

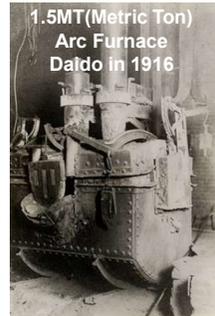
Fe基ナノ結晶合金コアにおける 複素透磁率と鉄損の周波数特性解析

大同特殊鋼株式会社
富田祐也

会社概要 大同特殊鋼株式会社

<会社概要>

会社名	大同特殊鋼株式会社 Daido Steel Co., Ltd.
本社	愛知県名古屋市中区 Nagoya, Aichi
社長	清水 哲也
創業	1916年 8月 19日 (創業: 福沢桃介) 2016年: 創業100周年 記念ロゴ 
従業員数	12,605(連結) 3,332(単体)
売上	2023年 5,813億円(連結) 3,866億円(単体)
資本金	372億円



アウトライン

会社紹介

- 大同特殊鋼について
- 大同特殊鋼の軟磁性材料ラインナップ

高周波用途向け材料&ソリューション開発事例

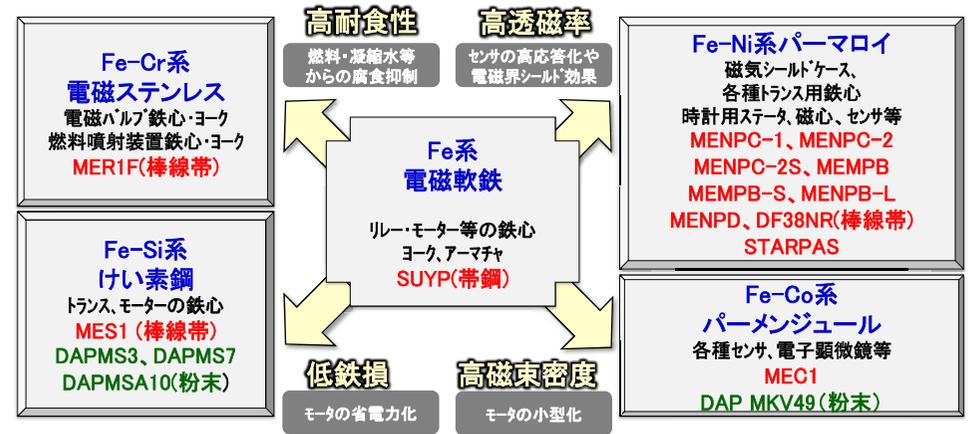
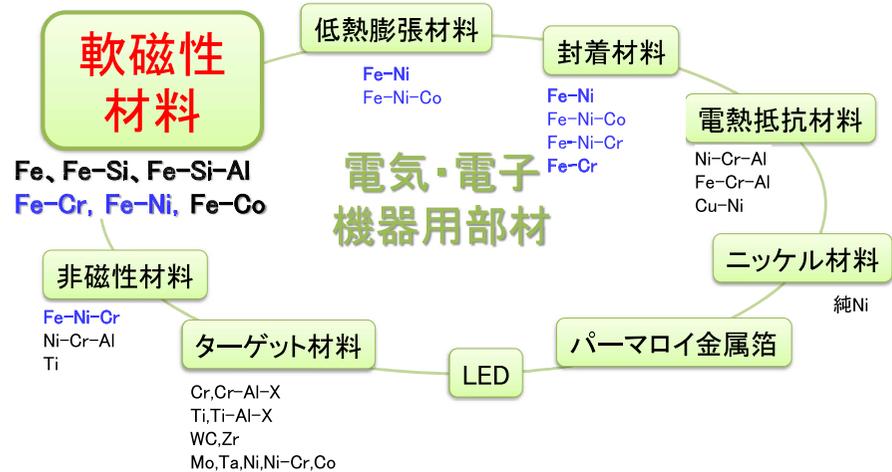
- 材料・製品開発事例
- ソリューション開発 EMC評価技術の開発

メインピックス

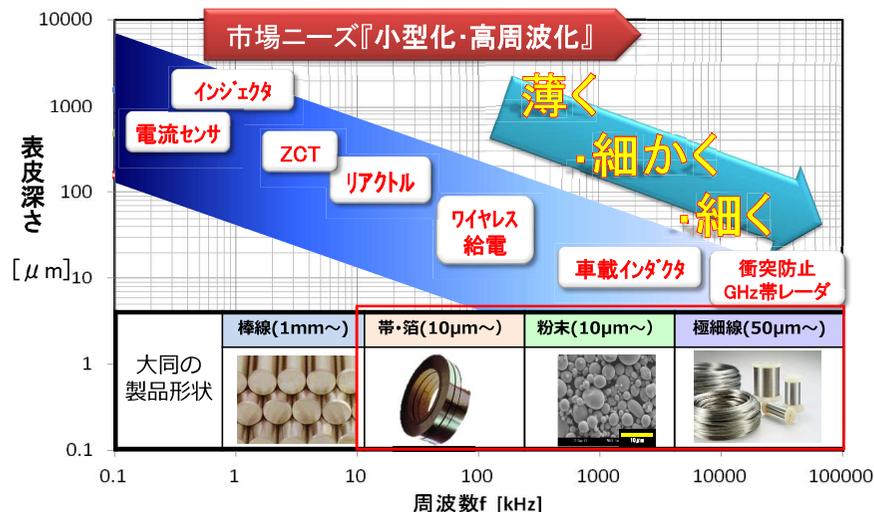
～Fe基ナノ結晶合金コアにおける
複素透磁率と鉄損の周波数特性解析～

セグメント

セグメント	売上比率	主な製品
特殊鋼鋼材	37%	Steel Bars, Steel Wire Rods, Steels for Powertrain & Steering, Steels for Drivetrain, Steels & Alloys for Fuel Injection & Sensors
機能材料・磁性材料	38%	Soft Magnetic Materials (Rare Earth Magnet), Stainless Steels, Nickel Alloys
自動車部品・産業機械部品	18%	Strip Steels, Engine Shafts for Aerospace, Ti-Al Alloy Turbine Wheels, Hot, High-speed Precision Forgings
エンジニアリング	3%	- Vacuum Carburizing Furnaces - Steel Melting & Refining Furnaces - Environmental Equipment



