

画像処理を用いた変形測定とその応用

西村 惟之*

1. 緒言

最近のIC技術の進展に伴って、画像処理技術が身近なものになってきている。機械に視覚を持たせて製品の検査や自動選別、図面や記号の自動入力或いは生産工程において様々な計測や制御を行うものなど、極めて他種類の画像計測・処理装置が利用されている。また、画像処理ボードや画像処理ソフトも種々販売されたり標準化されたりしており、画像の専門家以外の人々にも比較的容易に利用できるようになってきている。画像処理に関する教科書・参考書も多数出版されている^{(1)・(2)}。

物体の形、位置、寸法、大きさ及び個数などを計測することは、一般に画像計測と呼ばれている。このような画像計測は、光情報を入力とするため非接触で2次元の計測が出来る。これにより、直接測定することが困難な、顕微鏡下で観察する様な微小領域、或いは高温の領域における計測手段として非常に有効である。また、画像を取り込む時刻が任意に選べるので、別時刻に取り込まれた複数の画像から、物体の変位や移動速度を計測することも可能である。ここでは、主に画像処理を用いた変形測定について述べることにする。

2. 画像計測システムの構成

製品の検査や自動選別など、生産工程で用いられる画像計測・処理システムは、リアルタイム性が求められることが多く、画像処理専用プロセッサと大容量画像メモリーを直接ホストコンピュータに接続し処理結果の解析をさせるものが多い。このような装置は、一般に単機能であると同時に高価である。いっぽう、PC（パーソナルコンピュータ）やEWS（エンジニアリングワークステーション）を用いて画像処理を行う場合は、ソフトウェアによって処理が行われるため、極めて融通性と柔軟性に富んでおり比較的安価であるが、処理時間が長くなる。しかし、最近のPCやEWSは、高速のCPUを備えたものが多く画像処理時間も短くなってきている。

3. 画像処理を用いた変形測定例

電子部品は、近年益々小型化しており、特に、ICリードフレームは、複雑化、多ピン化の厳しい要求にさらされている。リードフレームはICの性能を左右する重要部品であり、その製造行程は高精度加工の典形例となっている。ICリードフレームは、薄板の打ち抜きまたはエッチングによって作られているが、塑性加工品はエッチング品よりも正確な断面形状により優れているとき

れている³⁾。精密小物電子部品を塑性加工により製造にする場合は、薄板のせん断加工が重要な行程になっている。特に、ICリードフレームは、0.15~0.25mm程度の薄板から板厚とほぼ同じ程度のリードを抜き残す打ち抜き加工で作られており、厳しい加工条件にさらされている。その材料は、42%Ni鋼あるいは銅合金のような高強度で高電導性が求められる。一般に、焼きなまし材は、強度不足となるため用いられない。このため、切口面の性状や残留応力が製品の精度や性能に影響を与えている³⁾。現在、ICリードフレームの様な微細形状品の残留応力を測定する方法としては、細束X線応力測定装置を用いる以外に無い。しかし、この装置は、極めて高価であるばかりでなく、回折X線の強度が低いと測定時間も長くなる。微細形状品の残留応力測定例としては、腕時計のぜんまいに関するものがあるが⁴⁾、この方法は長い試料向きであってICリードフレームの様な短い形状の場合は適用が困難である。従って、ICリードフレームの様な微細形状品の残留応力分布を簡便で安価に測定する方法の開発が待たれていた。

ここでは、CCDカメラ付き顕微鏡とEWSを用いて、試料の一部分除去時の応力解放による変形計測を画像処理によって行い、微細形状品の巨視的残留応力分布を自動的に測定するシステムを開発した。

(3-1) 残留応力測定システム

デジタル画像処理は、デジタル計算機あるいはデジタル回路により画像の処理を行うものであり、その融通性、精度、再現性などにおいてアナログ画像処理と比較にならないほど優れている。しかし、画像の入出力装置、画像の記憶用大容量メモリー、さらに逐次処理による低処理速度などにデジタル処理の難点があるとされていた。近年の超高速A/D、D/A変換器、高速かつ大容量のICメモリーおよび画像処理ソフトなどの出現により、これらの難点も克服され急速に普及しつつある。画像処理を用いた切削工具の摩耗測定システム⁵⁾なども開発されており、高度に自動化された生産ラインの監視用システムにも利用されている。画像処理を用いた形状あるいは表面性状変化の測定は、測定対象物の画像の一定時間ごとの電算機への取り込みと、取り込まれた画像の変化量の計算によって行うことが出来る。このため非接触かつ迅速に対象の自動測定ができる点に大きな特徴がある。

