

ゾンデ用空ごう(I)*

岡田 芳隆**

目次

1. はしがき
2. 製法
3. 材料
4. 変位特性
5. 弾性誤差
6. 温度誤差
7. 気象大学校における最近の研究
8. あとがき

1. はしがき

この解説は編集委員のおすすめによって書きあげたものである。高層気象観測に用いられる空ごうについて筆者の知る所を述べ、併せて研究の現状を紹介する。内容は項目毎に独立した形になっているが、研究あるいは考え方の流れが判るように心がけたつもりである。

空ごう気圧計は金属の弾性を利用した気圧計である。大気圧の変化によって、それをうける金属板のたわみに変化を生じ、これを測定することにより大気の絶体圧力の測定を行なう。

空ごう気圧計は、空ごうおよび変位の拡大機構より成る。てこによる変位の拡大機構は空ごう気圧計の重要部分であるが、ここでは空ごうのみを考察し拡大機構にはふれない。

なお、わが国のゾンデ用空ごう気圧計の歴史については、鹿野(1961)の発表を参照されるとよい。

以下、まず空ごうの概要を説明してから本論に入ることとする。

空ごうは二枚の金属ダイヤフラム(diaphragm)からできている。ダイヤフラムは円板を適当に成型して浅い殻(かく)としたものである(写真1下段)。二枚のダイヤフラムを周辺で合わせて内部を真空にして封じたものが空ごうである。内部が真空であるため、真空空ごとよばれることがある。空ごうのダイヤフラムの中心には、取付用のねじ金具と変位を取出すための金具がつけられている。

空ごうが大気圧と釣り合うために補助的にばねを使用することがあるが、ゾンデ用としてはこの方法は採用されていない。

一般圧力センサとして空ごうの特徴をあげてみると、

- (1) 安価：製法で述べる絞り型が適当に定められれば

* Aneroid Capsule for Radio-sonde Use (I)

** Y. Okada: 気象大学校
—1973年4月9日受理—

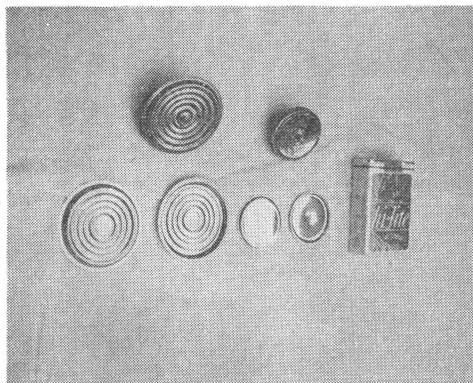


写真1 上左：南極用空ごう，上右：ルーチン用空ごう，下：各ダイヤフラムの表と裏

量産が可能である。

- (2) 小型軽量：構造が簡単である。
- (3) 応答が早い：適当に設計されたダイヤフラムは数百 Hz の圧力変化に応答するといわれる (Wildack et al, 1957)。
- (4) 他の装置と結合が容易：変位測定器と組合せればよい。
- (5) 精度に問題がある：以下で説明する諸誤差がある。また、相対測定であるから精度は準器に依存する。といえるだろう。

現在使われているゾンデ用空ごうは、一つはルーチンゾンデ、他の一つは南極ゾンデに用いられているものである。前者をルーチン用空ごう、後者を南極用空ごとよぶことにする(写真1上段)。

両者を対照してみると

- (1) 材料：ルーチン用は磷青銅製、南極用は恒弾性材料製である。
- (2) 大きさ：ルーチン用は有効直径約 40 mm、南極用は約 60 mm である。また、板厚は、ルーチン用は 0.15 mm、南極用は 0.12 mm である。
- (3) ダイヤフラムの形状：ルーチン用は周辺に唯一つ

の波 (corrugation) をもち他の部分はほぼ平坦な形状をもつ。このようなダイヤフラムは波なし (non corrugated) とよばれる。一方、南極用は5つの同心円状の波をもっている。これは波あり (corrugated) とよばれる。

(4) 段数：ルーチン用は有効直径が小さいため変位が充分大きくとれない (4. 変位特性) ので空ごうを二段重ねて直列使用している。南極用は一段である。

2. 製 法

空ごうの製法はルーチン用と南極用では若干異なる。

[1] ブランクの打抜きとダイヤフラム成型

材料の板材から円板を打ち抜く。この円板をブランク (blank) という (写真2下段)。ブランクを金型で絞り加工することによりダイヤフラムが成型される。金型と絞り方法は現在のところおのおの二種類がある。

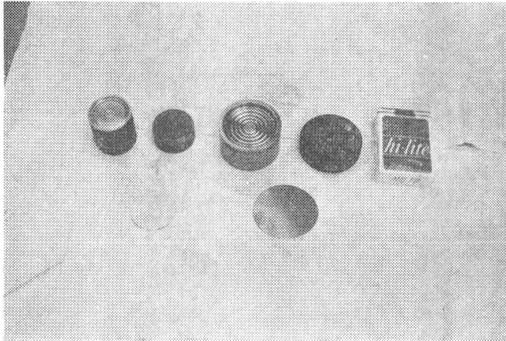


写真2 上左から：ルーチン用雌型，同雄型，南極用金型，成型用ゴム
下左から：ルーチン用ブランク，南極用ブランク

金型の分類

(1) 雄型と雌型を使う方法：二つの型の間にブランクをおき力を加えて絞り成型する。この方法はルーチン用空ごうの製造に使われている。

(2) 雌型とゴムを使う方法：雄型の代わりに成型用ゴムをあて、力を加える。この方法は南極用空ごうの製造に使われる (写真2上段)。

絞り方法の分類

(1) パワープレスによる絞り：これは上記金型の分類 (1) に対してのみ使える方法である。数回の衝撃を加えることによりダイヤフラムが成型される。加工時間は当然短い。この方法はB社製ルーチン用空ごうの製造に採用されている。

(2) 油圧プレスによる絞り：これは上記金型の分類 (1), (2) いずれにも使える方法である。油圧プレスにより徐々に力を加えて絞り成型する。加工時間は数秒程

度である。この方法はA社製のルーチン用空ごうと南極用空ごうの製造に使われている。

このように異なる成型方法があるが、その優劣は明らかではない。なお、米国ではブランクに流体圧をかけ雌型によって絞る方法があるようである (Wildack et al. 1957)。

[2] ダイヤフラムの二次熱処理

この工程は南極用空ごうに対してのみ実施される。南極用空ごうの材料は析出硬化型恒弾性材料とよばれるものである (3. 材料)。弾性は、ダイヤフラム成型後に熱処理を行なうことによって向上する。この工程を二次熱処理とよぶ。二次熱処理は水素炉または真空炉中で行ない、550°C 1時間、後徐冷と定められている。

[3] 真空封じと中心金具取付け

成型されたダイヤフラムを二枚合わせ内部を真空にする工程であって、實際上製造の歩留り (不良率) にかなり影響する。この工程も多様である。ルーチン用と南極用に分けて説明する。

(1) ルーチン用空ごうに使われている方法

二枚のダイヤフラムの周辺部を、一部ピンホールを残して互にはんだづけしておき真空槽中ではんだを加熱してピンホールを封ずる。槽から取出せば真空空ごうができる。

ピンホールを封ずるための加熱方法には、ニクロム線による方法 (B社) と高周波加熱 (A社) の二つがある。この優劣も明らかではない。高周波加熱法では、素材金属中に溶解したガスを追い出しうる利点がある (佐貫1953) といわれる。しかしダイヤフラム全体を不必要に過熱するおそれがあり、加熱時間の最適制御が必要である。過度の加熱は弾性を悪化するし、変位特性にも影響を与える (4. 変位特性)。

(2) 南極用空ごうに使われている方法

二枚のダイヤフラムを合わせ、高真空中 (10^{-4} ~ 10^{-5} mmHg) におき、電子ビームで周辺部を熔接する。この熔接法は電子ビーム熔接といわれる。当然ながら空ごう内部の真空度を著しく良好にする (7. 気象大学校における最近の研究)。

この方法は最近開発されたものであって、従来はダイヤフラム周辺をローラー状電極で熔接していた。これをシーム熔接という。真空封じは、ダイヤフラム中心にあるピンホールを中心金具取付けと同時にはんだで封じて行なっていた。米国のある種の空ごうはこの方法を用いている。

(3) 中心金具取付け

中心金具がダイヤフラム中心にはんだによって取付けられ空ごうは完成する。

3. 材 料

材料の性質は、物理的定数と機械的定数であらわされる。物理的定数は、材料の加工によって変化しにくい、機械的定数は著しく変化する(坂本光雄1968, 飯高 一郎 1971)。機械的定数は、引っ張り強さ、のび (elongation), ばね限界値 (K_b), 硬さ (ビッカース) 等である。

空ごうに関して、素材の機械的性質は重要である。即ち、引っ張り強さはダイヤフラムが耐える圧力に関係するし、のびは複雑な成型の可能性の目安であり、ばね限界値は弾性のよさの目安である。これらの機械的定数の測定にはおのおの固有の測定器が開発されているが、我々の対象とする薄板に関しては問題点があるようである(ばね性測定研究会1966)。

機械的定数の間にはごく大まかな関係がみられる。即ち、引っ張り強さ大なるものは、のびは小、ばね限界値は大、硬さは大の傾向がある。また周知のように、冷間加工によって、一般に、引っ張り強さは大、のびは小、硬さは大、ばね限界値は大となる。

