

材料試験機の検定実務について（その1・力の移転）

河 島 吉 彦*

1. ま え が き

材料試験機の検定は、昭和2年現在の運輸省にあたる逓信省が省令をもって、造船造機関係の材料試験に使用される試験機を対象に、船用品試験機・試験規程を制定し、これによって、鋼船構造規程及び、船舶機関規程にも「この規程による諸試験に使用する試験機は、船用品試験機試験規程に適合したものでなければならない」とし、試験機検査の行政的な措置を行ったことに始まる。

本会は昭和21年に前述の船用品試験機試験規程を検定のよりどころとして、造船造機関係の試験機の検定を運輸省より引き継ぎ、同時に、一般の船用品以外に使用されている試験機の検定依頼にも応じることになった。

以上のいきさつにより、本会は現在まで造船造機関係の材料試験に使用される船用試験機と、これ以外の一般に使用されている試験機の検定を行っている。

材料試験機の検定依頼台数は現在年間約12,300台であり、各産業界の品質管理のパロメーターの役割を示している。それに伴い本会の材料試験機の検定業務も年々増加の一途にある。

これらの検定業務で重要なのは、検定の根拠となる力の標準とその移転が如何に正確に行われているかという問題である。

これらの諸問題について考察してみたい。

2. 力標準体系

力標準の分野で使用されている基準機類の主なものは、

- (1) 分銅及び天秤類
- (2) 実荷重標準機（デットウェイトマシン）
- (3) てこ式力基準機（単こうかん、及び複こうかん）
- (4) 油圧式力基準機
- (5) 基準こうかん
- (6) 弾性荷重検定器（環状形検定器、容積形検定器、ロードセルなど）

などが使用目的に合わせ、随時使用されている。表1に

表1 各基準機類の目標精度

基準機の種 類	精 度
分 銅	1. 実荷重標準機の校正用, ±0.0001% 器差 ; 2. てこ式力基準機の校正用, ±0.001% 3. 材料試験機の校正用 ±0.05%
弾性荷重 検 定 器	1. 力基準機の校正用, 能力に相当する荷重の±0.2% 安定性 ; 2. 材料試験機の校正用 能力の $\frac{1}{10}$ 以上で荷重の0.2%
実 荷 重 標 準 機	各荷重の±0.001%
油圧式力 基 準 機	器差 ; 使用範囲の各荷重の±0.1% 安定性 ; 各荷重の0.03% 感量 ; 各荷重の0.01%

は国内の各基準機類の目標精度を示し、図1に現在の力標準体系を示す。

3. 弾性検定器

材料試験機の検定は、最終的にはその荷重精度を許容範囲内において保証し、品質保証の均一性を保つために行われるものである。すなわち、荷重基準機から力の基準値を弾性検定器等を媒介して、材料試験機に移転することである。そこで重要な役割を演じるのが荷重基準機と弾性検定器である。力標準体系に示すように力の移転になくしてはならない弾性検定器について説明する。

弾性検定器は、大別すれば、次の3つに分けることができる。

- (i) たわみ形検定器……弾性体のたわみを荷重測定に用いる弾性荷重検定器（Loop型）
- (ii) 容積形検定器……中空弾性体の変形に伴う容積変化を荷重測定に用いる弾性荷重検定器（Box型）
- (iii) 電気式検定器……加えた荷重による電氣的出力を荷重測定に用いる弾性荷重

