

# 焼結金属を転造加工した歯車の気孔率分布センサの開発

信州大学 工学部 電気電子工学科

教授 水野 勉

(平成 21 年度 一般研究開発助成 AF-2009008)

キーワード：焼結歯車，気孔率，渦電流形センサ

## 1. 研究の目的と背景

焼結歯車は粉末金属を焼結することで製造されるために、複雑な形状に成形が可能であり、材料の無駄がなく安価に大量生産できる。また焼結歯車に転造加工を施すことで歯の表面が緻密化して、荷重負荷能力の改善ができる<sup>1)</sup>。そのために、転造歯車は自動車トランスミッション用歯車として期待されており<sup>2), 3)</sup>、転造歯車の良否をインラインで判定するためのセンサが要求されている。

転造加工によって、気孔率、残留応力、抵抗率および透磁率が変化する<sup>4)</sup>。これらの物理量を測定することで、転造歯車の良否判定ができる可能性がある。一般に、気孔率測定には、切断した歯車を光学的に測定する破壊検査方法が用いられている。また、残留応力を測定するためには、渦電流形センサやX線回析、超音波などを用いた非破壊検査が用いられている<sup>5), 6)</sup>。X線回析を用いた残留応力の測定では、X線の侵透する深さが浅いために、歯の表面から内部までの測定が行えない問題がある。

そこで、著者は渦電流形センサを用いた測定法を提案している<sup>7), 8)</sup>。本センサは、渦電流非破壊検査であるために、非破壊かつ短時間で測定が可能である<sup>9)</sup>。また励振周波数を変化、すなわち磁束の浸透深さを変えて、表面から内部までの測定ができる利点がある。

本報告書では、まず、励振コイルと磁束密度検出用ホール素子を有するセンサの構成、次に、転造加工によって生ずる気孔率、残留応力、抵抗率および透磁率の変化について述べる。さらに、転造加工量の異なる焼結歯車の出力電圧特性に基づく転造加工の良否判定を検討しており、下記の事項を明らかにする。

- (1) 気孔率，残留応力，抵抗率および透磁率
- (2) 転造加工の良否判定

## 2. 転造加工を施した歯車および渦電流形センサ

### 2.1 転造加工を施した歯車

表1と表2に焼結歯車の素材の化学成分と特性をそれぞれ示した。焼結歯車はヘガネス AB 社製の完全合金粉から、冷間で1回圧縮成形した後に1回焼結する工程により成形した。

図1に焼結歯車の寸法、表3に歯車の特性をそれぞれ示した。歯数  $Z = 16$ 、モジュール  $M = 3.0$  のはすば歯車を用いた。

上述した焼結歯車に転造加工を施すことで歯の表面が緻密化される。ギア形状の工具を押し込む方法で加工を行うと、加工前に比べて歯が小さくなる。また、過度な転造加工をすると剥離などの欠陥が生ずる。転造加工前である未転造歯車、適切な転造加工を施した転造歯車、過度な転造加工によって剥離が生じた過転造歯車の3種類の焼結歯車を用いて測定を行った。

表4は3種類の焼結歯車のまたぎ歯厚(図1(a)参照)である。転造加工を施すことで、またぎ歯厚は  $0.27 \text{ mm}$  減少して、過度な転造加工を施すと  $0.28 \text{ mm}$  減少した。

図2は、適切な転造加工を施した転造歯車の表面からの深さ  $d$  に依存する気孔である。図中の黒い部分が気孔である。レーザ顕微鏡(OLYMPUS, OLS-4000)を用いて表面からの深さ  $d$  に依存する気孔を観察した。転造加工によって表面が緻密化されている。同図に示したように  $0.15 \times 1.50 \text{ mm}$  の抽出範囲面積  $A_t$  と気孔の総面積  $A_v$  を用いて気孔率  $P$  を次式より算出した。

$$P = \frac{A_v}{A_t} \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots (1)$$

