

切削加工の分野で使用されるロードセルについて

Static Characteristics of the Load Cell Using for the Research of Cutting

谷 泰 弘*

Yasuhiro TANI

切削加工の分野で使用されている種々のロードセルの構造とその静特性について説明している。その中で最近注目を集めている平行平板形ロードセルおよびその改良形である円孔ロードセルについて、その特性および干渉性を対比しながら述べている。このロードセルは従来のロードセルに対して優れた特性を有しており、これを最適の状態にて使用するためにその受感部の種々の形状とその特徴について説明している

1. は じ め に

ロードセルとは、一般に抵抗線歪みゲージを使用した重量センサのことを意味している。すなわちその歪みゲージを、もっとも歪みが生じやすい部分（受感部）にはりつけ、その電気抵抗変化により、ロードセルの取り付けられている物体に作用する力を測定しようとするものである。力または変位のセンサとしては、電気的な変換素子としてもっとも利用しやすく、性能もよく、入手が容易であるなどの利点をもっているために、歪みゲージがよく利用されている。

機械工場の自動化が進められている現在、物理量の力を測定するためのこのロードセルは、研究に必須の装置としてのみでなく、一般の計測センサの一つとして、より高精度のものが要求されている。というのは機械加工において力は加工状態を間接的に監視するうえで、非常に重要な物理量となっているためである。現在この切削力は主に主軸を駆動している直流電動機の電流値から算出されているが、軽切削・仕上げ切削等においてはその電流値がノイズに埋もれ、検出困難となっている。特に精度が要求されるこれらの加工では、ロードセルは必須のものとなる。

本稿では切削加工の分野で使用されている各種ロードセルを紹介するとともに、最近注目を浴びている平行平板形ロードセルの静特性について解説する。さらに、平行平板形ロードセルを改良して、新しく筆者が開発した円孔平行平板形ロードセルの構造と干渉性について説明する。

2. 種々のロードセルとその特徴

ロードセルの寸法形状は、得たい剛性および歪み出力量により決定されるといっても過言ではない。一般に高出力を得ようとするれば、その分剛性が低下することを承伏せねばならない。しかしその出力量は、分解能の仕様

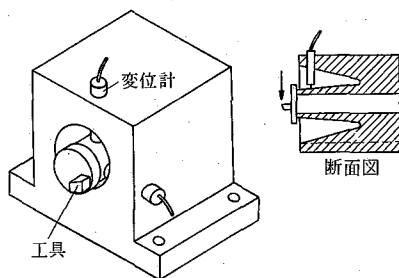


図1 円筒形状の片持梁型二方向ロードセル

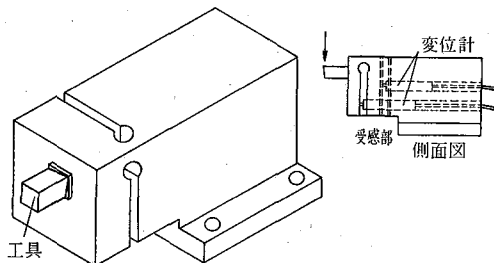
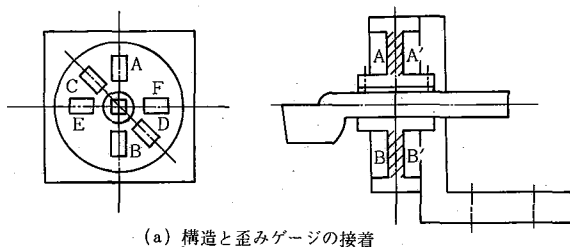
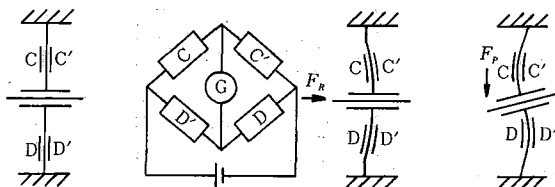


図2 スロット穴を利用した片持梁型二方向ロードセル



(a) 構造と歪みゲージの接着



(b) 測定原理

図3 弾性膜利用の三方向ロードセル

* 東京大学生産技術研究所 第2部

から決められることが多い。そのため、受感部は厚みを減少させたりしてあるのがふつうである。ロードセルをその構造から分類すれば、

- (1) 片持長方形はりを利用したもの
- (2) 両端固定長方形はりを利用したもの
- (3) 外周固定の円板を利用したもの
- (4) 中空または中実の円筒を利用したもの
- (5) 弾性環を利用したもの