* 東京支部

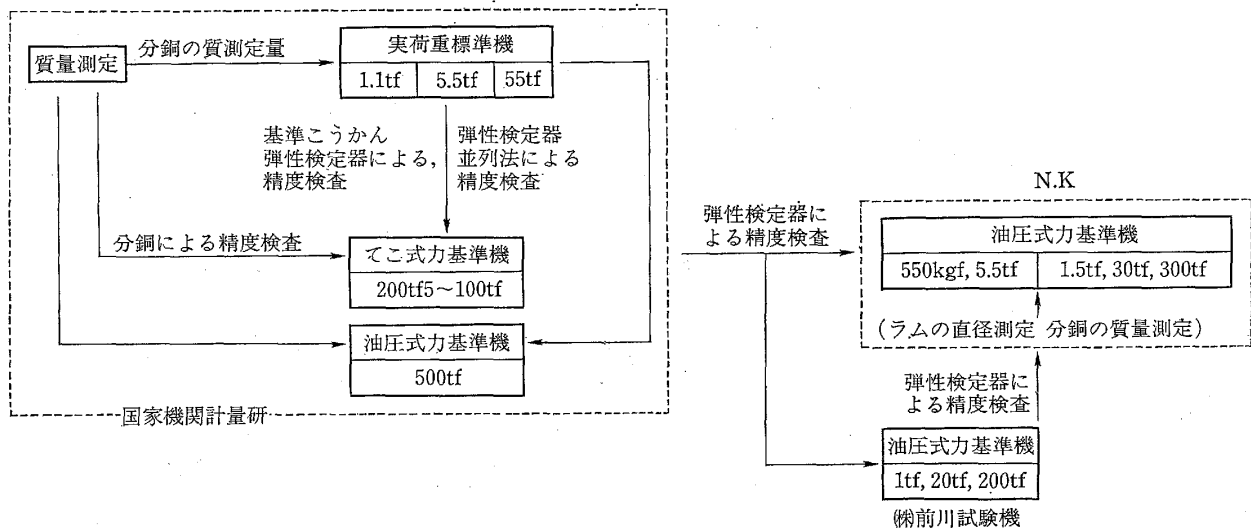


図1 力標準体系

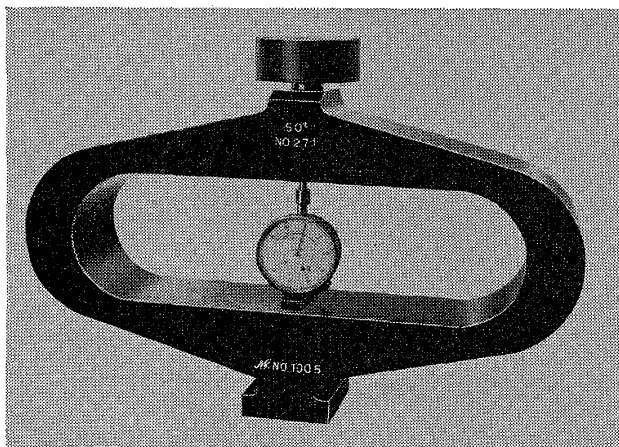


図2 Loop 型

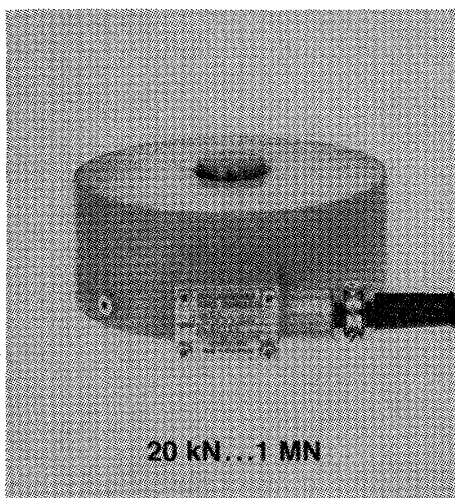


図4 ロードセル型

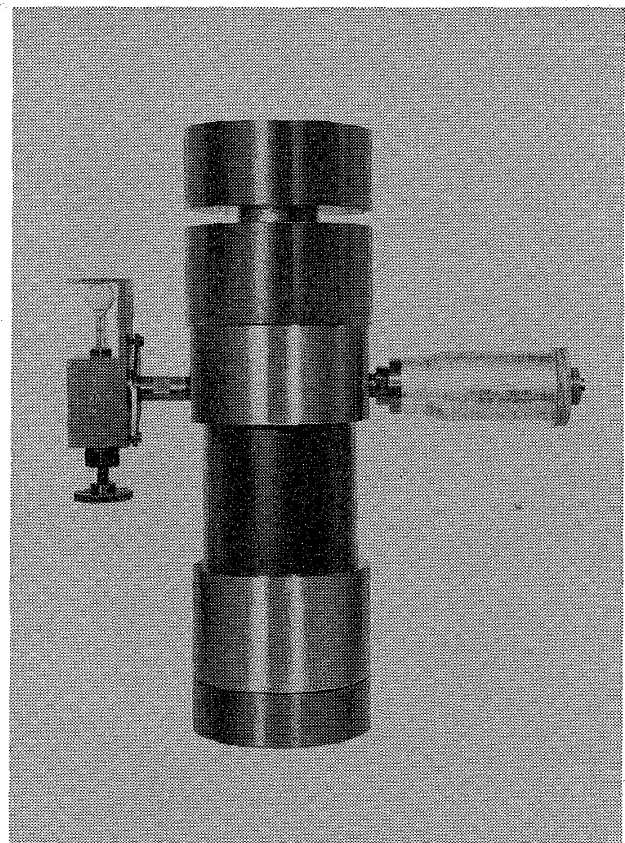


図3 Box 型

検定器（ロードセル型など）

これら弾性荷重検定器の代表例を図2ないし図4に示す。また、弾性荷重検定器に使用されている材質を表2に示す。

たわみ型検定器については、主にダイヤルゲージをたわみ測定装置に用いたループ型力計が用いられている。

表2 検定器の素材

検定器	記号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
たわみ型, 容積型	SNM625	0.2 ~0.3	0.15 ~0.35	0.35 ~0.60	0.03 以下	0.03 以下	3.00 ~3.56	1.00 ~1.50	0.15 ~0.30
	SNM439	0.36 ~0.43	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	0.03 以下	0.03 以下	1.60 ~2.00	0.60 ~1.00	0.15 ~0.30
ロードセル型	ニッケルクロームモリブデン鋼 (SNM 2種, 5種, 8種, 9種), 工具鋼(SKD), Sus40, 630 など								