以下ルーチン用および南極用空ごうの素材である磷青銅および恒弾性材料 Sumi Span について概観してみよう。

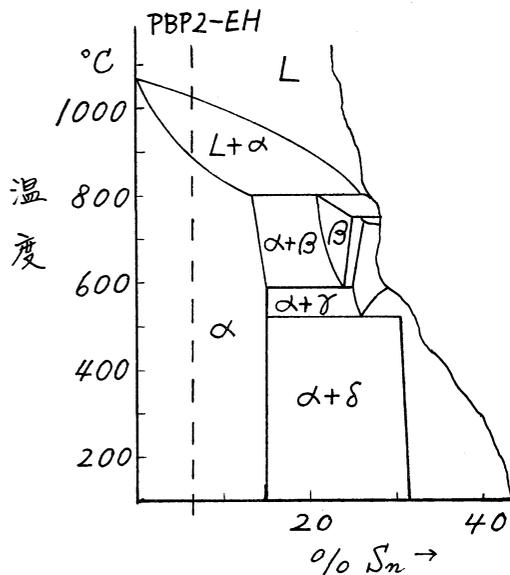
[1] 磷青銅

ルーチン用空ごうの素材は JIS に規定された磷青銅板 PBP 2-EH で板厚 0.15 mm である。化学成分は、 S_n 5.5~7.0%, P 0.03~0.35%, $S_n+P+Cu > 99.5\%$ と定められている。機械的性質については JIS の規定はない(恐らく薄板のため)が引っ張り強さ 65 kg/mm² 以上、のび 5% 以上のものを使っている。

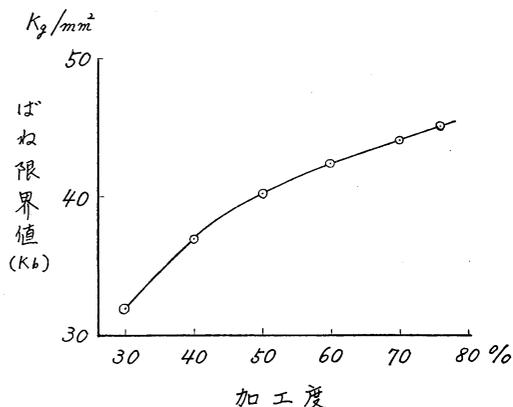
さて、磷青銅の成分中、P は素材製造工程中で脆性物質の発生をおさえるため痕跡程度添加される脱酸剤であって組織的には何ら影響を与えない。従って磷青銅は Cu-Sn 二元合金とみられ状態図 (phase diagram) に示すことができる。これを第 1 図に示す(飯高 1962)。PBP 2-EH のところでは常温で均一な α 固溶体である。この均一組織は圧延とかダイヤフラム成型等の冷間加工によって変化するはずであるが、ダイヤフラムに関する巨視的あるいは微視的な組織の実状については調査がなされていない。

磷青銅の弾性は冷間加工によって向上する。磷青銅の

1973年5月



第 1 図 Cu-Sn 合金の状態図



第 2 図 磷青銅の加工度とばね限界値の関係
加工度は断面縮少率で示す。

ばね限界値が加工度によって変化する様相を第 2 図に示す(坂本光雄 1968)。このようにして、素材の圧延率がダイヤフラム成型の条件等は、完成されたダイヤフラムの弾性的性能に影響を与える(5. 弾性誤差)。

次に、磷青銅の弾性は、加工後に低温熱処理を行なうことで向上させるといわれている(中谷 宏 1963, 坂本光雄 1968)。この処理は低温焼きなましといわれ、磷青銅にあっては再結晶温度(組織がこの温度で変化する)直前の 250°C がよいといわれている。また、現在ゾンデ用空ごう材料としては使われていないが、洋白 (Cu-Ni)

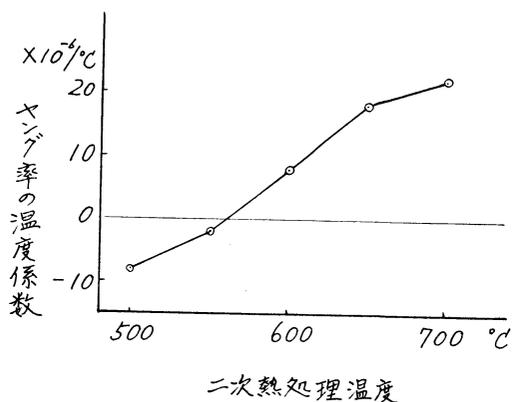
に対して低温焼きなましの効果は著しいといわれている。しかしながら磷青銅製空ごうに対する効果は明らかではない(5. 弾性誤差)。

[2] Sumi Span

南極用空ごうに使われている恒弾性材料は、商品名 Sumi Span EL-3 といわれ板厚 0.12 mm である。その化学成分は、Ni 42.4%, Cr 5.5%, Ti 2.5%, Fe 残である。このような複雑な合金は磷青銅のように状態図で示すことはできない。

この合金の素材は溶体化(均一組織)されていて、常温では金相学的に不安定となっている。ゾンデ用空ごうの素材の機械的性質は、引っ張り強さ 70 kg/mm² 以上、のび 10% 以上、硬さ(ビッカース) 150 以上、ばね限界値 30 kg/mm² 以上のものである。一見して磷青銅にくらべて加工性に富むことが判る。

しかるに、この材料は冷間加工後に二次熱処理を行ない徐冷すると組織中に析出相があらわれ適当に安定化する。それと共に、弾性は著しく改善され、ばね限界値、引っ張り強さ、硬さは大となる。このため析出硬化型材料とよばれる。このように、加工性に富む溶体化状態で加工を行ない、しかる後、二次熱処理によって弾性の向上をはかりうることは、ダイヤモンド用材料として甚だ好都合と考えられる。



第3図 Sumi Span のヤング率の温度係数と二次熱処理温度の関係

この材料の他の大きな特徴はヤング率の温度係数が小さいことで恒弾性材料とよばれるゆえんである。6. 温度誤差で説明するように、空ごう材料のヤング率の温度係数は温度誤差の大きな因子である。この点でもゾンデ用空ごう材料として都合がよい。Sumi Span の恒弾

性は磁気的作用によるといわれている。ヤング率の温度係数は二次熱処理温度で若干変化するといわれ、その関係は第3図に示される。

Sumi Span と同じく析出硬化型材料にベリウム銅がある。この材料が弾性的にすぐれていることは周知の通りであるが、ゾンデ用空ごう材料としては用いられていない。二回ほど試作したことがあるが、いずれも真空封じが不完全で使用に耐えるものはできなかった。しかし、空ごうではなく、単にダイヤモンドとして使用することを考えるならば有力な材料とみられる。最近、ドイツでベリリウム銅の空ごうの試験が行なわれたとの報告がある(Fink 1968)。

4. 変位特性

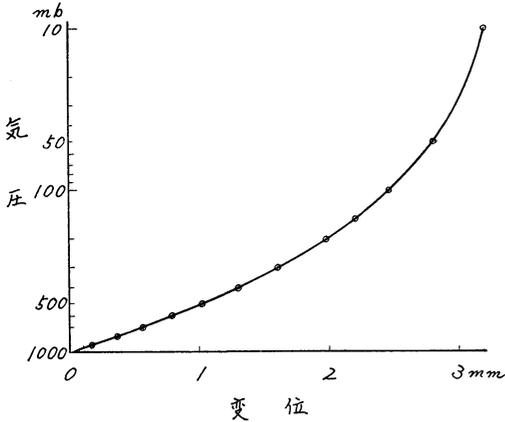
空ごうは、大気圧—変位の変換器であるから圧力と変位の関係は基本的な特性である。一般計測器では変換器の直線性を重視する。圧力と変位が直線関係をもつような変位特性は圧力直線型といわれ、そのようなダイヤモンドは工業プロセスにおいて多く用いられる。

しかしながらゾンデ用空ごうではいささか事情がことなる。

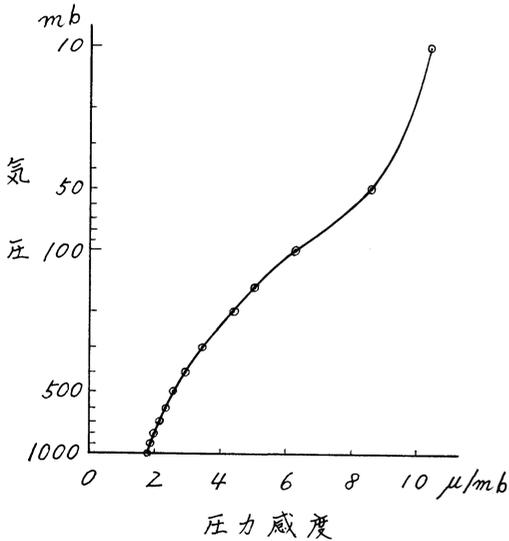
[1] ゾンデ用空ごうの変位特性

ゾンデ用空ごうで測定した気圧は高度計算に使われる。高度と気圧は対数関係だから、ゾンデ用空ごうは気圧の対数と直線関係をもつ変位を示すと都合がよい。つまり、低圧では圧力感度(1 mb 当りの変位)が大きく、高圧では小さいような変位特性を要求する。このような変位特性を高度直線型という。しかし厳密に変位と高度が比例しているわけではない。ゾンデに使用される空ごうは高度直線型が多いようである。

高度直線型の空ごうを用いた気圧計は別の利点をもっている。先に述べたように、空ごう気圧計は機械的な拡大機構をもっているが、これは若干のがたは不可避であり誤差の原因となる。しかるに、高度直線型の空ごうは低圧で圧力感度が大きいいため、機構の不完全による誤差は低圧で比較的小さい値となる。例えば、がたによって 1 μ の狂いがあった時、ルーチン用空ごうは 10 mb 付近で約 10 μ/mb の圧力感度であるから、気圧に換算した誤差は 0.1 mb に過ぎない。一方、ルーチン用空ごうと同大の空ごうで圧力直線型のものを作ると、全圧力範囲で約 2 μ/mb の圧力感度がえられる。前と同じ 1 μ の狂いを考えれば、誤差は全圧力範囲で 0.5 mb となり、低圧で前者より大きくなるのが判るであろう。低圧での誤差は高度計算の結果に大きくひびく。



第4図 ルーチン用空ごうの変位



第5図 ルーチン用空ごうの圧力感度

それでは、高度直線性のよい空ごうほどゾンデ用として適しているかという点、これも問題である。そのような空ごうは、低圧で、いわゆるベコを生じ易い。これは空ごうの変位が圧力に対して不連続になる現象である。ベコを生ずるとその点(気圧)で圧力感度は極大を示す。許されるベコの限界をきめることは、ゾンデの機構との関連もあり、實際上非常に困難である。

