. By his own effort, Yoshihira Wada succeeded in domestically producing these pressure gauges.

On entering the Taisho era (1912 – 1926), the industrialization of Japan flourished and progressed in conjunction with a military buildup and overseas expansion through colonization. Then, despite the unprecedented disaster of the Great Kanto Earthquake of 1923, the production of industrial machinery continued to expand right up to the Second World War. The demand for domestically produced Bourdon tube gauges increased dramatically, and the number of pressure gauge makers in Japan grew from just a few to more than a hundred by the 1930s. The Bourdon tube gauge promoted the industrialization and economic development of Japan.

During the Second World War, much of Japan’s industrial base was destroyed, but after the war, special procurements associated with the Korean conflict breathed new life into the industrial sector. The high economic growth period that followed also gave rise to new industries resulting in more diverse and advanced needs for pressure gauges, which stimulated the development of products using new technologies. Electrical pressure gauges (analog indicators) that appeared after the war converted pressure to electrical quantities using Bourdon tubes. With the coming of the computer era, however, computer control in which pressure indication is unnecessary became mainstream and products like electronic pressure gauges (digital displays) and pressure transmitters came to be developed. Electrical pressure gauges fell out of use as a result.

Then, as Japan entered the Heisei era following the bursting of the bubble economy, “industrial pressure sensors” began to spread rapidly. These industrial sensors were the result of long-term R&D efforts by leading pressure gauge makers in Japan using new semiconductor technologies. They have come to be exported to industrially advanced countries from which Japan once imported pressure gauges, and the international market for them is expanding steadily. Industrial pressure sensors are the fruit of pressure measuring technologies and a strong point of Japanese industry.

Nevertheless, while a variety of pressure gauges have appeared in the post-war period, the Bourdon tube gauge, whose production volume has grown from 14,000 units in 1920 when the national certification system was launched to about 9-million units in 2007 and whose history is one of the oldest among pressure gauges, is now the most widely used pressure gauge in Japanese industry. The Bourdon tube gauge, which has survived earthquakes and wars and the trend toward digital devices following Japan’s high economic growth period, is still evolving technologically as reflected by the development of an ultra-high-pressure Bourdon tube gauge meeting the world’s highest standards. We can expect the Bourdon tube gauge to continue to make significant contributions to industry.

■ Profile

清水 明雄 Akio Shimizu

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和33年 3月	東京都立工業短期大学機械科卒業
昭和33年 5月	富士通信機製造株式会社入社
昭和33年10月	同社退社
昭和33年11月	株式会社長野計器製作所(現、長野計器株式会社)入社東京研究所配属、本社工場(上田市、後に上田工場に名称変更)生産技術部次長兼量産試作課長、技術部次長兼標準器室長
	工作部長など担当(主に、ブルドン管の研究、圧力計をはじめ、圧力計測機器、試験器、装置、自動化等の開発、設計、製造に従事)
昭和63年 1月	同社退社(転出、以降も圧力計製造等に従事)
昭和63年 1月	株式会社長野汎用計器製作所 代表取締役
平成11年 9月	ゼットエイ株式会社 代表取締役
平成13年 6月	同社退社
平成15年 3月	株式会社長野汎用計器製作所退社
平成 8年 7月	日本圧力計温度計工業会技術委員会委員
～平成14年 7月	
平成10年 5月	日本圧力計温度計工業会常務理事
～平成15年 5月	
平成10年 7月	ブルドン管圧力計JISB7505(1999)改正原案作成
～平成11年11月	圧力計専門委員会委員
平成11年 7月	通商産業省計量行政審議会専門委員
～平成13年 7月	
平成20年 4月	国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

■ Contents

1. はじめに	163
2. 圧力の概要	166
3. 圧力計の構造原理	180
4. ブルドン管圧力計	191
5. 圧力計の開発製品	218
6. まとめと考察	226

1 はじめに

圧力計の産業統計分類⁽¹⁾(経済産業省)は、分類番号 278「業務用機械製造業の計量器」である。旧分類番号 319「その他の精密機械器具製造」は、平成 20 年から上記に改正された。

圧力計の起源は、イタリアのエヴァンジェリスタ・トリチェリ⁽²⁾(Evangelista Torricelli, 1608-1647)によって発明され、その後、『液柱形圧力計』に発展した「水銀気圧計」とされる。この「水銀気圧計」は、後述の『エンジンインジケータ』とともに、イギリスの産業革命で中心的役割を果たしたジェームス・ワット (James Watt, 1736-1819) の蒸気機関の開発・改良に用いられた。世界の近代工業化はこの蒸気機関の実用化から始まった。



図 1.1 トリチェリ © The Mathematical Association of America ペセズダ国立医学図書館所蔵

その後、ドイツでは『重錘形圧力計』が、イギリスでは蒸気機関の爆発圧力を測る『エンジンインジケータ』が誕生し、フランスでは、1844 年に L. ビディが設計した「アネロイド形気圧計」と、1849 年に E. ブルドン⁽³⁾(Eugène Bourdon, 1808-1884)が発明した「ブルドン管圧力計」、(『アネロイド形圧力計』の一種)が、それぞれ発明された。

アネロイド (aneroid) とは、ギリシア語の “a (～がない)”、“neros (湿った)” に由来し、「液体を用いない」を意味する⁽⁴⁾。トリチェリが発明した水銀を用いる気圧計 (barometer) に対し、液体を用いない気圧計が開発された際、この言葉が使われた。しかし、

近年、『アネロイド形圧力計』には液体を用いたものも登場し、その厳密な意味は薄らいでいる。



図 1.2 ブルドン © FISICANET

このうち、「ブルドン管圧力計」は、イギリスの産業革命後、近代工業国家を目指す各国の蒸気機関などに急速に普及し、水銀を用いた『液柱形圧力計』から置き換わって行った。

これら『液柱形圧力計』『重錘形圧力計』『アネロイド形圧力計』および『エンジンインジケータ』の 4 つの圧力計は、それぞれの特長を発揮しながら、今なお、産業界の発展に貢献を続けている。

一方、国内では、1896 年に和田計器製作所を創業した和田嘉衡⁽⁵⁾(1861-1945) が、先進工業国の指導やライセンスなどを全く受けることなく、ブルドン管圧力計の研究開発に没頭し、試行錯誤を重ねながら、創業から 1 年を経ずして、独力で圧力計の国産化に成功した。



図 1.3 和田嘉衡
東京計器 (株) 提供

各種圧力計をはじめとしたさまざまな計器を開発する和田計器は、やがてわが国を代表する計器メーカーの東京計器製作所（株）（現、東京計器（株））へと発

展し、和田はその初代社長に就任した。和田は、「計器」という言葉を造語したことで知られる。

わが国の産業機械に使用されて 110 余年（1896・明治 29 年～）発展を続けているブルドン管圧力計の一例

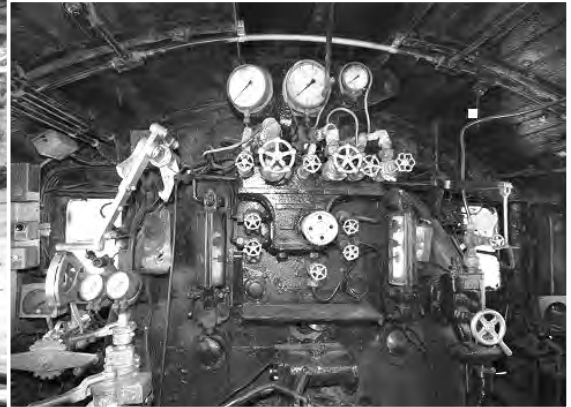


図 1.4 蒸気機関車 D51 に搭載の圧力計 日本国有鉄道 1943（昭和 18）年製造 聖博物館（長野県麻績村）提供



図 1.5 氷川丸に搭載の圧力計 日本郵船 1930（昭和 5）年竣工 氷川丸（横浜市山下公園地）提供



図 1.6 長野新幹線「あさま」に搭載の圧力計 長野計器（株） 2008（平成 20）年提供

本稿では、こうした経緯から進展したわが国の産業用圧力計を取り上げ、特にブルドン管圧力計を中心にその発展についての系統化調査を行った。調査では、筆者の作成した産業界の慣習的な分類（図 1.7）に基づき、主に、現在使用されている産業用機械式圧力計を対象とした。なお、アネロイド形圧力計の詳細な分類については、その内容から第 5 章で取り上げ、図 5.6 に示した。

るが、特に統一された定義や数値はなく、慣例に従った。

また圧力では、圧力の“力”を省略した。その他の用語については、JIS 圧力計（B7505-1）⁽⁶⁾、JIS 計測用語（Z8103）⁽⁷⁾、および、慣例に基づいて使用した。

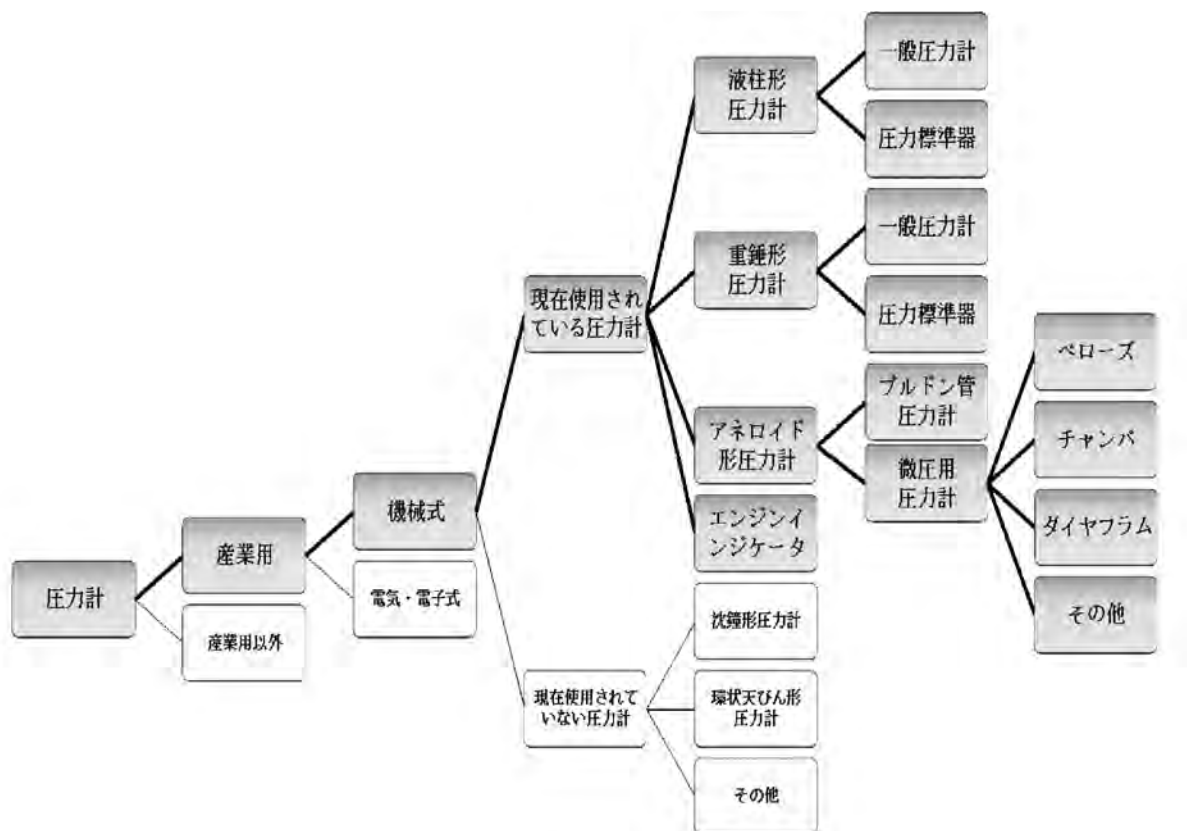


図 1.7 圧力計の分類

内容としては、以下のように取りまとめた。第 2 章では、圧力と圧力計側、圧力計側の歴史、圧力単位、圧力基準と圧力標準について、第 3 章では、『液柱形圧力計』『重錘形圧力計』『アネロイド形圧力計』および『エンジンインジケータ』の構造原理について、第 4 章では、今なお産業界の主流を占める『ブルドン管圧力計』の歴史、技術、圧力計業界と関連事項について、第 5 章では、圧力計の開発製品について、第 6 章では最終章として、まとめと考察を行った。

なお、圧力計を表す用語に、「形」、「型」、「式」などがあるが、専門書でもその表記は統一されておらず、また、法規上でも歴史的な経緯があり、その使用は複雑である。従って、本稿では、混乱を避けるために、差し支えない限り、「形」に統一して使用した。

また、本稿では圧力の分類に、「極微圧」「微圧」、「低圧」、「中圧」、「高圧」、「超高圧」などの用語を用いてい

参考文献

- (1) 経済産業省：「産業統計分類統計」（2008）〔平成 20 年〕
- (2) H.W. ディキンソン：「蒸気動力の歴史」P17 平凡社（1994）〔平成 6 年〕
- (3) 橋本、梶、廣野監訳『科学大博物館』P198 朝倉書店（2005）〔平成 17 年〕
- (4) 同上 P135
- (5) 長野計器社史編纂委員会編：「計測から制御へ 長野計器 50 年史」P2（1999）〔平成 11 年〕
- (6) JIS 規格（2007）〔平成 19 年〕
- (7) JIS 規格（2000）〔平成 12 年〕

2 | 圧力の概要

2.1 圧力と圧力計測

(1) 圧力⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

圧力とは、単位面積当たりの力で定義される物理量である。連続体の中に任意にとった一つの平面を仮定し、この面に作用する法線応力を圧力と呼ぶ。

圧力には、固体の内部圧力や固体間の接触面圧力なども存在するが、一般に、産業分野（機械装置産業）での対象は流体の圧力である。流体の圧力は、計測上の立場から、静的な圧力と動的な圧力とに大別される。流体力学上の分類（静圧と動圧）との混同を避けるため、前者を「定圧力（静的な圧力）」、後者を「変動圧力（動的な圧力）」という。

『アネロイド形圧力計』JIS規格（ブルドン管圧力計）⁽⁴⁾では、産業計測の分野で用いられる圧力計の一般的特性を考慮し、『定圧力』を「変化しない圧力または、1秒当たり圧力スパンの1%を超えない速さで連続的に変化し、かつ1分当たりの変化量が圧力スパンの5%を超えない圧力」、『変動圧力』を「1秒当たり圧力スパンの1～10%の速さで変化する圧力」、『常用圧力』を「ブルドン管圧力計を使い続けてもよい圧力範囲の上限値」と規定されている⁽⁵⁾。

静止流体では、任意の1点の圧力は、方向とは無関係に等しい。このような等方向性の圧力を静水圧（静水圧力）という。重力場においては、水平面上の各点の圧力は同一で等圧面を形成するが、鉛直方向には圧力勾配が生ずる。

密度が一定である静止流体内の、ある点の圧力を P_1 とし、その点よりも h だけ低い他の点の圧力を P_2 とすると、次式⁽⁶⁾

$$P_2 - P_1 = \rho gh \quad (1)$$

となる。

ここに、 ρ は液の密度、 g は重力の加速度である。密度が高さ h によって異なるとき、圧力は次式

$$P_2 - P_1 = \int \rho g dh \quad (2)$$

で表される。

(2) 圧力計測⁽⁷⁾⁽⁸⁾

産業界で扱う圧力は約10Paから 10^9 Pa（1GPa）と広範囲で、用途もきわめて広い。

図2.1は、圧力計の圧力範囲を概念的に示したものである。

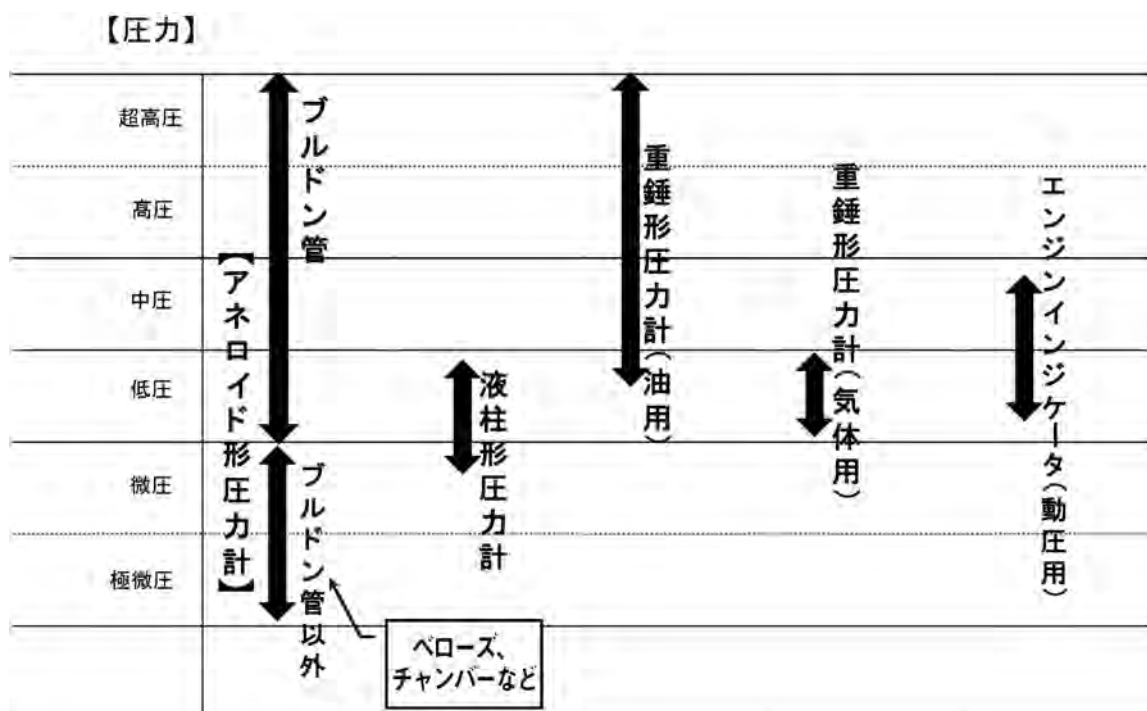


図 2.1 圧力計の計測範囲

圧力計にはさまざまな種類があるが、一般に多用されているのは、前述したアネロイド形圧力計に属する弾性式と呼ばれる圧力計である。下記に、かつて、日本機械学会で作成された圧力計の分類表（図 2.2）を

記す。ただし、第一章でも触れたように、この図は現在の産業界の分類とは大きく異なるため、ここでは過去の資料としての紹介に留める。

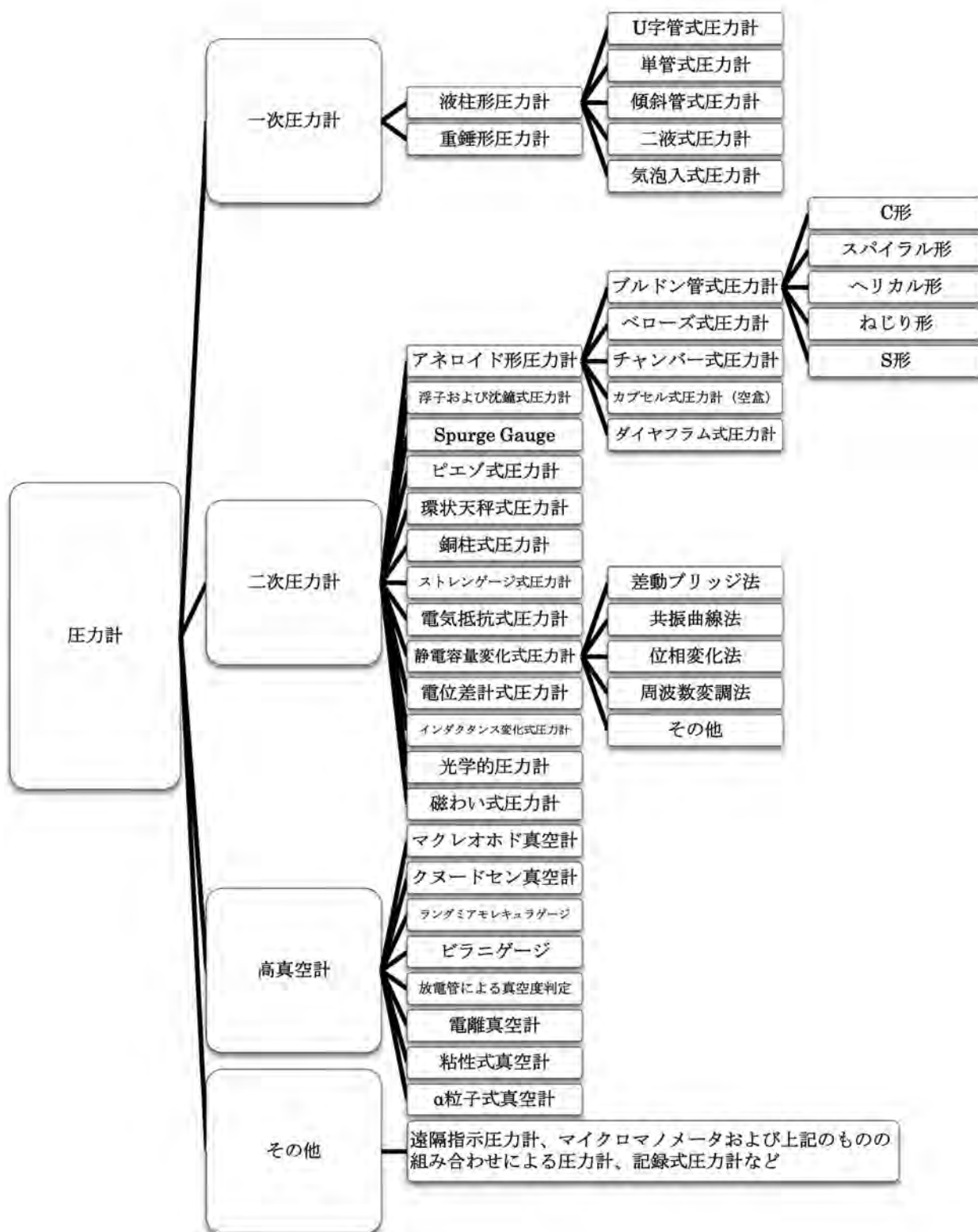


図 2.2 圧力計の種類（日本機械学会第 223 回講習会教材（'64-11 東京、機械技術者のための工業計測「第 1 表」）

圧力の変換方式には、変位を利用する変位式、力を利用する力平衡式その他、電気信号を発信するもの、物理現象を利用するものなどがある。この内、ブルドン管圧力計は、一般的に、変位を利用する圧力計である⁽⁹⁾。

圧力計も電子化時代を迎え、電子式圧力計（デジタル式）（図 2.3）が開発された。



図 2.3 デジタル圧力計（左は丸形、右は角形）
長野計器（株）提供

しかし、人間が直視して機械装置の操作や監視を行う場合は、デジタル表示よりアナログ表示が格段に適しており、さらに、機械式圧力計は電子式に比べて、精度は若干劣る（精密級は別）ものの、電源を必要としない、取扱やメンテが容易、ノイズなどの電氣的影響を受けない、コストも低い、などの理由から、産業界で特に多用されている。

2.2 圧力計測の歴史

次頁に、圧力計技術開発の主要年表を掲載する。

ここでは、圧力計測の歴史について、(1) 16 世紀～1896 年頃（圧力計誕生から国産化開始前まで）、(2) 1896 年頃～1945 年頃（圧力計国産化開始から第二次世界大戦後まで）、(3) 1945 年頃～1990 年頃、(4) 1990 年頃以降、の 4 つの時代に区分して述べる。

(1) 16 世紀～1896 年頃（圧力計の誕生から国産化開始前まで）

16 世紀の近代科学が始まる前、「人間が圧力の現象を利用して作った最初の道具は、はれもののうみを吸い出す“吸いふくべ”であったかも知れない」、また、「紀元前 150 年の頃、消化ポンプが作られた」、などの記事⁽¹⁰⁾があるが、これらを具体的に示す資料は見出されていない。本稿では、圧力が近代科学として実験によって明らかにされた 16 世紀以降について取り上げて述べる。

圧力を科学の対象として捉え、世界で初めて研究実験を行ったのは、ガリレオ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ (Galileo Galilei、1564–1642 (伊))（図 2.4）である。

「近代科学の父」と呼ばれるガリレオは、当時、知

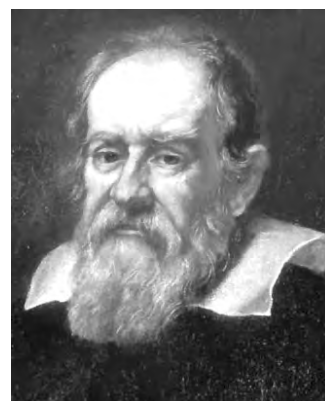


図 2.4 ガリレオ (Justus Sustermans 1636)

られていなかった大気の性質を発見した。この発見はトスカナ大公コシモ・デ・メディチ 2 世お抱えの技術者たちによる研究成果とされる。その研究とは、「約 50 フィート下方から桶に水を汲み上げる特殊な吸い込みポンプをつくる」というものであった。彼らはすでに経験によって、「水面からほぼ 28 フィート以上の高さにある桶にはどうしても水を汲み上げることができない」という事実に気付いていたが、当時、普及していた考えは「自然は真空を嫌う」というものであった。ガリレオは、大気に関する実験をいくつか試みたが、ついに科学的な説明はできず、自分の疑問を解決できなかった。なお、これとは別に、ガリレオは、同時期の 1586 年、『水圧天秤』の考案を発表しているが、その詳細については不明である。

ガリレオは、自分の弟子で筆記係でもあったトリチェリ⁽¹³⁾に研究の示唆を与えた。これを受けてトリチェリは何度もポンプの実験を行った。その結果、「大気には重さがあり、その重さは水柱の重さと大気の重さが釣り合う高さ」と推論した。より重い液体であれば、それに比例して液柱も低くなると彼は考え、一端を閉じたガラス管の中に水銀を入れ、それを水銀の入った鉢に逆さに立てて試してみた。この実験により、トリチェリは自分の推測の正しさを確信した。これが水銀気圧計の発明であり、そのため、トリチェリは「真空の父」と呼ばれる。真空の単位『トル：Torr』は、このトリチェリの功績から名付けられたものである。トリチェリは、閉じたガラス管の上部に真空をつくることに成功し、世界で初めて科学的に真空の存在を証明した。その実験結果は 1643 年に発表され、ヨーロッパの至るところで、その後、実験が行われるようになった。

この実験でもっとも著名な人物は、フランスの聖職者かつ学者で、天賦の才に恵まれたブレーズ・パスカル⁽¹⁴⁾ (Blaise Pascal、1623–1662)（図 2.5）である。

彼はさらに高度な実験を行った。「高く登れば登るほど大気の圧力は低くなるはず」と考えたパスカルは、

表 2.1 圧力計技術開発の主要年表（戦前から創業している圧力計メーカーの一部のみ記載）

西暦	和暦	内容	関連事項
1586	天正14	(伊)ガリレオ、水圧天秤の構想を発表(詳細不明)	
1643	寛永20	(伊)トリチェリ、水銀気圧計を発明	
1647	正保4	(仏)バスカル、水銀液柱形気圧計(現在の水銀液柱形圧力計を用いて、大気圧の存在を科学的に証明)	
1702	元禄15		(英)ロバートフック、ひげゼンマイを発明(その後、圧力計の内機に採用)
1790	寛政2	(スコットランド)ワット、インジケータの原型を製作。これを使用しイギリス産業革命の主力となった、蒸気機関の実用化に成功	
1801	寛政13/享和1	(英)トレビシック、蒸気自動車を発明	
1804	享和4	(英)トレビシック、蒸気機関車を発明	
		1800年代初頭(仏)フォルタン、フォルタン水銀気圧計を発明、この気圧計は19世紀において標準とされた。	
1840	天保11	(独)シュツツェル、初めて重錘形圧力計を製作(ロシア向け)	
1844	天保15/弘化1	(仏)ビディ、アネロイド気圧計を発明	
1849	嘉永2	(仏)ブルドン、ブルドン管圧力計を発明	
1856	安政3	江戸幕府がオランダより購入した軍艦威臨丸に圧力計(ブルドン管圧力計と推定される)が装着されていた。日本に入った最初の圧力計	
1860-63	万延1-4	(英)ブルー(最初の特許取得者)他4名、重錘形圧力計の特許を取得	
1892	明治25	現(株)草場計器製作所大阪で創業	圧力計メーカー(以下※印工業会現会員の一部のみを記す)
1896	明治29	和田嘉衛・東京小石川区に和田計器製作所設立、国産初のブルドン管およびブルドン管圧力計の開発に成功	ブルドン管を板から製作
1899	明治32		和田式エンジンインジケータ開発特許取得(和田計器)
1902	明治35		和田計器(合)東京計器製作所に改組(現、東京計器(株))
1903	明治36		圧力試験機開発(東京計器)
1909	明治42		大阪市西区で木幡計器製作所創業(現、(株)コバタ計器製作所)各種圧力計の製造販売
1911	明治44		国産第1号蒸気機関車が製造される。明治後半頃より国産蒸気機械(船舶、鉄道、ボイラー、産業機械など)が量産され、ブルドン管圧力計、各種圧力計、エンジンインジケータなどが国産化され、わが国の近代工業化、経済成長発展に大きく貢献する
1914	大正3		3本ローラー式ブルドン管成形機開発(東京計器)
1916	大正5		大阪市港区で森計器製作所創業・計量器、試験機、溶断機、酸業圧力計、ガス器具の輸入製造販売開始。昭和19年旭計器工業(株)に商号変更、各種圧力計の製造販売、現在に至る。
1920	大正9	度量法に計圧器が規定され、全数検定が開始される	ブルドン管圧力計の全数検定開始
1924	大正13		2000キロ重錘型圧力計の開発(東京計器)
1930	昭和5	JES規格にブルドン管圧力計が規定される	
1937	昭和12	4月6日、日本圧力計工業組合創立(現日本圧力計温度計工業会の前身)創立時会員13名(京浜地区8名、大阪地区5名)・現在会員36名	
1948	昭和23	企業再建整備法により、(株)東京計器製作所を解散、直ちに(株)東京計器製造所と(株)長野計器製作所(現長野計器(株))設立	
1951	昭和26	計量法公布、度量衡法廃止・計圧器は圧力計と名称を変え継承 ブルドン管圧力計の全数検定は昭和26年まで。その後規制緩和、自主検査等進展、現在検定は車両用などわずかである。	圧力計部門を長野計器に継承し現在に至る 検定の主体は、度量衡法施行以来ブルドン管圧力計である
1952	昭和27	JIS規格が制定され、JES廃止、ブルドン管圧力計はJISに継承	計量法に、圧力計の検定に使用する基準圧力計が規定される
1953	昭和28		F1型インジケータの開発(長野計器)
1954	昭和29		3000キロ分銅式標準圧力計開発(東京計器)
1955	昭和30		完全密閉形圧力計開発(東京計器)
1960	昭和35		φ250(4000キロ)圧力計の開発(長野計器) 1960年代からブルドン管を板から管に変更。ブルドン管その他の圧力計製作の機械化、自動化開始(圧力計メーカー各社)
1963	昭和38		原子力用圧力計の開発(長野計器)
1965	昭和40		IP3形(7000キロ)重錘型圧力計、7000キロ圧力計の開発(同上)
1966	昭和41		IP3形1万キロ重錘型圧力計、1万キロ圧力計製品化(同上)
1967	昭和42		エアーストンゲージ、1万5000キロ超高压重錘型圧力計、1万5000キロ超高压圧力計の開発(同上)
1979	昭和54		デジタルサーボマンメータの開発(同上)
1982	昭和57		CQ83車載用圧力スイッチの開発(長野計器)／国産乗用車初のABS(アンチロックブレーキシステム)にブルドン管が採用された(本田技研工業(株)開発車)
1983	昭和58		蒸着形半導体ひずみゲージ式圧力センサの開発(長野計器)
1984	昭和59		GC80デジタル指示計(長野計器)、各社デジタル圧力計開発
1990	平成2	計量法改正、圧力標準供給制度、圧力の国家標準が規定され、液柱形圧力計と重錘形圧力計によって、高精度の圧力標準がえられる。精度は、「不確かさ」で扱われる	計量法は、昭和26年に公布されて以来しばしば改正される すべての圧力計・圧力機器の校正は、国家標準に連鎖している
1992	平成4	計量法改正、圧力単位を国際単位(SI単位)のパスカルPaに統一	Pa単位以外の各種圧力単位は、非SI単位となり使用禁止となる
1993	平成5	JIS規格改正、圧力単位をパスカルPa単位に統一	新計量法公布。これまでの計量法は、すべて改正廃止される
2000	平成12		計量法は平成5年11月1日施行。この日を計量記念日とする 世界最高性能水準の1GPa重錘形圧力標準器開発(長野計器)

