



多段直列共振回路による高周波高磁場発生と1次微分型コイルによる磁化測定技術の開発

柳原英人、田中大暁、吉田宏一、喜多英治、磯部高範（筑波大学）
萬年智介（宇都宮大学）他多数

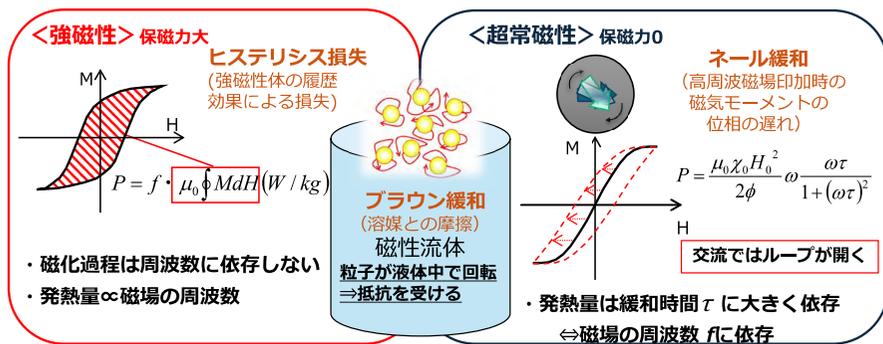
アウトライン



目次

- 0. 動的磁化測定（ハイパーサーミア：～100 kHz）
- 1. MHz領域でのフルヒステリシス測定
 - 1-1. 計測装置の開発
 - ・ 励磁方法
 - ・ 磁化検出方法
 - 1-2. 較正手法の確立
 - ・ 時間遅延（位相）補正
 - ・ 磁場・磁気モーメント較正
 - 1-3. 実用軟磁性材料の測定

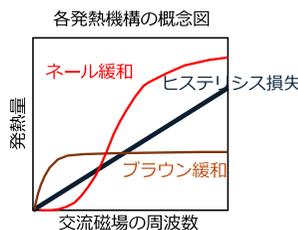
磁性ナノ粒子の磁化過程と発熱機構



これらの磁化過程や緩和機構が共存し、ヒステリシス曲線が変化する

◆発熱量はブラウン緩和やネール緩和を含むヒステリシス面積に等しい（はず）

⇒様々な磁場強度・周波数で交流磁化曲線の形状等を観測することで詳細な発熱機構の検討が可能



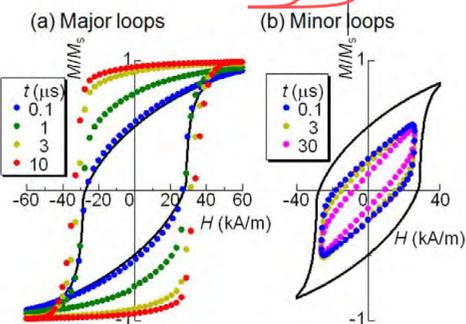
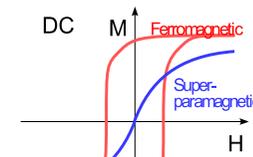
強磁性ナノ粒子懸濁液の磁気特性



磁気ハイパーサーミアにおける磁性粒子の

- ・ AC MH 曲線とDC MH曲線を比較したい。
- ・ 理論的考察
- ・ J.Carrey, JAP 109, 083921 (2011).
- ・ H.Mamiya, Sci. Rep. 1, 157 (2011).

交流磁場により磁性粒子が配向する可能性
→ネール緩和、ブラウン緩和等の緩和機構は独立でない。



- ・ ヒステリシス損は発熱と一致しているのか？
- を確認するため、AC MH測定と、ACでのSpecific loss power (SLP)を直接比較したい。

