

ンサを支える構造部材の剛性を小さく設計したことから、磁性力が働いた時にセンサの片持ち梁のたわみが生じて、指定した距離よりも磁性力が働く向きに実際の距離が増減することがわかった。

すなわち、永久磁石の同極を向かい合わせた場合はそれが近づくにつれて、距離の二乗に反比例した反発力が働くことが予想される。そのときの両者間の距離を  $d$ 、比例係数を  $G$  とすると、反力  $F$  は近似的に

$$F = \frac{G}{d^2} \quad (1)$$

であらわせると考える。ところが、図8に示すように、この反発力によってセンサの構造部材が変形し、これに伴う弾性力と磁性反力が釣り合うように永久磁石どうしの距離が  $\delta$  だけ広がる。このときの磁性反力の大きさは、距離が  $d + \delta$  となるので、(1) 式から

$$F = \frac{G}{(d + \delta)^2} \quad (2)$$

となり、この影響から近づく距離に対して反発力の増大傾向が幾分緩和された距離—磁性力特性になると考えられる。

一方、片方が磁性体の場合は、センサの構造部材の変形が距離  $d$  を縮小する側になるので、逆に近接距離に対して反発力の変化が増大され、距離が0になる前に磁石が磁性体にくっついてしまい、その直前で飽和するような距離—磁性力特性になったと考えられる。

センサは磁性力を構造部材の変形で検出する原理を用いるので、このような傾向性を持つことは必然である。力の検出感度を上げるには、同じ力が働いたときに大きく変形させることが必要になるので、構造部材の剛性を小さくしなければならない。しかし、剛性を小さくするとスリーブの移動に伴う加速度の影響を受けてセンサ自体が振動し、共振等によりセンサの破損にもつながる可能性がある。

従って磁力を利用した近接センサの設計に当たっては、構

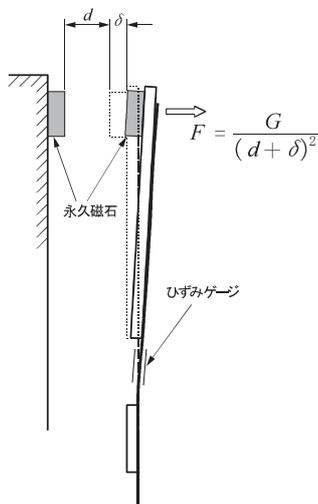


図8 センサ構造部材の変形の影響

造部材の剛性を大きくして変形量を小さく抑えるか、検出感度を上げるかのどちらかの要求に従って寸法を決定しなければならない。

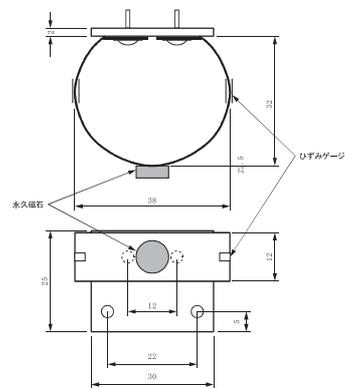
構造部材の剛性を高くする方法は、部材の板厚を厚くして断面係数を大きくする方法と、構造的に変形しにくい形状を選択する方法が考えられる。

そこで、構造部材の剛性を大きくし、変形量を最も効果的に検出する形状として、図9に示すようなリング状の構造をしたセンサを試作した。

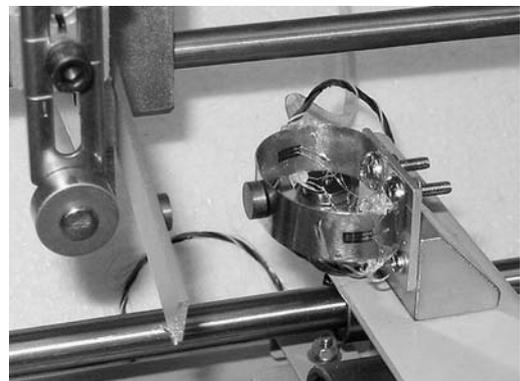
製作したリング形状の近接センサについて、片持ち梁型のセンサの時と同様に永久磁石の同極どうしを向かい合わせた場合と、片方を磁性体（鉄）に置き換えた場合のセンサ特性を計測した。