1647年、義兄のフロレン・ペリエに、オーヴェルニュにある標高4800フィート(1463メートル)のピュイ・ド・ドームの頂上まで水銀気圧計をもって登るように

頼んだ。ペリエが登って行くにつれ、水銀柱の高さは着実に下がっていき、頂上では山麓よりも3インチほど低くなった。こうして大気の圧力は、高度に反比例



図 2.5 パスカル

することが確認された。パスカルは、漠然としていた大気圧の存在を科学的に明らかにしたのだった。パスカルは「流体の父」と呼ばれ、国際単位 SI の圧力単位『Pa: パスカル』にその功績を称えて採用された。パスカルは、水銀の代わりに赤ワインを使った実験も行った。海面における大気は、一平方センチ当たり 14 から 15 ポンドであった。パスカルの死後に出版された「流体のつりあいについて」にある『パスカルの法則』は、彼が 1648 年頃に発見したものと言われる。トリチェリが発明し、パスカルが実験に用いた「気圧計」（水銀式気圧計）は、その後、「高度計」「血圧計」「液柱形圧力計（産業分野）」として、また、圧力基準器、圧力標準器として使用され、現在に至る。

『重錘形圧力計』は、1840 年にシュツェル（ドイツ）がロシア向けに作ったものが最初と言われる。特許上に『重錘形圧力計』が登場するのは 19 世紀後半で、1860 年から 1863 年にかけて、イギリスでは 4 人が特許を取得した。最初がブルーで、その他 3 名は、いずれも同原理の構造改良を行い、特許を取得している。

1769 年、ワット（図 2.6）は、蒸気機関の実用化に成功し、英国の産業革命の発展に多大な貢献をした。

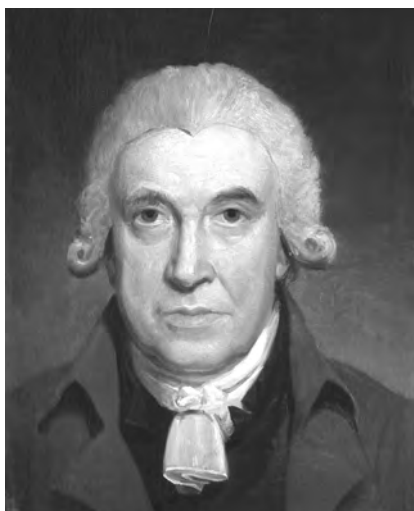


図 2.6 ワット⁽¹⁵⁾

ワットが蒸気機関の改良に着手したときには、蒸気機関は、イギリスをはじめヨーロッパの多くの技術者たちによってすでに開発・改良が重ねられていたが、いずれも試作の域を出ていなかった。そこで、ワットは自身で考案した『ワット・インジケータ』圧力計を製作した。ワットは晩年、「圧力計がなければ、（効率の高い）実用的な蒸気機関の開発はできなかった」と、述懐している。

ワットの実用化した蒸気機関は据付式の巨大なもの（図 2.7）で、圧力も低かった。



図 2.7 1817 年のワットの蒸気機関（英バーミンガム）
©Chris Allen

ワットは高圧蒸気機関の開発も試みたが、蒸気釜の爆発事故が多発したため、高圧蒸気機関の研究開発を厳重に禁止した。しかし、晩年になると、若い技術者たちによって秘密裏に研究が再開され、小形で移動できる出力の大きな蒸気機関が開発された。リチャード・トレビシック（英）は、1801 年に蒸気自動車を、1804 年に蒸気機関車を発明（図 2.8）し、その試作車を実際に走らせた。



図 2.8 1804 年にトレビシックが発明した蒸気機関車のフルスケールレプリカ（イギリス国立ウォーターフロント博物館所蔵）©Chris55

しかし、実用化にまで至らず、トレビシックは身を引いてしまった。その後、多くの技術者たちがさまざまな機関車の開発・改良を行い、また、蒸気船なども発明され、実用化が始まった。機関の動圧データを記

録採取するインジケータには圧力目盛がなく、構造的に静圧測定には向かないため、当時の蒸気機関（静圧測定）には、水銀液柱式圧力計が用いられた。

エンジンインジケータ（指圧計、指圧器ともいう）は、1782年にワットが特許を取得した新式蒸気機関とともに発展した。1790年頃、ワットは蒸気圧とばねの間で平衡状態を保ちながら運動するピストン・シリンダ機構の装置を製作した（図2.9）。ワットの協力者、J. サザン（John Southern）は、ピストンに連結されていたポインタを、すぐにペンと平面記録紙に置き換えて改良を行った。その装置はブルトン・ワット工場で約30年間秘密裏に扱われ、1822年に初めてイギリスの出版物で公開された。

1830年頃、J. マークノート（John McNaught）は、この平面記録紙を回転ドラムに置き換えた。フランスのA. モラン（Arthur Morin）とP. ガルニエ（Paul Garnier）は、連続密閉線図を記録できる方式や単位時間周期になされた仕事を測定できる方式をインジケータに導入した。1862年、アメリカ人のリチャード（C. B. Richard）は、運動部品の慣性とばね振動を大幅に軽減した初めての機械インジケータを発明した。

その他、多くの発明家たちによって、自己周波数（固有振動数）を高める努力が続けられたが、300Hzを超えることはできず、その後も先進工業国で開発・改良が行われた。

近年では、光学的要素や電子的要素が組み込まれているものが開発され、自己周波数が大きくなった。インジケータの歴史は性能改善の歴史でもある。イギリス人技術者サーストン（R. H. Thurston）は19世紀終盤に、「インジケータは技術者の聴診器であり、それを自己周波数の変遷に見ることができる」として、以下のように言及した。

「ワット＝サザン・インジケータは6Hz、機械的増幅を利用したインジケータが150Hz、マイクロインジケータ400 Hz、マノグラフ25,000 Hz、ピエゾ型（圧電型）は、第二次世界大戦以前には、50,000 Hzで、1970代には150,000Hzにまでなった。」（以上は、海外文献によるもので、日本の実情を示したものではない）。

インジケータは、近代工業・科学技術の発展とともに、熱機関、蒸気機関（往復ピストン式内燃機関）、ジェットエンジン、空気圧装置、大砲、小銃など、ガスや蒸気が圧力下で機械的エネルギーを発生・運動するあらゆるエンジンで利用され、その改良進歩に大きく貢献した。

中でも、機械式インジケータは、電気を必要とせず、小形で運搬や取り付けも容易で、測定も簡単なことが

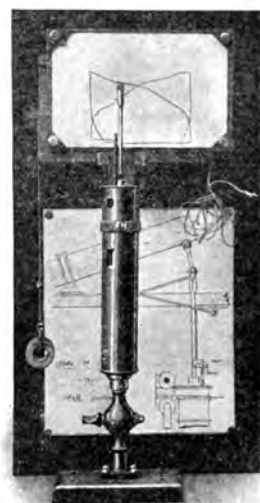


図2.9 ワットが開発したワット・インジケータ（平面記録）⁽¹⁶⁾

ら世界中で普及した。

ブルドンは、1849年に『ブルドン管圧力計』を発明し、フランスで特許を取得した。その後、ブルドンはイギリスでも特許を取得した。『ブルドン管圧力計』は急速に各国に広まり、それまで使用されていた『液柱形圧力計』から次々と置き換わっていった。ブルドン管圧力計は液柱式に比べ小形で、機械装置への取り付けも容易であり、しかも水銀が吹きこぼれる心配もなく、圧力も高く設定することができた。また、アナログ指示計のため、前述した様に、人間の直読、操作には馴染みやすいなど、『ブルドン管圧力計』の発明は画期的であった。

わが国に圧力計が登場したのは、「幕府が長崎海軍伝習所の練習艦として所有し、活躍した軍艦咸臨丸（図2.10）（1856年オランダで建造購入）にアネロイド圧力計が装着されていた」との記録から、幕末の頃と考えられる。咸臨丸は洋式のスクリューを装備した初の軍艦で、排水量625トン、100馬力の蒸気機関をもち、勝海舟を艦長に迎え、ジョン万次郎や若き福沢諭吉を乗せた幕府の軍艦として、初めて太平洋を往復した。その圧力計は、ブルドン管圧力計であったと推測される。

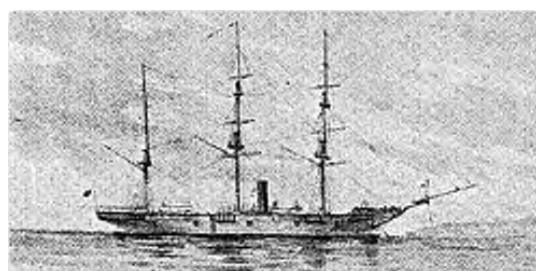


図2.10 咸臨丸伝『1860年 桑港碇泊中の咸臨丸』⁽¹⁷⁾

明治時代に、政府は近代工業化政策により、外国から資金を借りて、先進工業国から圧力計の装着された蒸気機械（軍艦、船舶、汽車、蒸気ハンマーなど）を数多く輸入した。外国の軍人や技師による指導の下、1887（明治 20）年頃、日本人によるこれら外国製圧力計の点検、修理が始まり、明治 30 年代には、艦船用として初めて外国製の圧力計そのものが輸入された。

（2）1896 年頃～1945 年頃（圧力計国産化開始から第二次世界大戦まで）

明治 29 年（1896 年）5 月に、和田嘉衡は東京の小石川（現文京区）に和田計器製作所（現東京計器（株）の前身）を設立した。初代社長を務めた和田はブルドン管圧力計の研究開発を始め、最初の国産圧力計を製作したとされている。



図 2.11 国産化された初期の圧力計（株）東京計器製作所（現、東京計器（株））製作 長野計器（株）提供

しかし、今回の調査では、これ以前、すでに圧力計が国産化されていたとする記事⁽¹⁸⁾の存在を確認した。以下にその原文の一部を掲載する。

「... わが国においては、1887（明治 20）年頃からブルドン管を利用した圧力計が製作されはじめ、...」

この記述はブルドン管研究の第一人者として活躍した人物による記事であるため、筆者も当時の資料を丹念に調査した。しかし、現在のところ、和田が圧力計を初めて国産化したとするのが正しいと考えられる。明治 20 年頃と言えば、前述したように、外国製ブルドン管圧力計の点検やメンテがようやく始まった段階であることから、国内でブルドン管や内機あるいは圧力計を製作していた可能性はきわめて低い。さらに、これまでこの事実の信憑性を裏付ける資料は確認されておらず、また、二次情報に基づいたわが国のブルドン管圧力計の創生期についての文献には不正確な記述も多い。それに対し、社史（東京計器）に残された当

時の記録の方が信頼性が高く、やはり和田がわが国で初めてブルドン管圧力計を国産化したと考えるのが妥当である。

明治の後半には、それまで輸入していた蒸気機械の国産化が始まった。1911（明治 44）年には、第 1 号国産蒸気機関車がつくられたが、当時の工業技術が未熟であったため、この機関車の部品は殆どが輸入品であった。

その後、日清戦争（1894-95（明治 27～28））、日露戦争（1904-05（明治 37～38））に大勝した日本は、工業の近代化と富国強兵に一段と力を入れて行った。

大正時代に入ると、発電所、電気機関車、電車、バス、機械装置などが輸入され、それらの機械が盛んに国産化されるようになった。経済は 2 桁の高成長を続け、圧力計の生産量や圧力事業者も急速に増えたが、その大半は中小、零細企業であった。蒸気機関車、電気機関車、電車をはじめ、船舶などに使用されていた圧力計は、人命にかかわる重要保安部品として、1920（大正 9）年、度量衡法に『計圧器』として規定され、国家による全数検定が開始された。（表 4.15 参照）

電気式圧力計、圧力発信器などの研究は昭和時代の 1930 年代までにはすでに行われていたが、安定した性能が得られなかったため、戦前の圧力計は機械式であった。

1935（昭和 10）年頃になると、航空機に搭載する速度計、高度計など計器の国産化が始まった。構造はアネロイド形の機械式精密計器で、弾性素子には、ペローズ図 3.14 あるいはチャンバ（図 3.18、図 3.19）が用いられている。1990 年以降の大型旅客機には電子化された計器が搭載されているが、中小型機には、今なお、約 70 年前と同じ構造原理の計器が製作されている。航空用計器には、一般産業用計器に比べると、非常に高い信頼性が求められる。素材となる弾性素子は、年単位の枯らし（自然に放置して素材のひずみを除去すること）が行われて加工された後、機械的エージング処理が施されて製品化される。また、計器は熟練技能者と技術者により丁寧に作られ、諸試験が行われる。現在、国内の航空計器メーカーは国内需要が防衛省向けなど、きわめて少ないため、世界最大市場であるアメリカに計器を輸出している。日本人の緻密で繊細な伝統的な匠の技によりつくられた計器は、アメリカはもとより、他の国の追従を許さないほどの卓越した品質を誇る。

（3）1945 年頃～1990 年頃

戦争で壊滅的打撃を受けたわが国の産業は、朝鮮戦

争特需（1950（昭和 25）-1953（昭和 28）年）で息を吹き返した。廃墟から立ち上がった日本は不況を経験しながらも、高度経済成長期（1955-1977）の到来を迎えた。

戦後、計量法に沈鐘式圧力計が規定され、流量計測分野で盛んに用いられたが、液体を使用した理科の実験器具のようなこれらの圧力計は、取り扱いも専門的で、重量も大きいものがあり、測定に時間もかかることから、当時の機械装置産業には用いられることなく、1970 年代には完全に消えて行った。現在、これらの物理実験用各種圧力計の痕跡は、当時の工学書などにわずかに見られるに過ぎない。

また、戦後、圧力計メーカーは、いち早くブルドン管その他の弾性素子を用いた電気式圧力計（電気式発信器と受信器）の研究開発を行って製品化した。しかし、1980 年代以降半導体を用いた液晶表示のデジタル式圧力計の開発と伴に、電気式圧力計の製造は廃止された。

(4) 1990 年頃以降

高度経済成長期には技術開発が盛んに行われ、新用途向けの圧力計が次々と誕生した。しかし、電子化、コンピュータ化されて久しい現在においてもなお、産業界でもっとも広く使用されているのは古くからあり、今も用途を広げているブルドン管圧力計（各種圧力計の 90%以上といわれている。）である。

一方、電子化されたデジタル式圧力計や圧力機器は、人間が介在する必要のないコンピュータシステムに使用され、両者は用途を異にしてそれぞれ発展している。

1980 年頃には、圧力計メーカーが商品化した工業用小形圧力センサが市場に登場し、先進工業国に輸出されている。コンピュータシステムで駆動する自動車をはじめ、機械装置、プロセス制御、自動化機械など、その用途は拡大しており、現在、長野計器（株）では、圧力センサは売上ベースですでにアネロイド形圧力計

と肩を並べるまでに成長しているが、本稿のテーマから外れるため、ここでは説明を省略する。

2.3 圧力単位⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾

圧力単位は、すべての圧力計、圧力計測機器（以下圧力計という）の基本としてもっとも重要である。

圧力単位には歴史的にさまざまな単位が使われた。

日本では度量衡法（前身の度量衡取締条例公布 1875（明治 8）年を経て）の圧力単位は尺貫法、メートル法、ヤードポンド法、その他が法規改正されながら使用されてきたが 1993 年、新計量法の制定にあたり国際単位である SI 単位（パスカル：Pa）に統一改正された。

JR をはじめとした各鉄道会社は、運転士が長年見慣れている単位（Kg/cm²）からの切り替えに対し、誤認の恐れがあるとして慎重を期し、切り替え猶予期間、最長 7 年の歳月をかけて全運転士の訓練を実施した。また、国内旅客航空会社からは、この国内法を外国の航空機メーカーにも適用してほしいとの強い要望が出された。これは、統一化されていない各国航空機の圧力単位がパイロットの誤認を招くとの理由からだった。しかし、所轄官庁は外国の航空機メーカーへの国内法の適用が難しいとして、各国の Pa 単位への移行の動向を調査して対応するとの結論に留めた。圧力単位の改正時には上記のような混乱があった。

圧力計メーカーにとっても、この単位の統一改正は、長年蓄積し使用していた数多くの種類の単位の圧力基準器、圧力計、目盛板原版、部品、工程設備などの大量破棄や改造、新たな Pa 単位への整備など、業界の長い歴史の中できわめて大きな負担を強いられた出来事であった。

(1) 圧力単位の変遷

圧力単位は SI 単位に統一されたが、それまで圧力はさまざまな分野で利用されていたため、MKS 系、重力系、液柱系、その他、使い慣れた単位が数多く存在

表 2.2 圧力計に用いられる圧力単位の変遷⁽²¹⁾

規格の制定・改正年月	1930 年 (昭和 5 年 12 月)	1959 年 (昭和 34 年 10 月)	1999 年 (平成 11 年 11 月)	2007 年 (平成 19 年 11 月)
規格	JES 第 118 号計壓器 制定 (昭和 28.3.28 に JIS 規格制定・引き継ぐ)	JISB7505 改正	JISB7505 改正	JISB7505-1 制定
圧力の単位 (目盛り板に単位記号を表記する)	kg/cm ² (正のゲージ圧) mm または cm (負のゲージ圧)	kg/cm ² (正のゲージ圧) cmHg (負のゲージ圧)	パスカル (単位記号 Pa) (SI 単位)	パスカル (単位記号 Pa) (SI 単位)
圧力計に使用する単位	真空計および連成計の真空部は、水銀柱の高さをもって示す	真空計および連成計の真空部は、水銀柱の高さをもって示す	メガパスカル (MPa) または キロパスカル (kPa)	メガパスカル (MPa) または キロパスカル (kPa)

表 2.3 SI 単位と非 SI 単位（圧力関係）⁽²²⁾

圧力の単位	Pa	kPa	MPa	bar	kgf/cm ²	atm	cmH ₂ O mmH ₂ O cmHg mmHg	mmHg または Torr	psi lb/in ²
備考	主な単位への換算率 $1\text{Pa} = 1\text{N} / \text{m}^2$ $1\text{kPa} = 0.1\text{N} / \text{cm}^2$ $1\text{MPa} = 1\text{N} / \text{mm}^2$			上記単位は、1993 年（平成 5 年）に計量法が全面的に改正、施行され計量単位の SI 単位系への移行が行われた。 改正後は、非 SI 単位を使うことはできない。しかし、非 SI 単位は、上に記載されていないものも含めて、例外的に国防や航空製品などの製品の輸入の際には、経済産業省の許可を得る必要がある。血圧は非 SI の mmHg が使われている。					

太線で囲んである単位が SI 単位、その他は非 SI 単位。

表 2.4 圧力の換算表⁽²³⁾

	Pa	bar	kgf/cm ²	atm	mmH ₂ O	mmHgおよびTorr
圧 力	1	1×10^{-5}	1.01972×10^{-5}	9.86923×10^{-6}	1.01972×10^{-1}	7.50062×10^{-3}
	1×10^5	1	1.01972	9.86923×10^{-1}	1.01972×10^4	7.50062×10^2
	9.80665×10^4	9.80665×10^{-1}	1	9.67841×10^{-1}	1×10^4	7.35559×10^2
	1.01325×10^5	1.01325	1.03323	1	1.03323×10^4	7.60000×10^2
	9.80665	9.80665×10^{-5}	1×10^{-4}	9.67841×10^{-5}	1	7.35559×10^{-2}
	1.33322×10^5	1.33322×10^{-3}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1.35951×10	1

する。その主要な二つの系統は、インチ・ポンド系とキログラム・メートル系である。表に圧力単位の主な変遷を示す。なお、JIS、JES 規格については、第 4 章で詳しく述べる。

(a) 圧力計の関連法規における単位の変遷

圧力計の単位にはさまざまな法規が関係しているが、歴史的には、度量衡法（現計量法）と JES 規格（現 JIS）がもっとも重要であり、以下にその単位の変遷を述べる。

① 度量衡法時代⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾

1919（大正 8）年に度量衡法（法定計量と呼ばれ罰則規定がある）が改正され、力の『メガダイン』、仕事の『ジュール』、効率の『キロワット』、『密度』（1 気圧で 4℃の水の密度）、温度の『度』とともに、圧力の『パール』が追加された。同時に、計圧器（圧力計）は検定対象となり、翌年から全数検定が実施された。

② 計量法時代

1951（昭和 26）年に『度量衡法』は廃止され、同年 6 月 7 日に『計量法』が公布、翌年 3 月 1 日に施行された。『計圧器』の名称は『圧力計』へと変更された。

『計量法』第 5 条 6 号で、圧力の計量単位は『パール』『重量キログラム毎平方センチメートル』『水銀柱メートル』および『気圧』へと改正されたが、その後も計量法はしばしば改正され、1993（平成 5）年の大改正

では、法定計量単位はすべて国際単位（SI）へ統一された。国際単位への単位の切り替えは、猶予期間（圧力は最長 7 年）の中で順次実施された。その後、それまで使われていた圧力単位は、非 SI 単位となり使用できなくなった。

(b) 工業製品規格における圧力単位の変遷⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾

① JES 時代

1930（昭和 5）年、『計圧器』としての日本標準規格「JES 第 118 号類別 B28」が工業品規格統一調査会によって制定された。計圧器とはブルドン管圧力計を指し、その技術的仕様が規定された。

圧力の単位は、圧力計には『kg/cm²』、真空計には『mm または cm（水銀柱の高さを示す）』、連成計の圧力部には『kg/cm²』、真空部には『mm または cm（水銀柱の高さを示す）』などが JES に規定された。

② JIS 時代

1953（昭和 28）年に JES は廃止され、日本工業規格『JIS B 7505（ブルドン管圧力計）』が日本工業標準調査会によって制定された。JES で用いられた『計圧器』の名称は『圧力計』へと変更されて JIS に継承され、圧力計の構造、技術基準、試験条件などが規定された。

圧力単位は、圧力計には『kg/cm²』、真空計には『cmHg』、連成計の圧力部には『kg/cm²』、真空部に

は『cmHg』に決められた。

その後、JIS はしばしば改正され、1999（平成 11）年の改正で、圧力の単位は前述のようにパスカル（単位記号 Pa）に統一され、ブルドン管圧力計には、メガパスカル（MPa）またはキロパスカル（kPa）が使用されることとなった。

2007（平成 19）年には JIS B 7505 ブルドン管圧力計は廃止され、アネロイド型圧力計 JISB7505-1-第 1 部：ブルドン管圧力計が制定された。

2008（平成 20）年には、「アネロイド型圧力計-第 2 部：取引又は証明用-機械式」と「アネロイド型圧力計-第 3 部：取引又は証明用-電気式」の 2 つが規定され、その圧力単位に、パスカル（Pa）又はニュートン毎平方メートル（ N/m^2 ）を使用、ただし、バー（bar）を使用してよいこととなった。

2.4 圧力基準と圧力標準

2.4.1 圧力基準と圧力基準器の検定

(1) 圧力基準

圧力基準の取り方について以下に説明する。

気圧より低い圧力）をゲージ圧力で表すとき、これを真空圧（真空圧力）という。

③差圧圧力

二つの圧力の差で表される圧力で、大気圧以外の任意の圧力を基準にとって表した圧力。

④その他

航空分野・気象分野の圧力計（高度計、気圧計）は絶対圧力基準だが、目盛の基準が産業用圧力計とは異なる。血圧計は大気圧基準で目盛は mmHg（非 SI）である。航空計器には海面高度基準、飛行機ごとに決められた飛行高度基準などがある。

(2) 圧力基準器の検定⁽²⁸⁾

1920 年の度量衡法に計圧器（ブルドン管圧力計その他）の検定制度が導入されたとき、圧力計の検定基準（公差その他）が定められ、次の 2 つの圧力計が用いられた。

①基準液柱形圧力計（低圧用）

②基準重錘形圧力計（中・高圧用）

すべての圧力計は、この 2 つの圧力基準器によって検定が行われた。戦後、度量衡が廃止されて計量法に

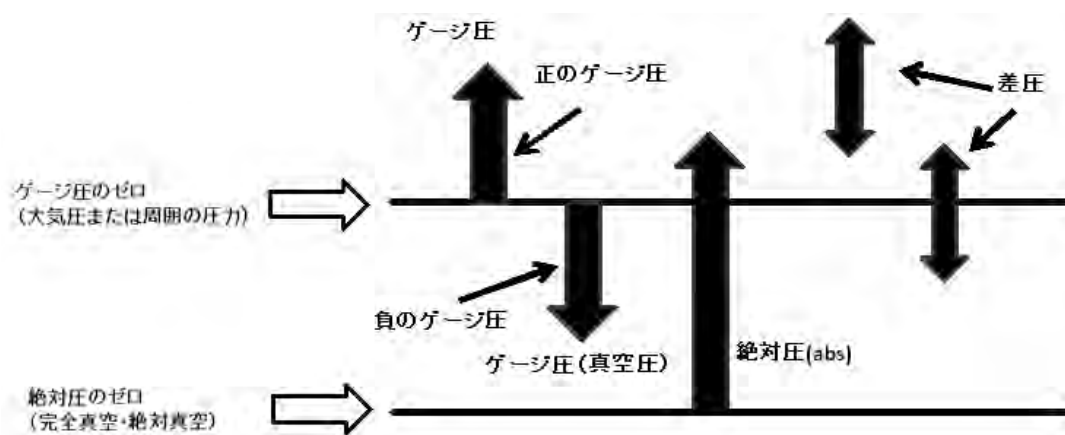


図 2.12 圧力基準の取り方

①絶対圧力

完全真空（絶対真空）を零基準にとって表した圧力。絶対圧力であることを示す場合に、ISO では、単位記号の後に符号“abs”あるいは“a”をつけることを奨励している。なお、大気圧より低い圧力を絶対圧力で表すとき、これを真空度という。abs は、“absolute”の略で、“a”はその頭文字である。

②ゲージ圧力

大気圧を基準にとって表した圧力。一般にアネロイド形圧力計は、ゲージ圧力でつくられる。その場合には、表示符号はつけない。なお、負のゲージ圧力（大

基準圧力計が規定された。規制緩和が始まり、計圧器は圧力計へと名称を変えた。そして、すべての計圧器を対象とした検定は、年々その数を減らし、近年では、鉄道車両用圧力計など、わずかしが行われていない。

圧力計の検定に用いる前述の 2 つの基準圧力計は、それぞれ圧力範囲ごとに製作される。圧力計メーカーでは、この 2 つの基準圧力計を、圧力計の検定とは別に、圧力範囲ごとに数多く製作販売し、工場や施設に配備して、一般圧力計、圧力機器の校正に使用し、現在でも、精度的に対応できる一般圧力計の検査や校正に用いている。なお、高度経済成長期以降、圧力計の

高圧化、高精度化が進み、それに対応する圧力標準供給制度が規定運用されている。

また、わが国の圧力標準の最高レベルのものは、国家標準として、(独)産業技術総合研究所(NMIJ)で研究開発が続けられている。

図 2.13 の液柱式標準圧力計は、基準液柱形圧力計よりはるかに高精度の圧力計である。光波干渉原理を応用し、U字管の水銀液柱の液面の変化を精密に測定できるようにしたものである。

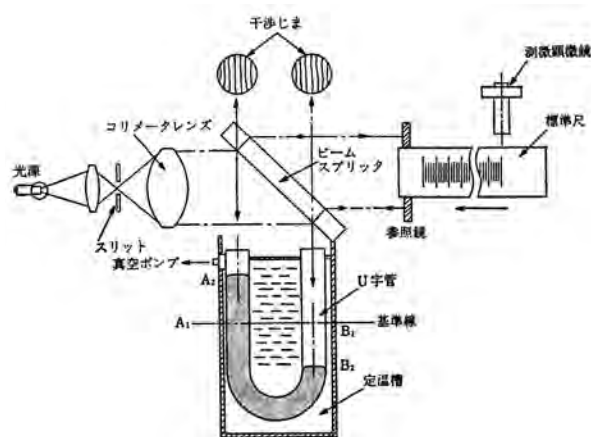


図 2.13 液柱式標準圧力計の原理図⁽²⁹⁾
(標準器は NMIJ で保管)

以下に、2つの圧力計の検定について述べる。

①基準液柱形圧力計の検定

基準液柱形は、詳細に規定されたスケール目盛などで検定される。

一例を示すと、最大測定圧力は 220kpa 以下（計量法制定時 2000mm 以下）公差は圧力測定範囲と 1 目盛値で異なるが、400 分の 1 または 1 目盛の値（同制定時と略同じ）である。液は、水銀または水で、スケールには熱膨張係数が補正され、20℃で正しい値となるよう目盛が付けられる。スケールには『水銀用（または水用）、20℃』などと表示される。



図 2.14 液柱形圧力計 PM26-43 長野計器（株）提供

測定圧力 P （以下圧力という）と液柱の高さ h の関係は次式で表される。

$$P = \rho gh \quad (3)$$

ここに、 ρ は液の密度、 g は重力加速度、 h は液柱の高さである。

検定では国内における重力加速度のばらつきが 0.2% の範囲にあることから、スケールは、精度上、問題がないとして、地域の補正はしない。スケールは、一般に黄銅などの金属でつくられており、温度による熱膨張係数が計算、補正される。

②基準重錘形圧力計の検定

圧力範囲が広いと、圧力を区分して種類がつけられている。

検定は、最大限界圧力 250Mpa 以下、公差 500 分の 1、各被検定基準重錘形圧力計ごとに、ピストンの面積と重錘の重量を実測、計算して、他の付帯検査項目とともに、合否判定される。

重錘形圧力計の測定圧力 P （以下圧力という）は、次のような式と測定条件によって検定される。

ピストンとシリンダ部において、ピストンの底部に生ずる圧力によって、ピストンと重錘が浮揚し、平衡状態にあるとき、圧力 P （ゲージ圧）は、次式で求められる。

$$P = W/A \quad (4)$$

ここに、 W はピストンと重錘の合計重量

A はピストンの有効面積

検定では、ピストンを含む重錘の重量を精密天秤で測る。

当初、上級天びんの測定精度は、重錘に対して問題のない精度（推定 0.1% 以上）で測定できていた。また、重力加速度は場所によって異なるが、液柱形同様の理由で、重錘形においても場所の補正は考慮されない。測定はゲージ圧である。

ピストンの面積 A は、ピストンの直径 d をマイクロメータで測り、次式により求める。

$$A = \pi (d/2)^2 \quad (5)$$

$$d = 2 \sqrt{A/\pi} \quad (6)$$

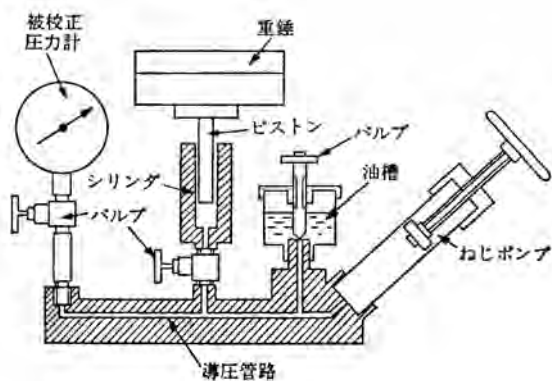


図 2.15 重錘形圧力計の構造⁽³⁰⁾



図 2.16 重錘形圧力計 長野計器 (株) 提供

2.4.2 圧力標準⁽³¹⁾と圧力標準供給体制

(1) 圧力標準

前項では圧力基準について述べた。1920 年に度量衡法で規定された圧力基準は、戦後の JIS や計量法に引き継がれ、基準圧力計などの圧力基準として、圧力計メーカーに普及した。この考え方は、「精度＝真の値－誤差」に由来する。しかし、圧力基準を定めても、つねに誤差(器差)が伴い、真の値はつかめない。一方、戦後、計量分野の国際化が始まると、精度も非常に高くなったため、標準という考えが一般に用いられるようになった。誤差(精度)のばらつきの範囲を確率的な「不確かさ⁽³²⁾」という表現で示すことが決められた。

以下に計量標準の概要について説明する。

計量法では、圧力や質量、電圧のような物理量の計量計測を行うときに計量計測器の目盛調整(校正)を行う基準となるものを「物理標準」、濃度のような化学的な量の計測を行うときに計測器の調整を行う基準となる物質を「標準物質」と呼ぶ。一般には、物理標準、標準物質を合わせて「計量標準」と呼び、圧力計測を行うときに基準となるものを「圧力標準」と呼ぶ。

