

# 珪素鋼板の鐵損試験規格の検討

三浦倫義\* 島 史郎\* 杉浦繁二\*

## Methods of Testing Iron Loss of Silicon-Steel Sheets

By Tomoyoshi Miura, Shiro Shima and Shigeji Sugiura  
Hitachi Laboratory, Hitachi, Ltd.

### Abstract

The Epstein method which is generally employed for measuring iron loss of Si-steel, uses test specimens of 10 kilograms, cut from sheets of 3'×6' size, in strips of 30 mm in width and 500 mm in length, half parallel, half perpendicular to the direction of rolling, and each half weighing 5 kilograms.

An efficient method of measuring iron loss, which can test full-size sheets up to 3'×6' size successively, was contrived by the writers. The test result evidenced that variations existed even among sheets taken from one shipment lot, proving that the prevailing tests carried out according to the JES standards are not reliable enough. The manufacturers concerned should strive to minimize such non-uniformities.

Even if a certain amount of variation is to be allowed, it is desirable to introduce a statistical way of thinking and procedure into the testing rules for iron loss. The writers, then, suggested a plan to meet the above requirements, inviting comments thereon.

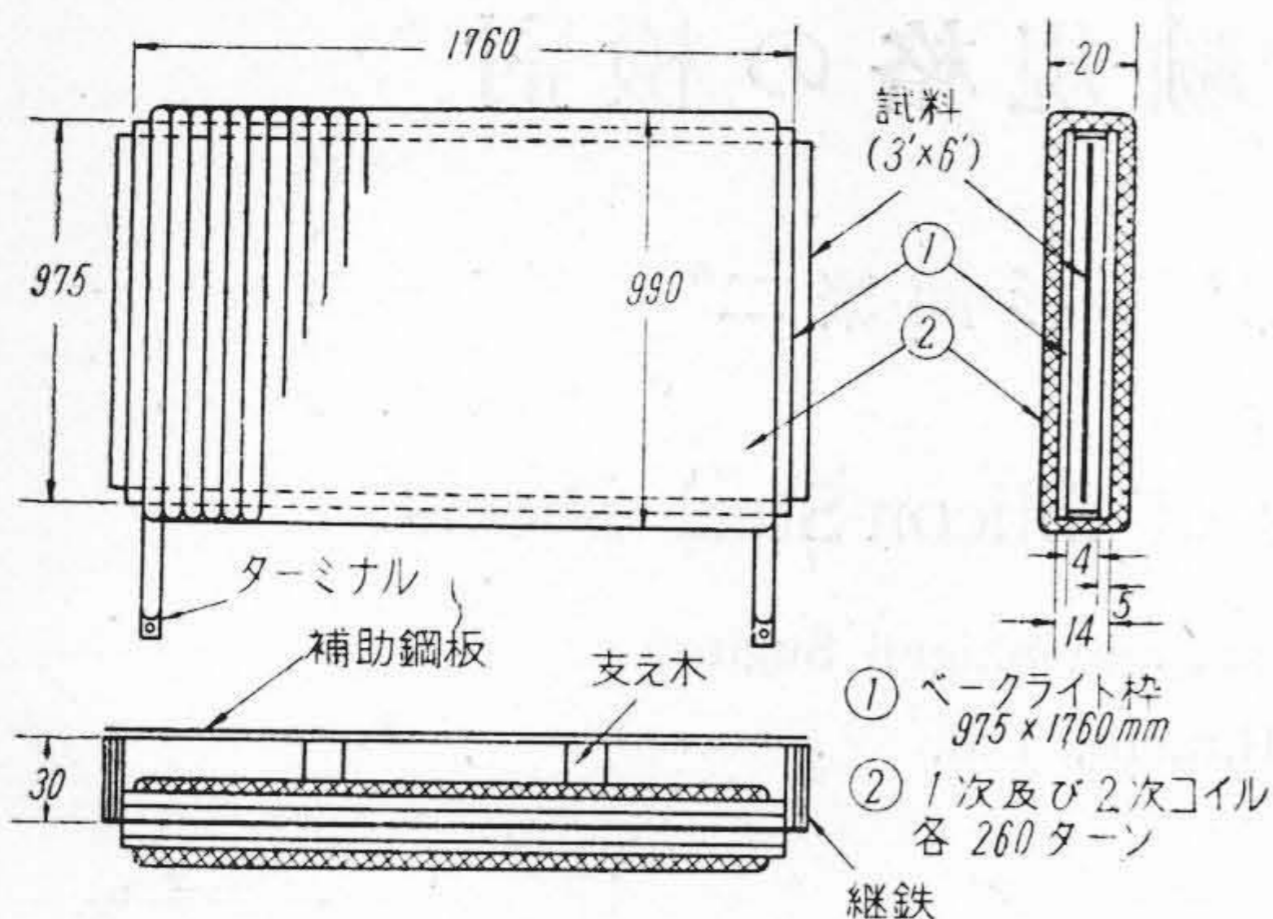
### [I] 緒 言

統計学の最近の目覚しい進展と共に、生産工場に於ては品質管理が大きな問題として採上げられ、他方各種試験の規格にも統計的な考え方が多分に採入られて来ている。然るに電気機器の根幹となる珪素鋼板の磁性試験には、舊態依然たるエプスタイン装置及びNS導磁率計により抜取り試験が行われていて、何の疑念も抱かれていない現状である。たまたま3'×6'の珪素鋼板の鐵損を原寸のまま測定し得る新装置をつくり検討を行つた所同一荷口の鋼板に於て鐵損のばらつきが相當顯著なものがあつた。現行JES規格での試験には大きな不安が抱かれることが明かとなつた。鋼板製造者に於てこのばらつきを縮減する努力が望ましいが、一方規格の方もばらつきを考慮に入れ、より合理的なものに改訂する必要があると思われるので、敢て一私案を提示し大方の御検討を得たいと思う。

### [II] 珪素鋼板の鐵損の新試験装置

珪素鋼板の鐵損試験には一般にエプスタイン法が採用されている。エプスタイン法では試料として普通3'×6'の原板3枚から展延の方向とこれに直角の方向にそれぞれ30×500mmの短冊型に細断した各5疋合計10疋を採つて測定するので、鋼板がそれだけ損失になるばかりでなく鋼板1枚毎の品質判定は不可能である。今回3'×6'の原板を切らずにそのまま1枚毎に鐵損値を測定する装置を試作し測定を行つた。試作した鐵損試験装置は第1圖に示すように厚さ5mmのベークライト板2枚を4mmの隙間をへだてて設け、その間に3'×6'の原板を挿入する如くし外側に誘起電壓測定用コイル(2次コイル)として0.8×6mmの綿巻銅線を260回、更にその外側に勵磁コイル(1次コイル)として同じ綿巻銅線を260回各一層に巻いたものである。鐵損値はエプスタイン法同様規定周波数の電源を使用して、2次コイルの誘起電壓を所定磁束密度に相當する値にした時の

\* 日立製作所日立研究所



第1圖 試作鐵損試驗裝置

Fig. 1 New Measuring Device of Iron Loss.

電力計の読みから次式で算出する。

$$W = \left\{ \textcircled{W} - \frac{E^2}{R} \right\} / M$$

$W$  = 鐵損値 (watt/kg)

$\textcircled{W}$  = 電力計の読み (watt)

$E$  = 2次コイル誘起電壓 (實効値) (volt)

$R$  = 電力計の電壓コイルと電壓計との並列抵抗値 ( $\Omega$ )

$M$  = 試料重量 (kg)

磁束密度は次式で計算される。

$$B = (E \times 10^8) / (4.44 f N A)$$

$$A = (M \times 10^3) / (l D)$$

$B$  = 最大磁束密度 (gauss)

$f$  = 周波數

$N$  = 2次コイル巻回数 (260)

$A$  = 試料斷面積 ( $\text{cm}^2$ )

$D$  = 比重 (T 鋼板では 7.55 B 鋼板では 7.75)

当初は第1圖のように試料を挿入したコイルの外側に試料と平行に補助の鋼板を置いて、磁氣回路を試料—繼鐵—補助鋼板—繼鐵で閉路させて鐵損値と勵磁電流を測定した結果、第1表のようになった。補助鋼板の枚数を

第1表 新装置による鐵損試驗結果  
Table 1 Test Results by New Device.