	棒線	帯	粉末	細線	箔
製品形状					



会社紹介

- 大同特殊鋼について
- 大同特殊鋼の軟磁性材料ラインナップ

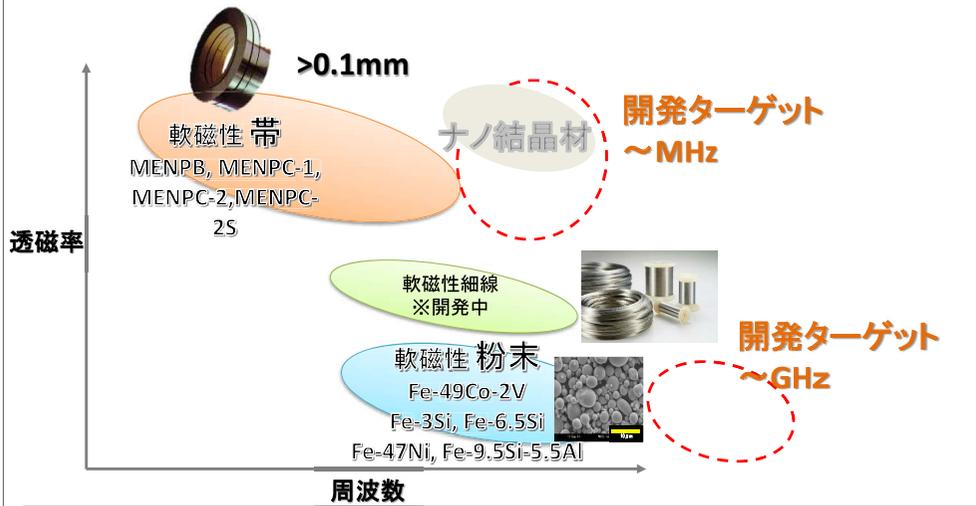
高周波用途向け材料&ソリューション開発事例

- 材料・製品開発事例
- ソリューション開発 EMC評価技術の開発

メインピックス

～Fe基ナノ結晶合金コアにおける複素透磁率と鉄損の周波数特性解析～

高周波向け軟磁性材料・製品開発

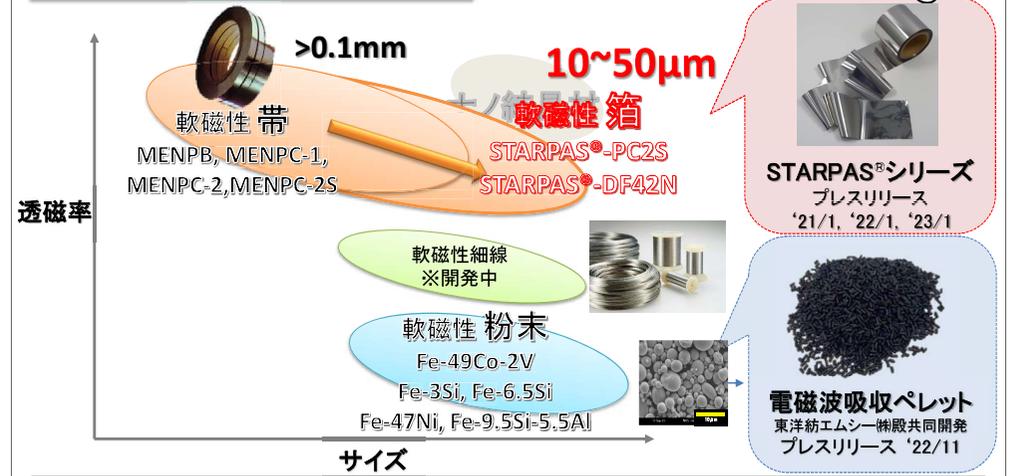


高周波用途材ラインナップ

高周波用途材料ラインナップを拡充
・電磁波吸収ペレット
(東洋紡エムシー(株)殿と共同開発)
・パーマロイ箔“STARPAS®”

STARPAS

電磁波吸収体 大同



開発事例: パーマロイ箔 STARPAS®シリーズ

◆開発品特長

- ・kHz~MHz帯域等で優れたシールド性能
- ・加工性・柔軟性に優れた極薄のパーマロイ箔 (10~50µm)

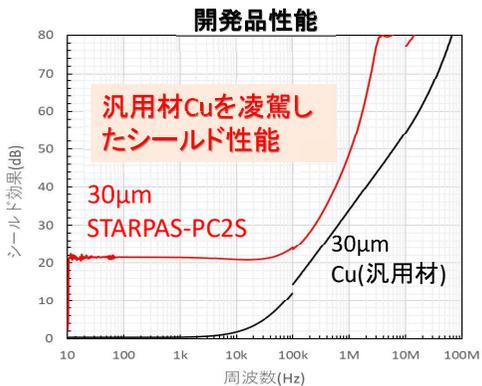
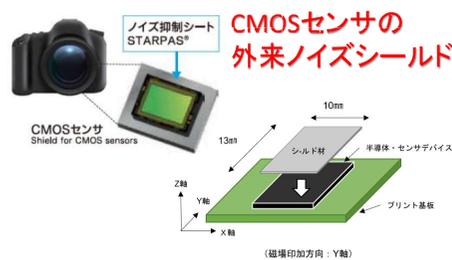
製品外観



◆解決可能な課題(例)



◆適用例



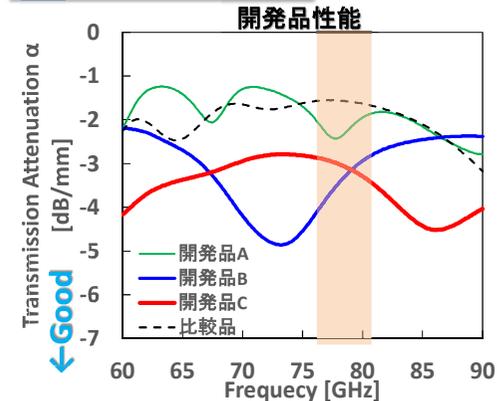
開発事例: 電磁波吸収体(共同研究-東洋紡エムシー(株)殿)

◆開発品特長

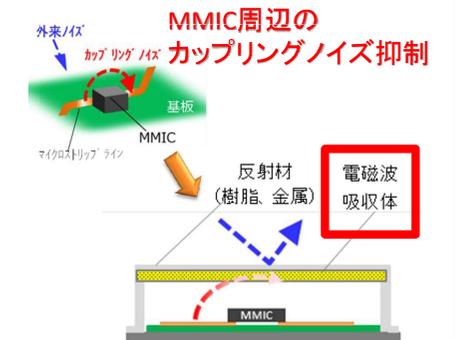
- ・自動車用レーダ用途 76GHz-81GHz等で優れたノイズ吸収性能
- ・インサート成型など、高い成型自由度



