Journal of JSNDI Vol.63, No.7, pp.360-364 (2014)

論文

渦電流法による鋳造カムシャフトのチル化率評価

矢口　修*，宮崎　利行**，佐々木敏彦***

A Method of Non-destructive Inspection for Chilled Structures in Cam-shafts Using the Eddy Current Technique

Osamu YAGUCHI*, Toshiyuki MIYAZAKI** and Toshihiko SASAKI***

Abstract

Cam-shafts used for internal-combustion engines need to be chilled at the foundry stage to increase the cam hardness, however, unexpected chilled structures may occur on the sensor plate surface. Chilled structures on the sensor plate may break a grinding tool during the grinding process and may also hinder the fabrication of a specified shape due to resistance arising from the hyper-hardness of the chilled structure. For this reason, developing an inspection technique and a device for detecting unnecessary chilled structures before the grinding process of cam-shafts is needed to determine the rejection and removal of a sample with chilled structures. This paper reports on a recently developed non-destructive method employing the Eddy Current method to detect chilled structures on a cam-shaft sensor plate accurately.

Key Words　Non-destructive inspection, Casting, Machinability, Measurement, Eddy current, Structure test, Chilled structure, Cam-shaft

1．緒言

内燃機関用に使用される鋳造製カムシャフトでは，カム先端部の耐摩耗性向上のため，微細なセメンタイトを分散させた白鋳鉄化（以下，チル化）する処理が一般に施される[1]。このようなチル化処理では，カムシャフト全体のじん性確保や機械加工時の被削性の目的で，バルブとの接触部分以外はチル化させないことも重要になる。すなわち， チル化した組織は硬質で被削性に劣るので，予期しない箇所に出現すると機械加工時にバイトを損傷させ，生産ラインに悪影響を及ぼすからである。そのため，チル化組織の適正な管理が必要になる。これに対して，現状では金属組織観察による対応が一般的である．しかし，破壊法であるため，検査時間およびコスト，さらに全数検査が困難である等の課題がある。このため，迅速で低コスト，しかも非破壊による新たな検査技術が求められている。

鋳造後のカムシャフトの表面は，酸化膜（黒皮）で覆われているため，目視による外観検査やX線回折法では判定が困難である。また，形状が比較的複雑で曲面が多いため，超音波法の適用も困難な場合が多い。これに対し，渦電流法では非破壊，非接触で，高速かつ低コストでの検査が期待できる。さらに，渦電流法では鋳鉄の組織状態が評価可能であることが阿部ら[2]により，また，鋳鉄中のセメンタイトの有無や体積率の評価が可能であることが黒澤ら[3]によって，既に報告されている。さらに，渦電流法は材質変化に関してX線回折法より敏感であることが後藤[4, 5]により明らかにされている。一方，カムシャフトの製造ラインでの適用においては，実際的な課題が幾つか未解明である。例えば，鋳造直後の荒れた鋳肌の表面状態や，カムやセンサプレート部を有する複雑な形状がチルの評価に悪影響を及ぼすことが懸念される。そこで本研究では，このようなカムシャフトの製造ラインにおいても有効に適用できるような渦電流式検査法の実現を目的に検討を行った。

原稿受付：平成25年10月23日　　掲載決定：平成26年4月21日

*　（株）リケン（945-8555 新潟県柏崎市北斗町1-37）
Riken Corporation Div. of Piston Rings Research & Development
(Hokuto-Cho 1-37, Kashiwazaki-City, Niigata, 945-8555 Japan)
**　金沢大学人間社会域人間科学系（920-1192 石川県金沢市角間町）
Human and Socio-Environmental Studies, Kanazawa University
(Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192 Japan)
***　金沢大学大学院自然科学研究科（920-1192 石川県金沢市角間町）
Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University
(Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192 Japan)

2．本渦電流法の概要

渦電流センサの励磁コイルの磁界内に導体の試験体を置くと，ファラデーの電磁誘導の法則により，試験体内に渦電流が誘導される。渦電流はコイルの磁束の変化を妨げる向きに磁束を発生させるため，コイルの総磁束が変化し，コイルのインダクタンスに変化を与える。

このとき，試験体内部にチル化などの材質の変化があった場合，それによって透磁率の変化を生じる。また，励磁コイルによって試験体に発生した渦電流も変化する。一方，検出コイルは励磁コイルと試験体の渦電流による磁場との合成磁場を検出する。その結果，検出コイルの出力変化により試験体の渦電流による磁場の変化が検出できる[2, 6]。本研究では，このような変化をカムシャフトにおけるチル化率の検査に利用するための検討を行った。