補助鋼板の枚數	0	1	2	5	10
鐵 損 値 $W_{10/50}$ (watt/kg)	2.30	2.58	2.66	2.69	2.70
勵磁電流 (A)	1.45	1.28	1.25	1.25	1.25

[備考]  $W_{10/50}$  は 50 サイクル、10,000 ガウスに於ける鐵損値

増すに従つて勵磁電流は減少するが鐵損値は漸増する。鐵損値が増加するのは補助鋼板の鐵損が加わるためである。但し補助鋼板を通る磁束は試料のそれに比し遙かに

小で、大部分は外部に逃れるものと思われる。

鐵損の比較測定を目的とすれば補助鋼板無しで充分と考え、装置の簡單化を期して以下の測定にはすべて補助鋼板を用いなかつた。

T 級、B 級兩鋼板各 3 枚を新装置で測定した結果、第2表のような鐵損値を得た。これらの鋼板を 30x500

第2表 標準エプスタイン装置との比較  
Table 2 Comparison of Test Results by New and Ordinary Device.

試 料	新装置による $W_{10/50}$ (watt/kg)				エプスタ イン装置 による $W_{10/50}$ watt/kg	スプスタ イン装置 による鐵 損値 新装置に よる平均 鐵損値
	No. 1	No. 2	No. 3	平均		
(1) T 級	1.17	1.26	1.17	1.20	1.28	1.067
(2) B 級	1.81	2.07	2.30	2.06	2.30	1.117

mm 縦目及び横目各 5 kg 宛に細斷して、標準エプスタイン装置で測定した結果は同表に併示したようになった。

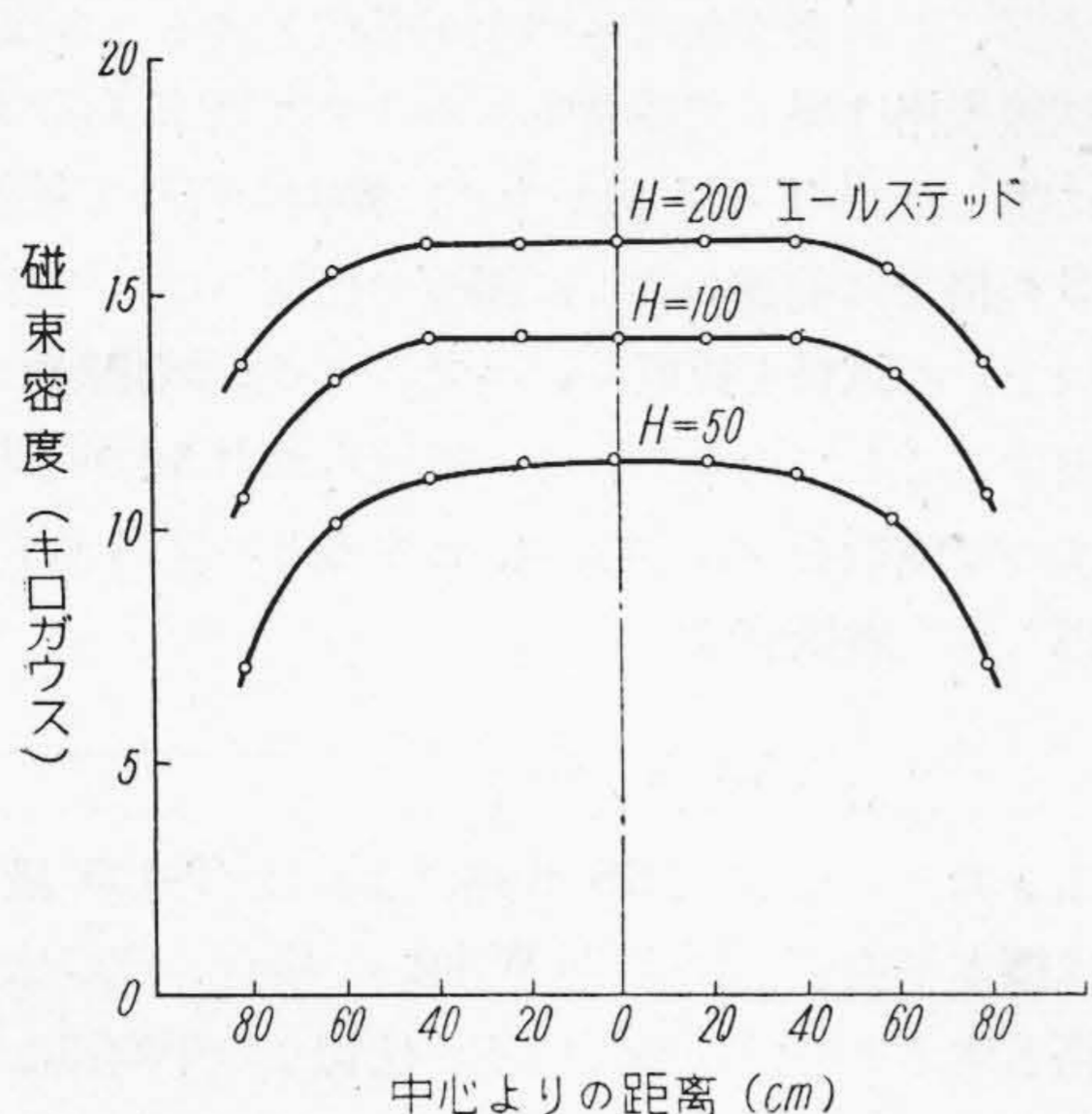
新装置では縦目方向の鐵損値を測定することになるから T 級、B 級各 6 枚の試料につき、縦目方向だけの比較を行うと第3表の如くなる。

第3表 縦目方向だけのエプスタイン装置との比較  
Table 3 Comparison of Test Results by New and Ordinary Device, Using Test Specimens Parallel to the Direction of Rolling.

試 料	鐵 損 値 $W_{10/50}$ (watt/kg)		エプスタイン装 置による鐵損値 新装置による 平均鐵損値
	新装置 による 平均値	縦目のみ 10kg を エプスタイン装置 で測定した結果	
(1) T 級	1.23	1.27	1.032
(2) B 級	2.22	2.29	1.032

第3表のように、縦目方向だけで比較しても、エプスタイン法による方が 3.2% 鐵損値が大きく出るのは、細斷による機械的歪にて、磁性の劣化が起るものと考えられる。即ち本装置による時は第2表のように、従來のエプスタイン法による場合に比し、鐵損値が 6% 乃至 10% 小さく出るが、その原因は縦目だけで測定すること、細斷による磁性の劣化が無いためと考えられる。

参考までに新装置による測定時の縦目方向に於ける磁束密度を測定した結果を示すと第2圖のようである。磁束密度が兩端部でかなり遞減しているが、鐵損の測定には、2次コイルの誘起電壓で平均の磁束密度を測つているので、これが大きな誤差を來す原因とはならないと思ふ。