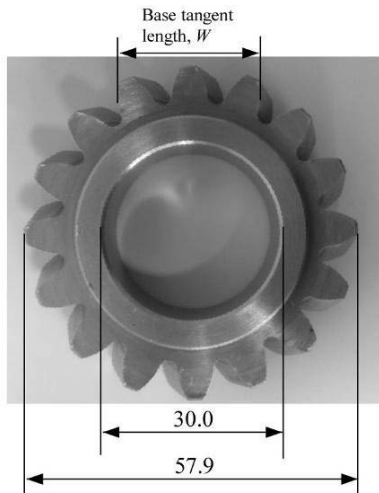
図3は、式(1)を用いて算出した3種類の焼結歯車の気孔率  $P$  - 表面からの深さ  $d$  特性である。なお、同図は2つの歯の  $P$  の平均値である。未転造歯車は、 $d = 0.2 \text{ mm}$  のときに  $P$  が最大となり、 $d$  の増加にともなって  $P$  は減少して  $1.5\%$  に収束した。転造歯車と過転造歯車は、 $d = 0 - 0.3 \text{ mm}$  の範囲において  $P = 0\%$  であった。 $d$  の増加にともなって  $P$  は増加しながら  $1.5\%$ 、 $1.0\%$  にそれぞれ収束した。

表1 焼結材の化学成分

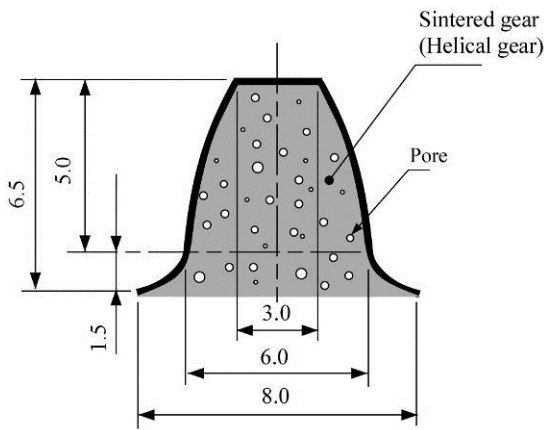
Substance	Share (wt%)
C	0.23
Mo	0.20
Cr	1.50
Fe	Bal.

表2 焼結材の特性

Item	Value
Powder	Completely alloyed powder
Manufacturing process	1 Cold Press, 1 Sintering
Density (g/ml)	7.55
Porosity (%)	3.2
Hardness (HRB)	85



(a) 全体図



(b) 歯

図1 焼結歯車の寸法(単位: mm)

表3 焼結歯車の特性

Gear parameters	Symbol	Value
Gear types	-	Helical gear
Module	$M$	3.0
Number of tooth	$Z$	16
Pressure angle (deg)	$\alpha$	20
Helix angle (deg)	$\beta$	20

表4 測定に用いた焼結歯車

Sintered gear	Base tangent length before form rolling, $W_0$ (mm)	Base tangent length, $W$ (mm)	Reduction of base tangent length, $\Delta W$ (mm)
Non form rolling	23.69	-	-
Form rolling	23.69	23.43	0.27
Over form rolling	23.69	23.42	0.28

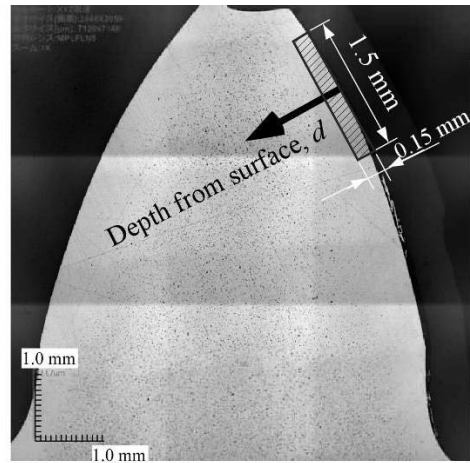


図2 転造歯車の表面からの深さ  $d$  に依存する気孔(単位: mm)