ICリードを長方形断面ばりとみなし、はりの上面または下面を一様に層除去したときに生ずる曲率の変化から残留応力を求めるStableinの測定法を用いた⁹⁾。リードの残留応力は、はりの長手方向に一様と仮定し、曲率は、一様な曲げモーメントを受ける一端固定ばりの自由端のたわみから計算している。

ICリードフレームの残留応力自動測定システムは、XYステージの付いた落射照明式金属顕微鏡、25万画素をもつCCDカメラ、カメラユニット、画像処理ボードおよびEWSによって構成されている。このシステムのブロック線図を図1に示す。取り込まれたリード端面の画像は、ディスプレイ上で256×256ドットの範囲に0～63の強度を持つ数値として表現される。リード端面の光の反射強度が最大になるように光源を調節した後、予め定められた強度以上の点の画素を白、他を黒として画面を2値化し、白の部分を試験片端面の画像とした。試験片の片面層除去によって生ずる端面の移動量を求める方法は、白図形の図心の位置から求めるなど各種考えられるが、計算時間を考慮して適当なものを選ぶ必要がある。また、顕微鏡の倍率は、測定精度を上げるためには高い方がよいが、高倍率にした場合は焦点深度が浅くなることや、腐食液面とレンズとの距離が取れないことに注意する必要がある。

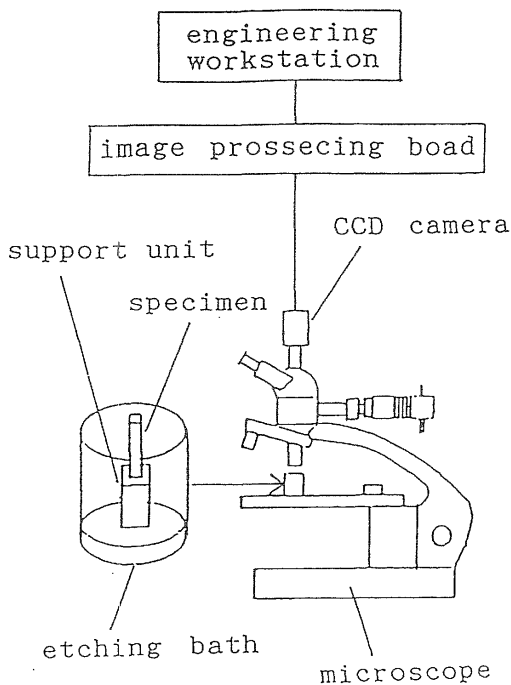


図1 実験装置のブロック線図

この実験では、試験片端面の移動量算出のための時間を少なくしデータ数を多くするためディスプレイ上に白で表される部分を4角形で近似し、4角形の角点の移動量から求めた。対物レンズと腐食液との距離を大きく取るため顕微鏡の倍率は50倍とした。この場合1ドットの大きさは、 $3.3\mu\text{m}$ である。画像は30秒間隔で取り込んだ。残留応力の測定プログラムのフローチャートを図2(a),(b)に示す。