計量標準は国家計量機関が定め、その標準は、各階層を通じて各企業、関係機関、エンドユーザーに供給

される。表 2.5、図 2.17、表 2.6 に国家標準を研究開発している(独)産業技術総合研究所(NMIJ)の最近の状況を示す。

表 2.5 国家計量標準の研究成果 国家標準の研究⁽³³⁾

平成 16 年度 圧力真空標準の開発と供給
計測標準研究部門 (独)産業技術総合研究所

光波干渉式標準圧力計(1kPa～120kPa)を基準にして気体ゲージ圧・絶対圧標準(5kPa～7MPa) 微差圧基準(1Pa～10kPa)および液体圧力標準(1MPa～16Pa)用の重錘型圧力計、ボイルの法則を利用する膨張法(0.1mPa～1Pa)および、気体の流れを利用するオリフィス法(0.1μPa～0.1mPa)などによる標準圧力の範囲を拡大し、極高真空から超高圧までの標準と計測技術、さらに、リークディテクタ用の標準リーク標準(10pPa³/s～1mPa³/s)についての世界の標準研究所が供給する最高レベルを目標とした標準の開発、維持、供給およびそれらの高度化を目指す

計量標準 ①国家計量標準の開発・維持・供給
②国際計量システムの構築

(2) 圧力標準供給体制

『圧力標準』は最高精度(不確かさ)の標準が、NMIJによって定められ、その標準(一次標準国家標準)が各階層に供給される。この標準の供給体制はトレーサビリティ制度として、平成4年の計量法改正時に創設され、平成11年の計量法改正によって、計量器の校正を行う事業者の各階層への導入が行われた。

この制度をJCSS(Japan Calibration Service System)という。現在、国家計量標準の供給は、NMIJの他、日本電気計器検定所および指定校正機関が行っている。

圧力標準は、NMIJによる「特定第二次標準器」の校正、または、JCSS認定事業者(登録事業者)による「圧力標準器」の校正(JCSS)の2つにより供給されている。一般ユーザーに標準供給される標準器には『重錘形圧力てんびん^(注)』『液柱形圧力計』、その他がある。また、校正する場合、校正対象、校正範囲、校正不確かさなどにより、上位機種で校正された標準器が選定される。

JCSS認定事業者は、校正結果を認めた校正証明書を発行することができる。

圧力標準の研究は、圧力計メーカーでも行われ、NMIJに次ぐ、高精度(不確かさ)の圧力標準器がつかられている。

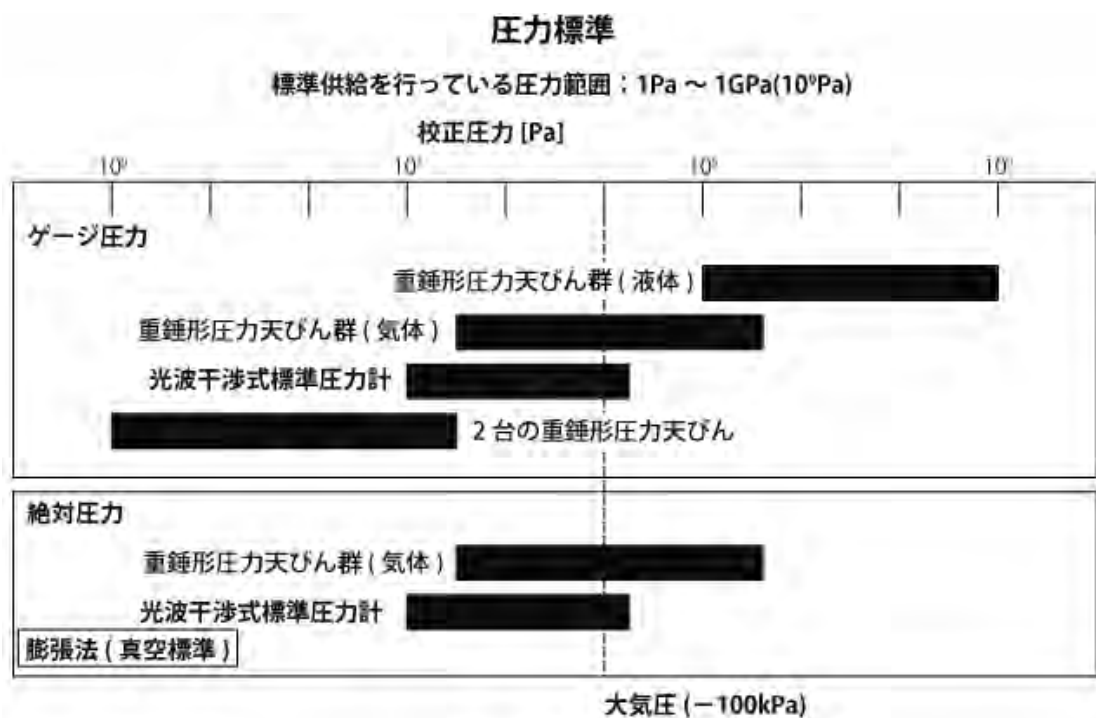


図 2.17 標準供給を行っている圧力範囲 (独)産業技術総合研究所提供

表 2.6 校正サービス (独)産業技術総合研究所提供

種類	校正範囲	圧力媒体	校正器物
気体ゲージ圧力	5kPa～7000kPa	純窒素	重錘形圧力天びん
気体絶対圧力	5kPa～7000kPa		高精度圧力計
気体差圧	1Pa～10kPa [ライン圧力: 絶対圧力100kPa ± 10kPa]		高精度圧力計
液体圧力	1MPa～500MPa	セバケイト (油)	重錘形圧力天びん
	500MPa～1GPa		高精度圧力計

(注) 重錘形圧力計は、JIS の「重錘形圧力天びん」と同じ構造である。

参考文献

- (1) (社)計量管理協会:「圧力の計測」P2-4(1987) [昭和 62 年]
- (2) 同上 P2
- (3) 松代正三編:「工業計測技術体系」P1 日刊工業新聞(1964) [昭和 39 年]
- (4) JIS 規格 B7505 (1959, 1999, 2007) [昭和 34、平成 11、19 年]
- (5) (社)計量管理協会:「圧力の計測」P3-4 コロナ社(1987) [昭和 62 年]
- (6) 松代正三編:「工業計測技術体系」P1 日刊工業新聞(1964) [昭和 39 年]
- (7) 同上 P13
- (8) 計量技術ハンドブック編集委員会:「計量技術ハンドブック」コロナ社(1982) [昭和 52 年]
- (9) 松代正三編:「工業計測技術体系」P10-12 日刊工業新聞(1964) [昭和 39 年]
- (10) 小泉袈裟勝:「はかる道具のおはなし」P168 (財)日本規格協会(1982) [昭和 52 年]
- (11) 竹内薫:「闘う物理学者!天才たちの華麗なる喧嘩」P30-54 (株)日本実業出版社(2007) [平成 19 年]
- (12) (13) (14) H.W. ディキンソン:「蒸気動力の歴史」P16-19 平凡社(1994) [平成 6 年]
- (15) National Portrait Gallery, London: NPG 663
- (16) W.W.F. PULLEN:” The Testing of Engines, Boilers, And Auxiliary Machinery 3rd edition” P280 THE SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, MANCHESTER (1900) [明治 33 年]
- (17) 東郷神社・東郷会 図説東郷平八郎、目で見ると明治の海軍
- (18) 中原一郎:「ブルドン管の理論と設計 (1) 機械の研究第 14 巻第 6 号」東京工業大学(1962) [昭和 37 年]
- (19) (社)計量管理協会:「圧力の計測」、P4-5、コロナ社(1987) [昭和 62 年]
- (20) 松代正三編:「工業計測技術体系」P2-5 日刊工業新聞(1964) [昭和 39 年]
- (21) JES 第 118 号(1930) JIS 規格 B7505 (1959, 1999, 2007) [昭和 34、平成 11、19 年]
- (22) JISZ8203 (国際単位系 (SI)) (1991) [平成 3 年]
- (23) 通商産業省:「新計量法と SI 化の進め方」P20 (1999) [平成 11 年]
- (24) 度量衡法 大正 10 年法律第一號改正条項(1922) [大正 11 年]
- (25) 度量衡比較表 農商務省工務局 中央度量衡器研究所 (1911) [明治 44 年 1 月 10 日発行]
- (26) (27) JES および JISB7505 ブルドン管圧力計(1930, 1959, 1985, 1999, 2007) [昭和 8、34、60、平成 11、19 年]
- (28) 全国中小企業団体中央会:圧力計製造業経営指針 P25-27 (1978) [昭和 53 年]
- (29) (社)計量管理協会:「圧力の計測」P30 コロナ社(1987) [昭和 62 年]
- (30) (独)産業技術総合研究所『圧力標準』計測標準研究部門力学計測圧力真空標準研究室(2008 年資料提供) [平成 20 年]
- (31) (独)産業技術総合研究所:「計量標準要覧」(2005) [平成 17 年]
- (32) 阿部正一:「計量管理 Vol. 47, No. 3, 1998 不確かさの評価事例紹介」P9-12 (1998) [平成 10 年]
- (33) (独)産業技術総合研究所:「TODAY Vol. 6 (2006) 圧力標準の国際整合性の確保」P1 (2006) [平成 18 年]

3 | 圧力計の構造原理

圧力計は構造原理により、主に、『液柱形圧力計』『重錘形圧力計』『アネロイド形圧力計』『エンジンインジケータ』の4種類に分類される。本章では、各々の構造原理と基本的な圧力計について述べる。その他、産業分野とは限らないが、上述の基本的な構造原理とは異なる圧力計があり、これについても、圧力計の歴史上、重要であると思われるので、本章でその一部を取り上げた。

3.1 液柱形圧力計⁽¹⁾

(1) 構造原理

『液柱形圧力計』の起源は、イタリアのトリチェリが発明した「水銀気圧計」とされている。『液柱形圧力計』は、ガラス管と正確な密度が知られている液体とを用いて液柱を鉛直にし、液体に作用する重力加速度により発生する力を利用して、基準の圧力を知る。その底面に及ぼす圧力を液の密度と液柱の高さから算定して求め、これと釣り合っている圧力をスケールで読み取る。

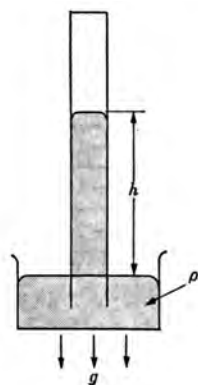


図 3.1 一般原理説明図⁽²⁾

液柱形圧力計によって発生する圧力 P は

$$P = \rho gh \quad (1)$$

ここに、 ρ : 液体の密度

g : 重力加速度の大きさ

h : 液柱の高さ

で、求められる。

『液柱形圧力計』は、耐圧性や伸縮性などのガラスの性質上、低圧の測定に用いられる。また、メニスカ

ス（後述）、管壁の汚れ、毛細管現象などの影響を回避するため、ガラス管にはなるべく太いものを使用する。封入液には水銀、または水などを用いるが、それぞれの管内径は、水銀の場合は少なくとも 8mm 以上、水、アルコールなどの場合は 15mm 程度がよい。

また、液柱形圧力計全般に生じる現象として、液面を読み取る際の測定誤差としての視差（パララックス）がある。液面の上面の形状は、図 3.2 に示すように、水銀では凸、水やアルコールでは凹、など、液面の凸凹（メニスカス）があるので、目視する位置は、凸の場合には上端、凹の場合には下端とする。液面を目視する際に注意することは、液面の正面から水平に視定して視差の影響を少なくすることである。

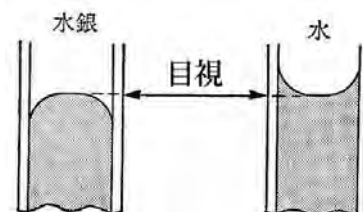


図 3.2 液面の凹凸⁽³⁾（メニスカス）

通常、液柱形は、視差が小さくなるようにつくられているが、さらに視差を小さくする方法として、ガラス管背面への鏡の設置や、カセットメータ、拡大鏡、望遠鏡などの使用などがある。

(2) 基本的な種類

『液柱形圧力計』には、圧力を発生させる加圧ポンプなどを付帯したものなど、さまざまな種類がある。ここでは3種類の基本的な圧力計を紹介する。

①単管式液柱形圧力計⁽⁴⁾

図 3.1 の原始的な液柱形圧力計である。単管式は一つの管の液柱の高さ h だけを測ればよく、測定が容易である。

単管式では「管下がり」と呼ばれる独特の現象が発生する。液柱形圧力計は、 g の値が一定であれば、液柱の高さ h によって圧力が求められるが、単管式では、液槽内に圧力が加わったときに液面が下降するので、求める圧力の基点が変化する。これを「管下がり」と呼ぶ。

図 3.3 で、液槽内の液面（X-Y）が、圧力 P を受けて、 h'' だけ下降する。一方、スケールは、基点が（X-Y）面でつくられる。圧力 P による液柱の高さは、

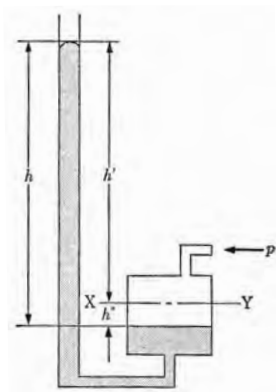


図 3.3 管下がりの説明⁽⁵⁾

液面が h'' だけ下降した点から高さ h となる。スケールの基点は、はじめの基点をゼロとして、実際の液柱高さ h より h'' 短い縮目盛 h' でつくられる。この h'' を「管下がり」という。

そのため、単管式の目盛は実目盛でなく縮目盛にする必要がある。一般には、コスト削減や重量軽減のため、液槽を必要以上に大型化しないよう、縮目盛があらかじめ計算されてつくられる。ただし、液槽の内側の断面積が、液柱管の内側の断面積に比べて十分に大きければ、管下がり小さくなり、それが測定誤差の範囲であれば、目盛は実目盛でつくられる。なお、単管式の縮目盛に対して、後述するU字管式は実目盛でスケールがつくられるので、両者のスケール目盛の長さが異なる点に注意する。

「管下がり」の計算式は複雑なので省略するが、単管式の場合、液柱高さ h を読み取れば、その値が測定圧力となるようにつくられている。なお、スケールは黄銅板などでつくられるので、管下がりの補正とともに、スケールの温度補正も計算される。精度の高い場合は、容器その他の温度補正、重力加速度の補正、その他の補正も行われる。なお、地球上の重力加速度は、緯度、経度および海拔の高さで異なり、国内では0.2%の範囲にある⁽⁶⁾。精度上問題のない場合は、場所の補正を行わず、国際的に定められた標準重力加速度を使用する。重力加速度（北緯45度の海拔0mの値）は、 $g=9.80665\text{m/s}^2$ である。以下、重力加速度の補正に関しては同様である。

② U字管式液柱形圧力計⁽⁷⁾

U字管式は、U字形のガラス管内に液体を入れたもので、管の一方に測定圧を導き、他方を大気圧に開放すれば、次式が成り立つ。

$$P_2 = P_1 + \rho gh \quad (2)$$

ここに

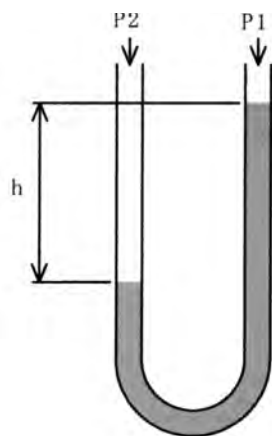


図 3.4 U字管式圧力計の原理⁽⁸⁾



図 3.5 U字管式液柱形圧力計⁽⁹⁾

P_1 : 大気圧（ゲージ圧）

P_2 : 測定圧

ρ : 液体の密度

g : 重力加速度

h : 液柱の高さの差

とすれば、

測定圧力 P_2 は、液柱の高さの差を h として次式が成り立つ。

$$h = (P_2 - P_1) / \rho g \quad (3)$$

$$P_2 = \rho gh + P_1 \quad (4)$$

上式には温度の影響が考慮されていないが、精密な測定をする場合には、温度補正や重力補正等が必要となる。また前述したとおり、単管式と異なり、U字管式は実目盛でスケールがつくられる。

③ 傾斜管式圧力⁽¹⁰⁾

傾斜管式の原理は単管式と同じだが、傾斜管式は指定の取り付けを行って単管式を傾斜させたものである。読み取り部分が拡大されることにより、高精度の読み取りが可能となる。

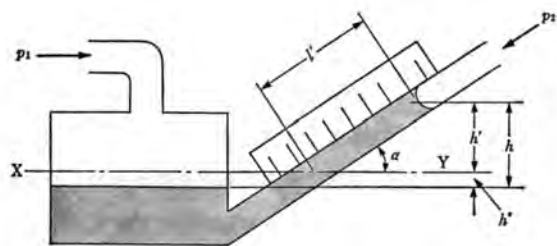


図 3.6 傾斜管式液柱形圧力計⁽¹¹⁾

測定圧力 P_2 は、次式により計算できる。

P_1 : 大気圧

P_2 : 測定圧

α : 管の傾斜角度

h : 液中の高さの差

l : スケール目盛 (縮目盛)

ρ 、 g : 前式と同じ

として

$$P_2 - P_1 = \rho g l' \sin \alpha \quad (5)$$

$$P_2 = \rho g l' \sin \alpha + P_1 \quad (6)$$

3.2 重錘形圧力計⁽¹²⁾⁽¹³⁾

重錘形圧力計は、低圧から超高压までの圧力測定に用いられており、材料、加工処理技術、その他の進歩とともに研究開発が深められ、高性能化が進んでいる。現在、産業界でこれに代わる高圧力、高精度の圧力計は存在せず、圧力測定においてきわめて重要である。

(1) 一般原理

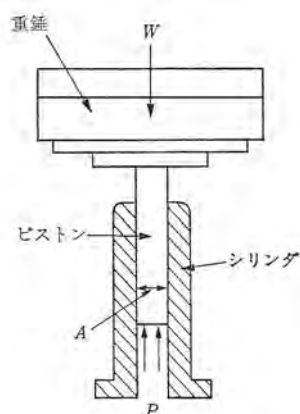


図 3.7 重錘形圧力計⁽¹⁴⁾

重錘形圧力計のピストン・シリンダ部において、図

3.7 に示すように、重錘が積載されているピストンが、その底面に作用する圧力によって浮揚して平衡状態にあるとき、測定圧力 P (ゲージ圧) は、

$$P = W / A \quad (7)$$

W : 「ピストン+重錘」の空気中での重量
で求められる。

この式は「圧力=単位面積当たりの力」という圧力の定義式にほかならない。すなわち、シリンダ内に緊密に嵌合し、かつ、自由に滑動するピストンを「圧力-力」変換機に用いて、この圧力の定義を具体化したものである。

「ピストン+重錘」の空気中での重量 W は、「ピストン+重錘」の質量を M 、密度を ρ_0 、空気密度を ρ_a 、その場所の重力加速度を g として、

$$W = Mg (1 - \rho_0 / \rho_a) \quad (8)$$

また、ピストンの有効面積 A は、ピストンの断面積を A_R 、シリンダの孔の面積を A_C として

$$A = 1/2 (A_R + A_C) \quad (9)$$

あるいは、式を変形して

$$A = (1 + h / r_R) \quad (10)$$

となる。ここに、

r_R : ピストンの半径

h : ピストンとシリンダとの間のすきまの幅 (片側)

で与えられる。

すなわち、ピストンの断面積に環状すきま面積の半分を加えたものが有効面積 (「圧力-力」変換係数) となる。このピストンの有効面積は、重錘形圧力計の装置定数とも言えるべき重要因子である。

なお、高圧、超高压用の製作ではこの原理に加え、材料の変形や漏れなどの対策が必要となる。材料には特別な合金鋼などが使用されるが、設計的に安全率を十分に取れず、ピストンの面積 (直径) は小さく、各部に大きな力 (応力) が発生してピストンとシリンダが変形し、液漏れが起こる。高圧、超高压では、高圧技術の経験者をもってしても、製作にはその都度困難

を伴う。超高圧になると、重量も 500Kg、高さ 3m を超えるものもあり、設置には、土台となる固い基礎と振動、温度、湿度などの影響を受けない環境が必要となる。

(2) 種類

重錘形圧力計の種類は、「圧力媒体と測定圧力」「ピストン・シリンダ構造」「重錘の負荷方式」などにより分類できる。以下に、その分類について述べる。

① 圧力媒体と測定圧力による分類

重錘形圧力計は使用圧力媒体によって、液体式（主に油、水はきわめて少ない）と気体式とに大別される。それぞれの圧力媒体による測定範囲は、メーカーにより異なるが、概要は以下のとおりである。

< 1 > 液体用（水を除く）

2、5、10、20、50、100、300、700MPa

< 2 > 気体（その他）用

1 MPa、2 MPa など

< 3 > その他水用

200MPa

液体式には作動油などが使われる。計測範囲が広いため、上記のように圧力範囲が区分されている。各区分で使用される重錘とピストンは、重錘の重量が整数となるように決められている。ピストンの断面積（直径）は、圧力が高くなるにつれ、小さくなるようにつくられ、重錘は小型軽量化する。

気体式重錘形圧力計（エアピストンゲージ）は戦後開発された低圧の高精度測定用である。この圧力計には、窒素ガスなどの気体を使用される。近年、圧力計メーカーではさまざまな研究が進み、断面積 10cm^2 の大きなピストンや、不確かさ（計測関係で使われる用語、誤差（精度）のばらつきの範囲を確率で示すこと（第2章 2.4.2 (1) 圧力標準参照））、数十 PPM 程度のものが開発されている。気体式重錘形圧力計は国家標準圧力計として採用され、気象庁では気圧計の基準圧力計として使用されている。

円筒ピストンを用いた気体式重錘形圧力計の一例を図 3.8 に示す。



図 3.8 気体式重錘形圧力計 PD82
（エアピストンゲージ）
長野計器（株）提供 1967 年

この他、気体式には、球形ピストン（ボール）を用いて、空気軸受の原理を応用したものがある。図 3.9 に気体式球形ピストン重錘形圧力計を示す。

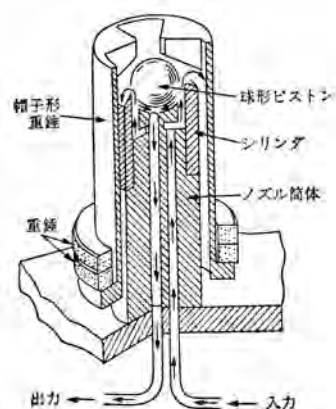


図 3.9 気体式球形ピストン重錘形圧力計⁽¹⁶⁾

この球形ピストンでは、その赤道径がシリンダの上端面と一致して浮遊しているときに正規の平衡状態を与える。赤道径がこの平衡位置から外れれば、有効面積に従って発生圧力は変化し、圧力は漏洩気体の流量の関数となる。

② ピストン・シリンダ部の構造形式による分類

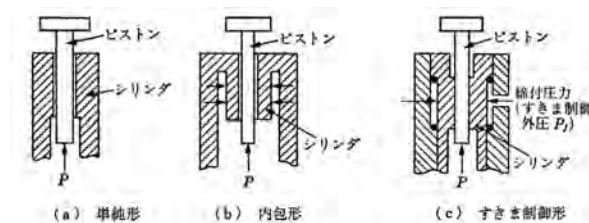


図 3.10⁽¹⁵⁾ ピストン・シリンダ部の構造

図 3.10 (a) は単純形シリンダで、シリンダの外周面は大気圧にさらされている。一般の低圧、中圧重錘形圧力計はこの形式のシリンダを用いる。

同図 (b) は内包（re-entrant）形シリンダで、測定圧力自体を利用した、シリンダを締め付ける構造により、「高圧下でのシリンダの膨張⇒すきまの増大⇒圧力流体の過度の漏洩」を防止できる。簡単な構造で特別な操作を必要としないことから、実用的な高圧用重錘形圧力計に広く利用されている。



図 3.11 MH 型重錘形圧力計 旭計器工業（株）提供
500Kg/cm² 1972 年

同図（c）はすきま制御形シリンダで、独立の圧力源から供給される調節可能な締付圧力をシリンダの外周面に作用させ、ピストン・シリンダ間のすきまを自由に制御できるようにしたものである。構造および操作は複雑化するが、測定圧力全範囲に渡り、すきまを最適状態に制御して「圧力-力」変換を行うことができるため、国家標準などの高精度の高圧用重錘形圧力計に採用されている。

③重錘の負荷方式による分類

重錘式は、高圧になるほど重錘の重量が大きくなる。そのため重錘の負荷方式がいろいろ開発利用されている。ピストン上に直接重錘（分銅）を付加するのが実荷重式だが、一般には図 3.12 に示すような 3 種類の方式が採用されている。

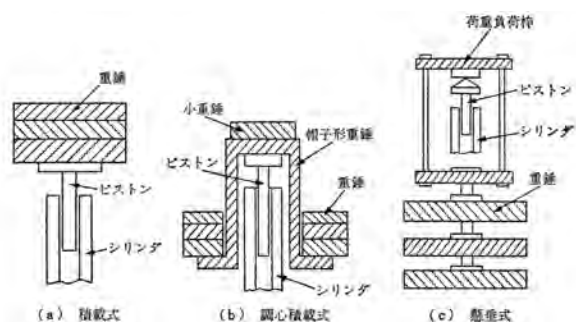


図 3.12 重錘形圧力計の重錘積載構造⁽¹⁷⁾

図 3.12 (a) は積載式で、もっとも簡便な方法である。積み重ねる重錘の数とともに重心の位置は高くなる。

図同（b）は調心積載式である。帽子（ベル）形重錘を用いることで、ピストンの嵌合作動部に近い位置に重錘群の重心をもってくることができるため、動的な安定性が良い方法とされる。

図同（c）は懸垂式で、大量の重錘を負荷する高圧用重錘形圧力計に用いられる。重心の位置が低く、静

的な安定性に優れる。

戦前から戦後の高度経済成長期の頃までは、屈強な力のある男が、一枚数キロから数十キロの鉄製の重錘の上げ下ろしを素手で行っていた。その後、油圧や電動で重錘を加除操作できるようになり、現在では、以下のような 3 通りの方法が用いられている。

(i) 圧力の低いものは、手動でハンドルあるいはレバー方式で加圧、または減圧操作し、重錘も手で上げ下げする構造のものが多い。

(ii) 圧力の高いものは、電動で加圧ポンプを駆動し、重錘も重くなるので電動で上げ下げする構造となっている。

(iii) 加圧ポンプと重錘の操作を全自動で行うものもある。高圧用。



図 3.13 重錘形圧力計 100Kg/cm² 4 連卓上用
1941 年頃（株）右下計器製作所提供

この他に、特殊形式として、差動ピストン式、傾斜ピストン式、てこ（レバー）式、増圧式などがある。

差動ピストン式は高圧用で、段付ピストンの段差面積に受圧させる構造をもち、ピストンの強度を確保して有効面積を小さくすることができる。

傾斜ピストン式は主として低圧用で、ピストンを任意の角度に傾斜させて使用する構造をもち、重錘に働く重力のピストン軸方向の分力を有効荷重にできる。

てこ（レバー）式は高圧用で、重錘の重量をてこ比で倍増してピストン上に負荷する方式である。

増圧（hydraulic multiplier）式は超高圧用で、油圧荷重式ともいわれ、直列 2 段に組み合わせたピストン・シリンダ機構（増圧器）によって荷重、従って圧力を倍増する方式である。

ただし、これら差動ピストン式などの形式は、現在、わが国ではほとんどその使用例をみない。

3.3 アネロイド形圧力計⁽¹⁸⁾

(1) 一般原理

アネロイド形圧力計は、前述したとおり、弾性素子

を圧力計の受圧部にもつものである。弾性を利用して大きな変位を取りだすことができる。

(2) 弾性素子の種類

以下に、主要な弾性素子の基本について説明する。

①ブルドン管

第4章で取り上げるので、ここでは省略する。

②ペローズ⁽¹⁹⁾

ペローズは蛇腹状の弾性素子である。ペローズは比較的低压に使用され、5kPa ~ 2MPa 位の範囲で用いられる。また、ペローズは適切な変位を取り出すため、一般的には、他のばねと併用して使用される。ペローズは図3.14に示すように「外周にちょうちん状の深いひだをもった薄肉円筒状で軸方向に伸縮可能な圧力容器」である。これを密閉してこの中の圧力を変化させると、軸方向に伸縮する。ペローズには形状や製法の異なる幾多のものがつくられているが、ここではそのもっとも一般的な製法、材料、形状、特性などの概要を紹介する。

ペローズは一般に、継目のない薄肉の金属パイプの外周面に、ちょうちんのようなひだをつけてつくられる。ペローズは製作方法により、主として、『成形ペローズ』と『溶接ペローズ』に分類される。『成形ペローズ』は、板材を絞ってパイプ状とし、油圧成形により製作される。材質は、リン青銅、ステンレス鋼が一般的である。『溶接ペローズ』は、あらかじめ同心円状に打ち抜いた板材を溶接することにより製作する。『溶接ペローズ』は変位特性に優れるが、コストが高いため『成形ペローズ』ほど一般的でない。『成形ペローズ』と『溶接ペローズ』の断面形状の違いを図3.15に示す。

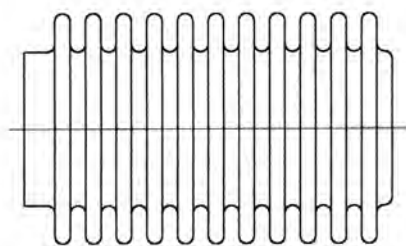


図 3.14 ペローズ⁽²⁰⁾

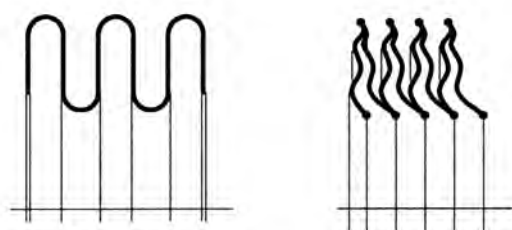


図 3.15 成形ペローズと溶接ペローズ⁽²¹⁾

③ダイヤフラム^{(22) (23)}

ダイヤフラムとは、その周辺を固定した比較的柔軟な板材からなる弾性素子で、その材料から『非金属製』と『金属製』のダイヤフラムとに分類される。ダイヤフラムは主として 100Pa ~ 400kPa 位の比較的低压で使用される。

『非金属ダイヤフラム』には主としてゴムが使われ、ほとんどの場合、中央部に剛体とみなせるセンターディスクを設け、有効面積を大きくする方法がとられている。

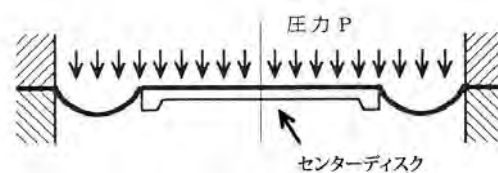


図 3.16 非金属ダイヤフラム⁽²⁴⁾



図 3.17 金属ダイヤフラム⁽²⁵⁾

『金属ダイヤフラム』には、フラットな薄板だけのダイヤフラムもあるが、ほとんどの場合、特性を改善するため波形に成形される。また、センターディスクを設ける場合もある。『金属ダイヤフラム』はペローズに比較し、同一の有効面積では直径が大きくなるなど、不利な点もあるが、波形と同形状のバックアッププレート設けることにより、相当なオーバー圧力に耐えられるよう設計できる利点がある。

④チャンバ（空盒）

金属ダイヤフラム単体では、取り出せる変位が小さいため、変位を必要とする場合は、図3.18のようなダイヤフラムを組み合わせた「チャンバ」と呼ばれる弾性素子を使用される。チャンバを重ねて使用することにより、変位をさらに大きくすることができる。



図 3.18 航空機用（高度計）チャンバ
東京航空計器（株）提供



図 3.19 航空機用高度計
東京航空計器（株）提供

チャンバは、産業用に微圧計として広く使用されている。航空機の高度計や気象観測の気圧計としても使われている。

⑤その他

油圧用の圧力スイッチには、弾性素子でなくピストンを使用することがある。ピストンは機械的なストップにより容易にオーバー圧力に対する保護対策を講じることができる。反面、Oリングなどのシール対策が必要であり、シール対策により摩擦が増大し低圧には適さない、などの問題点もある。