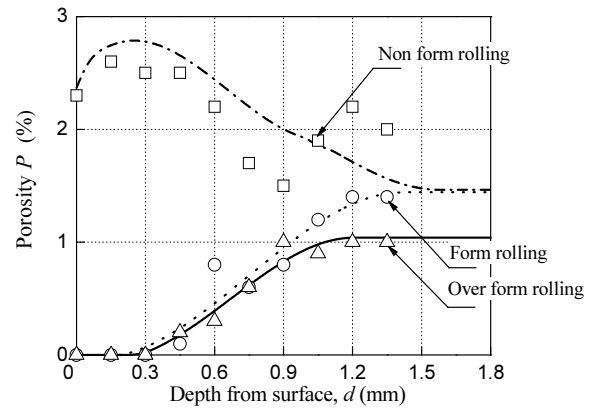


図3 気孔率  $P$  - 表面からの深さ  $d$  特性

## 2.2 渦電流形センサ

図4に渦電流形センサの測定原理を示した。励振コイルから発生する磁束を歯車に作用させると、渦電流が生ずる。発生する渦電流は歯車の抵抗率、比透磁率に依存するために、渦電流によって変化する磁束密度をホール素子で出力電圧として検出する。後述する図7と図8に示したように、抵抗率と比透磁率は、焼結鋼の残留応力と気孔率に依存している。励振周波数を変化、すなわち磁束の浸透深さ  $\delta$  を変えて測定することで、深さ方向  $d$  の特性が得られる。 $\delta$  は下式で与えられる。

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_t \mu_0}} \quad (\text{m}) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\rho$ : 抵抗率 ( $\Omega\text{m}$ ),  $f$ : 励振周波数 (Hz),  $\mu_t$ : 比透磁率,  $\mu_0$ : 真空の透磁率 (H/m)

ホール素子の磁束密度検出部は小さいために ( $\varnothing 0.3$  mm) 局所的な磁束密度、すなわち局所の測定可能である。ホール素子の出力電圧  $V_o$  は次式となる。

$$V_o = \frac{R_H \cdot I_c}{d_H} \cdot B \quad (\text{V}) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $R_H$ :ホール係数( $\text{m}^2/\text{As}$ ),  $I_c$ :直流電流(A),  
 $d_H$ :ホール素子の厚さ(m),  $B$ :磁束密度(T)

表5に渦電流形センサの仕様を示した。ホール素子は歯先に配置してあり、3種類の焼結歯車の出力電圧を比較する。

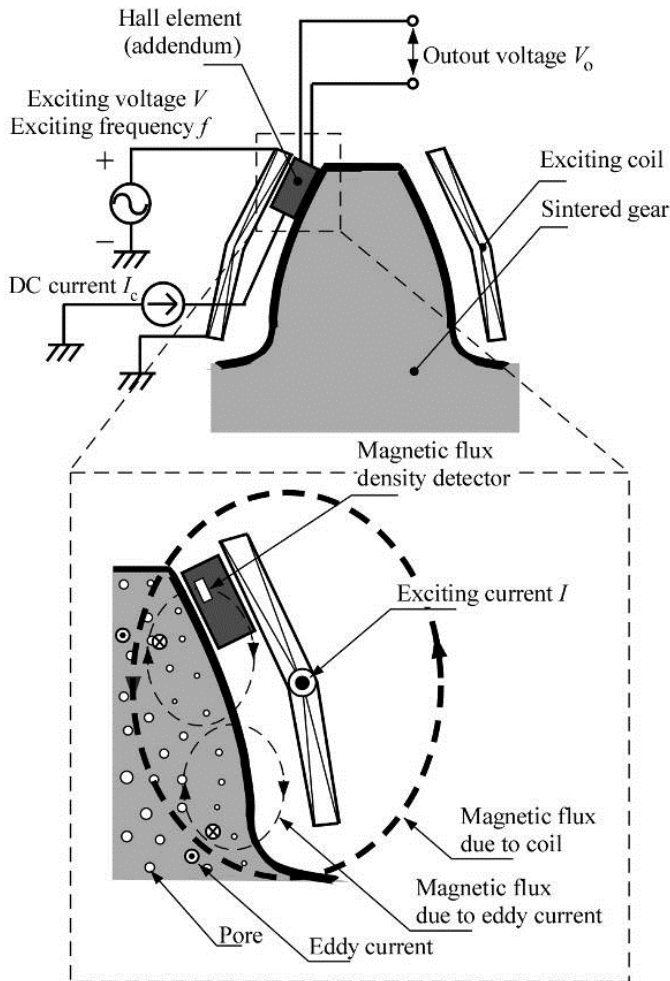


図4 渦電流形センサの測定原理

表5 渦電流形センサの仕様

Hall element	Manufacturer	Asahi Kasei
	Model number	HW-322B
	Installation point	addendum
Exciting coil	Diameter of conductor (mm)	0.09
	Layer	3
	Number of turns	130
	DC resistance $R_{dc}$ ( $\Omega$ )	16.2