しかし、その使用方法によっては精度にかなりの差が出る。精度よく使用するには、はじめ2~3回の測定値を捨てるか、または無駄押しをすること、荷重を加えてから一定時間後に指示値を読み取ること（弾性体のクリープが安定するため）、温度変化をできるだけ避けることなどの諸点に注意を払う必要がある。このような注意をして使用すれば、5回測定した指示値のバラツキは、0.01 mm 目盛りのダイヤルゲージでは、約0.4~0.6 μm また、0.001 mm 目盛りのダイヤルゲージでは約0.2~0.4 μm であって、ループ型力計の最大たわみが4~5 mm のものを使用すれば、最大荷重では、 $\pm 0.02\%$ 程度の精度で力基準機の器差が測定可能である。

容積型検定器については、主に容積変化の検出に水銀を用い、その水銀の変化量をマイクロメーターで測定する装置を用いた Box 型が用いられている。この Box 型は大きな能力に対しても割合に軽量で、荷重に対するマイクロメーターの読み取り目盛数が多くとることができる。この種の圧縮用 Box 型の最大は、1000 tf 位である。精度は200 tf 以上のものでは、 $\pm 0.05\%$ 程度である。だから、温度変化の激しい場所での使用は避けるように注意が必要である。温度変化に対する Loop 型、Box 型両力形の補正值は、温度係数として JIS B7728 では、 $0.025\%/1^\circ\text{C}$ 、ASTM その他の外国規格の多くは、 $0.027\%/1^\circ\text{C}$ を推奨している。従って力計本体を使用場所の温度になじませるよう、1~2時間以上前からセットしておくことが望ましい。

電子式検定器については、弾性体に荷重を加えたときに生ずる歪みを電氣的に指示させる方式で、歪みゲージ式ロードセル、磁わい式ロードセルなどが用いられている。

電気抵抗線歪みゲージを用いて測定する歪みゲージ式ロードセルでは、構造的に弾性体の小さな変形量を電氣的に変換できることと、遠隔測定も可能であるなどの利点がある。精度は $\pm 0.05\%$ より良いものがあるが、それ以上の精度を得るためには安定した電源電圧装置や、

