

磁気測定によるオーステンパ ダクタイル鋳鉄の 残留オーステナイト定量

加藤義雄，山田銑一，加藤隆幸，宇野武志

Non-destructive Measurement of Retained Austenite Content in Austempered Ductile Iron

Yoshio Kato, Sen-ichi Yamada, Takayuki Kato, Takeshi Uno

要 旨

Austempered Ductile Iron (ADI) は，マトリックスをベイナイト組織とし，引張強さ 100kg/mm^2 以上，伸び10%以上を有する高強度・高靱性で，かつ耐疲労特性・耐摩耗性に優れた材料である。そのため，軽量化・コスト低減の観点から自動車部品や産業機械などへ利用され，今後も増加すると予測されている。

ADIは，ベイナイトの他に残留オーステナイトを含む。その量を約10%以上含むと，切削加工時に加工誘起変態し硬くてねばいマルテンサイトになるので，切削抵抗が非常に大きく，工具のチッピングが起きる場合もある。そのため，切削加工する前工程で，残留オ

ーステナイトを定量することができれば，切削加工時のトラブルを未然に防止することができ，生産性の向上やコスト低減等も図ることができる。

残留オーステナイトの定量方法として，X線回折法によるのが一般的であるが，黒皮のついた鋳造品形状のADIを測定することは困難である。

そこで，ベイナイトは強磁性で，残留オーステナイトと球状黒鉛は共に非磁性であることに着目し，磁気測定により残留オーステナイトを定量することを検討した。そして，部品形状でも定量可能となり，カーエアコン用コンプレッサの部品に適用したので紹介する。

• •

Abstract

Austempered ductile iron (ADI) is noted for its combination of high strength and wear resistance. In recent years, much attention has been paid to ADI as a prominent material for reducing weights and costs of automobile components. Usually, ADI shows poor machinability, due to strain-induced transformation of the retained austenite.

If it is possible to measure the amount of retained austenite before machining, we can prevent the chipping of cutting tools. For measurement of the amount of retained

austenite, X-ray diffraction is the only method capable of giving an absolute value, but it can not be applied to the non-destructive quantitative analysis of castings.

However, we found a strong relationship between the amount of retained austenite and the induced voltage in the AC magnetization method.

A retained austenite meter on the basis of this method is used for inspection of ADI rotors for automotive air conditioning compressors.

キーワード

鋳鉄，熱処理，組織，磁気特性，品質管理装置，自動車部品

1. まえがき

球状黒鉛鑄鉄をオーステンパ処理して得られるAus-tempered Ductile Iron (以後、ADIと略す)は、マトリックスをベイナイト組織とし、引張強さ 100kg/mm^2 以上、伸び10%以上を有する高強度・高靱性で、かつ耐疲労特性・耐摩耗性に優れた材料である。そのため、鋼の鍛造部品からの代替えによるコスト低減や、鑄鉄部品からの代替えによる軽量コンパクト化の観点から自動車部品や産業機械などでは、ADIが期待されている¹⁾。例えば、クランクシャフト、タイミングギヤ、エンジンマウティングブラケット、カムシャフトなどの自動車部品にも適用されており、今後ますます増加すると予測されている¹⁻¹⁰⁾。

オーステンパ処理はオーステナイト域から M_s 点(焼入によりマルテンサイトが生成し始める温度)以上の温度に急冷し、その温度で恒温変態させマトリックスをベイナイト組織にする点で鋼の熱処理と同じである。しかし、鋼に比べ炭素量が高いため、マトリックス中にオーステナイトが残留しやすい傾向がある。そのため、恒温変態時間を長くすることや、二段のオーステンパ処理をしてADIの特徴を失わないで残留オーステナイト量を減少させる工夫もなされている^{11, 12)}。

残留オーステナイト量が約10%以上含むADIを切削加工すると、残留オーステナイトが加工誘起変態して硬くてねばいマルテンサイトになるため、切削抵抗が非常に大きくなる。特に孔あけ加工では、刃先のチッピングが著しく、加工が困難になる場合もある^{13, 14)}。そのため、切削加工する前工程で、非破壊・迅速・簡便な手法でADI中に残留するオーステナイト量を全数検査できれば、切削加工時のトラブルを未然に防止することができ、生産性の向上やコスト低減等も図ることができる。残留オーステナイトを定量する方法としては、X線回折法によるのが一般的である。しかし、X線回折では、表面層約数 $10\mu\text{m}$ 程度であり、また黒皮のついた鑄造品形状のADIの残留オーステナイト量を測定することは困難である。

そこで、マトリックスのベイナイトは強磁性で、残留オーステナイトと球状黒鉛は共に非磁性であることに着目して、直流磁気測定と交流磁気測定により残留オーステナイトを定量することを検討した。その結果、交流磁気測定により部品形状のまま簡便・迅速・非破

壊で定量可能となり、量産ラインでも成果が得られた。

本報告では、これらの結果とカーエアコン用コンプレッサの部品^{11, 15)}に適用した例について紹介する。

2. 実験方法

2.1 試料

本実験に用いた球状黒鉛鑄鉄の化学組成は、Fe-3.8% C-2.4% Si-0.26% Mn-0.008% S-0.023% P-0.04% Mg (wt%)である。供試材は $\phi 8 \times 22\text{mm}$ で、 $900^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ オーステナイト化後、 $375 \sim 450^\circ\text{C}$ の温度で種々の時間保持する方法でオーステンパ処理し、残留オーステナイト量を0~40%とした。Photo. 1は、試料を研磨後5%ナイタルでエッチングした時の顕微鏡組織の一例で、球状黒鉛を約10%含む。上部ベイナイトが球状黒鉛のまわりを取り囲んでいるが、その中にエッチングされにくいオーステナイトが残留しているのがわかる。