3．実験方法

3.1　試験片

本研究では，実際の内燃機関用鋳造カムシャフトを試験片として用いた。**Fig.1**に，試験片の外観写真を示す。この写真のように，カムシャフトの端部には軸周りの回転角の検知用として用いるセンサプレート，また，他端にはジャーナルがある。本カムシャフト試験片には，約45mm間隔に8個の

© 2014 The Japanese Society for Non-Destructive Inspection

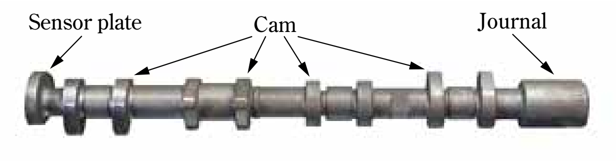


Fig.1 Photograph of the cam-shaft specimen used in this study

カムがあり，それらを繋ぐシャフト部の直径は26mm，全長440mmである。本カムシャフトの材質はFC250であり，その化学成分は**Table 1**に示す通りである。また機械的性質は引張強さが250N/mm^{2}以上，硬さ（ブリネル）が241HB以下である。試験片の表面における鋳造後のシェル砂を除去するため，製造ラインと同様にショットブラスト処理を施した。**Fig.2**に，カムとセンサプレートの形状，および，カムにおけるチル組織の形成範囲（白い部分）を模式的に示した。

現在，製造過程において問題となるのは，センサプレートに面積比（以下チル化率と呼ぶ）で5%を超えるようなチルが発生することである。それ以下のチル化率や，カム部におけるチル化に関しては，通常，ほとんど問題とはならない。**Fig.3**に，以下の実験で用いた3種類のチル化率を有するセンサプレートの外観および断面の金属組織写真を示す。このように，チル化部分では凝固時の急冷処理によってセメンタイトが形成されており，酸による腐食によって白色の外観を呈するようになる。一方，チル以外の部分はパーライトである。本研究では，Fig.3に示した3種類のチル化率のカムシャフト試料を，それぞれ16本ずつ作製した。これらとチル化率0%の試料16本を加えて実験に供した。

3.2　実験装置

本研究で用いた渦電流装置，その構成図および渦電流センサ（貫通プローブ）を**Fig.4**，**Fig.5**にそれぞれ示す。いずれもibg Prufcomputer GmbH製である。本システムでは，貫通プローブの励磁コイルによって試料に渦電流を発生させ，同じ貫通プローブ内の検出コイルによって励磁コイルと試験体の渦電流による磁場との合成磁場を検出する。このような測定を，測定試料と共にチル化率が0%の基準試料と同時に行った。磁場により検出コイルに生じる誘導電圧の，励磁コイルへの印加電流と同相成分である実成分をX_n，また，それと90°位相

Table 1　Chemical composition of FC250

(wt.%)

C	Si	Mn	P	S
3.3	2.1	0.75	0.05	0.02 >

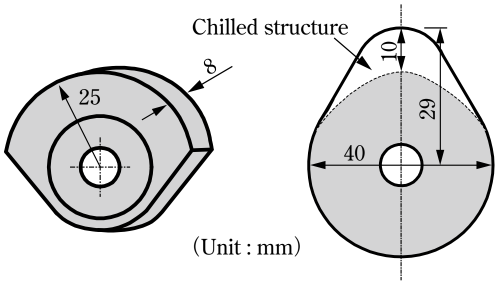


Fig.2 Shape of sensor plate (left) and cam (right) for cam-shaft used in this study