◆解決可能な課題(例)



◆適用例



アウトライン

会社紹介

- 大同特殊鋼について
- 大同特殊鋼の軟磁性材料ラインナップ

高周波用途向け材料&ソリューション開発事例

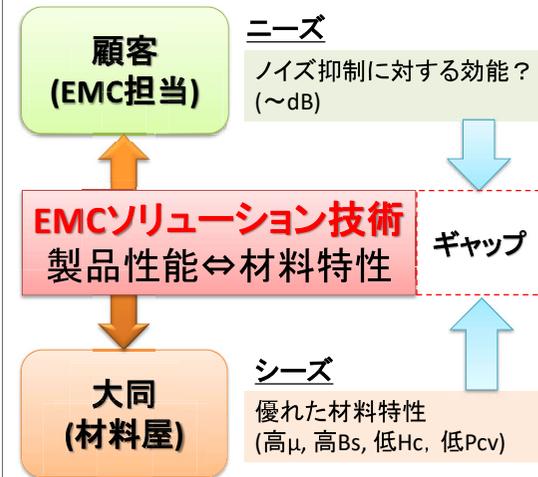
- 材料・製品開発事例
- ソリューション開発 EMC評価技術の開発

メインピックス

～Fe基ナノ結晶合金コアにおける
複素透磁率と鉄損の周波数特性解析～

EMCソリューション技術開発

EMC Sol.の位置づけ



開発事例

- ①近傍界シールド評価技術 (科学大, 西方先生)
- ②CISPR(車載規格)に準拠したEMC測定技術の構築
※3m法対応電波暗室を保有

参考: CISPR規格測定への対応状況

CISPR	対象	対応状況
11	工業, 科学, 医療機器	○(一部対応外)
14-1	家庭用機器他	○(一部対応外)
25	車両, ポート	◎
32	マルチメディア	◎

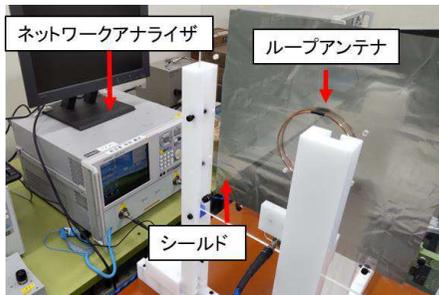
開発事例①: シールド評価技術(共同開発-科学大西方先生)

シールド性能評価技術の開発

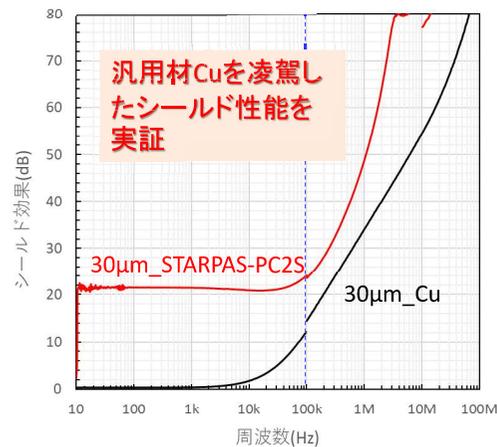
西方先生, 東科大のシールド理論式

$$S.E. = 20 \log_{10} \left| \frac{H_{z0}}{H_{zS}} \right|$$

出典: Nishikata, IEEE, EMC vol.34, No.1, 1992, Feb



STARPAS®-PC2Sのシールド効果

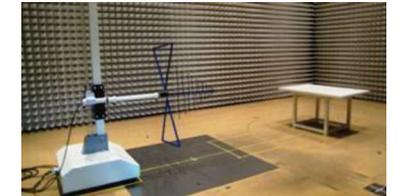
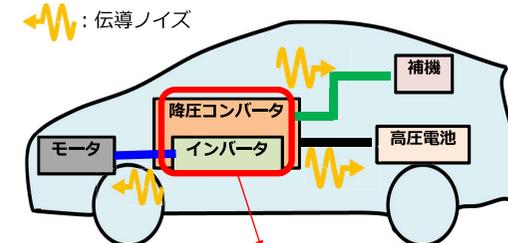


開発事例②: モータインバータ間の伝導ノイズ評価

電波暗室を活用したノイズ評価環境構築(CISPR25対応)

電気自動車における伝導ノイズ

参考: 弊社保有3m法対応電波暗室



供試システム

- ・製造元 小野塚精機(株)
- ・販売元 CQ出版社
- ・品名: CQインバータ・キット2

供試コア

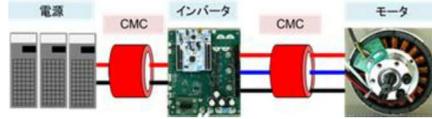
- ・STARPAS®-PC2S製コア



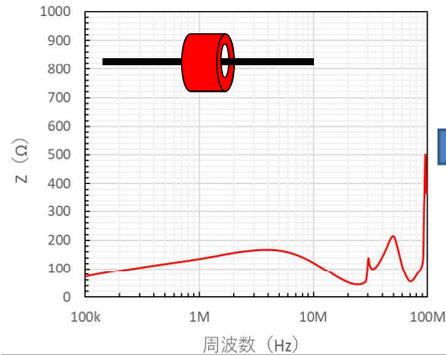
引用元: <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/I/1100516.html>