2.2 直流磁気測定法

直流磁気測定は、直流自記磁束計(東英工業製、TRF-5AH)と磁化器を用いた。試料を磁化器の磁極にはさみ、最大磁界 10kOe までの磁化曲線を測定した。得られた曲線より、保磁力、最大透磁率、残留磁化、

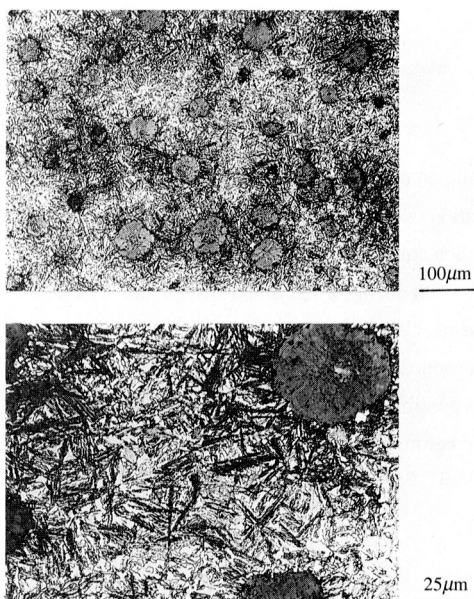


Photo.1 Microstructures of ADI (27% retained austenite).

そして磁界の強さ200Oe, 1kOe, 10kOeでの磁化の値と残留オーステナイト量との相関を調べた。

2.3 交流磁気測定

交流磁気測定は、Fig. 1に示すように均一な磁界が発生できるヘルムホルツコイルと交流磁化特性自動記録装置（理研電子製、AC BH-100K）とを組合せて用いた。ヘルムホルツコイル（外径490mm, 内径270mm）には60Hz, 500Hz, 2kHz, そして10kHzの周波数で励磁した。磁束検出コイル（外径11mm, 内径9mm）は、アクリル樹脂のポビンに線径0.15mmのエナメル銅線を60回巻いたもの2個を用いた。ヘルムホルツコイル内に2個の磁束検出コイルを置き、両者を逆極性に接続して交流磁化特性自動記録装置に結線した。このことにより、一方の検出コイルに試料を挿入し、他方の検出コイルを空芯のままとすると、磁界の大きさの成分がキャンセルされるので試料の磁束成分のみ検出できる。また、一方の検出コイルに残留オーステナイトを含まない試料を挿入し、他方の検出コイルに残留オーステナイトを含む被測定試料を挿入すると、残留オーステナイトの有無による磁気特性の差が出力される。

ヘルムホルツコイルの替わりに、それぞれの磁束検出コイルの外側に、ソレノイドコイルを挿入し励磁コイルとし、標準試料と被測定試料をそれぞれ独立に励磁する方法も検討した。それらの励磁コイルは、外径31mm, 内径28mm, そして高さ18mmのアクリル樹脂のポビンに線径0.4mmのエナメル銅線を150回巻いたものを用いた。励磁コイルは直列に、磁束検出コイルは

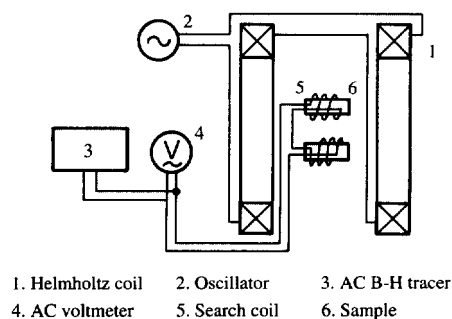


Fig. 1 Schematic diagram of AC magnetization method.

逆極性に接続する方法で、標準試料と被測定試料の誘起電圧の差分値を取り出すようにして、残留オーステナイトの定量も検討した。

3. 実験結果

3.1 ADIの直流磁気特性

Fig. 2(a)~(c)は、直流自記磁束計を用い、印加磁界200Oeと10kOeで測定した試料の磁化曲線の例である。(a), (b), そして(c)は、それぞれ残留オーステナイト量0%, 12%, そして39%の試料の結果である。いずれも、磁化は印加磁界5kOeでほぼ飽和に達した。

ベイナイトは強磁性で、残留オーステナイトは非磁性であることから、飽和磁化に相当する10kOeでの磁化 ($4\pi I_{10k}$) を利用して次式より各試料の残留オース