センサの出力特性として近接距離—磁性力特性の計測結果を図10に示す。永久磁石の同極どうしを向かい合わせた場合（反力）と、片方を磁性体に置き換えた場合（引力）とも、それぞれ絶対値は異なるが、距離が近づくにつれて加速度的に磁性力が増大する傾向が認められた。また、片持ち梁形状のセンサと比較して反力と引力の場合の出力特性の傾向性について著しい差は認められず、センサの構造部材の変形が小さい範囲で計測されていると考えられる。

以後、リング形状の近接センサを用いて実験を行った。



a) センサの構造図



b) センサの外観

図9 永久磁石を利用した近接距離センサ (リング構造タイプ)

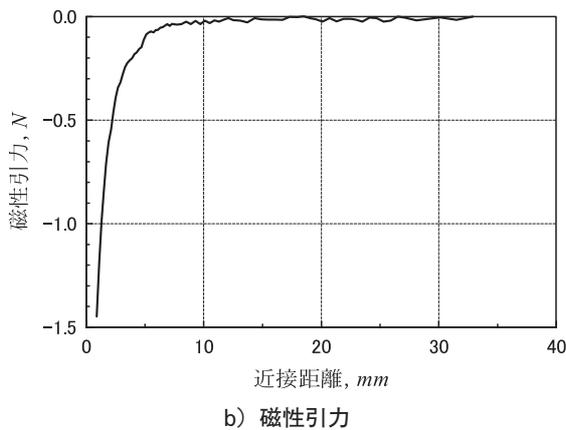
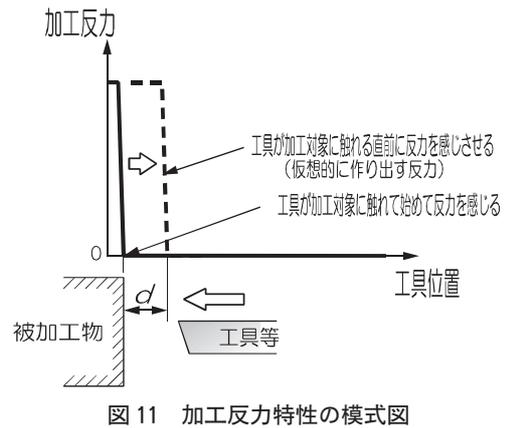
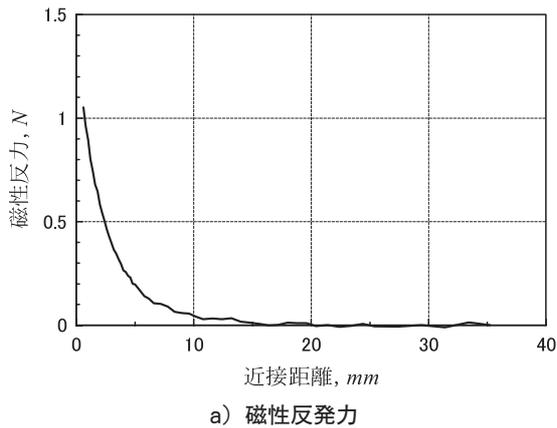
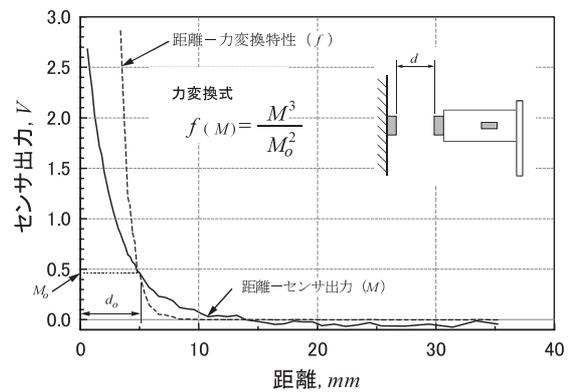


