621.833.1.01 : 53.088.2

2 歯面同時測定による歯車精度の測定法*

(第3報, 歯の抜取検査)

大 村 平**

A Measuring Method of a Gear Accuracy
by Means of Two Feelers

(Part 3, Extract Inspection of Gear Teeth)

by Hitoshi OHMURA

When the number of gear teeth becomes greater, the length of the entire error curve from the measuring method of gear accuracy by means of two feelers becomes longer, consequently the important merit of this method that the accuracy of the gear can be found by a glance tends to disappear, furthermore it may happen that the estimation of the gear accuracy is mistaken through the accumulation of superposing error.

Expression of the gear accuracy by error curves of some part of teeth is the suitable mode to grasp the accuracy of the gear and to save labor and time of the measurement. This expression by the extract inspection can be more accurate than the entire error curve, because superposing error is negligible.

1. 緒 論

第1報⁽¹⁾および第2報⁽²⁾で報告した2歯面同時測定による歯車精度の測定法(以下, 2歯面同時測定法⁽³⁾と呼ぶ)によって歯数が多い歯車の精度を測定する場合には, 全歯数についての精度測定を行なうより, 一部の歯についてのみ精度測定を実施して, その結果から歯車の精度を推定するほうが有利である場合が多い。その理由は次のとおりである。

(1) この測定法では個々の歯の誤差曲線を次々に重ね合わせて歯車全周の誤差曲線を作るので, 歯数の増大につれて重ね合せの作業で生ずる誤差が累積して歯車精度の評価を誤らしめる危険がある。測定子が球であるときには, 歯数が大きくなると一方の測定子が歯底に当ることによって他方の測定子の歯形測定範囲が制限されるために, 重ね合せの作業による誤差が大きくなりやすい⁽¹⁾⁽²⁾ので, この危険性はこの測定法の最も大きな欠点である。一部の歯についてのみ抜取検査を行なった結果から歯車精度を推定すれば, その推定には必ず誤差を含む可能性を伴うが, その誤差が確率的に, 重ね合せで生ずる誤差よりも小であるならば,

抜取検査のほうが精度のよい測定法であるということができる。

(2) 歯車全周についての誤差曲線の長さは, 歯数 z に比例して長くなるので, 歯数が多いと誤差曲線の長さが非常に長くなり, 一見して歯車のもつ誤差の種類と大きさを知ることができるといふ長所が失われて, 観察と解析に不便となる。第1図は, $z=127$, $D.P.=12$, $\alpha_0=14.5^\circ$ のホブ盤用換え歯車を実測した誤差曲線であり, 歯数が多い場合の一例である。個々の歯形をめいりょうに記録させるためには, 全長が2m程度の誤差曲線になり観察と解析に不便をきたしている。

(3) 歯車の精度測定と誤差曲線の作成に要する時間と労力は, ほぼ歯数に比例して増大する。この測定法は, 従来の個別誤差の規格に基いた検査よりは測定に要する時間が短くてすむことも特長の一つではあるが⁽¹⁾, しかしながら, 歯数が多い場合にはさらに測定に要する時間が短縮されることが望ましい。抜取検査によれば, 数学的な処理に多少の時間を要するが, 全数検査よりははるかに短時間で精度検査を完了しうる。測定装置の自動化によっても時間と労力の軽減は期待しうるが, 所要時間の6割程度は測定後の誤差曲線の作成であり, この作業を自動化することはかなりむずかしいことを思えば, 抜取検査は労力削減の有力

* 昭和37年11月15日 日立地方講演会において講演,
原稿受付 昭和38年7月1日。

** 正員, 防衛庁技術研究本部第3研究所(立川市曙町3の216)。

な手段であろう。

このような種々な理由で、2 歯面同時測定法で大歯数歯車の精度を測定する場合の抜取検査法を確立する必要があるので、その検討結果をここに報告する。

2. 抜取検査による誤差曲線表示法

2.1 誤差曲線の表示法 歯数 z の歯車の誤差曲線を n 枚の歯についての誤差曲線で表示するには、歯数を t 等分 (厳密に t 等分でなくてもさしつかえない) した各位置から、おのおの連続に s 枚 ($ts=n$) の歯について精度測定を行ない、おのおの s 個の誤差曲線のグループを正当な相対位置に配列して表示する。また歯車全周についての誤差曲線は、多くの場合歯車の偏心等のために歯車 1 周を周期として正弦的な変化をするから、誤差曲線を 1 本の正弦曲線で代表した場合の上限および下限を表わす直線を、2.2 で述べる手法によって記入する。さらに、 s 個の誤差曲線の各グループのこう配を代表する直線を記入しておくとも便利である。