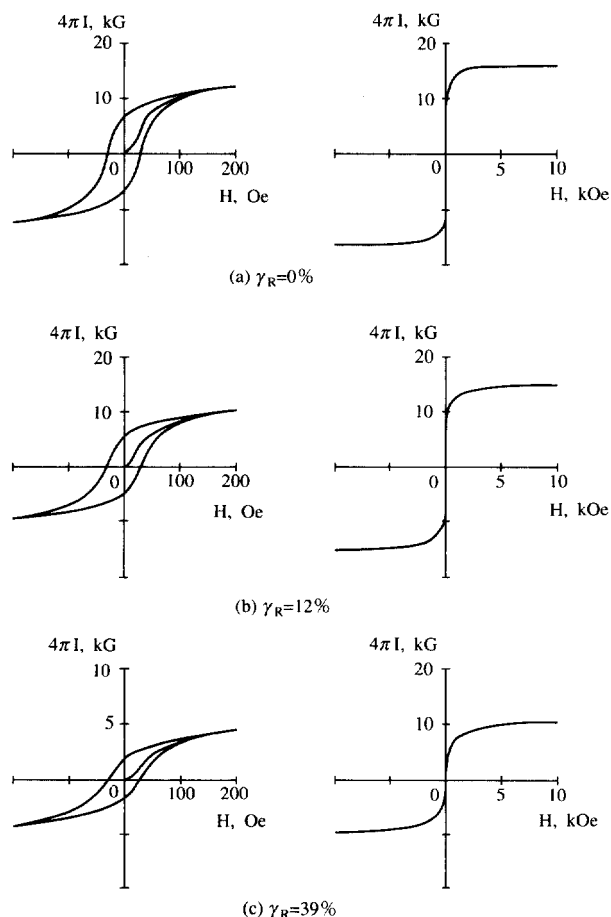


Fig. 2 DC magnetization curves of ADI.

テナイト量 ($\gamma_{R\cdot mag.}$, %) を求めた。

$$\gamma_{R\cdot mag.} = \left(1 - \frac{4\pi I_{10k}}{4\pi I_{10k}^*}\right) \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \times 100 \cdots (1)$$

$4\pi I_{10k}^*$: 残留オーステナイトを含まない試料の
10kOeでの磁化

G : 黒鉛の量 (10vol %)

上式の中で残留オーステナイト量を含まない試料の10kOeでの磁化 $4\pi I_{10k}^*$ は、オーステンパ処理後さらに500で1hr焼鈍して残留オーステナイトを完全に分解して得られた17.2kGを用いた。

Fig. 3は、X線回折法と直流磁気測定法で求めた残留オーステナイト量の相関である。X線回折法では、 α Feの回折線 (200) と (211), そして γ Feの回折線 (200), (220), および (311) との組合せを使い、球状黒鉛の量を補正して残留オーステナイト量 ($\gamma_{R\cdot Xray}$, %) を求めた。6個のデータの平均値 (図中の○印) と、直流磁気測定を行い式(1)より求めた残留オーステナイト量 ($\gamma_{R\cdot mag.}$, %) との関係を、最小二乗法により求めると、次式のようにほぼ1:1の相関が得られた。

$$\gamma_{R\cdot mag.} = 1.04 \times \gamma_{R\cdot Xray} + 1.10 \cdots (2)$$

(相関係数 = 0.97)

そこで、以下の記述では試料の残留オーステナイト量は式(1)で求めた値を用いることにする。

Fig. 4は、各試料の磁化曲線より求めた保磁力、最大透磁率、残留磁化、磁界の強さ200Oe, 1kOe, そして10kOeでの磁化を残留オーステナイト量でプロットした結果である。保磁力は、残留オーステナイト量を0~39%に変化させても約300eでほぼ一定であった。残留磁化、200Oe, 1kOe, および 10kOeでの磁化と最大透磁率はいずれも残留オーステナイト量の増加と共に減少した。以上のように、飽和磁化以外の残留磁化や最大透磁率でも残留オーステナイト量と強い相関を示したことから、これらの値を用いても定量が可能である。

3.2 ADIの交流磁気特性

Fig. 5(a)~(d)は、Fig. 1に示したヘルムホルツコイルに交流磁界を印加した時の試料の磁化曲線の例で、残留オーステナイト量0%, 12%, そして39%の試料の結果である。(a)と(b)は60Hzと500Hzで15Oe, (c)は2kHzで6Oe, そして(d)は10kHzで10Oeの交流磁界の例である。(a)の60Hzでの磁化は、いずれも印加磁界の増加と共に直線的に変化した。残留オーステナイトの量が

多くなるほど直線の傾きは小さくなり、15Oeでの磁化は残留オーステナイト量0%で143G, 12%で134G, そして39%で114Gとなった。(b)の500Hzでは、いずれの試料も60Hzの場合と異なりヒステリシスを示すようになった。15Oeでの磁化は、残留オーステナイト量0%で128G, 12%で120G, そして39%で102Gとなり、60Hzの結果に比べて約10%小さくなった。さらに、周波数が高くなると(c)や(d)に示すように、磁界の時間的変

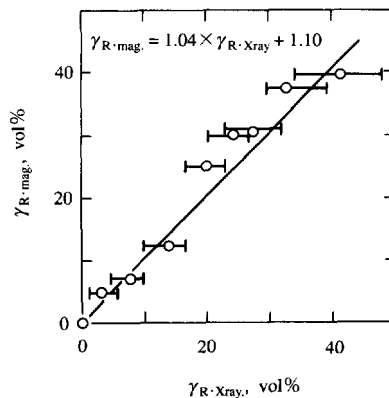


Fig. 3 Relationship between the amount of residual austenite by X-ray diffraction method and DC magnetization method.

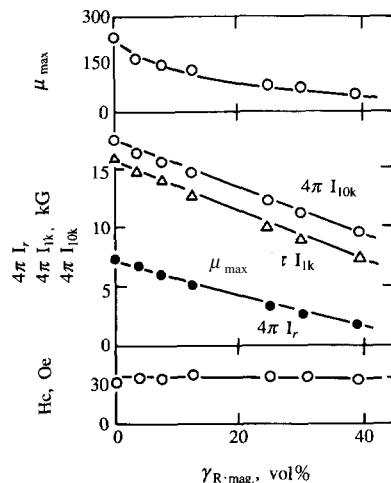


Fig. 4 Effect of the amount of retained austenite on DC magnetic properties of ADI.