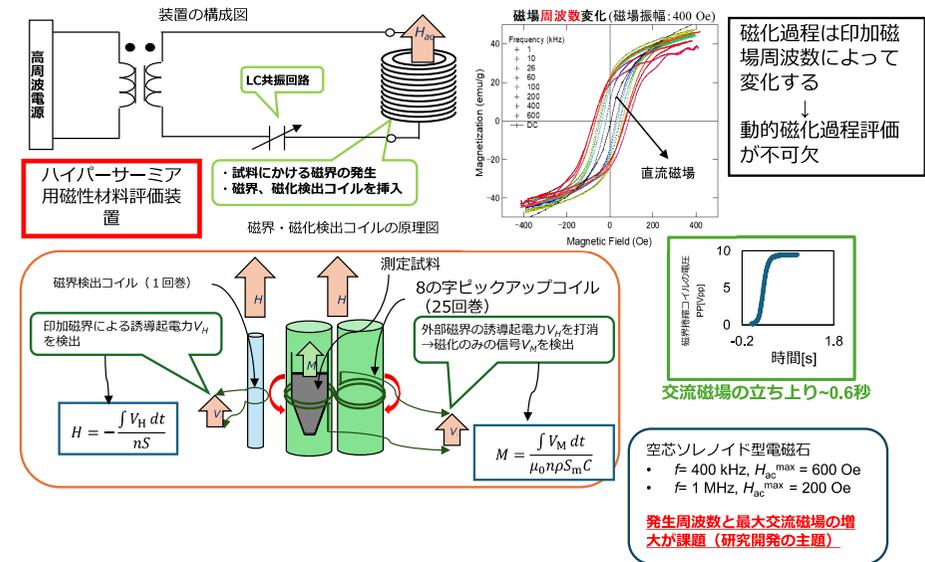
動的磁化過程の測定方法

動的磁化過程に関する先行研究

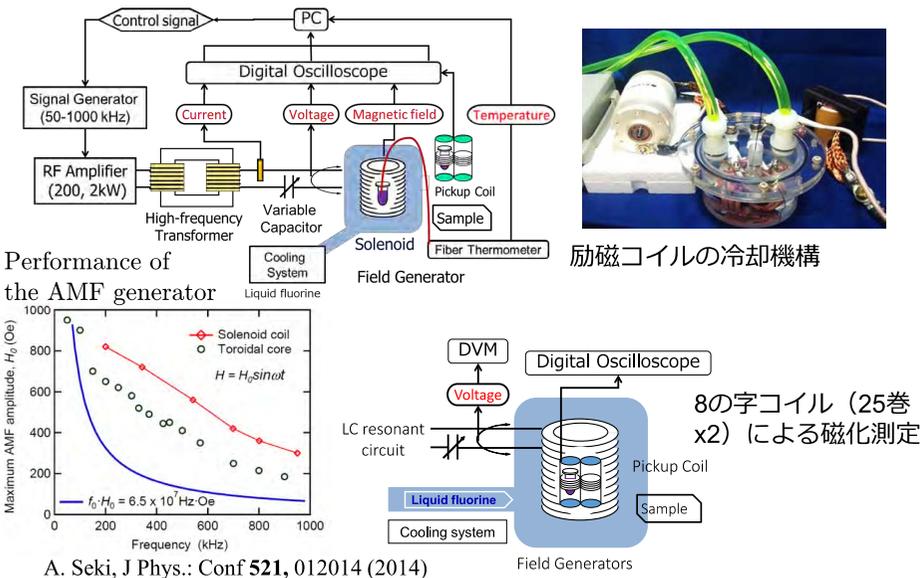
Frequency	$\mu_0 H_0$	sample	Affiliation	ref
2 – 100 kHz	10 mT	Fe ₃ O ₄ NP	Carnegie Mellon	IEEE mag 2007
50 kHz	35 mT	Co ferrite NP	Inst Phys Czech	Nonotech. 2007
50 – 400 kHz	3 – 21 mT	Ni Ferrite	Yokohama NU	JAP 2010
56 kHz	23 mT	FeCo NP	U Toulouse	APL 2011
10 – 150 kHz	25 – 40 mT	Fe ₃ O ₄ (Dry)	NA Usov(Russia)	JSNM 2013
60 – 990 kHz	20 – 100 mT	Fe ₃ O ₄	U Tsukuba	Present study

汎用の製品（高周波電磁石、磁気計測）はなさそう。

交流磁化過程測定装置(MHループ)



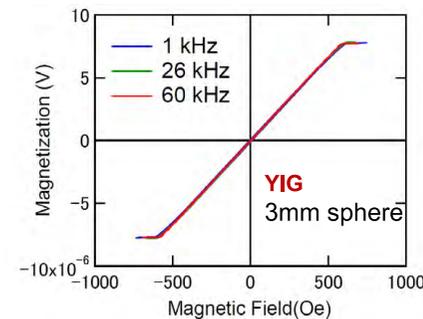
動的磁化過程の測定



校正手法

Measurement of YIG sphere at different frequency

$m_s = 1.925 \text{ emu}, H_s = 580.7 \text{ Oe}$



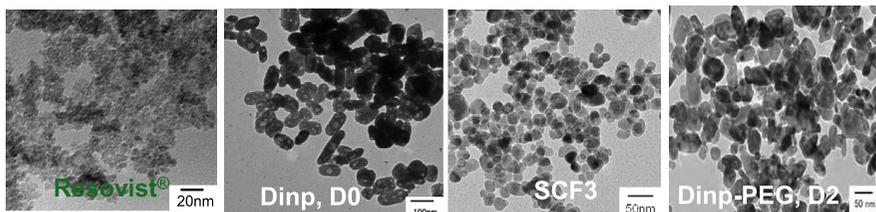
Calculation supposing that the sample is long enough.

$$M = \frac{\int V dt}{\mu_0 \rho S C}$$

S: Cross section of sample

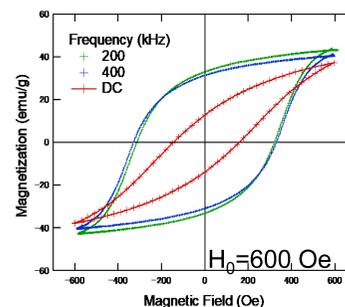
B. Mehdaoui et al., APL100, 052403(2012)

Sample		Shape	Size (nm)	Hydro-dynamic dia. (nm)	Coercivity (Oe)
Resovist [®] [1]	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$?	~10	60	0 (SPM)
Dinp, D0[2]	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Platelet	70	770	182 (FM)
S C F 3 [3]	(Co) Fe_3O_4	Sphere	22	60	336 (FM)
Dinp, D2 [4]	Fe_3O_4	Platelet	30~40	300	140 (FM)



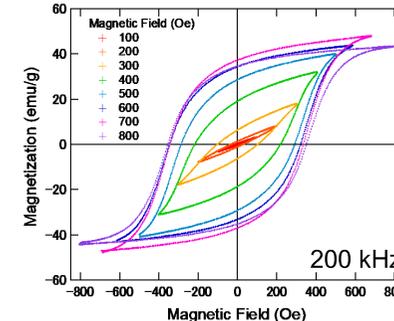
[1] MRI enhancement agent, Bayer
 [2] nano-platelet, M. Kishimoto *et al.*, IEEE Mag (2013)
 [3] (Co) Fe_3O_4 E. Kita *et al.*, J. Phys. :D (2010)
 [4] PEG-b-PVBP coated nano-platelet

Frequency dependence of Dynamic MH for maghemite nano-platelet, D0

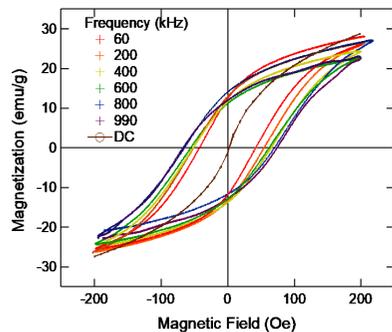


High squerness at AMF of 200 kHz
 No difference in 200, 400 kHz MH
AMF alignment !