第 2 図は、第 1 図に示した誤差曲線を抜取検査の誤差曲線で表示した一例であり、 $t=3$, $s=6$, $n=18$ の場合である。第 1 図と第 2 図を比較してわかるように、誤差曲線を同程度の大きさに整理すると、抜取検査による誤差曲線のほうが、誤差曲線の細部までめいりょうに表現され、また、抜取検査の誤差曲線によ

ても全体の正弦的変動の状態は十分に推察できるので、歯車精度の直観的なはあく誤差の解析の便利さからみて、抜取検査による表示法が全歯数の誤差曲線よりも必ずしも劣らないことがわかる。

2.2 誤差曲線の配列法 全歯数についての誤差曲線はほとんどの場合、歯車 1 周を周期とした正弦的变化を伴うので、誤差曲線が 1 本の正弦曲線で代表するものと仮定する。この仮定が成立しない場合については後に触れる。一般に、正弦変化をする関数

$$\delta = A \sin \theta \quad \cdots \cdots (1)$$

の各位置のこう配は

$$\frac{d\delta}{d\theta} = A \cos \theta \quad \cdots \cdots (2)$$

であり、 θ の 1 周期を任意に t 等分して、その各位置における $d\delta/d\theta$ の二乗平均の平方根をとると、 t が 3 以上の整数であれば、 t および等分を開始する位置 θ_0 に関係なく

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{t}} \left\{ \sum_{i=1}^t \left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_i^2 \right\}^{1/2} \\ &= \frac{A}{\sqrt{t}} \left\{ \sum_{i=1}^t \cos^2 \left(\theta_0 + 2\pi \frac{i}{t} \right) \right\}^{1/2} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad \cdots (3) \end{aligned}$$

がなりたつ。

この測定法では、抜取歯数 n が一定なら t を小さく s を大きくしたほうが測定の手数に対して資料の効率がよいし、また、誤差を含んだ $(d\delta/d\theta)_i$ から半振幅

$z=127$, $D.P.=12$, $\alpha_0=14.5^\circ$

第 1 図 全数検査の誤差曲線

$z=127$, $n=18$, $t=3$, $s=6$

第 2 図 抜取検査の誤差曲線

A を算出する精度は, t を小さく s を大きくするほうがよいことが証明できるから(3.1 節参照), (3) 式を利用するために $t \geq 3$ の制限のもとに t をなるべく小さくするほうがよい。したがって, 特別な目的がある場合を除いて $t=3$ とする。

この測定法で得られる誤差曲線の縦軸座標を δ , 横軸座標を θ にとれば, 以上のことから抜取検査の誤差曲線の描き方は次のように整理される。

(1) 歯車全周を3等分した各位置からおのおのの連続に s 枚の歯について精度測定を行なう。

(2) 3個の誤差曲線群のおのおのについて, そのこう配を代表する1本の直線を引き, $(d\delta/d\theta)_1$, $(d\delta/d\theta)_2$ および $(d\delta/d\theta)_3$ を求める。

$$(3) \quad A = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_i^2} \dots \dots \dots (4)$$

に $(d\delta/d\theta)_i$ の値を代入して A を求める。

$$(4) \quad \left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_i = A \cos \theta_i$$

を満足する θ_i から, $\delta_i = A \sin \theta_i$ を求める。符号の関係については後に述べる。

(5) δ_i の位置に誤差曲線群の中心(こう配を代表した線分の中心)があるように3個の誤差曲線群を配列する。このとき, θ 軸方向の配置としては3個の誤差曲線群を等間隔に並べる必要があり, 等間隔でありさえすれば観察に便利なように適宜に配列してさしつかえない。