開発事例②: モータインバータ間の伝導ノイズ評価

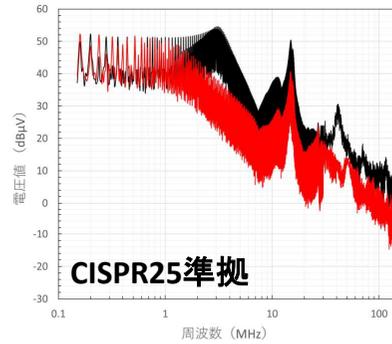
磁気特性とノイズ抑制効果の関係を紐づけ



STARPAS®-PC2S
のインピーダンス特性



STARPAS®-PC2S
のノイズ抑制効果



高周波向け製品・EMCソリューション技術紹介まとめ

■ 高周波向け製品

- 棒線、帯、箔、粉末等 用途に応じて
様々な形状の材料を提案可能。

【新製品】 パーマロイ箔“STARPAS®”シリーズ

【新製品】 電磁波吸収用ペレットの開発

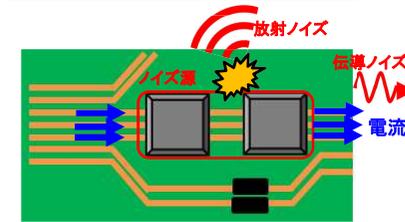
■ EMCソリューション技術

【新技术】 近傍界シールド評価技術

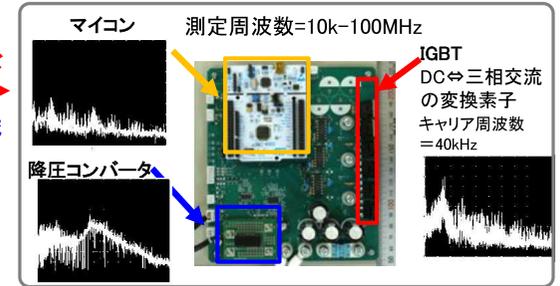
CISPR(車載規格他)対応 EMC評価環境の構築

開発事例③: ノイズ源の可視化技術

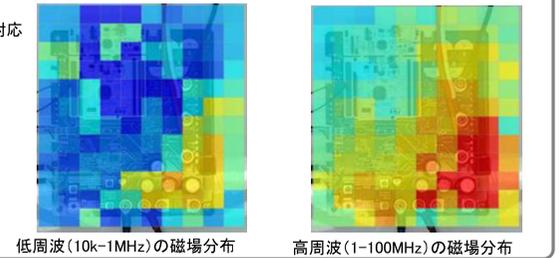
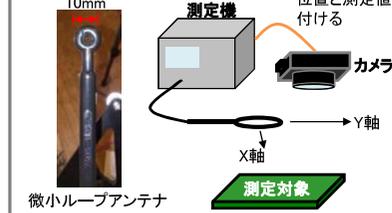
ノイズ源の特定が可能



ノイズ源では伝導ノイズと共に放射ノイズが発生するため機器の放射ノイズ分布からノイズ源を特定する



微小ループアンテナをXY方向にスweepさせて磁場分布を作成

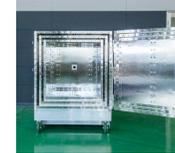


(改めて...) EMC, パワエレ市場における要求軟磁気特性

EMC市場 → 高透磁率



チョークコイル



シールド*

*石田鉄工殿HPより

パワエレ市場 → 低鉄損



リアクタ/トランス**



モータ***

**北川電機殿HPより

***NIDEC殿HPより

材料開発の視点は同じ。
→高周波高透磁率化

鉄損と透磁率の関係式

$$P_{\text{鉄損}} = \frac{\mu''}{(\mu'^2 + \mu''^2)} \cdot \frac{\pi \cdot B_m^2 \cdot f}{\text{定数} \cdot \text{駆動条件}}$$

複素透磁率

鉄損(コアロス)Pと
複素透磁率 $\mu (= \mu' - j\mu'')$
は1 vs 1の関係

市場ニーズ=開発ターゲット
→ナノ結晶合金しかない



アウトライン

会社紹介

- 大同特殊鋼について
- 大同特殊鋼の軟磁性材料ラインナップ

高周波用途向け材料&ソリューション開発事例

- 高周波用途ラインナップ
- 高周波向けパーマロイ箔 STARPAS
- EMC評価技術の開発

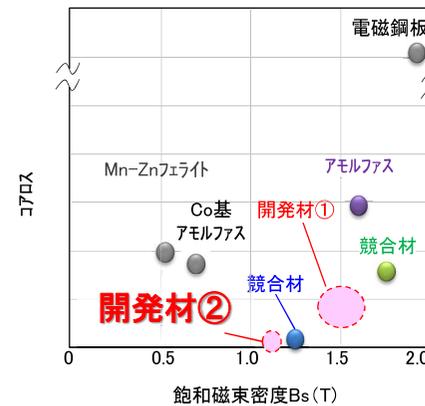
メインピックス

～Fe基ナノ結晶合金コアにおける
複素透磁率と鉄損の周波数特性解析～

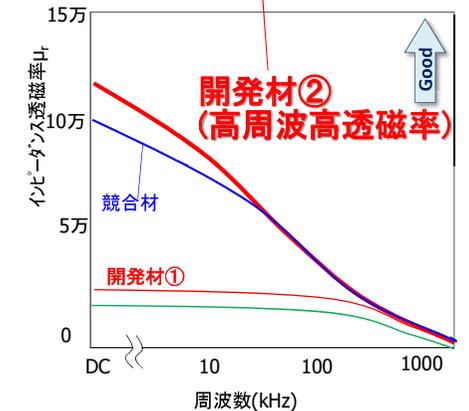
(ラボレベルですが)
高特性ナノ結晶材料を開発中

本日の報告内容
高周波特性改善方法を模索
する中で得た知見

開発ターゲット



開発材特性(@ラボ)



日本磁気学会 第48回 日本磁気学会学術講演会
S-4 次世代パワーエレクトロニクスを見据えて軟磁性材料に求められるものは？[27pD-5]

金属磁性コアにおける
インピーダンス透磁率の周波数依存性
Fe基ナノ結晶合金コアにおける
複素透磁率と鉄損の周波数特性解析

大同特殊鋼株式会社
○富田祐也, 高林宏之, 入山恭彦

Daido Steel Co., Ltd.
○Y. Tomita, H. Takabayashi, T. Iriyama

磁化過程に基づく鉄損解析

従来の鉄損解析

Classical Empirical model(Steinmetz eq.***)

$$P = P_{hys} + P_{ano} + P_{cl}$$

最近の鉄損解析のアプローチ

Model with magnetization process *

$$P = \frac{\mu''}{2(\mu'^2 + \mu''^2)} \cdot B_m^2 \cdot f$$

μ', μ'' 表示 (複素デカルト)

$$= \frac{\sin\delta}{2\mu_r} \cdot B_m^2 \cdot f$$

μ_r, δ 表示 (複素極形式)