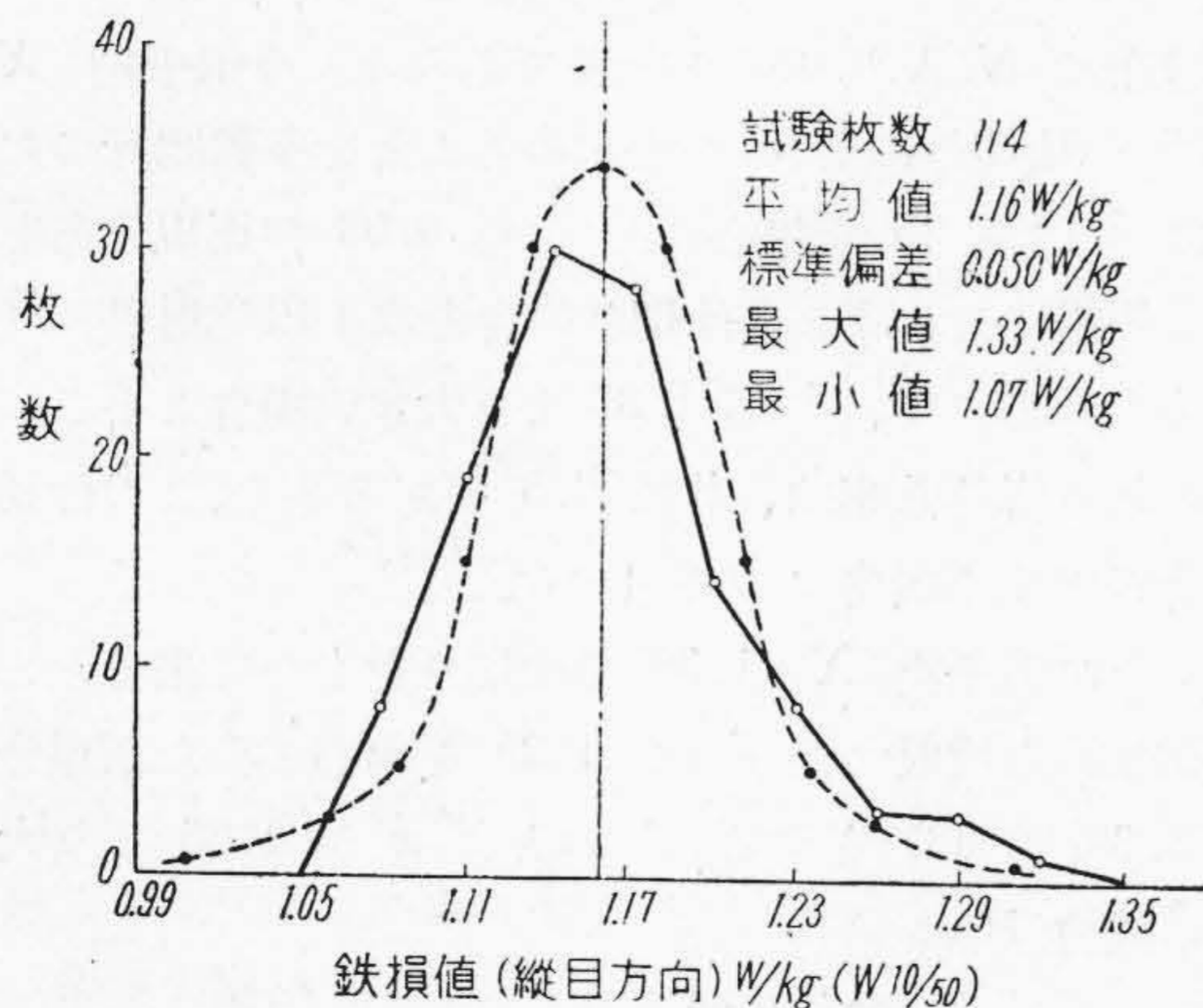


第2圖 試作装置に於ける磁束密度の分布状態  
Fig. 2 Flux Distribution in Specimens Under Test by New Device.

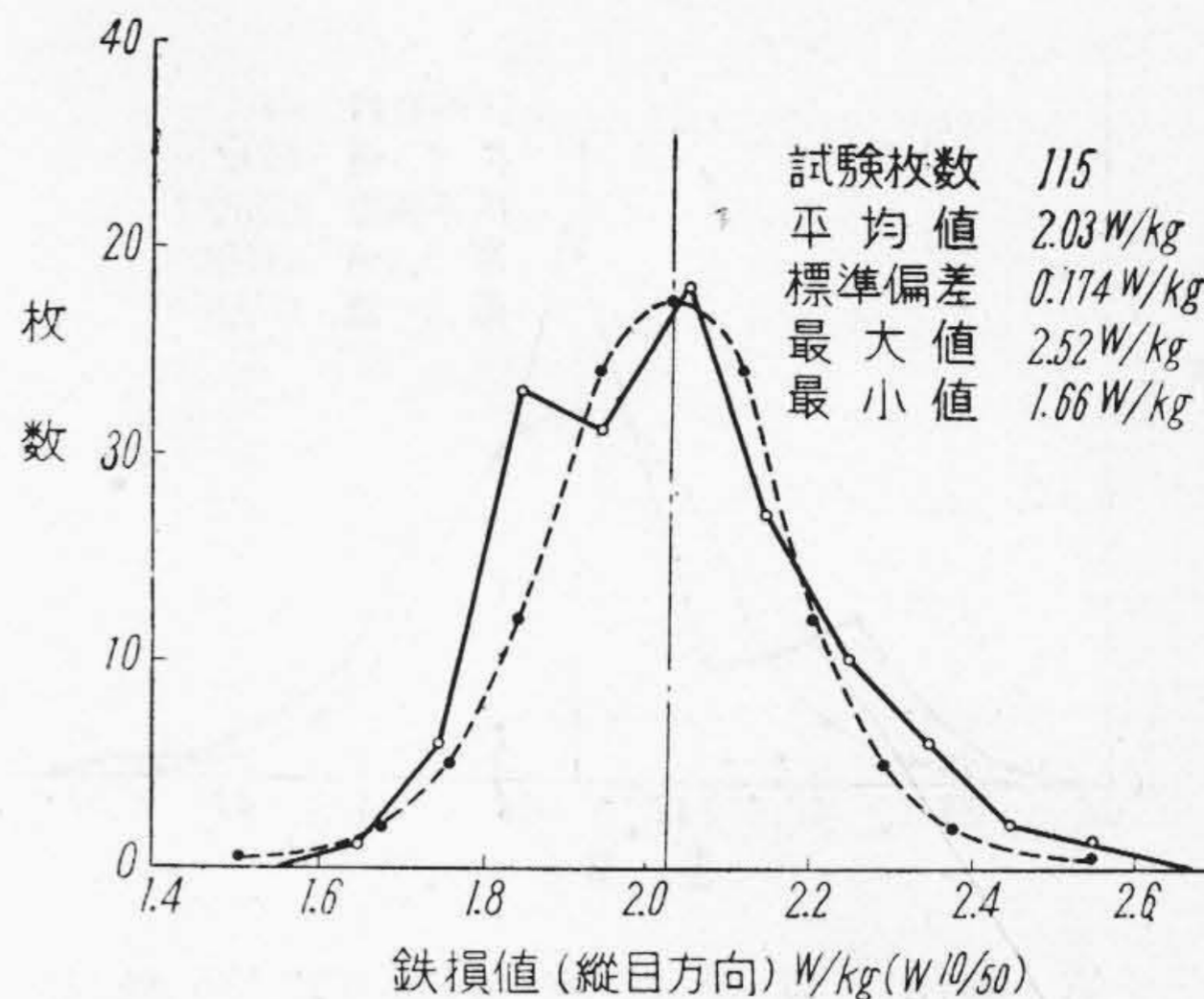
[III] 同一荷口鋼板に於ける鐵損値のばらつき

昭和 25 年 9 月に日立工場に入荷した某社製 T-135 級及び B 級鋼板の同一荷口各 500 kg, 並びに昭和 26 年 3 月に入荷した T-120 級 850 kg (焼鈍温度その他製造条件がすべて同一と見做される同じ箱内のもの) について、新装置による測定を行い、第 3 圖に示すような鐵損値頻度曲線を得た。同じ試料について 1 枚毎の重量測定結果の頻度曲線は第 4 圖の如くである。この結果から鐵損値及び重量の平均値、標準偏差を計算すると第 4 表のようになる。第 3 圖、第 4 圖に點線でこれらに相當する正規分布曲線を示してある。