となる。

一般に切削加工では、ロードセルは工具あるいは工作物を支持する形で使用される。そのため剛性が足りないと、本来の切削状態さえ変えてしまうことになる。そういった意味で、上述の(1)のみに含まれるロードセルは一般に使用されておらず、過去に製作されたものも剛性の点から実用されていない。ロードセルはたとえ検出荷重が一方向でも、一軸状態にて使用されることは少ない。そうしたときに、検出方向でない荷重に対していかに反応するかという方向分離性が問題となる。図1¹⁾は(1)と(4)の中間的なものである。このロードセルは二方向測定用であるが、剛性が不十分であることと、方向分離性が悪いという欠点を有している。三軸状態の切削力は工具に対し、トルクを生じ、それが干渉を生むことになる。

図2はShaw²⁾により製作された、(1)に類する二方向ロードセルである。本品は剛性が歪出力量に対して小さいうえに、モーメントの影響を受けやすいという欠点を有している。図1、図2のロードセルは、ともに変位計を用いて、力を検出しているが、歪みゲージにより検出することも不可能ではない。

図3は奥島ら³⁾により作られた三方向ロードセルで、(3)に含まれるものと考えられる。力は円板中央部に装着された工具から伝達される。A, B の位置にはられた歪みゲージにより鉛直方向の力を検出し、E, F の位置にはられた歪みゲージにより水平方向の力を検出する。さらにC, D の位置にはられた歪みゲージから軸方向の力を検出する。円板に沿った方向の力によるC, D の歪みゲージへの出力は同図(b)に示されるようにホイートストンプリッジを組むことにより、相殺される。この形式のロードセルは、一般に剛性・固有振動数が小さく、また方向分離性があまりよくない。

図4⁴⁾は、(1)と(2)の中間的な形式の二方向ロードセルである。鉛直方向の力 F_c は、梁AC, EF にはられた歪みゲージにより検出し、水平方向の力 F_t は、梁AB, ED の歪みゲージにより検出している。本ロードセルは剛性が低いうえに、歪みゲージが非常にはりにくい構造となっている。また F_c は梁AB, ED に、 F_t は梁AC, EF に曲げを生じさせるために、方向分離性もあまりよくない。

切削の分野でもっともよく用いられているのが、図5に示される八角形弾性応力リングである。これは(5)の変形であり、歪みゲージのはりやすさ・方向分離性・剛性などの点から、こうした形状をしている。しかし、これは逆に加工を困難にしている。このロードセルは、鉛直方向と水平方向の二方向の力に対して、同図(b)に示されるような変形をする。そのために鉛直方向の力に対しては、A点にはった歪みゲージで、水平方向の力に対してはB点にはった歪みゲージにより検出する。すなわち同図(a)の右側の図に示されるように垂直方向の

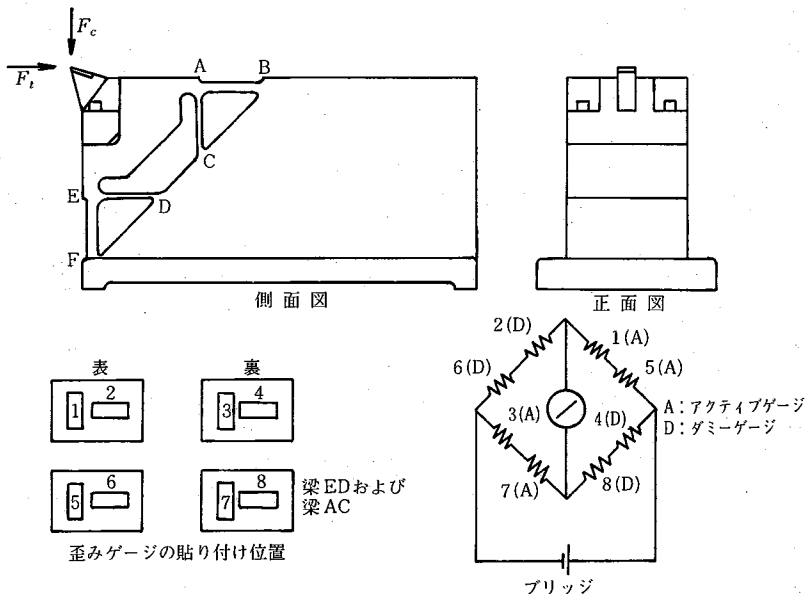
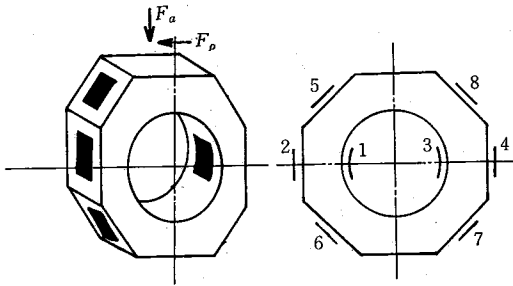
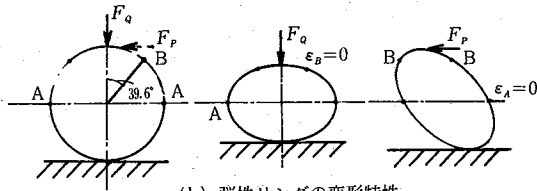