化に対して磁化は大きな遅れを生じるので、大きなヒステリシスを示す磁化曲線となる。

磁化を誘起電圧として検出することもできる。磁束検出コイルに誘起される電圧は、次式で表される。

$$E = \sqrt{2} \pi \times N \times S \times 4\pi I \times f \times 10^{-5} \quad \dots \dots \dots (3)$$

E : 誘起電圧 (実効値; mV)

N : 検出コイルの巻数 (60回)

S : 試料の断面積 (mm^2)

$4\pi I$: 磁化 (G)

f : 周波数 (Hz)

Fig. 6(a)~(d)は、Fig. 5(a)~(d)の磁化を誘起電圧として測定した結果である。いずれも印加磁界の増加と共に誘起電圧は大きくなった。同一磁界で周波数の異なる(a)と(b)を比較すると、式(3)に示したように周波数の項が大きき寄与して、誘起電圧は60Hzよりも500Hzの方が大きくなった。

以上の方法で求めた磁化と誘起電圧を残留オーステナイト量で整理し、Fig. 7(a)~(d)を得た。(a)と(b)はそれぞれ60Hzと500Hzで15Oeでの結果で、そして(c)と(d)はそれぞれ2kHzで6Oeと10kHzで1Oeの磁界を印加した時の結果である。いずれの条件でも残留オーステナイト量の増加と共に磁化と誘起電圧は、直線的に減少することがわかった。

3.3 差分法による残留オーステナイトの定量

Fig. 1に示したヘルムホルツコイル内の磁束検出コイルの一方に残留オーステナイトを含まない試料を、そして他方に被測定試料を挿入する方法で、残留オーステナイトの有無による磁化の差分を求め、Fig. 8(a)~(d)を得た。(a)と(b)は60Hzと500Hzで15Oe、(c)は2kHzで6Oe、そして(d)は10kHzで1Oeの交流磁界を印加した例である。磁化の差分を誘起電圧の差分として求め、残留オーステナイト量で整理した結果がFig. 9(a)~(d)である。(a)は60Hzで15~125Oe、(b)は

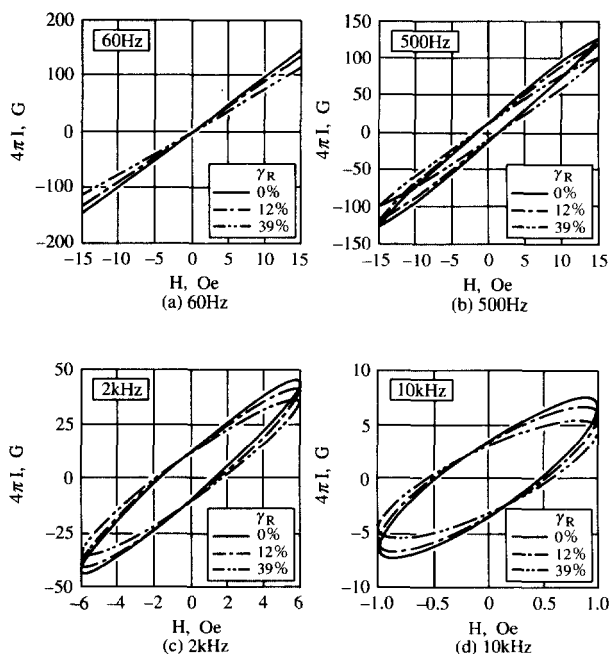


Fig. 5 AC magnetization curves of ADI.

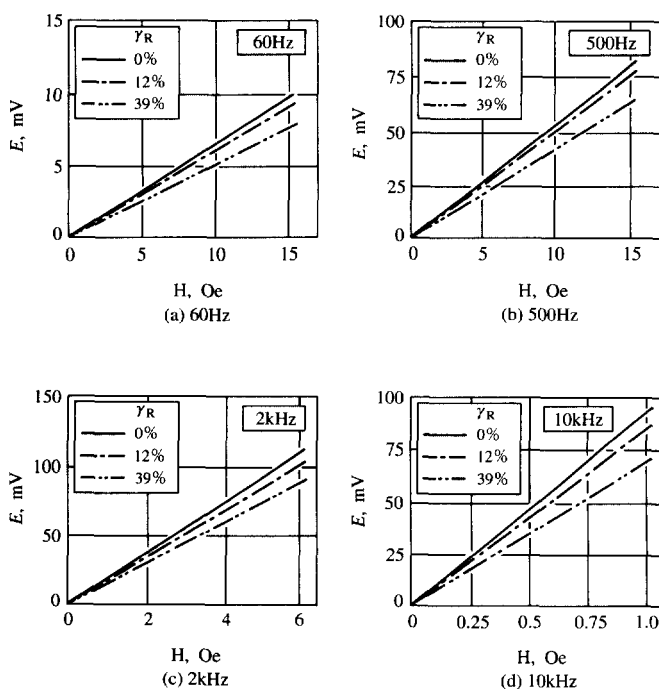


Fig. 6 Induced voltage by AC magnetization method.