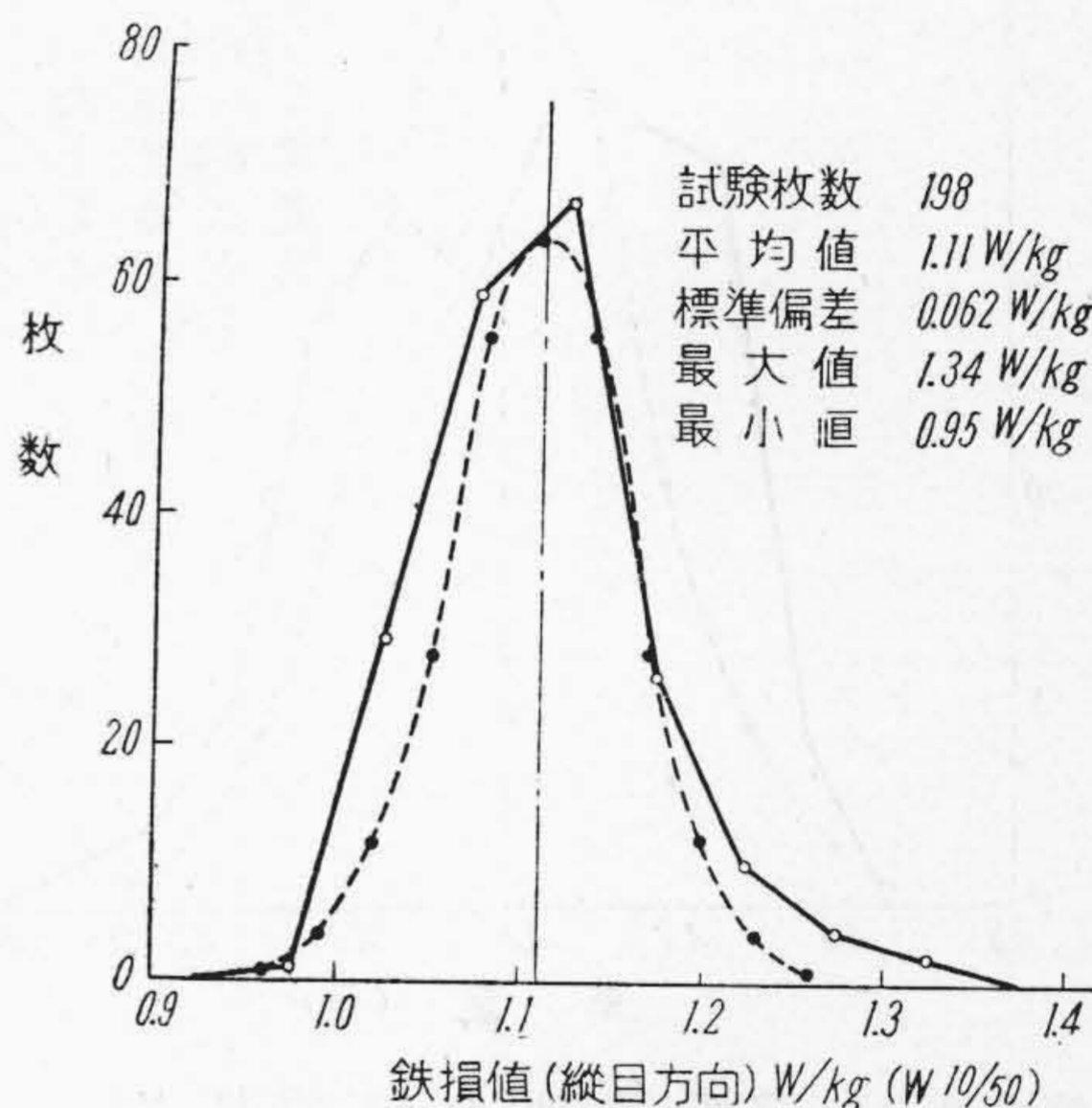
同一仕切内において、鐵損値と重量との間には、かなりの相關が認められるが、未だ重量検査を以て鐵損試験



第3圖(a) 鐵損値頻度曲線 (T-135 級品)  
Fig. 3(a) Frequency Curve of Iron Loss. (T-135 Sheets).



第3圖(b) 鐵損値頻度曲線 (B 級品)  
Fig. 3(b) Frequency Curve of Iron Loss. (B Sheets)



第3圖(c) 鐵損値頻度曲線 (T-120 級品)  
Fig. 3(c) Frequency Curve of Iron Loss. (T-120 Sheets)

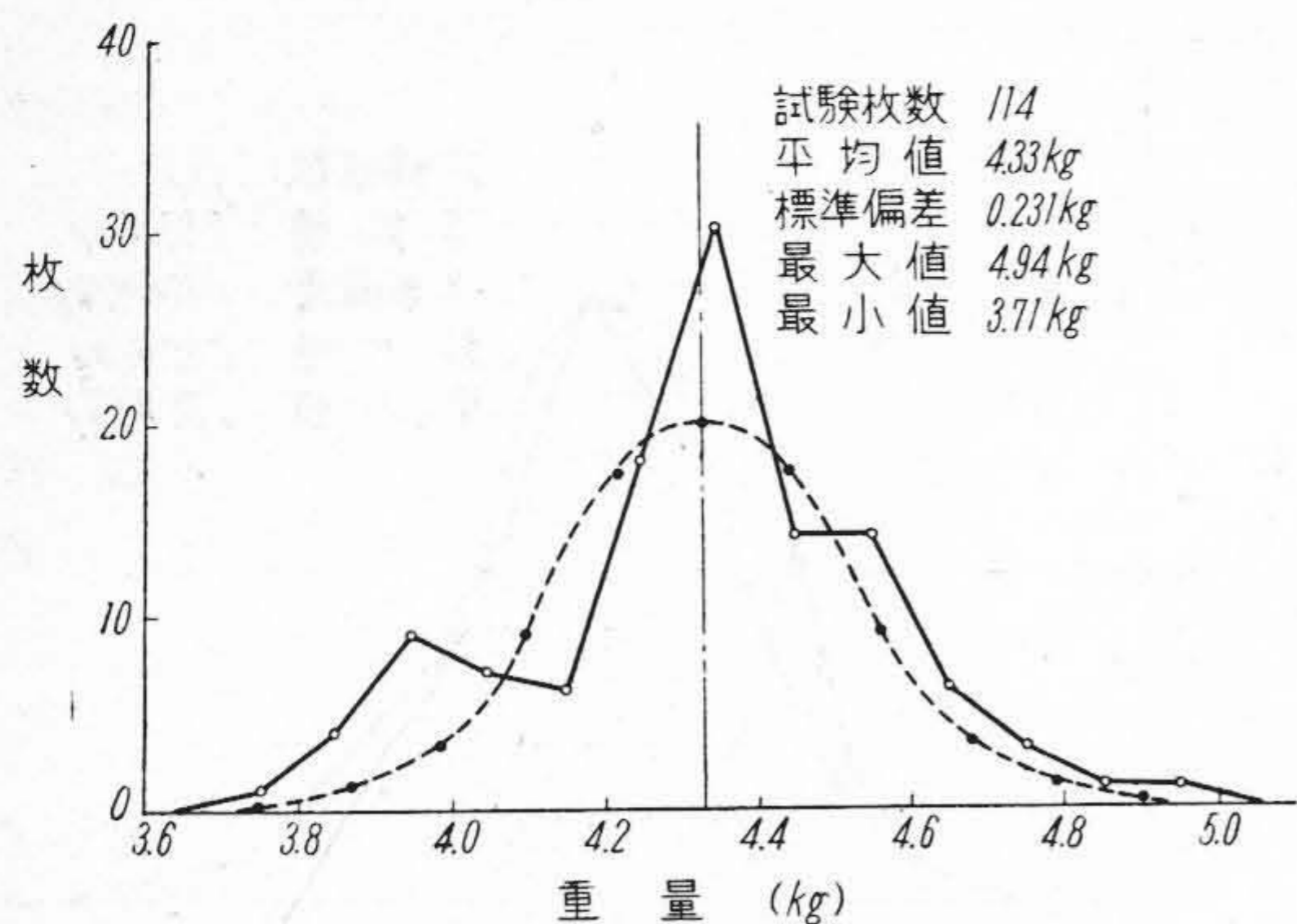
第 4 表 鐵損値及び重量の平均値と標準偏差  
Table 4 Mean Value and Standard Deviation of Iron Loss and Weight.