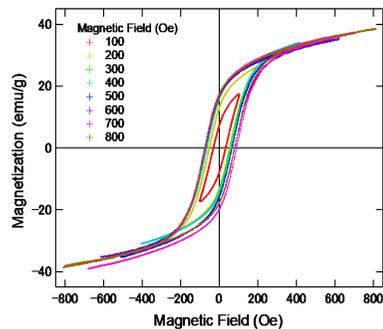
H_0 dependence of Dynamic MH for maghemite nano-platelet D0



$H_0 < 200$ Oe: 交流磁場配向は小さい
 $H_0 > 300$ Oe: 交流磁場配向は大きい (飽和に近づく)

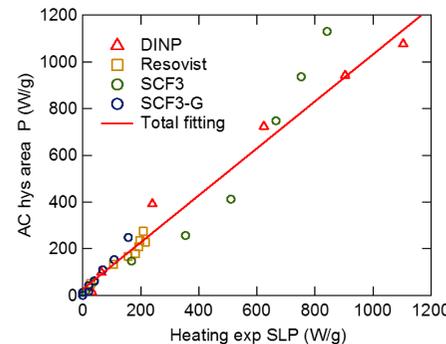


Frequency dependence of MH curve for SPIO Resovist.
 From DC to 990 kHz at 200 Oe
 DC : Langevin Function
 AC : H_c increases with an increase of f



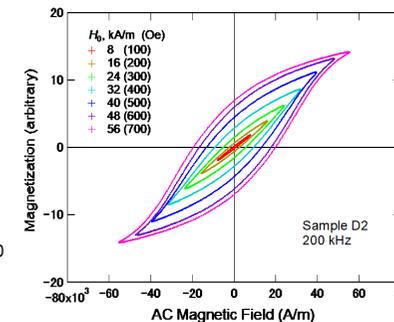
H_0 dependence of MH curve for SPIO Resovist at 200 kHz

Summary of SLP and LA



SLP from heating experiments and estimation from loop area coincide well irrespective to the sort of heat generation mechanism.

dynamic MH curves for D2



AMF alignment is not well observed. (heavy surface decoration)

目次

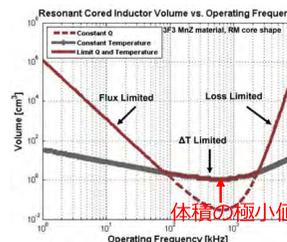
- 0. 動的磁化測定 (ハイパーサーミア: ~100 kHz)
- 1. MHz領域でのフルヒステリシス測定
 - 1-1. 計測装置の開発
 - 励磁方法
 - 磁化検出方法
 - 1-2. 較正手法の確立
 - 時間遅延 (位相) 補正
 - 磁場・磁気モーメント較正
 - 1-3. 実用軟磁性材料の測定

- 高周波動作による電力密度の向上 例: 65W ACアダプタ



動作周波数を高めることで機器が小型化

- インダクタの動作周波数と体積^[1]



実際の素子: 損失による小型化の限界

- 導線の抵抗損
- コアの鉄損

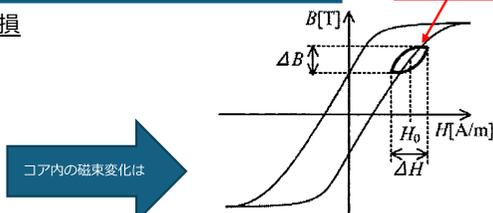
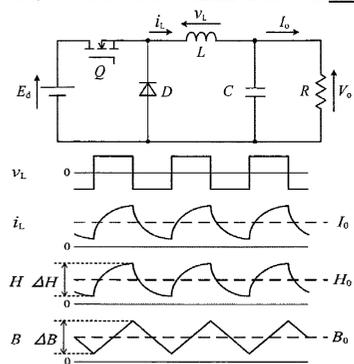
受動素子の高性能化が大事

[1] David Perreault, Opportunities, Progress and Challenges in High-Frequency Power Conversion, APEC2024 (2024)

電力変換用パワーインダクタの動作

小型化→高パワー密度→受動部品での損失と温度上昇の正確な評価

例) 降圧チョップ回路における鉄損



- I_0 のため、HもBもDCのオフセットが存在
- BH曲線は非線形
- ΔB (リップル) と周波数 + H_0 に依存した鉄損
- (拡張) スタインメッツ方程式、ロスマップ法による鉄損の評価

周波数 f ごとに H_0 と ΔH をパラメータにして鉄損を評価 (実測) する必要がある。

インダクタの小型化: $f, \Delta B, H_0$ すべて増大

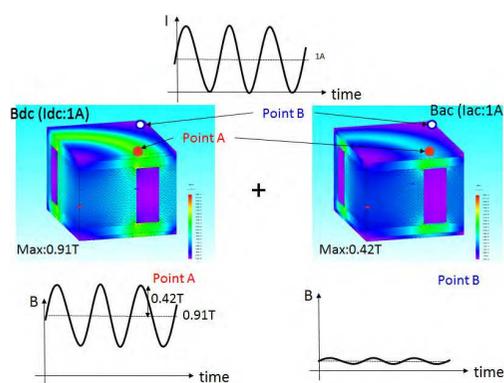
- チョップのon/offによって、 v_L が矩形に変動
- i_L が I_0 の周りで振動

清水ら, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌) IEEJ Trans. Industry Applications, 133, pp. 84-93 (2013)