(6) $\delta = \pm A$ の直線を記入する。

このようにして, 抜取検査による誤差曲線が描かれるが, この計算はきわめて簡単であり, 短時間で実施できる。

次に, 上記の手順のうち, (4) で $(d\delta/d\theta)_i$ から $0 \leq \theta < 2\pi$ の範囲で二つの θ の値が求まり, それに相応して δ_i の符号は正負のいずれをもとりうる。 θ と δ について, どちらの値を採るべきかは第1表によ

て判定される。これは, θ_i がそれぞれ $2\pi/3$ の間隔にあることから符号と絶対値の大きさを整理したものであり, $+++$ は符号が正であって絶対値が他の二つに比べて最も大きいことを表わし, $---$ は負であって絶対値が中位であることを表わす。 $(d\delta/d\theta)_i$ の符号と絶対値の大きさ, および (4) の手順で求めた δ_i の絶対値から, ほとんど間違いなく δ_i の符号を決定することができる。

2.3 実例 2.3.1 $z=127$, $n=18$, 抜取歯番号 1~6, 43~48, 85~90 第1図に示した $z=127$, D.P.=12, $\alpha_0=14.5^\circ$ の歯車を抜取検査の誤差曲線に表示した第2図の場合の計算は次のとおりである。 θ 軸方向の倍率 $v_{rg\theta}$ (基礎円半径を r_g とし, $r_g \cdot \theta$ に対する倍率) は 2.62 であったから, 1 rad に相当する誤差曲線の θ 軸方向の長さは法線ピッチを t_e とし

$$\frac{t_e z v_{rg\theta}}{2\pi} = 342 \text{ mm}^{(2)}$$

であり, また, δ 軸方向の倍率 v_δ は 1000 であった。抜取検査による誤差曲線から

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_1 &= 5.0 \mu/\text{rad}, & \left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_2 &= -14.3 \mu/\text{rad}, \\ \left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_3 &= 9.7 \mu/\text{rad} \end{aligned}$$

半振幅 A は (4) 式によって 14.7μ 。2.2 節 (4) の手順で δ_i を符号を考慮せずに求めると

$$|\delta_1|=13.8\mu, \quad |\delta_2|=3.5\mu, \quad |\delta_3|=11.1\mu$$

$(d\delta/d\theta)_1$, $(d\delta/d\theta)_2$, $(d\delta/d\theta)_3$ の符号と絶対値の関係は, $+$, $---$, $++$ だから第1表によって δ_1 , δ_2 , δ_3 の符号は $+$, $-$, $-$ を採るべきであり, したがって

$$\delta_1=13.8\mu, \quad \delta_2=-3.5\mu, \quad \delta_3=-11.1\mu$$

2.3.2 $z=127$, $n=18$, 抜取歯番号 20~25, 62~67, 104~109 同じ歯車から抜取歯番号を変えて抜取検査を行なった結果が第3図である。

第1表 δ の符号の判定表

θ_1	$0 \sim \frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \sim \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} \sim \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} \sim \frac{5\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{6} \sim \pi$	$\pi \sim \frac{7\pi}{6}$	$\frac{7\pi}{6} \sim \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} \sim \frac{3\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{2} \sim \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} \sim \frac{11\pi}{6}$	$\frac{11\pi}{6} \sim 2\pi$
$\left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_1$	+++	++	+	-	--	---	---	--	-	+	++	+++
$\left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_2$	--	---	---	--	-	+	++	+++	+++	++	+	-
$\left(\frac{d\delta}{d\theta} \right)_3$	-	+	++	+++	+++	++	+	-	---	---	---	--
δ_1	+	++	+++	+++	++	+	-	--	---	---	--	-
δ_2	++	+	-	---	---	---	---	-	+	++	+++	+++
δ_3	---	---	--	-	+	++	+++	+++	++	+	-	--

$$\left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_1 = -8.6 \mu/\text{rad}, \quad \left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_2 = -5.9 \mu/\text{rad},$$

$$\left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_3 = 14.0 \mu/\text{rad}$$

であり、この符号の関係は、――，―，++++なので、 $A=14.4\mu$ ， $\delta_1=11.5\mu$ ， $\delta_2=-13.1\mu$ ， $\delta_3=3.4\mu$ である。