試料	試験枚数	鐵損値 W <sub>10/50</sub>		重量	
		平均値 W/kg	標準偏差 W/kg	平均値 kg	標準偏差 kg
T-135	114	1.16	0.050	4.33	0.231
B	115	2.03	0.174	4.42	0.202
T-120	198	1.11	0.062	4.18	0.222

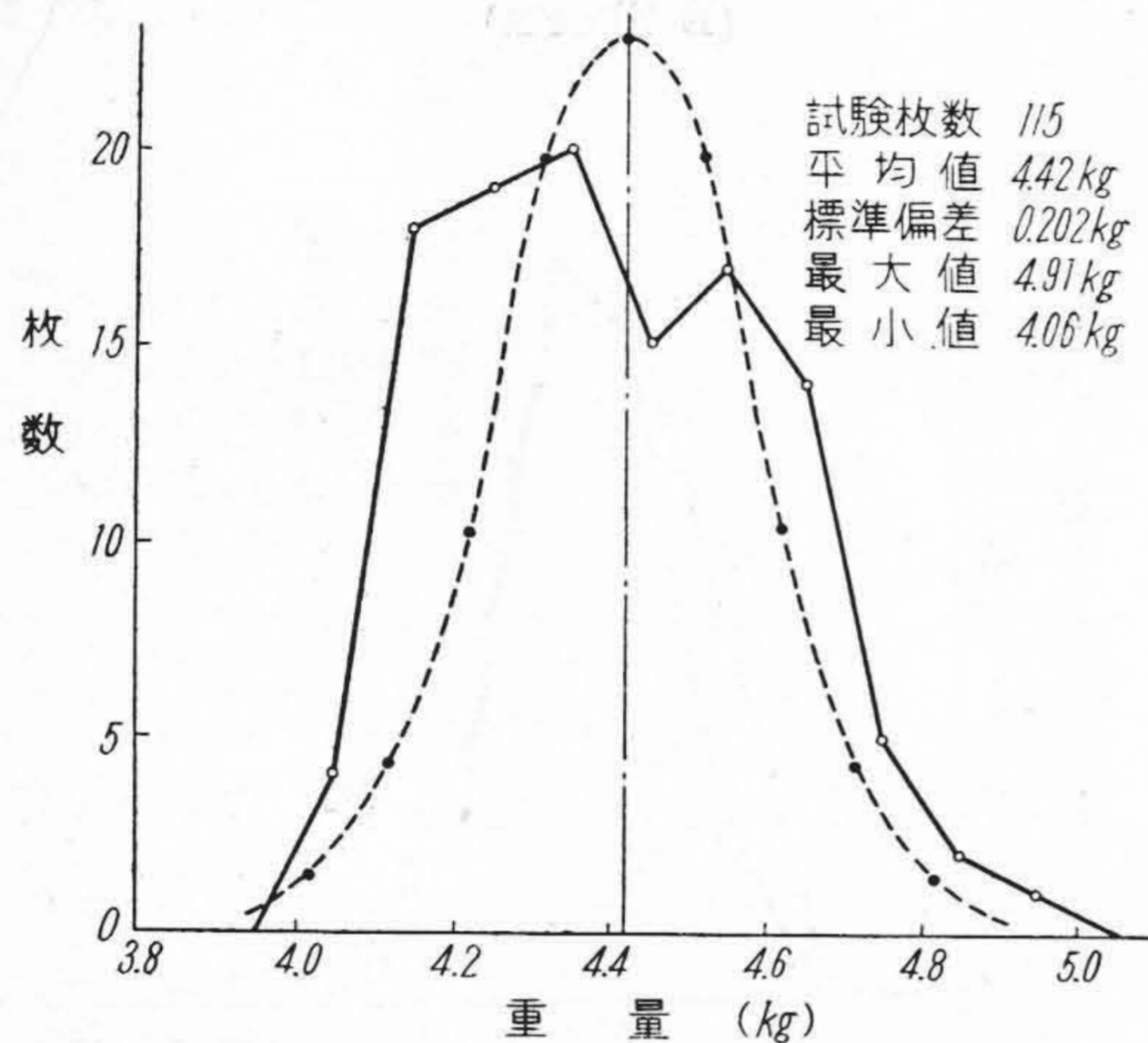
に代用することは出来ない。

[IV] JES 試験規格の検討

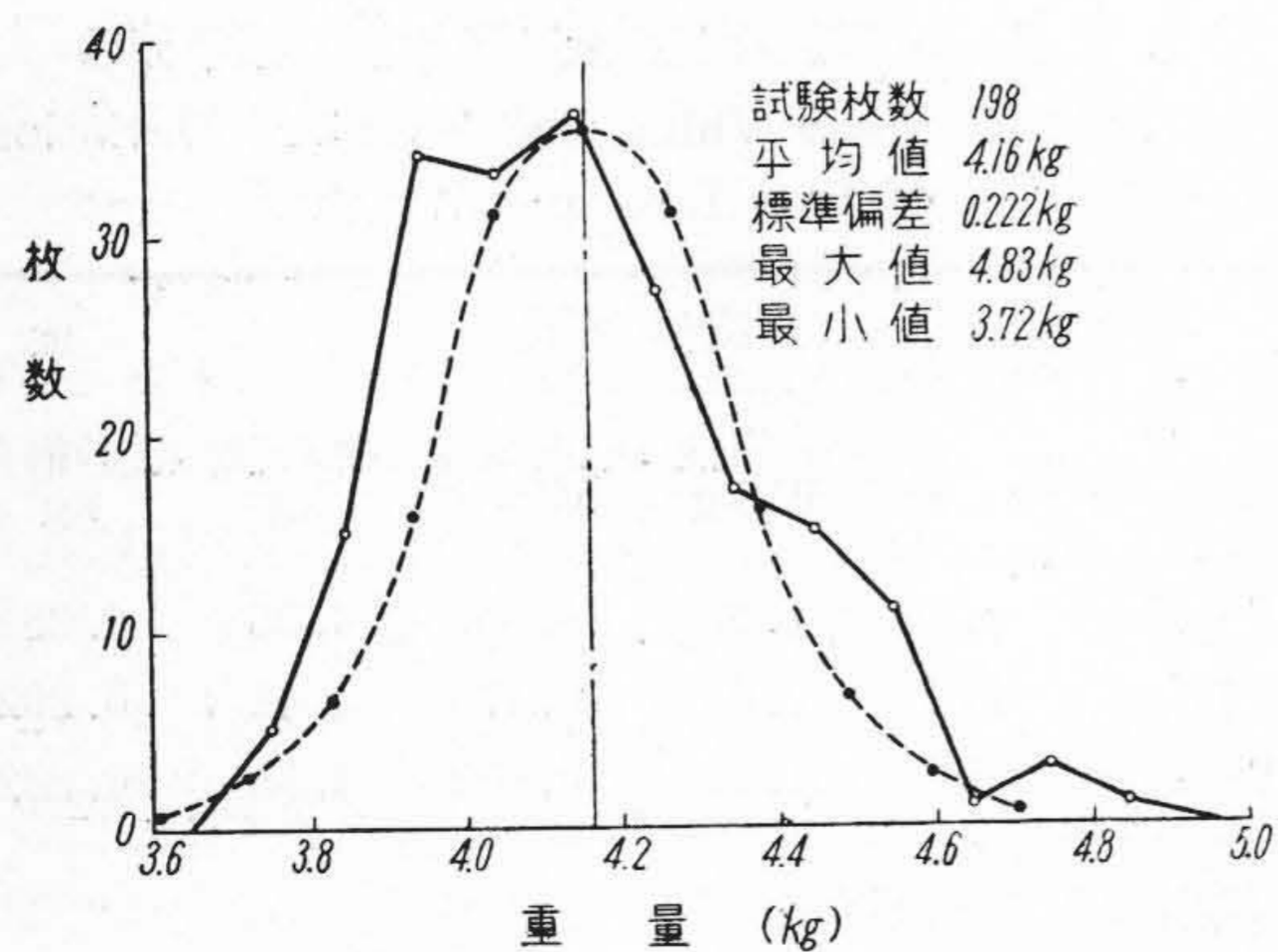
同一荷口鋼板の鐵損値にこのような大きなばらつきがあることは、新装置による測定で初めて明かにされたの