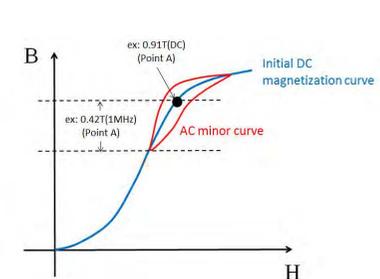
インダクタ設計の技術課題

高周波領域 (~数十MHz) での磁性材料の磁気測定手法は限定的。
⇒最適なインダクタの設計ができず、高周波化の利点が活かし切れない。

インダクタ内部の磁束密度分布例

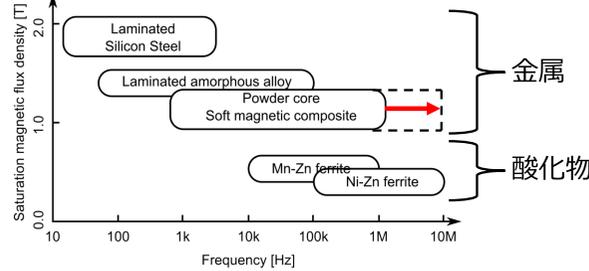


測定が必要な磁化過程



さまざまなDC, AC磁場でさまざまなマイナーループ測定が必要

軟磁性材料の適用周波数と飽和磁束密度 B_s [2, 3, 4]



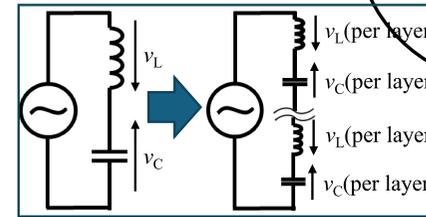
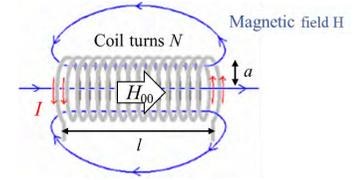
電力密度向上のため、 B_s が 1 T 程度の圧粉材料の高周波領域への展開

既存の特性評価手法 (2コイル法) では、試料のリアクタンス、漏れ磁束の影響で MHz 域における数 100 mT の大振幅磁束密度条件での測定が困難

[2] 吉沢克仁, 軟磁性材料の開発動向と展望, まてりあ, No. 56, 2017.
 [3] Tomoyuki Ishimine, et al. SEI TECHNICAL REVIEW, No. 72, pp. 117-123, 2011
 [4] H. Shokrollahi and K. Janghorban. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 189, No. 1, pp. 1-12, 2007.

高周波・大振幅磁場を発生させるために

例えば・・・
 内径 2 mm, 長さ 10 mm,
 単位長さ当たり巻き数 8000 のコイルに,
 5 MHz, 1 T の磁場を発生させるには
 $I = 100$ [A] (rms), $v_L = 12$ [kV] (rms)



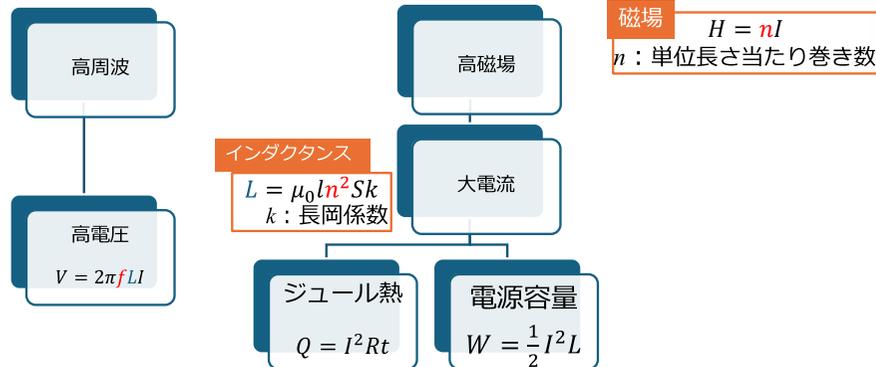
磁場 $H = nI$
 n : 単位長さ当たり巻き数

インダクタンス
 $L = \mu_0 n^2 S k$
 k : 長岡係数

コイルにかかる電圧
 $v_L = 2\pi f_s L I$

電圧を分散するため、
 多段の直列共振回路を構成

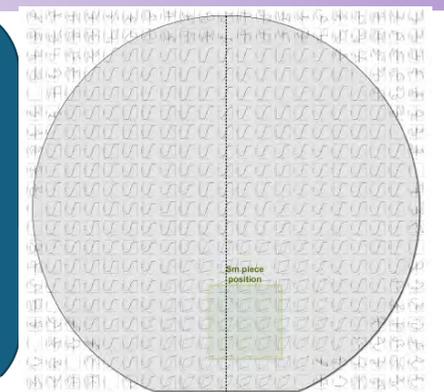
高周波・大振幅磁場を発生させるために



- 小さい電源 (低電源容量化) → LC共振回路
- 素子電圧の分散 → LC回路の多段化
- t を小さく → 短時間測定
- 小さいインダクタンス → コイルの小型化

Magnetic field up to 10 T
 Sweep rates $\sim 10^6$ T/s
 Pulse repetition rate ~ 1 cycle/s

<http://www.pumag.fr/>



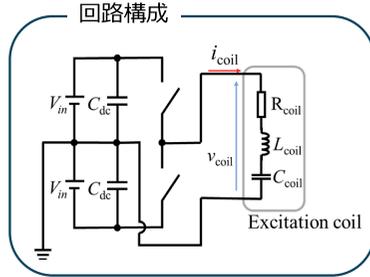
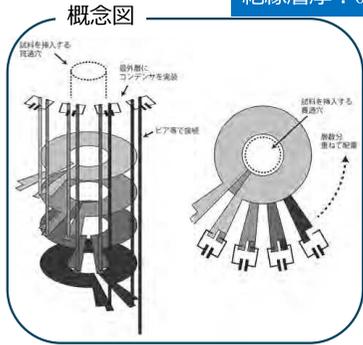
SmCo 薄膜 (100nm) の局所磁化曲線 (MOKE)
 A. Diaz et al., AIP Adv., 7, 056227 (2017)