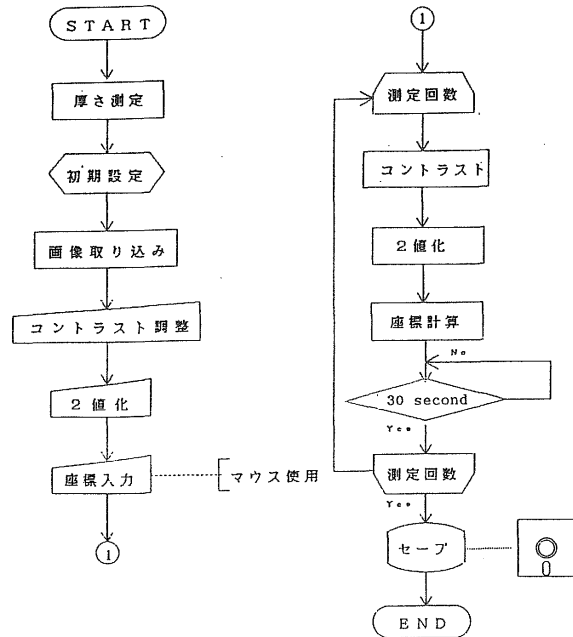


図2(a) 測定プログラムフローチャート

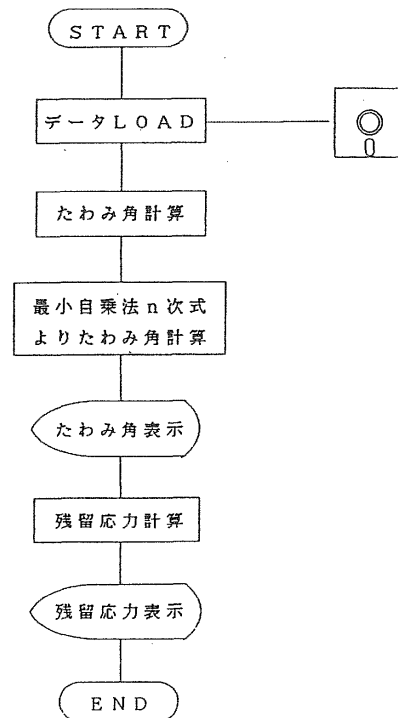


図2(b) 残留応力計算プログラムフローチャート

(3-2) 測定結果

前述の測定システムを用いてリードの残留応力を測定した。使用したICリードフレームは、図3(a)に示す形状で、材質は42%Ni鋼である。最初、リード切り出し時の塑性変形を抑えるため、アクリル樹脂に埋め込み、次に、研削切断機で図3(b)のブロック状に切り出す。これをアセトンに漬けてアクリル樹脂を溶かし去って、残留応力測定用試験片とする。測定に用いた試験片形状の一例を図4に示す。エクスターナルリードの場合は、板厚 0.25 mm 長さ 3.5 mm で幅は場所によって異なる。インターナルリードの場合は、板厚は同じであるが、長さ幅共に場所によって異なる。試験片は、残留応力を測定する面以外をエポキシ樹脂で覆った後、腐食槽の支持台に固定する。これに20%硝酸水溶液入れ、顕微鏡のXYステージに乗せ測定を開始する。

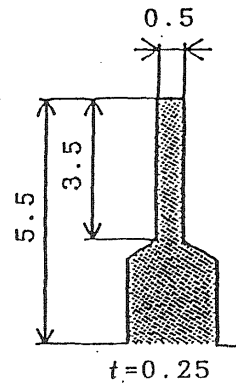
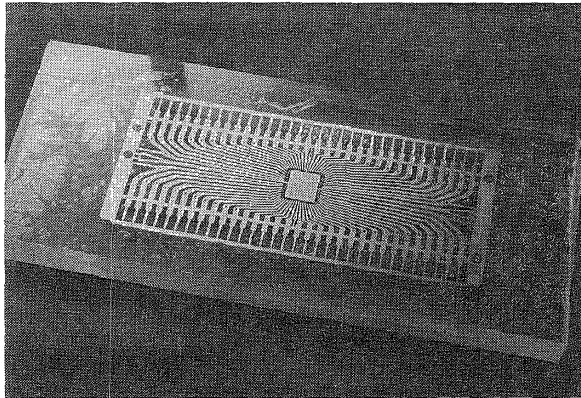
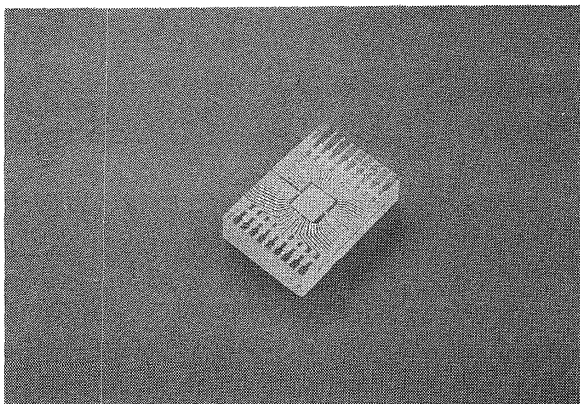