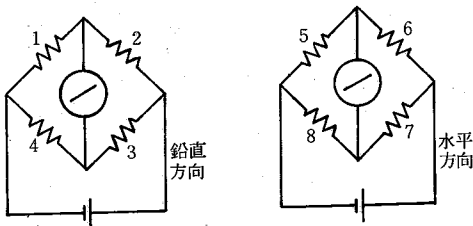
図4 トラス構造型の梁を利用した二方向ロードセル



(a) 構造と歪みゲージの接着



(b) 弾性リングの変形特性



(c) ホイートストンブリッジ

図 5 八角形応力弾性リング

力に対して1~4の位置にはった歪みゲージで、同図(c)のようにブリッジを組むことにより出力を得る。しかし一般に1,3の位置に正確に歪みゲージをはりつけることは困難であるので、そのかわりに2,4の位置に二方向ゲージをはりつける形で用いられている。

本品は二方向ロードセルとして単品でも使用されるが、図6のように組み合わせて全体として三方向ロードセルといった形でも用いられている。しかし同図のような使用形態では、力が常に偏心して作用するので、干渉出力が大きく現れるようである。

八角形応力リングは、剛性を高めるために図7のような形に変形させて使用されている。本ロードセルは、俗称めがね形ロードセルといわれているもので、上部に工作物または工具に固定させて使用している。このロードセルを使用することにより、荷重作用点の偏心の度合いを小さくし、そのために生じる干渉出力を小さくすることが可能である。

3. 平行平板形ロードセル

荷重作用点の単位変位量当たりの歪み出力量が大き

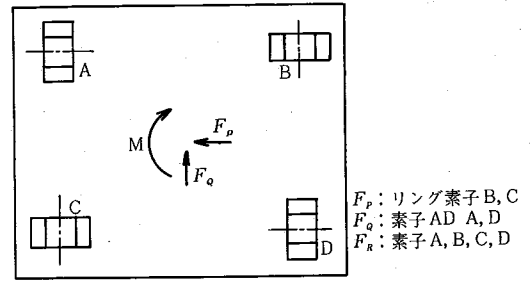


図 6 弾性リングによる三方向ロードセル

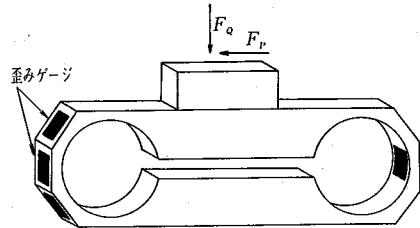


図 7 めがね形ロードセル

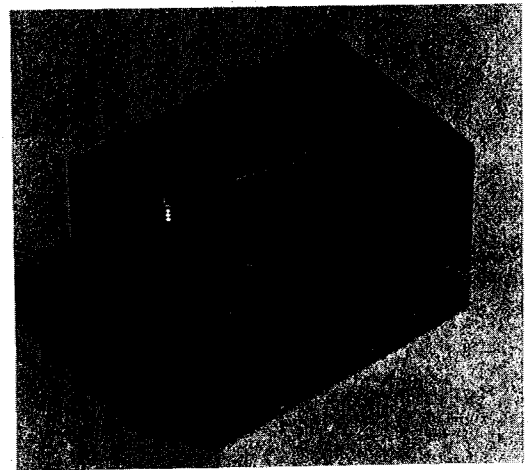


写真 1 平行平板形一方向ロードセル

く、注目を集めているのが、平行平板形ロードセルである。このロードセルは畑村⁵⁾により開発されたもので、その基本形は写真1のような形状をしている。すなわち直方体形状のブロックに、四角形状の穴が貫通した構造をしている。四角穴により断面係数の減少している部分の、上下の平行な梁を平行平板と称している。左端面を