2・3・3 $z=127$ ， $n=12$ ，抜取歯番号 10～13，52～55，94～97 同じ歯車からわずか 12 枚の歯について測定を行なった結果を第 4 図に示す。測定機による測定回数は 9 回，重ね合せの作業は 6 回であって，全数検査に要した 5 時間の約 1.5 割の時間で完了した。

$$\left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_1 = -1.5 \mu/\text{rad}, \quad \left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_2 = -12.2 \mu/\text{rad},$$

$$\left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_3 = 12.9 \mu/\text{rad}$$

であり、符号の関係は―，――，+++であるから、 $A=14.6\mu$ ， $\delta_1=14.5\mu$ ， $\delta_2=-8.0\mu$ ， $\delta_3=-2.7\mu$ である。ここで、 $(d\delta/d\theta)_i$ の符号の関係は、+，――，++の読誤りではないかという疑問が生ずる。しかし $|\delta|$ を算出すると $|\delta_1| > |\delta_2| > |\delta_3|$ がめいりょうなので第 1 表から δ_i の符号は+，―，―と判定される。以上の三つの例で求めた A の値はほとんど一致しており、この計算法の信頼性を示している。

2・3・4 $z=36$ ， $n=12$ ，抜取歯番号 1～4，13～16，25～28 第 5 図は、 $z=36$ ， $m=4$ ， $\alpha_0=20^\circ$ の歯車

の全歯数の誤差曲線であり、歯形や歯のあたりの状態をめいりょうに記録させるために、横方向の長さが 700 mm 程度になった。この程度の長さが 1 列の誤差曲線のまま観察し解析するのに便利な限界であるように思える。第 6 図がこの歯車の 12 枚の歯について行なった抜取検査の結果である。 $t_e=11.81$ mm， $v_s=1500$ ， $v_{rg-\theta}=1.72$ ，1 rad に相当する長さ=122 mm。

$$\left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_1 = 3.7 \mu/\text{rad}, \quad \left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_2 = -6.6 \mu/\text{rad}$$

$$\left(\frac{d\delta}{d\theta}\right)_3 = 2.5 \mu/\text{rad}$$

であり、 $A=6.5\mu$ ， $\delta_1=5.4\mu$ ， $\delta_2=0$ ， $\delta_3=-6.0\mu$ であった。この例で、 $\cos\theta_2=-1.01$ であり、1 よりやや大きくなっている。測定誤差等のためにこのようなことがありうるが、 $\theta_2=\pi$ として十分である。

2・4 振幅の最大位置の推定 歯車の偏心の方向を知りたい等の理由で、正弦変化の振幅の最大の位置を抜取検査の誤差曲線から求める必要があれば、次のように容易に求めることができる。2・2 節で述べたように、 $(d\delta/d\theta)_i$ と δ_i は符号を含めて計算できるから θ_i は一義的に求められ、また、歯数と抜取歯番号の関係で θ_i 相互間の正しい間隔 θ_{02-01} ， θ_{03-02} および θ_{01-03} が知られる。 z が 3 の倍数ならば、これらはそれぞれ $2\pi/3$ になるよう抜取歯番号を選ぶことができる。2・2 節の手順で求めた θ_1 ， θ_2 および θ_3 から算

$z=127$ ， $n=18$

第 3 図 抜取検査の誤差曲線

$z=127$ ， $n=12$

第 4 図 抜取検査の誤差曲線

$z=36$ ， $m=4$ ， $\alpha_0=20^\circ$

第 5 図 全数検査の誤差曲線

$z=36$ ， $n=12$

第 6 図 抜取検査の誤差曲線

術平均の考え方で算出される θ_1 の妥当な値 $\bar{\theta}_1$ は

$$\bar{\theta}_1 = \frac{1}{3} \{ \theta_1 + (\theta_2 - \theta_{\theta_2 - \theta_1}) + (\theta_3 - \theta_{\theta_3 - \theta_2} - \theta_{\theta_2 - \theta_1}) \} \quad \dots\dots\dots(5)$$

である。振幅は $\theta = \pi/2$ で最大となるから、 $\bar{\theta}_1$ の位置から $\pi/2 - \bar{\theta}_1$ の位置が振幅の最大位置と考えることができる。