- 内 (外) 径 : 3 (10) mm コイル上の磁化曲線
- 9 パルス の 平均値
- ◎ ごく短時間であれば、大電流の通電は可能
- ◎ 小さなソレノイドであれば電源容量を小さくできる

励磁コイル（試作1号機）の構造

16層プリント基板を用いて16段のLC直列共振回路を設計

銅箔厚：0.035 mm
絶縁層厚：0.1 mm



作製したコイルの仕様

内径	2 mm		
長さ	2 mm		
L_{coil}	0.45 μ H	$L_{coil}(\text{per turn})$	0.028 μ H
C_{coil}	2.25 nF	$C_{coil}(\text{per turn})$	36 nF
共振周波数	5 MHz付近		

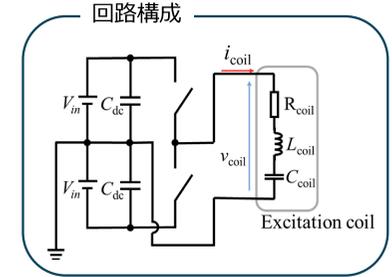
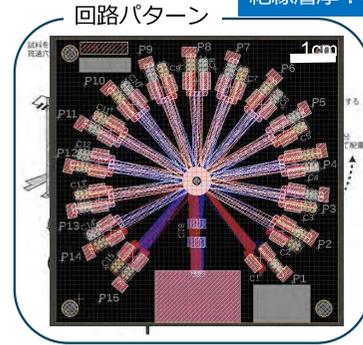
共振周波数

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 5[\text{MHz}]$$

励磁コイル（試作1号機）の構造

16層プリント基板を用いて16段のLC直列共振回路を設計

銅箔厚：0.035 mm
絶縁層厚：0.1 mm



作製したコイルの仕様

内径	2 mm		
長さ	2 mm		
L_{coil}	0.45 μ H	$L_{coil}(\text{per turn})$	0.028 μ H
C_{coil}	2.25 nF	$C_{coil}(\text{per turn})$	36 nF
共振周波数	5 MHz付近		

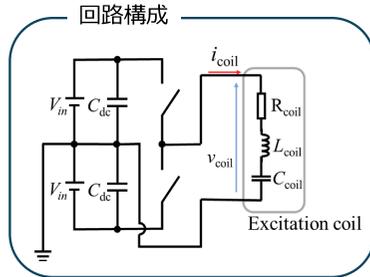
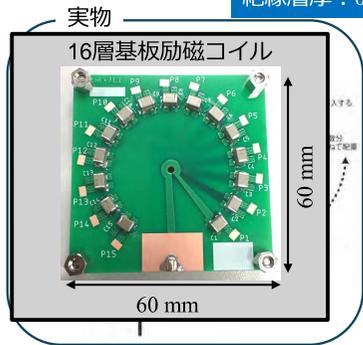
共振周波数

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 5[\text{MHz}]$$

励磁コイル（試作1号機）の構造

16層プリント基板を用いて16段のLC直列共振回路を設計

銅箔厚：0.035 mm
絶縁層厚：0.1 mm



作製したコイルの仕様

内径	2 mm		
長さ	2 mm		
L_{coil}	0.45 μ H	$L_{coil}(\text{per turn})$	0.028 μ H
C_{coil}	2.25 nF	$C_{coil}(\text{per turn})$	36 nF
共振周波数	5 MHz付近		

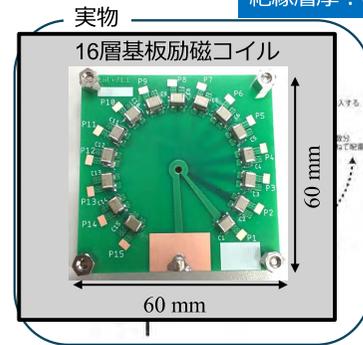
共振周波数

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 5[\text{MHz}]$$

励磁コイルの構造

16層プリント基板を用いて16段のLC直列共振回路を設計

銅箔厚：0.035 mm
絶縁層厚：0.1 mm



作製したコイルの仕様

内径	2 mm		
長さ	2 mm		
L_{coil}	0.45 μ H	$L_{coil}(\text{per turn})$	0.028 μ H
C_{coil}	2.25 nF	$C_{coil}(\text{per turn})$	36 nF
共振周波数	5 MHz付近		