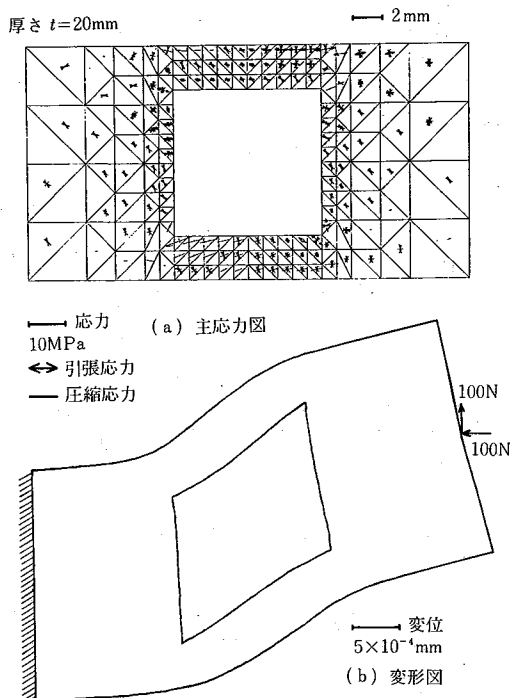


図8 平行平板形ロードセルの変形

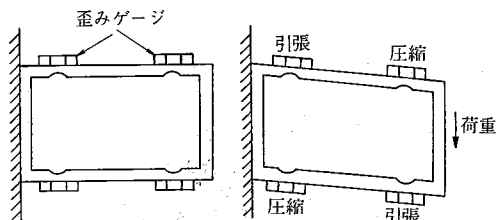


図9 はかりの原理

固定し、右端面に横方向荷重をかけると、一様な梁の曲げの変形のみでなく、平行平板部とこれを支持している支持部の撓み角が零となるような変形が生じる。これを平行平板のモードによる変形と呼んでいる。すなわち本ロードセルに二方向の荷重をかけると、図8(b)に示されるような変形を生じる。図8は平行平板形一方向ロードセルの変形と主応力のような、有限要素法により解いたものである。同図(a)に示されるように、支持部と平行平板部との境界部分には、大きな応力集中が生じている。この部分に歪みゲージをはれば、大きな出力を得ることができる。

図9は最近商業用、または工業用秤りに応用されている平行平板形構造である。横荷重に対して図に示されるような垂直歪みが、ゲージはりつけ部分に生じている。平行平板形ロードセルは、前述の八角形応力リングのほぼ同一の寸法のロードセルに対して、約40倍の単位変位

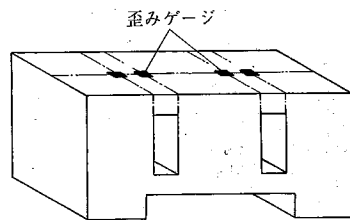


図10 両持梁型構造の平行平板形一方向ロードセル

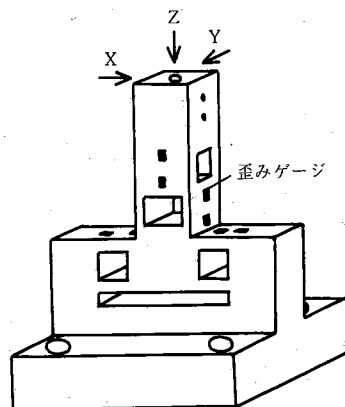


図11 積層型三方向ロードセル

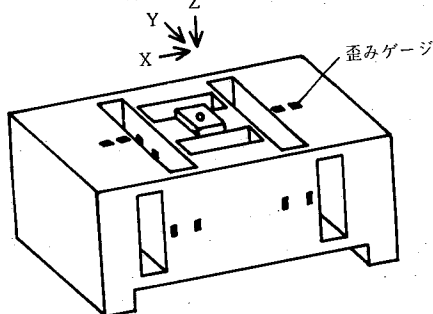


図12 門型三方向ロードセル

量当たりの歪み出力量を有している。このように剛性が高いだけでなく、固有振動数も大体1kHzをこえており、使用可能範囲が広い。

写真1の一方向ロードセルは片持梁型であるが、より高い剛性を得るためには、図10のような両持梁型の一方向ロードセルを使用すればよい。荷重作用点は上面中央部で、下の足の部分でこのロードセルを固定する。二対の平行平板部を有しているが、荷重の偏心による干渉出力を相殺するために、歪みゲージを上面のみ、あるいは下面のみにはり出力を得ている。そのために上部の平行平板と下部の平行平板にてその厚さを変化しても干渉には影響を及ぼさない。