### 3. 材料特性

図4に示した渦電流は焼結歯車の抵抗率および比透磁率に依存する<sup>9)</sup>。したがって、転造歯車の応力に依存する抵抗率と比透磁率を明確にする必要がある。電磁鋼板などの磁性材料の抵抗率と比透磁率の応力依存性はすでに検討されている<sup>10)・12)</sup>。しかし、機械構造材料である本焼結材の特性は検討されていない。本焼結歯車の形状は複雑であるために、応力に依存する抵抗率と比透磁率の測定が困難であった。そこで、円筒状の転造加工した焼結鋼の表面からの深さに依存する気孔率、応力、抵抗率、比透磁率をそれぞれ測定した。

#### 3.1 測定試料

図5は応力 $\sigma$ 、気孔率 $P$ 、抵抗率 $\rho$ 、比透磁率 $\mu_t$ の測定試料である。転造加工した焼結鋼は表1に示した焼結歯車と同じ完全合金粉(CAP)を1回冷間圧縮、1回焼結の工程で製造した後に転造加工を施した。転造加工によって焼結鋼の外径は未転造時に比べて0.1-0.2 mm減少した。同図に示したように厚さ0.2 mmごとに放電加工によって抵抗率測定試料、比透磁率測定試料を作製した。拡大図に示した気孔率測定試料は、原点Oと対称な位置においても切り出した。すなわち、気孔率測定試料は計2個、抵抗率測定試料と比透磁率測定試料は、それぞれ計10個である。また応力測定には、図5に示した転造加工した焼結鋼と同一条件で作製した試料を用いた。

#### 3.2 測定方法

気孔率 $P$ は、レーザ顕微鏡(OLYMPUS, OLS-4000)を用いて表面からの深さ $d$ に依存する $P$ を測定した。図6に示したように $0.1 \times 2.56 \text{ mm}$ の抽出範囲面積 $A_t$ と気孔の総面積 $A_p$ を用いて $P$ を式(1)より算出した。また、抵抗率 $\rho$ は、デジタルナノボルト・マイクロオームメータ(Agilent, AG34420A)を用いて試料の長さ $l$ における抵抗 $R$ を測定して、 $\rho$ を下式を用いて求めた。

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (\Omega \cdot \text{m}) \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $A$ :断面積( $= 2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ )

さらに、比透磁率 $\mu_t$ は、試料振動型磁力計(VSM, 理研電子, BHV-55)を用いて試料の $B-H$ ループを測定して求めた。図4に示した励振コイルによって磁界の強さ $H = \pm 320 \text{ A/m}$ を歯車に作用させている<sup>7)</sup>。そのために $H = \pm 320 \text{ A/m}$ を作用させたときの軸方向の $\mu_t$ を下式を用いて求めた。

$$\mu_t = \frac{B}{\mu_0 H} \dots \dots \dots (5)$$

応力 $\sigma$ は、同一条件で作製した転造加工した焼結鋼を0.2 mmごとに電解エッチングを施して、軸方向の応力 $\sigma_a$ 、円周方向の応力 $\sigma_\theta$ をそれぞれ測定した。なお、測定にはX線応力測定装置(リガク製 PSPC-MSF-3M)を用いた。

#### 3.3 測定結果

図7は表面からの深さ $d$ に依存する図(a)  $P$ 、図(b)  $\rho$ と $\mu_t$ 、図(c)  $\sigma$ である。表面からの深さ $d$ の増加にともなって、 $P$ は単調増加した。 $\rho$ は $d = 0 \text{ mm} - 0.2 \text{ mm}$ の範囲において