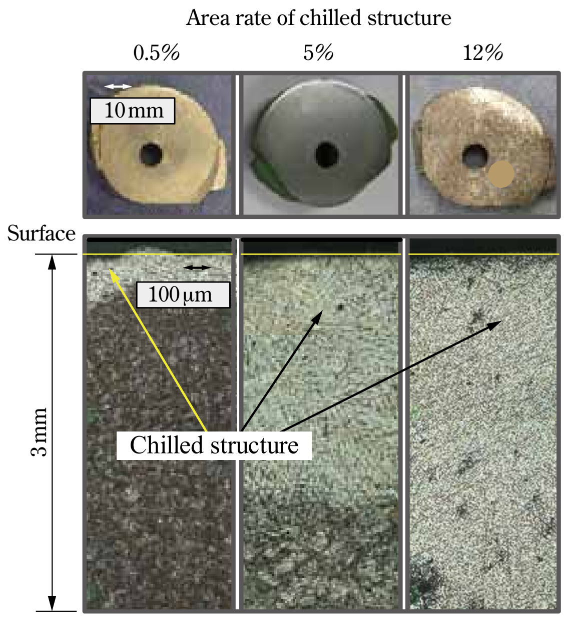
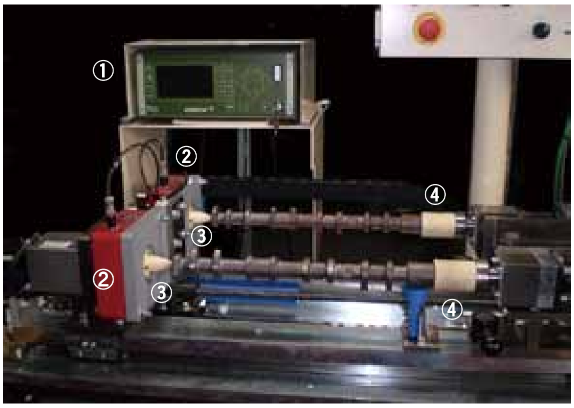
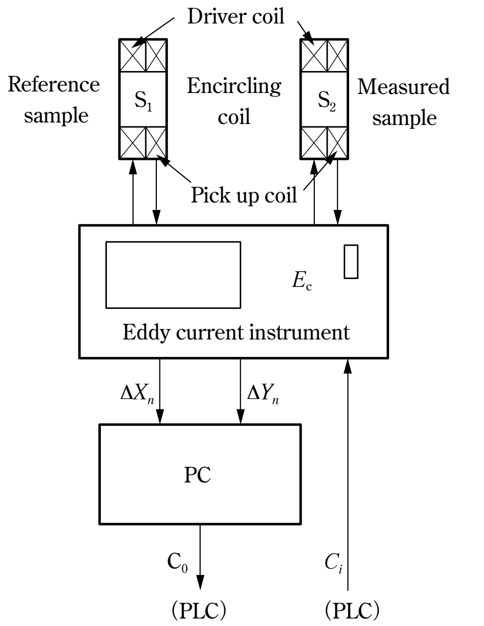


Fig.3 Sensor plate specimens with different ratios of chilled structure, and their macro structures of the cross section



(a) Eddy current apparatus used in this study



(b) Setup of eddy current testing used in this study

Fig.4 Non-destructive inspection apparatus based on eddy current testing used for cam-shaft. (1: Eddy current instrument, 2: Encircling coil, 3: Holder-A, 4: Holder-B)

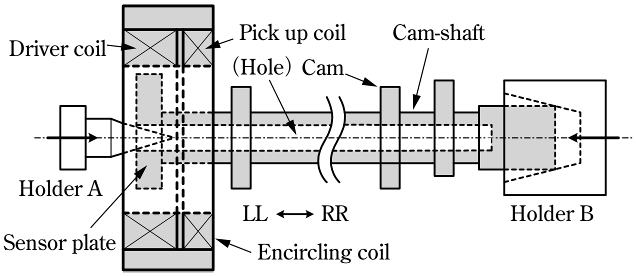


Fig.5　Schematic illustration of holding method with sample holders A and B, as well as encircling coil with two kinds of coil

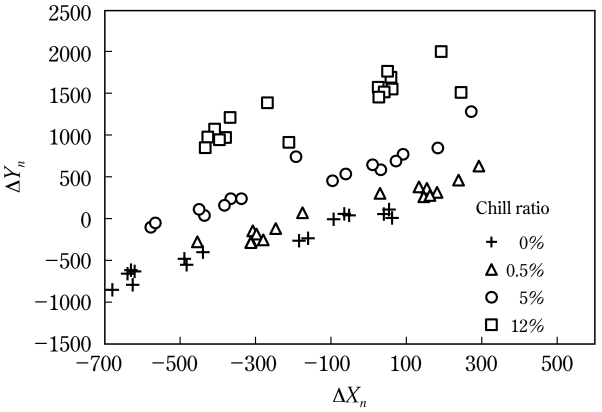


Fig.7　ΔX_n−ΔY_n diagram obtained from four kinds of specimens with different chilled structures