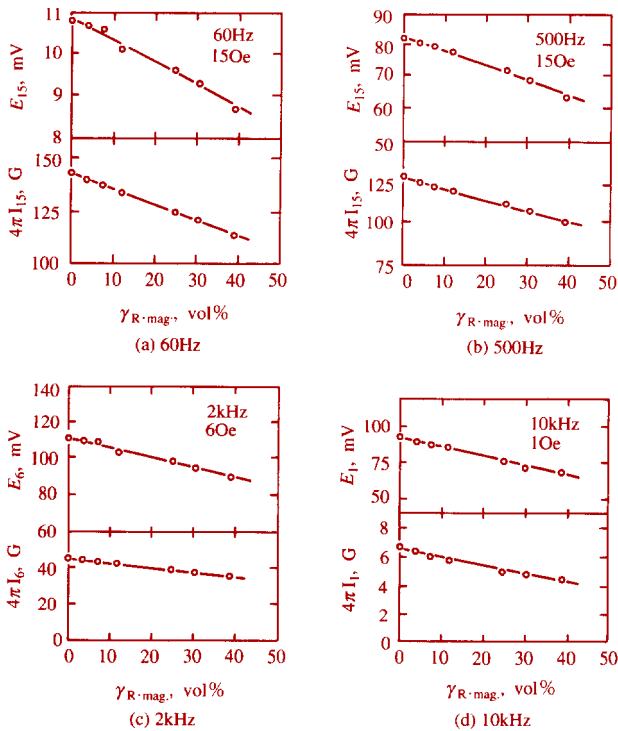


Fig. 7 Relationship between the amount of retained austenite and induced voltage by AC magnetization method.

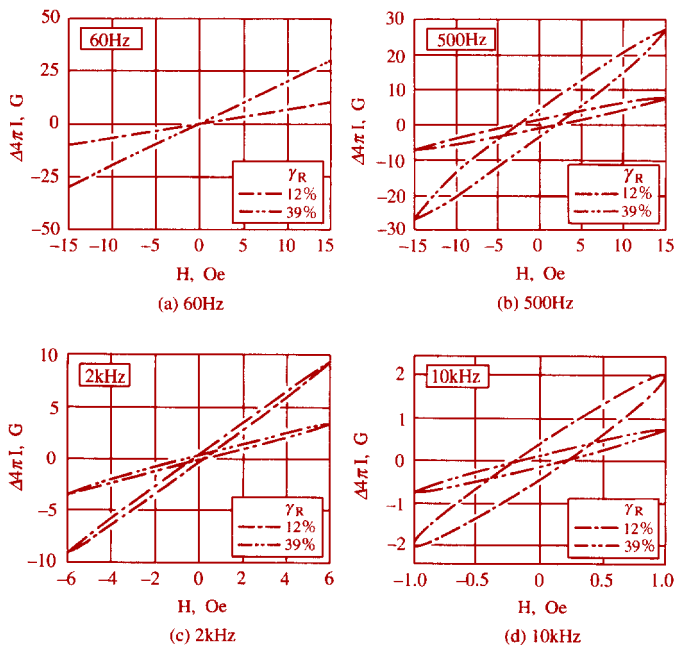


Fig. 8 Differential AC magnetization curves. (standard sample : $\gamma_R=0\%$)

500Hzで15Oe, (c)は2kHzで6Oe, そして (d)は10kHzで1Oeの結果で, いずれも残留オーステナイト量の有無による誘起電圧の差分値は, 残留オーステナイト量と強い相関を示した。

次に, ヘルムホルツコイルの替わりに, ソレノイドコイルで励磁する方法で, 残留オーステナイト量の有無による誘起電圧の差分値を求めた。Fig. 10(a)は60Hzで (b)は500Hzの結果で, それぞれ励磁電流を0.1A~0.5Aとした。ソレノイドコイルに発生する磁界は不均一で, 印加電流0.5Aの時, 中心で26Oe, 端部で18Oeとなった。このような不均一な磁界中で試料を励磁しても, 残留オーステナイト量の有無による誘起電圧の差分値は, 一様な磁界の発生できるヘルムホルツコイルの場合と同様に残留オーステナイト量と強い相関を示した。

このことから, あらかじめ残留オーステナイト量の有無による誘起電圧の差分値と残留オーステナイト量の関係を求めておくことにより, 残留オーステナイトを定量できることがわかった。

4. 直流磁気測定と交流磁気測定による残留オーステナイト定量法の比較

Fig. 3に示したように直流磁気測定で求めた飽和磁化で残留オーステナイトの定量ができる。また, Fig. 4に示したように, 残留磁化や最大透磁率でも残留オーステナイト量と強い相関を示したことから, これらの値を用いても残留オーステナイトの定量が可能である^{16~19)}。

また, Fig. 9やFig. 10に示したように, 残留オーステナイトの有無による交流磁気特性の違いを利用しても, 誘起電圧の差分値は, 残留オーステナイト量と強い相関を示した。このことから, あらかじめ両者の関係を求めておくことにより, 残留オーステナイトを定量することもできる。