第4圖(a) 重量頻度曲線 (T-135 級品)  
Fig. 4(a) Frequency Curve of Weight of Sheets. (T-135 Sheets)



第4圖(b) 重量頻度曲線 (B 級品)  
Fig. 4(b) Frequency Curve of Weight of Sheets. (B Sheets)



第4圖(c) 重量頻度曲線 (T-120 級品)  
Fig. 4(c) Frequency Curve of Weight of Sheets. (T-120 Sheets)

であるが、このようなばらつきが必然とするならば、現行の試験規格は果して妥当であろうか。以下ばらつきが最小に得られた T-135 級を中心に検討を行つて見よう。

JES 規格では前述のように鋼板の仕切りから任意に 3 枚 (以上) の試料を抜取り、エプスタイン試験器で鐵損を測定することになっている。抜取られた 3 枚の鋼板の 1 枚ずつの鐵損を  $x_1, x_2, x_3$  とするとエプスタイン試験で得られた鐵損値は

$$\bar{x} = \frac{1}{3}(x_1 + x_2 + x_3)$$

であると考えられる。JES 規格によれば T-135 級に対しては標本平均値  $\bar{x} \leq 1.35 \text{ W/kg}$  の場合、その仕切りを合格とすることになっている。仕切りの平均でない點に特に注意する。新装置による測定の結果 T-135 級において母標準偏差  $\sigma = 0.050$  が得られている。 $\sigma$  については未だ充分多くの資料を得ていないが、上掲第 4 表の最小値を採つて議論を進めるならば、ばらつきを過大視するとのそしりは免れるものと思う。一般に變量  $x$  の正規分布は次の確率密度函数で定義される。

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-X}{\sigma}\right)^2}$$

ここに  $e$  は自然對數の底で、 $X$  は母集團の平均値これを  $N(X, \sigma)$  で表わす。この形式によれば我々の考えている鋼板の鐵損値は  $N(X, 0.05)$  の分布をしていることになる。 $N(X, \sigma)$  なる仕切りから  $n$  個の試料を任意に抽出して、その平均値  $\bar{x}$  を計算することを多數回行えば、 $\bar{x}$  の分布は  $N(X, \sigma/\sqrt{n})$  の形となることが知られている。もし JIS 規格に示された最小枚數  $n=3$  で試験を進めて行けば、 $\frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03$  となり、 $\bar{x}$  の分布は  $N(X, 0.03)$  となるであろう。今母平均  $X=1.35$  の仕切りにつき  $\bar{x}$  を求めることを多數回行つたならば  $\bar{x}$  は 1.35 を中心として  $\sigma=0.03$  の正規分布をする。規格によればこの仕切りの合否は 1 回の測定の  $\bar{x}$  で決められるので、 $\bar{x}$  が 1.35 より大きい場合と小さい場合の起り得る確率は、共に 0.5 であるから、この仕切りを合格とする機會は 0.5 しかない。

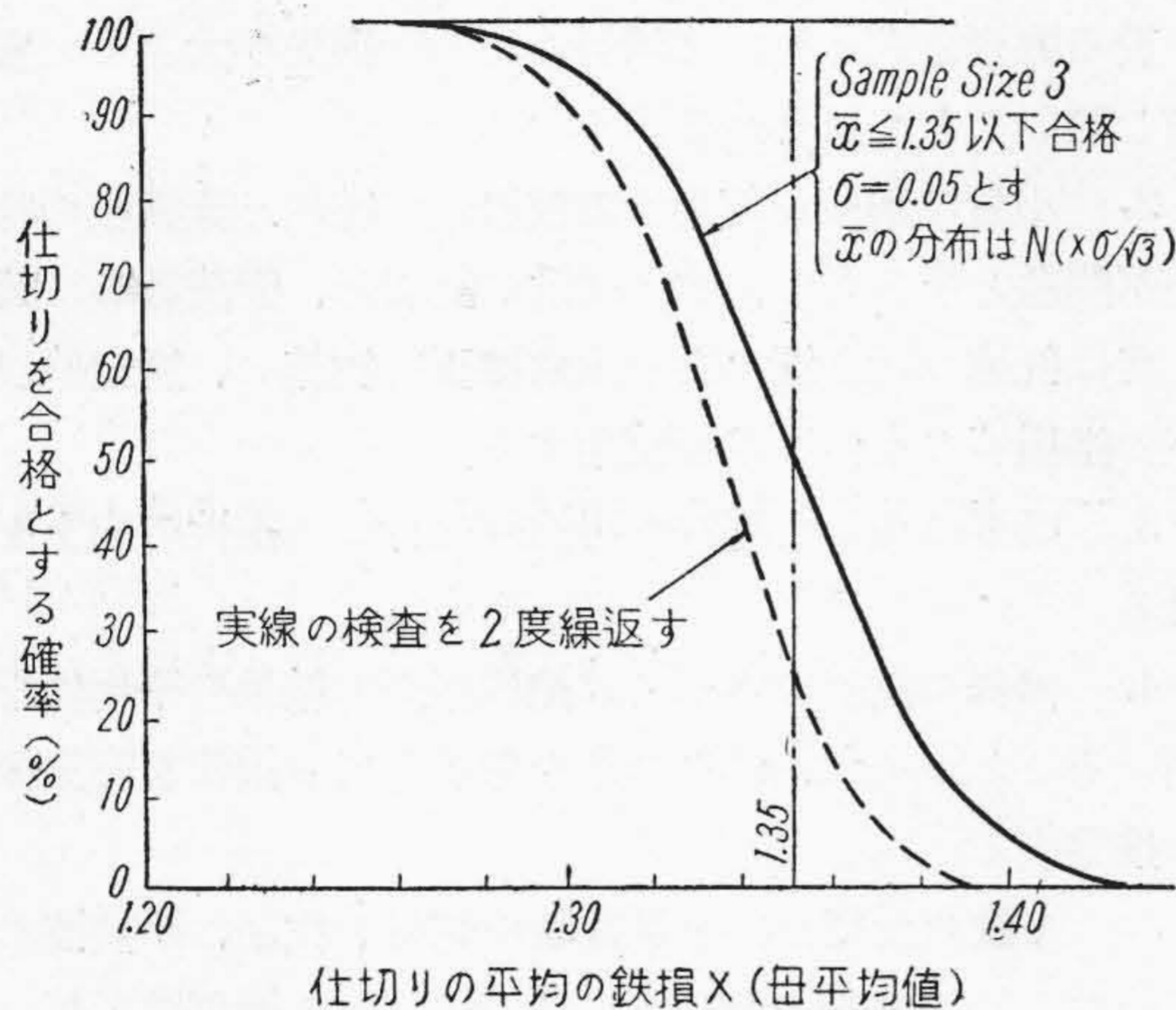
つぎに母平均  $X=1.30$  の仕切りをもつて來るとこの仕切りから抜取つた  $\bar{x}$  は 1.30 を中心とした正規分布  $N(1.30, 0.03)$  をする。このとき  $\bar{x}$  が 1.35 より大となる機會  $P$  は

$$\lambda = \frac{1.35 - 1.30}{0.03} = 1.67$$

を次式に代入して得られる。

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} y dx \quad \text{但し} \quad y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}$$

この  $P$  の値は  $\lambda$  の函数として表になつて與えられているから、それによると  $P=0.05$  となり、JES 規格で  $X=1.30$  の仕切りを合格とする確率は 95%，不合格とする機會が 5% あることがわかる。 $X$  を逐次變化させて行くとき、その仕切りを合格とする確率が如何に變化するかを圖示すると、第 5 圖實線のようになる。これは 3



第 5 圖 鐵損検査の OC 曲線  
Fig. 5 OC Curve of Iron-loss Test.