がずれた成分である虚成分を Y_n とすると，本装置の出力データは，測定試料と基準試料との測定データの差，ΔX_n，ΔY_n となる。以下では，これらの値を用いてチル化率の評価方法を検討した。

Fig.4 (b) は，試料および貫通プローブの配置関係について示している。図中のホルダ A はサーボモータにより試料を軸方向に移動可能であり，後述する検証実験においてその影響の検討に用いた。ホルダ B ではエアシリンダによって試料を押し付けて固定した。両ホルダの先端部は，アルミナ製(Al_2O_3，99.5%) とした。

Fig.6 に，本研究で用いた貫通プローブの外観写真および断面構造の概略図を示す。本貫通プローブの貫通部（内径 ϕ63 mm）の外周には，励磁用と，検出用の 2 種類のコイルが巻かれてある。本貫通プローブの駆動可能な周波数は，最小 25 Hz，最大 25 kHz であり，本実験では 25，80，250，630，1.6 k，4 k，10 k，25 kHz の 8 種類を採用した。励磁用コイルの抵抗，インダクタンスはそれぞれ 2.1 Ω，1.8 mH，検出コイルはそれぞれ 21.8 Ω，10.5 mH である。また，励磁コイルは 12 V_{rms} で電圧駆動した。

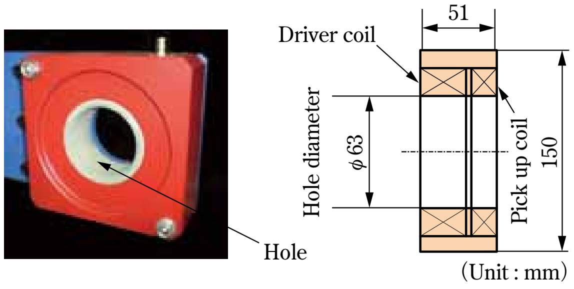


Fig.6　Photograph and schematic of encircling coil

4.　実験結果および考察

Fig.7 に，センサプレート部にそれぞれ異なるチル化率を有する各 16 本のカムシャフト試験片に対して，本渦電流装置の出力信号（ΔX_n，ΔY_n）を横軸に ΔX_n，縦軸に ΔY_n をとってプロットした結果を示す（励磁周波数 f = 630 Hz の場合）。図より，各試験片の測定結果はそれぞれ異なる右上がりの帯状の分布を示す傾向があることが判明する。

Fig.8 は，センサプレート部を励磁コイルの中心から軸方向（Fig.5 (b)）の RR 方向）に 0.25 mm ずつ，最大 1 mm まで変化させたときの ΔX_n − ΔY_n 線図である（励磁周波数 250 Hz の場合）。図より，右上がりの直線関係となることが判明する。

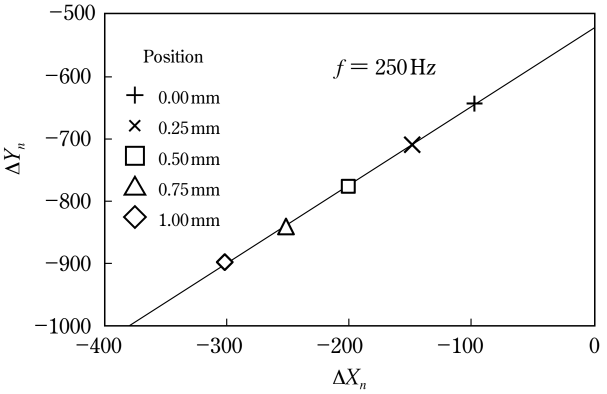


Fig.8　ΔX_n−ΔY_n diagram as function of axial cam-shaft movement

他のすべての周波数範囲においても同様な傾向が確認された。

通常の製造ラインでは，試料取り付け時における長軸方向への取り付け誤差が，ある程度は不可避であり，Fig.8 のようなデータ変動が付随せざるを得ない。また，こうした出力信号の変動は，チル化率とは無関係であるため，両者を区別する必要がある。Fig.7 より，チル化率が異なると ΔX_n − ΔY_n 線図において異なるバンド領域に測定データがシフトする。すなわち，チル化率が同じ試料では，取り付け位置の影響を受けると，同じバンド上を変化し，一方，チル化率が異なると別のバンド上に移るようになる。このとき，各チル化率に対するバンドはほぼ平行で，チル化率の差が大きいほど各バンド間の間隔が増加する。よって，こうしたバンド間の間隔を利用すると，長軸方向の取り付け誤差の影響を受けずにチル組織の状態が判別できる可能性がある。