$$\mu = \mu_{rev} + \mu_{irr}$$

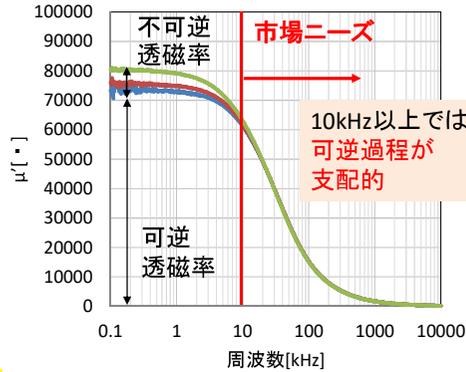
可逆過程(rev)と非可逆過程(irr)に分離可**

透磁率を介した解析のメリット

- ①可逆過程, 非可逆過程の分離が容易
- ②情報が1つ多いため詳細な解析が可能

参考: ナノ結晶コアの透磁率の磁場振幅 H_m 依存性

$$\mu = \mu_{rev} + \mu_{irr} = \mu_{rev} + \frac{1}{2}\eta H \cdot g(f)$$



*Florillo(INRiM), 岡本(東北大)のグループにて研究.
**C. Beatrice, J. Magn. Magn. Mater., 429(2017)
***Steinmetz (1892)

解析対象

Fe基ナノ結晶材料

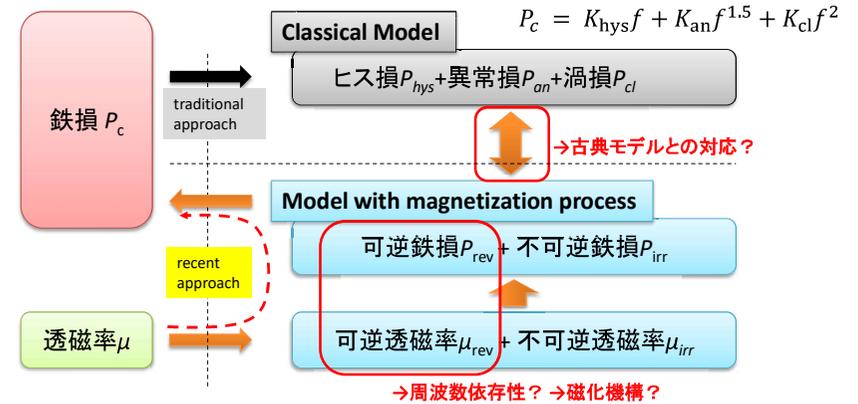
超急冷	巻き加工	熱処理	ケーシング	評価
<ul style="list-style-type: none"> FeSiBNbCu ナノ結晶 幅 10mm 厚み 18μm 	<ul style="list-style-type: none"> 巻回数 20 ϕ20.1-20, 高さ 10mm スポット溶接 	<ul style="list-style-type: none"> 823 K, 1.8ks Ar 雰囲気 	<ul style="list-style-type: none"> lid(PEEK) ribbon core case(PEEK) 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄損 (SY-8218, IWATSU) 透磁率 (E4990A, KEYSIGHT)

843 K, 1.8ks
0.83K/s
furnace cooling

本研究の目的

高周波で支配的な可逆磁化過程における複素透磁率 μ_{rev} の定式化を行い, 可逆鉄損 P_{rev} の周波数特性やその磁化機構について考察・議論する

OVER VIEW

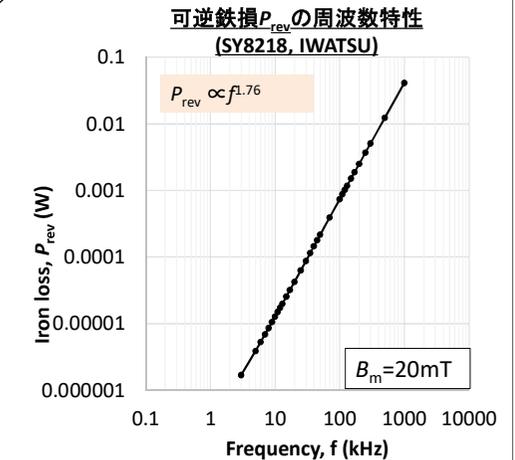
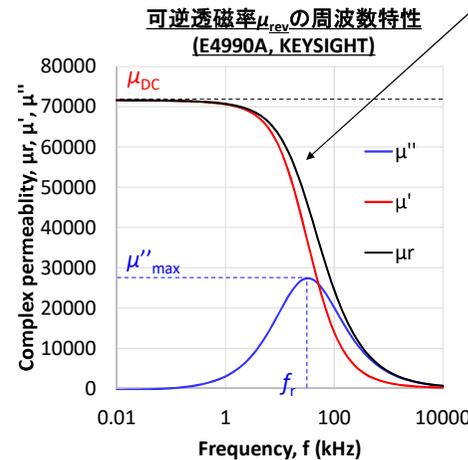


複素透磁率および鉄損

ナノ結晶合金の磁気特性の特徴

- 透磁率 μ_{rev} : 緩和型
- 鉄損 P_{rev} : $\propto f^{1.76}$

各種実測値	
μ_{DC}	71500
μ''_{max}	27000
f_r	35kHz



①磁壁の運動方程式による解析

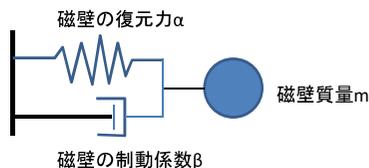
new

磁壁の運動方程式より透磁率の周波数特性の定式化を試みた。

磁壁の運動方程式(W. Doring, 1948)

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + \alpha x = 2I_s H_{ex}$$

磁壁移動の等価モデル



$$\mu = 1 + (\mu_{DC} - 1) \alpha \cdot \frac{(\alpha - m\omega^2) + j\omega\beta}{(\alpha - m\omega^2)^2 + \omega^2\beta^2}$$

高透磁率かつ低抵抗=ナノ結晶

$$m \ll \beta^2 / \alpha$$

$$\mu = \frac{\mu_{DC} - 1}{1 + (if/fp)}$$

$$f_p = \frac{\alpha}{2\pi\beta}$$

誘電率解析におけるDebyeの緩和式と同型
Debyeの緩和式(Debye, 1929)

$$\epsilon^* - \epsilon_\infty = (\epsilon_0 - \epsilon_\infty) / (1 + i\omega\tau_0)$$