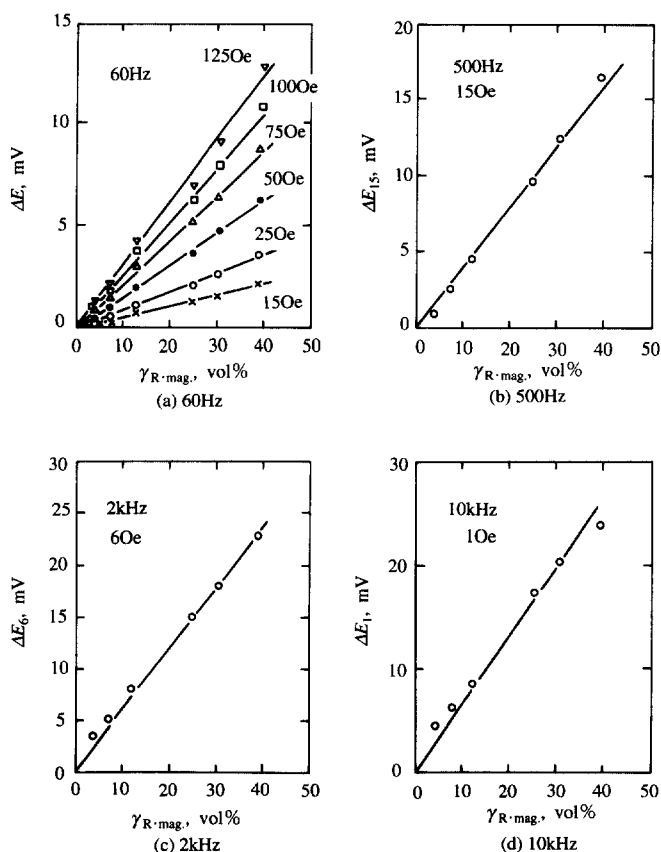


Fig. 9 Relationship between the amount of retained austenite and differential induced voltage by AC magnetization method.

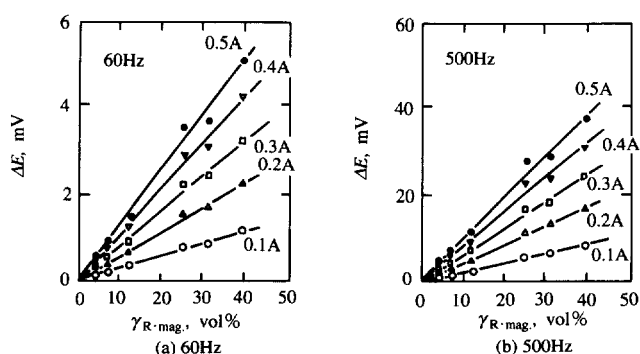


Fig. 10 Relationship between the amount of retained austenite and differential induced voltage by AC magnetization method with dual solenoid coils instead of helmholtz coil.

そこで、直流磁気測定と交流磁気測定による残留オーステナイトの定量法を比較する。直流磁気測定による方法では大きな磁化器を必要とし、測定後試料を消磁する必要がある。消磁しないと、残留磁化により切削加工や研削加工の際の切屑が加工面等に残り、組み付けできないという不具合を生じることもある。

交流磁気測定による方法では、残留オーステナイトの有無による誘起電圧の差分値を利用するので、標準試料として残留オーステナイトを含まない試料を準備する必要がある。そして、誘起電圧の差分値と残留オーステナイトとの相関をあらかじめ求めておくことにより残留オーステナイトの定量ができる。その際の磁界の強さも直流磁気測定のように大きくする必要はなく、また消磁する必要もない特徴を有する。

また、ヘルムホルツコイルで標準試料と被測定試料と一緒に励磁しなくても、Fig. 10に示したように、ソレノイドコイルを用い、それぞれ単独に同一強さで励磁する方法により測定できることを知った。ヘルムホルツコイルで大きな空間を励磁する必要がなくなり、ソレノイドコイルで試料のみを励磁することにより、小さな電源容量で測定できる。

なお、交流磁気測定では励磁の周波数の選択が必要である。同一磁界の強さでは、周波数が高くなるほど誘起電圧は大きくなり検出しやすくなる。しかし、周波数が高いほど磁界が内部に浸透しなくなる、すなわち表皮効果が発生する。たとえば、無限円柱の丸棒について、磁界の強さが表面の $1/e$ ($\approx 36.8\%$) になる表面からの深さ、すなわち浸透深さ (δ ; mm) は、次式で与えられる。

$$\delta = 50.3 \sqrt{\rho / \mu \cdot f} \quad \cdots \cdots (4)$$

ρ : 比抵抗 ($\mu\Omega\text{cm}$)

μ : 透磁率

f : 周波数 (Hz)

比抵抗 $100\mu\Omega\text{cm}$ ，透磁率100とした時のADIの浸透深さは，Fig. 11に示すように周波数の高いほど浅くなる。一方，周波数が高いほど誘起電圧の差分値が大きくなり検出しやすくなるが，高すぎると試料の発熱の心配もある。それ故，表皮スケール，表面と内部の組織の不均一性，そして試料の肉厚等を考慮して最適な条件を選定する必要がある。

5．部品の残留オーステナイト量測定装置

5.1 試料

残留オーステナイトの定量を検討したADIの部品は，Fig. 12に示す形状のカーエアコン用コンプレッサの回転駆動部品（ドライブプレート）である。900で30分オーステナイト化後325 に一旦冷却し，直ちに種々の温度で恒温変態させる二段オーステンパ処理をしたものを供試材とした。部品の残留オーステナイト量は，肉厚部（13mm）と薄肉部（8mm）より切りだした $\phi 8 \times 20\text{mm}$ と $\phi 6 \times 11\text{mm}$ の丸棒を用いて，直流磁

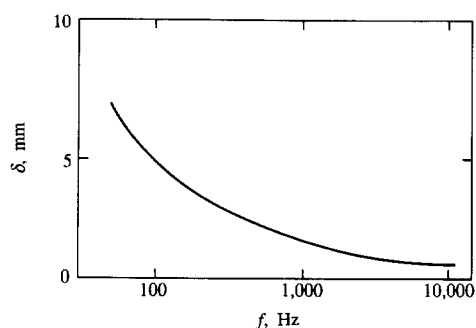


Fig. 11 Depth of penetration as a function of frequencies for ADI.