要するに、ゾンデ用空ごうは、高度直線型の変位特性を有し、圧力感度は低圧で機構から許される適当な値にすることが要求される。ルーチン用空ごうの圧力-変位特性および圧力-圧力感度特性の一例を第4図、第5図に示す。

南極用空ごうの特性も似たようなものであるが、高度

直線性はルーチン用に比して若干悪い。

〔2〕円板の微小たわみ

空ごうの変位特性は複雑であるが、ダイヤフラムのたわみ(変位)特性に帰着する。以下ではダイヤフラムの変位を与える計算式を空ごうに適用する時の問題点を検討する。それによって、ゾンデ用空ごうの変位特性の諸性質を考察することができる。

ルーチン用空ごうは周辺に1つの波があるが他の部分は殆んど平坦なダイヤフラムからできている。このようなダイヤフラムの変位特性は、大まかにみて、分布荷重をうける円板の曲げ変形を仮定して計算できる。最も簡単に微小たわみを仮定すれば、円板周辺の支持条件に従って、円板中心の変位 w_{max} は

$$\text{周辺を固定した場合 } w_{max} = \frac{qa^4}{64D} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{周辺を単に支持した場合 } w_{max} = \frac{(5+\nu)qa^4}{64(1+\nu)D} \dots\dots\dots(2)$$

で与えられることはよく知られている。ここに

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots\dots(3)$$

は板のまげ剛性 (flexural rigidity) といわれる量である。また、

- q : 単位面積当りの荷重
- a : ダイヤフラムの直径
- ν : 材料のポアソン比で約0.3
- E : 材料のヤング率
- h : 材料の板厚

である。

実際の空ごうではダイヤフラムの平坦部分は周辺の波で弾性的に支持されているので、変位は (1), (2) 式の中間の値をとることになる。

〔3〕円板の大たわみ

しかしながら、(1), (2) 式はいずれも中心変位 w_{max} が荷重の強さ q に比例することを示し、ルーチン用空ごう用ダイヤフラムの変位特性(いわゆる高度直線型)を説明することはできない。この欠点は〔2〕で微小たわみを仮定したためである。ゾンデ用ダイヤフラムの変位は板厚の数倍に達する。そこで大たわみの計算式が必要になってくる。

大たわみでは、変位は板厚に比して小ではないが、他の寸法(例えば直径)に比して小さいことを仮定する。更に、荷重によって中央面が変形することを考慮する。中央面とは、板の表面と裏面の丁度中間に想定した面である。

これらの仮定から計算された結果として Timoshenko

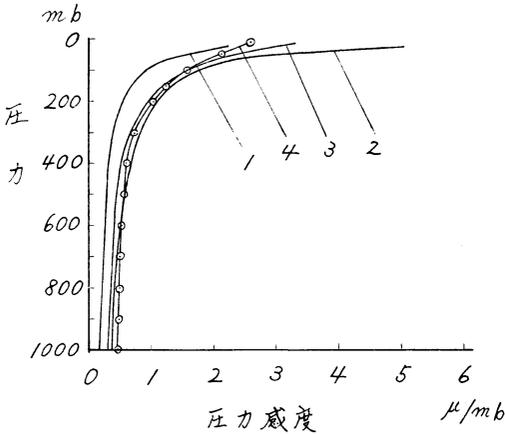
は次式を紹介している (Timoshenko and Woinowsky-Krieger 1959).

$$\frac{w_0}{h} + A \left(\frac{w_0}{h}\right)^3 = B \frac{q}{E} \left(-\frac{a}{h}\right)^4 \dots\dots\dots(4)$$

ここに, w_0 は円板中心の変位で, その他は[2]と同じであるが, ポアソン比は0.25としてある. 定数 A, B は周辺条件でさまるものであり第1表で与えられる.

第1表 (4) 式の定数 A, B の値

Boundary condition		A	B
Plate clamped	Edge immovable	0.471	0.171
	Edge free to move	0.146	0.171
Plate simply supported	Edge immovable	1.852	0.696
	Edge free to move	0.262	0.696

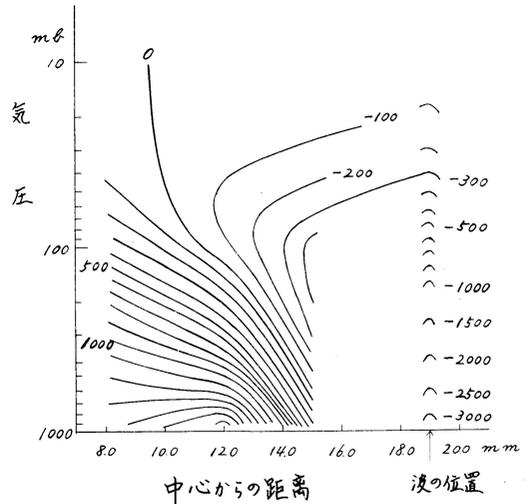


第6図 ルーチン用ダイヤフラムの圧力感度の計算値は比較的に実状に合う.

1. Simply supported edge immovable
2. Simply supported edge free to move
3. Clamped edge free to move
4. ルーチン用ダイヤフラム

(4) 式がルーチン用ダイヤフラムにどの程度適合するかを見るために, 計算した結果と実際例を第6図に示す(岡田 1969). これは圧力感度とダイヤフラムにかかる圧力との関係をあらわしたものである. 大まかにみて, ルーチン用ダイヤフラムの特性の傾向は計算値と合っていることが判る.

ストレンゲージ(歪(ひずみ)計)を用いた歪測定の結果(岡田 1967)では, 第6図の曲線3の場合, 即ち周辺が固定されて回転はできないが位置は動きうる場合と



第7図 半径方向の曲げ歪の分布(ルーチン用ダイヤフラムの実測結果). 横軸はダイヤフラム中心からの距離. 縦軸は気圧. 上面凹なる曲げを正とする. 圧力が大きくなると歪0の点が移動する. 歪の単位は $\times 10^{-6}$ で示す.

似ていることが示されている. 第7図はルーチン用ダイヤフラムにかかる圧力と半径方向の曲げ歪の分布を示す実測結果である. 圧力が増加するとダイヤフラム平坦部分の曲げ歪0の点が次第に外側に移動していく. これは Clamped edge に近い様相を示すものである.

第6図において, ルーチン用ダイヤフラムの特性は, 低圧で, いずれの計算値よりも圧力感度の増加が少ない. 低圧では別の問題点があり[4]で説明がなされる.

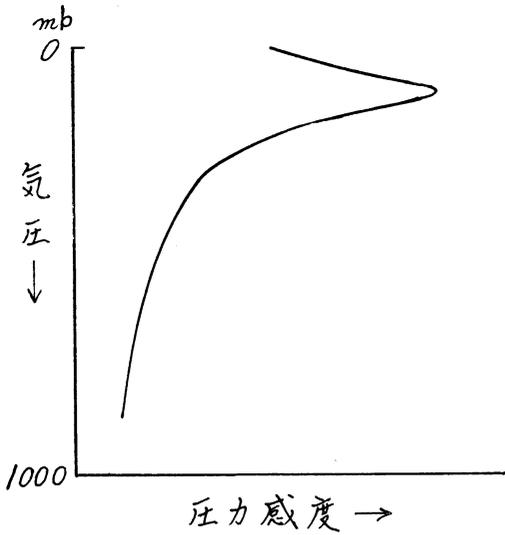
円板の大たわみの計算式はルーチン用ダイヤフラムの高圧および中圧部の変位特性を比較的によくあらわすものといえることができる.

[4] 挫屈の発生

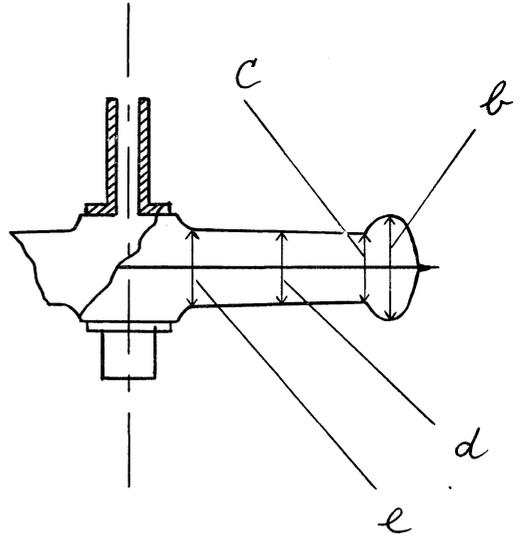
大たわみ式はダイヤフラムにかかる圧力が小さくなると問題点がでてくる.

(4) 式によれば, 第6図で示したように, 圧力が減ずるに従って圧力感度は大きくなる. しかるに多くのルーチン用空ごうを調べると, 時々, 低圧のある気圧付近で圧力感度が増大し, その気圧から外れるに従って減少するといった様相を示すことがある. 第8図はその概略の特性である. 最大の圧力感度が極端に大きくなったものはベコである.