②磁壁枚数変化を考慮した解析

- 緩和周波数は磁壁枚数に依存
- 低周波と高周波で磁壁枚数の周波数依存性が変化。(と当時は思っていた。 榭先生の手法を高周波適用するのは無理があるかもしれない。)

$$\omega_{relax} = \frac{\alpha}{\beta} \cong \frac{n\rho}{3\mu} C \quad \text{緩和周波数は磁壁枚数nに比例}$$

低周波 $n \propto f^{1/2}$
(電磁鋼板)

高周波 $n \propto f^{1/4}$

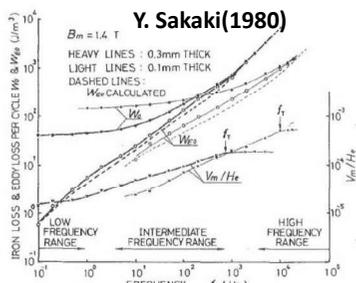
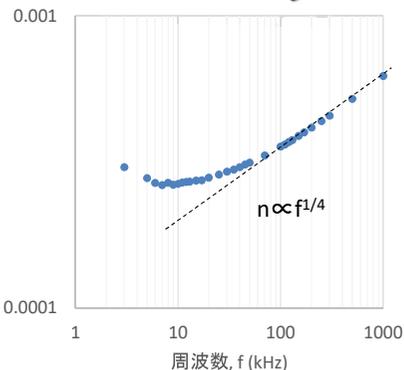


Fig. 2. Iron losses, eddy current losses, and V_m/H_e versus frequency.



結果

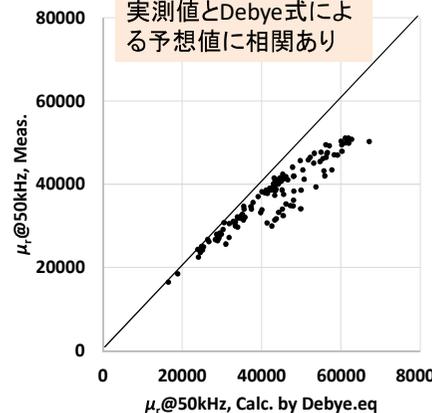
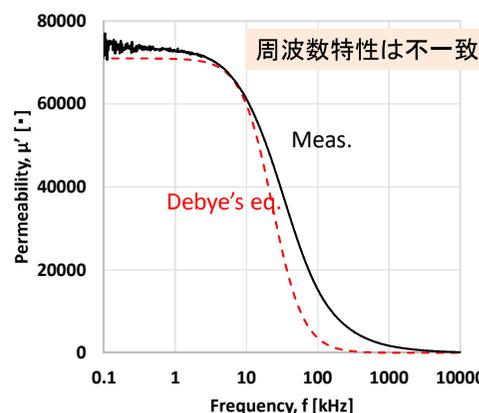
new

【×】磁壁緩和の式は実測値と一致しないが、関係はありそう。

磁壁緩和の式
(Debye緩和式)