良い性能の指示計などの計測装置が必要である。

強磁性体に機械的歪みを与えると、磁化特性が変化する。 10^{-6} ~ 10^{-5} 程度の小さな歪み量で大幅に磁化特性が変化するので、この磁化特性を用いて測定する磁わい式ロードセルでは、機械的変形量が小さく、感度が著しく大きな力計を製作することが出来る。電気出力が数百 mV~数 V と大きく、受感部の使用応力が、4~10 kgf/mm² と小さいので過負荷に対して頑丈である。また、使用応力が小さいということは、定格荷重での変形量が小さいこととなり、密閉構造にし易く、外部の悪雰囲気に影響されにくい特徴がある。

4. 荷重基準機の構造と精度

本会が所有している5.5 tf 及び300 tf の荷重基準機は、液圧プレスの原理を用い直径の大きいラムによって荷重計などの試料に力を加え、直径の小さいラムにももりを載せて、油圧を通じてそれらのつり合いを取る方式の装置で、大きい能力の力基準機としては古くから用いられている方式である。

荷重の精度は、通常 $\pm 0.1\%$ といわれるが、油圧式であるから、第一回目から正しい荷重を加えることは難しい。ラム、シリンダー間の摩擦が安定するように、1~2回能力まで荷重を加えた後使用することが望ましい。両荷重基準機の主な仕様は、表3のとおりである。

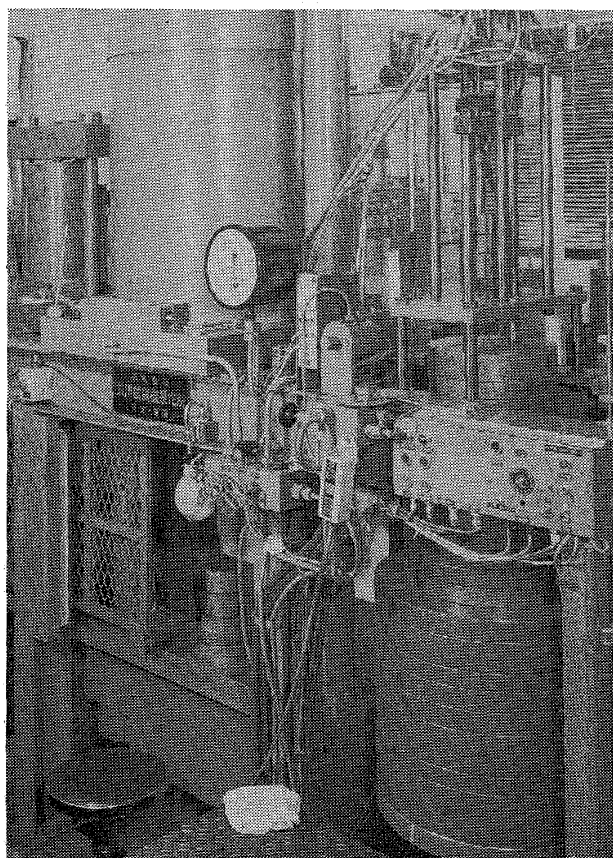
両荷重基準機は、力計に荷重を加える本体部、正確な油圧を発生させる計測ラムと、重錘部及び制御部から構成されている。図5に両荷重基準の据え付け状態を示す。