図 10 センサ特性の計測結果



#### 4.2 センサ出力特性の変換

一般に、作業者が何か物体に触れてその存在を認識する場合、その物体に触れていないときは力が発生せず、触れた瞬間に発生する反力を素早く感じ取っている。

すなわち、図 11 の模式図で示すように、物体に触れる直前までと、触れた瞬間では大きな反力の差があって初めて物体の存在とその位置関係を認識することになる。

図 7、図 10 で示した近接距離センサの出力特性も距離が近づくにつれて反力が徐々に大きくなる傾向を示しているが、被加工物が硬い物体であることを認識させるためには、模式図に示すように、ある位置の前後でさらに急激な変化をもたせることが必要になる。

すなわち、加工時の工具と加工対象の位置関係をマスタ側で操作する作業者に力覚による感覚として与えるためには、センサの出力をそのまま用いるのではなく、何らかの変換を行わなければならない。

しかしながら、センサ出力のある値にしきい値を設け、それを境に前後で大きく出力特性に変化を持たせる方法を使った場合、境となる位置付近を往復する際に不連続な出力特性の影響を受けて制御が不安定になりやすい。

そこで、磁力による近接距離センサの出力特性が非線形であることを有効に利用して出力特性の変換方法を検討した。

いま、近接距離センサで認識したい加工対象表面からの距離を  $d_0$  とする。近接距離センサの出力特性は、 $x > d_0$  の範囲で出力を小さく抑え、 $0 < x < d_0$  の範囲では出力を拡大するような変換方法を考える。

近接距離センサの出力特性を  $M(x)$  という連続関数で表せる場合、もし  $x = d_0$  のときの出力が 1 であれば、 $x > d_0$  のときは  $M(x) < 1$ 、 $0 < x < d_0$  のときは  $M(x) > 1$  となるから、目標の出力特性を得るには単純に  $M(x)$  を累乗すればよいことになる。その効果は、二乗、三乗と乗数を高くすればするほど  $d_0$  を境とした特性曲線の立ち上がり急激になる。

目標の位置  $d_0$  で標準化するために  $M(x)$  を  $x = d_0$  の時の出力値  $M(d_0)$  で除して、

$$M(x) = \frac{M(x)}{M(d_0)} \tag{3}$$

という関数を得る。

センサ出力の特性変換はこの式を累乗することになるが、二乗、四乗のように偶数による累乗では、スレーブが受ける力の向き示す符号の情報なくなる。

そこで、実験ではこれを三乗して出力特性を変化させ、その後で標準化した際の係数をかけることで  $x = d_0$  の時点でのセンサ出力レベルを変えずにその前後の出力特性を目的に合

うように変換することが出来る。

これを数式で表すと、センサ出力特性変換後の関数  $f(x)$

は、

$$f(x) = \left[ \frac{M(x)}{M(d_0)} \right]^3 \times M(d_0) \tag{4}$$

$$= \frac{M(x)^3}{M(d_0)^2}$$

で得られる。この変換方法を「標準化三乗法」と呼ぶことにする。

この出力特性変換法を導入して制御実験を行ったところ、目標の位置でかなり明確な力覚感覚が得られることを確認した。

### 4.3 非接触力覚制御

マスタ装置とスレーブ装置を用いて、近接距離センサによる非接触型の力覚制御実験を行った。

近接距離センサはリング形状の試作したものをを用い、標準化のための基準となる距離として  $4\text{mm}$  の間隔を設定した。力覚制御は最も単純な力学制御モデルによるバイラテラル制御法を採用した。すなわち、図13のブロック線図に示すようにマスタとスレーブに加わる力の差分から移動すべき変位量を計算してマスタ、スレーブとも同一の位置指令を出力する方式により制御プログラムを作成し、動作を確認した。

はじめに、近接センサの出力を変換せずに、そのまま用いた場合の動作試験の結果を図14に示す。ただし、上段の負荷荷重で、操作力を与えるマスタの波形が大きく変動しているが、これは操作者が微妙な手加減を行っていることに加えて、センサの感度の関係でマスタ側の増幅度が大きくなっていることによるものである。