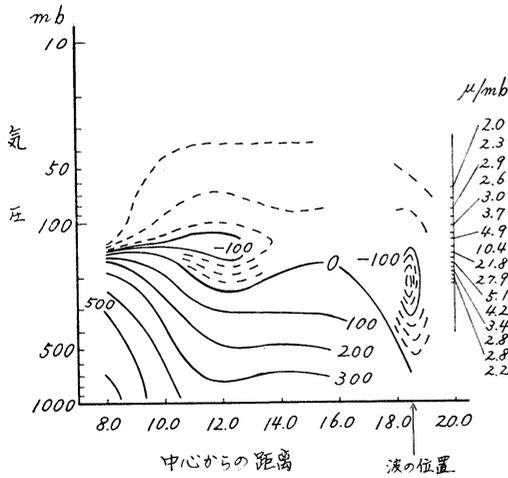
歪計で, ベコを生ずる波なしダイヤフラムを調べた結果, 中央面において, ベコ発生時に, 半径方向の圧縮歪



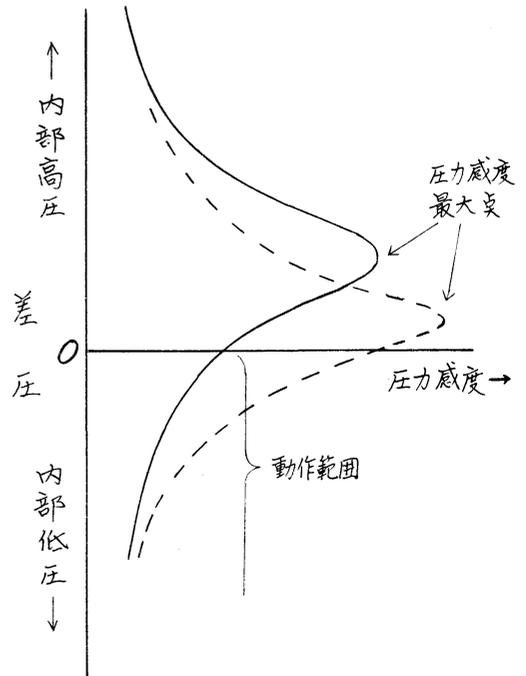
第8図 圧力感度の極大値がある場合



第10図 吸口付空ごうの構造および寸法名



第9図 ペコを生ずるダイヤフラムの半径方向の中央面歪の分布 (ルーチン用実測結果). 引っ張り歪を正とする. 歪の単位は $\times 10^{-6}$ 右側に圧力感度を示す.

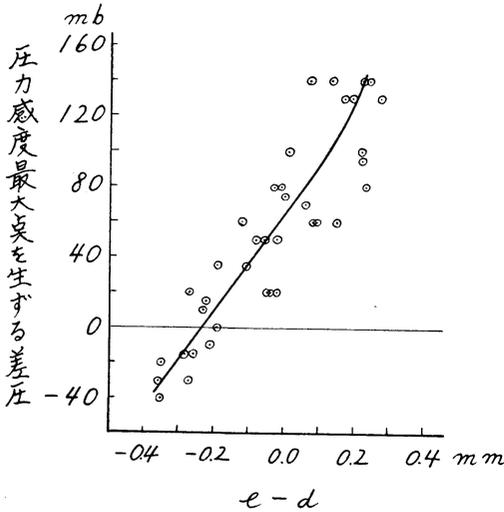


第11図 吸口付空ごうの圧力感度の説明図

が発生することが判っている (岡田 1967). 測定結果を第9図に示す. 図で圧力感度をみると, ペコが160 mb付近で生じており, その時, 中心からの距離12 mm付近で大きな圧縮歪が発生しているのが判る. 圧力がもっと大きくなるとこの歪は引っ張りに転じてしまう.

Timoshenko は, 荷重のかかる円板の中央面内に一様な圧縮力が働く時のたわみを計算し, ある臨界圧縮力に

おいて変位が急増することを示している (Timoshenko and Woinowsky-Krieger 1959). この現象は挫屈 (buckling) としてよく知られている. ペコは浅い殻の挫屈として理解できる.



第12図 吸付空ごうの形状と圧力感度最大点の差圧
横軸 e-d は図10参照

波なし空ごうのダイヤフラム平坦部分が完全に平面ならばベコは発生しないであろう。なぜなら、たわみによって中央面には引っ張り力のみが生じ、圧縮力は生じないからである。我々の波なしダイヤフラムは、細かに見れば、多かれ少なかれ曲率分布をもつ面である。これが、程度の差はあるにしてもベコを発生させる。

実際において、いわゆるベコを発生するルーチン用空ごうは非常に少ない。しかしこの現象が低圧での変位特性に大きく影響していることは明らかである。岡田は、吸口付と称するルーチン用空ごうを作り圧力感度と気圧の関係の調べた(未発表, 昭和38年)。この空ごうは、金具に貫通穴があり、空ごう内外に自由に差圧がかけられるもので、第10図にその構造を示す。測定結果は、たとえば、第11図の実線で示すようなものである。圧力感度最大点は空ごうによっていろいろの差圧にあらわれ、その大きさもさまざまである。その点では挫屈が発生している。

いま、第11図の実線の吸口付空ごうを真空空ごうにしたとすると、その圧力感度特性は図の下半分(動作範囲として示してある)で示される。吸口付空ごうの差圧0の点は真空空ごうの気圧0 mbの点になるわけである。この空ごうは、図示の通り動作範囲内には圧力感度最大点をもたないが、その影響は動作範囲の特性におよぶ。例えば、図の破線のような特性をもつ吸口付空ごうを真空空ごうにすると、低圧でよく動く空ごうが得られるこ

とは明らかである。

吸口付波なし空ごうにおいて、最大圧力感度を生ずる差圧とダイヤフラムの形状は密接な関係がある。第10図に示す e と d の差 (e-d) とその差圧との相関が大きい(第12図)。ダイヤフラムの中心付近の形状が変位特性に与える影響は大きいことになる。

ルーチン用空ごうでは、通常は圧力感度最大点が動作範囲外にあるようにダイヤフラム成型が行なわれているが、真空度の悪い空ごうは最大点が動作範囲に近づいてくる。第11図で差圧0は吸口付空ごう内外の圧力が等しいことを考えれば明らかである。従って、ルーチン用空ごうでは、真空度の悪いものは変位が大きいことになり、この点に着目してしばしば真空度比較の際の目安とされる。

波なし空ごうは、挫屈現象をうまく利用することによって高度直線性をよくすることができるが、ダイヤフラム形状の僅かな変化で特性が変り易い。低圧の変位特性は挫屈のために複雑となるといえる。

[5] 波ありダイヤフラムの計算式

南極用空ごうは波ありダイヤフラムを用いている。

Timoshenko は正弦波状の波をもつ周辺固定のダイヤフラムのたわみに対して

$$8\left(\frac{w_0}{h}\right)\left[-\frac{2}{3(1-\nu^2)} + \left(\frac{f}{h}\right)^2\right] + \frac{6}{7}\left(\frac{w_0}{h}\right)^3 = -\frac{q}{E}\left(\frac{a}{h}\right)^4 \dots\dots\dots (5)$$

を与えている (Timoshenko and Woinowsky-Krieger 1959)。ここに

w₀: 中心部のたわみ, h: 板厚, f: 波の頂上と底の高さの差の1/2, q: 荷重の強さ, E: ヤング率, ν: ポアソン比

である。(5)式は波数5以上に対して適当といわれる。

赤坂は波板を直交異方性材料として扱い詳細な計算を行ない次式を導いた(赤坂 1955)。

$$w_0 = \frac{pa_0^4g_3}{16(\alpha g_1 + 3g_2)D_r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{4}w_0^2 \frac{H_r \cdot f}{D_r(\alpha g_1 + 3g_2)}} \dots\dots\dots (6)$$

ここに

w₀: 中心変位, a₀: ダイヤフラム半径-中心金具半径(長さの差), p: 圧力, D_r: 半径方向の等価曲げ剛性, H_r: 半径方向の等価伸長剛性, α: 異方性の強さによってきまる数値, g₁, g₂, g₃, f: 中心金具の寸法できまる数値

である。(6)式は周辺固定条件の大たわみに対するものである。

米国標準局(NBS)でダイヤフラムの研究が行なわれ、変位特性に関する調査結果が発表されている(Wildac et al. 1957)。対象は、各種材料の圧力直線型である。一様な3つの波をもつ同一形状のダイヤフラムを多数試験して次の実験式を得ている。

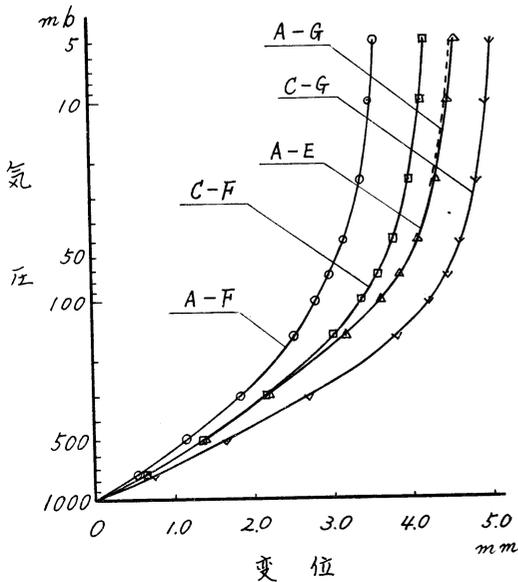
$$\frac{FX}{PD} = 2.25 \times 10^5 \left(\frac{t}{D} \times 10^3 \right)^{-1.52} \dots\dots\dots (7)$$

ここに

X:変位, D:直径, t:板厚, P:圧力, E:ヤング率, F:板定数 $E/(1-\nu^2)$, ν :ポアソン比

である。この関係は、 $(t/D) \times 10^3$ が0.6から6.0の範囲、 X/D が0.02以下で成り立つとしている。直径の2%の変位まで直線性が得られるというのは一般的に妥当なようである。

(5), (6)式は、いずれも一様な波を仮定していること、波を平均化した面が水平であるとしている点で我々のダイヤフラムにそのままあてはまるものではない。実際の空ごうのダイヤフラムは、例えば第35図(次号参照)に示されるような形状である。(7)式は圧力直線型であるから勿論都合が悪い。空ごう用の波ありダイヤフラムの変位特性を予測することは困難といえよう。



第13図 材料の機械的性質と変位特性
A, C: 金型の名称, E, F, G: 材料のロット名
(第2表参照)

第2表 材料のロット別の機械的性質

ロット名	引張強さ kg/mm ²	硬さ (HV)	のび %	ヤング率 kg/mm ²
E	72.0	246	12.0	18,540
F	65.3	189	24.2	18,220
G	74.9	240	11.5	18,620