両荷重基準機ともひょう量は異なるが、構造的には全く同じ機構である。したがって、構造については300 tf 荷重基準機について説明する。

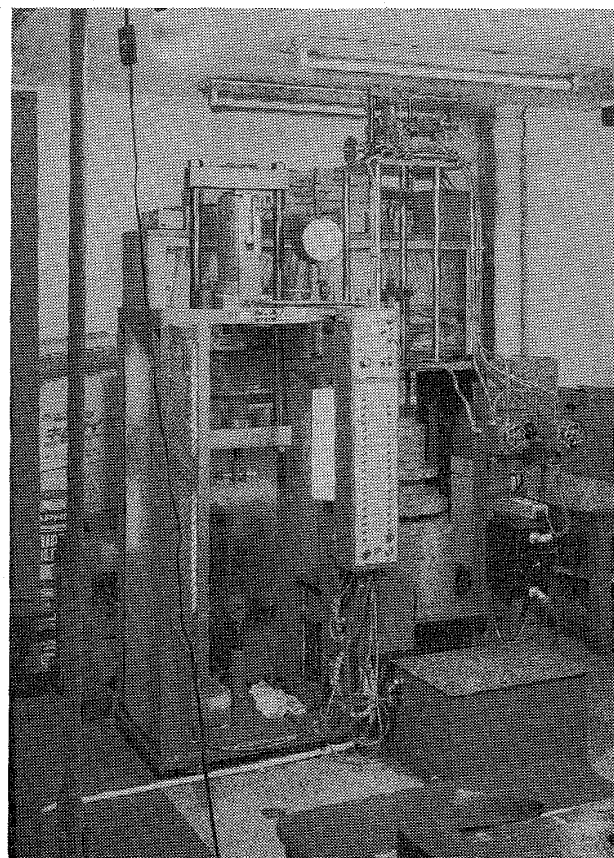
ラム、シリンダーの摩擦の影響、コルクスクリュウ効果の影響などが確認できるように大小ラム、シリンダー共に、シリンダーを回転可能な構造に製作している。器差の確認には、ラムの有効断面積の算出が重要な要素と

表3 力基準機の主仕様

基 準 機	ひ ょ う 量	ラム 面 積 比	荷 重 の 設 定	最高作動圧力 kg/cm ²
5.5 tf	550 kgf (D.W) 5.5 tf	1 : 10	10 kgf~5.5 tf 36段階	120 kg/cm ²
300 tf	1.5 tf (D.W) 30 tf 300 tf	1 : 20 : 200	50 kgf~300 tf 63段階	240 kg/cm ²



300 tf 荷重基準機



5.5 tf 荷重基準機

図5 5.5 tf 及び 300 tf 荷重基準機

なる。そこで特に、ラム、シリンダーの円筒精度、最高圧力下における弾性変形を 1/20000 以下に極力おさえる。

また、精度を高めるために必要な条件は、第一は加圧されても大小ラム、シリンダーの面積比が常に一定であることである。このためには、大小ラム、シリンダーの加圧による変形が面積比に及ぼす影響を無くするために構造、寸法を幾何学的に相似に設計、製作することが大切になる。しかし大小ラム、シリンダーは、大きさが極端に違うため、長手方向については全く相似に設計、製作

することが出来ないで直径方向について相似に設計、製作するほか、ラム、シリンダーの加圧により生じる弾性変形量を 1/20000 以下に押さえることである。

ここでラム、シリンダーの有効断面積をクリアランスの中央と仮定し、加圧によりラム、シリンダーともに変化する場合を考えると、ラム、シリンダーの有効直径の変化率を一定の値以内に押さえればよい。この変化率を ϵ_1 とすれば、 ϵ_1 は、次式で示される。

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{E} \left(\frac{K^2 + 2}{K^2 - 1} + \frac{3}{m} - 1 \right) \quad \dots\dots(1)$$

ここで

P ; 作動最高圧力

E ; 材料の縦弾性係数

r_1 ; ラムの外半径, シリンダーの内半径

r_2 ; シリンダーの外半径

K^2 ; r_1/r_2 比

$1/m$; 材料のポアソン比

$m=10/3$ とすれば圧力と変化率は次式のようになる。

$$P = \frac{2E\epsilon_1}{\left(\frac{K^2+1}{K^2-1} - 0.1\right)} \quad \dots\dots(2)$$

(2)式より, K^2 を求めると $K^2 = (2\epsilon_1 E + 1.1P) / (2\epsilon_1 E - 0.9P)$

ここで, $2\epsilon_1 E - 0.9P > 0$ でなければならないから

$$P < 2\epsilon_1 E / 0.9 \quad \dots\dots(3)$$

$E = 2.05 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ とすれば, 変化率 ϵ_1 を $1/20000$ 以内にするためには, 許容最高圧力は約 228 kg/cm^2 となる。