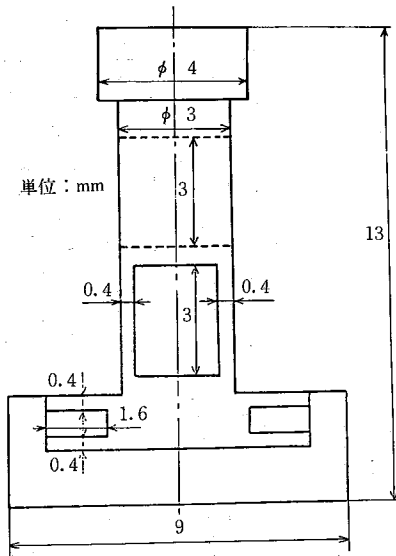


図13 平行平板形小型三方向ロードセル

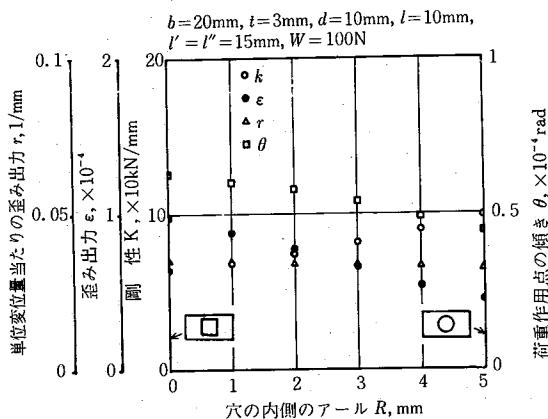


図14 四角穴の四隅のアールによる平行平板形一方向ロードセルの特性の変化

平行平板形ロードセルは、基本形状が単純であるために、同一点に作用する三方向の力を検出するロードセルを容易に設計することができる。図11は単一砥粒に作用する三方向の力を検出するために製作したロードセルである。非常に大きな力が作用する鉛直方向は両持梁型構造となっている。図12は平面研削において工作物に作用する三方向の力を検出するために製作したロードセルである。剛性を高めるために全方向とも両持梁型構造(形状から門型構造と呼んでいる)となっている。また単品では移動偏心荷重に対して干渉を生じ、またモーメントの影響が出ることが考えられるので、図6のように四個のロードセルを組み合わせて使用している。図4に示したロードセルも平行平板形ロードセルとして使用すれば、より高い歪み出力が得られるものと考えられる。

4. 円孔ロードセル

ある実験のために小型の三方向ロードセルを製作する必要性を生じた。平行平板形ロードセルの四角穴を機械加工により精度よくあけることは、非常に困難であるために、図13に示されるような寸法の三方向ロードセルを白金加金で精密鑄造により製作した。白金加金は歯科鑄造用に使用されている白金合金で、鑄造可能金属としては大きな強度および弾性限界を有している。しかしこのロードセルは、

- (1) 模型をいちいち製作することが必要で、製作に時間を有する。また鑄造法のため仕上げが必要となる。
- (2) 加工精度が小さいために悪く、干渉出力が大きい。
- (3) 白金加金を使用しているために、コストが高い。
- (4) 固定具と一体でないため、擬似干渉が生じる。

などの欠点を有している。

一方平行平板形ロードセルの四角穴の四隅のアールの不一致が干渉性にどう影響するかが問題となっていた。そこで有限要素法を用いてこのアールの影響を解析してみることにした。図14は四隅のアールが同一の場合、アールが一方向ロードセルの静特性に及ぼす影響を調べたものである。 $R=0$ は全くの四角穴の場合で、 $R=5$ は円孔の場合である。アールが増加すると、剛性は増大するが、得られる歪み出力量は減少する。そのため荷重作用点の単位変位量当たりの歪み出力は変化していない。このことは静的な特性としては同一であることを意味しており、円孔の直径を変えることにより、全く同一の剛性と歪み出力を有するロードセルを製作することが可能であることを示している。受感方向の横荷重に対して、受感部の平行平板部に生じる軸方向の垂直歪みは、アールの大きさにより図15のように変化する。すなわち平行平板部と支持部との境界点において、最大・最小値を生じているが、アールの増大とともに、その値の絶対値は減少している。このことにより境界点の歪みは広範囲にわたってほぼ同一の値を示しており、歪みゲージのはりつけ位置のずれにより、得られる歪み出力の低下が小さいことがわかる。図16には検出方向の荷重でない軸方向荷重が作用したときの、アールの変化による平行平板部に生じる軸方向垂直歪みの分布の様相を示す。平行平板部中央部では大きく変化しているものの、支持部との境界点における歪みはほとんど変化していない。したがって他方向の荷重による干渉性は、円孔であってもほとんど同一となるものと思われる。