枚の鋼板の平均の鐵損  $\bar{x}$  が  $\leq 1.35$  のとき採擇、 $> 1.35$  のとき棄却という検査方法の精度を示す曲線で、Operation Characteristic Curve 通常 OC 曲線と呼ばれる。生産者から T-135 として供給される鋼板の  $X$  が一様な分布をしているならば、消費者の受入れる仕切群の母平均値の分布は OC 曲線と同様になる。又生産者で一度この特性の検査を行つて仕切りの級を定めて出荷し、消費者で再び同様な検査を行うとすれば、これを綜合した検査の OC 曲線は同圖に點線で示したようになる。

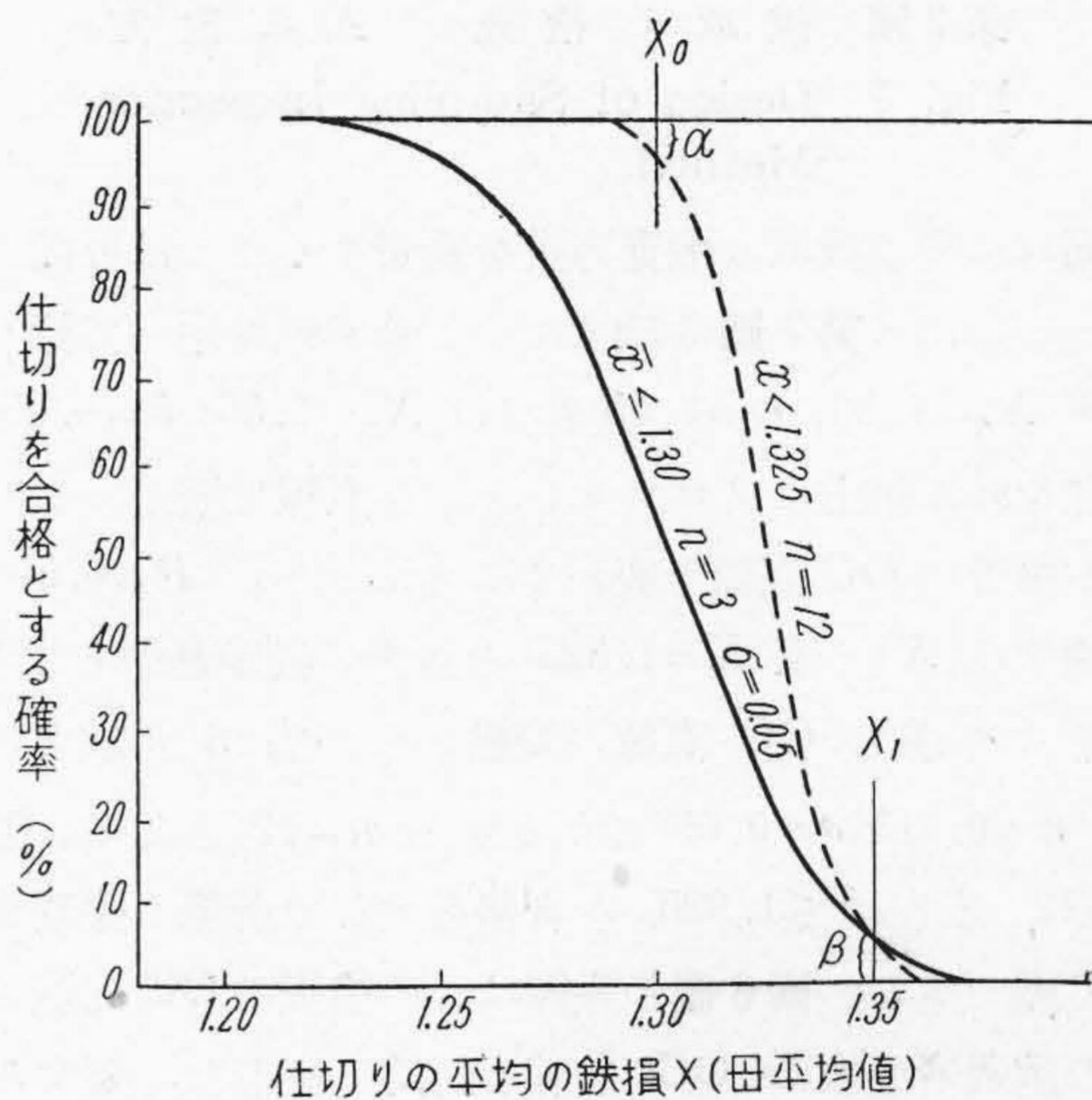
〔V〕 今後規格を如何に改むべきか

以上に於て現在市場にある鋼板の特性のばらつきを程度を明かにし、現行 JES 規格がこの特性のばらつきを考へるとき極めて不合理なものであることを示した。生産者に於て特性のばらつきを少なくするよう努力されることが最も望ましいが、これには相當な困難のあることが考へられるので、現在程度のばらつきが己むを得ないとした場合試験規格を如何に改むべきかを考へて見たい。但し試験法にまで遡つて論ずると問題が餘りに紛糾するので一應試験法は現行のエプスタイン法に依るものとする。

先ず仕切りの平均鐵損で抑えるか、それとも鋼板各個

の鐵損値を抑えるべきか、そのいずれにするかによつて規格は異なつたものとなるが、こゝでは仕切りの平均鐵損を抑える方法を採用することにする。大型の變壓器などのように多量の鋼板を使用するものにあつては、特性に現われて來る鐵損値は母平均値に近くなつていと思われるので平均値を抑えるだけで足りるであろう。小型の機器で鋼板を少量しか使用せぬものに對しては、さらに嚴格な検査が必要となることは言を俟たない。