実際には図6のようにラム, シリンダーは加圧され変形するものと考えられている。ラム, シリンダーの加工精度は図6のA点附近が一番低下するものと思われる。

このA点附近で, ラム・シリンダーが接するところを有

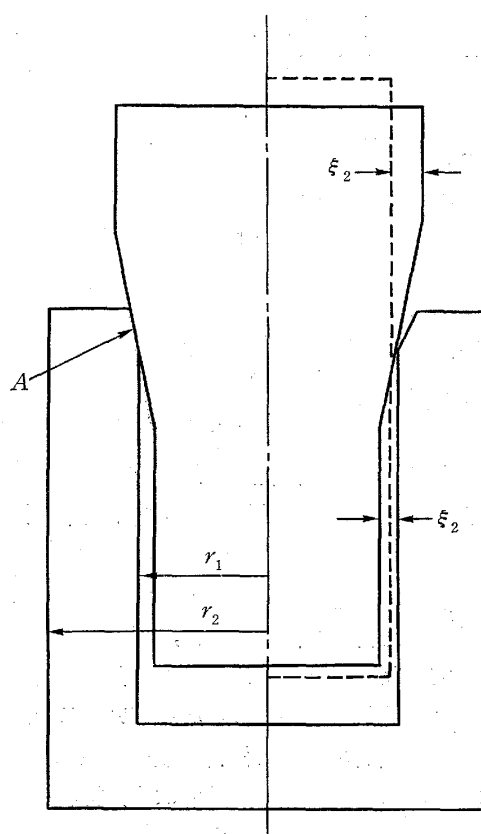


図6 ラム・シリンダーの変形

効直径と考えれば, 加工精度の影響をさけるため, 大気圧下と加圧下におけるラム径の差を小さくすることが望ましい。この場合の変化率 ϵ_2 は

$$\epsilon_2 = \frac{P}{E} \left(1 - \frac{2}{m} + \frac{1}{m} \right) \quad \dots\dots(4)$$

で表され, この面での有効直径の変化率を $1/20000$ 以内におさえるためには許容最高圧力は 147 kg/cm^2 となる。しかし, 2組のラム・シリンダー間で相似性が完全に成り立つならば, これらの弾性変形も荷重誤差にならないことは, 油圧拡大方式の大きな特徴の一つと言える。

また, 有効断面積の変化を小さくするためにシリンダーの外側から別系統の外圧（吹き込みとも言う）を加えてラムとの間隙を調整する方式の構造を採用すると, 作動圧力を 2000 kg/cm^2 以上にとることができる。

ここで本会の 300 tf 荷重基準機は表3の主仕様に示すとおり, 作動最高圧力は 240 kg/cm^2 であるため, 設計基準を越えている。そこで(1)式によりラム・シリンダーの有効直径の変化率 ϵ_1 を計算すれば, ほぼ $1/19200$ となり, 設計基準に近い値である。この ϵ_1 の値は JIS B7728 荷重基準機に規定されている精度, 100 tf 以下では $\pm 0.05\%$, 100 tf をこえる 500 tf 以下では $\pm 0.1\%$ を十分に満足している。従って本会の 300 tf 荷重基準機はほぼ初期の精度を達成しているものと思われる。

5. 標準荷重基準機の精度管理

荷重基準機の荷重の検査には直接分銅を載荷する方法が最良であるが, 約 5.5~300 tf におよぶ分銅を載せることは実際には不可能である。そのため2に記した力標準体系の図1に示すように弾性検定器を用いて我国の力の基準とされている計量研（通産省工業技術院計量研究所）の力基準機から本会の荷重基準機へ力の移転する方法が採用されている。また, 同時に4に記したラム・シリンダーの寸法精度から誤差を推定する手段を用いて荷重精度の校正を行っている。しかし, ラム・シリンダーの直径の計測を毎年行うためには荷重基準機をそのたびごとに分解しなければ出来ないのでは経済的にも不都合が生じる。そこで製作時, 及び据付時に校正を行い, その後は前者のように弾性検定器を用いた比較校正を行っている。

弾性検定器を使って長期間にわたって荷重基準機の荷重精度を管理する場合の累積誤差, すなわち荷重基準機の安定性は荷重変動の要因であるラム・シリンダーの摩擦の大小, 弾性検定器のヒステリシス, 測定者の操作法, 室温等を一定にするか, 層別してその影響を消去するとともに荷重指示値の管理を管理図によって監視す