3.4 エンジンインジケータ

(1) 一般原理⁽²⁶⁾

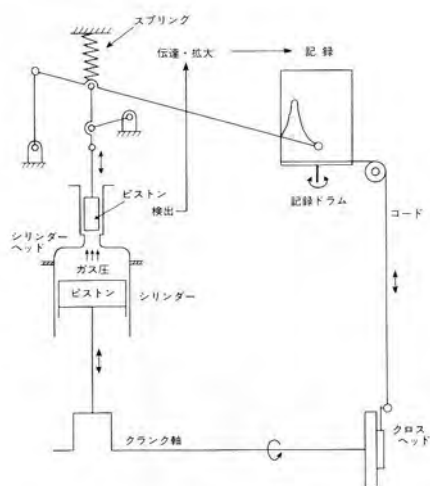


図 3.20 エンジンインジケータの原理図⁽²⁷⁾

インジケータは、「受圧部」、「シリンダ」、「ピストン」およびピストンに接続する「スプリング」、ピストンの変位を伝達・拡大する「レバーペン機構」、「円筒形記録ドラム」で構成される。

エンジンのシリンダ内爆発圧力は、インジケータの受圧部からピストンに加わり、この力がピストンロッドを介してスプリングに作用する。スプリングはピス

トンで発生した力に応じて変位するとともに、変位に応じた力を発生する。スタティックな状態のとき、両者の力はバランスしている。

インジケータの可動系の固有振動数がシリンダ内圧力変化に比較し十分に高ければ、近似的にスタティックな圧力状態が実現されているとみなすことができる。従って、ピストンおよびピストンロッドの変位は、正確にシリンダ内圧力を表していることになる。この変位は、精密なリンク機構により伝達・拡大され、レバー先端に設けられた金属針がドラムに巻き付けた記録紙に圧力変化を記録する。

リンク機構は、特殊なリンク構成により、金属針部分が直線的かつ比例的な変化をする構造となっている。

一方、エンジンのクランクシャフトと関連付けられたクロスヘッドから取り出された動きは、コード（柔軟な鉄製ワイヤーなど）を通して、インジケータのドラムに伝達され、ドラムに回転運動（往復）を与える。これにより、PV線図（図 3.25 (a)）（足袋形線図、指圧線図ともいう）を描くことができる。

この他、ドラムの回転方向を変えることにより爆発圧力を連続記録する“最高インジケータ”（図 3.25 (b)）、燃料の噴射時間の良否と最高圧力を知るための“手引き線図”（図 3.25 (c)）などを描くことができる。

エンジンの最高圧力に合わせてスプリングが用意され、交換使用される。また、エンジンの回転数に応じて、インジケータの機種がつくられている。

電気式（電子式も含む）インジケータには、原理的には圧電素子などを用いた圧力ピックアップ発信装置と、これを記録し解析する電気的な装置で構成される。現在、国内市場には製品化されたものや資料は見当たらないが、エンジンメーカーでは、自社のエンジンにあった電子式インジケータ装置が開発、使用されている。



図 3.21 現在製造中のもの型番
MM20⁽²⁸⁾ 2008 年

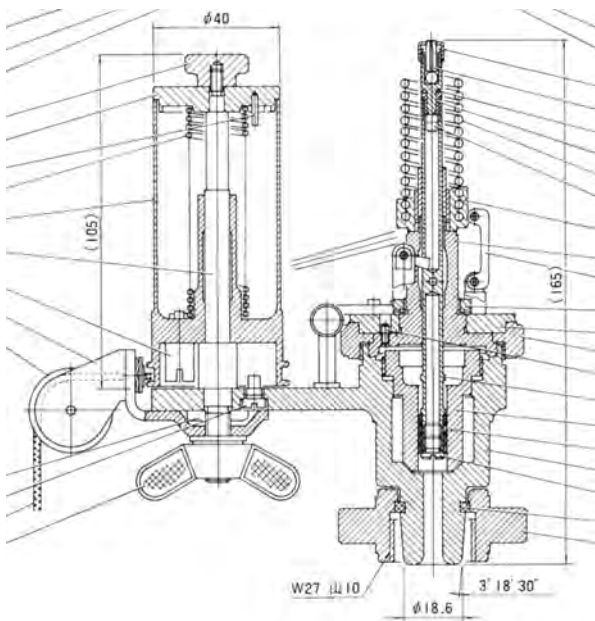


図 3.22 エンジンインジェクタの構造図
(図 3.21 の構造図)⁽²⁹⁾

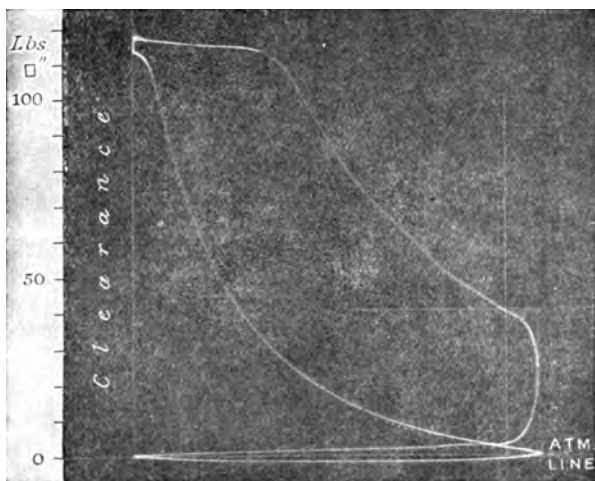


図 3.23 指圧線図 (足袋形線図)
(横軸は気筒の 1 工程、縦軸は、気筒内の圧力)
1900 年頃⁽³⁰⁾

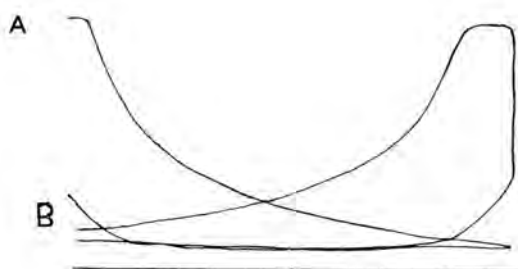


図 3.24 指圧線図 (記録紙に描く)⁽³¹⁾

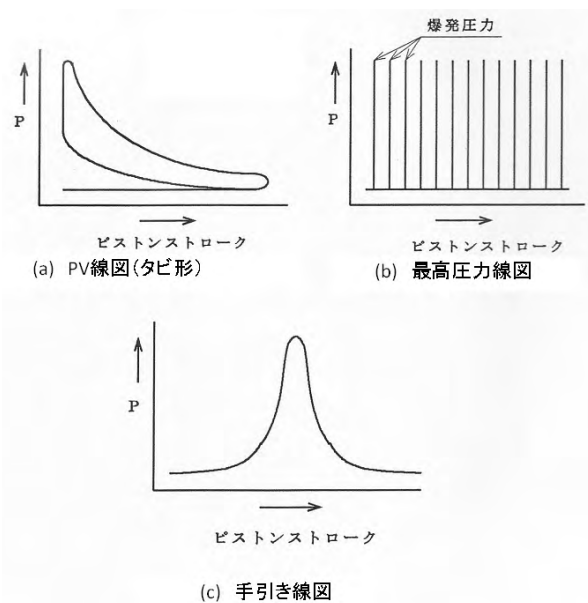


図 3.25 インジェクタ線図 (a) (b) (c)⁽³²⁾
1900 年頃

(2) 性能

インジェクタは他の圧力計と異なり、外観形状的な構造の違いが見られないため、ここでは、さまざまなインジェクタを特徴づける性能について述べる。

1890 年頃にワットが製作した「ワット・インジェクタ」は、ワットが実用化に成功した蒸気機関の開発・改良に用いられ、イギリスの産業革命に多大な貢献をしたが、固有振動数が低く、平板記録式で、インジェクタとしての性能は機構的に未熟であった。その後、蒸気機関の高圧化、高速化が進み、「ワット・インジェクタ」の誕生から約 70 年後の 1862 年、現在の機械式インジェクタの原型となる円筒記録式「機械インジェクタ」が(米)リチャードによって発明された。その後、



図 3.26 現存する最古の和式インジェクタ
1948 年 (株) 東京計器製作所 (現、東京計器 (株)) 製造 長野計器 (株) 保管

インジケータは、リチャードの原型を元に、多くの技術者によって、主に、固有振動数を高めること、測定を容易にすること、などの性能改善が行われている。

わが国でインジケータを初めて国産化したのは、やはり、ブルドン管圧力計を開発した和田嘉衡である。和田は明治 39 年に「和田式インジケータ」の特許を取得している。図 3.26 の写真は、現存する国産化当初の「和田式インジケータ」である。

しかし、インジケータはイギリスやドイツなどで盛んにつくられたが、1980 年代には姿を消し、現在、世界でその製造を行うのは、和田の系譜を継ぐ長野計器一社とされる。

長野計器では、現在、可動部分の固有振動数は極高く改良され、機関の最大回転数／機関の最大圧力は、4 ～ 30MPa/350、600rpm、5 ～ 15MPa/1000rpm、4.5 ～ 12MPa/1200rpm が製造されている。

3.5 その他

この他上記とは、まったく異なる構造原理をもつ圧力計が、一時期、存在した。以下に、その中の一部について記す。

① 沈鐘を利用するタイプの液柱形圧力計⁽³³⁾⁽³⁴⁾

日本機械学会や大学の著名な研究者によって紹介され、1950 年頃から 1960 年代にかけて活躍した圧力計である。教育目的の圧力計として導入された測面もあり、理工系の学生向けの教育資料も作成されたが、流量関係を除き、機械系産業界ではほとんど普及することなく、高度経済成長期には姿を消した。しかし、過去に「沈鐘形」として度量衡法および計量法に規定され、圧力計に分類された経緯もあり、本稿に取り上げた。

液体の中に一部分が沈入している鐘体（ベル）の圧力の変化による昇降を利用して、圧力の大きさを指示または記録する方法、その他がある。主に、流量測定分野で使用された。

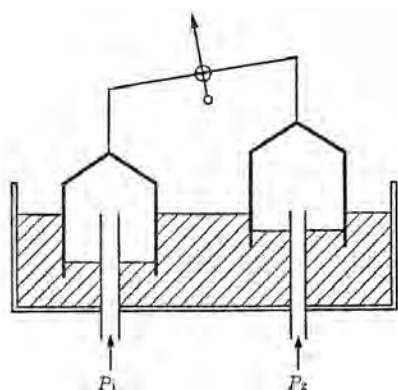


図 3.27 沈鐘式圧力計⁽³⁵⁾

② 環状天びん式圧力計（リングバランス圧力計）⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾

この圧力計は①と同じ経緯をたどった圧力計で、産業界では 1950 年頃から 1960 年代にかけてわずかに使用され、過去に「環状天びん式」として分類されていた。しかし、それ以降、まったく使用されていない。

この圧力計は、リング状の管の上部に隔壁があり、下部に封入液が半分ぐらい入ったもので、中心はナイフエッジで支えられている。圧力の導入口は隔壁の左右にある。圧力差が生じると支点のまわりに回転モーメントが生じてリングは回転するが、重心に働く重力 W による復元力とつりあったところで静止する。このときの傾き角 θ を指針やその他の方法で測定すれば、 $P_1 - P_2$ の差圧を求めることができる。

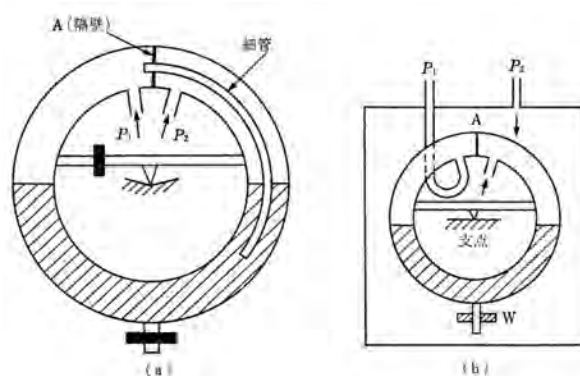


図 3.28 環状天びん式圧力計（リングバランス圧力計）⁽³⁸⁾

③ 零位法による微圧計

零位法による微圧計は液を用いるが、②の環状天びん式圧力計と同様、液柱形圧力計の構造原理とはまったく異なる。機械産業ではほとんど使われなかったが、過去、流量分野とごく一部の産業分野で用いられた実績がある。測定方法は、今まで述べてきた液柱の差を直接読む代わりに、液柱の差がなくなるまで計器を傾斜させるか、または基準槽を移動させて、その傾斜角度、あるいは、基準槽の移動量から、圧力、または、差圧を測定するものである。これは、100mmH₂O 程度までの微小圧力を高い精度で測定するためのもので、精度は測定範囲の 0.5% 程度である。

以下、零位法による微圧計の一部として、圧力水準器、レイレイゲージ、チャトックゲージ、排水ゲージ、ミニメータについて述べる。

(a) 圧力水準器

この圧力計は、U 字管形圧力計のように構造が簡単で、しかも精度の高いものである。

(b) レイレイゲージ

これは前述の圧力水準器と同様に U 字管を傾斜させることによって 5mmHg 程度までの微圧を測定する

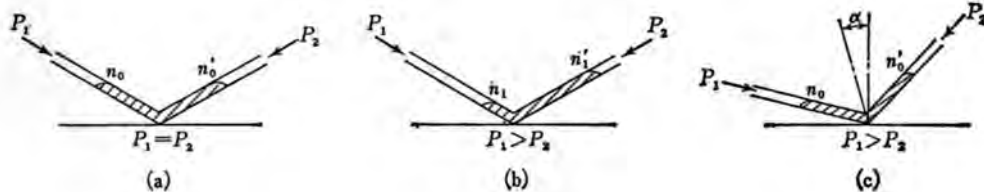


図 3.29 圧力水準器⁽³⁹⁾

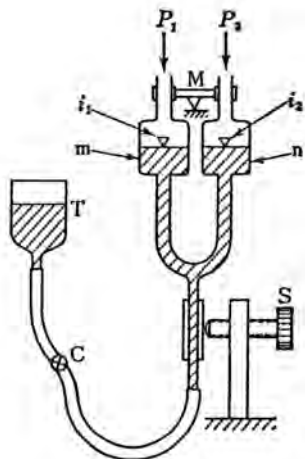


図 3.30 レイレイゲージ⁽⁴⁰⁾

圧力計である。精度は $1/200\text{mmHg}$ 程度で、ガラス針 i_1 、 i_2 の水銀面との接触は顕微鏡で見る。

(c) チャットックゲージ

これは図 3.31 に示すように左右に水を封入した液槽と、中央に油と水を封入した槽が連通され、Z 部を持ち、この 3 つの液槽とマイクロメータ S などによって構成されている。差圧は 0.01mm まで読み取れる。また、1 目盛の $1/10$ まで読み取れば $1/1000\text{mm}$ まで読み取ることができる。

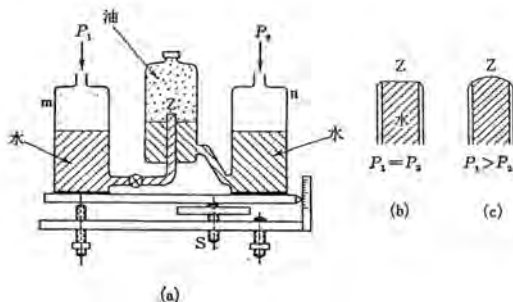


図 3.31 チャットックゲージ⁽⁴¹⁾

(d) 排水ゲージ

これは図 3.32 に示すように、傾斜管圧力計の液槽に排水ドラム D を入れたものである。これは排水ドラムの上下量を読むためのマイクロメータ S および傾斜管の液面のごくわずかな変動を精密に視定する顕微鏡などから構成されている。顕微鏡は 60 倍で 2.5

μ 程度まで読みとれる。傾斜管の傾斜角度を $1/10$ にすれば、 0.25μ まで読み取ることができる。

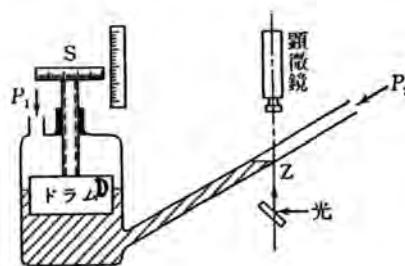


図 3.32 排水ゲージ⁽⁴²⁾

(e) ミニメータ

これは図 3.33 に示すように固定槽 m と可動槽 n、および、m、n を連結するゴム管 t、固定槽内の視定針 i、マイクロメータ S などによって構成されている。 $1/100\text{mm}$ まで読み取ることができる。測定範囲は $120\text{mmH}_2\text{O}$ 程度で、精度は視定針のゼロ調整の技術により左右される。

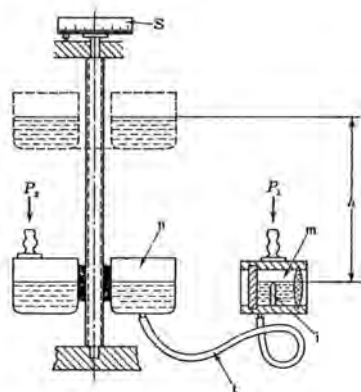


図 3.33 ミニメータ⁽⁴³⁾

④ U 字管式浮子形圧力計

U 字管の部分には液柱形の原理が用いられているが、この圧力計は流量計測に用いられて発展したもので、やはり液柱形とは異なる独自の構造原理に分類される。図 3.34 に示すように鉄製の U 字管内の封入液面に浮子を浮かべ、圧力（または差圧）の変化による浮子の昇降を、機械的あるいは電気的に取り出すものである。これを差圧計として使用するとき、その最高

使用圧力は通常 $50 \sim 100\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度、特に高圧用として $300\text{kg}/\text{cm}^2$ まで使用できるものもある。測定精度は、測定範囲の $\pm 1 \sim 2\%$ である。

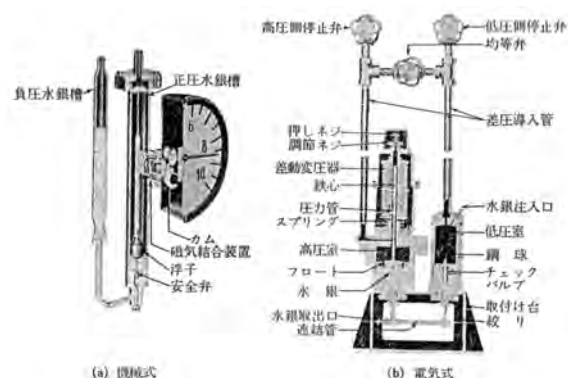


図 3.34 U 字管式浮子形圧力計⁽⁴⁴⁾

参考文献

- (1) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P7 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (2) 同上 P15
- (3) 同上 P17-18
- (4) 同上 P23
- (5) 同上 P21
- (6) 同上 P29-30 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (7) 同上 P21
- (8) (株) 長野計器技術資料
- (9) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P25 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (10) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P24-25 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (11) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P25 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (12) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P72-74 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (13) 豊沢陽二：「計測第 11 巻第 1 号重錘型標準圧力計に関する研究」 P26-32 (1960) [昭和 35 年]
- (14) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P73 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (15) 同上 P75
- (16) (17) 同上 P76
- (18) 全国中小企業団体中央会：「圧力計製造業経営指針」 P10-11 (1978) [昭和 53 年]
- (19) ベローズ委員会：「ベローズ-強度・仕様書・検査規定 JHP1 Vol. 10 No. 3 1972」(1972) [昭和 47 年]
- (20) (21) 長野計器技術資料
- (22) (23) 松代正三編：「工業計測技術体系」 P123 日刊工業新聞 (1964) [昭和 39 年]
- (24) (25) (26) (27) (28) (29) 長野計器技術資料
- (30) (31) W. W. F. PULLEN: "The Testing of Engines, Boilers, And Auxiliary Machinery 3rd edition" P309 THE SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, MANCHESTER (1900) [明治 33 年]
- (32) 長野計器技術資料
- (33) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P56-58 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (34) 真島正市、磯部孝：「計測法概論 (下巻)」 P442-444 コロナ社 (1964) [昭和 39 年]
- (35) 同上 P58
- (36) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P59-60 コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (37) 真島正市、磯部孝：「計測法概論 (下巻)」 P441-442 コロナ社 (1964) [昭和 39 年]
- (38) 同上 P60
- (39) 松代正三編：「工業技術大系」 P27 日刊工業新聞社 (1964) [昭和 39 年]
- (40) 同上 P27
- (41) 同上 P28
- (42) (43) 同上 P29
- (44) 同上 P30

4 | ブルドン管圧力計

1896年に初めてわが国で国産化されたブルドン管圧力計は、検定制度や国家規格（JES）にいち早く規定され、産業界の発展に貢献している。本章では、このブルドン管圧力計を取り上げ、歴史、技術、圧力計業界と関連事項、の3つに分類し、その詳細について述べる。

4.1 歴史⁽¹⁾

フランスのブルドンは世界で初めてブルドン管を発明し、1849年に特許を取得した。しかし、同じ頃、ドイツのシンツがプロシア（後のドイツ）ですでに同一原理の圧力計の特許を取得していたため、特許の優先権を巡る国際裁判が勃発した。結局、ブルドンの考案したものをシンツが参考にしていた事実が認定され、裁判ではブルドンが勝訴したが、シンツがすでにプロシアで特許を取得していたため、ドイツなどでは現在でもブルドン管をシンツ管と呼ぶ習慣がある。

ブルドンは、円形断面の金属管でばねを作った管をスパイラル形状（渦巻形）に巻いたところ、管の密着する部分が偏平につぶれ、これを直そうと管の一端を閉じて管に圧力を加えたとき、スパイラル形状の管は巻き戻す方向に形状変化し、管の自由端（閉じた管端）が動く（変位）ことに気付いた。これが、ブルドンによるブルドン管原理の発見である。このブルドン管の基本原理は、今でも変わらない。

イギリスの産業革命後、ブルドン管圧力計が蒸気機関による世界の工業近代化に貢献した功績は計り知れない。また、国内外を問わず、国家規格として構造と技術基準が規定されている圧力計はブルドン管圧力計だけである。わが国の法規では、1930（昭和5）年にJES（日本工業規格）で、『ブルドン管圧力計』として制定され、その後身であるJISに引き継がれている。

ブルドンはブルドン管原理を用いたさまざまな圧力計を考案し、数多くの特許を申請した。その詳細図が描かれた考案画帖の原本は、ブルドンの創立した（仏）ブルドン社に現存する。ここにその一部を紹介する。



図 4.1 ブルドン管の変位を直接読み取る圧力計
(1849) ブルドン社提供

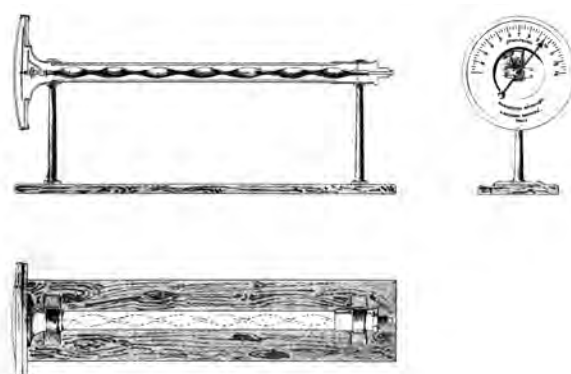


図 4.2 ねじれブルドン管圧力計
(1849) ブルドン社提供

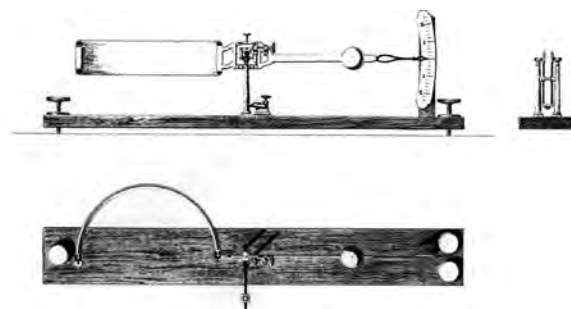


図 4.3 方向を変え拡大指示する圧力計
(1853) ブルドン社提供

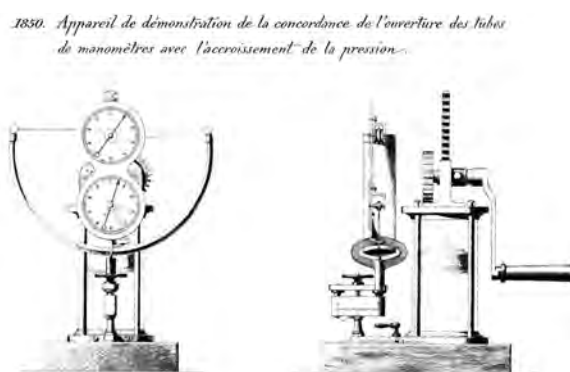


図 4.4 校正試験装置
(1850) ブルドン社提供

一方、わが国でブルドン管圧力計を最初に国産化したのは和田嘉衛である。日清戦争の直後の外国製だらけの機械に囲まれた日本で、明治29（1896）年、和田は機械工業に身を置くことを決意し、東京の小石川（現文京区）に従業員二人と和田計器製作所を創立した。和田はつねづね国産品をつくりたいと考えていた。あるとき、和田は、一人の海軍機関大尉と運命的な出会いをする。それは、後年、海軍中将艦政本部第五部長となる山本安次郎である。山本は和田に、『艦にはさまざまな機器が装備されているが、これらは外国製である。これらの国産化は我が国の急務である』と熱く説いたのだった。和田は早速、港に停泊中の艦船を訪れ、さまざまな計器類の中から圧力計を選び、作業場に持ち帰った。しかし、その頃の国内には関連資料が一切なく、まして相談できる研究者や技術者は皆無であった。

ブルドンが海の向こうでブルドン管圧力計を発表したことは伝え聞いていたが、和田にはまったく未知のことだった。和田は工場を訪ね歩いたり、中には見習いに入ったり、鍛冶職人や飾り職人、“らお（キセル）”職人らのところに通ったりして作り方を教わるなどしながら、必要な道具を製作した。その中でもっとも難しかったのは歯車装置で、結局、その製作だけは銀座の時計店の近常（人名）氏に依頼することになった。製造の難しいボルドンカン（ブルドン管）で失敗の日々を過ごしていた和田は開発を支援してくれそうな人物を探し続け、やがて、鉄道車両の圧力計修理に経験を積んだ鍛冶職人の存在を知り、この職人を招いて、日夜一緒に、来る日も来る日も試行錯誤を続けた。圧力計に圧力を加えると管が伸び切って元に戻らないクリープ現象が発生するなど、数々の難題に直面したものの、和田は創業からわずか1年足らずで、国産第一号となるブルドン管圧力計を世に送り出したのだった。

和田計器は、その後、（株）東京計器製作所と名前を変え、日本を代表する計器メーカーに成長した。和田は、1931（昭和6）年の創立35周年記念祝賀会で、当時を回想したスピーチを行っている。『山本大尉の話に強く心を動かされ、圧力計をつくる決心をした。艦中で一番単純なもので製造し易いと思った圧力計が、実は一番難しい物であることを知った²⁾。その後、（株）東京計器製作所は1948年の企業再建整備法により、株式会社東京計器製造所（現東京計器（株））と株式会社長野計器製作所（現長野計器（株））とに分離され、現在、後者が和田の圧力計事業の系譜を引き継いでいる。

4.2 技術

4.2.1 構造

ブルドン管圧力計は「アナロイド形圧力計」に分類され、弾性素子にブルドン管を用いる。

JIS規格（B7505-1:2007）では、ブルドン管圧力計を『アナロイド形圧力計（弾性素子の圧力による変形量を機械的に拡大して直接ゲージ圧を測定する指示圧力計）のうち、ブルドン管を弾性素子に用いた単針・同心の丸形指示圧力計...』と規定し、その構造や名称、形状、性能などを定めている。

ブルドン管圧力計は、図4.5のように、ブルドン管、内部拡大機構（以下、内機）、株、目盛板、指針、透明板、ケース、カバーなどから構成される。中でも特に重要なのが『ブルドン管』と『内機』で、この2つの要素がブルドン管圧力計の性能を決定する。

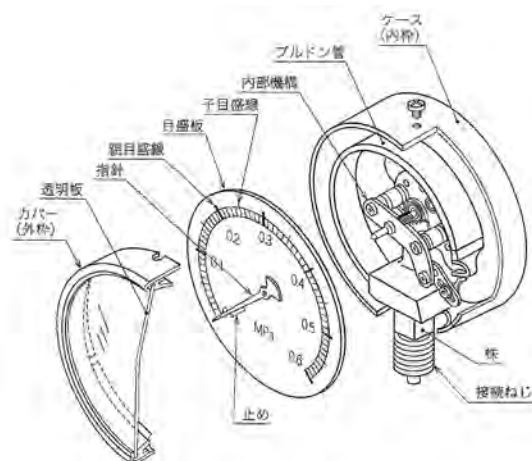


図4.5 主要部の名称⁽³⁾

ブルドン管は、低圧から高圧までの広い範囲において、ある程度の力と変位をその外形形状を大きく変えずに実現できるため、圧力計に組み込んだ場合、圧力計の形状を一定にしたままで、広い範囲のレンジをカバーできるきわめて優れた利点がある。

下の表と図に、ブルドン管圧力計の形状および記号を紹介する。

表4.1 ブルドン管圧力計の形状および記号⁽⁴⁾

形状の名称	形状の記号	縁位置	株位置
縁なし形	A	なし	下
丸縁形	B	後	下
前縁形	B2	前	下
埋込形	D	前	裏
	D2	なし	裏
ねじ込形	D3	前	中心
	D4	なし	中心

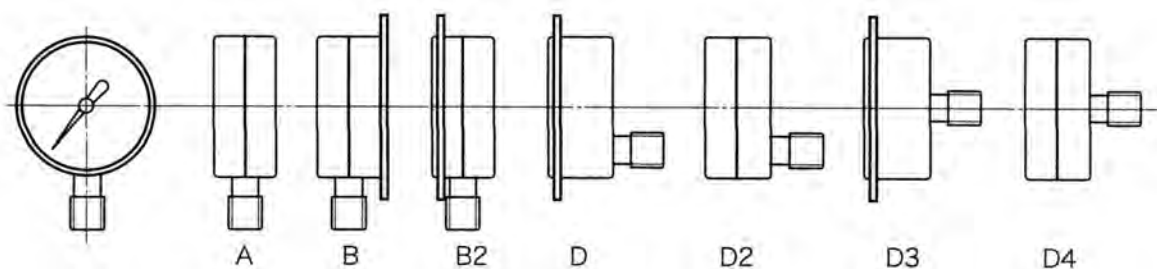


図 4.6 ブルドン管圧力計の形状および記号⁽⁵⁾

4.2.2 ブルドン管⁽⁶⁾

ブルドン管製造は、圧力メーカーの最高機密である。ブルドン管は、低圧から高圧までの広い範囲において、その外形形状を大きく変えることなく、比較的大きな弾性変位を取り出すことができ、また、ばねであるブルドン管は、ペローズのように、他のばねを併用する必要がなく、一端を溶接などにより完全に閉塞でき、ピストン式圧力計のような漏れがないなどの優れた利点をもつため、産業界で多用される。

以下に、その概要を記す。

4.2.2.1 原理と理論研究⁽⁷⁾

(1) 原理

ブルドン管はアネロイド形弾性素子の一つで、円管の断面を偏平につぶして、コイル状に成型したものである。ブルドン管の一端は閉塞され、他端（圧力の導入口）から圧力が加わると、閉塞端（自由端、管先という）はわずかに 3、4mm 程度、変位する（圧力計の大きさ、圧力、などで変位量は異なる）。変位は管先につながれたロッドを介して内機に伝わり、内機のリンク機構、セクタ（扇形歯車）とピニオン（小歯車）によって動きが直線運動から回転運動に拡大変換される。ピニオン軸に固着された指針は圧力に比例して回転する。この指針の指示を目盛板で読み取る。一般的に、ブルドン管の外側は大気圧に解放されるため、ブルドン管はゲージ圧検出弾性素子である。まれに差圧計測に使用されることもある。

(2) 理論研究

1910 年に H. ローレンツが、初めて、楕円断面のブルドン管の理論解析を行った⁽⁸⁾。しかし、その理論に導入された仮定が不適当であったため、理論値と実測値との間にはかなりの相違があることが後に判明した。1900 年にロンドンで発刊された“The Testing of Engines Boilers”には、ワットやブルドンらによって発明考案されたさまざまな圧力計測機器に加え、数々の計測機器の写真・図表や特性データなどが掲載されていることから、海外ではすでに 1900 年ま