2.5 誤差曲線が単純な正弦変化をしない場合 全歯数についての誤差曲線が歯車1周を周期とする正弦変化を伴うとして検討を進めて来たが、歯切盤の性質等によってはこれと周期を異にする変化が含まれていて、それを無視できないこともありうる。これは、第1表の符号と絶対値の関係が成り立たなかったり、 $\cos \theta_i$ が1よりもはなはだしく大きくなったりすることによって発見される。この場合には抜取検査を断念するか、あるいは、 t を大きくして他の周期の変化を見出さねばならない。しかし、従来の多くの歯車精度実測資料〔たとえば、文献(5)参照〕からみて他の周期の変化の振幅が歯車1周を周期とする正弦変化の振幅に比して同等以上になることはまれである。

3. 抜取検査の精度

3.1 計算して求めた A の精度 $(d\delta/d\theta)_i$ の読みとりには誤差を含むから、(3)式によって計算された A には誤差が含まれている。 $(d\delta/d\theta)_i$ の正しい値を y_i とし、 y_i から(3)式で計算された正しい A を A_0 と書く

$$A_0 = \sqrt{\frac{2}{t} \sum_{i=1}^t y_i^2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

誤差を含んだ $(d\delta/d\theta)_i$ を x_i と書き

$$x_i = y_i + \varepsilon_i \quad \dots\dots\dots(7)$$

とおく。 ε_i は零を平均値として正規分布の法則にした

がい、その標準偏差を σ_ε とおく。 x_i によって計算される誤差を含んだ A は

$$A = \sqrt{\frac{2}{t} \sum_{i=1}^t x_i^2} = \sqrt{\frac{2}{t} \sum_{i=1}^t (y_i + \varepsilon_i)^2} \\ = \sqrt{\frac{2}{t} \sum_{i=1}^t y_i^2 + \frac{4}{t} \sum_{i=1}^t y_i \varepsilon_i + \frac{2}{t} \sum_{i=1}^t \varepsilon_i^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

σ_ε は連続した s 枚の歯の誤差曲線からそのこう配を読みとったときの読みとり誤差の標準偏差であり、経験的に求められる。第7図は、延べ26人、計182個の資料から σ_{s0} の大きさを調べたものである。 σ_{s0} は、実際の記録紙上でのこう配の分布であり、

$$\sigma_{s0} = \frac{v_\delta}{r_g \cdot v_{rg \cdot \theta}} \sigma_\varepsilon \quad \dots\dots\dots(9)$$

である。1枚の歯の誤差曲線からこう配を読みとったときの標準偏差を σ_1 とすると、正規分布の加法性から予想されるように

$$\sigma_s = \frac{\sigma_1}{\sqrt{s}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

が成立し、また、 σ_s は誤差曲線の幅にほぼ比例することがわかった。(6)式、(10)式および $st = n$ の関係から(8)式右辺の平方根記号中の各項は、

- (1) $\frac{2}{t} \sum_{i=1}^t y_i^2$ は A_0^2
- (2) $\frac{4}{t} \sum_{i=1}^t y_i \varepsilon_i$ は正規分布 $N\left(0, 8 \frac{\sigma_1^2}{n} A_0^2\right)$
- (3) $\frac{2}{t} \sum_{i=1}^t \varepsilon_i^2$ は自由度 t の χ^2 分布にしたがい、

平均値は $2\sigma_1^2 \frac{t}{n}$ 、分散は $4\sigma_1^2 \frac{t}{n}$ である。

したがって、 n が一定なら第1項と第2項には関係なく第3項の分散が t に比例するから、2.2節で述べたように、 t が小さく s が大きいほうが A の精度はよい。

第7図 幅 $\sim s \sim \sigma_{s0}$ の関係

第8図 K の値、 σ_{s0} ($s \rightarrow 1$) = 0.01

A の分布はこのように複雑であるが, $v_s, v_{rg, \theta}$ および σ_{s0} が常識的な範囲にあれば, 第 3 項は第 1 項および第 2 項に比べて非常に小さいので無視することができ, 誤差の分布は第 2 項に支配される. さらに, 第 2 項の標準偏差は A_0 に比べて小さいので誤差量 $A - A_0$ は正規分布すると考えることができ, 誤差量の絶対値は次の形に書くことができる.