下段の水平に置かれた点線位置が目標とする  $4\text{mm}$  の非接触基準位置を示しており、図からはこの基準位置に徐々に近づきながらその手前でセンサからの力を感じたので一度手が止まり、その抵抗を押し切りながら更に近づけていく様子が伺える。

鋳造品の後処理加工のように、工具が加工対象に触れる直前にその位置や存在を認識してから更に加工へと進むような工程にはこのような動作を採ることが適当である。

次に、センサ出力特性を標準化三乗法で変換して用いるプログラムで制御した場合の動作試験結果を図15に示す。こちらの場合は、下段の点線で示す基準位置より先に進むことが抑えられており、近接距離を力感覚として得られていることが伺える。

しかし、基準位置に達してからその位置を保持する過程で、マスタ装置、スレーブ装置ともに振動現象を起こしていることがわかる。制御位置は目標位置に安定しているように見えるものの、力制御の上では  $3\text{Hz}$  程度のゆっくりとした振動が起こっており、安定した動作とは言いがたい。

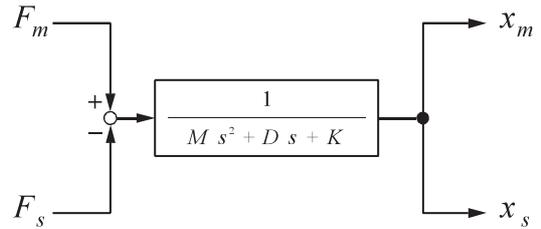


図13 対称型バイラテラル制御ブロック図

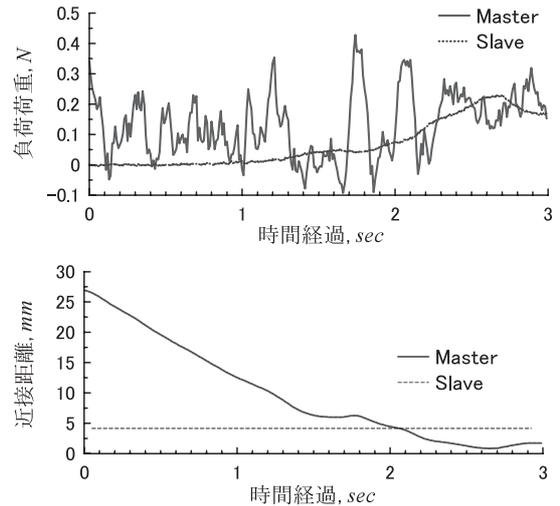


図14 動作試験結果（センサ変換なし）

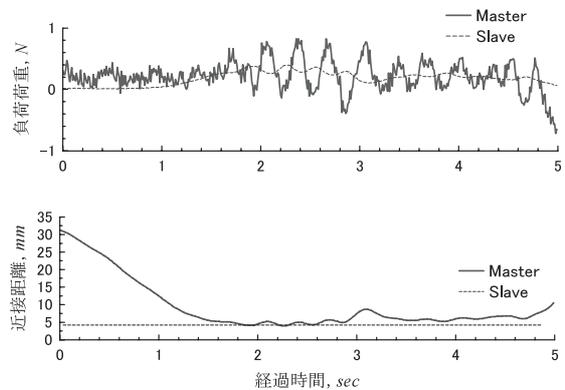


図15 動作試験結果（センサ変換あり）

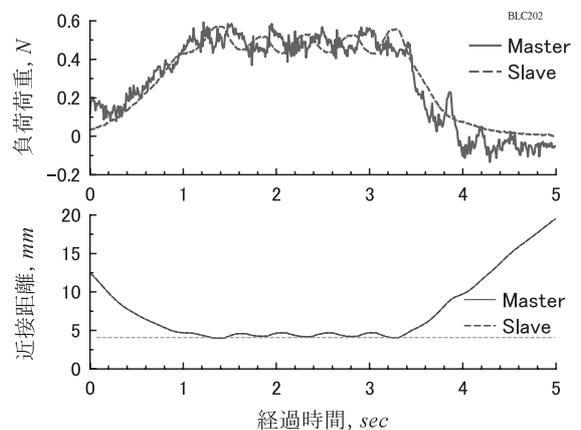


図16 間隔保持動作の際の振動現象