

2024/11/22

## 各種軟磁性材料の紹介および特徴



・ (株)プロテリアル 主任研究員  
 ・ 島根大学 次世代たたら協創センタ  
 教授  
**太田元基**

## 目次

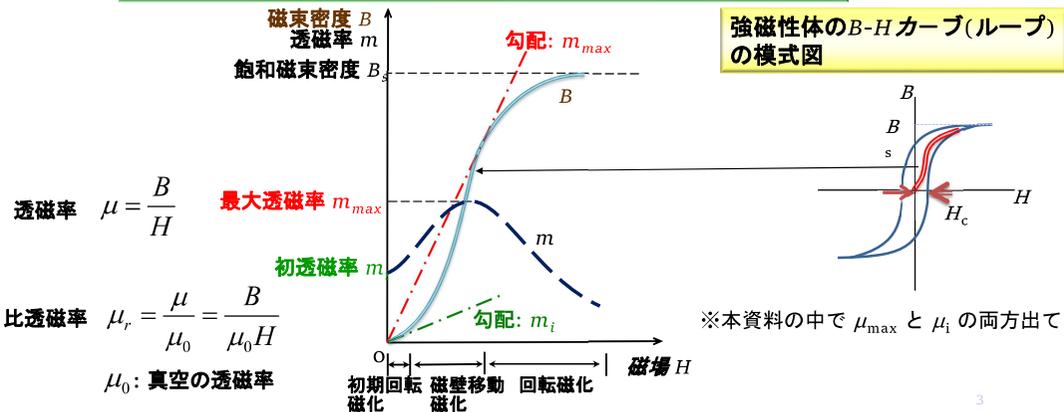
- 各種軟磁性材料の紹介および特徴
  - 金属系軟磁性材料の基本
  - 軟磁性と Fe
  - 各種軟磁性材料
    - 理想的金属系軟磁性材料
    - 金属系軟磁性材料
    - フェライト系軟磁性材料
    - 液体急冷系軟磁性材料
- 各種パワーエレクトロニクスデバイスに求められる軟磁気特性
  - トランスに求められる軟磁性材料
  - インダクターに求められる軟磁性材料
  - B-Hループ形状の制御

(基)

## 軟磁性(ソフト磁性)材料とは

$H_c < 1 \text{ kA m}^{-1}$ ... 軟磁性材料(低保磁力(低 $H_c$ )、高透磁率(高 $m$ )、低磁心損失)

磁場を印加すると弱い磁場でも高い磁化を示し磁化しやすい性質があり、磁気ヒステリシスが小さい



(基)

## 理想的軟磁性材料～低初透磁率 $\mu_i$ 材料

材料が決まる (組成、組織)  $\left\{ \begin{array}{l} K: \text{磁気異方性定数} \\ \lambda: \text{磁歪定数} \\ \rho: \text{電気抵抗率} \\ E: \text{ヤング率} \\ B_s (M_s): \text{飽和磁束密度} \end{array} \right. \rightarrow \mu: \text{透磁率}$

$$\mu_i \propto \frac{B_s^2}{K + \alpha \lambda_s \sigma}$$

$\mu_i$ : 初透磁率、 $\alpha$ : 比例定数

外的因子  $\left\{ \begin{array}{l} H: \text{磁場} \\ wd: \text{寸法、形状 (体積・面積率)} \\ \sigma: \text{応力} \end{array} \right.$

磁性体として、理想的軟磁気特性 → 磁気異方性がゼロ + 磁歪がゼロ

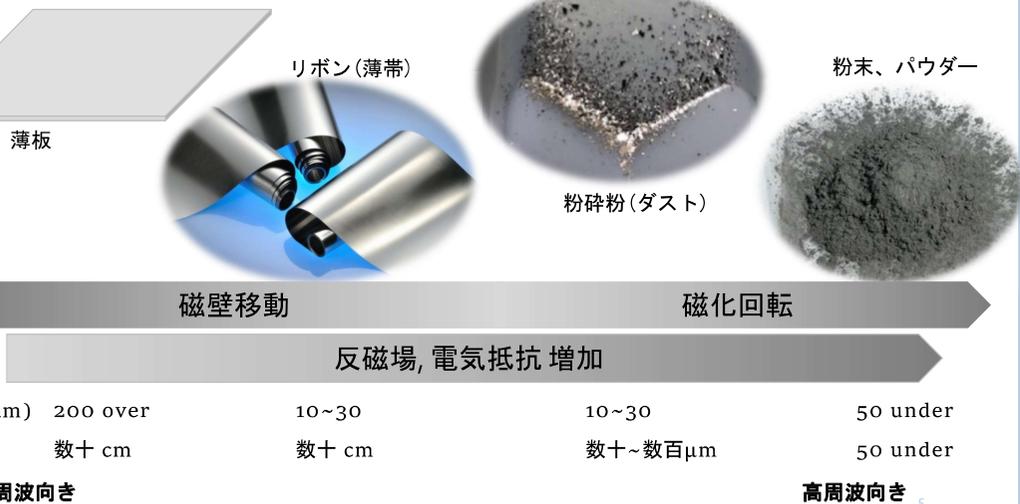
Fe-Ni (パーマロイ) や Fe-Al-Si (センダスト)、ソフトフェライト