$$\mu = \frac{\mu_{DC} - 1}{1 + (if/fr)}$$

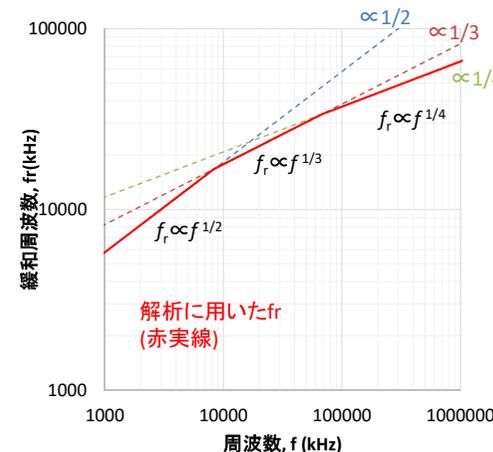
μ_{DC} : 直流透磁率
 f : 周波数
 f_r : 緩和周波数



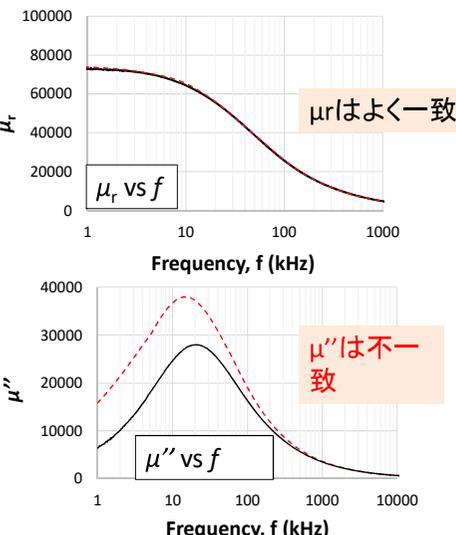
結果

【×】磁壁の周波数依存性を考慮することで μ_r は再現できたが、 μ'' は再現できず。

解析に用いた
磁壁枚数nの周波数依存性

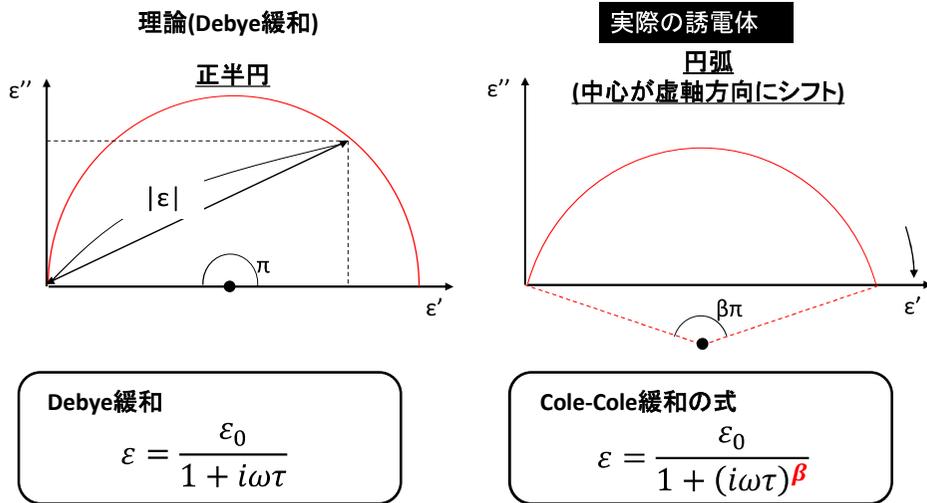


結果



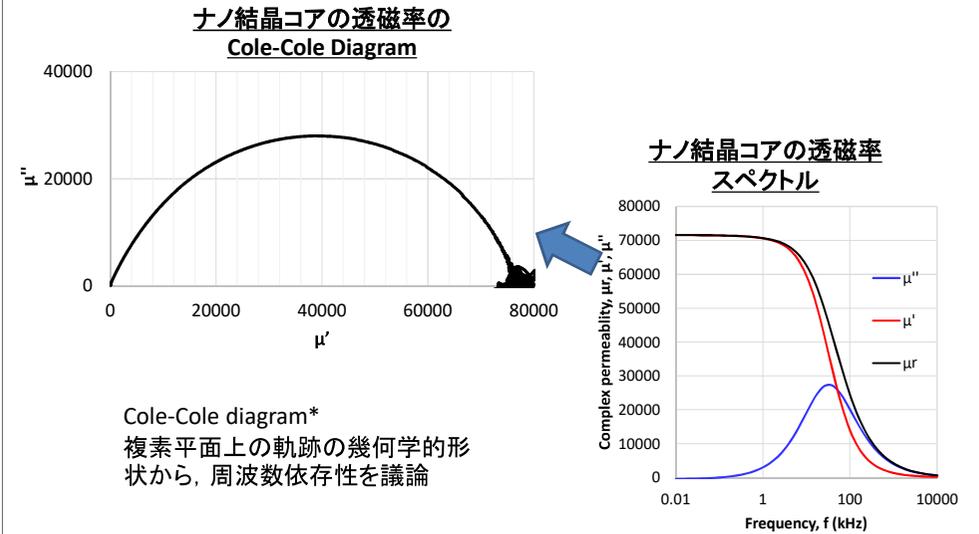
③Cole-Cole図を用いた解析

視点を変えて、他分野(誘電体)とのアナロジーによる解析にトライ



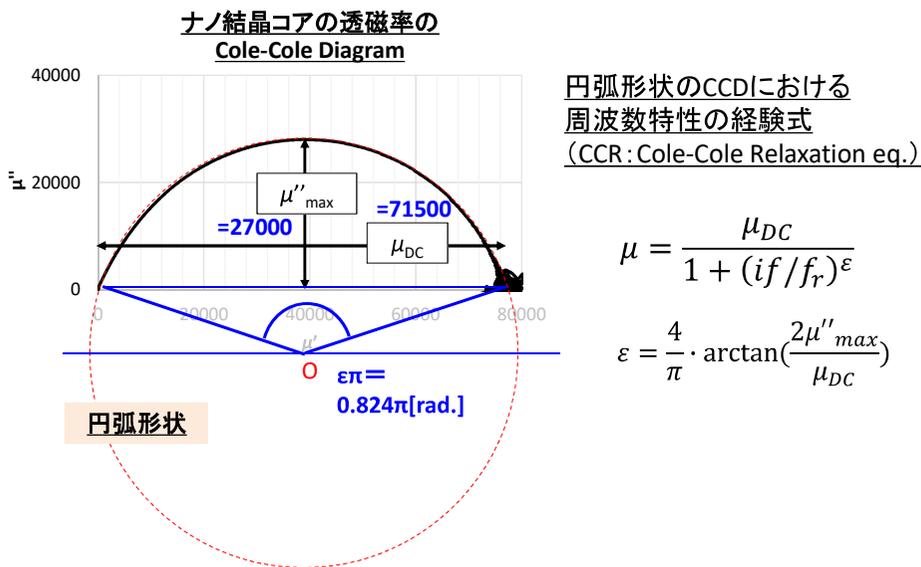
*K. Cole, R. Cole, J. Chem. Phys. 9, 341 (1941)

③ナノ結晶合金コア透磁率のCole-Cole Diagram



*K. Cole, R. Cole, J. Chem. Phys. 9, 341 (1941)

③ナノ結晶合金コア透磁率のCole-Cole Diagram



結果

【○】実験値をかなり精度よく再現
・透磁率スペクトル全体を3つのパラメータのみに集約

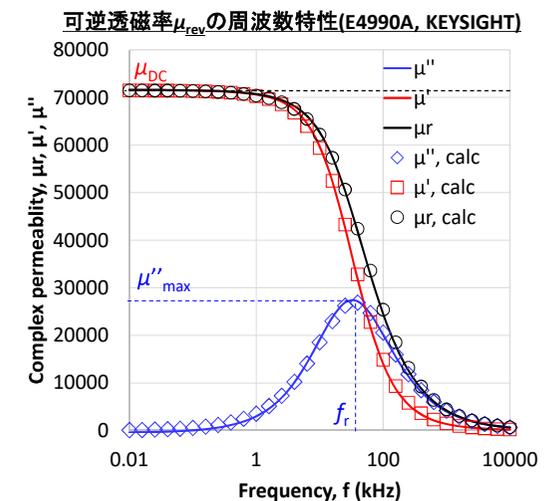
CCR式

$$\mu = \frac{\mu_{DC}}{1 + (if/f_r)^\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \frac{4}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{2\mu''_{max}}{\mu_{DC}}\right)$$

各種実測値

μ_{DC}	71500
μ''_{max}	27000
f_r	35kHz
ε	0.824



鉄損の定式化

- μ_{rev} 測定値から得られたパラメータを用いて鉄損を精度よく再現
- ナノ結晶材における可逆鉄損 P_{rev} は $f^{1+\varepsilon} = f^{1.83}$ に比例
- ★ Steinmetzの経験式や Bertottiの統計モデルでは現れない周波数依存性を確認。

可逆鉄損 P_{rev} の周波数特性 (SY8218, IWATSU)

CCR式に基づいた鉄損の透磁率表式

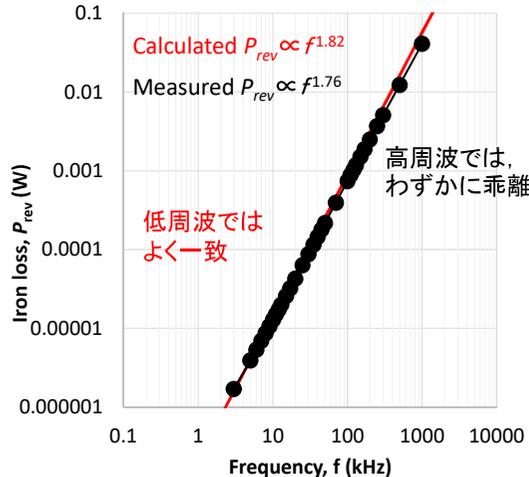
$$P_{rev} = \frac{\sin(\varepsilon\pi/2)}{\mu_{DC} f_r^\varepsilon} \pi B_m^2 \cdot f^{1+\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \frac{4}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{2\mu''_{max}}{\mu_{DC}}\right)$$