でに圧力計やインジケータの実証的理論が研究されていたことが窺える。日本では、1923 年、砂谷智導が初めて権威ある論文（1923（大正 12 年 7 月））を日本機械学会で発表した。

その後、国内外の研究者によって理論研究が行われたが、圧力メーカーは、既存の理論が実際に一致しないとして⁽⁹⁾、戦前は、それらの理論を採り入れずに、独自に開発を進めた。

わが国でブルドン管理論を初めて本格的に研究したのは、中原一郎（元東京工業大学教授）と古川浩（元中央大学教授）である。両者は、ブルドン管の研究を約 30 年以上も続け、数多くの論文を発表した。中原は世界で初めて難解で複雑な計算式を図表化したことで、古川は理論と実際の関係を実験などで検証したことで知られる。古川は大学を退官する際の最終講義で次のようなことを語っている。『ブルドン管の理論研究をはじめた。やるたびに新たな課題が生まれ、他の殻理論も研究した。やっているうちに定年を迎えた。ブルドン管は、単純な一つの管であるが、30 年以上やったがまだまだわからないことがある。知らないことの方が多いと思う』。

以下に、理論式の一部を紹介する。

ブルドン管の原理はどの巻き形状にも当てはまるが、ここでは、もっとも多用されている C 形ブルドン管の自由端の変位 S と測定圧力 P の変位式について、複数の理論式が発表されている中で比較的平易で実用的な式を取り上げる。

C 形ブルドン管の自由端の変位⁽¹⁰⁾

ΔR は、測定圧力による巻半径の増加分として変位 S

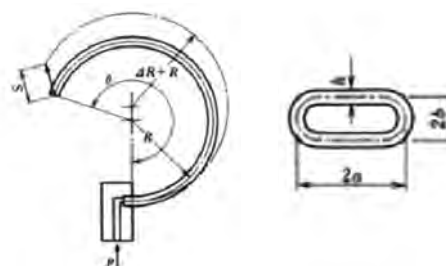


図 4.7 ブルドン管の変位⁽¹¹⁾

は次式による。詳細な式は省略して、結果のみを示す。

$$\frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{E}{P} = \frac{a^3}{h^3} \cdot \frac{k_3}{(1 + \lambda^2 k_1)} \quad (1)$$

$$\frac{S}{\Delta R} = \sqrt{2(1 - \cos \theta) - 2\theta \sin \theta + \theta^2} \quad (2)$$

$$\text{ここに、} \lambda = \frac{a^2}{Rh} \quad (3)$$

θ : 巻角

R : ブルドン管の半径

ΔR : 圧力を加えたときの半径 R の増加分

S : 管先の変位

P : 圧力

2a : 断面の長径

2b : 断面の短径

h : 断面の厚さ

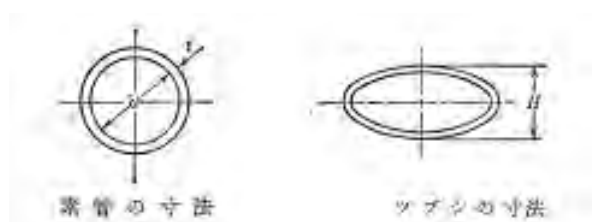
k : 係数

λ : 常数

k_1, k_3 は : 断面形状とその長短径比によって決まる。

E = 縦弾性係数

上の式から自由端の変位 S は測定圧力 P に比例することがわかる。



材質：黄銅， $R=40\text{ mm}$ ， $\theta=250^\circ$						
ブルドン管No.	1	2	3	4	5	6
管元						
d_2 (mm)	13	13	13	15	15	15
l (mm)	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
H (mm)	3.6	5.4	4.8	3.6	5.4	4.8
計算) S/P (mm/kg)	50	20	8	60	27	9
実験) S/P (mm/kg)	26~52	5~13	7~8	21~44	9~13	7~8
定格圧力 (kg/cm ²)	2.4~2.9	4.5~6.1	7.1~7.8	1.6~2.6	3.5~4.0	5.5~6.6

注：(1) 定格圧力は変位量 4.5 mm に対する圧力。

図 4.8 表 4.2 薄肉ブルドン管のツブシと剛性の実験値 (厚さ 0.2mm)⁽¹²⁾

4.2.2.2 特性^{(13) (14) (15)}

ブルドン管に圧力を加えたとき、管先は「圧力に比例した管先の変位」を生じ、巨視的にはフックの法則に従っているが、細部にわたって観察すると、必ずしもその法則に従っていない。この現象は、一般に金属

材料のもつ特性として知られている。ブルドン管の特性は、圧力計の性能を決定する主要因となるので、きわめて重要である。

ブルドン管の主な 5 つの特性について、以下に説明する。

(1) ヒステリシス

ブルドン管に圧力を加えると、管先は圧力に比例してほぼ直線的に変位する。この変位量を S とする。次に圧力を減じて行くと、増圧時にたどった線に沿わず、図 4.9 に示すように、その上側を通って帰ってくる。この二本の線の垂直距離の最大値をヒステリシスと呼び、この最大値は圧力が最高圧力の約 1/2 のところに現れる。この量を h とすると、 h/S を % で表し、ヒステリシス 0.5 %、0.1 % などとする。この値が小さいほど、優れたブルドン管であるとされる。

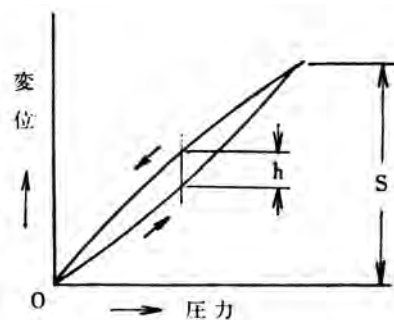


図 4.9 ヒステリシス

(2) クリープ

ブルドン管をその最大圧力に保って長時間そのままに保持しておくと、その間にブルドン管が徐々に変位を増加するものがある。この現象は、いわゆる「ブルドン管のヘタリ」ということで、この量の大きいブルドン管を使用した圧力計は、使用後、まもなく示度に狂いを生じる。中間圧力でのこの現象を「ドリフト」と呼ぶ。図 4.10 において C がクリープ量である。一般に、クリープ量は C/S (%) で表され、 C/S (%) 値が小さいほど優れた弾性のブルドン管となる。

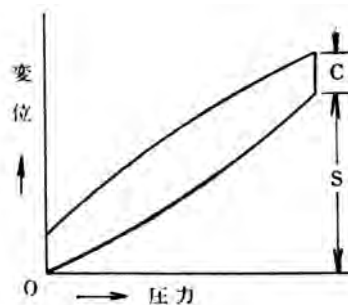


図 4.10 クリープ

(3) 余効果と永久変形

ブルドン管に圧力を加えた後、零にかえしたとき、ブルドン管が元の形に帰らないことがある。図 4.11 において、圧力零において O 点にあった管先が最大圧力を加えて、S の変位をして A 点に達する。次に圧力を減じて圧力を零にすると、管先は O 点に帰らず B 点に帰ったとき、OB の偏差を生じたことになる。このような偏差を生ずるブルドン管は、1 時間あるいは、数時間経過すると、管先は途中の C 点のところまでは帰ってくるのが常である。そして遂に OC だけは偏差として残ってしまう。このとき BC = a を余効果と呼び、OC = P を永久変形と呼ぶ。この場合も a / S 、 P / S を % で表し、それぞれ余効果、永久変形が小さいほど、優れたブルドン管となる。

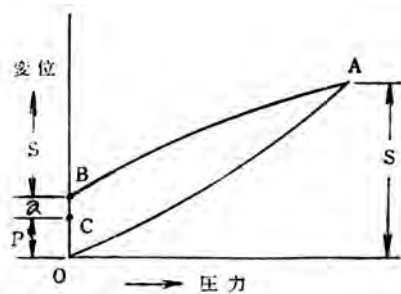


図 4.11 余効果と永久変形

(4) 大きい出力

ブルドン管は良好なばねであると同時に、外部からの振動、動揺に耐え、内機、指針を駆動する原動力となり、大黒柱のような存在である。動力源としてのブルドン管の能力を数量的に表すためには、次式のブルドン管の出力を用いる。

$$E = 1/2 F \cdot S \quad (4)$$

E: ブルドン管の出力 Kgmm

F: ブルドン管管先力 Kg

S: ブルドン管管先変位量 mm

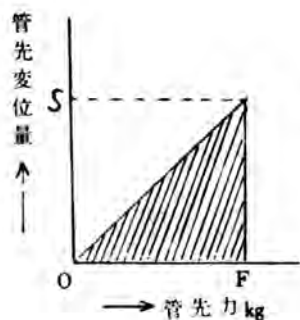


図 4.12 大きい出力

ブルドン管の管先力とは、ブルドン管に呼び圧力を加えて管先を変位させ、この圧力を加えたままの状態

で、管先を圧力が零であったときの位置に引き戻すのに要する力である。管先変位量は、ブルドン管に呼び圧力を加えたときに生ずる管先の変位量である。従って、図 4.12 において前記のブルドン管の仕事量は、斜線部の面積を表わす。ブルドン管の出力が大きいほど、内機を駆動させるエネルギーが大きい。この大きさは、ほぼ 2.5Kgmm 以上あれば、普通の内機を駆動して、JIS 程度の精度を得ることができる。

(5) 高い安全性

圧力計が圧力装置に取り付けられたとき、その装置が安全な圧力のもとに運転されているかどうかを確認するのが、圧力計の役目であるが、同時にまた、圧力計自身もその装置の一員として、圧力装置と同等以上の安全性を保持していなければならない。ブルドン管は、このようにして十分な強度をもつと同時に弾性変形（変位）を生じて指針を駆動しなければならないので、安全性が考慮されるあまり、頑丈で変位が小さすぎるブルドン管は、内機の構造上の理由から、示度が不安定となり、かえって圧力計としての役目は果たせなくなる。ブルドン管は、高い安全性がありながら、しかも必要な変位を生じることができるのが一番で、その設計には最も慎重さを要する。

圧力計の安全性の確認のために、メーカーではブルドン管の加圧破壊試験や寿命試験などが行われている。ブルドン管はフックの法則（圧力と管先の変位が比例する）の成立範囲（弾性限度・弾性限界・比例限度などと呼ぶ）を超えた圧力が加わると、永久変形（圧力をゼロにしてもブルドン管が変形して元の形に戻らないことをいう）を生じて機能を失い、圧力計に狂いが生じる。

ブルドン管を安全に使用するためには、「弾性限度」以内で使用しなければならない。圧力計の最大圧力は、ブルドン管の安全性を考慮して決められる。また、最大圧力以内の使用であっても、圧力の加わり方によっては、圧力計に狂いが生じることがある。そのため、JIS 規格には、使用方法が詳しく規定されている。

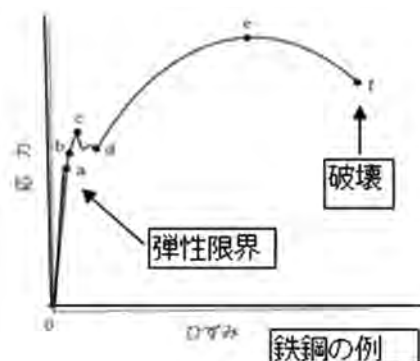


図 4.13 応力-ひずみ線図（鉄鋼の場合）

4.2.2.3 材料

(1) 概要

以下に現在のブルドン管の主な材料の一例を示す。

表 4.3 現在のブルドン管の主な材料例^{(16) (17)}

ブルドン管	低圧用	中圧・高圧用
材料	黄銅 リン青銅 アルミブラス アルミ合金 低膨張合金 ベリリウム銅	ステンレス鋼 Ni-Span C 超合金鋼 (以下、特殊材料) ボーレル CS 鋼 クロム・モリブデン鋼 チタン インコネル ニッケル タンタル ハステロイ モネル

以下に、これまで用いられたブルドン管の材料の変遷を示す。材料やメーカーによって普及した年代にかなり差があるため、年代区分はあくまでも参考程度とした。

表 4.4 ブルドン管の主要な材料の変遷

ブルドン管	1896-1960 年代	1960 年代以降
低圧用	黄銅板・その他板材 銅系(リン青銅(1940 年代)、アルミブラス、 ベリリウム銅(1950 年代))	黄銅系精密管 銅系精密管 各種
中圧用	板材と棒材	ステンレス鋼管
高圧用	鉄鋼棒材	ステンレス鋼管 合金鋼管・各種

明確ではないが、中圧用はリン青銅や鋼鉄などでつくられていた。

(2) 低圧用ブルドン管材料

低圧用ブルドン管の材料には、国産化当初から、黄銅材や、その後開発された、高級圧力計向けのリン青銅(1940 年代)やアルミブラス、ベリリウム銅(1950 年代)などの銅系材が用いられている。しかし、材質は昔のものと比較にならないほど向上している。

戦後間もない 1950 年頃、圧力計の信頼性を揺るがす事件が起こった。当時、国の全数検定によって品質が保証されているはずの低圧用ブルドン管圧力計に対し、大手ユーザーの造船や鉄道関係者からその信頼性を疑う声が相次いで上がり⁽¹⁸⁾、これを機に、国は運輸省や通産省などの主導で、第一線の研究機関、関係学会、大学、専門家、ユーザー、メーカーなどから構成される大規模な調査委員会(1952 年圧力計品質比較審査委員会⁽¹⁹⁾)を立ち上げ、官民挙げての膨大な調査と研究が始まった⁽²⁰⁾。同時に、製造現場を考慮したブルドン管の理論研究が始まり、メーカーは限定

的に理論式を採り入れ始めた。

「工場出荷検査や検定では合格品とされた圧力計が使用中にトラブルを生じる」というこの問題は高度経済成長期にも発生したが、その原因は、金属材料の製造工程に特有の、ブルドン管材料の結晶構造や組織に関わるものであることがわかった。さらに、研究によって、ブルドン管の製造過程もこうした欠陥を発生させ、成長させることが判明した。しかし、この時点では、製造工程で欠陥を見出すのは非常に困難であった。

上述の委員会から発展したチームは、後年起こる同様の事故に一つ一つ精力的に取り組み、ブルドン管に関する破壊や寿命の試験を主にした研究で、応力疲労破壊、応力腐食割れ、粒界腐食割れ、水素脆性破壊などを少しずつ解明して行った。東大の吉沢武男教授は圧力計メーカーと共同研究を行い、特にブルドン管の疲労と寿命に関わる長期間の実験結果を発表した。その後も、圧力メーカーは、さまざまな試験設備の開発や試験データを積み重ね、ブルドン管の諸問題の解決に力を注いだ。その結果、1950 年頃の JIS 規格の実現に限界を感じていたメーカーの技術力は格段に向上し、1970 年頃には規格条件を容易にクリアできるまでになった。そして、1980 年代には、一般圧力計に使用するブルドン管材料の大きな問題は解決され、ブルドン管圧力計の性能と品質が飛躍的に向上した。

当初の材料には黄銅系の板材が用いられていたが、戦後、黄銅系精密管メーカーの誕生に伴い、一般配管用黄銅管が市場に出現した。圧力計メーカーは精密管メーカーと共同開発を行い、約 2 年後にシーム管(継ぎ目のある管)を完成させたが、継ぎ目の信頼性が懸念され、性能も十分でないことから採用を断念した。その後、シームレス管(継ぎ目のない管)が市場に出現し、約 1 年を経て、再び、精密管メーカーとの共同開発によって、ブルドン管に使用可能な精密真直管(素管)が完成された。その後、板材は約 5 年から 8 年かけて、すべて管材(素管)へと置き換わって行った。その移行期間は圧力計メーカーによって大きく異なる。

材料の種類も増え、性能や品質も向上し、素管の種類は徐々に増加して行った。乱尺であった長さにも、直径約 25 φ mm、肉厚約 2mm、数メートルの長尺が登場したが、使用する素管の寸法は、圧力計メーカーにより異なっていた。以来、板材を用いた製造は行われなくなったが、現在でも例外的に、精密管の製造が難しい特殊サイズや特殊材料のブルドン管については、板材が使用されている。しかし、その生産量はきわめて少ない。

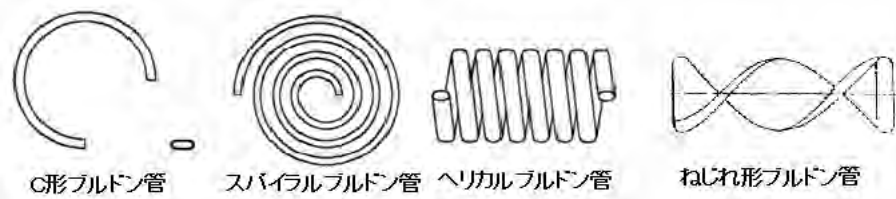


図 4.14 ブルドン管の形状⁽²¹⁾

(3) 中圧用ブルドン管材料

中圧用ブルドン管には、現在、主にステンレス鋼管が用いられる。なお、ステンレス鋼管の登場以前は、圧力計業界ではブルドン管の圧力区分を「低圧用」と「高圧用」の2種類としていたため、「中圧用」という区分が存在せず、上の表でも、当時の慣習に倣って、1960年代以前の「中圧用」を空白としてある。

1950年代に誕生したステンレス鋼管（シームレス管）は戦後生まれの新素材である。ステンレス鋼管の登場は、それまでの高圧用削り出しブルドン管や特殊材料で対応した、約10MPaから70MPaまでの圧力に対応できるようになった。また、原子力発電所用、高耐熱用、高耐蝕用など、新たな用途向けのステンレス鋼管の材種開発も進んでいる。一般に、ステンレス鋼管は、耐蝕性、耐熱性、耐化学薬品性に優れており、現在も需要が拡大している。

(4) 高圧用ブルドン管材料

中圧用で述べたように、ステンレス鋼管の登場以前は、圧力計業界におけるブルドン管区分には慣習的に「中圧用」がなく、「低圧用」と「高圧用」の2種類しか存在しなかった。しかも、当時の技術の限界から、「高圧用」の計測領域は厳密には、現在の中圧以上から高圧下領域を対象とした「中圧用」であった。

正確な資料は存在しないが、国産化当初は性能のよい材料がなかったため、鉄鋼の棒材が使われており、昭和に入り、合金鋼の棒材が使用されるようになった。その後、ステンレス鋼管（1970年代）やステンレス鋼の細管（1980年代）が開発され、特殊ヘリカルブルドン管の誕生につながった。さらに、モリブデン鋼材の登場は超高圧（500MPa）の実現の一翼を担った。

なお、低圧用、高圧用ともに、現在でも、国内で入手困難な特殊材料には輸入材料が使用されている。

4.2.2.4 形状

(1) 巻き形状

「ブルドン管」は丸管（断面円形の真直管）の断面を扁平につぶしてコイル状に成型したもので、その形

状により、C形、スパイラル形、ヘリカル形、ねじれ形などが存在する。

どの形状も原理的には同じだが、多用されているのはC形である。C形は、弾性変位をあまり大きく取れないが、生産性に優れるため、生産量がもっとも多い。スパイラル形あるいはヘリカル形は巻き数を増やすことにより大きな弾性変位を取り出すことができ、また応力を低くするなど、特殊な用途（精密な計測器・調節計等）や高圧用に使用することが多い。中でも、特殊ヘリカル形ブルドン管はモリブデン鋼などの高張力材料の登場や、形状設計などの研究開発により、超高圧（500MPa）に対応できるようになった。

(2) 断面形状

ブルドン管の断面形状については、研究者によって図4.15が発表されている。

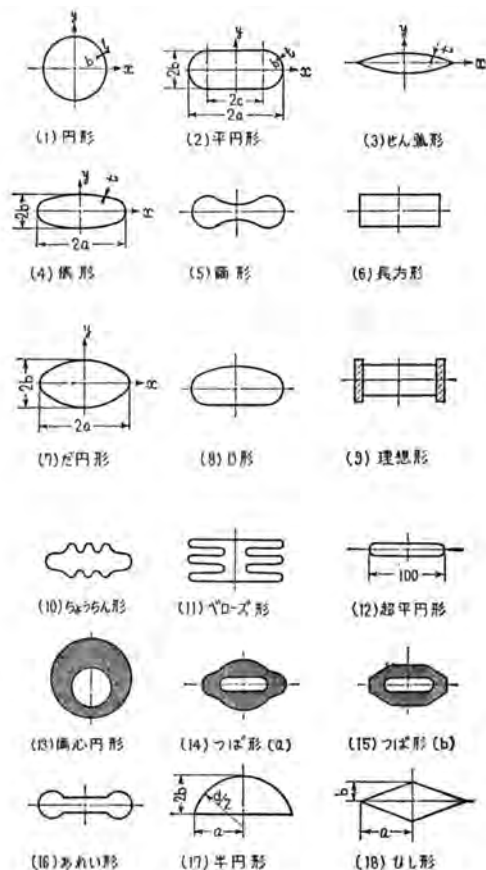


図 4.15 ブルドン管の断面形状⁽²²⁾

一般的には平円形、長円形、楕円形、D形や円形に近いものなどが使用されているが、多用されているのは平円および長円である。



図 4.16 ブルドン管の断面⁽²³⁾

なお、温度計（封入式）には、断面を潰した（図 4.15 左下隅のアレー形）ものが使用されている。

低圧用ブルドン管の断面形状は、板材時代には平円形が一般的であったが、管材への移行を機に、さまざまな長円形が開発された。元来、C形ブルドン管の長円形は、理論上、ブルドン管の剛性を高めることが知られており、板材時代の終わり頃から一部のメーカーでは製造されていたが、安定したものを製作するのは技術的に困難であった。しかし、管材の使用で長円が実現できるようになった。

4.2.2.5 製造技術^{(24) (25)}

ブルドン管の製造の特徴を以下に示す。

(1) 低圧用ブルドン管の製造技術⁽²⁶⁾

低圧用ブルドン管は主に冷間成形でつくられる。製造工程は、戦後、大幅に変更された。

表 4.5 低圧用ブルドン管製造の主な特徴

年代	1896 頃- 1960 年代	1960 年代以降
材料形状	板	管
断面形状	平円	長円の実現化
製造手段	熟練工による手工業	機械化、自動化
ブランク	1 個取り	多数個取り（自動化の場合）
成形機	2 本、3 本ローラー成形機	ローラー成形機の改良、自動成形機の開発

国産化当初から板ブルドン管製造は 1 個ずつ熟練工がつくるため、手間ひまがかかったが、管材の登場は、機械化、自動化を促進し、生産性を飛躍的に向上させた。また、板材から管材への移行により、従来、1 個取りしかできなかった素管の多数個取りが可能になった。一方、製造ロットが 1 個から 10 個程度のブルドン管では、管材への移行により、定尺素管から 1 個取り生産が可能になり、その合理化が進んだ。

ブルドン管の成形に使用されローラー成形機は、ブルドン管の大きさ、肉厚、作業姿勢などによりさまざ

まのサイズのものがつくられた。



図 4.17 ローラー成形機（株）荏原計器製作所提供

ブルドン管の成形には、2 本式と 3 本式ローラー成形機が使用されるが、この作業は、メーカーに蓄積されているノウハウに基づく、いわゆる高度な経験と匠の技を必要とする。ローラーは鋼材でつくられ、焼き入れ研磨される。成形によりキズが付き摩耗するが、わずかのキズもブルドン管に転写し、悪影響を与えるのでつねにキズは修正される。摩耗はブルドン管の性能や品質に影響するため、再研磨されるが、成形条件も変わるため、適宜、新品に交換される。

管材への移行により、ロール成形機の改良開発も行われ、ブルドン管の性能、品質、生産性が向上した。また、これとは別に、ブルドン管自動成形機（多数個取り）の開発なども行われているが、それらのすべては専用機で、次々と開発されている。

ブルドン管製造に使用される測定機器工具の一例を以下に示す。工具類も時代とともに性能が向上し小型化が進展した。

表 4.6 低圧用ブルドン管の製作に用いられた機器工具（例）1960 年代

メーカー 製作機器等	成形機、金敷（金床）、スコヤ、木槌、金鋸、手鋸、適圧試験機、各種芯金、銀ロウ剤、各種模範、型類、充填剤
購入機器 工具等	トーチランプ、ガスバーナ、酸素・アセチレン溶接器具、金切鋏、坩堝、熱処理炉、マイクロメータ、ダイヤルインジケータ、ノギス、金属スケール、光学スコープ、光学顕微鏡

低圧用ブルドン管では、その後、管材への移行により、これまで熟練職人によって手づくりされていた「板から管」への製造工程は完全になくなった。また、管材の登場は、従来の難しいとされた長円形断面を可能にした。

以下に、従来行われていた板材を使用した C 形ブルドン管（平円形断面）の製造工程例を記す。当時の

技術的記録や、設備はほとんど残されていないため、メーカーやそのOBによるオーラルヒストリーを基に当時の製造工程を紙上で再現した。

東京計器（株）、長野計器（株）OBによるオーラルヒストリー

取材日時：平成20年7月7日

取材場所：長野計器（株）（長野県上田市）

参加者：現役、および、70-90歳代の元研究所・技術部関係の圧力計担当者11名



図 4.18 東京計器（株）、長野計器（株）関係者（前列右端が筆者）

板材を用いた低圧用ブルドン管（平円断面）の製造工程

① ブランクの製作

ブランクの製作はブルドン管製作の基本である。品質検査を終えた板材料（黄銅系材料）から、ブルドン管の元となる素管をつくるためのブランク（板）を製作する。ブランクの長手方向と板の圧延方向を合わせて、1個分のブルドン管に対応する面積の黄銅板を金切鋸で切り取り、反りや歪みを修正して、短冊形のブランクをつくる。以下、すべての工程、作業は、きわめて難しく、熟練の匠の技によって行われた。精密な管と円滑な合わせ目であることがきわめて重要で、手作りでは最高難度の幅広い技量が必要であった。

② 角形など管の製作

ブランクを型にのせてプレスで型押しし、角形その他の形に成形する。溝の形状寸法や型はブルドン管の形状に合わせ、さまざまなものが作られた。

押し型は、ブルドン管の断面サイズごとに「押し型」と「芯金」のセットでつくられる。形状寸法を測りながら、型と木槌（または金鎚）と芯金を使い、各工程での指定形状寸法に仕上げる。

③ 偏平管の成形

管に芯金を入れ、木槌、金鎚などを使い、矩形断面、または円形断面のまっすぐな管を成形する。合わせ目は、うねりなく真っすぐで、全長にわたり隙間のない



図 4.19 金敷と鎚⁽²⁷⁾

（和田嘉衡の国産化圧力計第1号に用いられたブルドン管加工専用工具）（1896年頃）東京計器（株）を経て、現在、長野計器（株）で保管

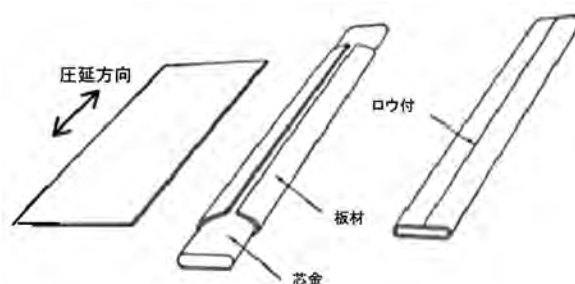


図 4.20 材料ブランクと成形⁽²⁸⁾（合わせ目はロウ付け）

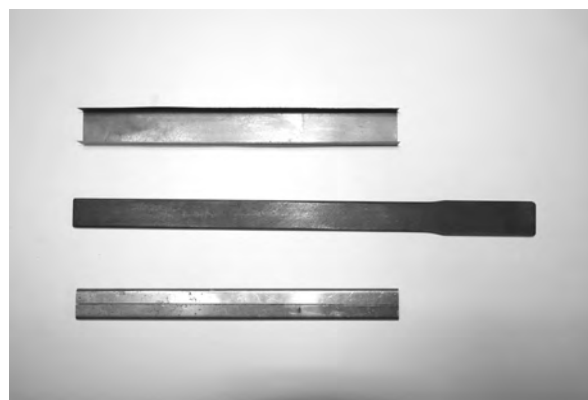


図 4.21 黄銅ブルドン管の成形（中段は芯金）
（株）荏原計器製作所 試作品 2008年

ようにつくる。

④ 管の合わせ目の接合

管の合わせ目に、銀ろう剤を一様に塗布し、トーチランプで素早く加熱して接着する。ろう付作業はやり直しがきかず、過熱は管のねじれや変質を引き起こし、薄い管は溶けて破れ、加熱不足は修正が難しく不良となるため、ろう付け作業は専門の熟練職人のみによって行われた。

銀ろうは、Ag、Cu、Zn、Cd、N、Snなどからなる合金で、鉄鋼、ステンレス、銅合金などを、母材を溶かさずに高い強度で接合することができるため、ブ

ルドン管製作に使われる。成分割合によって溶融温度が約 605 ～ 815℃の範囲となる。メーカーでは、使用材料、板厚などから合金の混合割合を決め、天秤で量り調合して坩堝に入れて加熱溶解し、棒状の型に流して銀ロウ棒をつくる。銀ロウ棒をやすりで削り、銀ロウ粉をつくり、これを硼砂と混ぜ合わせて銀ロウ剤をつくる。ブルドン管の肉厚によって銀ロウの成分を変えたものが使用された。高度経済成長期には、各種銀ロウ線材が市販されるようになったが、メーカーによってはその後もこの方式が続けられた。

ロウ付け後、偏平管には、湯洗浄、中和剤処理などが施される。

⑤ハンマリング（絞め）

ブルドン管のばね性を高める作業で、ブルドン管を初めて国産化したときに、性能改善のきわめて有効な手段として発見され、以降、この方法が広まり定着した。



図 4.22 ハンマリング

ハンマリング作業は素管（偏平管）に専用の芯金を入れ、金槌で管の両平面を均一にむらなく一様に叩く。この作業は性能を出すためにとても重要で、特別な専門職人の仕事であった。打痕が深く、ムラがある場合、そのブルドン管は不良となる。叩き台には金敷（金床）が使われた。材料硬度、板厚、材種によっては、ハンマリング作業を行わないものもある。精密素管を使用するようになってから、この工程までが完全に姿を消した。ブルドン管の大きさにより、叩く回数は異なるが、1 個について百回程度から数百回、大きいブルドン管については千回を超えた。神経を使い、気の抜けない作業であった。

⑥C形ブルドン管（平円形断面）の成形

偏平管に芯金を入れる。芯金は、偏平管の内径と長さに合わせて、適度な硬さの薄い黄銅板（厚さ約 0.3 ～ 0.6mm）でつくり、重ねて使用する。肉の厚い、硬度の高い偏平管は、芯金を使用せずに成形することがある。これを空曲げという。

偏平管を 3 本ローラー成形機に手で挿入して取り出す。

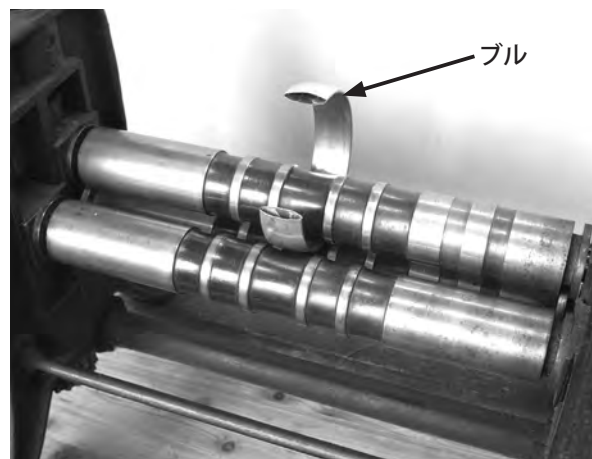


図 4.23 ブルドン管の成形（株）荏原計器製作所提供 2008 年

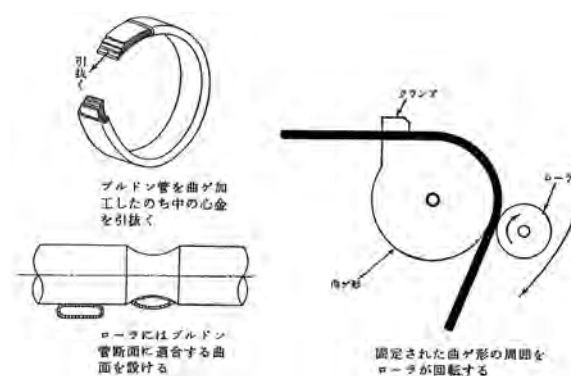


図 4.24 低圧用ブルドン管の成形⁽²⁹⁾

これを 10 数回以上繰り返して C 形に成形し、ブルドン管が完成する。



図 4.25 100 φ C形ブルドン管（株）荏原計器製作所提供 2008 年

成形はデータに基づいて行われるが、バラつきがあるので、安定性の高いものは別として、大半は製造ロットごとに試作が行われる。

⑦芯金の取り出しと適圧試験

ブルドン管が所定寸法に仕上がったら、芯金を取り出す。ブルドン管の断面形状寸法を確認し、両端に専用治具を取り付け、適圧試験機で管先移動量を測定する。適圧が適合した場合は、ロット生産に入る。