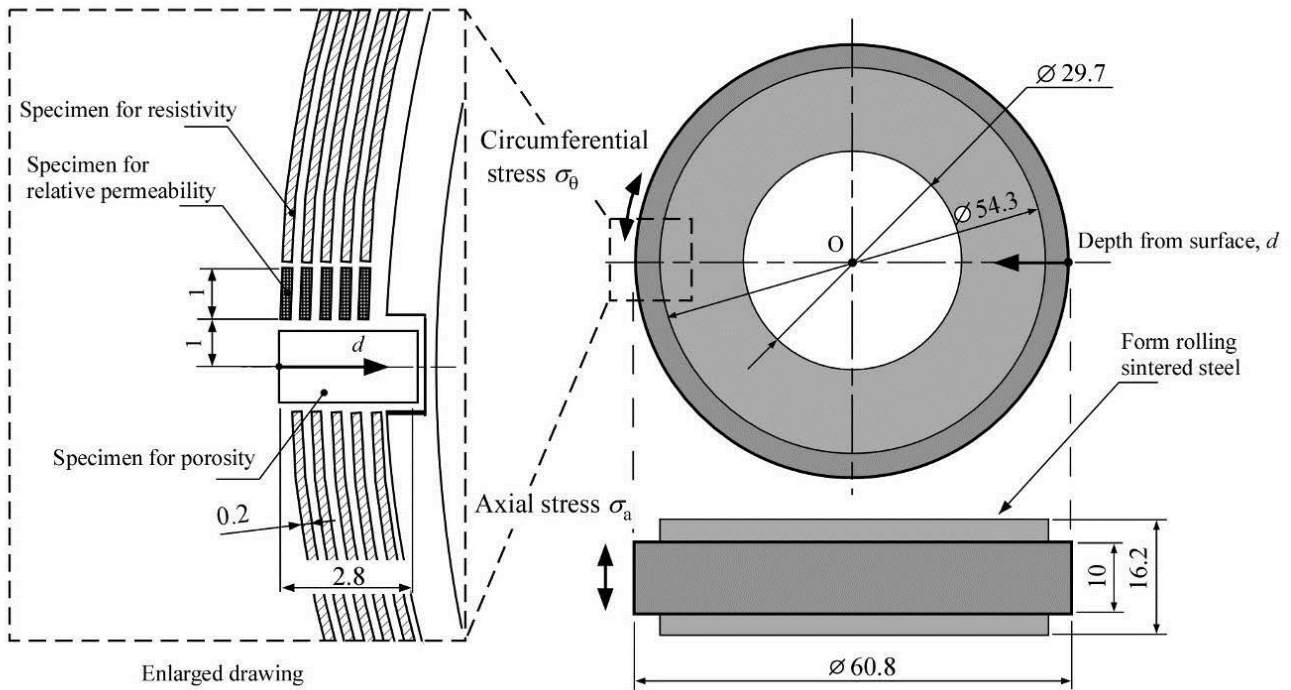


図5 応力，気孔率，抵抗率，比透磁率の測定試料(単位：mm)

$d$ の増加にもなって減少して、 $d = 0.2 \text{ mm}$ においては最小となった。また、 $d = 0.2 \text{ mm} - 2.0 \text{ mm}$ の範囲では $d$ の増加にもなって $\rho$ は増加した。さらに $\mu_r$ は $d = 0 \text{ mm} - 0.4 \text{ mm}$ の範囲では $d$ の増加により増加しており、 $0.4 \text{ mm} - 2.0 \text{ mm}$ の範囲では $d$ が増加すると減少した。

応力 $\sigma$ は、 $d = 0 \text{ mm} - 0.2 \text{ mm}$ の範囲において $d$ の増加にもなって減少しており、 $d = 0.2 \text{ mm} - 0.4 \text{ mm}$ の範囲においては最小となった。さらに $d = 0.4 \text{ mm}$ 以降は増加した。

図8は図7の結果から得られた $\sigma$ に依存する $P$ 、 $\rho$ 、 $\mu_r$ である。なお同図らは、 $d = 0.4 \text{ mm}$ 以降で残留応力が小さくなっていく範囲の特性をまとめている。 $\sigma$ の増加にもなって、 $P$ と $\rho$ は増加して、 $\mu_r$ は減少することがわかった。

本渦電流形センサは、転造加工によって生ずる $\sigma$ の相違を $\rho$ と $\mu_r$ の観点から検出することで、転造加工の良否判定をする。

#### 4. 出力電圧特性

図4に示したように励振コイルに励振周波数  $f = 0.3 \text{ kHz} - 80 \text{ kHz}$ 、励振電圧  $5 \text{ V}$  を印加したときのホール素子の出力電圧  $V_o$  を測定した。なお、ホール素子に直流電流  $I_c = 15 \text{ mA}$  を流した。表4に示した3種類の焼結歯車の出力電圧  $V_o$  をロックインアンプ(NF, LI5640)を用いて測定した。

図9は出力電圧  $V_o$  - 励振周波数  $f$  特性である。図8に基づいて、 $\rho = 18 \mu\Omega\text{m}$ 、 $\mu_r = 74$  と仮定して式(2)に代入して求めた $\delta$ を参考として記載した。さらに、式(3)を用いて求めた磁束密度  $B$  も示してある。また、未転造歯車の  $V_o$  は転