図17には円孔一方向ロードセルの形状を示す。図15に示されるように円孔の場合には、垂直歪みの最大・最小値は支持部との境界点よりも、わずかに円孔部内側に

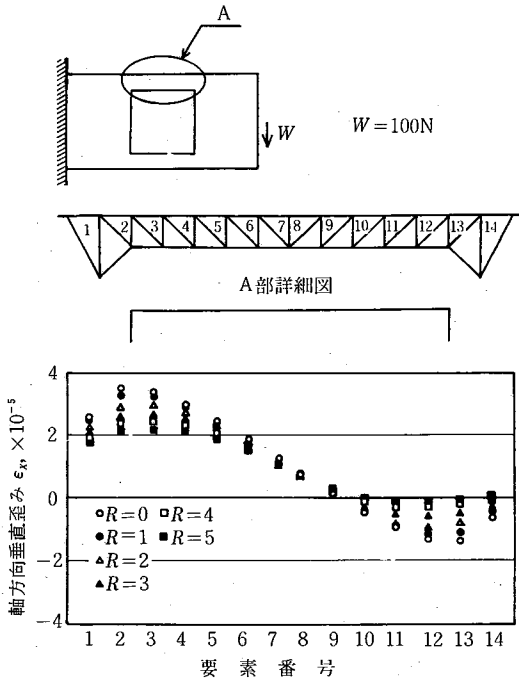


図15 四角穴の四隅のアールによる、横荷重により生じる平行平板部の軸方向垂直歪みの変化

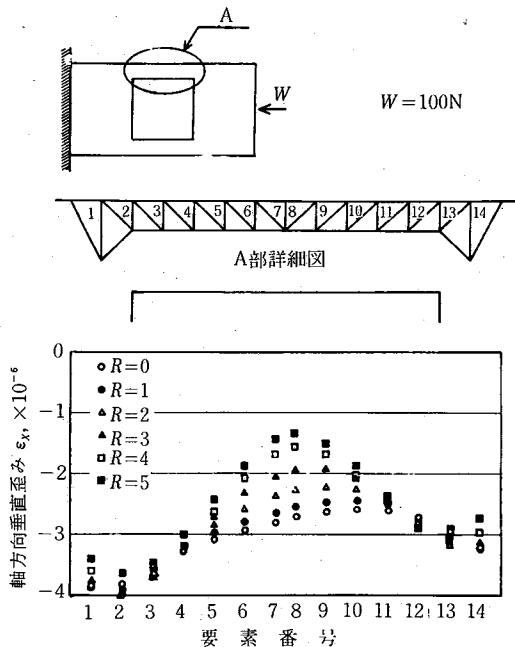


図16 四角穴の四隅のアールによる、軸荷重により生じる平行平板部の軸方向垂直歪みの変化

生じるので、歪みゲージは図17のようにはりつけるのが好ましい。円孔ロードセルは、四角穴のロードセルに対して加工が容易であるため、機械加工により図18に示される円孔小型三方向ロードセルを製作した。このロードセルは前述の平行平板形小型三方向ロードセルの欠点を

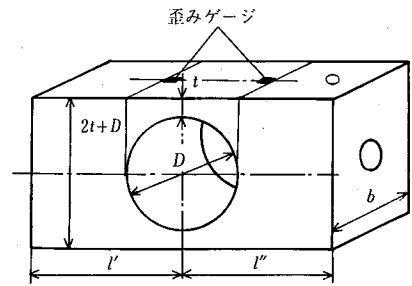


図17 円孔一方向ロードセルの形状

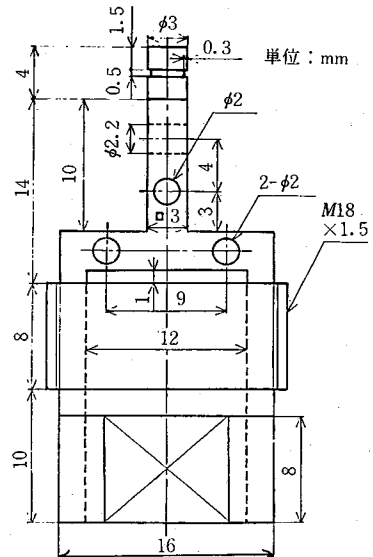


図18 円孔小型三方向ロードセル

考慮して、固定部分と一体構造になっている。リン青銅で製作したこのロードセルは、線形性・非履歴性・方向分離性に優れており、高出力・高剛性を有している。固有振動数も1.17~1.73 kHzと高い。本品は一品にて同時に三方向の力を測定できるという平行平板形ロードセルの長所をそのまま受けついでおり、小型でそうした性能を有しているロードセルとして、非常に工業的有用性の高いものと思われる。

5. 円孔一方向ロードセルの干渉性

円孔一方向ロードセルの干渉性について有限要素法により解析してみた。円孔ロードセルの基本形である一方向ロードセルについて解析を行うことは、その設計上大きな意味をもつものと考えられる。検出方向でない荷重の偏心による円孔一方向ロードセルの干渉性を図19に示す。偏心量がロードセルの板厚の1/2のとき(荷重が上端または下端に作用しているとき)でさえ、その干渉量(検出方向の同一量の荷重による歪み出力に対する比)は0.5%以内であり、大きな影響はないと考えられる。また偏心量が3/8にて干渉量は零で、その前後にて干渉