各種実測値

μ_{DC}	71500
μ''_{max}	27000
f_r	35kHz
ε	0.824

measured by Impedance Analyzer(E4990A)

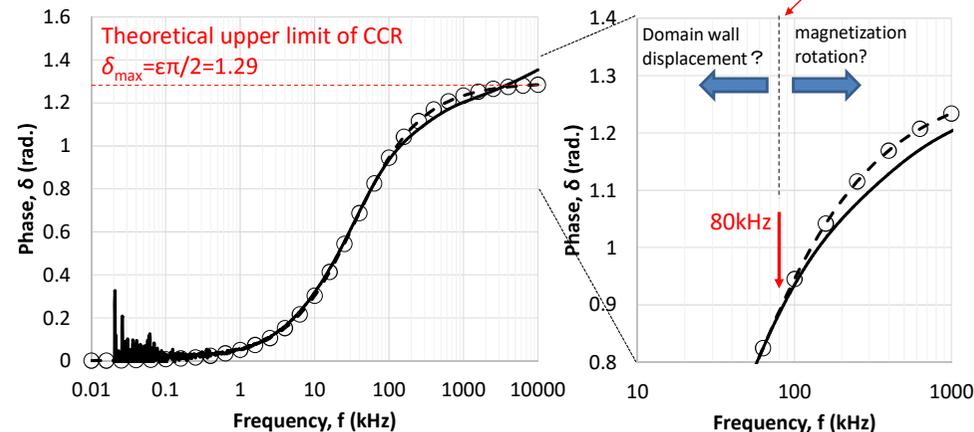


CCR式の精度・適用範囲の検証

$$\delta = \arctan\left(\frac{\mu''}{\mu'}\right)$$

80kHz以上の高周波では磁化過程が変化していることを示唆

磁区観察の結果を, MMM-Intermag(2025)で発表します。



CCR式の汎用性検証

複素透磁率 μ_r, μ', μ'' の周波数依存性のデータ 計121種を用いて μ_{DC} 及び μ'' のピーク周波数 f_p とインピーダンス透磁率 μ_r の関係についてデータ解析を実施した。

供試データ

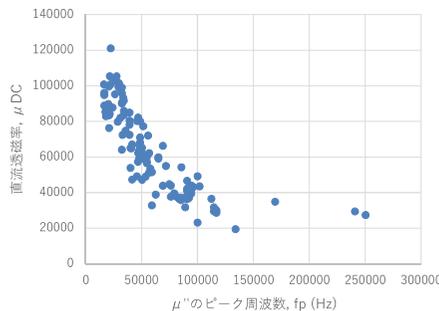
ナノ結晶巻きコア121点の複素透磁率の周波数特性。

[供試材概略]

- 組成: 大同開発高透磁率材等。
- 履歴: 超急冷-巻き加工(溶接止め)
- 熱処理(磁場中焼鈍/磁場無焼鈍)-評価
- 特性: 透磁率の周波数特性(インピーダンス測定)

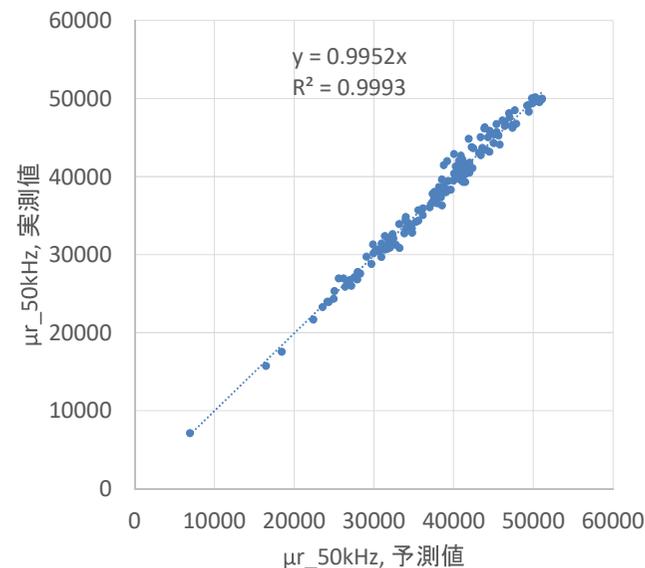
$$\mu = \frac{\mu_{DC}}{1 + (if/f_r)^\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \frac{4}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{2\mu''_{max}}{\mu_{DC}}\right)$$



結果

μ_r の予測精度は非常に高く, ナノ結晶材料には広く適用可能。



結論

- ・100kHz未満における可逆磁化過程の透磁率・鉄損を定式化した。
- ・SteinmetzやBertottiの式にない鉄損の周波数依存性 $f^{1+\epsilon}$ を発見。
- ・鉄損の解析・パラメータ化には透磁率スペクトルの測定が有効。

	磁壁運動方程式	本研究結果
透磁率	$\mu = \frac{\mu_{DC}}{1 + (if/f_r)}$	$\mu = \frac{\mu_{DC}}{1 + (if/f_r)^\epsilon}$
鉄損	$P_{rev} = \frac{1}{\mu_{DC} f_r} \pi B_m^2 \cdot f^2$	$P_{rev} = \frac{\sin(\epsilon\pi/2)}{\mu_{DC} f_r^\epsilon} \pi B_m^2 \cdot f^{1+\epsilon}$
計算 パラメータ	透磁率スペクトル測定 から一意に決定可能	$\mu_{DC}, \mu''_{max}, f_r$ <small>※ϵは以下の式により算出可能</small> $\epsilon = \frac{4}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{2\mu''_{max}}{\mu_{DC}}\right)$

ご清聴ありがとうございました

謝辞

本研究の実施にあたり、解析のご指導を頂きました、東北大学の杉本諭特任教授、岡本聡教授、遠藤恭教授ならびに実験のご協力を頂きました産業技術総合研究所の小笠原剛様にこの場をお借りして感謝申し上げます。

また本研究は『大同特殊鋼x共創研究所』の研究活動の一環として行われました。