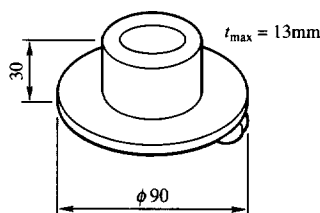


Fig. 12 Austempered ductile iron rotor for car air conditioning compressor^{1,2)}.

気測定による方法で求めた値を用いた。薄肉部と肉厚部との残留オーステナイト量を比べると，薄肉部の方が1～2%多くなる傾向を示したが，両者の平均値を部品の残留オーステナイト量とした。

5.2 装置の構成

Photo. 2は装置の外観で，その仕様をTable 1に示す。測定装置は，励磁電源部・コイル部・信号処理部から構成されている。

励磁電源部は，正弦波発振器と定電流回路で構成されている。部品の最大肉厚部13mmを考慮して，励磁周波数を100Hzとし，印加電流を200mAとした。

コイル部は，残留オーステナイトを含まない標準試料と被測定試料のそれぞれに励磁コイルと誘起電圧検出コイルから構成されている。励磁コイルは，樹脂製ケース（外径78mm，内径70mm）に線径0.45mmの耐熱性被覆銅線を180回巻線したものをを用いた。上記の条

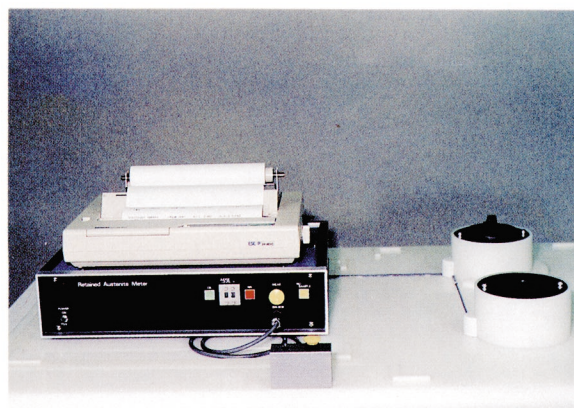


Photo. 2 Retained austenite meter for austempered ductile iron rotor.

Table 1 Specifications of retained austenite meter.

Range	0～80% γ_R
Error	$\pm 2\% / \gamma_R$
Judgment	Can be set at any value of 1% γ_R step
Display (Lamp)	OK, NG, No sample
Print out	Date, Time, Amount of retained austenite, Judgment (OK, NG)

件で励磁するとコイル中央部で8Oeの磁界が発生する。誘起電圧検出コイルは、樹脂製ケース（外径60mm，内径51mm）に線径0.15mmの耐熱性被覆銅線を1000回巻線したものをを用いた。励磁コイルと誘起電圧検出コイルとを同心円状に組込んだ一組を作製した。一方を残留オーステナイトを含まない標準試料側のコイルとし、他方を被測定試料側のコイルとした。励磁コイルは直列に結線し、誘起電圧検出コイルは逆極性に結線することで、標準試料側と被測定試料側の励磁を同一の強さとし、誘起電圧の差分値を取り出せるようにした。そして、同一のものを入れたときには誘起電圧の差分値がゼロになるようにバランスを取った。

なお、コイルの配置は、Photo. 2に示したように、作業性を考慮して奥側に残留オーステナイトを含まない標準試料用のコイルを、手前側に被測定試料用のコイルを置いた。両者の間隔は、互いの磁界が相互干渉を起こさない距離を実験で求め、約300mm離れた。

誘起電圧の差分値の交流電圧信号は、全波整流回路と平滑回路で直流電圧に変換される。変換された直流電圧は、あらかじめ求めておいた電圧と残留オーステナイト量の検量線から残留オーステナイト量を計算する。検量線は、熱処理された部品で本装置の出力を求めた後、その部品から切りだした丸棒を用いて直流磁気測定法により残留オーステナイト量を求める方法で作成した。その結果がFig. 13である。部品の残留オー

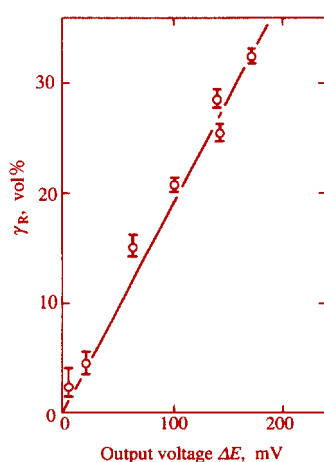


Fig. 13 Calibration curve between the amount of retained austenite and output voltage of retained austenite meter.

ステナイトの量と装置の出力電圧とは良い相関を示し、最小二乗法により次式を得た。

$$\gamma_R = 0.17 \times \Delta E + 1.8 \quad \dots \dots \dots (5)$$

(相関係数 = 0.99)

γ_R : 残留オーステナイト量 (%)

ΔE : 出力電圧 (mV)

信号処理部では、上記の残留オーステナイト量の換算の他に、設定した判定値との合否判定を行ってその結果をランプで表示するようにしている。そして、測定の日時、測定結果、および判定結果を自動印刷するようになっている。

5.3 実施例

Fig. 14は、恒温変態温度を種々変えたときの部品の残留オーステナイト量をPhoto. 2の装置で求めた例である。430 以下の恒温変態温度で熱処理すると、残留オーステナイト量は急激に増大する。430 ~ 440 の間で熱処理すれば、残留オーステナイトを含まないADIができることがわかる。このようなADIは、機械的性質や耐摩耗性に優れた材料で被削性にも優れている^{11, 12)}。