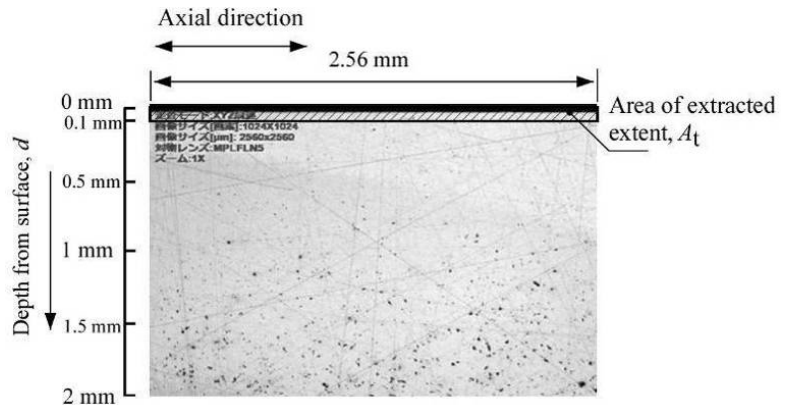


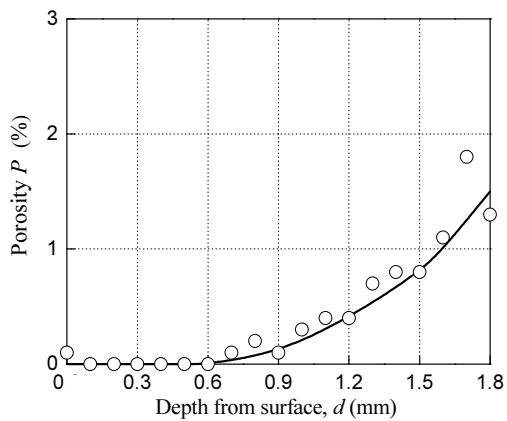
図6 転造加工した焼結鋼の表面からの深さ  $d$  に依存する気孔(単位：mm)

造歯車、過転造歯車の  $V_o$  より常に大きくなった。

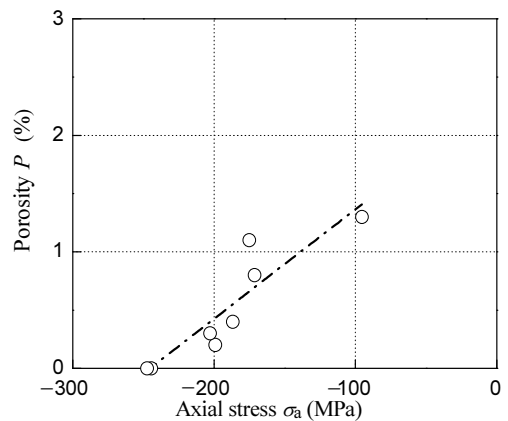
転造加工に依存する出力電圧特性を明確にするために、転造歯車と未転造歯車の相違に着目して、出力電圧の変化量  $\Delta V_o$  を下式で定義した<sup>8)</sup>。

$$\Delta V_o = V_o(\text{form rolling}) - V_o(\text{Non form rolling}) \quad (\text{V}) \dots\dots\dots (6)$$

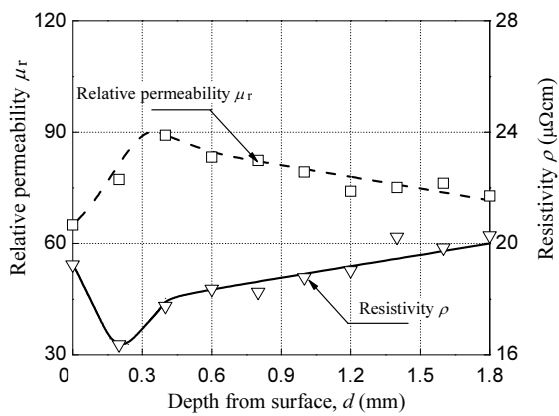
ここに、 $V_o(\text{Form rolling})$ : 転造歯車の出力電圧(V)、  
 $V_o(\text{Non form rolling})$ : 未転造歯車の出力電圧(V)