$$|\text{誤差量}(\mu)| = K \frac{v_{rg, \theta}}{v_s} \frac{1}{\sqrt{n}} r_g \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで, K は $\sigma_{s0}(s \rightarrow 1)$ と誤差量とその値以下である確率 P とによって定まる定数で $\sigma_{s0}(s \rightarrow 1)$ に比例する. $\sigma_{s0}(s \rightarrow 1) = 0.01$ として正規分布の数表から計算した K の値を第 8 図に示す. たとえば, $v_{rg, \theta} = 1000$, $v_s = 2$, $n = 15$, $r_g = 100 \text{ mm}$ の場合, 誤差は 50% の確率で 0.46μ 以下, 95% の確率で 1.29μ 以下であり, 通常の場合十分な精度である.

3.2 歯車精度評価の精度 従来の歯車精度表示の方法では, 歯車の等級を判定するのに誤差の最大値のみを問題にしており, 最大値以外の誤差の大きさや分布の状態には全く考慮が払われておらず, この精度表示の方法は簡便ではあるが必ずしも合理的であるとはいえないことが従来指摘されている⁽⁴⁾. そこで, ここでは誤差の最大値についてのみではなく誤差の分布の状態に考慮を払って歯車精度を直感的にあるいは解析的にはあくする場合, 抜取検査の精度がどれだけであるかを検討する.

一般に, z 個の有限母集団から n 個の標本をとり出

第 9 図 $\frac{n}{z} \sim \frac{\sigma_x}{S} \sim \frac{\sqrt{E(S^2)}}{S}$

したとき, 母集団の分散を S^2 , n 個の標本の平均を $\bar{x}$ とすると, 標本平均の平均値は母集団平均に等しく, 標本平均の分散 $\sigma_{\bar{x}}^2$ は

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{z-n}{n(z-1)} S^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

であり, 標本分散の平均値 $E(S^2)$ は

$$E(S^2) = \frac{z}{z-1} \frac{n-1}{n} S^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

である⁽⁶⁾. この関係を図示したものが第 9 図である. 定量的にはあくしやすように標準偏差の比の形にしてある. z 個の誤差量をもつ歯車を n 個の誤差量で表示したときの精度はちょうどこの場合に相当する. すなわち, 歯車の全歯数について存在するある種の z 個の誤差の分布の標準偏差は S に相当し, その中の n 個の値から推定されるその誤差の平均値は $\sigma_{\bar{x}}$ の標準偏差でばらついている. いいかえれば (非常に厳密さを欠く表現ではあるが) 抜取検査によって推定されたある種の誤差の平均値は $\sigma_{\bar{x}}/S$ の誤差を伴う. 同様に抜取検査によってある種の誤差の標準偏差を推定すると $1 - \sqrt{E(S^2)}/S$ の誤差を伴う.

次に, 抜取検査の精度が一定である z と n の関係が第 9 図から容易に求められるので, その関係を図示したのが第 10 図である. 歯数が多い歯車ほど, 抜取歯数の割合 n/z が小さくとも良好な精度が得られることがわかる.

3.3 抜取検査のほうが精度のよい歯数 2 歯面同時測定法では, 歯数の増大につれて重ね合せの誤差が累積される危険があり, その危険性が確率的に抜取検査による誤差の危険性を上回り, 抜取検査のほうが精度がよくなる歯数が存在しうる. この歯数は, 歯車精度を観察する重点をどこに置くかによって異なる. 歯車精度観察の重点が重ね合せの作業で生ずる誤差には

第 10 図 精度の等しい抜取歯数

ほとんど影響されない種類の誤差(たとえば歯の当り誤差)におかれているならば、抜取検査の精度が全数検査よりよくなることはあり得ず、抜取検査の精度は3・2節で述べたとおりである。そこで、重ね合せの誤差の影響を受ける二つの代表的な誤差量について全数検査と抜取検査の精度を比較する。

