

## 自動化のための画像処理の研究 —小型精密部品の非接触検査—

南 幅 留 男\*、藤 澤 充\*  
岩手県工業試験場 機械金属部

### Image Processing for Automatic Process Controls

MINAMIHABA Tomeo, FUJISAWA Mitsuru

高精度計測法として用いられるサブピクセル化法（差分法、重心法、正規分布法）について、精度の限界の確認及び高精度計測への応用を目的に、エッジ形状及びノイズと精度の関係、補正方法、方式誤差等の検討をした。

この結果、精度はランダム誤差、方式誤差及びエッジ形状で決まること、正規分布法は方式誤差が最も小さく、差分法はランダム誤差が最小で、且つ方式誤差を補正することにより精度を3倍向上できることが判った。

キーワード：画像計測 サブピクセル化 エッジ

#### 1 まえがき

部品の小型化精密化により、画像計測にも高精度化が要求されている。特に、時計や情報機器用部品では、数mmサイズのものを精度1～2 $\mu$ mで測定する必要があるため、通常用いる512×512画素のカメラで画素（ピクセル）単位の計測を行う方法では精度を達成できない。このため、エッジ位置の計測法として、エッジの濃度分布を用いてサブピクセル単位で求める方法が提案され、 $\mu$ mオーダーの精度を達成している<sup>(4)</sup>。

我々は、平成2年度に、濃度の微分値を用いた新たなサブピクセル化手法（以後、差分法と呼ぶ）を考案<sup>(1)</sup>し、位置決め精度 $\pm 4\mu$ mを達成してボンディング作業を自動化した。また、平成4年度に、濃度の微分値を正規分布に回帰させるサブピクセル化<sup>(2)</sup>の方法を用いて、計測精度 $\pm 1\sim 2\mu$ mの検査装置<sup>(1)</sup>を実施化した。

本研究では、我々が実施化に用いた『差分法』及び『正規分布法』と、現在、実施化に最も多く用いられている方法で、濃度の微分値の重心をエッジ位置とする『重心法』<sup>(2)~(4)</sup>の3方法について、より高精度な計測への応用を目的に、サブピクセル化の精度とノイズ及びエッジ形状の関係、方式誤差とその補正方法について、解析、シミュレーション及び実験により比較検討をした。

この結果、3方法とも、計測誤差はランダムノイズに比例して大きくなり、差分法と重心法はエッジ形状が緩やかになると誤差が増大し、正規分布法は、誤差が最小になるエッジ形状があることが判った。また、方式誤差

は正規分布法が最も少なく、差分法と重心法は同程度であった。更に、差分法と重心法については、ガウスフィルターを用いた補正方法を明らかにし、補正後の誤差を従来法より3～4倍改善（0.05～0.07画素に）できた。以下に結果の概要を示す。

#### 2 サブピクセル化の方法

画像計測の高精度化のために、サブピクセル化の方法が用いられるが、この一般的な方法<sup>(2)~(4)</sup>は、図2-1のように、測定ラインの濃度の微分値（ $D_k$ ）をN点を用いて、その重心位置（ $X_n$ ）を求める方法、正規分布に回帰させそのピーク位置（ $X_n$ ）を用いる方法、等がある。本研究は、差分法（5点）、重心法（5点）及び正規分布法（3点及び5点）について比較検討を行った。

これら3方法の共通点は、サブピクセル化の前に、図2-1のように、計測ライン上の濃度の微分値が最大（この値を $D_0$ とする）になる座標 $X_0$ を仮のエッジとしてピクセル単位で求めることである。

仮のエッジ $X_0$ からサブピクセル単位のエッジを求めるサブピクセル化の計算は、X座標の $X_0$ を中心にした前後N画素（ $N=2n+1$ ： $X_k=X_{-n}\sim X_{+n}$ ）における濃度の微分値（ $D_{-n}\sim D_{+n}$ ）を用いて、差分法は（2-1）式、重心法は（2-2）式、正規分布法は、（2-3）式を用いて行い、サブピクセル化エッジをそれぞれ、 $X_d$ 、 $X_w$ 、 $X_g$ とした。

尚、式2-2～2-3は文献<sup>(2)</sup>を参考にした。

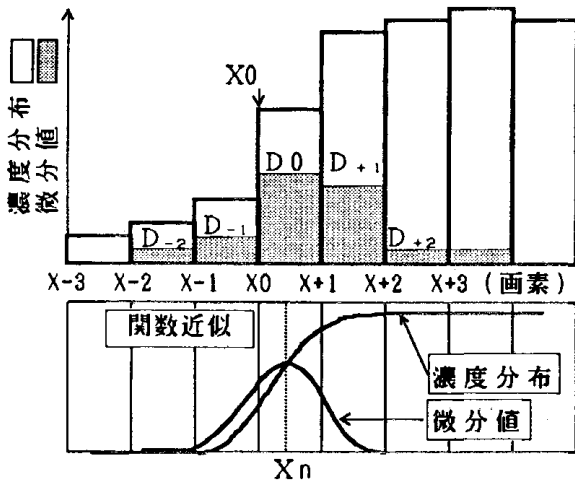


図2-1 エッジの濃度分布と微分値

$$X_d = X_0 + \frac{(D_{+2} + D_{+1}) - (D_{-1} + D_{-2})}{2 \times D_0} \quad (2-1)$$

$$X_w = \frac{\sum_{k=-n}^{k=n} (X_k \times D_k)}{\sum_{k=-n}^{k=n} D_k} \quad (2-2)$$

$$X_g = \frac{S_{xy} \cdot S_{x^2x^2} - S_{x^2y} \cdot S_{xx^2}}{2 \{ S_{xx} \cdot S_{x^2y} - S_{xx^2} \cdot S_{xy} \}} \quad (2-3)$$

但し(2-3)式において

$$S_{xx} = \sum X_k^2 - (\sum X_k)^2 / N$$

$$S_{xx^2} = \sum X_k^3 - \sum X_k \sum X_k^2 / N$$

$$S_{x^2y} = \sum X_k^2 \log D_k - \sum X_k^2 (\sum \log D_k) / N$$

$$S_{x^2x^2} = \sum X_k^4 - (\sum X_k^2)^2 / N$$

$$S_{xy} = \sum X_k \log D_k - \sum X_k (\sum \log D_k) / N$$

$$\sum_{k=-n}^{k=n} = \sum_{k=-n}^{k=n}$$

### 3 サブピクセル化の誤差解析

#### 3-1 ランダム誤差の解析

濃度は照明雑音や環境振動、量子化誤差等でランダムに変動し、これがエッジ位置に伝播して計測誤差を生じる。このため3方法について、濃度が標準偏差 $\sigma_n$ で変動した場合のエッジ位置の標準偏差(変動の幅)をランダム誤差として、誤差の伝播法則<sup>(5)</sup>を用いて解析した。

解析のために、まず、エッジ形状を表す『エッジパラメータ： $\sigma_e$ 』、エッジの濃度差を表す『エッジステップ： $H$ 』及びノイズの大きさで、 $H$ に対する割合(%)を表す『ノイズレベル： $nL$ 』の3個のパラメータを導入した。

次に、エッジの濃度分布が正規分布の積分値に似ていることを利用して、これを $F(X)$ として(3-1)

式で表し、この微分値 $D(X)$ を(3-2)式で表した。

エッジ形状と $\sigma_e$ の関係は、図3-1の通りである。

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{H}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_e^2}} dx \quad (3-1)$$

$$D(X) = \frac{H}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_e^2}} \quad (3-2)$$

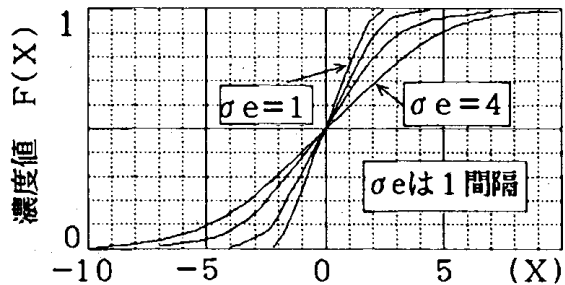


図3-1 エッジ形状とエッジパラメータ $\sigma_e$ の関係

この条件において、差分法のランダム誤差 $\sigma_d$ を以下のように解析的に求めた。

まず、(2-1)式を、微分値(変数： $D$ )で微分後整理して(3-3)式を得、次に、 $D$ は濃度の微分値 $(D_k - D_{k-1})$ であること及び $\sum (D_j - D_{-j})$ に統計確率的(中心極限定理)<sup>(6)</sup>考えを導入すると(3-4)式が得られる。従って、差分法のランダム誤差 $\sigma_d$ は、(3-4)式に誤差伝播法則を適用し(3-2)式の $\sigma_e$ 及び $H$ で表すと、(3-5)式として導出される。

$$\frac{\partial X_d}{\partial D} = \frac{\sum_{j=1}^2 (D_j - D_{-j})}{2 \times D_0} - X_d \frac{D_0'}{D_0} \quad (3-3)$$

$$\frac{\partial X_d}{\partial D} = \frac{\sqrt{2}}{D_0} (1 - X_d) \quad (3-4)$$

$$\sigma_d = \frac{2\sqrt{\pi} \sigma_e}{H} \sqrt{(1 - X_d)^2} \sigma_n \quad (3-5)$$

重心法のランダム誤差を $\sigma_w$ とし、文献<sup>(2)</sup>を参考に(3-2)式の $\sigma_e$ 、 $H$ を用いて近似的に表すと、(3-6)式が得られる。正規分布法によるランダム誤差 $\sigma_g$ は、文献<sup>(2)</sup>から(3-7)式となる。

$$\sigma_w = \frac{\sqrt{2} \sigma_e \sqrt{\sum (X - X_w)^2}}{H} \sigma_n \quad (3-6)$$

$$\sigma_g = \frac{\sqrt{\sum \frac{0.5(A_1 + A_2 X_k + A_3 X_k^2) + (B_1 + B_2 X_k + B_3 X_k^2) X_g}{\exp[-(X - X_g)^2 / (2\sigma_e^2)]}}}{- \{ B_1 \sum \ln D_k + B_2 \sum X_k \ln D_k + B_3 \sum X_k^2 \ln D_k \}}$$

$$\times \frac{2\sqrt{\pi} \sigma_e}{H} \sigma_n \quad (3-7)$$

但し、

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \sum X_k^2 \sum X_k^3 - \sum X_k \sum X_k^4 & B_1 &= \sum X_k \sum X_k^3 - \sum (X_k^2)^2 \\
 A_2 &= N \sum X_k^4 - (\sum X_k^2)^2 & B_2 &= \sum X_k \sum X_k^2 - N \sum X_k^3 \\
 A_3 &= \sum X_k \sum X_k^2 - N \sum X_k^3 & B_3 &= N \sum X_k^2 - (\sum X_k)^2
 \end{aligned}$$

以上の解析結果から、ランダム誤差は3方法ともノイズ偏差 $\sigma_n$ に比例し、エッジステップ $H$ に反比例することが導出された。図3-2は、これらの式から $\sigma_d$ 、 $\sigma_w$ 、 $\sigma_g$ と $\sigma_e$ の関係を、 $H=100$ 及び $\sigma_n=1$ の条件で求めた結果である。

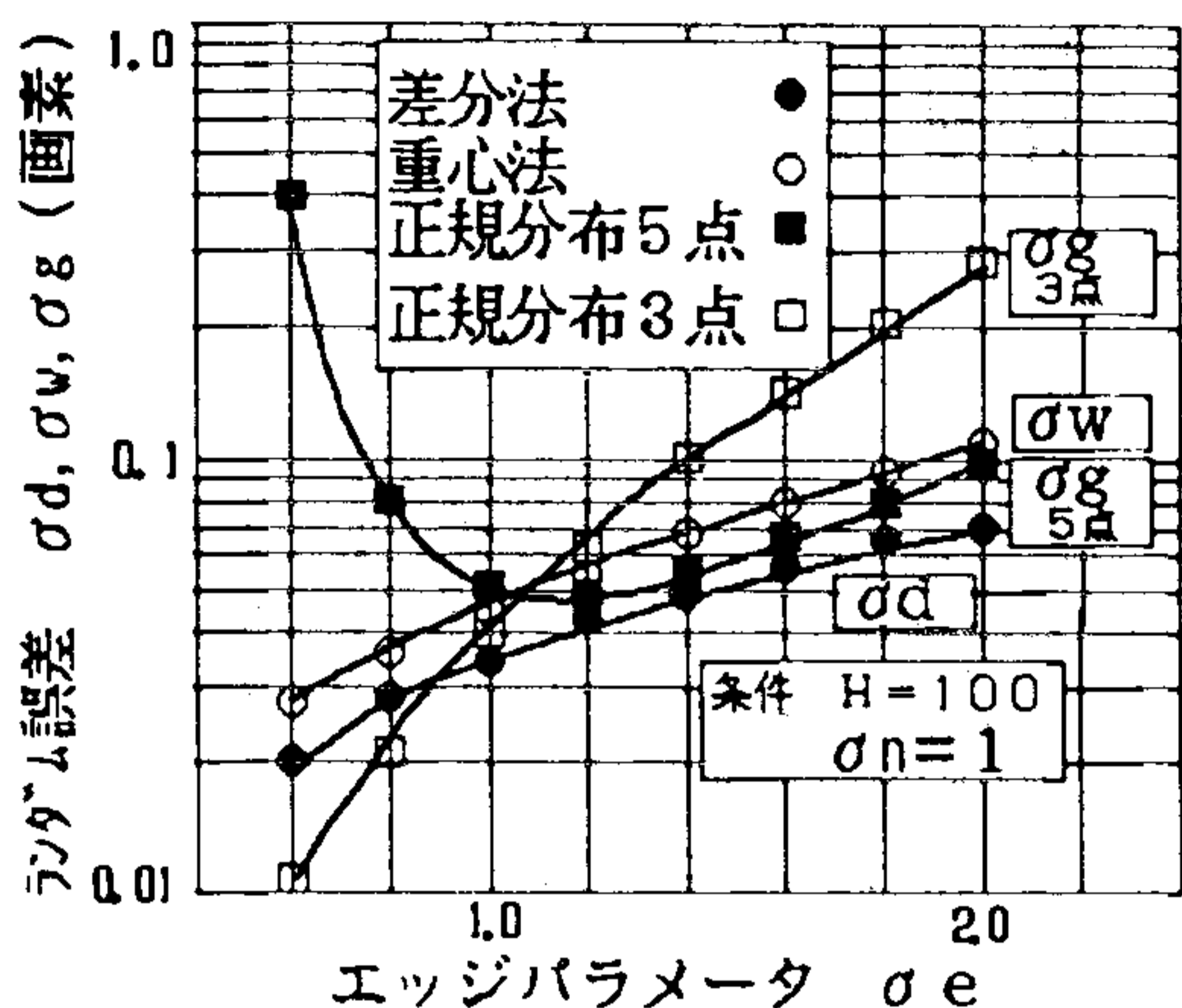


図3-2 エッジパラメータと誤差の関係

この結果では、差分法は微分値を5点用いたサブピクセル化の方法であるが、ランダム誤差は、5点を用いた重心法と同じ程度で、 $\sigma_e$ が増加すると大きくなっていく。また、正規分布5点法は、 $\sigma_e=1$ 付近でランダム誤差が最小になり、正規分布3点法は $\sigma_e$ の増加とともに急激に誤差が増加している。

図3-3は、 $\sigma_e=1$ 及び $\sigma_n=1$ の時の、エッジステップ $H$ に対するランダム誤差の結果で、3方法とも $H$ が大きいほど誤差が減少している。

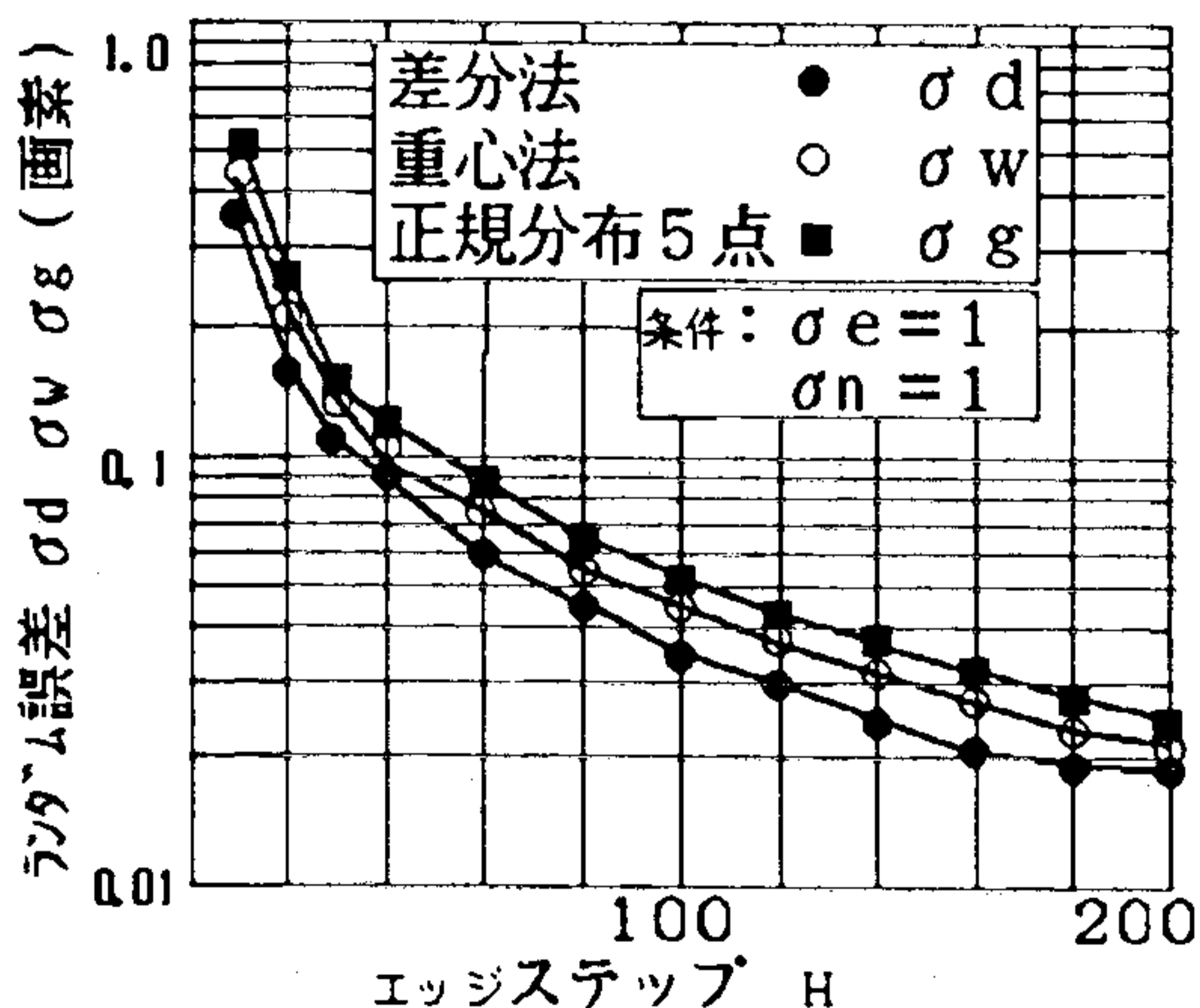


図3-3 エッジステップと誤差の関係

以上のことから、3方法におけるランダム誤差とエッジパラメータ $\sigma_e$ 及びエッジステップ $H$ との関係が判明した。

### 3-2 方式誤差の解析

図3-1のように、ノイズレベル $nL$ が零の濃度分布が、 $X$ 軸上でサブピクセル単位的位置にある場合、即ち $X_0$ が $-1.0 \sim +1.0$ の間(図3-4では $\Delta X$ )にある場合、理想的なサブピクセル化が行われれば、そのエッジは $\Delta X$ でなければならない。しかし、実際にはエッジの濃度値が一画素毎の離散データであるために、結果は $\Delta X$ にならないと考えられる。

この差は、各サブピクセル化の方法が有する固有の誤差であるから、これを方式誤差として求めることにした。誤差計算には、図3-4に示した計算モデルを用いた。

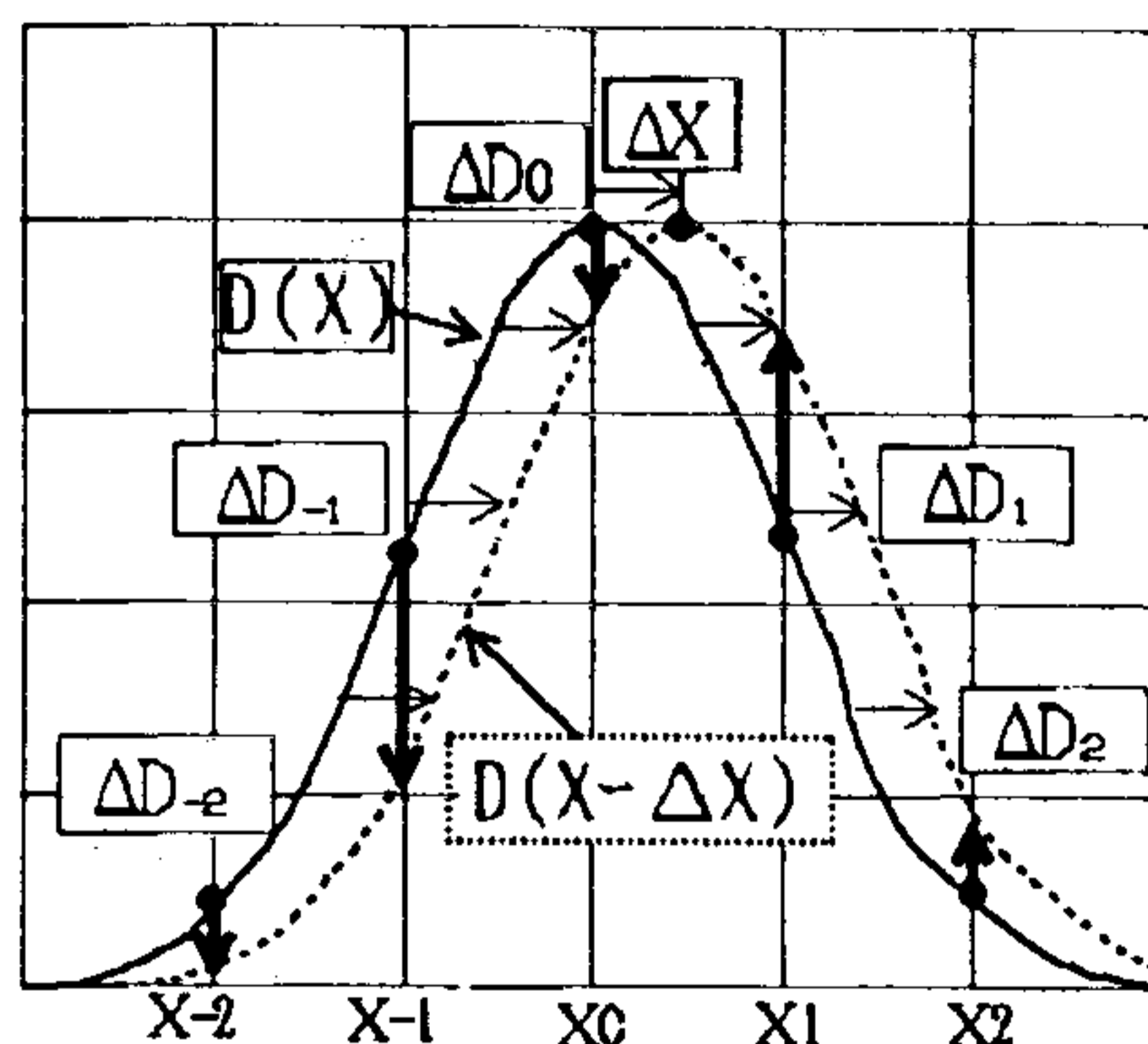


図3-4 誤差計算のモデル

このモデルでは、濃度の微分値を(3-2)式で表し、 $X_0=0$ の時の分布 $D(X)$ を実線で、 $X_0=\Delta X$ に移動した時の分布 $D(X-\Delta X)$ を点線で図示している。エッジ領域の $X$ 座標は $X_{-2} \sim X_2$ (5点)で、この位置が濃度値のサンプル点である。

このモデルで、各 $X$ 座標における移動前後の微分値の差( $D(X)-D(X-\Delta X)$ )を、それぞれ $\Delta D_{-2} \sim \Delta D_2$ とすると、濃度分布が、 $\Delta X$ 移動した時の差分法によるエッジ位置 $\Delta X_d$ を求めると、(2-1)式の定義から、 $\Delta X_d$ は(3-8)式となる。

$$\Delta X_d = \frac{D_2 + \Delta D_2 + D_1 + \Delta D_1 - (D_{-1} - \Delta D_{-1} + D_{-2} - \Delta D_{-2})}{2D_0(1 - \Delta D_0/D_0)} \quad (3-8)$$

(3-8)式に、 $\{(D_2 + D_1) - (D_{-1} + D_{-2})\} / (2 * D_0) = 0$   
 $\Delta D_1 = \Delta D_{-1}$ 、 $\Delta D_2 = \Delta D_{-2}$ であること及び2項定理を用いると、(3-9)式を得る。

$$\Delta X_d = \frac{2(\Delta D_1 + \Delta D_2)}{2D_0} \left\{ 1 + \frac{\Delta D_0}{D_0} + \left( \frac{\Delta D_0}{D_0} \right)^2 + \dots \right\} \quad (3-9)$$

ここで、

$$\Delta D_1 = D'(1) \times \Delta X \quad \Delta D_2 = D'(2) \times \Delta X \quad \Delta D_0 = D'(0) \times \Delta X = 0$$

であるから

$$\Delta X_d = \Delta X \times (D'(1) + D'(2)) / D_0$$

従って誤差  $\Delta EX_d (= \Delta X_d - \Delta X)$  は、

$$\Delta EX_d = \frac{\{D'(1) + D'(2) - D_0\}}{D_0} \Delta X \quad (3-10)$$

となり ((3-10)式)、移動量  $\Delta X$  に比例する。

重心法についても同様に求められ、誤差  $\Delta EX_g$

は (3-11) 式で表される。

$$\Delta EX_g = \left\{ \frac{\sum X_k \times D'(X_k)}{\sum D_k} - 1 \right\} \Delta X \quad (3-11)$$

正規分布法では、エッジの濃度分布が正規分布曲線であるため、濃度値を実数値とした場合は、方式誤差は理論上生じない。しかし実際には、濃度値は整数のため量子化誤差が混入してランダム誤差が生じてくる。このことは、4-2項のシミュレーションで結果を示した。

#### 4 シミュレーション及び結果

##### 4-1 ランダム誤差のシミュレーションと結果

エッジの濃度分布を模擬的に作成し、ノイズとランダム誤差の関係をシミュレーションによって調べた。

まず、作成するエッジ濃度の基本分布を、(4-1)式(最大値を100で規格化)で近似する。この式で、 $F(X)$ は点 $X$ (-15~15)における濃度値(整数化)、 $\sigma_e$ はエッジパラメータである。 $X_0$ はエッジの位置を表し、これを理論エッジとした。

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{100}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_e^2}} dx \quad (4-1)$$

次に、(4-1)式で得られたノイズの無いエッジデータにランダムノイズを重畳した模擬的な濃度データを(4-2)式により、100組作成し、3方法について理論エッジとの差(偏差)を求めた。

$$F_i(X) = R_i(X) \times nL + F(X) \quad (4-2)$$

(4-2)式で、 $i=1 \sim 100$ 、 $X=-15 \sim 15$ 、 $nL=2 \sim 30$ とし、 $R_i$ は乱数(平均=0、範囲=-0.5~0.5、 $\sigma=0.29$ )である。シミュレーションでは、 $nL$ 一点に対して100組の濃度データを用いてランダム誤差を求め、これを $nL=2 \sim 30\%$ について求めた。更に、 $\sigma_e$ 毎に、また各方式毎に求めた。

図4-1に、 $\sigma_e=1$ 、 $\sigma_n=1$ の場合の、ノイズレベル $nL$ に対するランダム誤差のシミュレーション結果を示す。

この結果では、誤差は $nL$ に比例して増大しており、3-1項の解析結果と一致した。

また、図4-2に、 $nL=5\%$ ( $\sigma_n=1.44$ )の時の $\sigma_e$ に対するランダム誤差の結果を $\sigma_n=1.0$ に換算して示した。

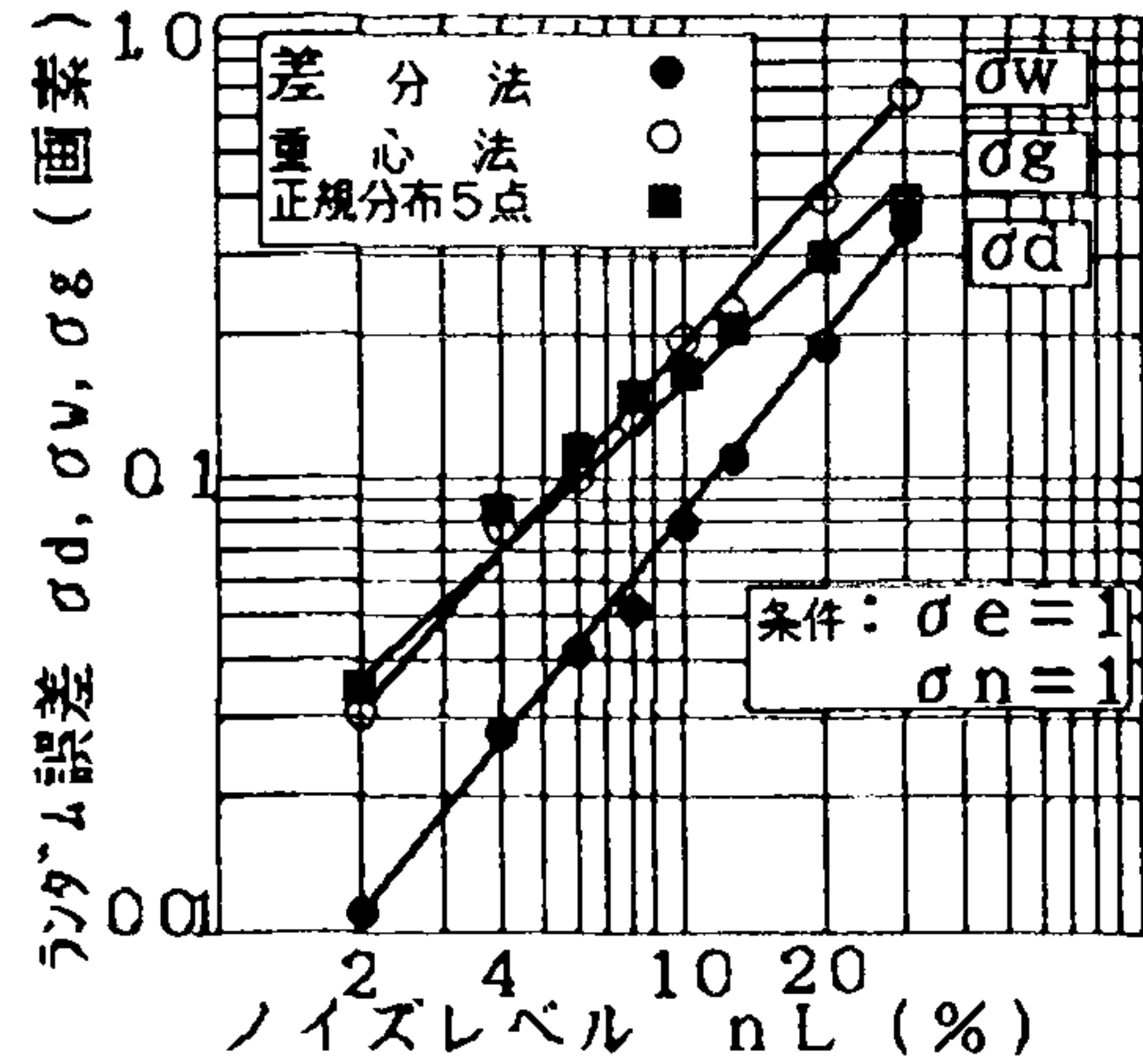


図4-1  $\sigma_e$ と誤差のシミュレーション結果

この結果では、3方法とも3-2項の解析値とほぼ同等の傾向が得られ、正規分布5点法では、 $\sigma_e=1$ 付近、3点法では $\sigma_e=.5$ 付近で誤差が最小であった。

しかし、3方法とも、 $\sigma_e$ に対する誤差の増加率は解析値より大きな値を示した。

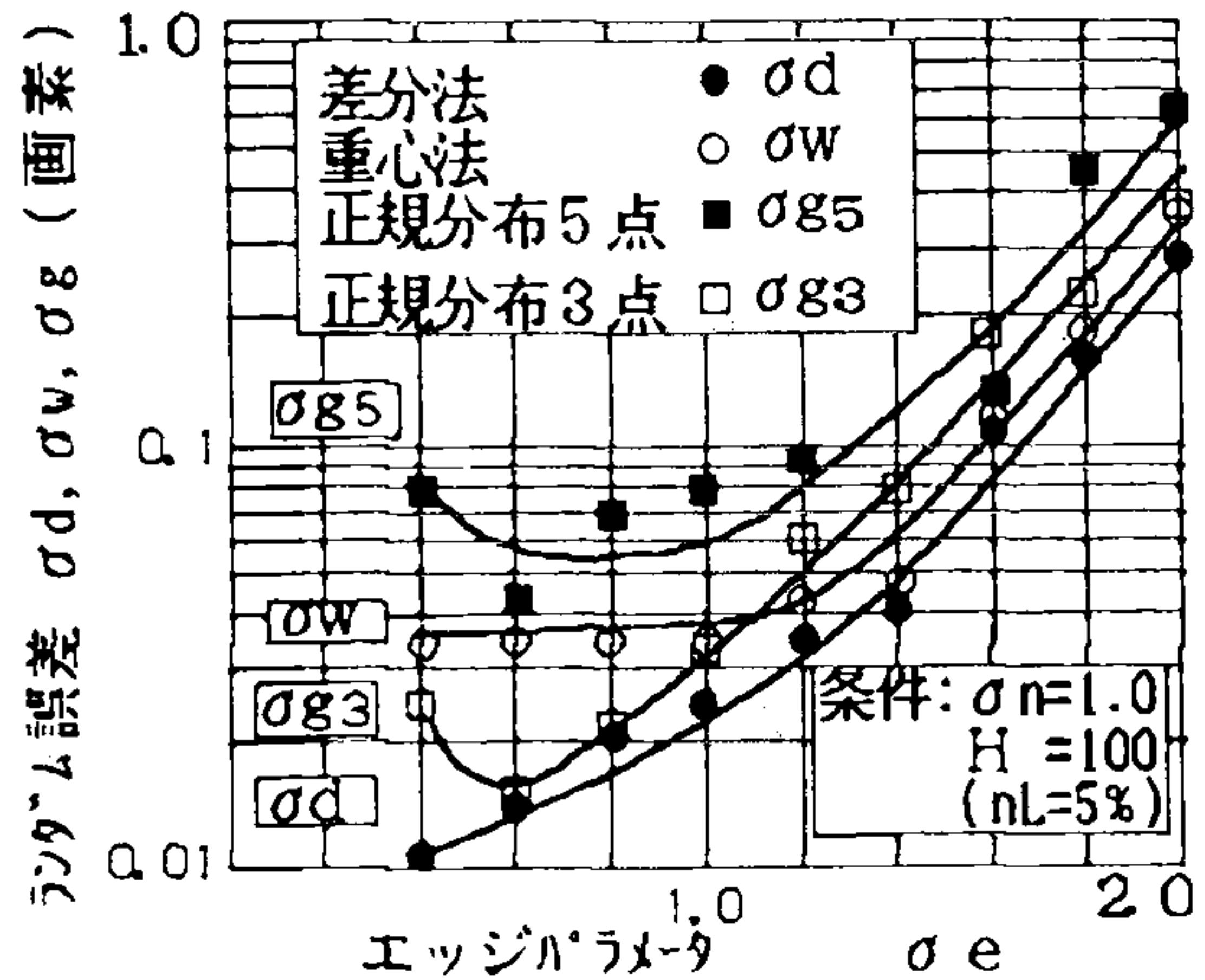


図4-2  $nL$ と誤差のシミュレーション結果

##### 4-2 方式誤差のシミュレーションと結果

(4-1)式及び(4-2)式において、ノイズレベル $nL=0$ の条件で、濃度分布の理論エッジ位置 $X_0$ を-1.0~+1.0まで0.1画素毎にシフトさせた時の3方法で求めたサブピクセル化エッジ( $X_d$ ,  $X_w$ ,  $X_g$ )と $X_0$ との差を方式誤差( $\delta_d$ ,  $\delta_w$ ,  $\delta_g$ )として求めた。

図4-3に、 $\sigma_e$ が1の場合の、差分法及び重心法について、移動量 $\Delta X$ に対する方式誤差の結果を示す。この結果から、3-2項の解析結果のように、 $\Delta X=-0.5 \sim 0.5$ の範囲で、ほぼ移動量に比例した方式誤差(-0.04~0.04画素)となった。

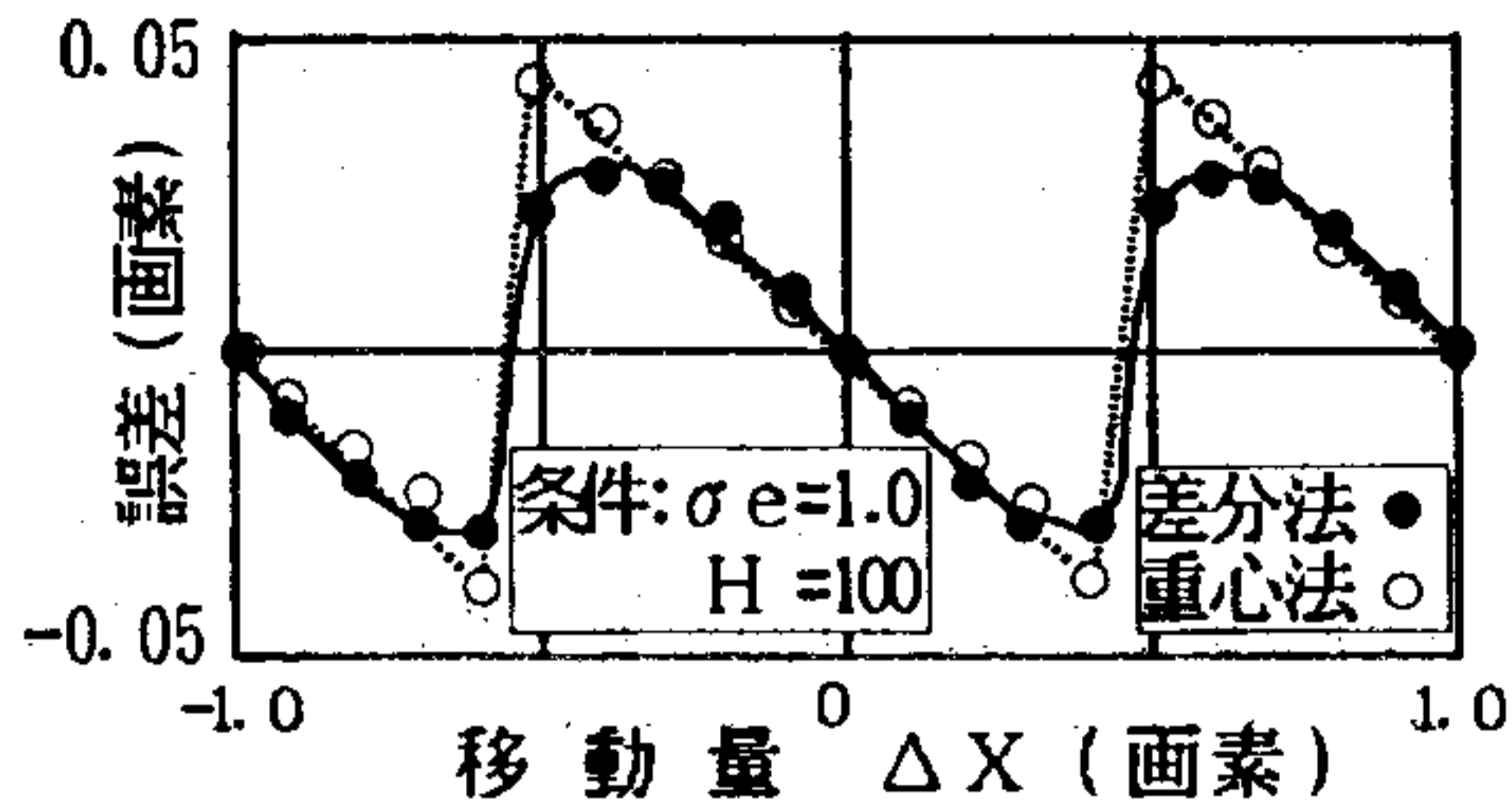


図4-3 差分法と重心法の方式誤差

図4-4に、移動量 $\Delta X$ が、0.3(差分法の方式誤差が最大になる位置)の場合の、 $\sigma_e$ に対する方式誤差のシミュレーション結果を示す。

この結果では、差分法及び重心法、正規分布3点法は $\sigma_e$ の増加とともに方式誤差が急激に増えること及び差分法と正規分布5点法では $\sigma_e = 1$ 付近で、最小値が存在することが判った。また、 $\sigma_e > 1$ では、正規分布法は方式誤差の点で優れているが、解析では、濃度値が整数であるための量子化ノイズが混入し、零にならなかった。

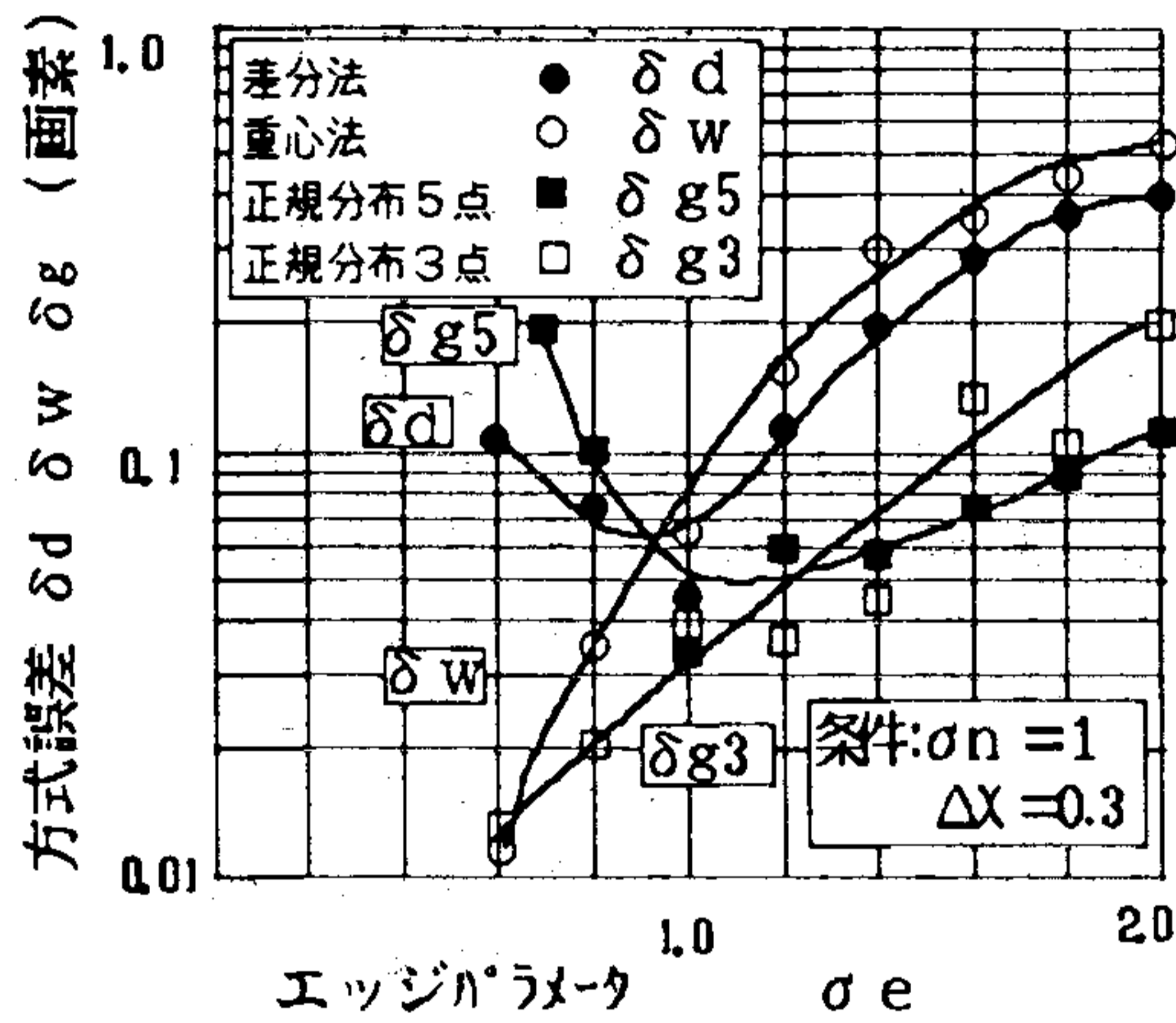


図4-4  $\sigma_e$ と方式誤差のシミュレーション結果

### 5 実験及び結果

#### 5-1 ランダム誤差に対する実験

実際の画像を用いて、3方法によりエッジ位置を計測し、その偏差を比較した。画像は、走査線に対して平行に置かれた0.25mmφのピンゲージを50mmの距離から、レンズ(25mm F1.8)を用いてCCDカメラ(512×512)から入力した。エッジ形状 $\sigma_e$ の可変は、画像入力後にガウスフィルターを演算させる方法を用いた。但し、フィルター演算後には、ランダムノイズ $\sigma_n$ も変わるので、ノイズを測定し同一レベルに換算して偏差を比較した。

ノイズレベルと $\sigma_e$ の測定は、以下の様に行った。

図5-1に示したように、ピンゲージ画像の水平エッジ50箇所を選択し、一箇所の濃度分布に対して、正規分布の回帰曲線(3-2式の $\sigma_e, H$ )を求めて、回帰値と実際の濃度値との差の最大値を求め、これを50箇所分平均してノイズレベル $nL(\%)$ とした。同様に $\sigma_e$ 及び $H$ も平均値を用いた。

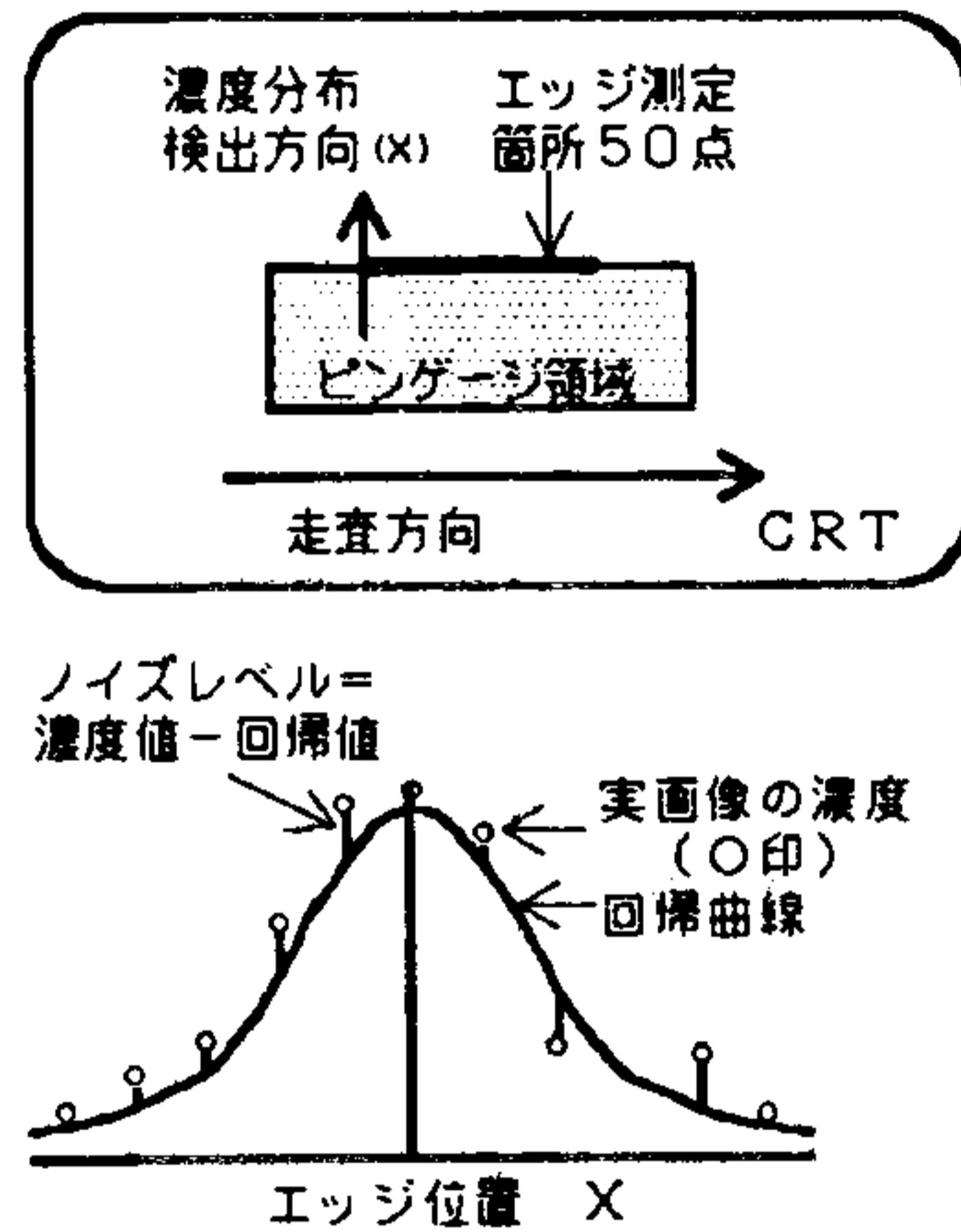


図5-1  $\sigma_e$ とノイズレベル(nL)の測定方法

実験では、3法について、 $\sigma_e$ に対するエッジ位置の偏差を求め、ノイズレベル( $\sigma_n = 1$ )及びエッジステップ( $H = 100$ )の条件に換算して誤差として求め、解析及びシミュレーションの結果と比較した。実験結果を図5-2に示す。

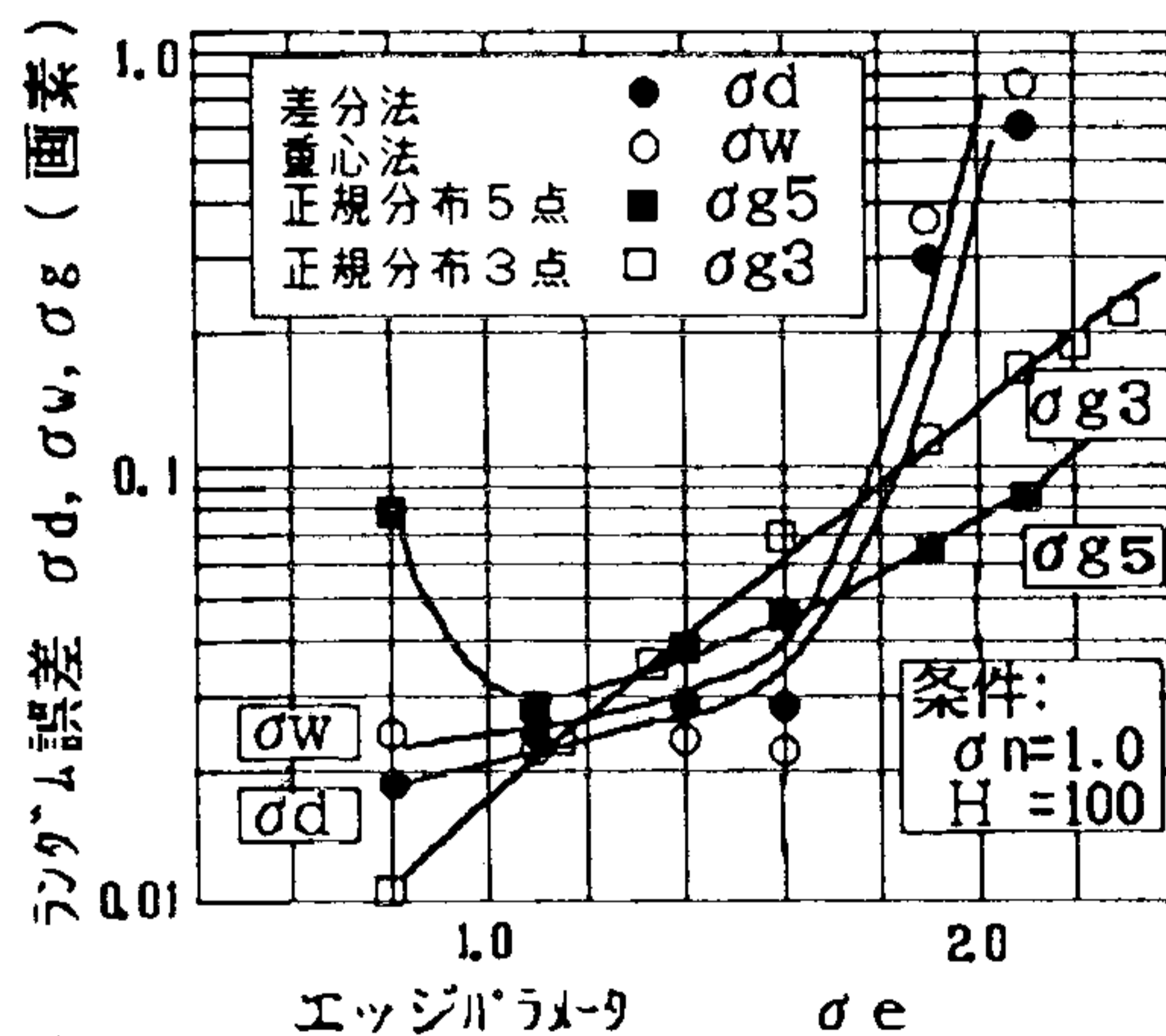


図5-2 ランダム誤差の実験結果

この結果では、 $\sigma_e = 1$ 付近では、いずれもノイズ偏差1当たり0.03画素程度の偏差で、ほぼ、解析結果(図3-2)とシミュレーション結果(図4-2)に近い値が得られた。この結果から、 $\sigma_e < 1.6$ では、差分法と重心法は誤差が小さく、正規分布5点法は

$\sigma_e = 1$  付近で最小になり、その前後で誤差が急増している。また、急峻なエッジ ( $\sigma_e < 1$ ) では、正規分布3点法の誤差が少なく、安定した計測が可能と考えられる。

### 5-2 方式誤差の実験

実際のエッジ画像として熱転写用サーマルヘッド (以下単にHDと略記) 用いて、方式誤差の確認実験をした。

実験装置の配置図を図5-3に示す。

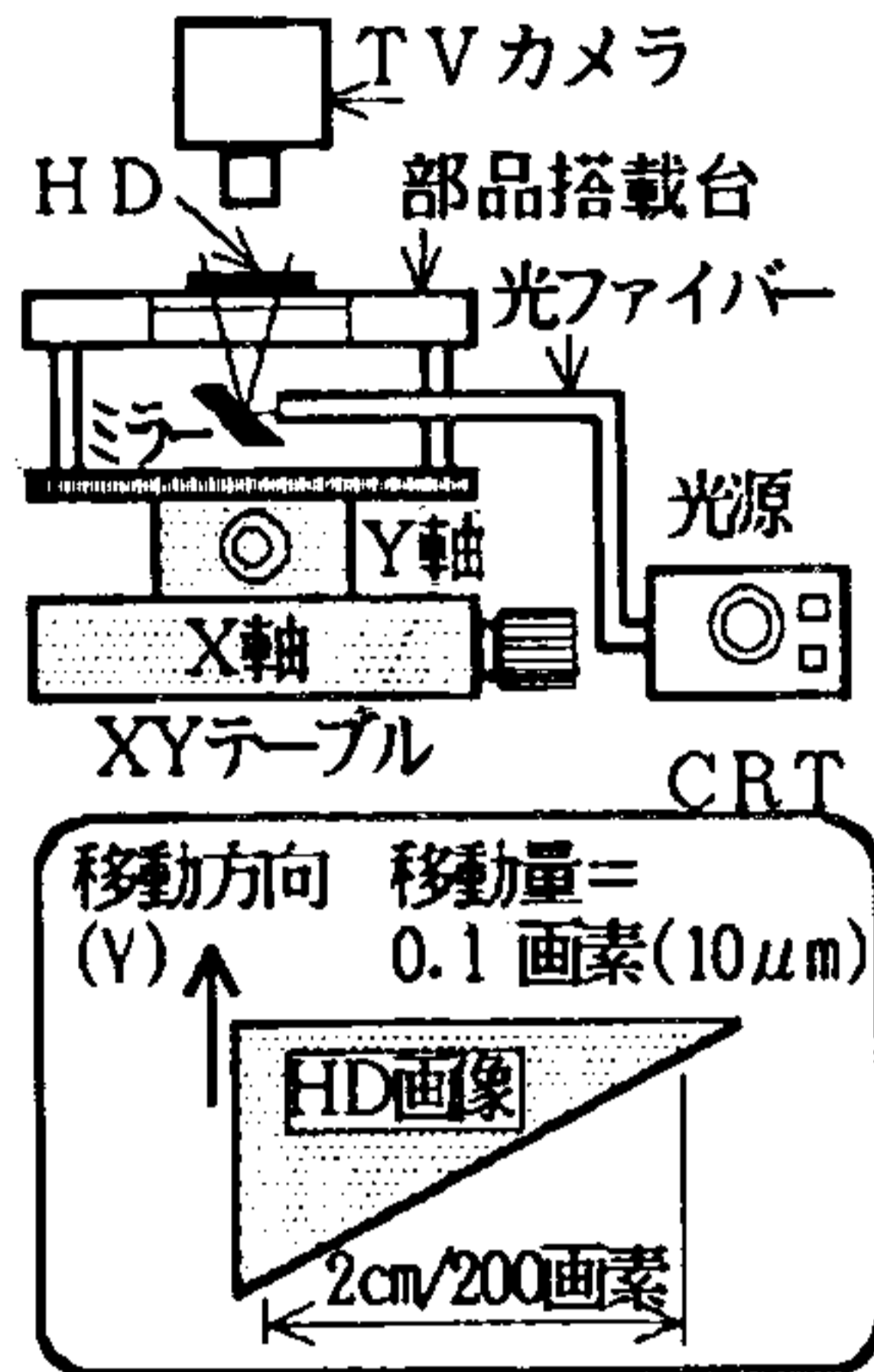


図5-3 実験装置図

実験方法は、以下の①~⑤手順で行った。

- ① HDを、TVカメラの走査線に対して測定エッジを平行(横向き)にして、XYテーブルの上の部品搭載台に置き50mmの距離から5-1項と同様に画像入力をする。
- ② 画像サイズは、一辺2cmを200画素 ( $10\mu\text{m}/0.1$ 画素) に調整し、焦点を最適にする。
- ③ 入力画像に対し、エッジ形状を同一にすることとノイズを抑えるために、ガウスフィルターを施し、 $\sigma_e$ を約1にする。
- ④ エッジ位置の測定は、走査線に対して垂直(縦)方向の濃度分布を用い、XYテーブルを縦(Y)方向に0.1画素 ( $10\mu\text{m}$ ) ずつ移動しながら、サブピクセル化の方法でエッジ位置を求める。
- ⑤ XYテーブルの移動量とサブピクセル化エッジ位置との回帰直線を求め、回帰直線からのサブピクセル化エッジの偏差を求める。

図5-4に、測定を10回行って平均した時の、テーブル移動量とサブピクセル化エッジの関係の結果を示す。図5-4において各方法の回帰線からの標準偏差 $\sigma$ は、差分法が0.055、重心法が0.059、正規分布法が、0.023であった。この結果から、サブピクセル化精度(3

$\sigma$ )は、差分法と重心法が0.2画素以下、正規分布法は0.1画素以下で、正規分布法が、精度的に2倍以上優れていることが判った。

また、重心法及と差分法はサブピクセル値0.5(図5-4の点線)を境に、XYテーブルの移動量に対しステップ的な変化をし、 $\sigma_e$ の増加と共に大きくなる(結果省略)。これは、3-2項及び4-2項の方式誤差の解析及びシミュレーション(図4-4)との比較から、方式誤差と考えられる。

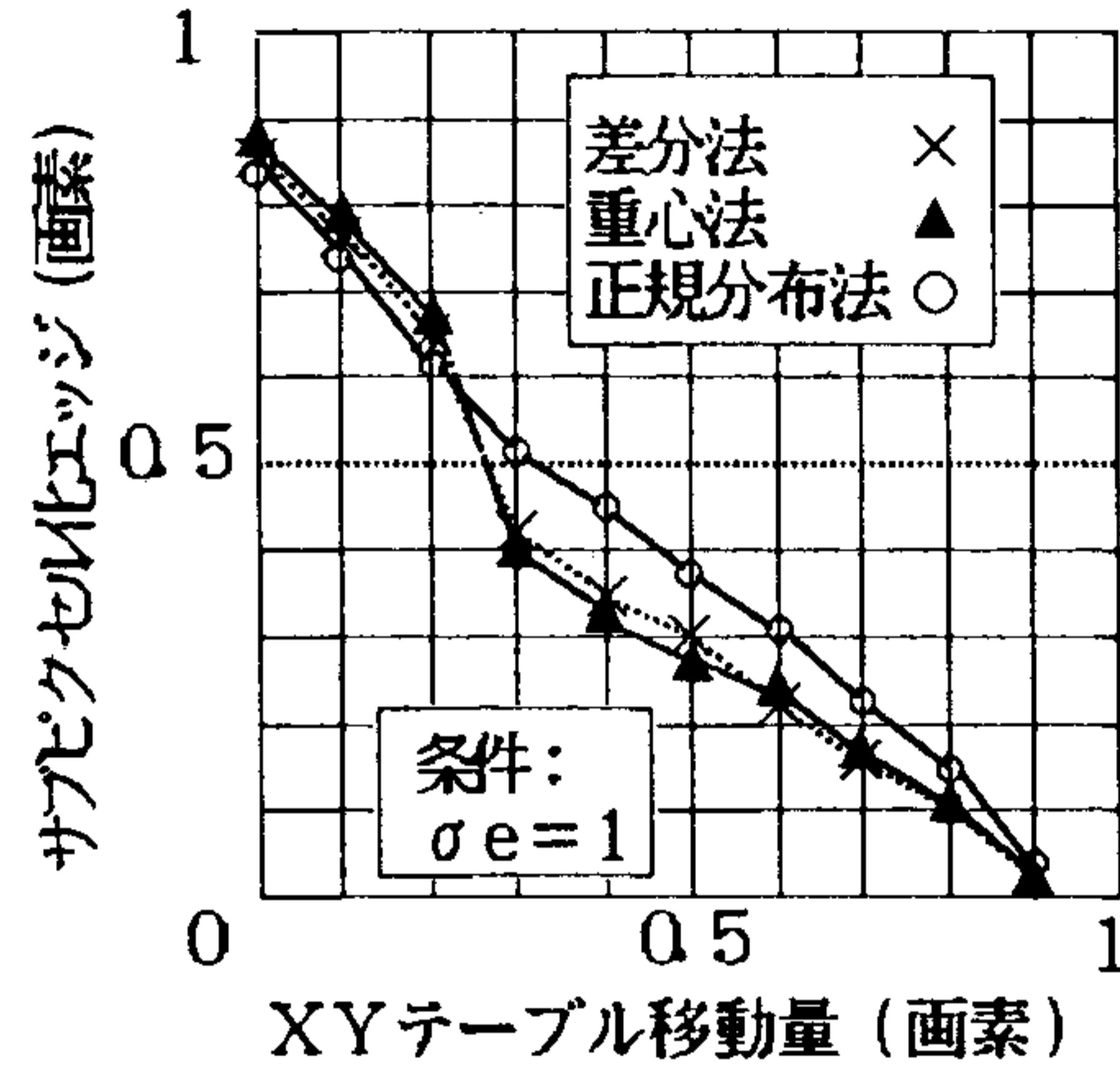


図5-4 方式誤差の実験結果

### 5-3 差分法の方式誤差の補正方法

我々が考案した差分法は、従来、約0.2画素程度の精度で実施化していたが、本研究の結果から、エッジ形状が緩やかに ( $\sigma_e$ が大き) になるとステップ的な方式誤差が増加して精度が低下することが、解析、シミュレーション及び実験から確認できた。

解析の結果から、方式誤差は補正が可能であることが判ったので、精度向上のために補正方法について以下の検討を行った。

まず、3-2項の方式誤差の検討で、差分法の方式誤差を(3-10)式で示したが、この式で、 $D'(1)$ 、 $D'(2)$ 及び $D_0$ の値が判れば、誤差を具体的に求めることが可能である。このため、入力画像にガウスフィルターを演算し、濃度の微分値を正規分布曲線に強制的に近づける方法を用いることとし、これらの値を正規分布関数から求めることにした。

次に、 $\sigma_e = 1$ の時の $D'(1)$ 、 $D'(2)$ 及び $D_0$ の値を求め、(3-10)式から補正後のサブピクセル化エッジ $X_{dC}$ を求めて(5-3)式とし、これを差分法の補正式とした。 $X_0$ は仮のエッジである。

$$X_{dC} = 1.14 \times (X_d - X_0) + X_0 \quad (5-3)$$

(5-3)式を用いて補正したサブピクセル化エッジとXYテーブルの移動量の間を、補正しない場合の

結果と比較して図5-5に示す。

この結果では、回帰直線からの偏差( $\sigma$ )が、補正前0.042から補正後0.014に、約3倍向上している。

このことから、画像データにガウスフィルターを演算してエッジパラメータ $\sigma_e$ を約1にした後で、差分法でサブピクセル化エッジを求め、(5-3)式で補正すると、0.05画素( $3\sigma$ )の精度が得られることが確認できた。

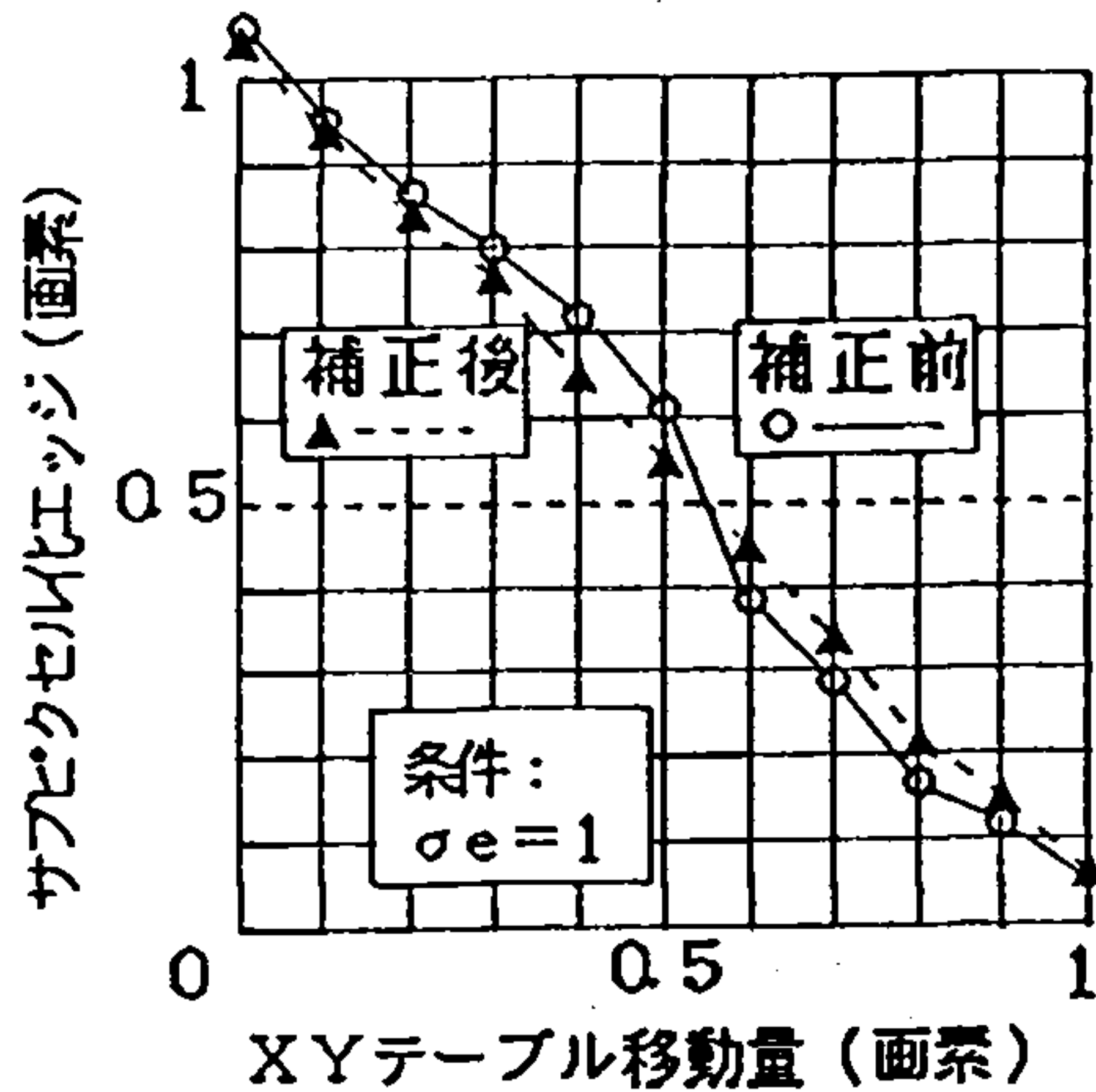


図5-5 差分法の方式誤差の補正結果

## 6 まとめ

本研究では、エッジパラメータ $\sigma_e$ を定義し、 $\sigma_e$ とランダム誤差の関係及び $\sigma_e$ と方式誤差の関係について差分法(5点)、重心法(5点)、正規分布回帰法(3点及び5点)の比較検討をした。

さらに、差分法と重心法の補正方法を検討した。

この結果、以下のことが明らかになった。

- ① 差分法及び重心法は、エッジパラメータ $\sigma_e$ が、約1.6までのエッジに対してはランダム誤差が小さく、サブピクセル化に有効であるが、それ以上になると急激にランダム誤差が増加する。
- ② 差分法及び重心法は、ガウスフィルターを演算した画像からサブピクセル化エッジを求め、この結果を一次式(5-3式)によって方式誤差を補正すれば、精度( $3\sigma$ )を約0.05画素にでき、正規分布法と同程度にすることができる。
- ③ 正規分布5点法は、 $\sigma_e$ が約1のエッジでランダム誤差が最も小さく、正規分布3点法は $\sigma_e$ の増加と共にランダム誤差が急増する。従って、正規分布5点法は、 $\sigma_e=1$ のエッジに有効で、正規分布3点法は $\sigma_e$ が1以下の(急峻な)エッジに有効である。
- ④ 正規分布法は、方式誤差が最も小さいため、低ノイズ画像のエッジ計測に最適である。

尚、本研究は、技術パイオニア養成事業並びに省力化技術開発研究モデル事業として実施したもので、平成3年度に導入した高速画像処理装置(日本自転車振興会補助)を用いた。

最後に、本研究を進めるにあたり、(2-3)式の導出及びガウスフィルターについて種々ご指導を頂いた、岩手大学工学部情報工学科の渡辺孝志教授並びに田山典男助教授に感謝致します。

## 参考文献

- (1) 南幅他：“自動化のための画像処理”、岩手県工業試験場報告No.33~No.34
- (2) 野村由司彦他：“エッジ計測のサブピクセル化と誤差解析”、信学論J-73D2、No.1990、PP1458-67
- (3) 鈴木健司他：“サーフェスマウント用高精度視覚アルゴリズム”、昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会論文集PP.109-110
- (4) 藤井健二郎他：“位置決め用マーク位置検出方式”、公開特許広報(A)昭和63-11804
- (5) 吉澤康和：“新しい誤差論”、共立出版 PP.149-175 (平成2年)
- (6) 篠崎壽夫他：“応用数値計算法入門(上)”、コロナ社PP.277-282
- (7) 高木幹雄他“画像解析ハンドブック”、東京大学出版会、PP.550-74