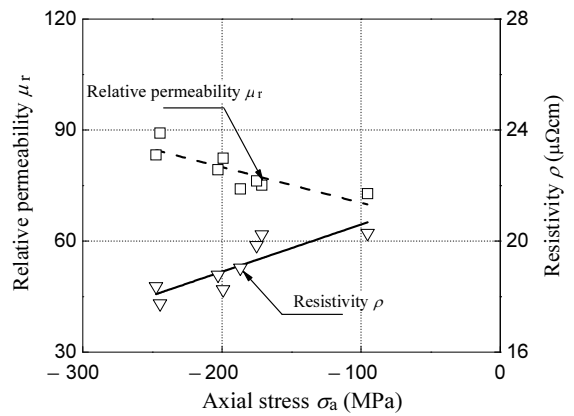
(a) 気孔率  $P$



(a) 気孔率  $P$

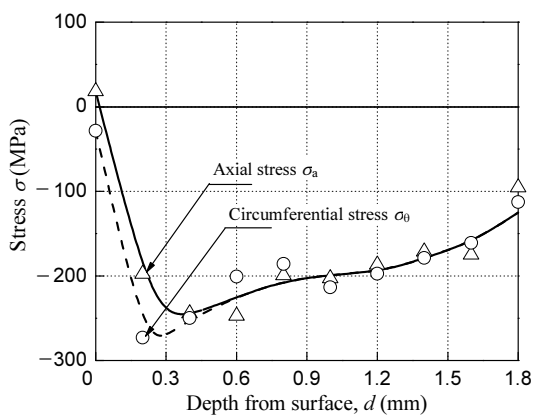


(b) 抵抗率  $\rho$  および比透磁率  $\mu_r$



(b) 抵抗率  $\rho$  および比透磁率  $\mu_r$

図 8 転造加工した焼結鋼の応力  $\sigma$  特性



(c) 応力  $\sigma$

図 7 転造加工した焼結鋼の表面からの深さ  $d$  特性

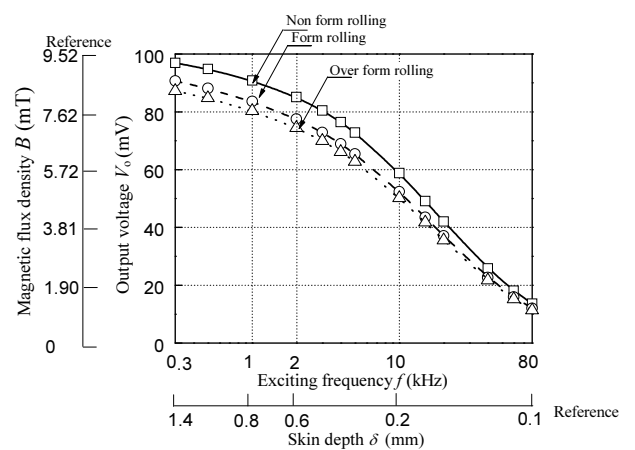


図 9 出力電圧  $V_o$ - 励振周波数  $f$  特性

( $V = 5 \text{ V}$ ,  $f = 0.3 - 80 \text{ kHz}$ ,  $I_c = 15 \text{ mA}$ , room temperature:  
 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

図10は出力電圧の変化量 $\Delta V_o$ - 励振周波数 $f$ 特性である。 $f=2-10$  kHz ( $\delta=0.2-0.6$  mm)の範囲において、 $\Delta V_o$ が最も小さくなった。これは転造加工を施すことで、この範囲で抵抗率 $\rho$ および比透磁率 $\mu_r$ が最も変化することに起因すると考えられる。

また $f=0.3-2$  kHz ( $\delta=0.6-1.4$  mm)の範囲において、適切な転造歯車と過転造歯車の $\Delta V_o$ の差が大きくなった。図3に示したように適切な転造歯車と過転造歯車は $d=0.9$  mmよりも大きな範囲において、気孔率 $P$ に差が生じている。 $P$ によって応力 $\sigma$ が変化、すなわち $\rho$ および $\mu_r$ がそれぞれ変化する。そのために、低い周波数である $f=0.3-2$  kHzにおいて適切な転造歯車と過転造歯車の $\Delta V_o$ に差が生じたと考えられる。以上の結果より、出力電圧は転造加工に依存しており、過度な転造加工によって剥離が生じた過転造歯車を出力電圧によって判定できることがわかった。