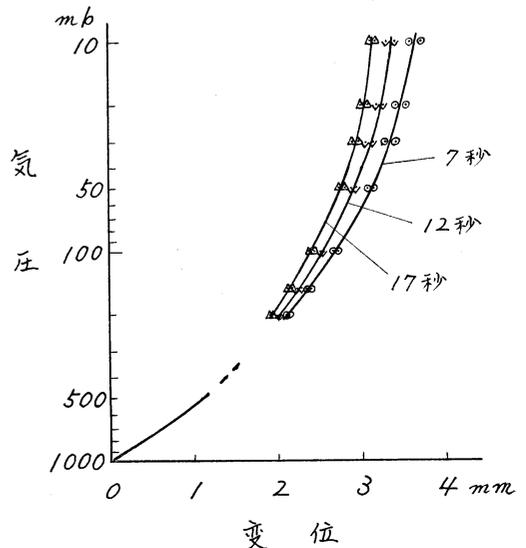
二次熱処理前の値

一般計測用のダイヤフラムにおいては、波は圧力直線性の改善のために有効である(赤坂 1955)が、ゾンデ用ダイヤフラムの場合は、寧ろ、要求される変位特性を得るための調整部分としての役割りを果たしている。

〔6〕材料の機械的性質の重要性

今までに述べた計算式はいずれも材料の物理的定数を含んでいるが、機械的定数と無関係である。これは少なくともゾンデ用空ごうの変位に関する限り実状に合わない。空ごう用ダイヤフラムの変位特性は、材料の機械的性質で著しく異なることは明らかである。

第13図に、機械的性質の異なる Sumi Span 素材で作った南極用空ごうの変位特性を示す。図で、特性につけた記号は、最初の文字は金型の名称、次は材料のロット名である。材料のロット別の機械的性質を第2表に示す。ヤング率(物理的定数)はさほどちがわないが他は著しく異なる。Fは軟質であり、EとGは硬質で互いに



第14図 高周波加熱時間と変位特性

よく似た性質をもっている。

第13図を見ると、A—EとA—Gが似た特性なのは素材EとGが似た機械的性質のため当然といえる。A—FとA—Gの差およびC—FとC—Gの差は素材FとGの機械的性質の差によるものと考えることができる。従って、軟質材料では変位は小さく硬質材料では大きい。このように材料の機械的性質が変位特性に与える影響は大きいので、これを考慮しないと実用的な変位の計算式を得ることができない。

更に、この問題の重要性を示す他の例をあげておく。さきに、2. 製法 で述べた高周波加熱は変位特性に影響を与える。第14図は高周波加熱時間を変えて作った同一ロットのルーチン用空ごうの変位特性である。加熱時間を長くすると変位が小さくなることを示している。恐らく、ダイヤフラム全体を加熱するためにその機械的性質が変化するものであろう。もし、加熱によって材料が軟化するとすれば、第13図のデータと定性的に一致することになる。

以上[1]～[6]にわたって述べたように、ゾンデ用ダイヤフラムの変位特性は複雑である。現時点では、計算式は目安を与える程度というべきであろう。空ごうのメーカーは経験的に金型を作って変位特性を規格内におさめる努力をしている。

5. 弾性誤差

弾性体に生ずる応力と歪の間には Hooke の法則により比例関係が成り立つが、この関係は応力が弾性限界をこすと成立しない。それと共に履歴、弾性余効等の現象を生ずることはよく知られている。このような材料の弾性的な不完全さのために、空ごうは気圧測定に誤差を生ずる。これが弾性誤差である。

材料の弾性のよさは、工学的にはばね限界値で示される。これは、一定量の塑性変形を生ずるための応力と規定されている。前述のように薄板のばね限界値の測定は若干問題があるが、我々の隣青銅や Sumi Span の素材の値は数10 kg/mm² であろう。ダイヤフラム完成後には2倍近くになると思われるが、実測は更に至難である。従って、ゾンデ用空ごうの弾性誤差をばね限界値で評価することは無理であって、現時点では、完成された空ごうの性能からとらえるのが妥当な方法である。

空ごうの弾性誤差は、通常、次の各種の量で表現される。

第3表 各種空ごうの残留変位

空ごう名	個数	残留変位の平均値	備 考
ルーチン用空ごう	5	mb 1.9	
南極用空ごう	4	0.0	電子ビーム溶接 二次熱処理温度 650°C1hr.
	4	0.1	電子ビーム溶接 二次熱処理温度 550°C1hr.
	5	0.4	シーム溶接 二次熱処理温度 550°C1hr.

残留変位は気圧点検作業の翌日の値

残留変位：空ごうを低圧に保った後、常圧にもどした時に生ずるものと常圧の変位との差。普通には、空ごうは若干ふくらんでしまっている。

ドリフト：空ごうを低圧に保つ時に生ずる変位の時間にもなる変化量。普通には、空ごうは次第にふくらみ一定値に落ち着く。

ヒステリシス：気圧を往復変化させて一巡した時、行き帰りに生ずる変位の差。

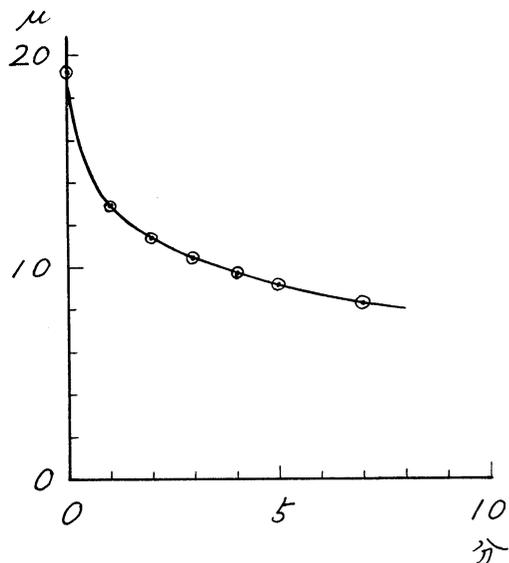
第3表は、ルーチン用空ごうと各種二次熱処理温度の南極用空ごうの残留変位の平均値である（阪本孝宏1972）。これは、ゾンデ用気圧計の気圧点検と同じ作業を行ない、翌日に調べた残留変位を気圧単位であらわしたものである。気圧点検作業では約1時間で常圧から低圧まで気圧を変化させる。南極用空ごうの残留変位は小さいが二次熱処理温度が高い方がよいように見える。

本章では、ルーチン用空ごうの残留変位、ドリフト、ヒステリシス等について調査結果を概観する。南極用空ごうでも弾性誤差は勿論問題であるが、ルーチン用に比して実用上の影響は少ないとみて、ここでは触れない。

[1] 残留変位とドリフト

ルーチン用空ごうの残留変位の一般的な例を第15図に示す。これは、低圧10 mb に1時間保った後の常圧における変位の変化である。残留変位は個々の空ごうで異なる値を示す。

気圧点検作業を終えたルーチン用空ごうは、3日間ぐらゐ徐々に変化するものとみられる。残留変位を生じたために、空ごうの圧力変位特性（例えば第4図）は、その分だけ平行移動するとみてよい。故に、高度直線型では、残留変位による誤差を気圧単位であらわすと、低圧



第15図 ルーチン用空ごうの残留変位 (10 mb に1時間保持後)
横軸は時間、縦軸は残留変位

では小さな値になる。

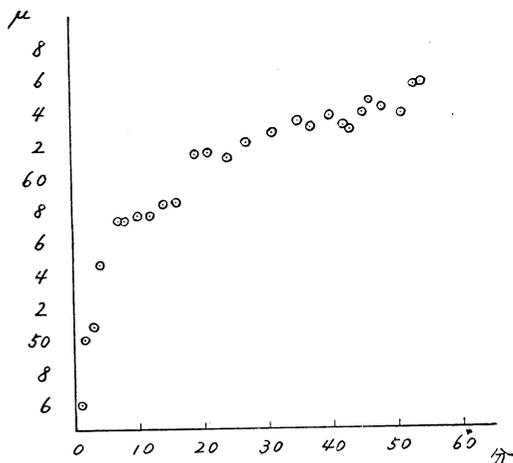
残留変位が、充分時間がたった後に0になるかという問題がある。これは、測定器の長期間の安定度に依存するものであり、現在のところ、公表しうるデータはないといってよい。

次にルーチン用空ごうのドリフトの一般的な例を第16図に示す。これは、気圧を常圧から10 mbに急変した時、10 mbの変位が時間と共に変化していく様子を示す。ドリフト量は、個々の空ごうによって異なり気圧によっても異なる。同一ロットの空ごうについて、いろいろな気圧でのドリフトの状況を第17図に示す。低圧でドリフトが大きいのが判る。

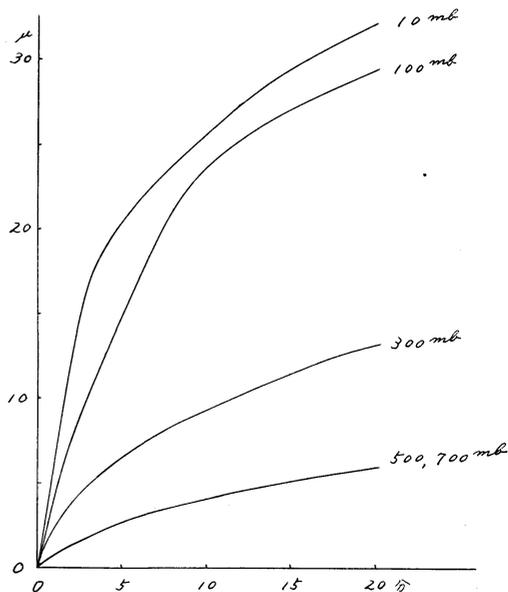
残留変位とドリフトの間関係は簡単ではないようである。ドリフトが小さいからといって必ずしも残留変位が小さいとはいえない。

空ごうは、製造後適当に枯らし (aging) てから使うとよいといわれる。その効果に対する調査はなされていない。

ついでに経年変化の問題にふれておく。この調査も空ごう単体としてはなされていない。船舶用アネロイド気圧計の経年変化に関する調査結果 (Yabuki 1964) は参考になる。それによると、空ごうは徐々にへこむ傾向があり、その量は2年間に約1 mb程度のようにみられ