表 4.7 ブルドン管の製造工程（板から管製作まで）⁽³⁰⁾
旭計器工業（株）提供

項 次 案 号		製 造 規 格		制 定 年 月 日	頁
資料—1		製 管 作 業		昭 和 年 月 日	1 / 2
製 管 作 業					
摘 要		φ 7 5 以 上 低 圧 用 (板材成形品)			
作業名	番号	工 程	使用機械及び治工，検査具	注 意 事 項	
材 料 切 断		材料切断	シエアー，板ゲージ (板-19，板-20)	① 板材の圧延方向に長く とること ② 検査最初の1枚及び 100枚毎に端面と 両側面の直角度を検 査する	
準 備 作 業	1	鈍し	電気炉，熱電対	30枚つくり炉に入れ る。 温度550～600℃ 時間 1時間	
	2	口切り	金挟み	 35mm	
銀 鍍 付	3	溶接部ミガキ	ヤスリ	完全にスケールを取る	
	4	返り取り	ヤスリ		
	5	ボンス押し	手押しボンス	溝に完全にはめること	
	6	口合わせ	金ハンマー	最初は荒合わせし、そ の後本合わせすること	
	7	硼砂塗り	硼 砂	高低の波が出来ない様 に注意の事 ① 内外共充分塗布する こと (塗布状態チエ ック) ② 硼砂は3倍に薄める こと	
	8	銀鍍付	酸素，アセチレンガス， 銀鍍，吹管60%	加熱しないこと	
酸 洗	1	酸洗い	稀硫酸	ボーメ度15～20 1時間滲漬	
	2	洗浄	水		
	3	脱水	電気炉	温度400～450℃，時間 10～20分	
			承認		作成者

不適合の場合は、再試作を行う。完製品は次工程に送られる。現在においても自動化設備で生産されるものは別として、ローラー成形の場合は、試作が行われている。材料組織分析については、成形工程中に抜き取りで行われることもあった。参考資料として表 4.7 に製造規格資料を掲載する。

以下に管材を用いた低圧用ブルドン管の製造工程を記す。直接管材を用いるため、それまでの製造工程における「板から管」をつくるまでの工程（前述の①から⑤）は完全に不要となった。

管材を用いた低圧用ブルドン管（長円断面）の製造工程

①素管の1個取り

まず、材料となる素管をブルドン管1個取りの長さに切断する。

②C形ブルドン管（長円形断面）の成形

素管を2本ローラー成形機に挿入し、断面が長円形となる管を成形する。ローラーには長円の円弧溝のついたローラーが使用される。続いて、管に充填剤を入れる。以降の基本的な工程は、板材と同じである。

【充填剤】

充填剤の研究は板材時代の後半頃からすでに行われていたが、管材への移行を前に各メーカーでいろいろな充填剤が本格的に検討開発された。充填剤は、ブルドン管の材質、大きさ、厚さ、硬度などにより、軟質のもの、硬いもの、などで使い分けられる。成形には適度な粘性と硬さが必要とされる。充填成形されるブルドン管の肉厚はおよそ0.3～2mm位の範囲で、充填剤には、成形時の熱で溶けたり変質したりしないもの、硬さが変わらないもの、管内に面圧力が一様に働くもの、管に付着しないもの、管に化学的影響を与えないもの、成形後に管から容易に洗い出しできるもの、などの条件が要求される。これらの条件を満たすものとして、松脂（チャン）、蜜ロウ（蜂蜜）、油脂、砂（粒度の細かいものが指定される）その他が使用される。代表的な低溶融金属（80～90℃前後の湯で溶融する合金で成分は鉛、錫、ビスマス、カドミウムなど）であるセロベントは、厚肉の扁平管成形に使用され、成分金属が自社で調合されていた。現在もセロベントは使われている。

上記のほかにもさまざまな充填剤が開発されたが、その詳細は圧力計メーカーの企業秘密となっている。砂は、現在でも、リン青銅素管や、ステンレス鋼素管の長円断面成形に使用されている。

なお、内面の鏡面仕上げ、特別清浄度を必要とする、1980年頃に開発された半導体用ブルドン管には、特殊な充填剤が使用されている。

長円形断面の実現は、「良質の充填剤の開発」、「成形方法の試行実験」、「薄い肉厚（約0.2mmもついていた）のアルミブラス、リン青銅などの精密素管開発」、「剛性、精度を高めた長円の円弧溝をもつ3本ローラーの開発」、「成形機への高剛性ベアリングの開発採用」などの技術の集大成によるものである。これにより、難しいとされていた低圧下側領域にも対応でき、従来の水銀式液柱形圧力計や弾性素子微圧計から置き換わって行った。この低圧用の技術開発は、後述のステンレス鋼管やその他の特殊材料にも適用されるなど、画期的なことであった。

特に芯金と充填剤の開発は、現在の技術でも製造の難しい薄肉高剛性ブルドン管の開発を成功に導くなど、ブルドン管の新たな技術面や生産面を切り開いた。この長円断面は、平円断面では実現できないブルドン管の剛性（強い管先力）が得られることで、従来できなかった用途に対応ができることとなった。

(2) 中高圧用ブルドン管の製造

黄銅管と同様、圧力計メーカーは、設立間もない精密管メーカーと共同開発を行い、約2年の歳月を経て、1970年代初頭、精密なステンレスブルドン管の素管を完成させた。当初は管のサイズも少なく、長さも40cm程度の乱尺であった。やがて直径22mmφ、肉厚2mm、長さ4m、6mなどが生産されるようになった。使用する管のサイズは、圧力と圧力計の大きさにより異なる。材質や精度等級などを別にしても、JIS規格（ブルドン管圧力計）相当品だけでも、対象圧力（10MPaから70MPa）や大きさ（50mmφから200mmφ）に非常に幅があり、管の種類は数百種類に上る。

中圧用（棒材使用）と高圧用の基本的な製造工程は同じである。戦前から1980年頃まで、高圧用は、鋼棒材を削り出して、熱間成形でつくられていた。その後、管材の登場によって、棒材削り出しは完全になくなった。以下に、高圧用ブルドン管の棒材削り出しによる製造工程を紹介する。

棒材削り出しによる高圧用ブルドン管の製造工程

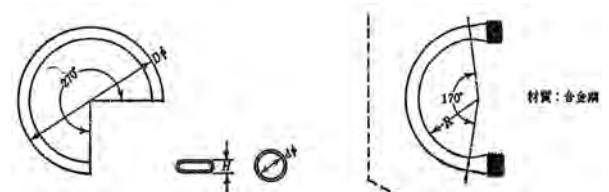
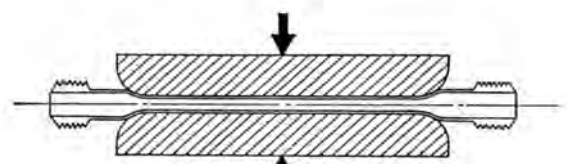


図 4.26 高圧用C形ブルドン管⁽³¹⁾

- ①鋼棒材から、ブルドン管の圧力、大きさなどに合わせて、ブランクをつくる。
- ②ブランクを機械加工し、両端にねじを付け、ブランクの中心に細い長孔をあける。断面は、同心で正確に加工される。孔はリーマ加工され、精密、平滑に仕上げられる。
- ③素管は熱処理炉で焼き入れされ、外形は研磨加工さ



(a) 丸棒を素材として、内径はリーマによって、外径は研削によってそれぞれ一定の仕上面とする。



(b) プレスで押潰して、断面の形状を作る

図 4.27 高圧ブルドン管の素管成形⁽³²⁾

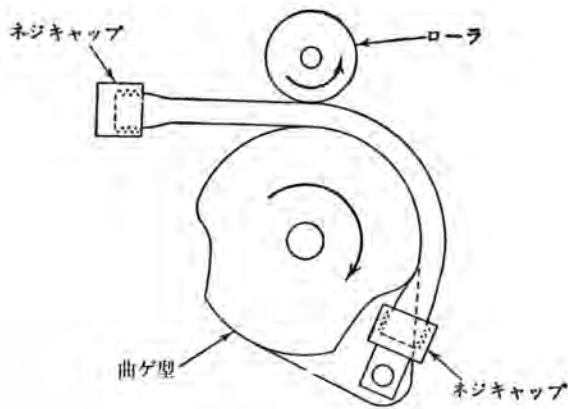


図 4.28 高压ブルドン管の熱間成形⁽³⁴⁾

れる。以下は、試作として1個または数個がつくられる。

- ④素管は炉で加熱され、ブルドン管曲げ機（図 4.28）で熱間成形される。
- ⑤熱間成形により、C形ブルドン管の断面の腹と背側が潰れる。潰し量は低压ブルドン管に比べて小さい。ブルドン管の断面形状、巻き径などを所定寸法に仕上げる。
- ⑥ブルドン管は熱処理炉で焼き戻し、調質処理され、スケールを薬品で落とし、脱脂、湯洗浄を行う。
- ⑦硬度、形状断面寸法などが測定され、高压適圧試験機で変位量などが測定される。
- ⑧適合した場合は、ロット製造される。

高度成長期には、高压用削り出しブルドン管用のさまざまな新鋭設備が開発強化された。これらの設備はその後の高压用圧力計や超高压用重錘形圧力計の開発にも使用された。

戦前から中高压用として存在した「棒材削り出しブルドン管」は、ステンレス特殊ヘリカルブルドン管の登場で姿を消して行った。特殊ヘリカル形ブルドン管は、当初、圧力が10MPa程度の低いものであったが、モリブデン鋼その他の高張力材料や、形状設計などの研究により、超高压（500MPa）まで実現できるようになった。

4.2.3 内機^{(35) (36) (37) (38) (39)}

(1) 構造と一般特性

内部拡大機構（JIS 圧力計での名称）は一般に内機と呼ばれる。

内機は精密機器で、ブルドン管とともに圧力計の性能を決定する重要な機能部品である。内機はロッドでブルドン管の管先と接続され、管先の「変位」が調整子、セクタ、ピニオン歯車により拡大回転される。ピ

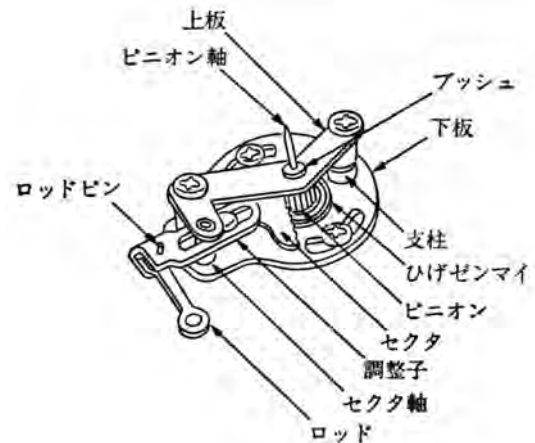


図 4.29 内機（JIS 規格より抜粋）

ニオン軸には指針が固着されており、指針は圧力に比例して270度回転し、目盛板の圧力指示値を目視で読み取る。



図 4.30 内機と指針 西計器工業（株）提供

内機に求められる一般的特性は次のとおりである。

- ①軽く円滑な作動をすること
- ②「変位-指針の回転」の伝達誤差が小さいこと
- ③圧力スパンに対する直線性が良いこと
- ④ひげゼンマイの弾性性能が優れていること
- ⑤ひげゼンマイの絡みや取り付け部の折損がないこと
- ⑥耐振性があること
- ⑦耐摩耗性があること
- ⑧耐熱性があること
- ⑨耐食性があること

これまでこれらの特性を考慮したさまざまな内機が開発されたが、すべての条件を満たす内機は存在しない。

内機にはこの他、内機の摩耗、指針の振れ防止対策として、油入り圧力計やヘリコイド内機（精度は若干下がる）、防振内機（ピニオン軸に羽根を付けて粘性液に浸したものの、小形内機）、直動形圧力計（内機を使わないもの）などが開発された。こうした対策を施した内機は圧力計に組み込まれるが、内機だけでは不十分な場合もあり、その場合には「アクセサリ」と呼ばれる有効な機器や器具を使用する。特に、油（グリ

セリン) 入り圧力計は、脈動圧力対策、内機摩耗対策として大変有効である。

(2) 歯形

内機の歴史は古い。内機には、当時、ヨーロッパで発達していた時計技術が用いられたため、ブルドンが1849年にブルドン管圧力計を発明し、特許を取得した時点で、すでに内機の基本形は完成していたと推定される。

わが国においては、終戦の1945(昭和20)年頃までの一般的なブルドン管圧力計は、比較的用途が狭く、激しい変動圧力のない低圧用で、内機は黄銅が主体で種類も少なかった。

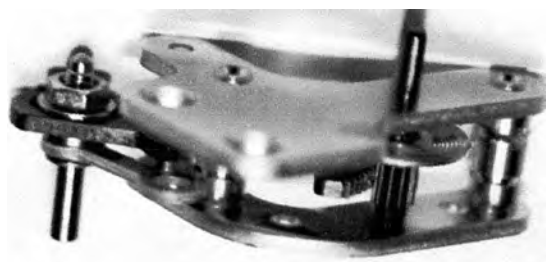


図 4.31 60 ϕ 用内機(黄銅製) 長野計器(株) 提供

しかし、戦後、新たな産業が誕生すると、液体を移送する歯車ポンプが開発され、それに圧力計が数多く使用された。振動や脈動を激しく生じさせる歯車ポンプは、圧力計の指針の折れ曲がりや脱落、内機の歯車の摩耗を激しく進行させ、圧力計の寿命は短かった。

産業界の多様なニーズを受けて、内機のさまざまな開発・改良が行われた。JIS には内機摩耗試験が規定され(現在は除外)、各メーカーは独自に改良を進めた。わが国では1964(昭和39)年に内機専門のメーカーが誕生した。研究を重ねた圧力計メーカーは歯形の変更を行った。それは内機の歴史では大きい出来事であった。

ブルドンの時代から、内機はヨーロッパの時計技術

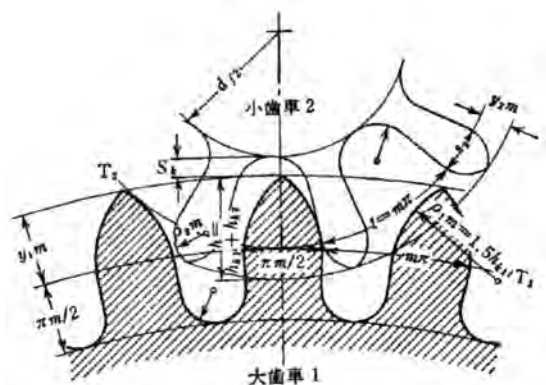


図 4.32 サイクロイド歯形⁽⁴⁰⁾
ISO/TC 60 144.1 (1958)

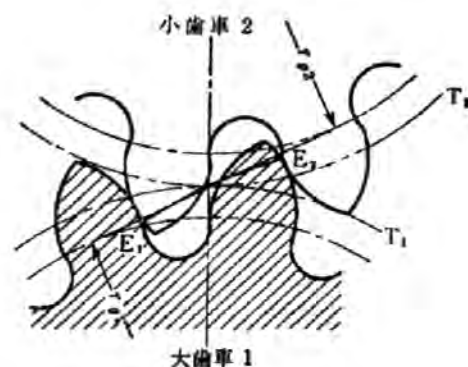


図 4.33 インボリュート歯形⁽⁴¹⁾
Eta 社(スイス 1943)

によりつくられたため、その歯車(ピニオンとセクタ)の歯形は、腕時計の歯車に採用されているサイクロイド歯形であった。

しかし、1967年頃、わが国でブルドン管圧力計内機の摩耗問題が起き、大学や圧力計メーカーで歯形の研究や実験が行われた結果、内機の歯形には「サイクロイド歯形」より「インボリュート歯形」の方が適していることが確認され、それに切り替わって行った。その論拠となる比較表を表 4.8 と表 4.9 に示す。

表 4.8 内機と時計の歯面負荷の比較

項目	内機	時計
歯車の回転方向	正回転と逆回転を繰り返す	一定方向
歯車の回転速度	一定でない	一定
加速度	激大	ゼロ
歯面に生じる力(面圧力)	衝撃的で強大	一定で小さい

上の表のとおり、内機の歯面に生じる力は時計に比べて甚大であることがわかる。

次に、インボリュート歯形とサイクロイド歯形の比較表を紹介する。

表 4.9 インボリュート歯形とサイクロイド歯形の比較

項目	インボリュート歯形	サイクロイド歯形
スベリ(理論)	生じる	転がりのため、スベリを生じない
回転速度(一歯)	一定でない	一定
歯の強度	高い	低い
加工	容易(直線切削加工)	困難(複雑な曲線加工)

さらに、インボリュート歯形には、歯数に関係なく、モジュールが同じであれば、ホブが使用できる。また、

修正歯形や転位歯形が設計でき、歯の強度を強くできる。ホブはサイクロイドホブに比べて安価で、許容されるクリアランスで精度のよい内機が得られる。

一方、時計に用いられるサイクロイド歯形は曲線加工となるため、ホブはつくり難く高価である。歯車(大小の歯数の組み合わせ)の歯数が変わると、モジュールが同じであっても、ホブは正確な歯切りができず使用できない。歯形の加工および内機の組立はインポリュートに比べて高い精度が必要である。精度が出ない場合(歯車の軸間距離が正確でない場合など)、サイクロイドはスベリが大きくなり、摩耗が増大する。

以上の結果、内機の歯形はインポリュートに変更された。ただし、歯面に強い力が働かない微圧計や超精密圧力計などには、現在でもサイクロイド歯形が使用されている。

セクター歯車の樹脂一体精密モールド成形
(軽量化、耐摩耗性向上)



図 4.34 玉付ハール (ひげゼンマイ) 100 φ用
1970 年代 長野計器 (株) 提供



図 4.35 モールドセクタステンレス鋼 100 φ用
1970 年代 長野計器 (株) 提供

(3) ひげゼンマイ

従来、圧力計に使用するひげゼンマイ(ハールともいう)の材料や加工には特殊な技術が必要で、圧力メーカーでは製造していない。また国内にある専門メーカーもきわめて少ない。ひげゼンマイは、特殊合金の薄い板(いろいろあるが、幅1~1.5mm、厚さ0.1~0.25mm程度の長いリボン状)を渦巻き状にしたもので、時計のひげゼンマイと形状は似ているが、腕時計の場合は、動力エネルギーとしてテンプ、ガンギ車などと組み合わせられ等時性(時間精度)を目的に、圧力計の内機の場合は、微小な遊びを取り除くことを目

的に使用される。この遊び(がた、バックラッシュなどという)は、圧力計の場合、圧力の増減がつねに繰り返されるため、わずかであっても精度に影響する。この“がた”を、ひげゼンマイによって一方向に吸収する。

内機のひげゼンマイは指針軸に取り付けられ、指針の回転角度270度回される。圧力計には静的な圧力だけでなく、動的な圧力が加わることが多い。この動的圧力(変動圧力)はブルドン管と指針や内機に大きな慣性力を生ずる。ひげゼンマイは、270度巻き込まれるが、力の変化が小さいほど圧力計の精度はよくなる。巻き数を多くすると力の変化は小さくできるが、ひげゼンマイの復元力は弱まり、また、フラツキを生じて内機の歯車などに絡みついて圧力計を損傷する要因となる。一般に使用されているリン青銅板では、温度変化によりひげゼンマイの長さや強さが変わる。つまり、精度が低下する。圧力計のひげゼンマイは、時計とは異なる厳しい条件下で使用される。

1960年代頃より、産業技術の発展に伴い、それまでの静圧的使用から、ギヤポンプへの使用などの変動圧使用が増加した。圧力計メーカーでは、高靱性、恒弾性、低線膨張係数材料など、ひげゼンマイの改善研究が行われ、ひげゼンマイ絡み防止板や指針の針をはじめ、駆動部の軽量化が行われた。現在では圧力計の用途や種類が増えるに従い、圧力計ごとに最適な材料(価格を含めて)、巻き数と巻き定数が決められ、いろいろなひげゼンマイが開発使用されている。また、JIS規格では、前述したように圧力計の使用方法について規定されている。

大手腕時計メーカーは、昔から自社の専門工場でひげゼンマイをつくっている。現在でも腕時計のひげゼンマイの調整は機械ではできないため、1個1個職人によって微調整が行われている。

圧力計に使用するひげゼンマイは、専門のメーカーに開発依頼した特注品を使用し、最終的に熟練工によって、巻き数が微調整され組み立てられているが、腕時計メーカー同様、ひげゼンマイの詳細な工程内容、技術は昔から企業秘密である。

東南アジアでは品質の良い内機のひげゼンマイを製造できないため、日本から購入しているといわれている。

(4) その他

歯形以外にも、内機にはさまざまな技術の変遷がある。国産化当初の内機には軸受がなかったが、戦後、サファイヤなどの宝石を用いたピボット軸受や、精密圧力計向けにミニチュアベアリングを用いたものなど、さまざまなものが開発されている。現在、低価格

品には軸受のないものが多い。

その他、歯厚の変更、調整子のない内機の開発（小型量圧力計に適用）、回転摺動部の異種材料の開発、内機の標準化、吊り内機（株質量の削減と加工工数の低減）、カシメ組立（従来ビス組立していたものをカシメにした。これらは小形圧力計に採用され生産性、コストの改善向上となった。大形圧力計、精密圧力計の内機はビス組立である。

4.2.4 株

株の種類は、材料、形状、大きさなどにより、きわめて多いが、微圧計の株には、一部の例外を除き、特殊な株（構造により株と呼ばない場合もある）が用いられる。図 4.36 に JIS 形圧力計に採用されている株の一例を示す。



図 4.36 株の例 長野計器（株）提供

以下は、図 4.36 株の大きさと形状、材質である。

- ① 100 φステンレスロストワックス
- ② 100 φ黄銅鑄造
- ③ 60 φステンレス型鍛造
- ④ 75 φ黄銅型鍛造
- ⑤ 100 φステンレス四角棒材
- ⑥ 60 φ黄銅四角棒材

株には接続ねじ（オス）が付され、中心にはブルドン管に通ずる細い圧力導通孔が設けられている。接続ねじには JIS 規格により、JISB6202 管用平行ねじ-2005、JISB6203 管用テーパねじ-2005 がある。圧力計の大きさにより、普通管用平行ねじが用いられ、形状、寸法が規定されている。圧力計を機械装置に取り付ける際には、ねじサイズ、圧力、測定媒体などに対応した適切なパッキンを使用する。

表 4.10 ブルドン管の接続ねじ⁽⁴²⁾

大きさ mm	50	60	75	100	150	200
管用ねじ	G ¹ / ₄ B 又は R ¹ / ₄		G ³ / ₈ B 又は R ³ / ₈		G ¹ / ₂ B 又は R ¹ / ₂	

この接続部の形状・寸法は図 4.37 による。

表 4.11 ブルドン管の接続ねじ⁽⁴³⁾

単位 mm

D	G ¹ / ₄ B	G ³ / ₈ B	G ¹ / ₂ B
L	14(16) ⁽⁷⁾	18	20

注⁽⁷⁾ () 内の寸法を採用してもよい。

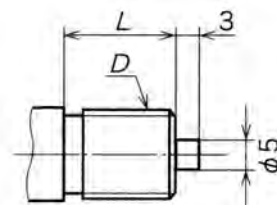


図 4.37 ブルドン管の接続ねじ⁽⁴⁴⁾

株には機構部品（弾性素子、内機、ケース（外枠、内枠）および目盛板など）が装着されるため、剛性、耐圧気密性、接着性、加工性などが要求される。

株の耐圧と漏れ検査は重要である。株にブルドン管と管先を接着した後、圧力とリークレベルによって、『圧縮空気を用いた水没検査』『フレオンなどの気体を用いた検知管検査』『H₂、He ガスを用いた検知管検査』などが耐圧検査とともに行われる。

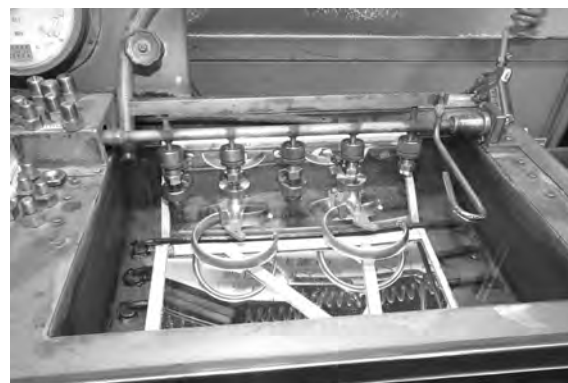


図 4.38 株組立の水没気密検査 長野計器（株）提供
1984 年

株は形状が複雑なことから、国産化当初は黄銅鑄物でつくられていた。しかし、徐々に圧力が高くなり、また、鑄物特有の巣不良があることから、耐圧強度に重点を置いた材料や素形、加工、接着などの技術開発が行われ、その結果、材料の性能や品質が向上し、耐圧強度が大きく改善された。

低圧用には、戦前は、黄銅鑄物の他、一部には青銅が用いられ、戦後は、黄銅の他、ネーバル黄銅、黄銅の四角棒材（長尺）や、アルミ角棒、亜鉛ダイカスト、ステンレス鋼の角棒材（長尺）、特殊材の精密ロストワックスが用いられた。この中で、アルミ角棒、亜鉛ダイカストは接着性に難点があり、経年変化が大きい

ことから、1970 年代以降、使用されていない。

高压用株には、戦前は、鋳鉄、合金鋼などが、戦後は、中高压用として、ステンレス鋼や特殊材の精密ロストワックスなどが用いられている。

4.2.5 目盛板

(1) 仕様

目盛板には、圧力単位、圧力と精度等級、目盛、数字、文字などが表記されるが、度量衡法および JES では、目盛板の色についても以下のように詳細に規定され、現在でもその仕様は基本的に変わらない。

表 4.12 法規に規定されている目盛板の色

計器の種類	目盛板の色
圧力計	白地に黒
連成計の真空部	白地に赤
真空計	白地に赤

目盛は、中心角 270 度に目盛られ、左右対称である。目盛板には圧力が右回りに増加するように、目盛と数字が付けられる。

(2) 大きさや形状

大きさと形状の変遷表を以下に記す。

表 4.13 目盛板の大きさや形状

目盛板	戦前 (JES)	戦後 (JIS)
大きさ (目盛板直径)	主に 150 ~ 200 mm φ	300 mm φ なし 汎用形小形が増加
形状	丸形 (100%)	丸形 (90% 以上)、 その他 四角形、エッジワイズ、 リボン式、凹形、 皿形など

大きさには、JES の当初、50、60、75、100、150、200、300 mm φ (目盛板の直径) が規定され、戦前は、150 ~ 200 が主で、300 がつくられていた。戦後は、300 がなくなり、いわゆる汎用形、目玉と呼ばれる小形が増えている。

目盛板の形状は、現在に至るまで、ほとんどは JIS B 7505-1 (ブルドン管圧力計) に規定された丸形である。戦前は 100% に近く丸形であったが、戦後は規制緩和が進み、非 JIS 圧力計がいろいろ開発され、目盛板にも四角形、エッジワイズ、リボン式、凹形、皿形などの形状も登場した。しかし、現在においても、90% 以上は丸形である。

エッジワイズは矩形の目盛板である。

リボン式は、薄い布あるいはアルミ箔などでできた帯状リボンの「動く目盛板」で、リボンに目盛がつけ



図 4.39 エッジワイズ 縦形圧力計 1970 年代
長野計器 (株) 提供



図 4.40 リボン式 鉄板 アルミ板 1970 年代
長野計器 (株) 提供

られ、リボンはドラムに巻きつけられる。

(4) 製造

表 4.14 目盛板製造の変遷

目盛板	戦前	戦後
材料	黄銅板、鉄板	アルミ板、カラー鉄板、亜鉛引き鉄板、ステンレス鋼板、樹脂など
方法	平板切り取り 手仕上げ	フープ板、 定尺板からの自動製造 プレス絞り加工 (平板以外)

材料には、国産化当初、黄銅板と鉄板 (特に戦時下) が使われていたが、戦後は、アルミ板、カラー鉄板、亜鉛引き鉄板、ステンレス鋼板、樹脂などが使用された。一般圧力計の目盛板には、現在、アルミ板が多く使用されている。また、下からの照射により目盛が浮き上がるタイプの樹脂製目盛板 (EL (エレクトロルミネッセンス) 板・バックライト付きなど) も登場した。

目盛板の製造方法は、戦前、平板を打ち抜き工具で、切り取り、手で仕上げていた。戦後は、数の多いものは、プレス型によりフープ材あるいは定尺板から連続自動でつくられるようになった。平板形状でないもの

は、プレス絞り型加工などでつくられる。

4.2.6 指針

指針は金属の薄い板をプレスで型抜きしてつくられ、軸帽が圧入カシメされる。

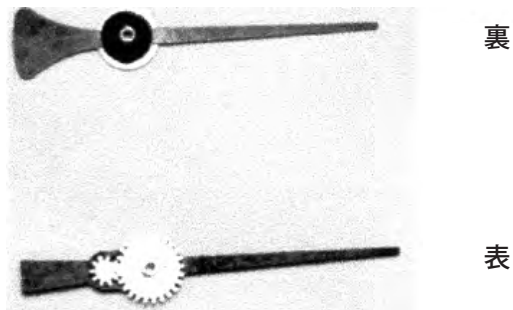


図 4.41 指針（下側ゼロ調指針）長野計器（株）提供

一般圧力計には、写真のような2種類の形の針が使用されている。扇形に膨らんだもの（写真上）は60φ以上向けに、直線カットされたもの（写真下）は50φ以下向けに用いられる。

指針の材料には、戦前は黒色塗装された鉄板やリン青銅板が使われていたが、戦後はカラー鉄板、ジュラルミン、鋼板、樹脂、ステンレス鋼板などが開発されている。指針は、軸帽がカシメ取付され、軸帽は特殊な工具（専用ハンマー）を用いて、ピニオン軸（テーパー軸）に圧入される。圧入された針をピニオン軸から抜く場合は、専用の針抜き治具を用いるが、指針を抜かずに手回しで微調整の行える「ゼロ調針」も開発されている。



図 4.42 ゼロ調部拡大図 長野計器（株）提供

「ゼロ調針」は、通常、100φ以上の圧力計に多く使用される。

精密圧力計の指針には、特に剛性のある軽い合金の細管が用いられ、指針の先端は平らにつぶされ、ツブシ面をタテにして使う。

ピニオン軸の取り付け部分は、軽合金の角棒でつくられ、細密ねじで固定される。

いずれの指針も、指針軸に対して左右の重心がバランスするように設計されている。

4.2.7 アクセサリとパッキン

アクセサリは、圧力計にとって有害な脈動圧力、振動、温度その他が、直接圧力計に加わらないように考案された緩衝器具で、その種類は多い。精密機械である圧力計はこれらの影響を受けやすいが、アクセサリの適正な使用により、機能や性能を損なうことなく、圧力計を使用することができる。アクセサリは、一般に「圧力計」と「圧力計を装着する機器装置や配管」の間に、ねじで結合して使用される。一方、予め圧力計そのものに対策を講じた特殊圧力計も開発されている。どちらを使用するかは、コストなども含め、ケースバイケースである。

パッキンは、圧力計接続部に使用される。豊富な種類の中から、圧力や媒体の性状などにより、もっとも適正なものを選定して使用する。



図 4.43 アクセサリ（例）長野計器（株）提供

4.2.8 枠

枠とは、圧力計の本体（構造物）を収納する筐体を目指す。枠は、圧力計の国産化当初から、同心丸形圧力計（JIS形）が主流で、本体構造や形状と密接な関係のもとに設計され、つくられてきた。ブルドン管と同様、戦前の時代は、ほとんど黄銅板で、職人の板金、ロウ付け、手作りでつくられていた。戦後は図に示すように、さまざまな材料、加工、成形法でつくられるようになった。