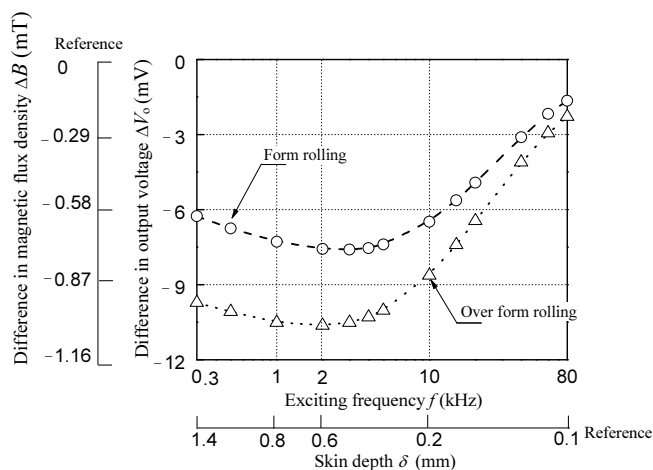


図10 出力電圧の変化量 $\Delta V_o$ - 周波数 $f$ 特性  
( $V=5$  V,  $f=0.3-80$  kHz,  $I_c=15$  mA,  $T=25$  °C)

## 5. あとがき

### (1) 気孔率, 残留応力, 抵抗率および透磁率

渦電流センサを用いるために、転造加工を施した焼結鋼の表面からの深さ特性を測定した。その結果、残留応力の増加にともなって、気孔率と抵抗率は減少して、比透磁率は増加することがわかった。

### (2) 転造加工の良否判定

転造加工前である未転造歯車, 適切な転造加工を施した転造歯車, 過度な転造加工によって剥離が生じた過転造歯車の3種類の焼結歯車を用いて出力電圧 $V_o$ を測定した。出力電圧の変化量 $\Delta V_o$ は転造加工に依存しており、転造加工

の良否判定ができることがわかった。

## 謝 辞

本研究の一部は(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により行われたものであり、関係各位に感謝の意を表す次第である。

## 参考文献

- 1) 三浦・津守・浜本・河本・宇波：鉄系焼結合金ローラの転造による面圧疲労強度の向上-第2報-, 粉体および粉末冶金, 57-6, (2010), 430-434
- 2) Takemasu T・Ozaki T・Matsunaga R: Crowning process of P/M gear for automotive transmissions by finish rolling using screw-shaped tool, JSME Int. Journal. Ser A. Solid Mech Mater Eng. Soc. Mech Engineers, 46-3, (2003), 196-201
- 3) Asti M・Bassan D・Pidria M F: Sintered gears for automotive applications, Metall Ital, 96-9, (2004), 37-42
- 4) 水野・安里・北村・後藤・渡辺・竹増・新仏・天野・吉川・須田：転造加工を施した焼結鋼の表面からの深さに依存する抵抗率と比透磁率, 粉体粉末冶金協会講演概要集, (2011), 67
- 5) 田中・三橋：鉄系焼結金属のフライス切削による表面変質層, 精密機械, 41-8, (1975), 808-813
- 6) 浦山・内一・高木・兼本：電磁超音波共鳴法による配管減肉のオンラインモニタリング, 電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集, 23rd, (2011), 553-556
- 7) 水野・出口・清水・志村・北村・竹増・新仏・天野・吉川・松本：渦電流センサを用いた焼結鋼の気孔率測定, 粉体粉末冶金協会講演概要集, (2009), 69
- 8) 北村・出口・水野：渦電流形センサを用いた焼結歯車の空孔率測定, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2010, (2010), 59
- 9) The Japanese Society for Non-Destructive Inspection : Eddy Current Testing III, (2003), 1, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection
- 10) MAI Jianming: Experimental study of electrical resistivity and flow stress of stainless steel 316L in electroplastic deformation, Mater Sci. Eng. A Struct Mater Prop Microstruct Process, 528-10-11, (2011), 3539-3544
- 11) 吉川・山田・山本・餅田・大橋・福永・澤井・藤原・石原：圧粉磁心の動作時印加応力環境下における磁気特性評価, SEI テクニカルビュー, 173, (2008), 53-58
- 12) D Miyagi・K Miki・M Nakano・N Takahashi: Influence of Compressive Stress on Magnetic Properties of Laminated Electrical Steel Sheets, IEEE Trans Magn, 46, (2010), 318-321