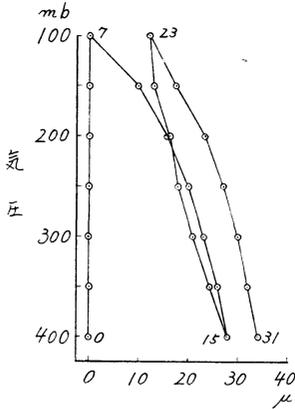
第16図 ルーチン用空ごうのドリフトの一例
横軸は時間、縦軸は変位のよみ



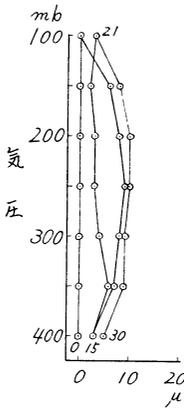
第17図 種々の気圧でのドリフト (ルーチン用空ごう)

る。

以上のようにみると、ルーチン用空ごうの弾性誤差について調査が不充分の点が多い。理由は測定器の精度や安定度の信頼性に負うところが大きい。しかしながら、未発表のものを含めて残留変位に関する種々の調査はなされている。これについては[3]以下で説明する。



第18図 ドリフトの影響を受けたヒステリシス特性(ルーチン用空ごう)



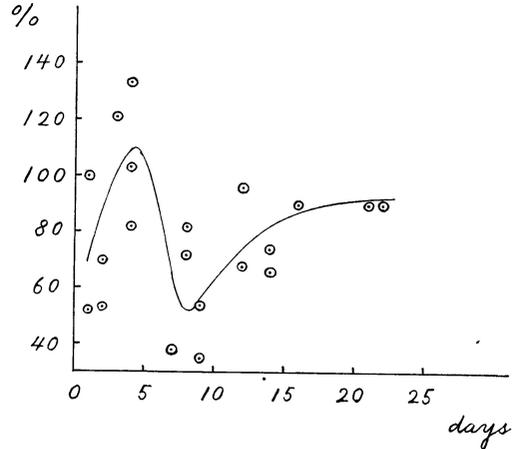
第19図 ドリフトの影響を受けないヒステリシス特性(ルーチン用空ごう)

[2] ヒステリシス

第18図にルーチン用空ごうのヒステリシスの測定例を示す(岡田 1968)。これは、低圧で気圧を一巡変化させた時の変位差をプロットしたものである。横軸は最初の減圧時の変位との差である。曲線にそえた数字は測定開始後の時間(分)である。図で、ヒステリシス曲線が傾いているのはドリフトの影響である。

第19図は、気圧を一巡する前にあらかじめ250 mbに約1時間保ち、ドリフトが安定してからヒステリシスを測定した結果である。ドリフトの影響が少ないので曲線は傾いていない。

ヒステリシスは、測定時間の影響を受け条件によって結果が異なること、および測定に手数がかかることなど



第20図 ルーチン用空ごうの残留変位は弾性的経歴で異なる。横軸は放置期間、縦軸は残留変位の比

のため、ゾンデ用空ごうの調査にはあまり使われていない。

[3] 弾性的経歴と残留変位

材料の過去の弾性的経歴がその弾性特性に影響を与えることはよく知られている。例えば、Baushinger 効果は、あらかじめ塑性変形させた材料の弾性限界が、ある種の応力に対しては低下することを述べている。

空ごうにおいても、その過去の取扱いによって残留変位が異なることが考えられる。過去の取扱いとして気圧点検作業をとりあげ残留変位の調査を行なったことがある(岡田 1969)。

この調査には、A, B各社製のルーチン用空ごう計20個を使った。まず、充分枯らした空ごうを気圧点検し残留変位Iを測定する。そのあと、いろいろな期間放置した後再び気圧点検し残留変位IIを測定する。比(II:I)と放置期間との関係を示したのが第20図である。データはばらついているが、多少の傾向はみとめられる。即ち、前歴のために、残留変位が減少する期間(7~10日のところ)があることである。また、残留変位の変化を無視するための枯らしの期間は約20日を要するといえる。このような現象の原因は全く不明である。

[4] ダイヤフラムの中心付近の硬さと残留変位

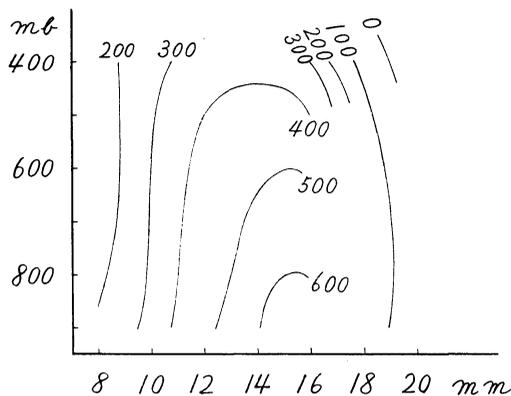
どんな空ごうの残留変位が大きいのか。これは興味のある問題である。

かつて、A, B両社製のルーチン用空ごうの残留変位に差があることが問題となったことがある。B社製は残留変位が少なくA社製は大であった。鹿野は、調査の結

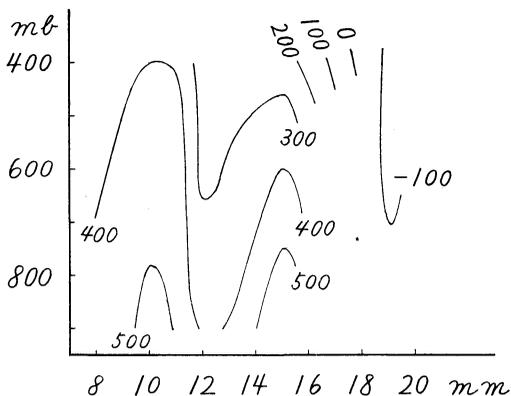
第4表 代表的な空ごうの残留変位

使用ダイヤフラム	空ごうの残留変位	条件	
		保持気圧	保持時間
5L	25.0 μ	20 mb	30分
5G	5.0		
5D	7.1		

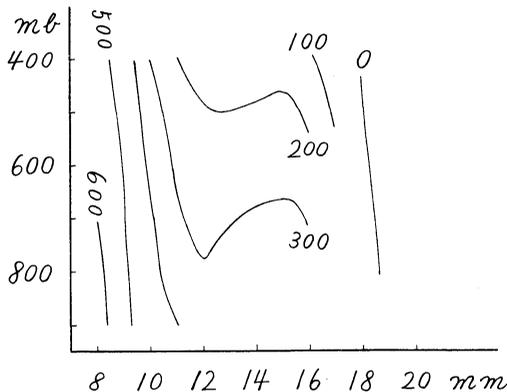
残留変位は常圧復帰後10分の値



第21図 ダイヤフラム 5L (残留変位大) の半径方向の中央面歪, 引っ張り歪を正とする。歪の単位は $\times 10^{-6}$ で示す。中心付近で引っ張り歪が小さい。



第22図 ダイヤフラム 5G (残留変位小) の中央面歪・中心付近で引っ張り歪が大きい。



第23図 ダイヤフラム 5D (残留変位小) の中央面歪中心付近で引っ張り歪が大きい。

果, 両社の成型方法の差 (2. 製法) が主要な原因と判断した。また空ごうの全変位量と残留変位の間に関連があるととした (鹿野 1961)。

筆者は、三種類の金型 (おのおの雄型, 雌型から成る) に各種の絞り加工条件を適用して作られた, ルーチン用空ごうと同種の約40種類の空ごうの残留変位を測定した (未発表, 昭和38年)。試料の中には残留変位, 全変位量の大小さまざまなものが含まれている。これらの試料を検討して残留変位に關係する因子を探そうとしたが困難であった。全変位量と残留変位の關係をしらべたところ, 鹿野の結果と一致して, 変位の小さい空ごうの残留変位は小であった。しかし変位の大きい空ごうの中にも残留変位の小さいものがあつた。

たまたま, 実験中に, A, B両社製のダイヤフラムの中心付近で硬さの差があるのに気付いた。中心を軽く指圧すると, B社製は容易に変形し, A社製は変形しにくかった。当時, 硬度計もなく量的にこれを示すことはできない。

岡田は, 40種類の空ごうから残留変位の大きいものと

小さいものを選び, ダイヤフラムの歪分布を測定した (岡田 1969)。試料ダイヤフラム 5L, 5G, 5D で作った空ごうの残留変位は第4表に示す通りで, 5Lは悪く, 5G, 5Dは良好である。各ダイヤフラムの半径方向の中央面歪の分布を第21, 22, 23図に示す。縦軸にダイヤフラムにかかる圧力, 横軸に中心からの距離をとり, パラメータは歪 (引っ張り歪を正) である。圧力が増加すると中央面歪は引っ張り方向に大きくなる。

第21, 22, 23図で圧力の高い範囲を比較してみると, 5Lは中心付近で歪が小さく (変形しにくい), 5G, 5Dは大きい (変形し易い)。前者が残留変位が大きく後者が小さいことは, A, B両社製のダイヤフラムに見出された差, 即ち, 残留変位の小さいダイヤフラムは中心付近が軟かく, 大きいダイヤフラムはかたいことと定性的

に一致している。従って、ダイヤフラム中心の硬さは残留変位の一因子と考えられそうである。

このような理解が都合がよい一例をあげておく。雌型と成型ゴムを使う絞り方法は現在ルーチン用空ごう製造には採用されていないが、この方法で作った波なし空ごうは残留変位が大きく、雄型と雌型を使った方法では残留変位が小さいとの報告がある(鹿野 1961)。ゴム絞りではプランクが一樣におされるため中心部分が加工硬化するのに反し、後者では型のはめあいを適当に作れば中心付近を硬化させずにすむ。よって残留変位の差ができる。また、金型を少し削り直すと残留変位は容易に変化する。これははめあいが微妙に変化するためである。

さて、ダイヤフラム中心付近の硬さと残留変位との関係は、現象的には理解できそうに思われるが、新たな疑問を提起する。一般材料は、加工硬化と共にばね限界値は向上し弾性的に良好となる。それならば、中心付近で硬化を起こした方が残留変位は小さくなるべきではないか。この疑問は、残留変位という実体のとらえにくいものに対する根本的な問題かもしれない。

[5] 作動エージングと温度エージング

圧力センサーとしてのダイヤフラムに適当回数の繰り返し圧力を加えると弾性誤差を小さくできるといわれる(Wildack 1957)。空ごうの場合、この工程を作動エージングとっている。ルーチン用空ごうに対する効果はさほどないよう考えられる。