図 4.44 現在の同心丸形圧力計（JIS形）プレス成形枠の大きさ100φ 長野計器（株）提供

特に国産化初期は、職人による板金加工とロウ付けでつくられていた。



図 4.45 1940 年代の同心丸形圧力計（JIS 形）
板金成形、銀口ウ付け、枠の大きさ 200 φ
黄銅板の枠 長野計器（株）提供

高度経済成長期頃からは規制緩和が進み、非 JIS 形圧力計が自由に設計できるようになった。その結果、圧力メーカーではさまざまな形状の枠が開発され、新たな製作法も誕生した。

以下に長野計器の製品の極く一例を紹介する。



図 4.46 角形圧力計（黒色樹脂）100 φ
1970 年代 長野計器（株）提供



図 4.47 100 角形圧力計アルミ DC（銀色）
1970 年代 長野計器（株）提供



図 4.48 200 角形圧力計（赤色樹脂成形）
1980 年代 長野計器（株）提供



図 4.49 200 φ精密圧力計 アルミ DC ミラー付
1980 年代 長野計器（株）提供



図 4.50 耐圧防爆形接点付圧力計 アルミ鋳物
1980 年代 長野計器（株）提供



図 4.51 全樹脂 60 φ 圧力計 1980 年代
長野計器（株）提供

現在は JIS 形（丸形）の枠が主流だが、引き続き、新たな形状の枠が開発されている。

4.2.9 組立作業⁽⁴⁵⁾

圧力計の組立工程には、ブルドン管と内機を組立てた後、調整、点取り、目盛書き、枠付けと呼ばれる工程がある。この工程は圧力計メーカーが長い経験とノウハウを積み重ねて作り上げたもので、仔細に見ると、作業のやり方や用語などは同じではなく、各作業は、メーカーごとに異なる。ここでは、長野計器の例を示す。生産技術の進歩により、これらの工程は機械化、自動化に移行しているが、メーカーによっては、今でも伝統的な熟練工による方法を行っている。



図 4.52 圧力計組立ライン
1950 年頃 長野計器（株）提供



図 4.53 小形圧力計自動組立ライン
2005 年 長野計器（株）提供

(1) 調整作業

管先の変位が所定であっても、管先位置が適正でない場合、指針の回転角度や目盛の等分性に影響を及ぼすため、位置決めは重要である。従って、最適な位置になるよう治具を用いて位置決めし、接着するのが一般的である。しかし、接着時の熱歪みによって管先位置が規定位置からわずかにずれる。各メーカーでは長年にわたり、管先の位置ずれをなくす改善を行ってきたが、管先位置のわずかな狂いを完全になくすことは

技術的に困難である。このため熟練工によって調整という作業によって補完している。調整は熟練工により手作業で行われる。

圧力計の調整には、「スパン出し（目盛りスパン角度を 270 度（JIS 圧力計に規定））」と「目盛り角度を左右対称に振り分ける」という作業がある。

圧力基準器（重錘形圧力計）に被調整圧力計をセットし、ブランク目盛板を取付け、所定圧力を中間点、最高点と加え、仮に取付けた指針の動きから、瞬時に管先の適正位置を見つけ出し、工具を使って位置の補正（修正）を行う。同時に内機のレバーの拡大比を調整して、スパン調整を行い目盛板上で左右均等になるように調整を行う。

この調整作業は、熟練工の勘と技によって 0.1 ～ 0.5mm 程度の位置ズレと方向を見出し、瞬時に行われる。新人はこの作業で時間をかけても、いじくり回して不良品の山をつくり出す。ベテランは数十秒で行うことができるが、簡単なものでも、組立作業の習熟には、数年を要し、勘と手先の器用な女性の典型的な作業である。

(2) 点取り作業

前項の調整が終わった後、ブランク目盛板を仮取付けし、親目盛り位置に所定圧力を加え、指針の先端位置にインクで（細い楊枝状の木の先につけ）点印をつける。最大圧力から減圧時も同様に親目盛にインクをつける。この作業を点取り作業という。点取りが終了した目盛板は、圧力計と合番号がつけられた後、圧力計から外され、文字書工程に送られる。

(3) 目盛書作業

目盛書は、当初から烏口（製図器具）が使われ、熟練工によって一個一個手書きでつくられていた。1930 年代にさまざまな種類の目盛分割機が開発され、特に戦後開発された精密圧力計の目盛りには、200 φ の円板に 500 等分割するものなど、専用の精密用分割器がつくられて使用されている。



図 4.54 度数分割機 1962 年 長野計器（株）提供



図 4.55 目盛半印刷（ゴム印）1980 年代
長野計器（株）提供

点取りされた目盛板に、定規や分割器などを使って、点取りされた点を基準にすべての目盛線（親目盛線、子目盛線）を書く。数字、記入文字などはゴム印や字抜き板などで押印される。目盛書き完了後は、ニス吹き、温風乾燥して、目盛板は完成する。製造番号などが記入（刻印など）され、合番号により圧力計に組みつけられ、再び圧力をかけて確認調整される。

高度経済成長期の圧力計の生産量の増加とともに、それまで手作業で行われていた目盛書きの半印刷化、全印刷化が進められた。印刷には、印刷原版がつくられるが、この原版はコストがかかるため、上記で述べたように、生産量の少ない目盛書きは、手作業で行われている。



図 4.56 一般圧力計文字書自動化設備 2005 年
長野計器（株）提供

1980 年代からは、目盛書機の自動化開発が始められ、2000 年にはレーザーや画像処理、スキャンニング、コンピュータなどのめざましい技術進歩により、全自動高速目盛書機械が開発された（図 4.56）。この機械の開発により、従来、熟練工が 1 枚仕上げるのに、数分から数十分要していたものが、秒単位でできるようになり、1 枚当たりの生産性は 100 倍以上に向上した。

また、印刷版下に必要のため、原寸大の正確な目盛図面を設計で書いていたが、この自動目盛書機械では必要な数値をプログラムすることで、図面の経験者を必要としなくなった。

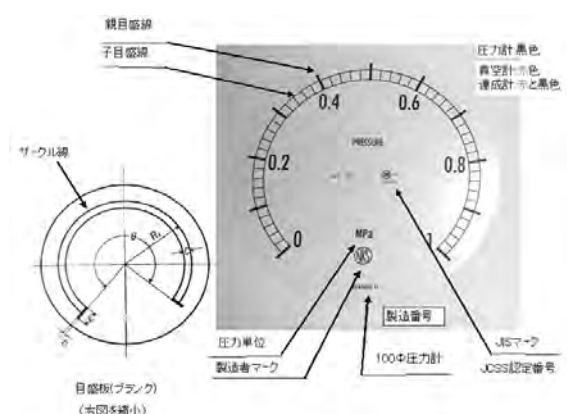


図 4.57 目盛板のプランクと完成品
長野計器（株）提供（資料を一部修整）



図 4.58 ブルドン管溶接組立 100 φ用ステンレス鋼
（株）に管先を溶接したブルドン管を溶接）
長野計器（株）提供

4.2.10 選定

圧力計は精密機器であり、構造的に振動や脈動（動圧）、衝撃に弱く、精度や性能が狂い易い。適格な機種を選定と取扱を含めた適切な使用は、圧力計の信頼性を保つために必要不可欠である。また、圧力計の寿命についての記録には、80 年使用した旧国鉄の例があるが、機種を選定あるいは使用が不適切な場合は寿命が短く、極端な場合は直ちに破損に至る。しかし、圧力計は前述したアクセサリ（機器や器具）の適切な使用により寿命を延ばすことができる。以下に、圧力計の選定について述べる。

4.2.10.1 精度等級⁽⁴⁶⁾

JISB7505-1-2007 による精度等級には、0.6 級、1.0 級、1.6 級、2.5 級、4.0 級の 5 等級が規定されている。この中で、もっとも選択範囲が広いのは 1.6 級なので、1.6 級を標準として選定を行う。システム上、要求される精度より高精度の圧力計を選定すると、無意味だけでなく、コストを増大させる要因となる。

精度の高い圧力計は、構造的にデリケートで、比較

的、耐久性に欠ける。反面、熱や振動などが加わるような悪条件下で耐久性能に優れる計器は、一般的に構造は単純だが、精度的には劣る。

このような点を考慮して、JIS 精度等級より圧力計を選定する。

なお、製造者によっては JIS の級別に完全に準拠していない場合があり、0.6 級や 4.0 級の製品を製作していない場合がある。一方、JIS にない高精度圧力計もつくられている。

4.2.10.2 測定流体⁽⁴⁷⁾

圧力計の精度はブルドン管の弾性特性、管先力、内機の特性等に左右されるが、ブルドン管の設計に当たってもっとも重視されるのは弾性特性であり、材料選定ではまず弾性特性を第一に考える。しかし、変位を最大限に利用するために、一般機械構造物のように、材料の強度を高め、応力を低くすることはできない。ブルドン管は薄い板であり、腐食性流体に触れると、わずかな腐食でも性能が変わる。また、応力的にも、もっとも過酷な使用条件に晒されている。材料には特に優れた弾性性能が要求されるため、材料は限定され、測定流体に適合するかどうか厳密に調査される必要がある。一般的には、低圧用ブルドン管には黄銅、アルミブラスなどが、中高圧用にはステンレス鋼が多く使われている。万一、適合する材料がない場合は、後述する隔膜式圧力計を選定する。

普通形圧力計とグリセリン入り圧力計の脈動圧耐久性試験の結果を図 4.59 に示す。

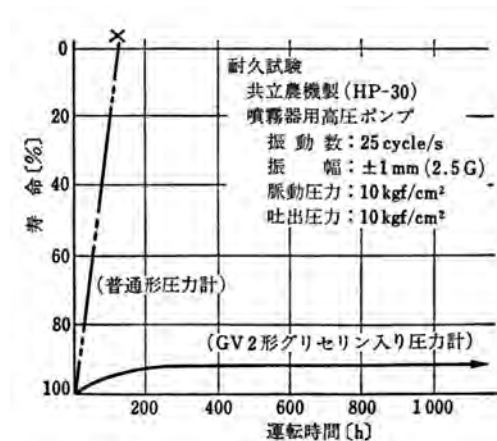


図 4.59 ブルドン管圧力計の耐久性⁽⁴⁸⁾

圧力計の選定の際の測定流体の注意事項を以下に記す。

(1) 腐食性

ブルドン管は比較的薄い材料から成形されているため、わずかな腐食に対しても影響は大きく、圧力計と

しての特性が大きく変化する。

(2) 粘度

ブルドン管圧力計は、圧力導入口が細穴になっており、スラリー状や粘度の高い測定流体の場合には圧力導入口が詰まり、測定不能になる場合がある。このような場合は隔膜式圧力計を使用する。なお、隔膜式圧力計は高価なので、単に重油を測定する場合などでは、シールポットで他の測定流体に置換するなどの方法も有効である。

(3) 温度

JISB7505-1 ブルドン管圧力計では、用途として、一般形蒸気用、耐熱用、耐振用、蒸気耐振形用および耐熱耐振形用の規定があり、温度に関する分類は次のとおりである。

①一般	-5 ~ 45℃
②蒸気用	10 ~ 50℃
③耐熱用	-5 ~ 80℃

80℃より高温の測定流体を測定する場合は、パイプサイフォンあるいは圧力導入管などにより温度を冷却して圧力計に導入する。しかし、アスファルトや重原油など、冷却すると都合の悪い流体の場合には、隔膜式圧力計を選定する。

高温の蒸気の圧力を測定する場合には、パイプサイフォン、タンクサイフォンあるいは圧力導入管などにより蒸気を冷却するとともに、水に置換し圧力計に導入する。

また、測定流体や周囲温度が氷点下になる場合は、空気中の水分が凝結し霜状に圧力計を覆い、指示が読み取れないばかりでなく、内機等が凍り付き圧力計が作動しなくなるので、圧力計を保温することが望ましい。

(4) 酸素の圧力測定

酸素は油と接触すると発火爆発の危険がある。

通常の圧力計は、油で調整・検査している可能性があるため、酸素測定の場合には必ず、禁油処理した圧力計を使用する。

圧力試験器（重錘形圧力計）には油を使用するのが普通であるから、試験器を用いて禁油圧力計の調整・検査を行う際は、必ず、タンクサイフォンを使用して、測定流体を水に置換する。

(5) アンモニアの圧力測定

アンモニアは銅合金を腐食するので、アンモニア用として製作された圧力計を使用する。

(6) アセチレンの圧力測定

アセチレンには 62% 以上（規格により若干異なる）

銅を含んだ合金は不適當である。

4.3 圧力計業界と関連事項

4.3.1 圧力計メーカーの変遷

国産化の当初、1900 年頃には数社であった圧力メーカーは、戦前の経済成長と軍事力強化により 1930 年代には 100 社にも達した。大手は 3 社といわれ、そのほとんどは中小零細企業であった。大手は高性能品を製作していた。

ブルドン管圧力計産業は、当初から典型的な多品種、少中量受注生産形態産業⁽⁴⁹⁾といわれ、多くの企業が中小企業の行政的扱いを受けていた。高度経済成長期の初期に、大手以外の圧力計メーカーは、工業組合が中心となり、部品の共通化、共用化を検討したが、一部のメーカーでは実施されたものの、その後、定着することなく解消した。かつて圧力計製造事業者は、JIS 指定工場になるために、ブルドン管、内機、圧力計組立を社内で製造する設備や能力をもつことが絶対条件であった。しかし、1980 年代以降、計量法や JIS 工場の規制緩和が進み、専門メーカーから部品を調達するメーカーが続出し、現在、主要部品のすべてを自社製造するメーカーは大手 1 社といわれている。

高度成長期を境に、圧力計メーカーは、高度な生産技術による自動化、無人化を指向し、一貫生産を進める設備集約形と、部品の専門外注化を行う労働集約形、の二極化が進み、1989（平成元）年のバブル崩壊以降は、その傾向がさらに加速しているようである。設備集約形の最先端を行くメーカーでは、画像処理技術を生産ラインに使用できるようになり、巨額投資により、世界最先端の自動化設備を次々と開発している。

4.3.2 ブルドン管圧力計の生産量

圧力計の生産量は、一貫して著しい伸びを続けている。圧力別では低圧用の生産が多い。高圧用の生産量は、公式な生産統計がないものの、全体の数%程度と推定されている。

表 4.15 に、ブルドン管圧力計の全数検定が行われていた期間（1920-1951）の検定個数・不合格率を示す。若干の増減はあるが、生産個数は検定開始直後 1921（大正 10）年 1.4 万個から、終戦直後 1947（昭和 22）年 33 万個、2007（平成 19）年 900 万個へと推移している。

図 4.60 に示す検定不合格率は、各社の技術、製造、品質管理などの向上、努力により、その後、生産量の伸びとは対照的に、大幅に低減し品質は安定した。各社の製品は、性能、品質、生産性のいずれも著しい進

表 4.15 ブルドン管圧力計検定個数・不合格率⁽⁵⁰⁾

圧力計検定個数および不合格数（中央度量衡検定所）

期間：大正 9 年から昭和 26 年まで。大正 9 年は、3 か月分。

年 度	検 定 個 数	不 合 格 率 %	年 度	検 定 個 数	不 合 格 率 %
大正 9 年	418	20.1	昭和 11 年	241,297	2.8
〃 10 〃	13,920	10.5	〃 12 〃	259,443	2.4
〃 11 〃	37,277	9.5	〃 13 〃	299,104	4.3
〃 12 〃	53,355	6.0	〃 14 〃	314,240	4.4
〃 13 〃	66,077	10.7	〃 15 〃	313,268	4.1
〃 14 〃	65,562	7.6	〃 16 〃	329,791	3.6
〃 15 〃	80,651	6.1	〃 17 〃	300,427	3.3
昭和 2 〃	88,266	8.1	〃 18 〃	222,316	5.8
〃 3 〃	91,946	7.2	〃 19 〃	128,748	6.2
〃 4 〃	103,234	4.3	〃 20 〃	49,497	5.2
〃 5 〃	80,952	2.9	〃 21 〃	211,137	5.2
〃 6 〃	93,336	2.8	〃 22 〃	329,677	3.3
〃 7 〃	103,258	3.1	〃 23 〃	309,111	2.8
〃 8 〃	139,447	2.9	〃 24 〃	280,462	3.1
〃 9 〃	171,572	4.2	〃 25 〃	349,825	4.0
〃 10 〃	214,394	3.3	〃 26 〃	420,933	4.9

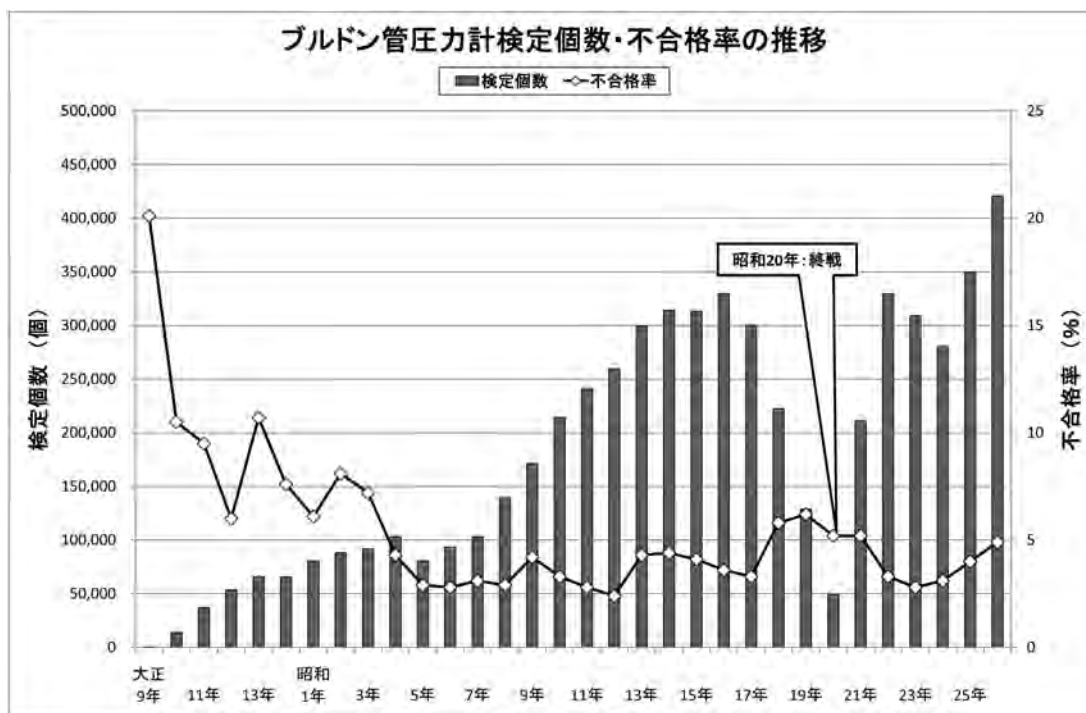


図 4.60 ブルドン管圧力計の生産個数と不合格率 (%)

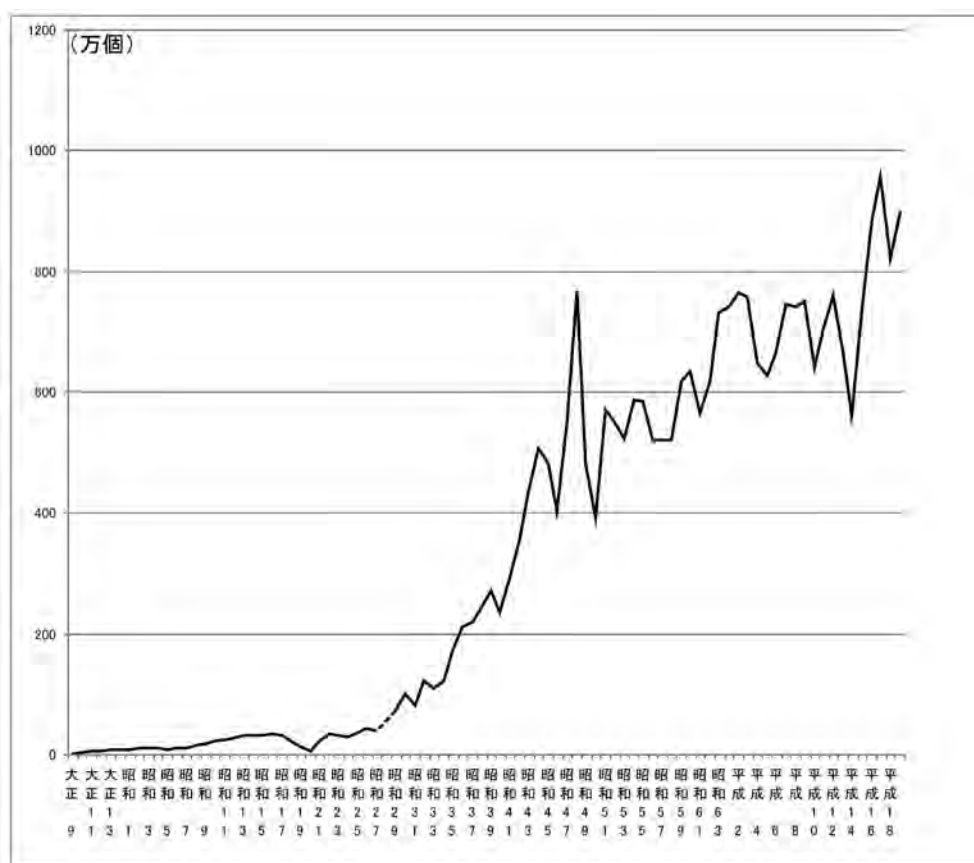


図 4.61 圧力計（ブルドン管圧力計）生産個数^{(51) (52) (53)}

歩をしている。

表 4.15 の検定品の内容を圧力計メーカーの過去の生産実績から推測すると、主流は、小形・汎用形圧力計と呼ばれる低圧用が主体で、圧力計全生産量のおお

よそ 60% 程度、高圧用、超高圧用は数%程度、残りは 100 φ を中心とする一般用、特殊用途圧力計である。

図 4.61 は、日本のブルドン管圧力計の生産個数のグラフである。日本のブルドン管、および、ブルドン管

圧力計の生産工程は、戦前の熟練職人による手作り一個生産から、最先端技術による連続自動化生産へと大きく進化しており、現在では世界の先端を行っている。

4.3.3 法規

圧力計に関係する法規はいろいろあるが、特に重要なものは、『計量に関わる法規（計量法など）』と『日本の工業製品基準に関わる法規（JIS など）』の2つである。

(1) 計量に関わる法規^{(54) (55) (56)}

① 度量衡法^{(57) (58) (59)}

1919（大正8）年4月10日に度量衡法の改正法が公布され、法律第50号により、『計圧計（現在のブルドン管圧力計）』『浮秤』『温度計』『生糸織度検定器』『乳脂計』の5種類の計器は度量衡器から独立し、新たに『計量器』と呼ばれることになった。これにより、圧力計は計圧器として初めて法律に規定された。この改正法は大正9年9月1日に施行されているが、「計量器」に関しては大正10年1月1日に行われた。なお、この改正法では同時に圧力の単位も制定された。

1920年には、この5種類の『計量器』は国家検定の対象となり、1920年に中央度量衡検定所により検定が開始された。

② 計量法

第2次世界大戦後の1951（昭和26）年に『度量衡法』は廃止され、新たに『計量法』が公布（同年6月7日）、施行（翌年3月1日）された。『度量衡法』の廃止に伴い、『計圧器』の名称は『圧力計』へ変更された。

また、同法律により、適正な計量を統一化するための実用標準器として、『基準器』の使用が義務付けられた。『基準器』は法規制の分野だけでなく、一般製造業における計測の標準器としても用いられ、『新計量法』の施行までは、『トレーサビリティ』⁽⁶⁰⁾の一環として機能した側面があった。

『トレーサビリティ』は1960年代の中頃にアメリカから紹介され、民間や国で計測標準の従事者たちの間に急速に普及して行った概念である。一時は政府機関などで盛んに議論されたが、諸般の事情により、その熱は急速に冷めて行った。しかし、『トレーサビリティ』を明確にすべしという声は止むことがなく、法律にそぐわないなどの意見もある一方、最終的には、国に義務を課すという意味を含め、計量法に取り入れられることになった。これが計量法の「計量標準制度」である。

新計量法では技術と品質管理の進歩が勘案され、特定計量器の製造が届け出のみで行えるようになった。

また、型式承認が必要となる対象を全ての特定計量器に広げ、自社検査を国家検定に代用できる「指定製造事業者制度」が設けられた。現在、『圧力計』の検定対象は、車両用圧力計などに限定され、検定数は大幅に減少している。

1999（平成11）年8月には、強制法規内の「技術基準」を定め、「基準に適合していれば認証する」という『基準・認証一括法』が制定された。これは、ISO/IEC規格との整合性を図り、同時に民間活力を取り入れるために制定されたものである。新計量法では、指定検定機関、指定定期検査機関、指定校正機関などの指定にあたる公益法人要件が撤廃され、計量供給標準について階層構造を導入するなどの改正が行われ、2001年4月から実施された。

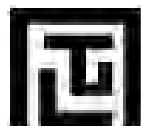


図 4.62 検定証印⁽⁶¹⁾



図 4.63 基準適合証印⁽⁶²⁾

(2) 日本の工業製品基準に関わる法規

① JES（日本工業規格）

『圧力計』は1930（昭和5）年3月21日に、JES（日本標準規格）第118号類別B28に『計圧器』として制定された。この規格は現行のJIS B7505-1ブルドン管圧力計の前身である。このJES規格はよく整備されているが、当時のメーカーの技術水準をはるかに上回るものばかりで、これをクリアすることは容易ではなかった。

② JIS（日本標準工業規格）

(a) 概要

1953（昭和28）年、JIS（日本標準工業規格）B7505が制定された。JESは廃止され、『JIS』に引き継がれた。『計圧器』の名称は『計量法』と同じ『圧力計』へ変更された。JIS圧力計規格では偏心型がなくなり、新たな試験条件が加わった。

JIS規格はハードルが高く、メーカーはかなりの努力を強いられた。1980年代にはさらに規格が厳しくなったが、メーカーは技術の改善向上に取り組んだ結果、製品の性能品質が格段に向上することとなった。

1994年の改正は、国際規格との整合が大幅に実施された。

1999年にはJIS改正が行われた。OIML（国際計量法定機関）やISO（国際標準化機構）の勧告とその他国際規格の動向を受けて、許容差を最大許容差に改め、新たに『精度等級』（0.6級、1.0級、1.6級、2.5級、4.0級）

が導入された。長年、圧力計の器差（精度）は、目盛分割数と1目を基準にしていたが、%で表されることになった。各精度等級は最大圧力目盛範囲（フルスパン（F.S.））を百分率で表わしたものである。

また、2007年の制定は、約50年振りとなる改正で、B7505は廃止され、新たにB7505-1が制定された。ブルドン管圧力計規格の内容はそのまま規定に組み込まれ、新たに次の項目が制定された。

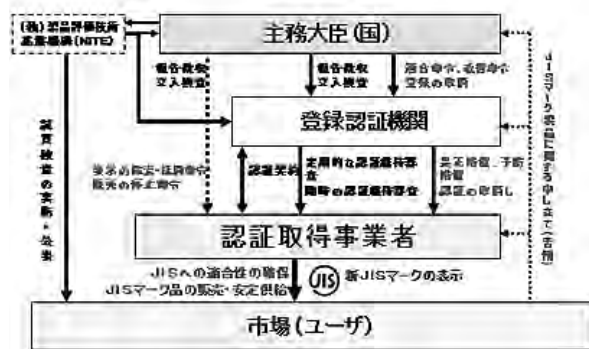


図 4.64 国による制度の信頼性の確保措置⁽⁶²⁾

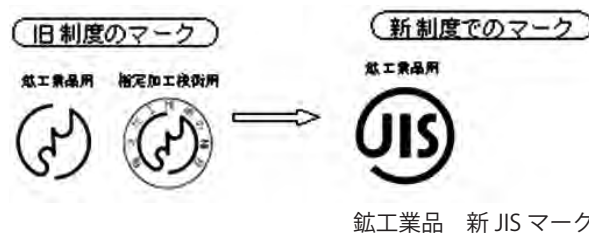


図 4.65 JIS マーク表示制度（圧力計に付される）⁽⁶³⁾

2007年 JIS B 7505-1 アネロイド形圧力計第1部：ブルドン管圧力計

2008年 JIS B 7505-2、アネロイド形圧力計第2部：取引又は証明用-機械式

同年 JIS B 7505-3 アネロイド形圧力計第3部：取引又は証明用-電気式

なお、上記の規格改正により、ブルドン管圧力計は、初めてアネロイド形圧力計と表記されることになったが、ブルドン管圧力計規格の内容は、改正前と変わらない。

なお、現在、わが国で JIS 化されている圧力計は次の9種である。

- (1) JIS B 7307 自記気圧計
- (2) JIS B 7505-1 アネロイド型圧力計 第1部：ブルドン管圧力計
- (3) JIS B 7505-2 アネロイド型圧力計 第2部：取引証明用-機械式
- (4) JIS B 7505-3 アネロイド型圧力計 第3部：取引証明用-電気式

- (5) JIS B 7546 隔膜式圧力計
- (6) JIS D 5603 自動車用オイルプレッシャゲージ
- (7) JIS D 8201 自動車用タイヤゲージ
- (8) JIS E 4118 鉄道車両用ブルドン管圧力計
- (9) JIS T 4203 血圧計

この内、一般的な圧力計の規格はブルドン管圧力計だけであり、ブルドン管以外の弾性素子を用いた規格は今のところ存在しない。

(b) JIS 認証取得事業者と JIS マーク

JIS マークは製品の適合性（信頼性）を保証するための制度で、認証取得事業者（JIS 圧力計の製造者）は登録認証機関によって検査を受けなくてはならない。適合した圧力計には JIS 圧力計として JIS マークが付され、市場に供給される。

旧 JIS は 2008（平成 20）年 10 月 1 日に廃止されて新 JIS に移行した。同時に、1953（昭和 28）年の JIS 制定発足以来使用されてきた JIS マークも改正された。

参考文献

- (1) 古川浩：「塑性と加工（日本塑性加工学会誌）第37巻第431号」P1260（1996）[平成8年]
- (2) 長野計器社史編纂委員会編：「計測から制御へ 長野計器50年史」P2-3（1999）[平成11年]
- (3) (4) (5) JIS B 7505-1 P3（2007）[平成19年]
- (6) 松代正三編：「工業計測技術体系」P10 日刊工業新聞（1964）[昭和39年]
- (7) 全国中小企業団体中央会：圧力計製造業経営指針 P32-33（1978）[昭和53年]
- (8) Theorie der Rohrenfedermanometer von H. LORENZ, VDI 54（1910）,（1865-1868）[慶応1-3年]
- (9) 全国中小企業団体中央会：圧力計製造業経営指針 P35（1978）[昭和53年]
- (10) 古川浩：「日本機械学会誌 第67巻第547号」（1964）[昭和39年]
- (11) 長野計器（株）技術資料
- (12) 松代正三編：「工業計測技術体系」P50 日刊工業新聞（1964）[昭和39年]
- (13) 全国中小企業団体中央会：圧力計製造業経営指針 P36-38（1978）[昭和53年]
- (14) 阿部武治：「弾性力学」P1-9 朝倉書店（1991）[平成3年]
- (15) （株）長野計器製作所「圧力計概説 改正版」P23-26（1970）[昭和45年]
- (16) （社）日本造船関連工業会：「ブルドン管圧力計