本研究では，軸方向に関する保持位置の変動に関して以下のような評価法を導入した。すなわち，**Fig.9** に示したように，複数（本研究では 10 本）のチル化率が 0%の標準試料に対して，センサプレートが励磁コイルの中心に位置しているときの ΔX_n，ΔY_n 値（図の＋印）と，軸方向（Fig.5 (b) の RR 方向）へ 1 mm 移動させた際の ΔX_n，ΔY_n 値（図の○印）を直線近似する（図の破線）。さらに，それらの直線の傾きの平均 a，ΔY_n 軸上の切片の平均 b を求め，全体の平均の直線 $\Delta Y_n = a\Delta X_n + b$（図の実線）に対する各測定点の残差 δY_{ni} を以下の式（1）より求め，次に式（2）から標準偏差 σ を求める。

$$\delta Y_{ni} = \Delta Y_{mi} - \left(a\Delta X_{mi} + b\right) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots （1）$$

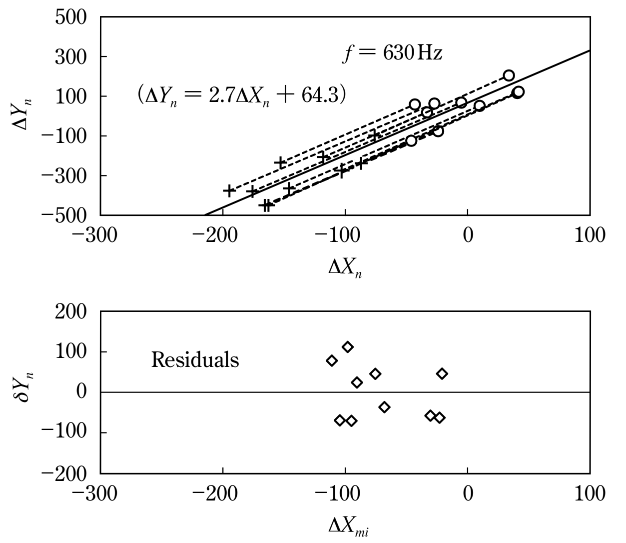


Fig.9 Lines obtained from ten samples by moving in axial direction (top) and residual of each data (bottom)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{i=N}\delta Y_{ni}^{\ 2}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

(ΔX_{mi}，ΔY_{mi} はそれぞれ＋，○点の ΔX_n，ΔY_n の平均値。N は標準試料数。以下同様)

このような σ の有効性を検証するため，Fig.7 に示した試料の各プロットに対する回帰直線および ±2.5σ の境界線を求めた結果を **Fig.10** に示す。図より，チル化率 0.5%は同 0%の結果と広い範囲でほぼ重なっているが，5%および 12%の試料のプロットはすべて ±2.5σ の外に分布していることが分かる。したがって，渦電流出力からの（ΔX_n，ΔY_n）データを ΔX_n − ΔY_n 線図に表し，Fig.10 のように決定した ±2.5σ のゾーンに入るかどうか確認することで，チル化率が 0.5%未満であるか判断可能になる。

次に，コイルの励磁周波数の影響を調べるため，他の周波数条件についても同様な測定を行った。その結果，高周波側の場合，f = 1.6kHz の場合と類似した傾向を示し，Fig.10 の f = 630 Hz の場合と同様なチル化率の評価が可能であることが確認された。一方，励磁周波数が低周波側（f = 25 Hz）では，チル化率 12%のプロットが同 0%と区別できず，チル化率の区別が困難であった。以上より，低周波数側の励磁周波数条件を除けば，カムシャフトの製造ラインにおいて問題であったチル化率 5%以上の製品を発見して，これを除くことが可能となる見通しが得られた。

一方，個々のカムシャフトのチル化率の定量的な評価はこのままでは困難である。そこで，標準偏差 σ の活用を発展させた第 2 の評価法について検討した。まず，チル化率評価パラメータ（以下 CEP と称す）を次のように定義する。

$$CEP = \left|\frac{\Delta Y_{mi} - \left(a\Delta X_{mi} + b\right)}{\sigma}\right| \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