第5表は、同一ロットのルーチン用空ごうについて、作動エージングを行なったものと行なわないもの各10個の残留変位を測定した結果である。作動エージングは常圧~25 mb 間を50回繰り返した。結果によれば両者の間に差は殆んど認められない。

作動回数を多くした場合については調査してない。著しく作動回数をふやせば材料は疲労して破断するにいたるはずだが、ゾンデ用空ごうについてはそこまで作動させた例はない。

温度エージングは、成型されたダイヤフラムを適当温度で熱処理する工程であって、その基本的な考え方は燐青銅の低温焼きなまし効果を利用していることである。この工程の効果はルーチン用空ごうに対して明らかではない。

第6表は、同一ロットのルーチン用空ごうについて、温度エージングを行なったものと行なわないもの各5個の残留変位を示したものである。むしろ行なった方が若

第5表 作動エージングと残留変位

	箇々の残留変位 (μ)	平均値 (μ)
作動エージング 50回	9.0 6.4 7.6 8.4 8.2	8.0
	9.1 8.8 6.7 8.0 7.7	
作動エージング せず	9.4 7.7 10.1 7.2 5.8	7.9
	8.4 7.9 6.8 9.1 6.9	

100 mb に20分間保持し、常圧復帰後10分の残留変位

第6表 温度エージングと残留変位

	箇々の残留変位 (μ)	平均値 (μ)
温度エージング 120°C 7hr	13.2 14.1 12.1 19.2 14.4	14.6
温度エージング せず	11.4 13.7 12.1 11.8 12.3	12.3

気圧点検作業の後、常圧復帰後10分の残留変位

干悪くみえる。採用した温度エージングは120°C 7時間で、資料(坂本光雄 1968)によれば最適とはいえない。現在この行程は実施されていない。

なお、残留変位に関して、以上の外に、周辺部分と中心部分のハンダ量の影響が調査されたが、通常の製造方法をとる限り特に問題とはならなかった。

[6] 弾性誤差調査の問題点

残留変位、ドリフト、ヒステリシス等は完成品としての空ごうの弾性的性能を示すものである。従って結果として得られる数値は多くの因子の影響を集約したものである。このような数値は、検査あるいは管理上には有効であるが、物理的な意味がとらえにくい欠点がある。例えば、古謝はベリリウム銅の2個の空ごうの残留変位を測定し両者の間に差を認めたが、その差は、一方がごく僅かな slow leak (真空封じ不完全による漏洩)を生じていたためとした(古謝 1973)。残留変位は、単に材料の弾性的な問題のみに関係するとは限らない。

空ごうの弾性誤差のすすんだ調査のためには理想化した実験が必要のように思われる。

ここではルーチン用空ごう(波なし)の弾性誤差のみを扱ったが、波なしは変位特性や温度特性(5. 温度誤差)の安定性に問題があるので、今後は波ありの調査に重点をおくことが必要と思われる。

6. 温度誤差

空ごうは温度変化によって誤差を生ずる。この項では、

その諸因子、一般的温度特性（ゾンデ用であるから低温に限る）、過去に行なわれた試験を概観する。最近の調査については、7. 気象大学校における最近の研究で述べる。

〔1〕温度誤差の諸因子

空ごうの温度誤差は、材料のヤング率が温度係数を有すること、材料が線膨張係数を有すること、空ごう内部の残留ガスが熱膨張することなどによって生ずる。

(1) 材料のヤング率の温度係数

従来、空ごうの温度誤差の要因といわれている、ルーチン用材料の磷青銅のヤング率の温度係数は約 $-300 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、南極用材料 Sumi Span では $+20 \sim -10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ といわれる。後者はすぐれた恒弾性を有することが判る。

(1) 材料の線膨張係数

一般に、空ごうの温度誤差に与える影響は小さいとされてきた。しかし、最近の調査によれば、ゾンデ用空ごうの場合には、低圧の温度誤差に複雑な形で影響を与えているものと考えられるむきがある。ゾンデ用空ごうに関しては重要な因子と考えたい。磷青銅の線膨張係数は、 $18 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、Sumi Span では、 $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ といわれる。

(3) 内部残留ガス

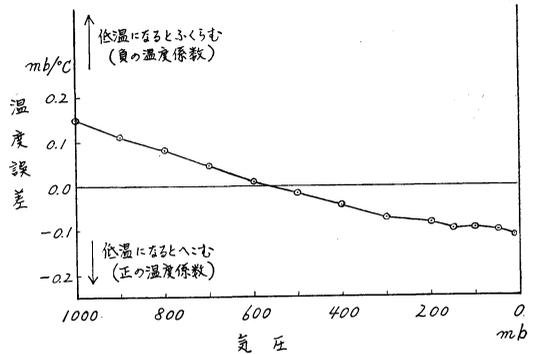
古くから、温度誤差に対して重要な因子とされてきた、空ごうの内部の残留ガスの実状については今のところ明らかではない。ルーチン用空ごうの真空封じはハンダによって行なわれる。その際、酸化皮膜除去のため flux (溶剤) を使う。もし、これが十分に除去されていないと内部にガスとして残留するおそれがある。また、真空排気はロータリーポンプで行なっているが、その能力が条件で変化することがありうる。また、金属材料が自然に放出するガスも考えられる。最も気になるのは、ハンダあるいは電子ビーム熔接部のピンホールからの slow leak である。非常に僅かであるため時間をかけないと発見できない。

〔2〕空ごうの温度誤差の一般的特性

一般に、空ごうの温度誤差は〔3〕で述べる Kleinschmidt の式で示される。この式は、温度誤差、即ち 1°C の温度変化当りの指示気圧の変化 $\Delta P/\Delta T$ が、気圧で変化することを示している。温度誤差を求めるには、常温と低温で空ごうの変位を測定し、その変位差を温度差でわり、気圧単位に換算すればよい。

ルーチン用空ごうの温度誤差の最近の測定例（阪本孝

1973年 5月

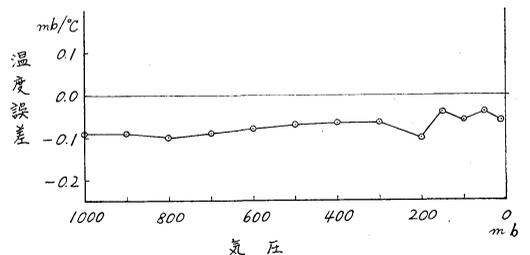


第24図 ルーチン用空ごうの温度誤差（A社製5個の平均値）温度誤差は気圧の関数である。

宏1972)を第24図に示す。これはA社製5個の平均値である。この測定結果は、従来より曲線が下に移動しているが、信頼性は高いと考えている。空ごうは、常圧では、低温になるとふくらむ（負の温度係数）し、低圧では逆にへこむ（正の温度係数）。特性はほぼ直線であるが、データは普通ばらつきがあり、また直線からずれることもある。

第24図の特性が傾いているのはヤング率の温度係数が原因といわれる。常圧では、ダイヤフラムに生ずる応力は大きいから、変位に与えるヤング率の影響は大きく、その温度変化によって大きな温度誤差を生ずる。低圧では応力は小さいからヤング率の温度変化の影響は小さくなる。このような理由で特性は傾く。低温になるとヤング率は大きくなるのでダイヤフラムのたわみは小さくなる（これは(1)、(3)式を見れば判る）。たわみが小さくなることは空ごうがふくらむことを意味する。よって、空ごうは、高圧部では低温になるとふくらむことになる。

低圧（0 mb）で温度誤差が正の温度係数をもっているのは、材料のいかんを問わずゾンデ用空ごうに見られる一般的な傾向である。この原因は、内部残留ガスの熱



第25図 南極用空ごうの温度誤差（3個の平均値）

膨脹と、自由な（差圧のかかっている）ダイヤフラムの熱変形である。

次に恒弾性材料を使った南極用空ごうの最近の測定例（古謝 1973）を第25図に示す。温度誤差は、圧力全範囲にわたりルーチン用に比べ変化が少なく、正の温度係数をもっている。これは恒弾性がきいているためであろう。

南極用空ごうの場合、ごく簡単に考えれば、低圧（0 mb）の温度誤差は、圧力全範囲の温度誤差を支配するものである。ヤング率が温度変化しないとすれば、気圧 P_{mb} における温度誤差 $(\Delta P/\Delta T)_P$ は

$$(\Delta P/\Delta T)_P = \frac{(\Delta P/\Delta T)_0 \times (0 \text{ mbの圧力感度})}{(P_{mb} \text{の圧力感度})}$$

となる。故に南極用空ごうでは、その温度特性の改善には 0 mb の温度誤差の調査が重要となってくる（7. 気象大学校における最近の研究）。

〔3〕 温度誤差に関する諸調査

古くから空ごうの温度誤差は先人の注目するところであったようである。

1928年 Kleinschmidt は著名な温度補正の実験式を示した（気象庁 1957）。この式は温度補正值が気圧と直線関係をもつことを示し、ルーチン用空ごう気圧計の温度補正は、定数を実験的に定めて、この式によって補正を行なっている。Kleinschmidt の式は、

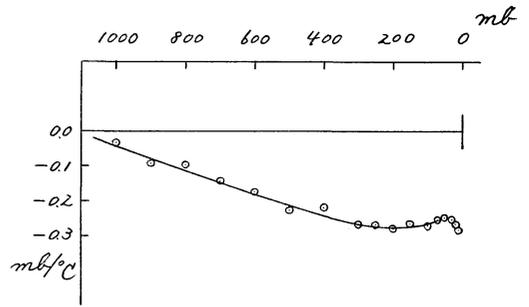
$$\Delta P = \Delta T(\alpha - \beta \cdot P) \dots \dots \dots (8)$$

である。ここに、 ΔP : 温度補正值（気圧単位で示した温度誤差）、 ΔT : 空ごうの温度変化、 P : 気圧、 α , β : 実験的にきまる定数、である。

昭和15年、平原は「真空空ごうに対する温度の影響」と題した発表をしている（平原 1940）。主としてばねつきペローズ（bellows）について測定しているが、空ごうについても実験している。対象は圧力直線型であるが、圧力単位で示した温度誤差は気圧と直線関係があるとしている。