ばよい。

そこで昭和44年度に本会の東京支部に設置されたときの 300 tf 基準機の荷重指示値, 20722.0 (300 tf における 300 tf BOX の指示値) と同時に計量研において校正された弾性検定器の指示値 20739.5 (300 tf における 300 tf BOX の指示値) を基準とし, 各年度の荷重指示値を X_i として次のように示す。

$$X_i = \frac{S_x}{S_{44}} \cdot 10^{-4}$$

ここで S_x ; 各年度の 300 tf 基準機による荷重指示値。

S_{44} ; 昭和44年度の 300 tf 基準機による荷重指示値。

X_i を用いて平均値, 標準偏差を計算した結果を表4に示す。

表4 NKと計量研の荷重指示値

	X	σ	$X \pm 3\sigma$	$X_{\max/\min}$
NK	20737.7	5.01	20752.7 20722.7	1.0012
計量研	20735.6	3.86	20747.2 20724.0	1.0007

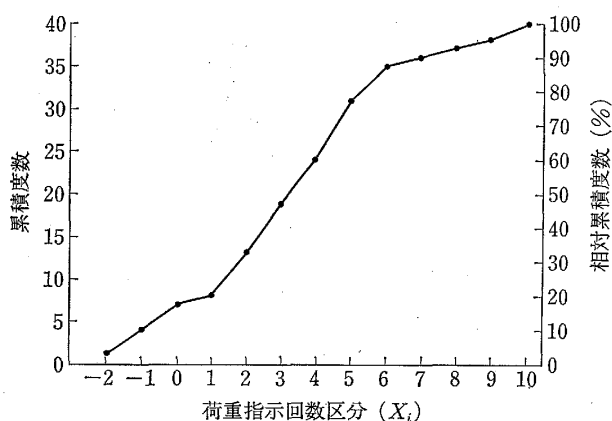


図7 累積度数図

一般に力基準機の荷重指示値は正規分布を示すことが分っているが, 図7に 300 tf 荷重基準機の荷重指示値の累積度数図を示す。また, 標準偏差の評価と平均値の評価をそれぞれ JIS Z9057 および JIS Z9049 により評価すると,