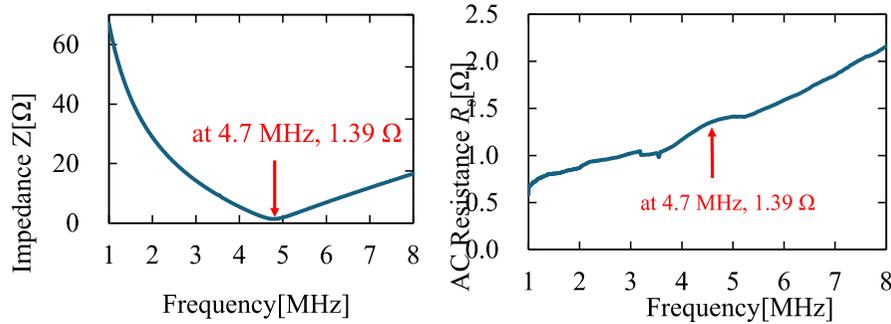
共振周波数

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 5[\text{MHz}]$$

インピーダンス測定結果



・LCRメータを用いて測定



- ・設計値5 MHzに近い周波数でインピーダンスが極小に
- ・4.7 MHzのとき, $Z = R_s = 1.39[\Omega]$

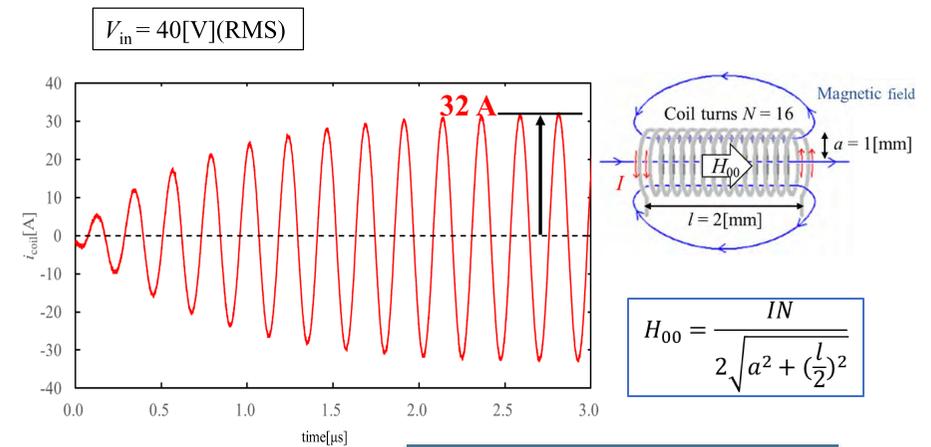
設計値

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 5[\text{MHz}]$$



LC直列共振回路としての動作を確認

電流波形



- ・約2 μsで定常状態に → 測定全体で10 μs程度
- ・コイル中心では $B_{00} = 0.23[\text{T}]$



励磁方法（まとめ）

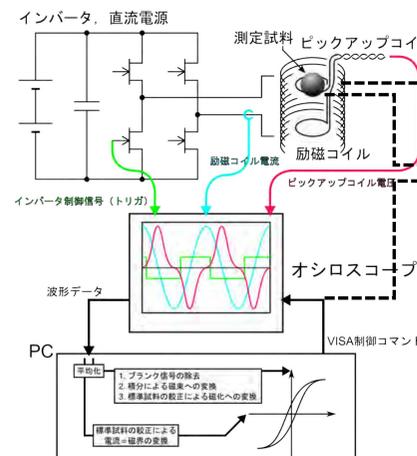


- ・小さい電源 → LC直列共振回路
- ・簡単な電源 → インバータの利用
- ・素子電圧の分散 → LC回路の多段化
- ・ τ (共振の立ち上がり時間)を小さく → 短時間測定
- ・小さいインダクタンス → コイルの小型化

～0.5 Tの振幅, 数MHzの交流磁場の発生は現実的

計測装置の開発

装置の全体像



1. 励磁コイル（LC共振回路）とインバータを組み合わせ大振幅励磁磁場を発生
2. ピックアップコイル（1次微分形）で磁化を検出
3. オシロスコープで各信号を測定, MH曲線を再現

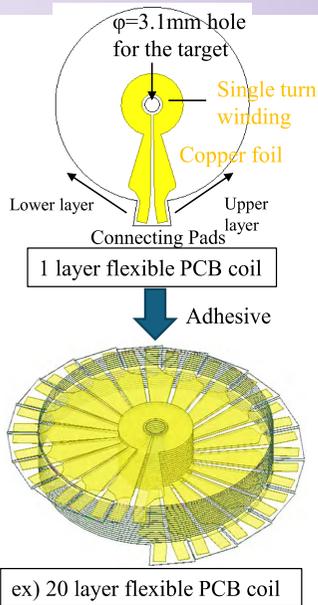
利点

- ・安価な電源（インバータ）
- ・計測システムの小型化

欠点

- ・単一周波数での動作
- ・インバータノイズの影響が未知

励磁コイルの製作



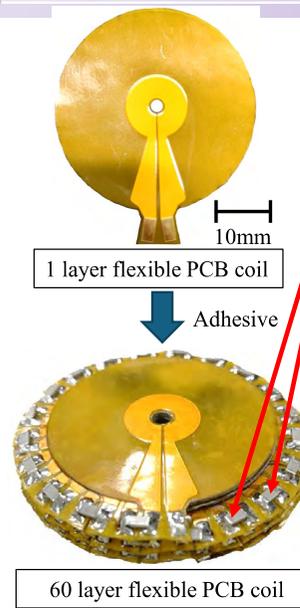
flexible PCB

Flexible design changes possible

Multilayer ceramic capacitors are mounted between each layer

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 3.68\text{MHz}$$

3.68MHz coil	
Inner diameter	3.1 mm
Length	7.3 mm
L_{coil}	6.0 μH
C_{coil}	$\frac{18\text{nF}}{59}$
Number of layer	60
Geometry	4.7mm×4.7mm



flexible PCB

Flexible design changes possible

Multilayer ceramic capacitors are mounted between each layer

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 3.68\text{MHz}$$

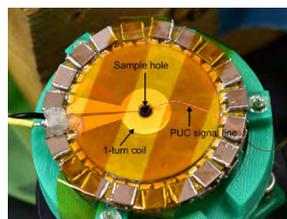
3.68MHz coil	
Inner diameter	3.1 mm
Length	7.3 mm
L_{coil}	6.0 μH
C_{coil}	$\frac{18\text{nF}}{59}$
Number of layer	60
Geometry	4.7mm×4.7mm