(1) 正弦部分の振幅の誤差 誤差曲線を重ね合わせるときの誤差は、 δ 軸方向のずれ、 $r_g \cdot \theta$ 方向のずれ、およびこう配としてのずれの各方向に発生するが、 $r_g \cdot \theta$ 軸方向のずれは実際上問題とする必要はない。 δ 軸方向のずれ、および $d\delta/d\theta$ 方向のずれがそれぞれ正規分布 $N(\varepsilon_1, \sigma_{s1}^2)$ および $N(\varepsilon_2, \sigma_{s2}^2)$ にしたがって発生するとする。正弦曲線の最大値と最小値がそれぞれ $z/4$ および $3z/4$ の箇所にあると考えると、最大値と最小値の差の誤差は

$$N\left(\frac{z}{2}\varepsilon_1 + \pi\varepsilon_2, \frac{z^2}{4}\sigma_{s1}^2 + \frac{4\pi^2}{z}\sigma_{s2}^2\right) \dots\dots\dots (14)$$

の正規分布にしたがう。実際の記録紙上での誤差を、 δ 軸方向で $N(\varepsilon_{10}, \sigma_{s10}^2)$ 、こう配で $N(\varepsilon_{20}, \sigma_{s20}^2)$ とすると

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{10} &= v_\delta \varepsilon_1, & \sigma_{s10} &= v_\delta \sigma_{s1} \\ \varepsilon_{20} &= \frac{v_\delta}{r_g v_{r_g \cdot \theta}} \varepsilon_2, & \sigma_{s20} &= \frac{v_\delta}{r_g v_{r_g \cdot \theta}} \sigma_{s2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

だから (14) 式は次のように書ける。

$$N\left(\frac{z}{2v_\delta}\varepsilon_{10} + \frac{\pi r_g v_{r_g \cdot \theta}}{v_\delta}\varepsilon_{20}, \frac{z^2}{v_\delta^2}\sigma_{s10}^2 + \frac{4\pi^2}{z}\frac{r_g^2 v_{r_g \cdot \theta}^2}{v_\delta^2}\sigma_{s20}^2\right) \dots\dots\dots (16)$$

簡単のために、これを $N(K_1, K_2^2)$ と書くと、誤差量と誤差がその値以下である確率 P との関係が、正規分布の数表によって第 11 図のように求められる。 ε_{10} 等は測定装置の精度に影響されるが、筆者らの測定の

第 11 図 全数検査の振幅誤差

場合には、 $\varepsilon_{10}=0.1$ mm, $\varepsilon_{20}=0.002$, $\sigma_{s10}=0.2$ mm, $\sigma_{s20}=0.004$ 程度にすることが可能であったので、 $m=4$, $v_\delta=1000$, $v_{r_g \cdot \theta}=2$ の場合について誤差量を計算し、(11) 式と第 8 図から $\sigma_{s0}(s \rightarrow 1)=0.02$ として計算した抜取検査による振幅推定の誤差と比較して、全数検査と精度の等しい抜取関数を図示したのが第 12 図である。このように、全数検査と抜取検査の誤差分布の形状の差異の当然の結果として、誤差がある値以下である確率 P に対する要求によって、抜取検査のほう精度のよくなる関数は異なる。また、 n/z が 1 に近くなると $n/3-2$ 回の重ね合せの誤差が無視できない等の理由で、この理論は成立しない。

(2) こう配の誤差 i 回の重ね合せによって生ずる誤差は $N(i\varepsilon_2, i\sigma_{s2}^2)$ の分布法則にしたがうから、全関数についてのこう配の誤差の分布は

$$g_1(x) = \frac{1}{z-2} \sum_{i=1}^{z-2} \frac{1}{\sqrt{2\pi i} \sigma_{s2}} e^{-(i\varepsilon_2 - x)^2 / (2i\sigma_{s2}^2)} \dots\dots\dots (17)$$

にしたがい、誤差 x が x_0 以下である確率は

$$P(x_0, z) = \int_{-\infty}^{x_0} g_1(x) dx \dots\dots\dots (18)$$

である。これを (1) の場合と同じ例について数値計算して第 13 図に示してある。

いっぽう、抜取検査で得た A の値から $d\delta/d\theta$ を推定したときの θ の全域にわたっての誤差の分布は、 A の誤差の標準偏差を σ とすれば

$$g_2(x) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\sqrt{2\pi} \sigma \cos \theta} e^{-x^2 / (2\sigma^2 \cos^2 \theta)} d\theta \dots\dots\dots (19)$$