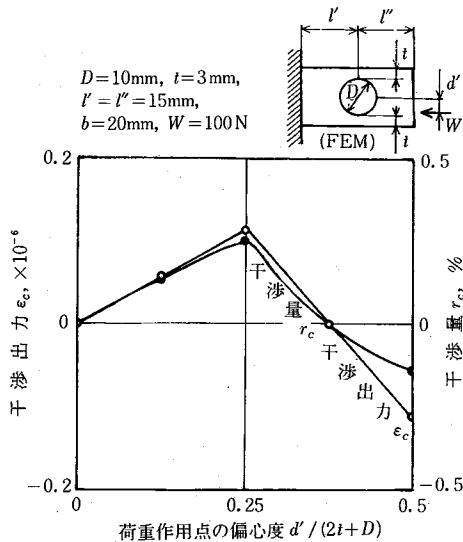


図19 円孔一方向ロードセルの荷重の偏心による干渉性

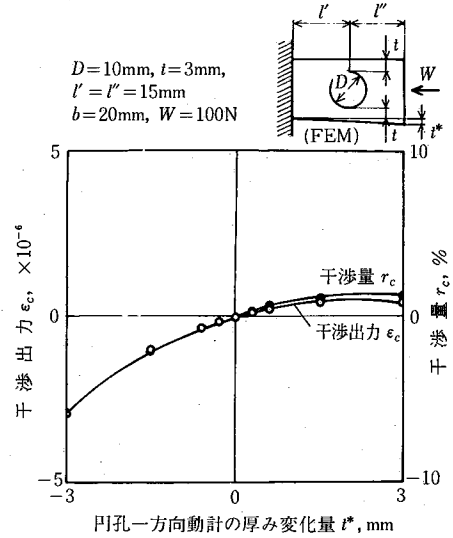


図21 円孔一方向ロードセルの形状による干渉性(2)

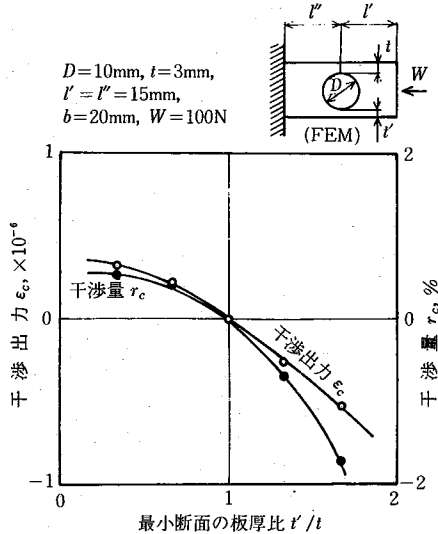


図20 円孔一方向ロードセルの形状による干渉性(1)

出力の正負が逆転していることは特徴的である。

図20には最小断面における上下の板厚が異なる場合の、軸方向荷重による干渉性を示す。これは加工誤差により円孔の中心がずれた場合を想定しての解析であるが、一方の板厚が他方の板厚の2倍になったときですら、干渉量は数%程度である。したがって実際の場合の干渉量はもっと小さいものと考えられる。2倍の場合と0.5倍の場合にて、干渉量の絶対値がくい違っているのは、板厚が薄くなると支持部との境界点における応力集中の様相が変化するためと、検出方向の荷重に対する歪み出力が増大するためであろう。

図21にはロードセルの上面あるいは下面が傾斜しており、上下の面の平行度が失われている場合の干渉性を示す。板厚が増大する方向に上下の面のいずれかが傾斜

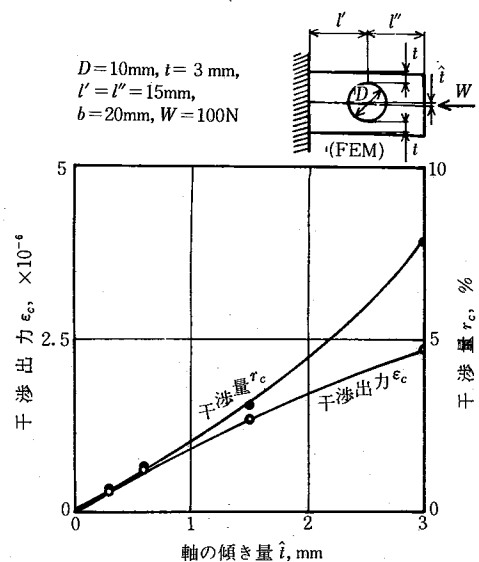


図22 円孔一方向ロードセルの形状による干渉性(3)

しているときは、あまり大きな干渉量ではないが、逆に板厚が減少する方向に上下の面のいずれかが傾斜しているときには、ロードセルの全長に対して、1/10の傾斜を有する場合でさえ、干渉量はほぼ6%前後となっている。通常は1/10という加工誤差を生じることはありえないが、面の平行度に関しては一応十分な注意を払うべきであろう。

図22にはロードセルの軸が傾斜している場合の干渉性を示す。これはロードセルの検定時あるいは固定時に傾斜して装着された場合を想定して、その擬似干渉について考察したものである。干渉量は1/10の傾き(傾斜角 5.71°)の場合にて約8%であり、非常に大きいと考えられる。これはもともとロードセルの軸が傾斜していても

生じる干渉量ではあるが、傾斜して装着されることにより生じる擬似干渉量の方が起こりうる可能性として大きいと考えられる。この結果より固定方法・固定の際の垂直度等は十分注意すべきであることがわかる。