本パラメータ CEP は，標準となるチル化率 0%の試料に対する ΔX_n − ΔY_n 線図からの標準偏差 σ と，未知の試料から得られる（ΔX_n，ΔY_n）データからの差との比の絶対値を表している。3 種類のチル化率を有する前記の各 16 本の試料について，8 種類の励磁周波数に対する平均 CEP を求め，チル化率との関係を図示した結果を **Fig.11** に示す。図より，チル化率が 0.5%の CEP は励磁周波数に関して概ね一定値を示すのに対し，同 5%の場合にはほぼその 2 倍程度の値を持ち，僅かにうねりおよび右下がりの分布を呈している。

一方，チル化率 12%では，比較的大きな勾配を有する右上がりの直線的関係を示し，また，低い励磁周波数範囲では CEP が小さく，f = 25 Hz では他より小さい値となった。

Fig.12 は，平均 CEP とチル化率の関係を励磁周波数 f が 630 Hz と 1.6 kHz の場合について図示した結果である。図より，どちらの周波数でも概ね直線的な相関がみられていることが分かる。Fig.12 の関係を用いると，渦電流法によってチル化率を定量的に評価できる可能性がある。すなわち，本研究の測定システムの出力データから CEP を求め，Fig.12 の直線関係を介して外挿によってチル化率を推定することができる。

CEP とチル化率の関係について，他の励磁周波数の場合についても調べてみたところ，高周波側（> 4 kHz）ではチル化率と CEP には相関性が見られたが直線的ではなくなり，また，80 Hz 以下の低周波側では相関関係は見られなかった。なお，励磁周波数は渦電流による評価深さに影響し，低周波の場合ほど試料の表面から深い領域の状態が反映される。本研究で用いたチル化率の異なる試料のセンサプレート部においては，表面（Fig.4 下図の上部）付近に異なる深さを有するチル層が形成されており，渦電流評価に影響したことが推察される。

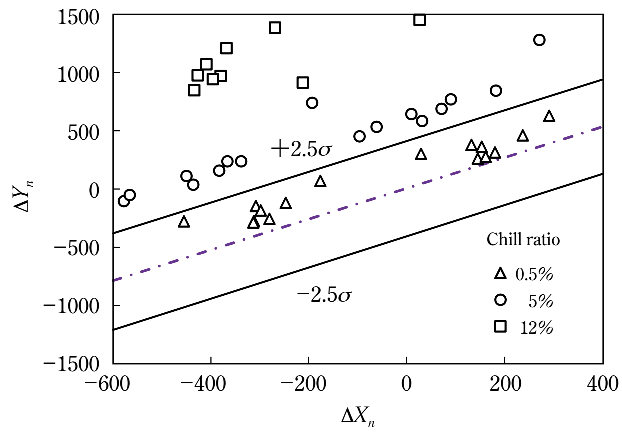


Fig.10 Change in ΔX_n−ΔY_n relation due to frequency obtained from three kinds of specimens with different chilled structure

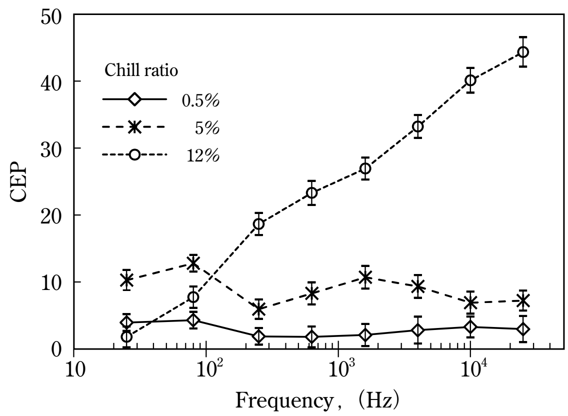
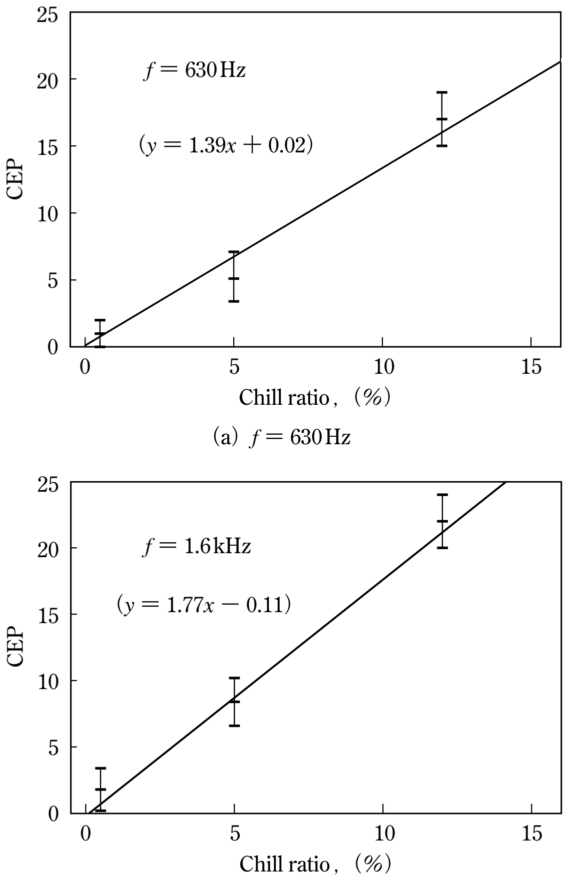