にしたがい、誤差 $|x|$ が x_0 以下である確率は

$$P(x_0, z) = 2 \int_0^{x_0} g_2(x) dx \dots\dots\dots (20)$$

である。これを同じ例について $n=9$ として数値計算

第 12 図 振幅の推定に関して全数検査と精度の等しい抜取関数

したものが第 13 図に示されている。第 13 図によって、歯車精度評価の重点が誤差曲線のこう配におかれるならば、抜取検査のほうが精度がよいことがわかる。実際には、誤差曲線を重ね合わせるときに、個々の歯の誤差曲線のこう配によってこう配が累積しないよう調節することが可能なので、全数検査のときのこう配の誤差は第 13 図に示すほど大きくなることはないが、歯数の大きい歯車では抜取検査のほうが精度のよいことは明らかである。

4. 結 論

歯数の大きい歯車を 2 歯面同時測定法で精度測定するときの歯の抜取検査について次の結論が得られた。

(1) 大歯数の歯車では全歯数についての誤差曲線で精度を表示するよりも、抜取検査の誤差曲線で表示したほうが、多くの場合、精度の観察と解析に便利であり、精度検査の労力も削減できる。

(2) 抜取検査は全歯数をほぼ 3 等分した位置から連続に数枚の歯について実施するのが精度が最もよく労力が最も少ない。

(3) 抜取検査の精度は抜取歯数の平方根に比例する。

(4) 歯数 z が大きいほど抜取歯数の割合 n/z が小さくても良好な精度が得られる。したがって、あらゆる意味で歯数が大きいほど抜取検査に適する。

(5) 全数検査と抜取検査を比較すると、(a) 誤差量観察の重点が局部的であるときは全数検査のほうが精度がよい。(b) 歯車全周についての誤差曲線の正弦的変動の振幅に観察の重点がおかれるときは、抜取検査のほうが精度のよい歯数が存在する。(c) 誤差曲線のこう配に観察の重点がおかれるときは、抜取検査のほうが精度がよい。したがって、こう配の影響を受け

第 13 図 こう配の誤差

る誤差量 (たとえば、単一ピッチ誤差) を解析する場合には抜取検査のほうが精度のよいことがありうる。

(d) 測定装置の精度がよいほど全数検査が、悪いほど抜取検査が有利になる。

(6) 全数検査によるか抜取検査によるかは、また、抜取歯数をいくらにするかは、検査の目的によって決定されなければならない。

この研究に際して、種々のご指導とご便宜を賜った東京工業大学精密工学研究所 石川二郎教授に厚くお礼申上げる。

文 献

- (1) 石川・大村, 機械学会論文集, 28-196 (昭 37-12), 1 655.
- (2) 大村, 機械学会論文集, 28-196 (昭 37-12), 1 663.
- (3) 石川・ほか 3 名, 機械学会誌, 66-533 (昭 38-6), 853.
- (4) 仙波, 歯車, 第 2 巻 (昭 29-1), 340, 日刊工業新聞社.
- (5) 中田・ほか 5 名, 機械学会誌, 65-526 (昭 37-11), 1 532.
- (6) 成実・坂井, 数理統計学要説 (昭 27-4), 118, 培風館.

世界最初の商業用メタンタンカー

イギリスでは、去る 6 月液化メタン輸送用のタンカーが進水した。Vickers 社の Barrow 造船所で建造され、メタンプリンセス号という。商業的なものとしては世界最初であり、積載能力 12 200 t である。

1964 年早々にアルゼリア海岸のアルゾーからチームズ河口のキャンベイ島まで、液化メタンを輸送する予定である。同島に液化メタンを貯蔵し、再気化して 325 mile の新パイプラインで各地方ガス局に配給される予定という。

このメタンの輸入は Gas Council of G. B. が行ない、石炭ガス増熱用とし、あるいは改質して都市ガスに供給される。コストはパイプライン渡しで、推定 7.5 ペンスで、石炭ガスを大幅に下回る。

メタンプリンセス号とその姉妹船で、年間 29 回往復し、合計 70 万 t の液化天然ガスを輸送する見込みで、これはイギリスの年間ガス消費量の約 10% 強に相当する。[Petrol Press Serv., 30-7 (1963), 267]

(日本科学技術情報センター提供)