6. 種々の円孔ロードセルと受感部の形状

本章では前述の円孔ロードセルを変形して製作した種々の円孔三方向ロードセルと、円孔ロードセルの受感部の形状について説明する。写真2には門型円孔三方向ロードセルの形状を示す。この写真のようにより大きな剛性を必要とする場合には円形ではなく、二つの円孔をつないだような長円形の穴にすればよい。ところがこの二つの半円をつなぐ平行な直線部分の形状はロードセルの静特性にほとんど影響を与えないので、写真3のように円孔をつないだバーベル状の穴にすればよい。円孔については精度は大きな意味をもつが、それを接続する部分は精度的にどんな形状であっても関係がなく、鋸により切断した状態のままで問題はない。

円孔ロードセルの受感部としては、まずもともと単純なのが図23(a)に示される円孔である。高い剛性を必要とする場合には上述のように同図(b)に示されるごとく軸に垂直な方向に長いバーベル状の穴を使用すればよい。一方高出力または大きな変位量を得たい場合には、同図(c)のように軸方向に長いバーベル状の穴を使用するとよい。高剛性・高出力をともに得たい場合には、四つの円孔を接続したような同図(d)の形状の穴にすればよい。この受感部と図9のはかりの受感部を比較してみれば、非常によく似ていることがわかる。この一連の受感部を有するロードセルを円孔平行平板形ロードセルと称している。いずれの受感部の場合にも歪みゲージは支持部との境界点近傍にはりつければよい。

7. あ と が き

切削加工の分野において使用される各種ロードセルとその特性について解説した。平行平板形ロードセルは、高剛性・高出力および優れた方向分離性から従来のどのロードセルよりも優れていると考えられる。このロードセルの加工性の問題点をとりぞいた円孔ロードセルはより優れた特性を有していると考えられる。ここでは切削加工の研究用として紹介したが、この円孔ロードセルは、他の種々の分野に適用できるものと思われる。そのときここにその一部を示した円孔ロードセルの有限要素法による解析結果は、設計上貴重なデータを与えるものと考えられる。

最後に本解説を書くにあたり、図面のトレースを引き受けて下さった、本所佐藤研究室 尾高広昭技官に感謝する。
(1982年3月11日受理)

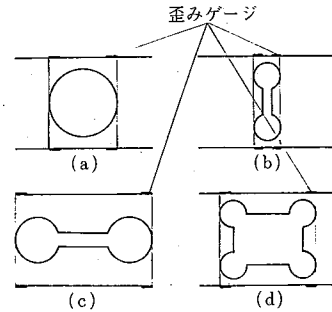


図23 円孔一方向ロードセルの受感部の形状

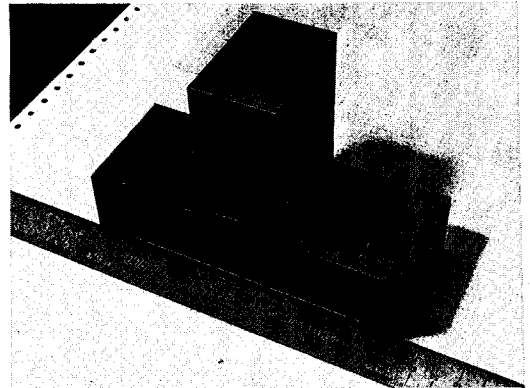


写真2 門型円孔三方向ロードセル

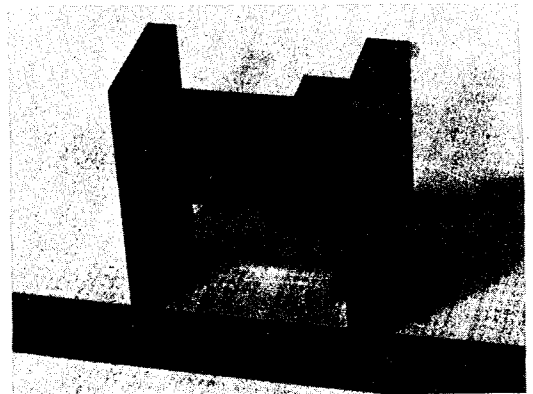


写真3 積層型円孔三方向ロードセル

参 考 文 献

- 1) A. W. J. Chisholm: Progress Report on the Wear of Cutting Tools, H. M. Stationary Office, MERL Plasticity Rep. 106, 1955
- 2) M. C. Shaw: Metal Cutting Principles, MIT Press, Cambridge, Mass., 1955
- 3) 奥島, 徳永, 田子: 抵抗線ひずみ計を利用せる切削3分力測定器, 日本機械学会論文集, 21, 110号 (1960) 709
- 4) G. Boothroyd: A Metal Cutting Dynamometer, Engineer, London, Vol. 213, p. 351, 1962
- 5) 竹内, 千々岩, 畑村, 内崎: 建設機械が土から受ける応力の検出器の開発, 日本機械学会論文集, 44, 381(1978) 1778