本装置では、1分間に5～6個の部品の残留オーステナイト量を求めることができる。このように、生産現場において誰もが簡便に、しかも個人差がなく部品の残留オーステナイト量を測定できるため、切削加工前にその良否の判定をすることができる。現在、本装置は年間60～70万個生産されている量産ラインの抜き取り検査用として使われている。

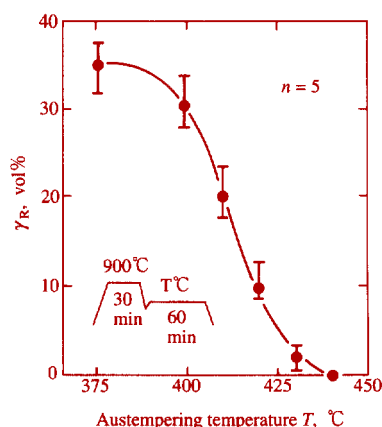


Fig. 14 Influence of austempering temperature on retained austenite content of ADI rotor.

6. まとめ

ADIの直流磁気特性と交流磁気特性を調べ、次の結果を得た。

(1) ADIの直流磁気特性では、残留オーステナイト量が多くなると、飽和磁化、残留磁化、そして最大透磁率は減少する傾向を示した。一方、保磁力は30Oeでほぼ一定であった。飽和磁化に相当する10kOeでの磁化 ($4\pi I_{10k}$, kG) を利用して次式で残留オーステナイト量 ($\gamma_{R\cdot mag}$, %) が求まり、X線回折法で求めた結果と1:1の対応が得られた。

$$\gamma_{R\cdot mag} = \left(1 - \frac{4\pi I_{10k}}{4\pi I_{10k}^*}\right) \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \times 100$$

$4\pi I_{10k}^*$: 残留オーステナイトを含まない試料の10kOeでの磁化 (17.2kG)

G : 黒鉛の量 (10vol%)

(2) ADIの交流磁気特性では、残留オーステナイト量が多くなると、同一磁界での磁化は少なくなる傾向を示した。励磁周波数が大きいほど、大きなヒステリシスを示す磁化曲線が得られた。

(3) 残留オーステナイトを含まない標準試料と被測定試料を同一の交流磁界で励磁すると、磁束検出コイルに誘起される電圧の差分値は、残留オーステナイト量と強い相関を示した。

(4) カーエアコン用コンプレッサのADI部品を100Hzで交流励磁し、残留オーステナイトの有無による誘起電圧の差分値を取り出す方法で残留オーステナイト量を測定し、非破壊・迅速・簡便に取り扱うことのできる装置を開発した。

最後に、本装置の実用化にあたりご協力を頂いた(株)豊田自動織機製作所の関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 自動車の軽量化における金属素材の現状と今後の展望, 矢野経済研究所編, (1991), 215p.
- 2) 田中一郎, 川端哲也: 自動車技術, 45-6(1991), 79
- 3) 岡崎健, 浅井裕史, 楠木弘明: 自動車技術, 43-6(1989), 19
- 4) 新美格: 鋳物, 61-1(1989), 7
- 5) 滝田光晴, 上田徹完: 熱処理, 27-5(1987), 310
- 6) Harding, R.: 2nd Int. Conf. on ADI, ASM., USA, (1986), 39
- 7) Mayer, H. and Barbezat, B.: ref. 6), p.99
- 8) 佐野実, 岡田文宏: 自動車技術, 40-8(1986), 1010

- 9) 石原安興: 鋳物, 58-12(1986), 823
- 10) 塩川忠: 鋳物, 56-6(1984), 362
- 11) 滝田光晴, 上田徹完, 白木久史, 成瀬賢次, 柏木陽一郎: 鋳物, 61-9(1989), 620
- 12) 北島博利, 白木久史, 柏木陽一郎, 成瀬賢次: 豊田織機技報, No.19(1989), 21
- 13) 小林俊郎, 山本浩喜, 高林幸央: 鋳物, 59-3(1987), 147
- 14) 木曾弘隆, 小山満晴, 田口富雄: 鋳物, 61-9(1989), 615
- 15) 加藤義雄, 山田銃一, 加藤隆幸, 宇野武志: 日本熱処理協会第21回講演大会予稿集, (1988), 7
- 16) 石原安興, 中野英治: 鋳物, 59-7(1987), 396
- 17) 石原安興, 上野大成, 末永充, 中野英治: 熱処理, 32-1(1992), 16
- 18) 吉田潤二, 竹内宏昌, 木村康夫: 鋳物, 59-11(1987), 658
- 19) 木村康夫, 竹内宏昌: 鋳物, 62-3(1990), 196

著 者 紹 介



加藤義雄 Yoshio Kato

生年: 1946年。

所属: 金属材料研究室。

分野: 金属材料, 磁性材料。

学会等: 日本金属学会, 日本応用磁気学会, 日本鉄鋼協会会員。



山田銃一 Sen-ichi Yamada

生年: 1936年。

所属: 材料3部。

1993年4月より, 関東学院大学工学部機械工学科教授。

分野: 金属材料。

学会等: 日本金属学会, 日本鉄鋼協会, 日本鋳物協会, 軽金属学会, ASM (American Society for Metals) 会員。
工学博士。



加藤隆幸 Takayuki Kato

生年: 1944年。

所属: 機電技術室。

分野: 静電気計測とその応用, 各種センシング技術の開発。

学会等: 自動車技術会会員。



宇野武志 Takeshi Uno

生年: 1961年。

所属: 機電技術室。

分野: 電磁気を利用した計測技術, 及び電気・電子・制御回路の設計・製作。