- に関する調査研究事業報告」(1961) [昭和 36 年]
- (17) (社) 計量管理協会:「圧力の計測」P44 (1987) [昭和 62 年]
- (18) (社) 日本造船関連工業会:「ブルドン管圧力計に関する調査研究事業報告」(1961) [昭和 36 年]
- (19) (20) 圧力計品質比較審査会:「第一回圧力計品質比較審査報告」(1952) [昭和 27 年]
- (21) 長野計器技術資料
- (22) 古川浩:「日本機械学会誌 第 67 巻第 547 号」P1175 (1964) [昭和 39 年]
- (23) (株) 長野計器製作所「圧力計概説 改正版」P13 (1970) [昭和 45 年]
- (24) 全国中小企業団体中央会:「圧力計製造業経営指針 P19-21 (1978) [昭和 53 年]
- (25) 全国中小企業団体中央会:「圧力計製造業経営指針 P91-94 (1978) [昭和 53 年]
- (26) 日本産業技術史学会:「日本産業技術史事典」P85-86 (株) 思文閣出版 (2007) [平成 19 年]
- (27) 長野計器社史編纂委員会編:「計測から制御へ 長野計器 50 年史」P. 2 (1999) [平成 11 年]
- (28) (29) 松代正三編:「工業計測技術体系」P66 日刊工業新聞 (1964) [昭和 39 年]
- (30) 全国中小企業団体中央会:「圧力計製造業経営指針 P301-303 (1978) [昭和 53 年]
- (31) (株) 長野計器製作所「圧力計概説 改正版」(1970) [昭和 45 年]
- (32) (34) 松代正三編:「工業計測技術体系」P67 日刊工業新聞 (1964) [昭和 39 年]
- (35) 福本保、山崎親康「計測第 11 巻 8 号 振動による圧力計の破損(1)」P468-473 (1961) [昭和 36 年]
- (36) 全国中小企業団体中央会:「圧力計製造業経営指針 P38-39 (1978) [昭和 53 年]
- (37) 両角宗晴:「歯車の基礎と測定」(株) 誠文堂 (1962) [昭和 37 年]
- (38) 会田俊夫:「歯車の技術史」開発社 (1970) [昭和 45 年]
- (39) 福本保、山崎親康「計測第 11 巻第 10 号」振動による圧力計の破損 (2)」P595-603 (1961) [昭和 36 年]
- (40) (41) 仙波正荘:「小形歯車」日刊工業新聞社 (1969) [昭和 44 年]
- (42) (43) (44) JIS B 7505-1
- (45) 全国中小企業団体中央会:「圧力計製造業経営指針 P96-98 (1978) [昭和 53 年]
- (46) JIS B7505-1
- (47) 長野計器技術資料
- (48) (社) 計量管理協会:「圧力の計測」、P47、コロナ社 (1987) [昭和 62 年]
- (49) (50) 全国中小企業団体中央会:「圧力計製造業経営指針」P18 (1978) [昭和 53 年]
- (51) 全国中小企業団体中央会:「圧力計製造業経営指針」P18-19 (1978) [昭和 53 年]
- (52) 経済産業省:「経済産業政策局調査機械統計」(1978-1989) [昭和 53- 平成元年]
- (53) 経済産業省:「経済産業政策局調査統計部資料 機械統計月報集計表」(1991-2006) [平成 3-18 年]
- (54) 経済産業省:「計量制度検討小委員会報告書」(2008) [平成 20 年]
- (55) 経済産業省:「計量単位について」(2005) [平成 17 年]
- (56) 計量研究所:「計量標準小史」P28 (2003) [平成 15 年]
- (57) 農商務省工務局中央度量衡器検定所:「度量衡比較表」(1911) [明治 44 年]
- (58) 権度検定所:「計量器 (電気計器ヲ除ク) 検定心得集 第二編計圧器」(1939) [康得 6 年]
- (59) 日本度量衡協会「度量衡法」(明治 42 年法律第四号、大正 10 年法律改正) (1924) [大正 13 年]
- (60) 栗田良春「計測と制御 第 32 巻第 8 号 新計量法の認証制度とトレーサビリティ制度」(1993) [平成 5 年]
- (61) 新計量法 (1996) [平成 8 年 1 月 1 日施行]
- (62) (63) 経済産業省提供資料 (2008) [平成 20 年]

5 | 圧力計の開発製品

世界で初めて圧力計測を行ったのは、気圧計を発明したトリチェリである。その後、圧力計の歴史上、特に重要な4つの圧力計である『液柱形圧力計』『重錘形圧力計』『アネロイド形圧力計』『エンジンゲータ』が発明された。構造原理を異にするこれらの圧力計の基本的事項については第3章と第4章で述べた。それを基に、特に高度経済成長期に、数多くの圧力計が産業界の要求により開発された。すでに製造されていないものもあるが、現在の圧力計の発展に多大な影響を与えた開発製品の一部を本章で紹介する。

(1) 液柱形圧力計の開発製品

① フォルタン形気圧計⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

トリチェリによって発明された水銀液柱形気圧計は運搬に適さないなどの理由から、その後、フランスをはじめイギリスなどのヨーロッパで新たな気圧計が研究され発明された。しかし、精度に関心が払われた形跡はなく、気圧計の精度は上がらず、地図製作者や測量者は不正確な気圧計に不満を抱いていた。そんな中、七年戦争の後、軍事測量や国土調査の必要性が増し、また、アルプス登山が流行するなどして、精密な気圧計の需要が急増した。スイスの登山家で自然哲学者であったJ. A. ドリュック(Jean-André Deluc, 1727-1817)は1770年頃、0.01インチの精度をもつ携帯用気圧計を考案し、人々から革命的と絶賛された。フランスでは、旧体制から革命期のナポレオンの時代に入り、器具職人は近代化への道を歩み出すことになった。その一人がN. フォルタン(Nicolas Fortin 1750-1831)である。フォルタンが考案した気圧計は「フォルタン形

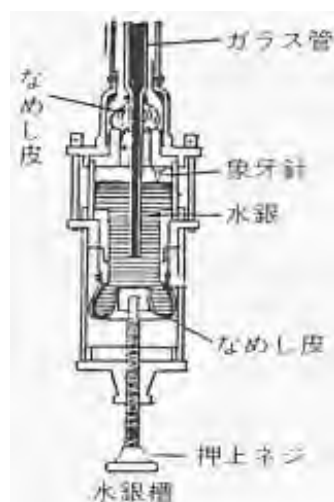


図 5.1 フォルタン形水銀気圧計構造図⁽⁴⁾

水銀気圧計」と呼ばれ、精度 0.002 インチまたは 0.1mm まで読み取れる、19 世紀の標準的な気圧計となった。

フォルタン形気圧計は図 5.1 に示すように、下部に水銀溜め（皮袋）があり、この中に水銀を充満したガラス管を挿入して、ガラス管の頭頂部を「トリチェリの真空」とする。大気圧の変化は通気皮を通して水銀柱の水銀の基準面で受圧する構造となっている。基準面の設定は、象牙針の先端が水銀溜りの水銀の表面に接触することにより得られる。大気圧の値（水銀柱の高さ）の測定は、上部の本尺目盛 1mmHg をバーニヤで読み取る。一般用は 1/10mmHg、標準用は 1/20mmHg のものが使用された。一般的な目盛範囲は 650 ~ 820mmHg である。

精度の高いフォルタン形水銀気圧計は気象庁の基準気圧計として、圧力メーカーなどでも 1940 年前後から、低圧の精密測定として、長年用いられていたが、全長が長く重いため運搬に適さず、衝撃、傾斜に弱く、高価で、しかも、室温が安定していること、測定に熟練を要すること、等の条件を必要することから、圧力



図 5.2 フォルタン形気圧計（中央）左右は部分拡大したもの⁽⁵⁾

計メーカーでは1980年頃には使用されなくなった。

気象庁でも、フォルタン形の内部に用いられる象牙針が政治的問題へ発展し、2005年から象牙を使用しない（別材料への移行）ことが決定され、さらに、気象の自動観測、無人観測にはフォルタン形が適さないため、別の気圧計を正式な基準気圧計として採用することが決まり、この時点でフォルタン形基準気圧計は基準器として使用されないこととなった。

気象庁は、新たな気圧計として、1982年から円筒振動式気圧計を、1995年からシリコンを用いた電気式気圧計を採用している。

②サーボマンノメータ⁽⁶⁾

サーボマンノメータは、元来、外国で生産されていた。液面の高さを電気的量として検出し、この出力信号により制御装置および検出器を作動させて、自動的に位置定めを行うものである。この方式には単管式とU字管式の2種類ある。下の写真と同じタイプはもう生産されていないが、現在では、この構造の一部を応用したものが製造されている。



図 5.3 サーボマンノメータ外観図⁽⁷⁾

(2) 重錘形圧力計の開発製品

高度経済成長期以降の高精度化、高圧化、およびエアピストンゲージの実用化開発など、重錘形圧力計の進歩は著しく、特に近年、超高精度の超高圧重錘形圧力計が開発されている。2000年に製造された「1GPa重錘形圧力標準器」（図5.4）は、開発に数千万から億単位が投じられ、再現性30PPM、不確かさ100PPM、と、

従来の20倍の高精度を実現した国家標準に準ずる世界最高水準の自動圧力標準器である。



図 5.4 1GPa 重錘形圧力標準器 2000年
長野計器（株）提供

下の写真（図5.5）は約70年前につくられた同じ標準器である。両者を比較すると、技術の発展は歴然で、興味深い。



図 5.5 満州国政府納入品 特高圧力計器検定器
1500Kg/cm² 1941年 商工省中央度量衡検定所
(株) 右下精器製造提供

(3) アネロイド形圧力計の開発製品

アネロイド形圧力計の開発は、高度経済成長期以降、新たな産業の誕生と関連して進展した。下表は、各産業分野とその主要な用途を示したもので、すべてアネロイド形圧力計の開発製品である。

表 5.1 新産業分野と用途

区 分		新用途
A	造船	大型タンカー、自動化船、ディーゼル船
B	冷凍機	圧縮機、ポンプ
C	ボイラー	石油燃料/ACC制御、安全弁、ドラフト、燃料供給、貯槽タンク
D	一般産業用機械	ポンプ(ギヤーポンプ、ベーンポンプ、プランジャポンプ)、油圧制御機器
※ E	石油化学プラント	石油精製プラント等
F	溶断器・溶接機	ガス溶接(酸素・アセチレン)、その他
※ G	ポンベ・貯槽設備、高圧ガス容器	高圧液化ガス・高圧ガス、空気、N ₂ 、O ₂ 、Ar、He、H ₂ 、CO ₂ 、液化炭酸ガス、その他
※ H	ガス設備・貯槽・ポンベ	ガスタンク、プロパンガスポンベ
I	鉄道車両	ブレーキ、コンプレッサー、暖冷房、ドア開閉他
J	バス・トラック	ブレーキ、暖冷房、換気、ドア開閉
※ K	特殊車両(土木建設、タンクローリなど)	荷台傾斜、クレーン移動・積載荷重、タンクローリ移送ポンプ
※ L	空圧機器	コンプレッサー、エアコン、クーラー
※ M	油圧機器	油圧制御機器、油圧ユニット、油圧ポンプ
※ N	原子力発電所	◎マーキングシステム、原子力用特殊使用材料
※ O	ビル空調	微圧、フィルター、清浄空気
※ P	消防機器	消防車、消防ポンプ、消火設備、消火器(陸上用、船舶用など)
※ Q	食品機械	食品製造ライン(サニタリ)、食品製造機械
R	工作機械	油圧制御、ポンプ、油タンク
※ S	射出成型機(プラスチック)	高圧・高温
T	プレス機械	精密プレス型
U	高圧・深海調査船など	物性、試薬、しんかい650など
※ V	化学薬品・化学合成	超高圧、高温、高圧、高耐食
※ W	半導体装置産業	特殊ガス、超清浄度、平滑性、面粗度(接液部)
※ X	医療・介護・健康	脳内圧力計、眼圧計、血圧計、その他

注記

(※) 特に、高度経済成長期以降に圧力計が使用された新しい産業と用途

(◎) マーキングシステム：原子力発電所用に使用する圧力計を対象として、その主要材料について、原材料(溶解炉から)から完成までの全工程を、個別に追

跡できるようにマークを付したシステム

表 5.1 には特殊用途、防衛省関係、航空、宇宙産業などは含めていない。

以下にアネロイド形圧力計の開発製品の分類の一部を掲載する。

一般圧力計の校正用マスターゲージ、圧カスイッチのマスターゲージ、実験用途などで精密な圧力測定が必要な場合などである。用いる弾性素子は圧力によって異なる。精密圧力計の精度としては、 $\pm 0.1 \sim 0.25\%$ のものが製造されている。



図 5.9 300 φ 精密圧力計 1958 年 長野計器（株）提供

構造面の特徴は以下のとおりである。

- (a) 圧力弾性素子は高精度、高駆動力のブルドン管、チャンバ等であること
- (b) 内機は摩擦を極力減少させた高精度なものであること
- (c) 温度誤差を減少させるために、内蔵された温度補正装置、恒弾性材料の弾性素子を使用すること
- (d) 目盛板が大きく目盛分割が多いこと（1000 分割目盛板、指針を約 2 回転させるタイプもある）
- (e) ミラー付目盛板があること（示度読み取り時の視差（パララックス）を取り除くため）

④サニタリ圧力計



図 5.10 サニタリ圧力計 1989 年 長野計器（株）提供

サニタリ圧力計の弾性素子にはブルドン管が用いられる。この圧力計は、衛生的配慮が要求される食品や医療関係等に用いられ、接液部にはステンレス鋼が使用される。また、接液部の洗浄性を良くするために次の様な設計的配慮が必要とされる。

- (a) 接液部の段差やデッドゾーンを少なくし、表面が平滑に仕上げられていること
- (b) 接液部が洗浄しやすい構造であること
- (c) 圧力計の取付け、取外しが容易にできる構造であること
- (d) 圧力計の使用材料、接合部、パッキン類などに

は、食品衛生上、有害でなく、また、分解、洗浄、乾燥等にも支障ないものであること

- (e) 使用する食品の性状、使用条件、用途などを考慮して、圧力計が設計されていること

⑤差圧計⁽¹⁰⁾

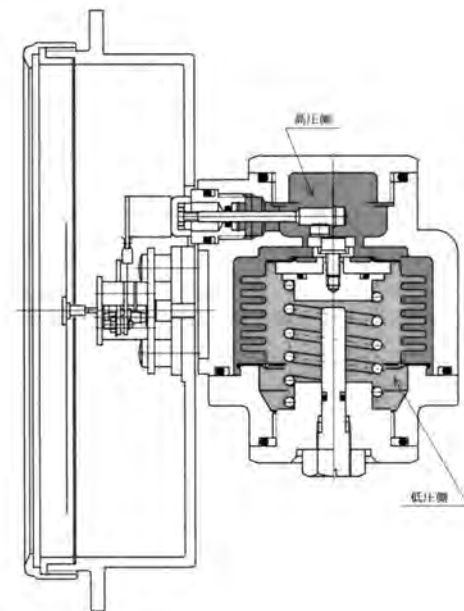


図 5.11 差圧計 1989 年⁽¹¹⁾

一般圧力計は大気圧を基準とした圧力、すなわち、ゲージ圧を測定するものであるのに対し、差圧計はある特定の 2 か所の圧力の差を測定する。常に一方の圧力が完全真空の状態である場合には、一般的に差圧計とは呼ばず、絶対圧力計と呼ばれる。用途は、密閉タンクの液面検出・差圧流量計・ストレーナの目詰まり検出等である。

⑥接点付圧力計

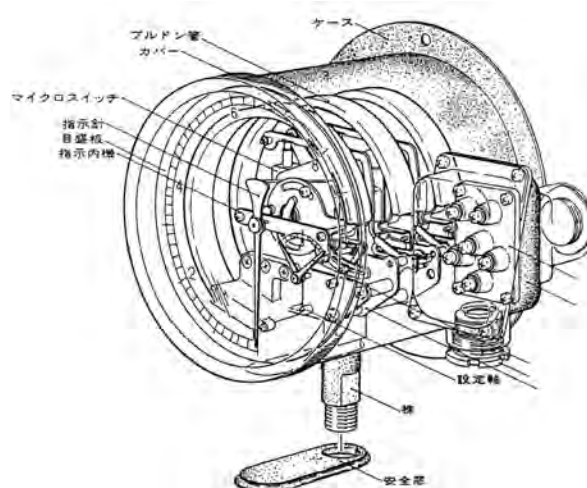


図 5.12 接点付圧力計 1979 年⁽¹²⁾

一般圧力計と同様、圧力の指示をすると同時に、ある圧力（設定圧力）において、電気接点を開閉し、警報信号や制御信号を発する圧力計である。接点には、マイクロスイッチ・コンタクトスイッチ・光電スイッチなどが使用されるが、最も多く使用されているのはマイクロスイッチである。

⑦圧力スイッチ

接点開閉機能のみで指示機構のないものを圧力スイッチという。従って、接点精度・耐振性等の接点性能を最重要視して設計されている。また、労働安全衛生法関連の法令により、爆発性ガス等の危険のある雰囲気のある工場・施設で圧力スイッチを使用する場合は、防爆構造の圧力スイッチの設置が義務付けられている。

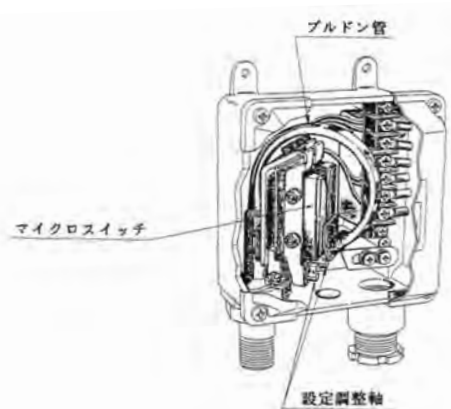


図 5.13 圧力スイッチ 1966 年⁽¹³⁾

⑧隔膜式圧力計（シール式圧力計）

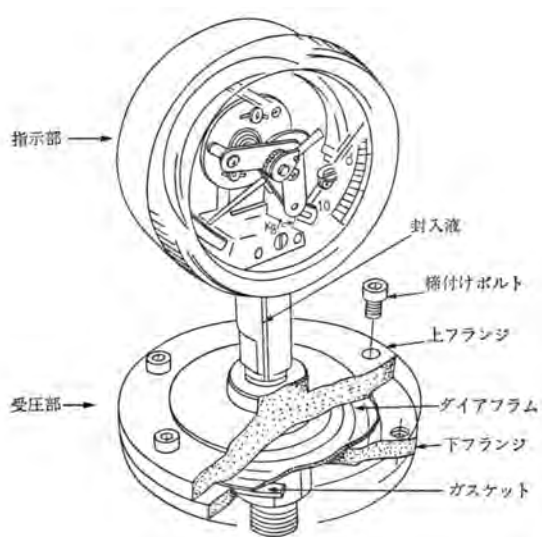


図 5.14 隔膜式圧力計⁽¹⁴⁾ 1953 年

隔膜式圧力計（シール式圧力計）は、測定流体とブルドン管とを薄板で成形されたダイヤフラムで仕切

り、内部に圧力伝達用の液体が封入された構造で、測定流体が直接圧力計内部に入らないようにしたものである。

ダイヤフラムあるいは受圧部を構成するフランジについては、ブルドン管のように優れた弾性特性が要求されないため、設計の自由度が広がる。そのため、さまざまな材質を選定することができ、測定流体に応じた仕様のものを製作できる。

隔膜式圧力計の主な用途は以下のとおりである。

- (a) 腐食性測定流体の場合
- (b) 高粘度測定流体の場合
- (c) 沈殿物・異物を含んだ測定流体の場合
- (d) 温度が低下すると粘度が著しく高くなったり固まったりする測定流体の場合

⑨高温用ダイヤフラムシール式圧力計

この圧力計は隔膜式圧力計と同様、ダイヤフラムで測定媒体がブルドン管に入らないように仕切った構造で、直結形（図 5.15）と隔測形があり、ダイヤフラムの直径が小さく、高温下での熔融状にある物質、または、常温下での高粘度流体の圧力測定に用いられる。



図 5.15 高温用ダイヤフラムシール式圧力計⁽¹⁵⁾ 1971 年

⑩防爆形接点付圧力計^{(16) (17) (18)}

電気接点を内蔵したもので、指示機構を有している。防爆形は、危険なガスの雰囲気で使用されるため、構造規定が厚生労働省で定められ、それに基づいて設計される。製品は（独）産業安全研究所で爆発試験などが行われ、形式認定された後、生産に入る。

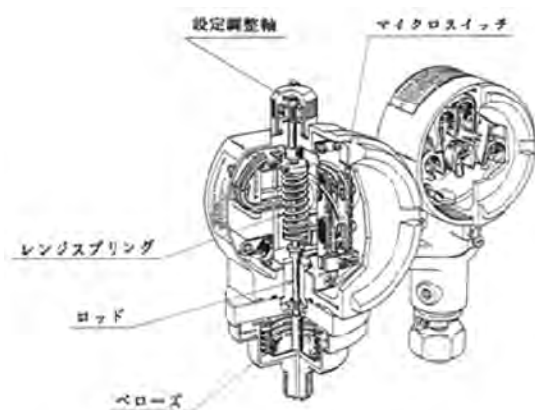


図 5.16 防爆形接点付圧力計⁽¹⁹⁾

(4) エンジンインジケータの開発製品

エンジンインジケータにはさまざまな製品が開発されているが、ここでは、1952 年に長野計器で開発された F1 形インジケータ（ファンポロとも呼ばれた）について記す。このインジケータは現在では製造されていないが、開発当時、画期的な製品とされ、技術史上、重要であるので、ここに取り上げる。

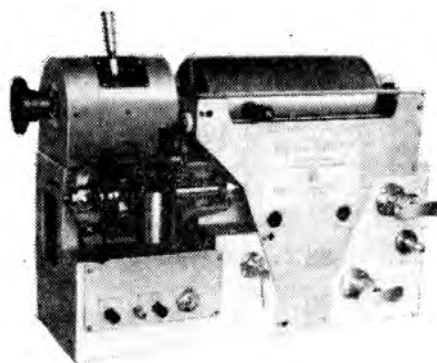


図 5.17 F 1 形インジケータ⁽²⁰⁾ 1953 年

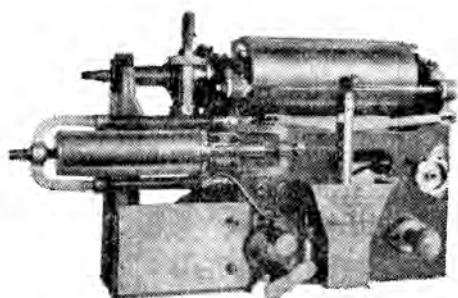


図 5.18 吸入圧および低圧指圧線図採取装置付 F1 形インジケータ⁽²¹⁾

インジケータの受圧部内にある 2 個の互いに接近する弁座に挟まれた 1 枚の薄板の片側に機関の気筒圧力をかけ、他の側に圧縮空気を送ると、両者の圧力が等しくなる。そのとき、薄板は他方の弁座に移動する。

内蔵されている高圧誘導発生装置の 1 次側回路を断続して二次側に高電圧を発生させて、記録ペン（電極）と機関のクランク軸に直結して回転する円筒との間に、火花（スパーク）を発する。その火花が回転円筒に巻きつけられ、表面に特殊処理をほどこした記録紙上にスパークスポットをつける。

F1 インジケータは、最高圧力 20、40、60、80 kg/cm² の 4 種類がつくられた。このインジケータは、遠隔測定（10m）やブラウン管に P-V 指圧線図を描かせるもの、その他当時としては画期的なもので、特許庁長官奨励賞その他を受賞している⁽²²⁾。性能は優れていたが、大型で重く、運搬や移動取り付けは不便であった。その後、新たな実験装置の電気式インジケータの開発により、小型化、高性能化が進み、F1 インジケータは 1970 年代まで販売された後、製造廃止された。

参考文献

- (1) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P25-26 コロナ社（1987）[昭和 62 年]
- (2) 気象庁：「気象観測の手引き」 P33-34（1998）[平成 10 年制定、平成 19 年改定]
- (3) 同上 P72
- (4) (5) (株) 安藤計器製工所提供（2005）[平成 17 年]
- (6) (7) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P27-28 コロナ社（1987）[昭和 62 年]
- (8) (9) 長野計器技術資料
- (10) 労働省産業安全研究所：「産業安全研究所技術指針 工場電気設備防爆指針（ガス蒸気防爆）（1979）[昭和 54 年]
- (11) (12) (13) 長野計器技術資料
- (14) (社) 計量管理協会：「圧力の計測」 P49 コロナ社（1987）[昭和 62 年]
- (15) 長野計器技術資料
- (16) 労働省産業安全研究所：「産業安全研究所技術指針 工場電気設備防爆指針（ガス蒸気防爆）（1979）[昭和 54 年]
- (17) (独) 産業安全研究所：「産業安全研究所技術指針 工場電気設備防爆指針（国際規格に整合した技術的基準対応 2006）（2006）[平成 18 年]
- (18) (社) 産業安全技術協会：「防爆構造電気機械器具 型式検定ガイド（国際規格に整合した技術的基準関係）」（1996）[平成 8 年]
- (19) 長野計器技術資料
- (20) (21) (株) 長野計器製作所「圧力計概説 改正版」 P89-91（1970）（昭和 45 年）

- (22) 長野計器社史編纂委員会編：「計測から制御へ
長野計器 50 年史」 P. 28 (1999) [平成 11 年]

6 | まとめと考察

世界で初めて科学的な圧力計測を行ったトリチェリは17世紀に「水銀気圧計」を発明した。その後、「水銀気圧計」は『液柱形圧力計』へと発展し、高度、気象、医療（血圧）、産業の各分野の発展に多大な貢献を行った。また、『重錘形圧力計』は『液柱形圧力計』とともに、圧力標準器として重要な役割を果たし、ブルドン管圧力計同様の歴史をもつ『エンジンインジケータ』は用途が限定的だが、ワットの蒸気機関の開発実用化に寄与し、世界の近代工業化を進展させた。

しかし、産業界でもっとも使用されている圧力計は『アネロイド形圧力計』に分類される「ブルドン管圧力計」である。そこで、今回は「ブルドン管圧力計」に焦点を当て、その誕生から現在までの軌跡を追った。その起源は、フランスのブルドンがブルドン管を発明して特許を取得した1849年に遡る。

一方、わが国で初めて圧力計の国産化を行ったのは、近代工業化が始まった明治時代の1896年に和田計器製作所を創業した和田嘉衡である。初期の圧力計は一般圧力計としての用途が中心で、「黄銅板を用いたブルドン管」による低圧用であった。その後、「丸棒の切削加工によるブルドン管」を用いた高圧用が開発され、その製造は、少量ながら、1960年頃まで続いた。本調査では、初期のブルドン管には使用できる管が開発されておらず、職人の手で、薄い金属板から管がつくられていたことが明らかとなった。

戦後まもなく、鉄道業や造船業などで、圧力計の信頼性を疑問視する声が高まり、官主導のもと、産官学による膨大な調査研究が行われ、これを機に、ブルドン管理論の研究はさらに進んだ。また、その頃、ブルドン管に使用する「黄銅管材」と「ステンレス鋼管材」が相次いで開発され、それまでの「板材」や「棒材切削加工」によるブルドン管の製造工程は、「管材」を用いたものへと一変した。しかも、その移行により、圧力が国産化当初の低圧（推定2MPa程度）から高圧へと向上し、検定時の不良率が大幅に改善されるなど、圧力計の技術、品質、生産性、信頼性は飛躍的に向上した。高度経済成長期には新産業が勃興して技術イノベーションが起こり、コンピュータ時代が到来したが、ブルドン管圧力計は高圧、超高圧（1GPa）の実現など、新たな産業ニーズに対応しながら、今なお、技術を向上させ、その用途を拡大し続けている。加えて、製造現場では、圧力計製造全般の機械化と自動化が加速している。

『ブルドン管圧力計』は、ブルドンの発明した構造原理を土台にして、さまざまな開発・改良が続けられている。外観からはわからないブルドン管技術の発展の変遷は、主に製造工程につくり込まれており、非常に専門的である。

本報告では、『ブルドン管圧力計』の構造や技術基準を示すJIS規格（B7505）を参考に調査を行った。各社の規格も、このJIS規格を基に発展している。

また、1980年代に市場に登場し、急成長を遂げている「工業用圧力センサ」は、最新半導体技術を応用したものである。自動車産業向けなど、新たな用途を拡大する「工業用圧力センサ」は、将来の圧力計測の一つの方向性を示していると思われ、今後、調査対象となることを期待したい。

今回の資料調査では、高度成長期以前の資料が企業に散逸、あるいは、ほとんど残されていないことが明らかとなった。伝統ある企業であれ、確実に世代交代は進んでおり、歴史を紐解くのは容易ではなかった。また、調査の過程では、わが国のもの作りの現場で行われていた、伝統的な技術や技能の育成や継承が、時代の変遷とともに著しく薄らいでいることを痛感せずにはいられなかった。

とはいえ、本調査では非常に多くの知見を学ぶことができ、大変に有意義であった。改めて、この機会をいただいたことに感謝したい。なお、系統化調査や所在調査を進めるに当たっては、関係機関、団体、ユーザー、工業会、メーカー各社、関係各位から多大なご協力を賜った。特に、本調査のために、板ブルドン管の試作、および、所在調査票の作成や提出などで、一部の方々にはご面倒をお掛けしてご協力をいただいた。施設名、御芳名のみでの記載となるが、下記の方々には心から感謝申し上げたい。なお、紙面の都合により、今回取りまとめた報告書には、その一部しかご紹介できなかったことをお許し願いたい。

経済産業省

独立行政法人産業技術総合研究所

小島時彦、小島孔、小路方誠

日本圧力計温度計工業会 兵田善男、市川由雄

社団法人日本計量振興協会

社団法人日本計量機器工業連合会

旭計器工業株式会社 楠輝雄、藤本正文、渡辺弘

株式会社荏原計器製作所 中村進、中村徳二

株式会社岡田計器製作所 國澤俊一
大林計器製造株式会社 辻典子、辻義和
オムロンヘルスケア株式会社 北村陽子
株式会社草場計器製作所 西野寧一
株式会社木幡計器製作所 木幡喜久恵、木幡巖
有限会社高橋製作所 高橋昭夫、高橋正司
東京計器株式会社 田中伸幸
東京計器株式会社、長野計器株式会社
大房二郎、宮川重一、宮坂久吉
東京航空計器株式会社
田口豊、前田誠二、住野匡、畦田親治、木村秀一

東京精密管株式会社 三木高雄
東洋計器興業株式会社 藤原勉
長野計器株式会社
宮下茂、塩入久徳、田村愼、武重剛、穂刈茂徳、
浅川供雄、中村真平、坂田信、山浦能人
長野計器株式会社 株式会社ナガノ計装 小川重光
西計器工業株式会社 西清志
株式会社日立製作所 菊入理、田村耕一
右下精器製造株式会社 右下誠一
山本計器製造株式会社 山本信太郎

圧力計登録候補一覧

No.	資料名称	所在地	区分	特徴	製造者	製造年
1	金敷と金槌	長野計器㈱	公開	我が国最初の圧力計を製造した時に用いたブルドン管を成形する為の金敷と金槌	和田計器製作所 現東京計器㈱	1896
2	3本ローラー式ブルドン管成形機	長野計器㈱	公開	金敷と金槌を用いた経験と勘による成形から、機械装置による成形となった初期の専用機	㈱東京計器製作所 現東京計器㈱	1914
3	重錘型圧力計	長野計器㈱	公開	大正13年に中央度量衡研究所(現産業技術総合研究所)福岡支所に納入された物。 昇圧能力2,000kgf/cm ² (200MPa相当)	㈱東京計器製作所 現東京計器㈱	1924
4	インジケータ	長野計器㈱	公開	昭和23年に東京計器製作所にて製作された内燃機関の燃焼圧力を測定・記録する計器	㈱東京計器製作所 現東京計器㈱	1948
5	15,000Kg/cm ² 重錘型圧力計	長野計器㈱	非公開	1967年当時世界で初めて15,000Kg/cm ² の超高压の発生に成功した圧力計	㈱長野計器製作所 現長野計器㈱	1967
6	1GPa重錘型圧力標準器	長野計器㈱	非公開	1GPaの超高压でありながら、再現性30PPM、不確かさ100PPMと従来の1/20の高精度を実現した圧力標準器	長野計器㈱	2000
7	蒸着形半導体ひずみゲージ式圧力センサ	長野計器㈱	非公開	多結晶シリコン薄膜による半導体ひずみゲージをステンレス製ダイヤフラムに直接蒸着した小型で高感度、耐食性の高い圧力センサ	㈱長野計器製作所 現長野計器㈱	1983
8	圧力計内機自動組立機シネクトン45	(有)高橋製作所	稼働中 公開	それまで人手で組立していた内機を自動化した、現存最古の内機自動組立機	設計:(有)高橋製作所 製作:シチズン時計(株)	1971
9	内機歯車摩耗テスト機TOKO221型	東洋計器興業(株)	非使用 非公開	内機の歯車の摩耗状況を確認し、内機の耐久性をチェックするテスト機	東洋計器興業(株)	1955
10	静圧動圧形圧力計特殊拡大機構(特殊内機)	西計器工業(株)	非使用 非公開	圧力計外部からの振動および内部動圧による振動を完全に受け止め、指針は静止して最高圧力を正確に指示するように設計された部品	西計器工業(株)	1978

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第15集

平成22(2010)年3月30日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト・エディット 永田宇征、エディット 大倉敏彦・久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク