

レーザー法による表面変位測定装置の特性評価

Evaluation of Characteristics of the Surface Displacement Measurement Device
by Laser Method

伊藤 正泰 川又 一夫 石塚 悦男

Masayasu ITO, Kazuo KAWAMATA and Etsuo ISHITSUKA

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

原子炉施設管理部

Department of JMTR Operation
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

March 2010

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

レーザー法による表面変位測定装置の特性評価

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
照射試験炉センター 原子炉施設管理部
伊藤 正泰、川又 一夫、石塚 悦男⁺

(2009年12月18日受理)

表面変位計測装置は、レーザー変位センサを用いて、試料の表面状態を測定するものである。本装置をセル内において使用するには、使用環境を考慮した当該装置の特性を知ることが重要である。そのため、本報告書は、レーザー法による表面変位測定装置の特性評価についてまとめたものである。

Evaluation of Characteristics of the Surface Displacement Measurement Device by Laser Method

Masayasu ITO, Kazuo KAWAMATA and Etsuo ISHITSUKA⁺

Department of JMTR Operation
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 18, 2009)

Surface state of material is measured by the surface displacement measurement device with laser displacement sensor. It is important to know the characteristic of a device that considers environment to use this device in the cell. Therefore, this report described about evaluation of characteristics of the device by laser method.

Keywords : JMTR, Hot Laboratory, Laser Displacement Measurement Device

⁺ : Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

目 次

1. はじめに.....	1
2. レーザー法による表面変位計測装置の概要.....	1
3. 特性評価試験の概要.....	1
3. 1 平行度試験.....	2
3. 2 Z軸距離.....	3
3. 3 X-Y平面分解能.....	3
4. 試験結果.....	3
4. 1 平行度試験.....	3
4. 2 Z軸距離試験.....	3
4. 3 X-Y平面分解能試験.....	3
5. まとめ.....	4
謝 辞.....	4
参考文献.....	4

Contents

1. Introduction.....	1
2. Outline of the surface displacement measurement device by laser method.....	1
3. Outline of performance evolution test.....	1
3. 1 Parallel test.....	2
3. 2 Z axis distance.....	3
3. 3 X-Y plane resolution.....	3
4. Test results.....	3
4. 1 Parallel test.....	3
4. 2 Z coordinates distance test.....	3
4. 3 X-Y plane resolution test.....	3
5. Conclusion.....	4
Acknowledgement.....	4
References.....	4

This is a blank page.

1. はじめに

材料試験炉(JMTR)に隣接するホットラボ施設では、JMTR および他の施設で照射された燃料、材料の照射後試験を行っている。ホットラボ施設では、しゃへい体にコンクリート、鉛、鉄を用いたホットセルを持ち、セル外よりマニプレータを使用し各種照射後試験を行う。そのため、ホットセルに内装される試験装置はマニプレータを用いて容易に操作することができる遠隔操作性を考慮した設計が必要である。今回、試験に使用した表面変位計測装置は、もともと核融合炉の第一壁に使用される炭素材料の熱衝撃による損耗を測定するために製作されたものである。測定部にはレーザー変位センサを組み込み、小型化されており、試料に触れることなく、試料表面状態を測定できる。しかし、レーザー変位センサは、ホットラボ地下機械室の空気圧縮機の振動や、セル内における温度、湿度などの環境性の要因が測定精度に大きく影響するため、このような要因を考慮した本装置の特性を知ることが重要である。また、装置製作より10年以上経過しているため再度、本装置の基本特性を評価することが重要であると考えられる。

本報告書は、表面形状を測定することを目的として製作された測定装置について、その利用の拡大とホットセル内での使用を目的として測定装置の基本特性の評価を行いまとめたものである。

2. レーザー法による表面変位計測装置の概要

本装置は、レーザーを利用して試料の表面変位を測定する装置である。測定原理を Fig.2-1 に示す。試料表面にレーザーを照射し、その反射光を受光部で検出し距離Zを測定するものである。計測装置の構成を Fig.2-2¹⁾に示す。

本装置は、(1) 試料を乗せるステージ部、(2) レーザー投光、受光機能を含む CCD レーザー変位センサ部、(3) センサを X、Y 方向に移動させる高トルクのパルスモータとボールネジを使用した駆動機構部、(4) センサの信号処理を行い、測定データを取得する信号処理部で構成される。(1) は COLLINS MICROFLAT 社製の石定盤を使用している。(2) には、KEYENCE 社製 LK-030/LK-2000 を使用している。(3) は、インサイト社製小型表面変位計測装置 FAI-D300-A を使用している。(4) は、(2) に対応して特製したインサイト社製表面変位測定プログラム「Surface Digitizer」を使用している。それぞれの仕様を Table 2-1²⁾、Table 2-2¹⁾、Table 2-3²⁾、装置本体および手動ボックスを Photo.2-1、Photo.2-2、測定プログラムの動作画面を Fig.2-3 に示す。

本装置により、X-Y 平面 50mm×50mm の範囲内で、レーザー投光部から 30mm の距離に試料を置いたとき±5mm の表面変位が測定できる。本装置に使用されているレーザー変位センサは Fig.2-4 に示すように 1mm 当たり 1V の電圧を出力する特性を持っている。仕様上での測定精度は白色試料、静止状態で公称値±0.005mm である²⁾。

3. 特性評価試験の概要

本装置の基本特性の評価およびホットセル内での水平出し作業は遠隔で実施しなければならないことを考慮し、以下の3項目について試験を行う。

3. 1 平行度試験

水平出しの方法による表面変位測定値に与える影響およびソフトウェアによる傾き補正の有無による表面変位測定値に与える影響について調査する試験である。平行度試験の概要図を Fig.3-1 に示す。本試験では、平行度 θ を、X-Y平面上の4点 (X1,Y1,Z1) , (X1,Y2,Z2) , (X2,Y1,Z3) , (X2,Y2,Z4) における表面変位測定値の最大値、最小値を Zmin、Zmax とし、以下の式で算出する。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{\ell} \right)$$

θ : 角度[°]

Z : 表面変位測定値[mm]

ℓ : Zmax-Zmin 間の X - Y 平面上の長さ[mm]

水平出しの方法は、以下の2つの方法を比較する。

- (a)測定装置に備え付けられた気泡水準器を用いる方法
- (b)測定装置の出力 (3Dグラフ) を用いる方法

いずれも、上記の情報をもとに Z1 から Z4 を装置に取り付けられている3つの調整ネジで調整する。

両方法の比較には、3Dグラフのほか、以下の平均値および誤差を使用する。

表面変位の平均値 \bar{Z} は、X-Y平面でそれぞれ、n1、n2 個の測定を行い、全平均して算出する。

$$\bar{Z} = \frac{1}{n1 \times n2} \sum_{x=1}^{n1} \sum_{y=1}^{n2} Z_{xy}$$

本測定の誤差は、シックスシグマ手法⁴⁾に基づき全測定値の標準偏差を4.5倍したものを誤差と定義する。

ソフトウェアの傾きの補正の有無の比較については、上記(a)、(b)について行う。

装置のZ軸の基準は、Table 2- 1 に示す基準距離 30mm (出力電圧 0V) を採用し、レーザー投光部から 30mm を基準面とした。このとき、駆動部のバックラッシュを考慮し、レーザー変位センサを下降させて、基準面に調整するように統一した。また、センサヘッドの温度による影響を抑えるため電源投入後一時間以上の暖気を行ったあとに試験を行う。試験に使用する表面変位測定装置プログラムのスキャンパラメータは、ADコンバータにより受光部の出力電圧をサンプリングするときのパラメータでメーカー推奨のストロブ間隔 512 μ sec、ストロブ回数 4 を使用する。そのため、1点の測定値は 512 μ sec 間隔で4回測定した時の平均値である。測定試料には、Mitutoyo 社製セラミックスゲージブロックを使用する。セラミックゲージブロックの仕様を Table 3- 1³⁾に示す。

3. 2 Z軸距離

レーザー変位センサと測定試料のZ軸距離が表面変位測定値に与える影響について調査する試験である。測定距離試験の概要図を Fig.3-2 に示す。本試験では、レーザー投光部から試料までの距離を 26 から 30mm まで 1mm 間隔で変化させ結果を比較する。比較に使用する平均値および誤差は 3. 1 と同様に算出する。また、本装置の電圧出力特性について調査するため、公称値 1 から 9mm のセラミックゲージブロックを 1mm 間隔で用意し、公称値 5mm のセラミックゲージブロックを基準面（出力電圧 0V）とすることで出力電圧-4 から+4V に変化することを確認する。この試験の概要図を Fig.3-3 に示す。装置の基準距離やスキャンパラメータ等は 3. 1 と同様である。

3. 3 X-Y平面分解能

X-Y平面分解能の設定は被測定物の表面粗さに依存する。そのため、本試験で使用したセラミックゲージブロックの表面状態は滑らかであるため、距離分解能 ΔX 、 ΔY を比較的小さな値に設定し、得られた精度を比較することで基本特性を確認する。X-Y平面分解能試験の概要を Fig.3-4 に示す。本試験では、測定プログラムのスキャンパラメータ Step[mm] (= ΔX 、 ΔY) の値を、1、0.5、0.2 に変化させ結果を比較する。比較に使用する平均値および誤差、また、装置の基準距離やスキャンパラメータ等は 3. 1 と同様である。

4. 試験結果

4. 1 平行度試験

Fig.4-1 と Table 4-1 に、平行度試験結果を示す。この試験では、予想したとおり測定装置の出力より水平出しを行ったほうが気泡水準器による水平出しに比べ、平行度、誤差について向上していることが確認できた。また、傾き補正を使用することで、Fig.4-1 の a-2、b-2 のように傾きのあるグラフを補正することができ、誤差の向上が確認された。

4. 2 Z軸距離試験

センサ投光部と試料との測定距離の影響の比較データを Fig.4-2 と Fig.4-3 に示す。Fig.4-2 は横軸にセンサ投光部と試料との測定距離、縦軸に平均値、Fig.4-3 は横軸にセンサ投光部と試料との測定距離、縦軸に誤差で整理した。この試験で、平均値はメーカーが公称している精度 $\pm 0.005\text{mm}$ の範囲内であることが確認できた。また、誤差についてはセンサ投光部と試料との測定距離に影響を示すような結果は確認されず、測定距離 26 から 30mm において誤差が一定で行えることが分かった。

本装置の電圧出力特性試験の結果を Fig.4-4 に示す。この試験では、傾き 1.0001V/mm の良好な電圧出力特性図を得ることができた。

4. 3 X-Y平面分解能試験

Fig.4-5 と Table 4-2 に、X-Y平面分解能試験結果を示す。Step[mm]を 1 から 0.2 と細分化させた結果、Step 0.2mm において誤差 $\pm 0.00946\text{mm}$ を得ることができた。また、Fig.4-5 に示すよう

に Step 細かくすることで、測定試料の表面状態をより詳細に測定することができ、試料表面の状態を 3D グラフ上で再現することができた。

5. まとめ

本報告書は、照射材料の表面状態を測定することを目的として製作された測定装置について、基本特性の評価を行い、以下のことが明らかにした。

- (1) 気泡水準器に比べ測定装置の出力を使用した水平出しのほうが、平行度、誤差の向上が得られた。また、傾き補正により、平行度、誤差を向上させることができた。
- (2) レーザー変位センサからの測定距離が 26 から 30mm において、平均値はメーカーが公称している $\pm 0.005\text{mm}$ の範囲内であり、誤差に関しても測定距離の影響を受けない測定が可能であることが分かった。
- (3) スキャンパラメータ Step[mm] 0.2 において、 $\pm 0.00946\text{mm}$ が得ることができた。また、試料表面の状態を 3D グラフ上で再現することができた。

今回の特性評価により明らかになった部分があるが、今後は、以下のことについて検討を行い、装置のセル内設置、運用を行っていく予定である。

- (1) 照度、温度、湿度、振動といった環境性の要因が及ぼす平均値、誤差への影響評価。
- (2) CT 試験片等照射後試験に使用される試料形状への本装置の実用性の検証。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、ホットラボ管理課 中川哲也課長、相沢静男課長代理には、試験の方向性や報告書についてご指導・ご助力をいただきました。以上、記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 小型表面変位計測装置 FAI-D300-A 取扱説明書
- 2) KEYENCE 社製 CCD レーザー変位センサ LK-2000 シリーズ取扱説明書
- 3) Mitutoyo 社製セラブロック 516Series 取扱説明書
- 4) 青木保彦、三田昌弘、安藤紫：“シックスシグマ 品質立国ニッポン復活の経営手法”，pp.13-16 (2000) .

Table 2-1 CCD レーザー変位センサの仕様

型式	センサヘッド	LK-030
	アンプユニット	LK-2000
基準距離		30mm
測定範囲		± 5mm
光源	種類	赤色半導体レーザー
	波長	670nm (可視光) クラス 2
	出力	最大 0.95mW
スポット径 (基準距離にて)		約φ30μm
直線性		± 0.1% of F.S.
繰り返し精度		1μm
アナログ出力	電圧出力	± 5V (1μm / mV)
	出力インピーダンス	100Ω
	電流出力	4 ~ 20mA (MAX350Ω)
アラーム出力		NPN オープンコレクタ (N.C.) 最大 100mA (40V 以下) 残留電圧 1V 以下
サンプリング周期		512μs
副機能		オートゼロ / アラーム時アナログ出力ホールド機能 ゲイン切換機能 / レスポンス切換機能 スパン・シフト調整機能
定格	電源電圧	DC24V±10%リップル 10% (P-P) 以下
	最大消費電流	400mA 以下
温度	センサヘッド	0.01% of F.S. / °C
ドリフト	アンプユニット	0.01% of F.S. / °C
耐環境性	保護構造	IP67
	使用周囲照度	白熱ランプ・蛍光灯 10000lx 以下
	使用周囲温度	0 ~ + 50°C
	使用周囲湿度	35 ~ 85% RH (結露なきこと)
	耐振動	10 ~ 55Hz 複振動 1.5mm X、Y、Z 各方向 2時間
材質	センサヘッド	アルミダイカスト
	アンプユニット	ポリカーボネート
質量	センサヘッド	約 260g
	アンプユニット	約 515g

Table 2-2 駆動部の仕様

駆動方式	センサヘッド駆動方式	
センサヘッド水平移動範囲	54 × 54mm	
計測範囲	50 × 50mm	
センサヘッド垂直移動範囲	30 ~ 80mm	
試料厚さ範囲	0 ~ 50mm	
水平方向置精度	50μm	
水平面平行精度	50μm	
最大スキャン速度	40mm / sec	
最小移動ステップ	10μm	
使用環境	温度範囲	10 ~ 30℃
	湿度範囲	20 ~ 90%RH (結露なきこと)

Table 2-3 表面変位計測プログラムの仕様

ストローク回数 (1点当たり何回測定して 平均化するか)	1 ~ 1023 (メーカー推奨: 4)
ストローク間隔 (測定する時間間隔)	16 ~ 1008 μsec (メーカー推奨: 512)
簡易スキャン速度	1 ~ 40 mm / sec
スキャンするX範囲	0 ~ 50mm
スキャンするY範囲	0 ~ 50mm
スキャンするステップ間隔	0 ~ 50mm (X軸、Y軸ともに測定点の 上限は201個まで)

Table 3-1 セラミックゲージブロックの仕様

型式 (符号)	BM3-76-0	
等級	0	
規格	JIS B7506 - 1997	
材質	ジルコニアセラミックス (ZrO ₂)	
熱膨張係数	10 ⁻⁶ / K	9.3 ± 1.0
熱伝導性	W / m·k	2.9

Table 4-1 平行度試験 測定データ

	平均値[mm]	誤差[mm]	平行度[°]
気泡水準器による水平出し	-0.086	±0.173	3.71×10^{-3}
気泡水準器による水平出し (傾き補正後)	0.195	±0.0105	1.98×10^{-4}
測定装置の出力による水平出し	0.005	±0.0124	8.58×10^{-4}
測定装置の出力による水平出し (傾き補正後)	-0.014	±0.00884	1.12×10^{-4}

※平均値は測定プログラムの測定上限に合わせて、小数点第四位を切り上げ第三位で比較を行い、誤差と平行度は有効数字四桁を切り上げて比較を行った。以降のデータ整理に関してもこの整理方法を適用した。

Table 4-2 X-Y平面分解能試験 測定データ

Step[mm]	平均値[mm]	誤差[mm]
1	-0.001	±0.0121
0.5	-0.002	±0.0128
0.2	-0.004	±0.00946

※平均値は測定プログラムの測定上限に合わせて、小数点第四位を切り上げ第三位で比較を行い、誤差と平行度は有効数字四桁を切り上げて比較を行った。以降のデータ整理に関してもこの整理方法を適用した。

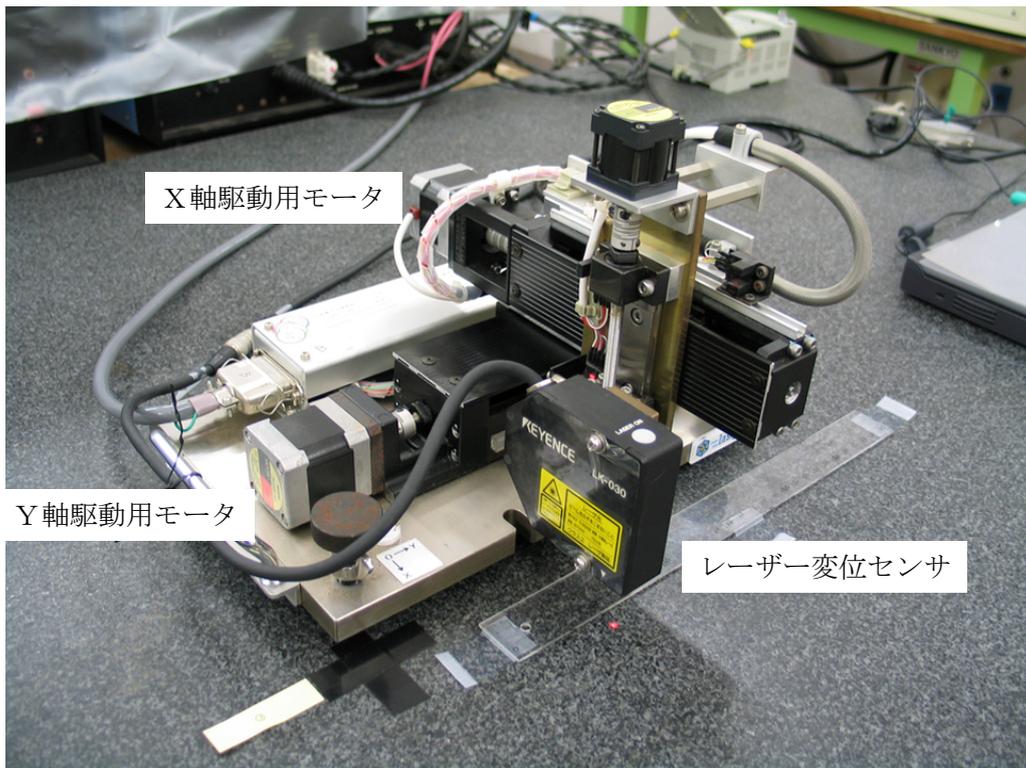


Photo.2-1 表面変位計測装置本体



Photo.2-2 手動ボックス

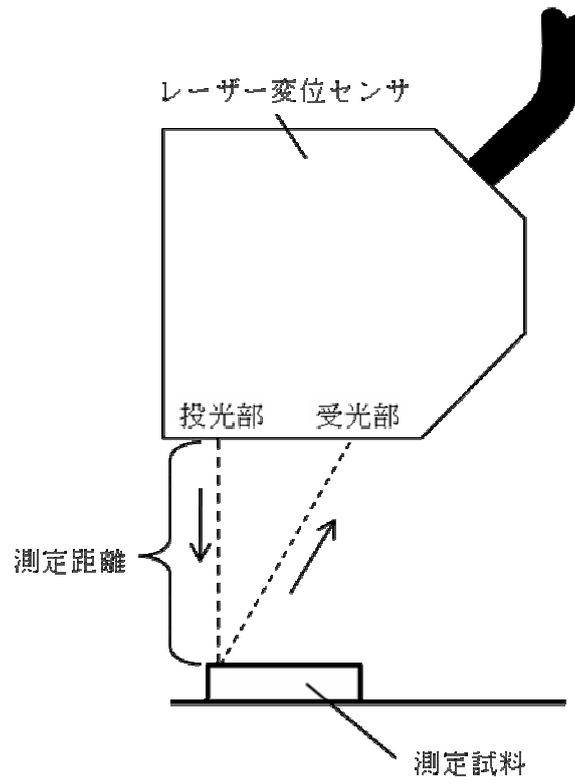


Fig.2-1 レーザー測定の原理

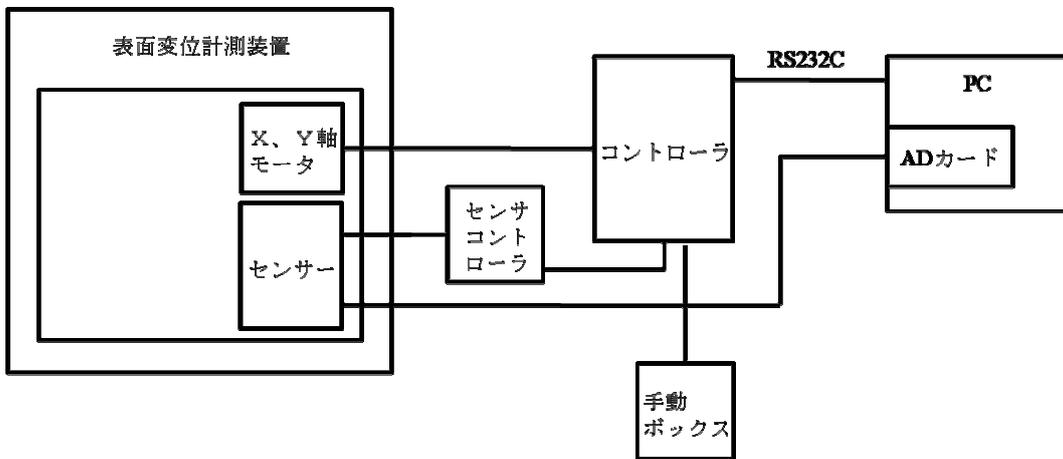


Fig.2-2 表面変位計測装置の構成

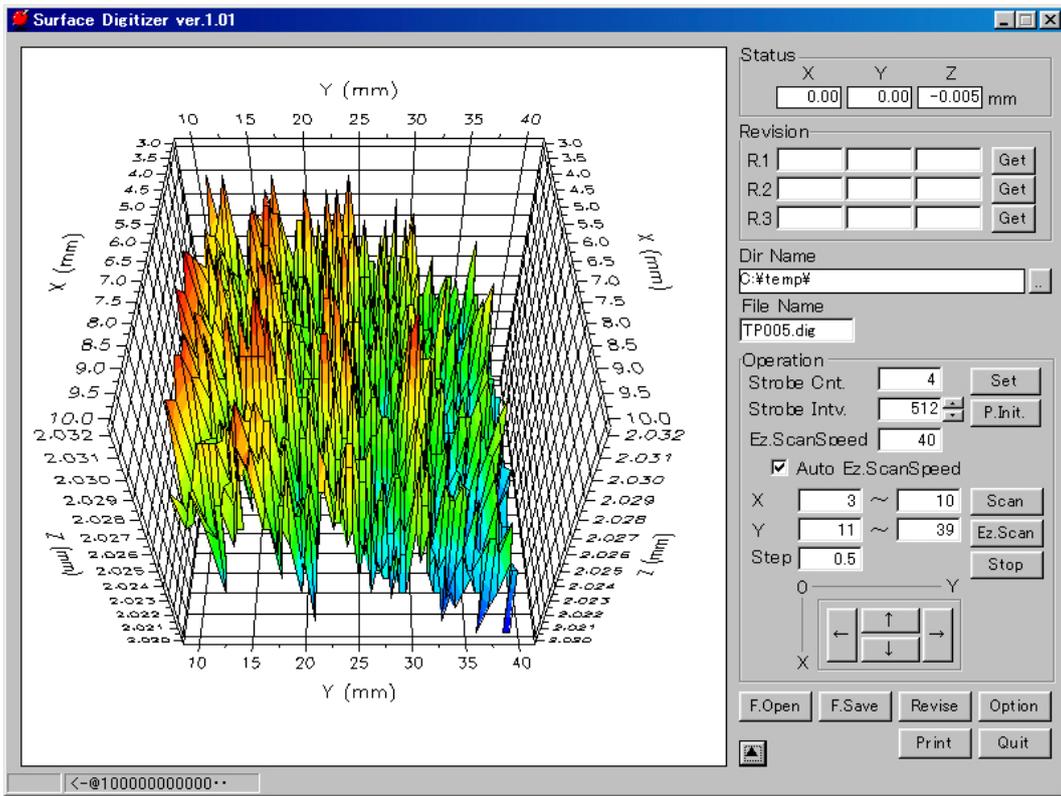


Fig.2-3 プログラム動作画面 (例)

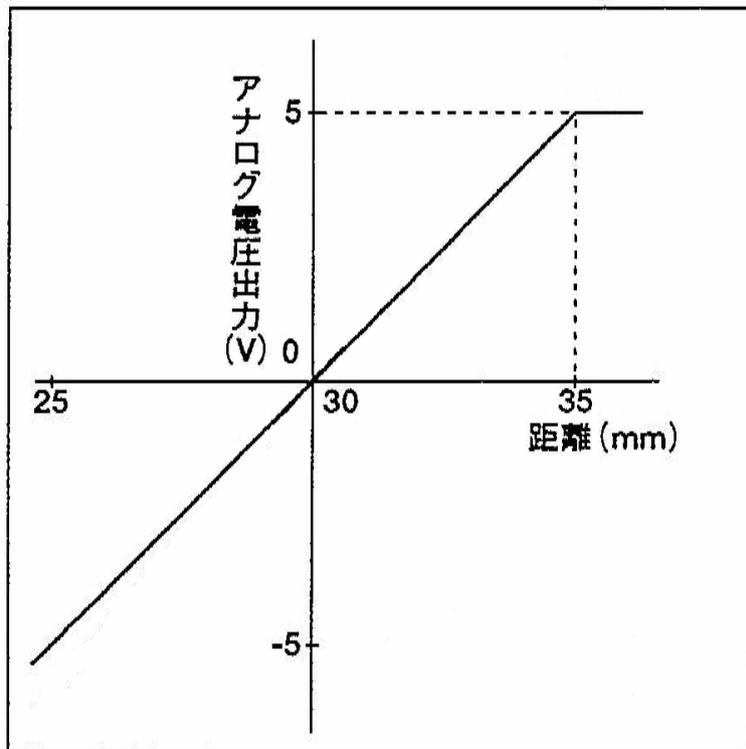


Fig.2-4 CCD レーザー変位センサ LK-030 電圧出力特性図

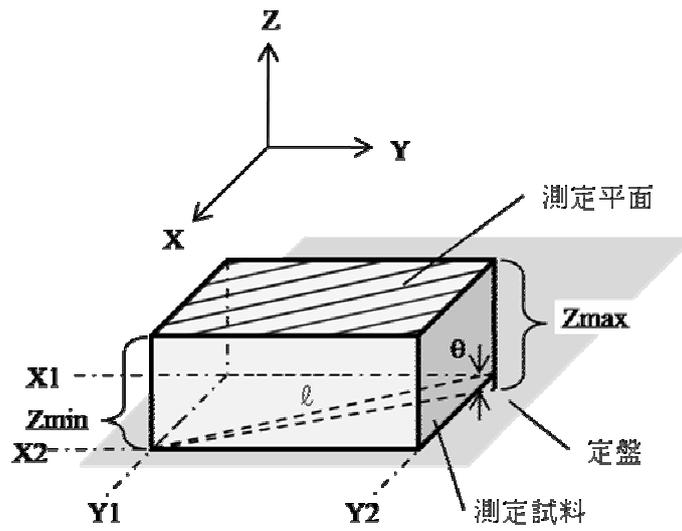


Fig.3-1 平行度試験の概要図

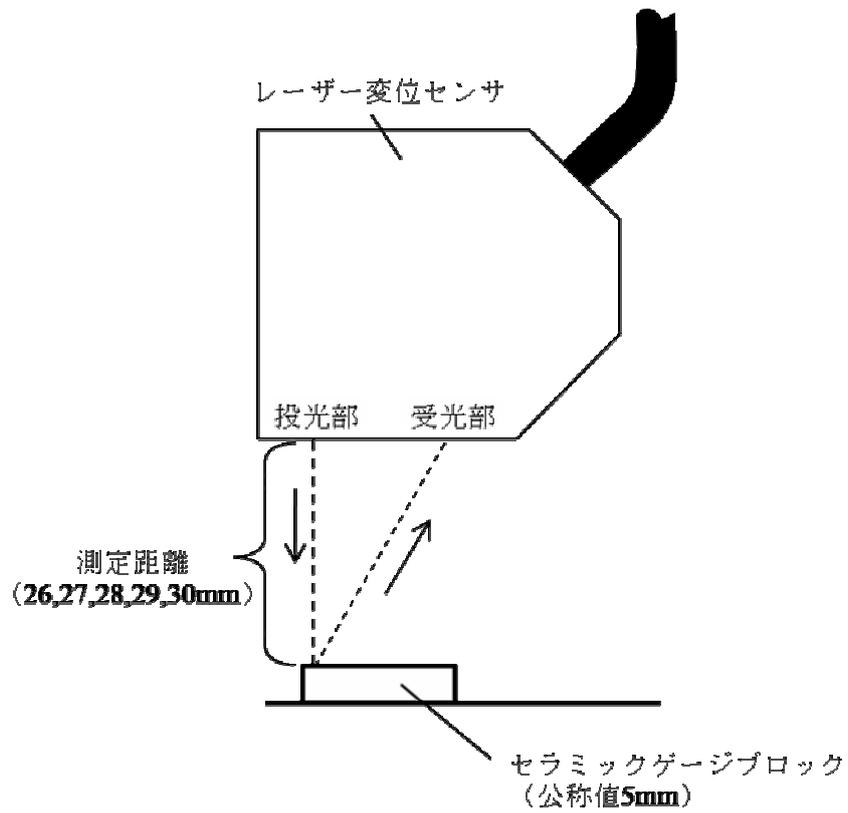


Fig.3-2 Z軸距離試験の概要図

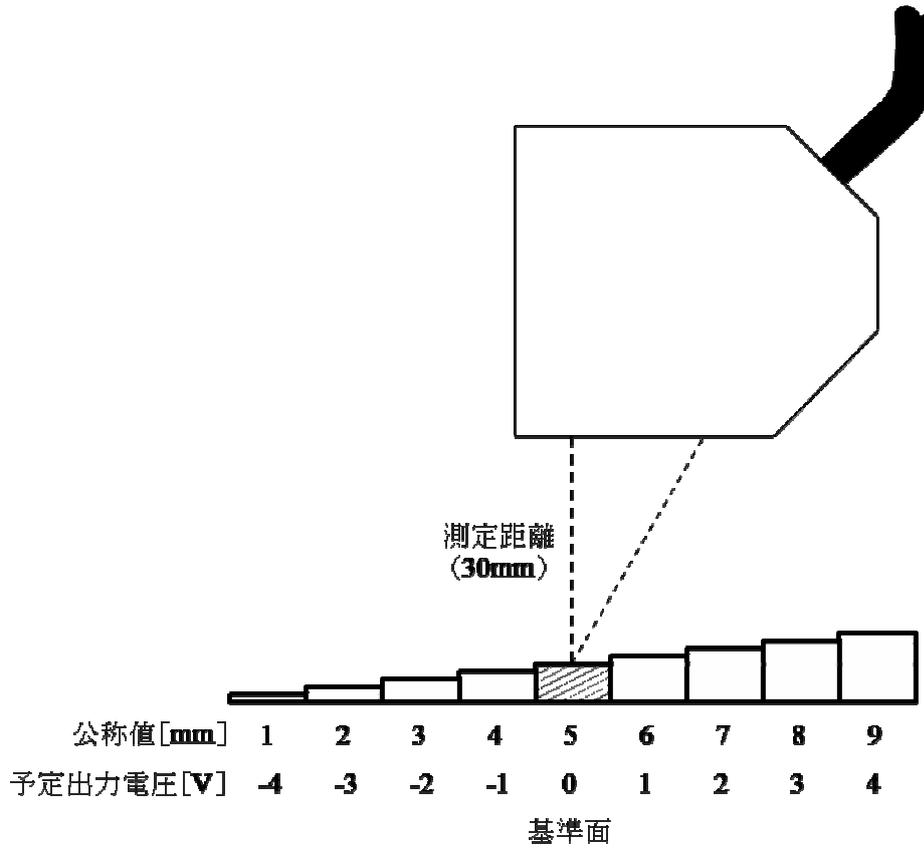


Fig.3-3 Z軸距離試験における試料厚さと出力電圧の関係

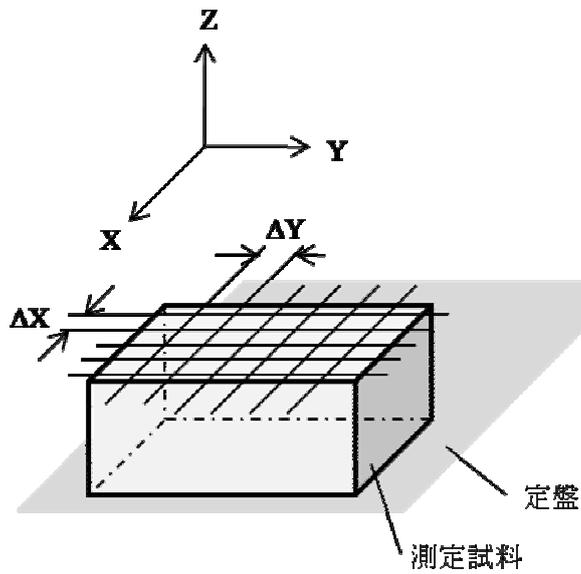
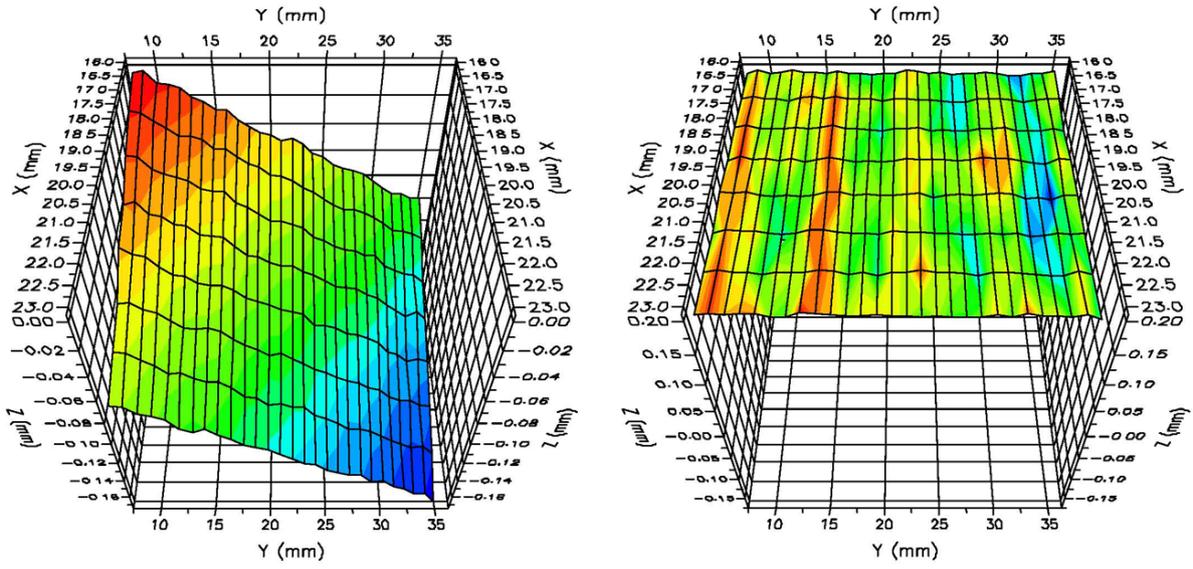


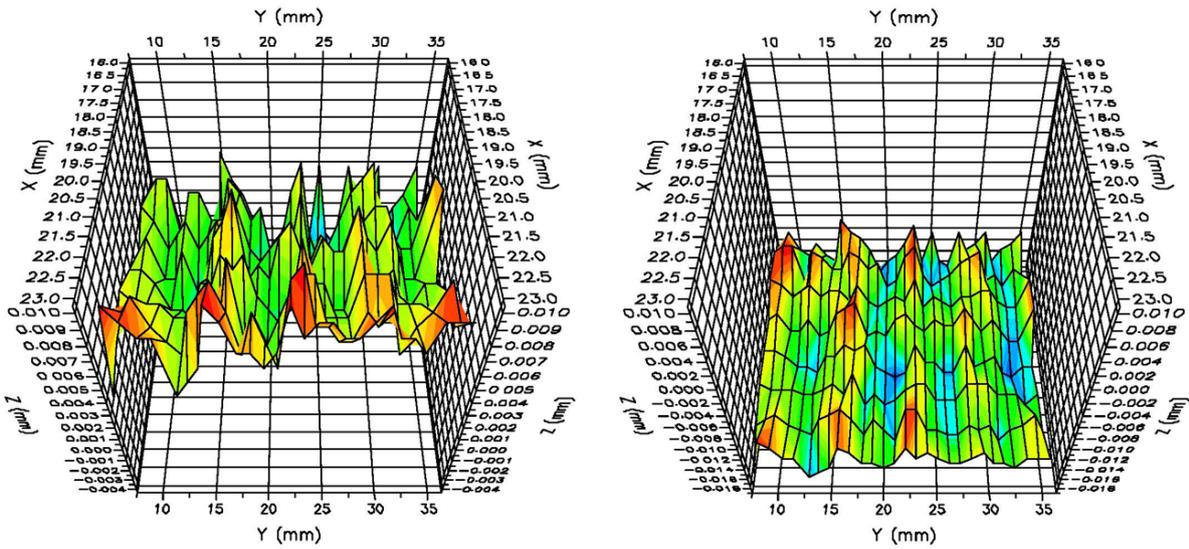
Fig.3-4 X-Y平面分解能試験の概要図



(1) 傾き補正前

(2) 傾き補正後

(a) 気泡水準器による水平出し



(1) 傾き補正前

(2) 傾き補正後

(b) 3Dグラフの出力結果による水平出し

Fig.4-1 平行度試験結果

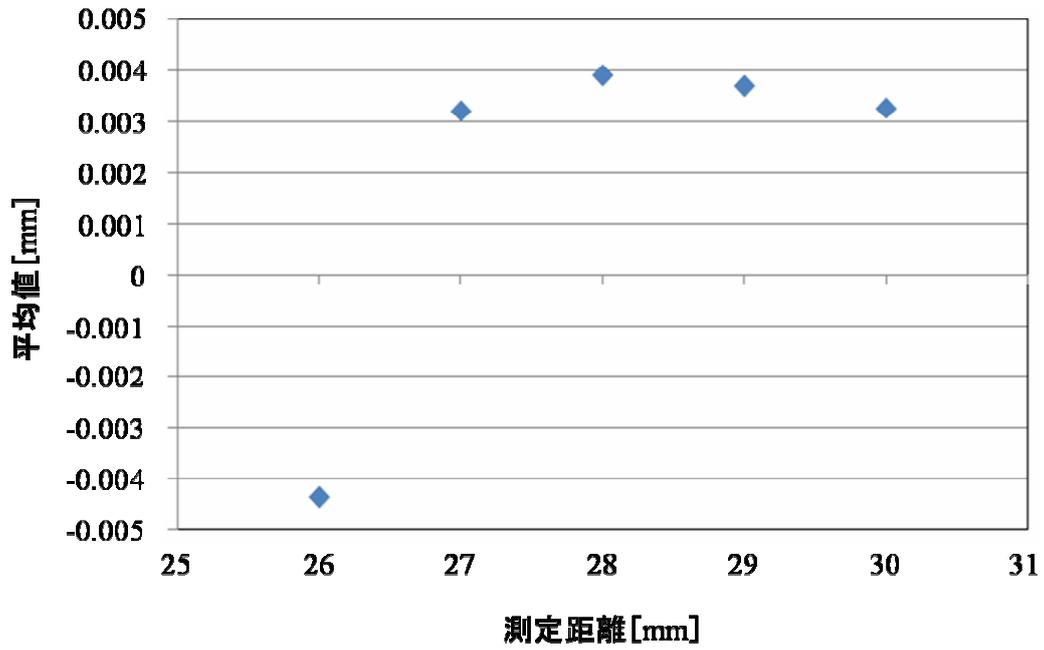


Fig.4-2 Z軸距離試験 (測定距離-平均値)

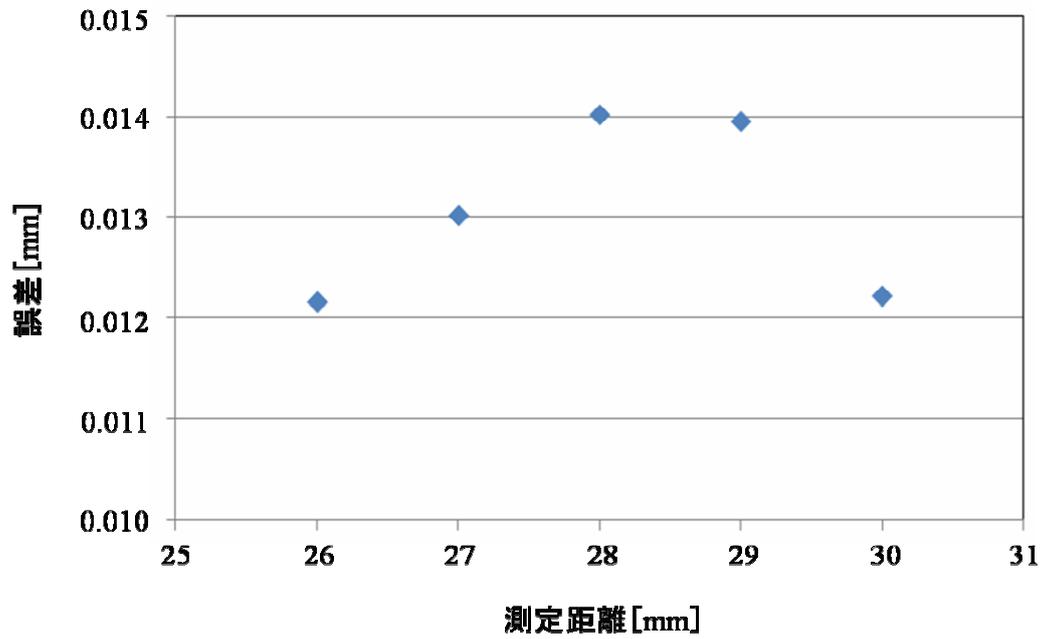


Fig.4-3 Z軸距離試験 (測定距離-誤差)

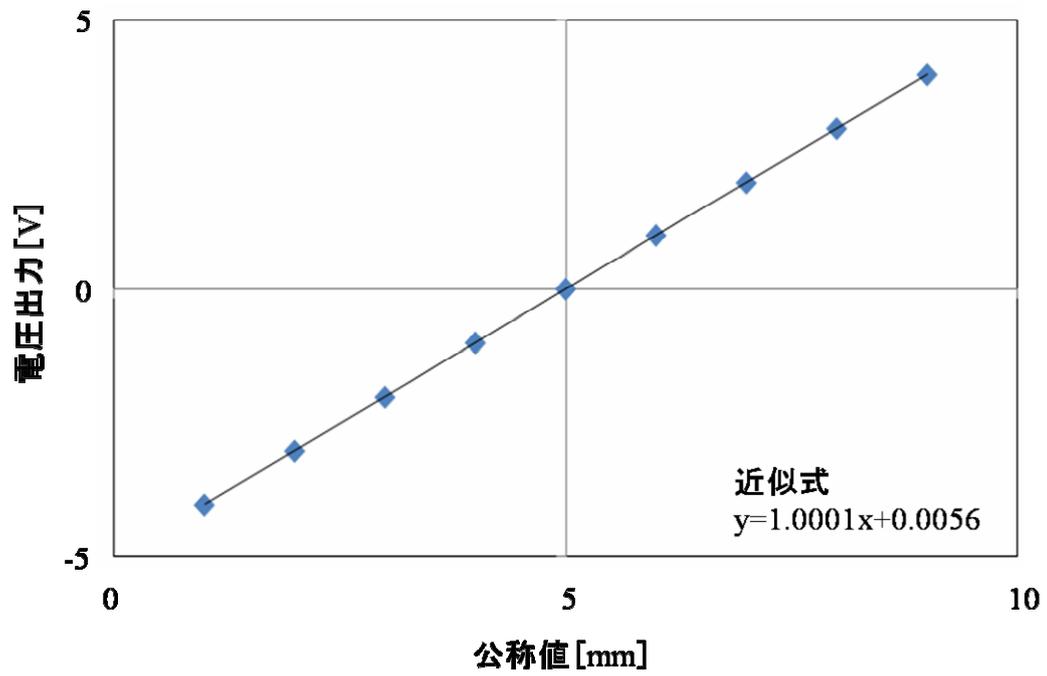
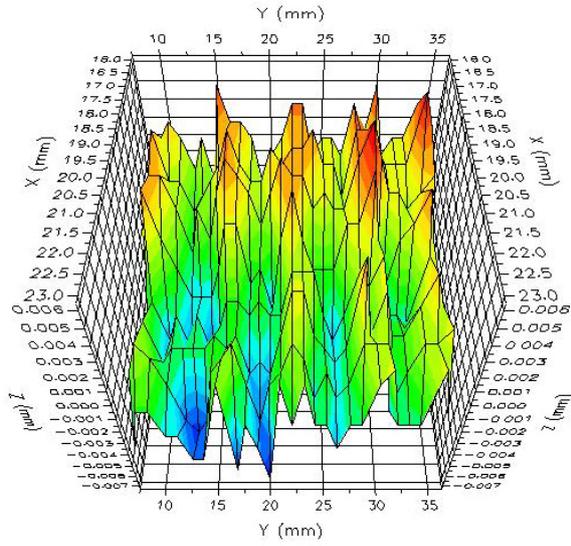
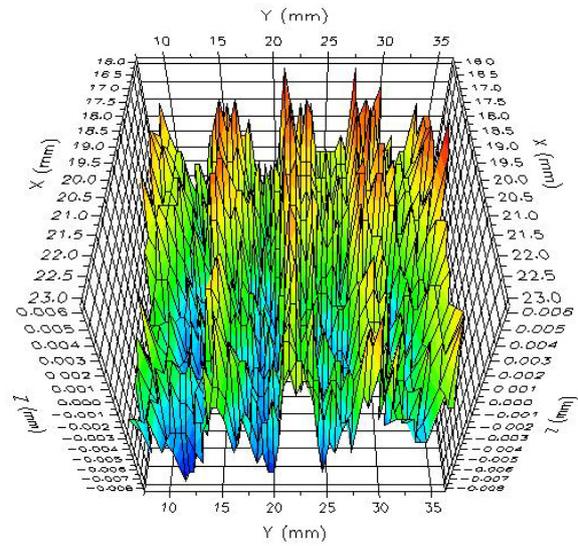


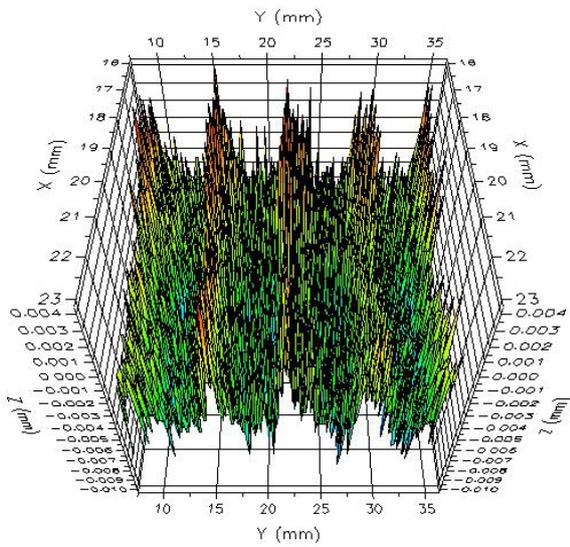
Fig.4-4 Z軸距離試験における試料厚さと出力電圧の関係



(1) Step 1



(2) Step 0.5



(3) Step 0.2

Fig.4-5 X-Y分解能試験結果

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70.205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘り度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨクタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻¹² cm ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁴ T
エルステッド (c)	Oe	1 Oe≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