Fig.11 Chill Evaluation Parameter (CEP) for frequency



(a) $f = 630$ Hz

(b) $f = 1.6$ kHz

Fig.12 Relation between value of CEP and volume fraction of chilled structure obtained from the experiment with frequency of 630 Hz (top) and 1.6 kHz (bottom)

しかし，その突起状の形状による影響も考えられ，詳細については今後の検討が必要と思われる。

また本研究の結果を基に，前述したパラメータ CEP を用いた渦電流式の検査システムを実際の製造ラインに適用した結果，鋳造カムシャフト部品に対するチル化率の判定技術として，従来法と比較して優れていることが実証され，現在，製造ラインにおいて有効に実用され，効果を発揮している。

5．結言

試料の形状が比較的複雑であり，加えて，鋳造およびショットブラスト処理による荒れた表面を有するカムシャフトに対し，製造ラインでも有効に使用可能なチル化率判別のための渦電流式検査法について検討した。本研究の目的のためには，試料保持における軸方向の僅かな取り付け誤差の影響が避けられず，それによる渦電流信号への影響を除去することが重要な課題である。この課題に対する本研究の成果をまとめると以下の通りである。

1．カムシャフトからの渦電流出力は，基準サンプルとの差から得られる $\Delta X_n - \Delta Y_n$ 線図に表して整理することが有効である。
2．$\Delta X_n - \Delta Y_n$ 線図において，チル化率の異なるサンプルのデータは試料の軸方向の位置のわずかな変動により平行な直線状の分布を示し，チル化率が異なるほど互いの直線の距離が増大する。
3．$\Delta X_n - \Delta Y_n$ 線図におけるチル化率 0%のサンプルに対する直線式の平均に対して，未知の試料からの測定データの残差から得られる標準偏差 σ を用いることで，チル化率判定が可能である。
4．$\Delta X_n - \Delta Y_n$ 線図におけるチル化率 0%のサンプルから得られる直線近似式と，チル化率が有限値を有するサンプルからの測定データとの関係から求められる新パラメータ CEP は，励磁周波数の中間的な領域である 630 Hz および 1.6 kHz において，チル化率と直線関係を示す。この関係を用いると，未知の試料の渦電流出力から CEP を割り出すことでチル化率の定量化が可能になる。

参考文献

1）日本金属学会編，金属便覧，改定 3 版，丸善，p.1249,（1971）
2）阿部利彦，内一哲哉，高木敏行，遠藤　久：渦電流試験による鋳鉄表面近傍におけるきずの検出，鋳造工学，77(12), pp.821-825,（2005）
3）黒澤真理，内一哲哉，阿部利彦，高木敏行，佐藤武志，鹿毛秀彦，野口　徹：渦電流法による球状黒鉛鋳鉄中のセメンタイトの検出，鋳造工学，77(12), pp.826-832,（2005）
4）後藤　徹，山内崇賢：12% Cr-Mo-W-V 鋼の長時間加熱による材質劣化の非破壊検出，材料，30(330), pp.228-234,（1981）
5）後藤　徹：Cr-Mo-V 鍛鋼部材のクリープ損傷の非破壊検出，材料，32(356), pp.563-569,（1983）
6）阿部利彦，内一哲哉，高木敏行，多田周二：渦電流法による鋳鉄の材質評価，鋳造工学，75(10), pp.675-681,（2003）