計測装置の開発

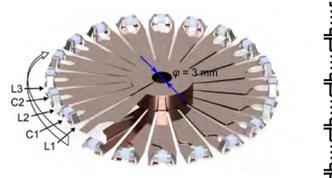


励磁磁場の発生

励磁コイルの外観

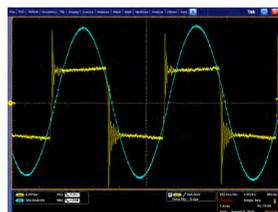


回路構造：1回巻コイル基板の60層スタック+コンデンサ = 共振コンデンサを組み込んだ空芯ソレノイド



電圧の分散のための多段LC直列共振回路

インバータを交流電源として用い、共振周波数付近で励磁コイルを駆動



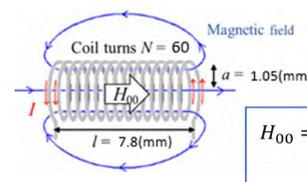
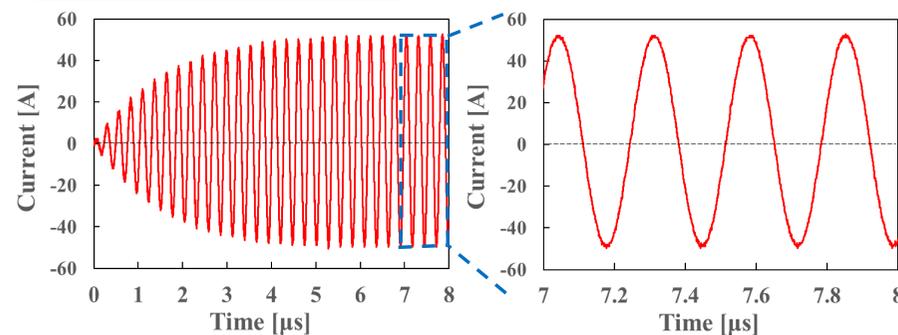
励磁コイルの共振（測定）周波数：1.2, 3.7 MHz
このとき抵抗 $\approx 3.5 \Omega$

共振動作はフィルタとして動作：
矩形波電圧から正弦波電流を得る

電流波形の例（3.7MHz）

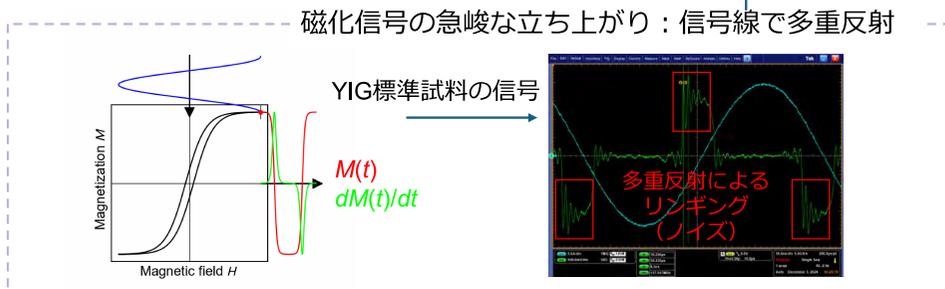
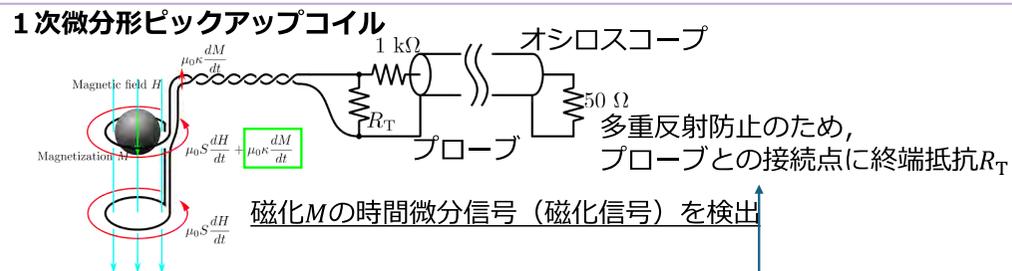


$$V_{in} = 320 \text{ V } f = 3.7 \text{ MHz}$$



$$H_{00} = \frac{IN}{2\sqrt{a^2 + (\frac{l}{2})^2}}$$

- ✓ 正弦波
- ✓ 電流の振幅
- $I_{PK-0} = 52 \text{ A}$
- ✓ コイル中心の磁束密度
- $\mu_0 H_{00} = 0.49 \text{ T}$



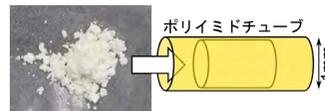
$$\text{鉄損 } P \propto \int_0^T v i dt = \frac{V_m I_m T}{2} \sin(\varphi \pm \omega\tau)$$

$$P \text{ の測定誤差} = \frac{\sin(\varphi) - \sin(\varphi \pm \omega\tau)}{\sin(\varphi)}$$

$$\begin{cases} v = V_m \cos(\omega t - \varphi) \\ i = I_m \sin(\omega t) \end{cases}$$

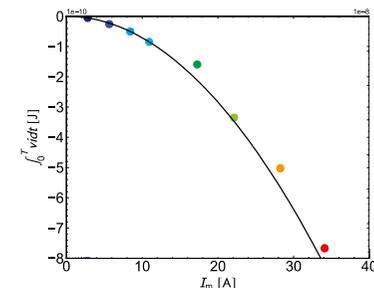
φ : 本質的な磁場に対する磁化の遅れ
 τ : 計測系の時間遅延
 (2つの信号がオシロスコープに届くまでの時間差)