佐貫、磯野（1961）は、空ごうの温度誤差を解析し、主として材料のヤング率の温度係数が因子であることを示している。また、空ごう内部に故意にガスを残すことによって、ある気圧範囲で温度誤差を小さくできるとしている。この方法は、気圧変化範囲が大きいゾンデ用空ごうには使えない。

1952年、鈴木らは（8）式の定数 α , β をルーチン用空ごう気圧計について実測した（鈴木ら 1954）。この値はゾンデの機構を含むもので空ごう単体ではない。現在の



第26図 内部真空度 30 mmHg のルーチン用空ごうの温度誤差

高層観測では、その実測値に近い値 $\alpha = 0.05 \text{ mb}/^\circ\text{C}$, $\beta = 4.5 \times 10^{-4}$ が採用されている。

ゾンデ用空ごうの温度特性の測定は、實際上、ゾンデの機構と組合せて行なうことが最も容易な方法であり、また、得られた結果は実用的である。しかしながら、機構は充分安定なものとはいえず測定中に狂いを生ずるおそれがあり、結果の信頼性を低める。岡田は、低温用の空ごう試験器を製作し、空ごう単体の温度誤差を測定した（岡田 1966）。おもな測定結果を列挙してゾンデ用空ごうの特性を知る一助としたい。

(1) 内部真空度

空ごうの内部真空度と温度特性の関連をしらべるため、30 mmHg で真空封じをしたルーチン用空ごうを作って温度誤差を測定してみた。測定結果を第26図に示す。通常のルーチン用空ごうに比して特性は著しく下方に移動している。全圧力範囲で正の温度係数をもつことは残留ガスの熱膨脹が大きくきいているためである。

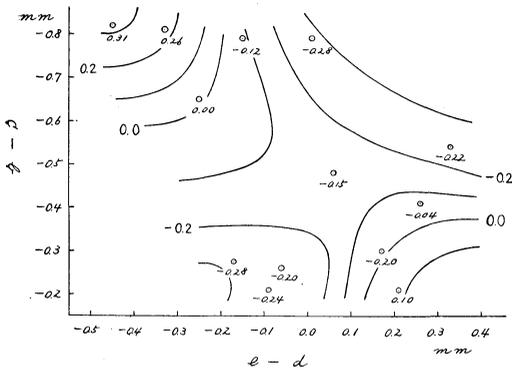
多くのルーチン用空ごうを低温試験してみると、特性が多少下に移動しているものが時々見られる。恐らく、内部真空度の不良のためであろう。

磷青銅製空ごうでは、真空度の不良は、常圧の温度誤差を小さくし、低圧のそれを大きくする。また、Sumi Span 製空ごうでは、圧力全範囲で温度誤差を大きくする。内部真空度の直接測定は困難である。

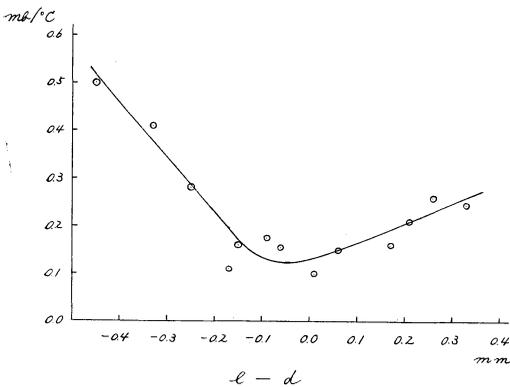
(2) Sumi Span の二次熱処理温度

南極用空ごうの温度特性は第25図に示すように平坦であるが、二次熱処理温度をかえると若干変化することが認められた。第3図に示すように、ヤング率の温度係数は二次熱処理温度で変化するから当然といえる。

しかしながら、最近の実験結果では殆んど変化しないデータばかりである。この理由は明らかではない。



第27図 ルーチン用吸口付空ごうの形状と熱変形の関係
b, c, d, e は図10参照。等値線は熱変形 ($\mu/^\circ\text{C}$) で、正值は低温になるとふくらむことを示す。



第28図 ルーチン用吸口付空ごうの形状と温度特性の傾きの関係
e, d は図10参照。縦軸は差圧0mbと500mbの温度誤差の差 ($\text{mb}/^\circ\text{C}$)

(3) ダイアフラムの形状と低温の温度誤差

低温の温度特性を調べるために、内部真空度の影響とダイアフラムの形状の影響を分離して考察する実験を行なった。空ごうは完成品だから、5. 弾性誤差の項でも指摘した通り、温度特性に関係する因子も元来複雑である。しかし低温に限定すると話は比較的に簡単になる。

低温ではダイアフラムにかかる圧力は小さく、それによる応力は無視できる。よって、温度誤差は、自由な(差圧のかからない)ダイアフラムの熱変形と残留ガスが主な因子と考えることができる。この二因子を分離するには、4. 変位特性で説明した吸口付空ごうを用いる

のが有効である(第10図)。これに差圧をかけることなく低温試験を行なえば自由なダイアフラムの熱変形のみを取り出すことができる。この考え方は最近の研究の基本となっている(7. 気象大学校における最近の研究)。

いろいろなルーチン用吸口付空ごうを試験した結果、ダイアフラムの形状と熱変形の間に関連があることが判った。第27図に結果を示す。両軸の b, c, d, e は第10図に示す寸法である。明らかにいえることは、周辺の波が深くて ($b \gg c$) 中心部がへこんでいる ($d > e$) 吸口付空ごうは、熱変形が+ (低温になるとふくらむ) になることである。このような吸口付空ごうは、真空空ごうにすると、第24図をみると判るように、通常の低压の温度誤差は改善されることになる。

低温にするとふくらむダイアフラムがあることは感覚的に理解しにくい、この現象は後に古謝も確認した(7. 気象大学校における最近の研究)。

(4) ダイアフラム形状と特性の傾き

次に、ダイアフラムの形状と温度特性の傾きの間に関係はないかという問題が提起される。

吸口付空ごうに差圧をかけ常温と低温で変位を測定し温度誤差を求めると第24図に似た特性が得られる。横軸が差圧になったに過ぎない。この特性は、その吸口付空ごうを完全な真空空ごうとした時の特性を示す。いろいろなルーチン用吸口付空ごうを試験した結果を第28図に示す。特性の傾きと e-d (第10図) の関連が大である。明らかに、中心付近の形状が平面からかけはなれる程、傾きは大きくなる。

4. 変位特位 で述べたように、変位特性はダイアフラム中心付近の形状と密接な関係があるから、変位特性と温度特性は無関係ではありえない。

第28図は、 $e-d < 0$ の部分については鹿野の結果(鹿野 1961)と一致するが、 $e-d > 0$ の部分については合わない。これは、第28図の試料がルーチン用ダイアフラムとして実用し難いものまで包含しているためであろう。 $e-d > 0$ のものは殆んど実用されない。ペコを生じ易いからである。

以上、過去の温度特性の調査を概観してみたが、最近も研究はすすめられており、その状況と結果は、7. 気象大学校における最近の研究 で説明する。

最近、ドイツで行なわれている空ごうの試験結果(Fink 1968)から、温度特性に関して目につく点をあげておく。ベリリウム銅製の空ごうの温度特性が発表されているがあまり良くない。燐青銅と似ている。ヤング

率の温度係数もほぼ同じと思われる。鋼鉄製の空ごうの特性の発表がある。全圧力範囲で、平均 $0.05\text{mb}/^\circ\text{C}$ の値になっている。これはかなりよい性能である。

文 献

- 1) 赤坂 隆, 1955: Corrugated diaphragm の弾性特性について, 航空学会誌, **3**, No. 22, 23, 279-288.
- 2) ばね性測定研究会, 1966: ばね限界値の測定について.
- 3) Fink C., 1968: Über Aneroid-Dosen Für Radiosonden, Deutscher Wetterdienst Instrumentenamt München.
- 4) 平原一夫, 1940: 真空空ごうに対する温度の影響, 航空学会誌, **7**, No. 65, 819-826.
- 5) 飯高一郎, 1962: 金属と合金, 岩波全書.
- 6) 飯高一郎, 1971: 金属学通論, 丸善.
- 7) 気象庁, 1957: 高層気象常用表.
- 8) 中谷 宏, 1963: 弾性材料, 計量管理, **12**, No. 5.
- 9) 岡田芳隆, 1966: 空ごうの温度特性, 研究時報, **18**, No. 12, 24-33.
- 10) 岡田芳隆, 1967: 波なし空ごうのひずみ分布, 研究時報, **19**, No. 8, 14-23.
- 11) 岡田芳隆, 1968: 空ごうのヒステリシスについて, 研究時報, **20**, No. 3, 48-50.
- 12) 岡田芳隆, 1969: 波なし空ごうの弾性誤差(残留変位)とひずみ分布, 研究時報, **21**, No. 2, 1-6.
- 13) 岡田芳隆, 1969: 高層観測用空ごうについて, 気象庁測器技術資料第4428号, 1-30.
- 14) 坂本光雄, 1968: 機器用ばね材料, 工業日日新聞社.
- 15) 佐貫亦男, 1953: 気象器械, 共立全書.
- 16) 佐貫亦男, 磯野謙治, 1961: 気象器械, 地人書館.
- 17) 鹿野 到, 1961: 空ごう気圧計, 高層気象, **4**, No. 4, 1-9.
- 18) 鈴木 茂, 金子松榮, 牧野 宏, 中野 宗男, 1954: CMO-S 50型ラジオゾンデの低温低圧検定結果について, 高層気象台イ報, **5**, No. 4, 101-110.
- 19) Timoshenko S.P. and S. Woinowsky-Krieger, 1959: Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill.
- 20) Wildack W.A., R.F. Dressler and E.C. Lloyd, 1957: Investigation of the properties of corrugated diaphragms, Trans, Amer. Soc. Mech. Eng. **79**, No. 1, 65-82.
- 21) Yabuki B., 1964: On the barometers of the selected ships of Japan in 1962. Bulletin of Kobe Marine Observatory, No. 172, 55-59.