図4 エクスターナルリードの形状寸法



(a)

図3 64ピンICリードフレーム(a)



(b)

図3 64ピンICリードフレーム(b)

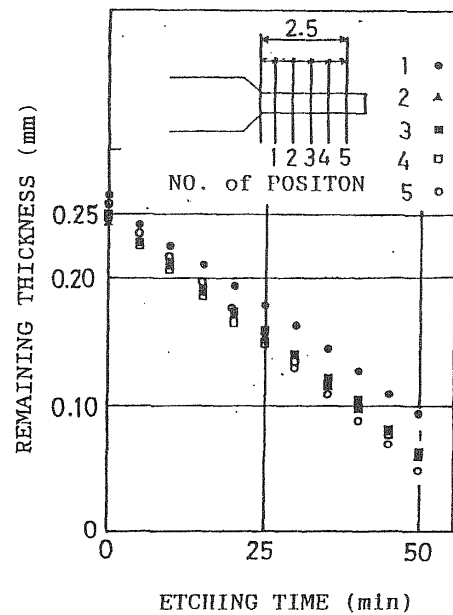


図5 腐食時間と試験片の厚さ

予備実験として、腐食時間と試験片残部の厚さとの関係を調べた。図4に示した試験片のフィレット部から5 mm間隔で残分厚さを測定した結果は、図5に示すようになっており、長さ方向にほぼ一様に削られていることがわかる。腐食速度は、 $4\ \mu\text{m}/\text{min}$ であった。よって、除去される層の厚さは腐食液に曝される時間によって制御できることがわかる。試験片の片面層除去によ

て生ずる端面の移動量は、計算時間を短縮するためディスプレイ上に白で表される部分を4角形で近似し、4角形の角点の移動量から求めた。図6にCRT画面の一例を示す。対物レンズと腐食液との距離を大きく取るため顕微鏡の倍率は50倍とした。この場合1ドットの大きさは、 $3.3\mu\text{m}$ である。画像は30秒間隔で取り込んだ。

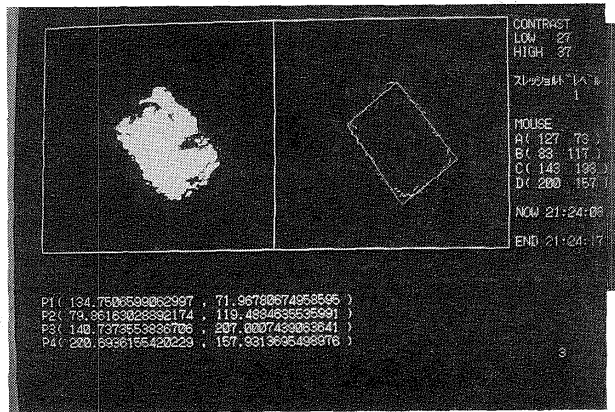


図6 2値化後の画像とその輪郭及び近似四角形

試験片は、長方形断面ばりであり、長手方向に様な残留応力分布をもつと仮定した。残留応力 $\sigma_x(z)$ は、次の計算式を用いて求めることができる^{(6), (7)}。

$$\sigma_x(z) = \frac{E}{6l} \left[(h-z)^2 \frac{d\theta}{dz} - 4(h-z)\theta + 2 \int_{\theta}^z \theta dz \right] \quad (1)$$

ここで、 E = Young率(1.5×10^2 GPa)、

h = 最初のはりの高さ、

l = 試験片の層除去される長さ、

z = 層除去された深さ、

θ = 試験片自由端の傾き

層除去後の残留応力の再配分によって生ずる試験片形状は円弧の一部と仮定できる。よって、試験片自由端の傾き θ と自由端のたわみ δ との関係は、次式で表すことができる。ここで、 α は、自由端の腐食されない部分の長さである。