較正用標準試料：**Dy₂O₃**

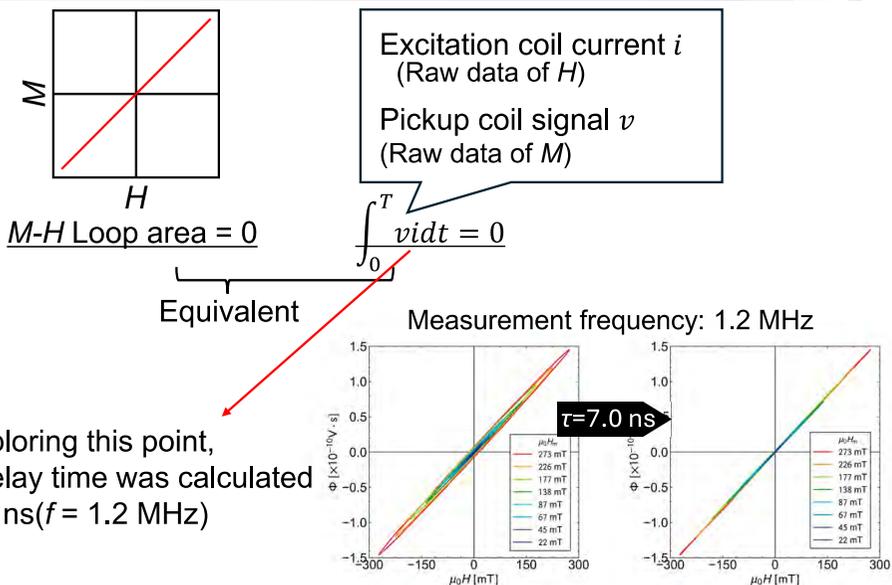


見かけの鉄損のフィッティングから τ を算出

(大きな) 常磁性絶縁体 $\Rightarrow \varphi = 0, M = \chi H$
 測定結果から τ を求めて測定データに補正 \Rightarrow 位相較正



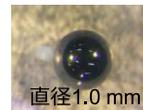
Dy₂O₃ による位相差評価 (デスクュー法)



較正手法の確立 磁化・磁場の絶対値

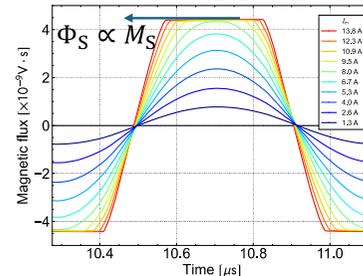
既知の飽和磁化 M_S ・飽和磁界 H_S を持つ軟磁性材料により測定値の絶対値較正

標準試料：**YIG球**



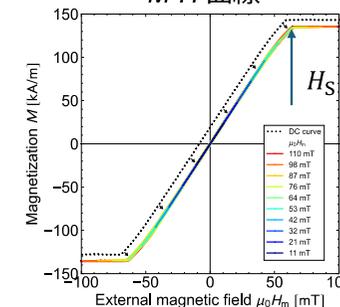
GHz帯で利用される材料 \Rightarrow MHz帯における M_S, H_S はDCと同じと仮定

磁束 Φ 波形 (磁化信号の積分)



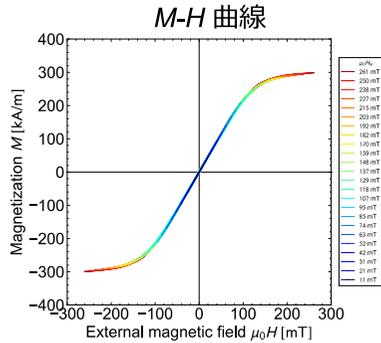
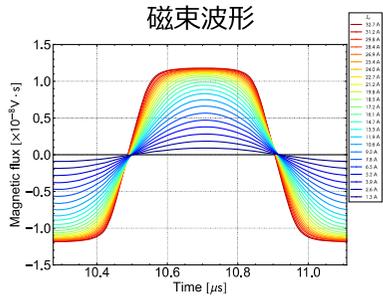
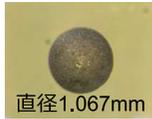
磁束の飽和値 Φ_S と M_S の比：
 $\Phi \Rightarrow M$ の変換係数

M-H 曲線



$M = M_S$ における i と H_S の比：
 $i \Rightarrow H$ の変換係数

市販高周波用Ni-Znフェライト (Amidon, 61 Material)
⇒YIG標準試料と同程度の寸法の球に加工し測定

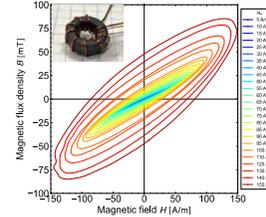


$P = \oint H dB = \oint \mu_0 H dM$ より,
ループ面積を求めることで2コイル法と同じ鉄損を評価可能

2コイル法の計測 (同じ型番材料のトロイダルコア) 結果と比較

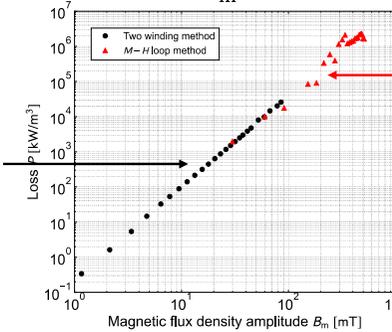
$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0 \left(H_{ex} + \frac{2}{3}M \right) \Rightarrow M-H \text{測定と} B-H \text{測定を相互変換} \\ \Rightarrow \text{磁束密度振幅} B_m \text{を基準に比較可能}$$

B-H 曲線 (2コイル法)

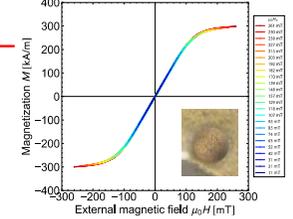


B_m の最大値: 80 mT

P - B_m特性



M-H 曲線 (本手法)

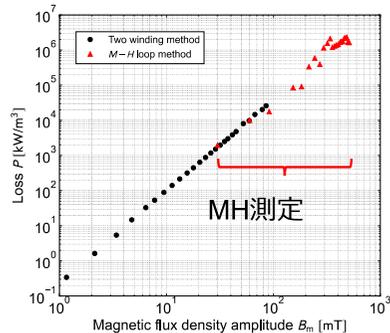


B_m の最大値: ⇒500 mT

まとめ

～ 5 MHzかつ磁束密度振幅が500 mTの領域における
磁性材料の鉄損評価技術に目処

Ni-ZnフェライトのP - B_m特性



今後の課題

- 実用材料を測定
- 10 MHz以上の交流磁場
- 直流磁場重畳 (電磁石内に設置)
- 計測手続きの簡単化
- BHとの比較
- 鉄損予測モデルの深化
- フルループの動的磁化特有の現象を探索