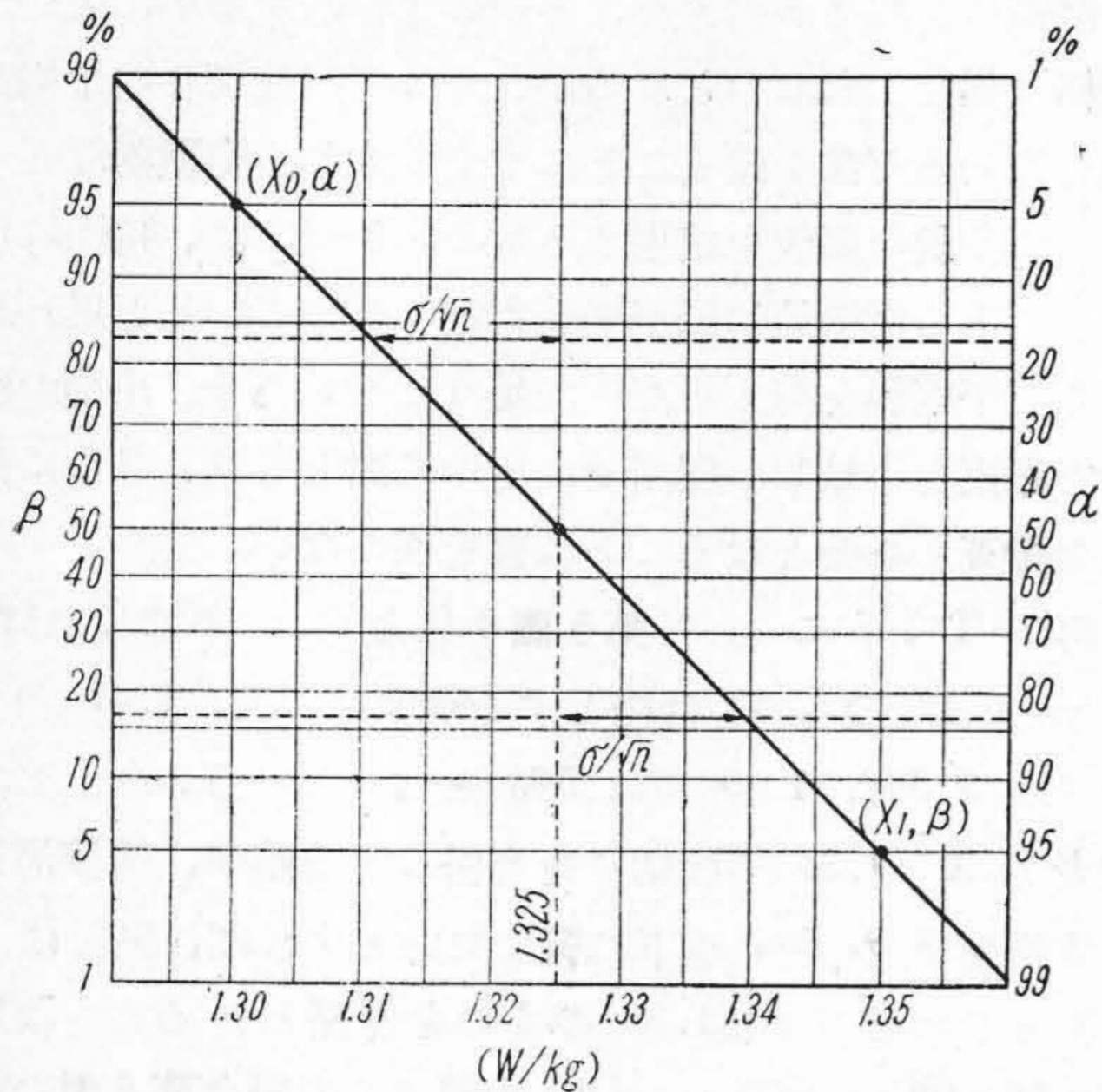
再び T-135 について第 5 圖を見よう。これによれば、 $X$  が 1.42 のものを合格とする確率は 1%，1.41 のものでは 2.5%，1.40 では 5% となつてい。今もし消費者が  $X > 1.35$  の仕切りを合格とする確率、所謂消費者危険率  $\beta$  を 5% 以下に抑えたいとすれば、例えば  $n=3$  としたまゝ  $\bar{x} \leq 1.30$  のものを合格とするような規格に切り變えればよい。OC 曲線はこの場合第 6 圖の實



第 6 圖 鐵損検査の OC 曲線  
Fig. 6 OC Curve of Iron-loss Test.

線のようになる。即ち一般に消費者は抜取り検査を行うとき、仕切りの平均鐵損が  $X_1$  以上のものは不合格としたい、その誤判の確率は  $\beta$  以下であつて欲しいという  $X_1, \beta$  を指定しなくてはならない。この要求に對しては生産者からおそらく苦情が出るであろう。なぜならば第 6 圖の實線の示す検査では當然使用可能な  $X=1.30$  の仕切りが 50% も不合格とされることとなるからである。これは第 3 者の觀點に立つても不當と考へざるを得ない。 $X=1.30$  の仕切りを不合格とする確率、所謂生産者危険率  $\alpha$  を 5% 以下に納めたいとの要求が當然出て來る。即ち生産者は仕切り平均値が  $X_0$  以下のものを不合格とする確率を  $\alpha$  以下にしたいという  $X_0, \alpha$  を要求すべきである。

$X_0 = X_1$ 、且つ  $\alpha = 1 - \beta$  のときはこれを満す抜取り検査方法はないが、それ以外のときは  $(X_0, \alpha), (X_1, \beta)$



第 7 圖 抜取り検査方式の設定  
Fig. 7 Design of Sampling Inspection Method.

を同時に満す抜取り検査方式を設定することは可能である。これには第 7 圖に示すような確率紙を用いて行う。先ず  $X_0=1.30$ ,  $\alpha=0.05$  および  $X_1=1.35$ ,  $\beta=0.05$  の 2 點を確率紙上にプロットしこれを直線で結ぶ。この直線が検査の OC 直線を表わすことになる。  $P=0.50$  に對應する  $X$  の値  $X=1.325$  を合否の判定基準とする。上下の  $\sigma$  線と OC 直線の交點から  $\sigma/\sqrt{n}$  が求まる。  
 $\sigma/\sqrt{n}=0.015$   $\sigma=0.05$  であるから  $n=12$  となる。即ち  $n=12$  とし  $\bar{x} \leq 1.325$  を合格とすれば所望の検査が出来る譯である。第 6 圖の點線はこの検査の OC 曲線で既述の消費者要求の OC 曲線と對比に便した。要するに  $\sigma$  が既知のときには消費者と生産者とが協調して  $X_0, X_1, \alpha, \beta$  を決めて検査方式を定めればよい。検査の精度を上げようとするれば  $n$  が必然に大きくなる。生産者の努力で  $\sigma$  が小となればこのような不利を伴わずに精度を上げることが出来る。なお生産者側と消費者側とで 2 回にわたつて検査することになれば精度は向上するが、これを規格にうたうことは適當でない。一回の検査で仕切りの取引がなされるのが原則である。

現行 JES 規格は大體アメリカの試験法 ASTM に倣つて制定されている。最近の文獻<sup>(1)</sup>によるとアメリカで製造されている珪素鋼板の磁性のばらつきは我國のそれと略々近似したものであり、この故に試験方法再検討の要が提唱され來つてゐる。

[VI] 規格が改訂される迄の暫定處置

JES 規格の改訂は早急に行われることが望ましいが實際問題としてこれには相當の期間を要することは明かであるから、それ迄の處置を如何にすべきかを暫定的にも考慮する必要がある。當所では暫定處置として次のことを實行している。

あるから、それ迄の處置を如何にすべきかを暫定的にも考慮する必要がある。當所では暫定處置として次のことを實行している。

1. 3'×6' の鋼板 3 枚を細斷してエプスタイン装置にかける代りに、12 枚の鋼板からその 1/4 ずつを細斷してエプスタイン装置にて鐵損を測定する。こうすれば標本數  $n=12$  となつて検査の精度を上げることが出来る。JIS 規格には 3 枚以上からとあるのでこれは JIS 規格をも満足する。但しこの標本數を増す方法は鋼板製造者に於る検査方式としては試料のための損失が大きくて實施し難いことゝ思われる。

2. 少量の鋼板を使用する機器にて特に珪素鋼板の特性が問題となるもの、例えば電位變成器、變流器等に對しては既述の新装置により全數検査を實施し、所定値以下の鐵損値のものゝみを使用する。

3. 必要に應じて特殊の再燒鈍を行つて磁性の向上を計る。

4. 機器の設計に當つては檢收検査の結果の平均値を用いることはせず、ばらつきを考慮して鐵損値を安全側に推定する。

5. 多數の仕切りから適當數の試料を抜き、新装置にて一枚づつの鐵損を測定し、 $X$  及び  $\sigma$  の管理圖を描いて規格改訂に必要な資料の整備を計る。

[VII] 結 言

3'×6' の珪素鋼板につき原型のまま一枚づつ鐵損を測定し得る新測定装置の概要を紹介した。この装置によつて T 級及び B 級の珪素鋼板の鐵損測定を行つた所、鐵損値のばらつきが相當に大きく、現行 JES 規格の試験方法には甚しい不安が抱かれた。生産者に於てこのばらつきを小にするよう努力されることが望ましいが、或程度のばらつきが己むを得ないとする時、鐵損の試験規格には統計的な考え方の導入特に OC 曲線に對する考察が必要である。この考えのもとに改訂の方向を示す一私案を提示した。最近この方面の學術の進展は眞に著しいものがあり、この他にもより勝れた検査方式の設定が可能と思われるので、大方の御検討を願つてやまぬ次第である。

なお本論は鐵損値に就てのみ論及したが磁化特性に就ても、ばらつきが認められているので、JES の改訂に當つては磁氣特性の全般につき考慮されることが望ましい。

參 考 文 獻

(1) Symposium on Magnetic Testing, 1948, ASTM Special Technical Publication 85.