標準偏差の評価は

$$F_0 = \frac{V_2}{V_1} = 3.30$$

ここで V_1 ; NK 300 tf 基準機の荷重指示値の分散

V_2 ; 計量研で校正したときの荷重指示値の分散

ここで危険率 α を 0.05 とすれば

$$F_{19}^{39}(0.025) = 5.33$$

$$\therefore F_0 > F_{19}^{39}$$

となり有意差は認められる。

平均値の評価は

$$t_0 = d / \sqrt{\frac{S_1}{n_1(n_1-1)} + \frac{S_2}{n_2(n_2-1)}}$$

ここで S_1 ; NK 300 tf 基準機の荷重指示値の平方和

S_2 ; 計量研で校正したときの荷重指示値の平方和

ここで危険率 α を 0.05 とすれば

$$t_0 = 4.211$$

分散の自由度

$$f = 43.668$$

$$\therefore t_0 < t(f, \alpha)$$

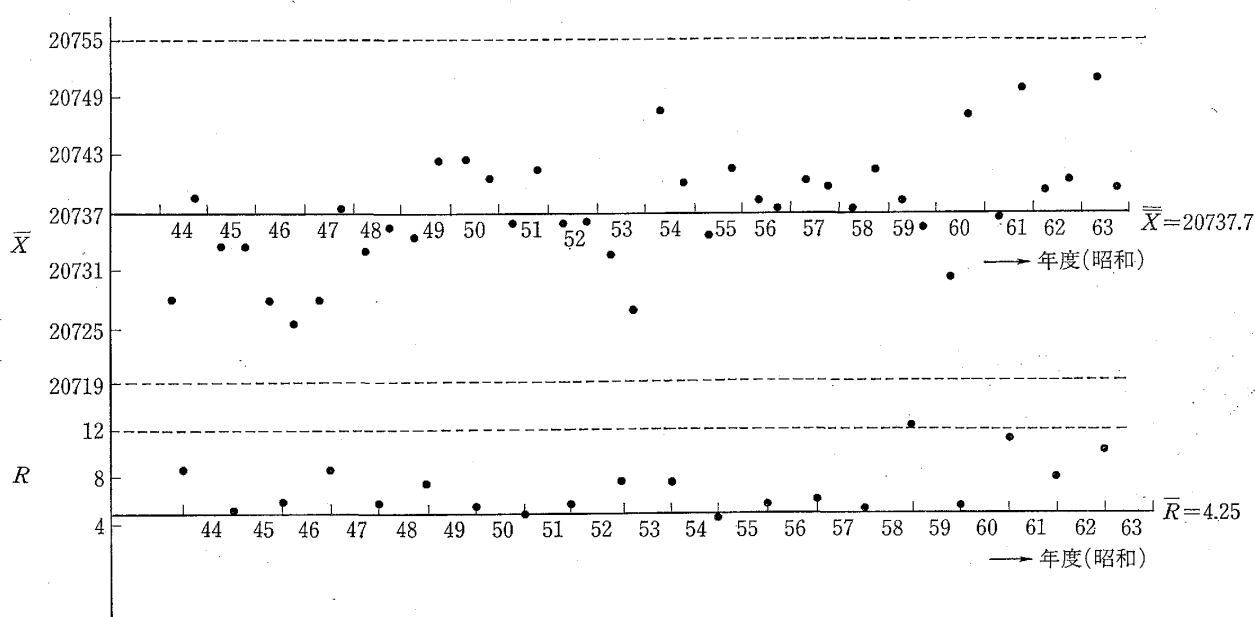
となり有意差は認められない。

以上, 平均値の評価は有意差は認められないが, 標準偏差は有意差が認められた。この結果は NK と計量研との荷重検定器の指示値の表示の違いから起きるものと思われる。即ち計量研では荷重の増加と減少の指示値を別々に検定器の定数としているのに対して NK では荷重の増加と減少の指示値の平均値を検定器の定数としているところからこのような結果になるものと思われる。また, 荷重検定器の負荷の安定性も含まれているものと解して, 参考に 300 tf 基準機の X-R 管理図を図8に示す。

6. 材料試験機の検査

材料試験機の検査は, 試験片へ所定の応力などを適確に加えつつ正確に移動することを確認するために行われるものである。しかし材料試験について考える場合に困難なことは, 製品の試験結果のバラツキの中に材料試験機に起因する誤差と試験片に起因する誤差とが複雑に混在し, この両者の誤差を容易に分離できない点である。

一般的には材料試験機の検査は, 試験片の強度の目盛そのものではなく試験片に加えるべき荷重の目盛を検査するなど間接的な校正が主体となっていることが多い。このような間接的な校正で材料試験機の性能を保証するためには, 荷重目盛の校正だけでなく, 材料試験機の各機能についても検査する必要がある。

図8 $\bar{x}$ -R 管理図

7. まとめ

- ① 油圧拡大方式を採用している大荷重基準機は、ラム・シリンダーの面積比から一応の精度を推定することができる利点がある。本会の 300 tf 荷重基準機の精度は、ラム・シリンダーの面積比から推定すれば約 1/19200 程度である。弾性検定器を用いた計量研との比較測定では約 1/10000 であり、ほぼ初期の目的を達成できたものと思われる。
- ② 材料試験機的全種の検査方法を記述することは省略した。現在、材料試験機については、当支部として合理的な検査方法を検討しており、成果が得られたら（その 2）で報告する。
- ③ 力基準機の安定性と弾性検定器の安定性を比較すれば力基準機の安定性が高い。従って、今後の力基準機の

荷重精度の校正はロードセルを用い、並列方式で行うのが良いものと思われる。

並列方式とは、例えば 300 tf を校正する場合、1.5 tf のセルを 3 個、計 4.5 tf、5 tf のセルを 6 個、計 30 tf、30 tf セルを 9 個、計 270 tf を使用し、1.5 tf の分銅を順々に拡大していく方法である。

参考文献

- (1) JIS, B7728, Z 9049, Z9057
- (2) 産業計測機器管理基準 VII, 力計, 試験機の管理計量管理協会
- (3) 硬さ試験法とその応用 吉沢武男著
- (4) 日本海事協会会誌 No.146
- (5) 金属材料試験技術 材料試験技術研究会