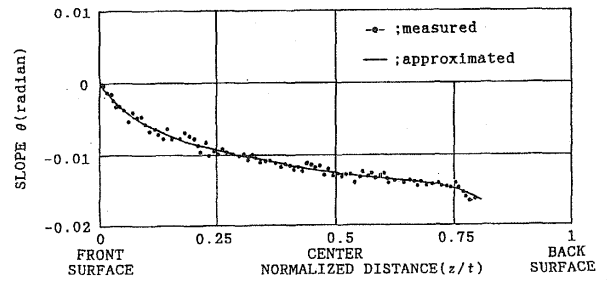


図7 たわみ角測定例

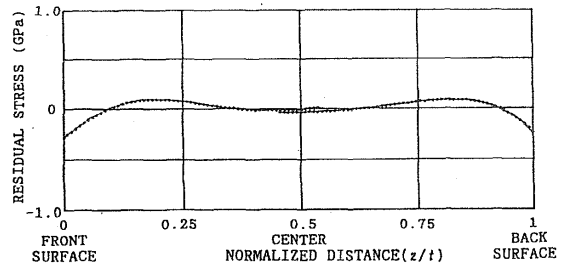


図8 エッチング成形品の残留応力分布

$$\theta(z) = \frac{2\delta(z)}{l+2\alpha} \quad (2)$$

ICリードフレームの表裏の定義は、ポンチに接触する側を表面としダイに接触する側を裏面とした。たわみ角測定結果の典型例を図7に示す。縦軸は式(2)で計算したたわみ角であり、横軸は無次元化した腐食深さである。図中、黒丸は測定点を示し、実線は最小自乗法を用いて6次の多項式で近似した曲線である。この多項式を式(1)に代入して残留応力を求めている。被覆材の剛性の影響を考慮すると、たわみ法を用いて一本のリードの表面から裏面までの全断面の残留応力分布を測定することは不可能である。対称な位置にあるリードを表面から層除去した場合と、裏面から除去した場合の残留応力分布を合成し全断面の分布とした。エッチング成形品のエクスターナルリードの残留応力分布を図8に示す。プ

レス成形品の残留応力に関しては、40ピンのICリードフレームについて測定を行った。図9および10は、プレス成形品のエクスターナルリードの残留応力分布である。図から明らかなように、エッチング成形品およびプレス成形品のエクスターナルリードは表面圧縮、内部引張りの残留応力分布をもっている。

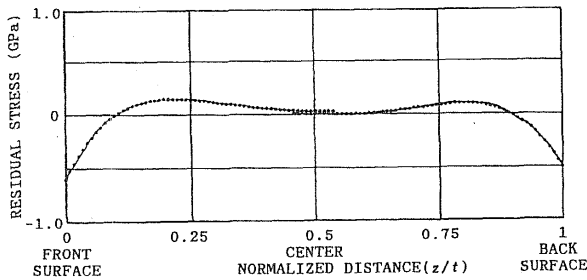


図9 プレス成形品の残留応力分布

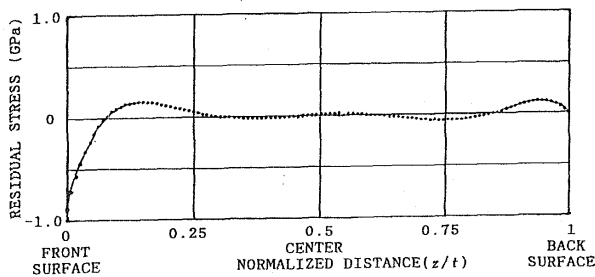


図10 プレス成形品の残留応力分布

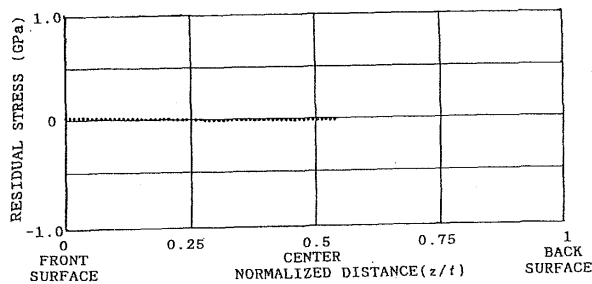


図11 焼きなまし材の残留応力

(3-3) 測定結果の考察

CCDカメラ付き顕微鏡とEWSを用いて、画像処理により微細形状品の巨視的残留応力分布を自動的に測定するシステムの開発を行い、ICリードの残留応力の測定した。実験結果の図から明らかなように、残留応力が前述のシステムで測定できることがわかる。このシステムに対する残留応力以外の因子の影響を調べるため腐食液を空気と変えた場合、焼きなまし材を測定した場合に付いて実験を行った。焼きなまし材の結果を図11に示す。図11から明らかなように、残留応力の測定値はほぼ零であり、残留応力以外の因子によって見かけの応力が生じないことがわかる。

一般にICリードフレームは、その幅に合わせて両側をスリッティングし、せん断応力除去焼きなましを行った後コイル状に巻きとった帯板材をエッチング加工またはプレス加工して製造される。日比野ら⁸⁾および神馬ら⁹⁾は素材を長手方向に条切りし幅方向の違いを調べた結果、スリット面を含まない条のそり、横曲がりおよびねじれは小さいと報告している。これは素材の残留応力は、幅方向に一樣なことを示している。ICリードフレームのエクスターナルリードは素材の長手方向を向いており、図8に示すエッチング成形品の残留応力は、素材の長手方向に垂直な断面内の残留応力を示しているものと思われる。

エッチング成形品および打抜き成形品の形状が同一ではないため直接比較出来ないが、エクスターナルリードは表面圧縮、内部引張りの残留応力をもっており、塑性加工品の方が表面残留応力の絶対値がやや大きい。

図9ではプレス加工品の残留応力分布が板厚にたいして対称な形状をしてい様に見える。しかし、これは表面から層除去した場合と裏面から層除去した場合とを合成して一枚の図にただで、これが実際の残留応力分布を表しているかどうかは検討を要する。リードの打抜き加工は、板厚方向に非対称な加工であるから残留応力分布も非対称になるの可能性がある方が大きいと思われる。

神馬ら¹⁰⁾は、打抜き変形機構の力学モデルを提案し、リードの長手方向の塑性変形様式を定性的に示している。これによると、表側は塑性的に縮み、裏側は塑性的に伸びるとしている。また、せん断面では、塑性的に伸びるとしている。不均一な塑性変形を受けた材料内の巨視的残留応力は、一般に塑性的に伸びた部分で圧縮、縮んだ部分で引張りとなるが、前述の力学モデルから推定するのは困難である。リードの板厚方向残留応力分布はリードの平坦度およびリード間の段差に関係する。リードの板幅方向の残留応力分布は位置ずれに関係する。

今回は、リード板厚方向の残留応力分布だけしか測定してないが、板幅方向の残留応力分布を測定することにより、リード打抜き時の塑性変形機構解明あるいはリードの品質管理に利用できるものと思われる。

3. 結 言

ICリードフレームの製造技術は、精密塑性加工の代表的なものである。その加工は、板厚0.15～0.25mmに対して、板厚の80%ぐらいの幅を抜き残す極めて厳しい加工条件にさらされるばかりでなく、製品精度は数 μm を要求されている。いっぽう、ICリードフレームはある程度の強度を要求されるが、いわゆる強度メンバーではない。したがって、疲労強度における影響因子としての残留応力のようICリードフレームの性能に決定的影響を及ぼす因子ではない。しかし、リードの残留応力分布を調べることによって、厳しい精度要求に答える適正な加工条件を決定するための基礎資料を得ることも可能ではないかと思われる。

終わりに、本文で引用した研究は天田金属加工機械技術振興財団の平成2年度研究助成をうけて行われたことを記し、御礼申し上げます。また、本研究は、第3回残留応力に関する国際会議(Nishimura, T.: Residual Stresses-III Science and Technology, 1(1992), 109.)で発表した。

文献

- 1) 例えば、安居・中嶋：基礎情報工学シリーズ18・画像情報処理、森北出版(1991)。
- 2) 例えば、土屋・深田：画像処理(テレビジョン学会編)、コロナ社(1990)。
- 3) 神馬敬・関根文太郎・関谷健助・勝瑞真一・森本巨：塑性と加工、28-315(1987)、355。
- 4) 川田雄一：機誌、55-406(1952)、720。
- 5) Pedersen, K., B.: International Journal of Mach. Tools Mnufact., 30-1 (1990), 131。
- 6) Stablein, F.: Kruppsche Monatsh, 12(1931), 93。
- 7) 米谷茂：残留応力の発生とその対策、養賢堂(1979)、49。
- 8) 日比野文雄・青木勇：塑性と加工、26-289(1985)、207。
- 9) 文献1)の355ページ。
- 10) 文献1)の362ページ。