実行磁束密度  $B_m$  を大きく振らない高周波応用では特に重要

使用環境に適合すれば低  $\mu_i$  軟磁性材料でなくても広く使われている

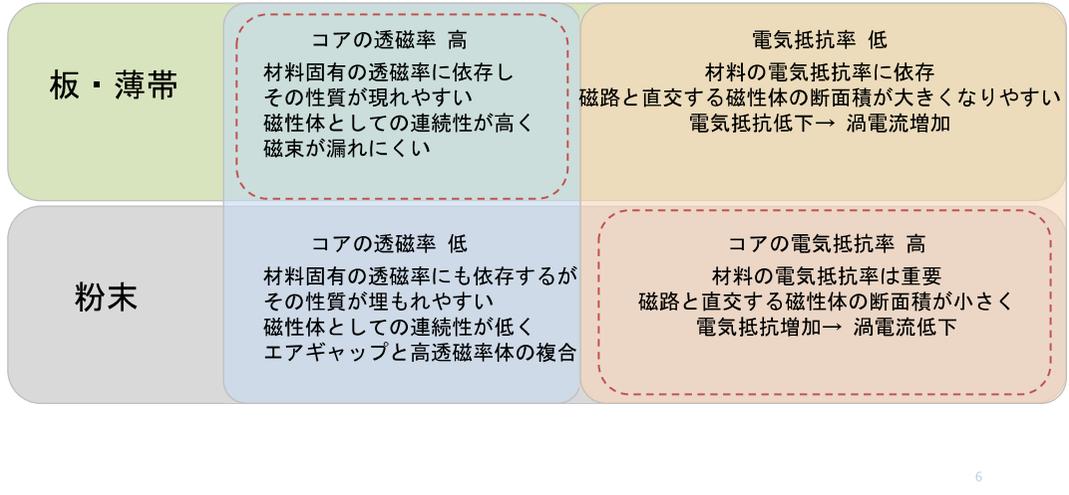
(基)

# 材料の形状が軟磁性に与える影響



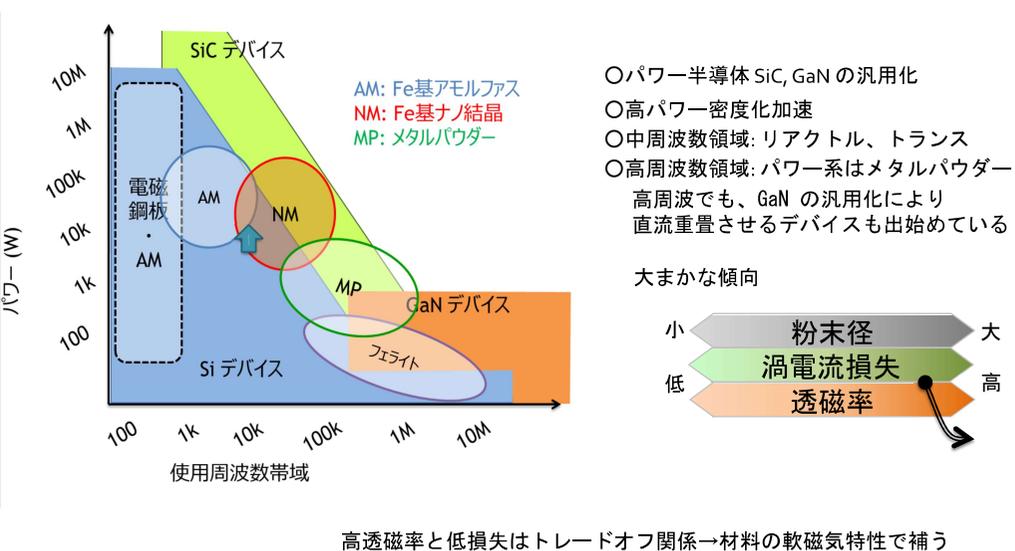
(基)

# 形状ごとの透磁率と電気抵抗



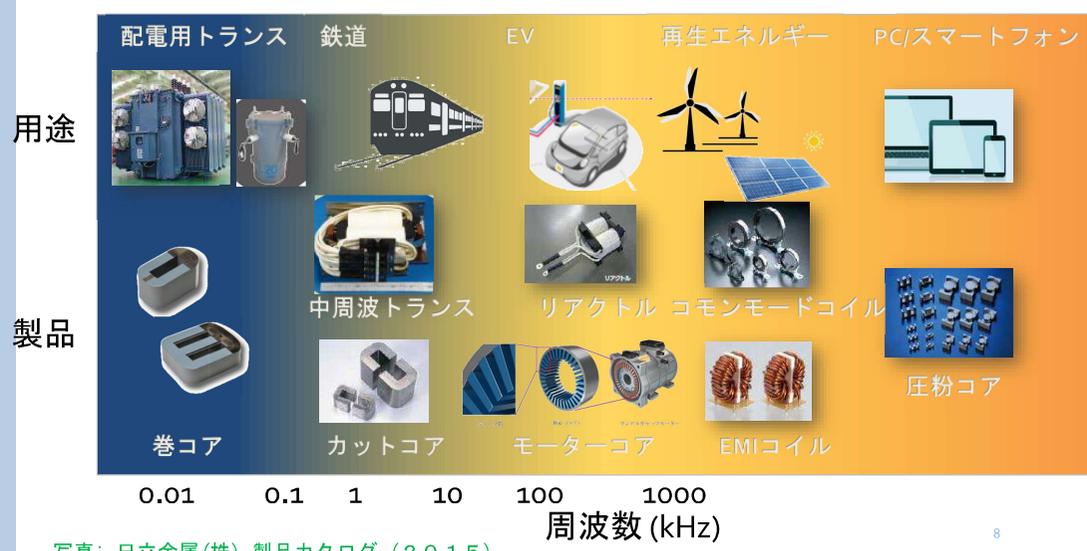
(基)

# パワーと周波数からみた推移



(基)

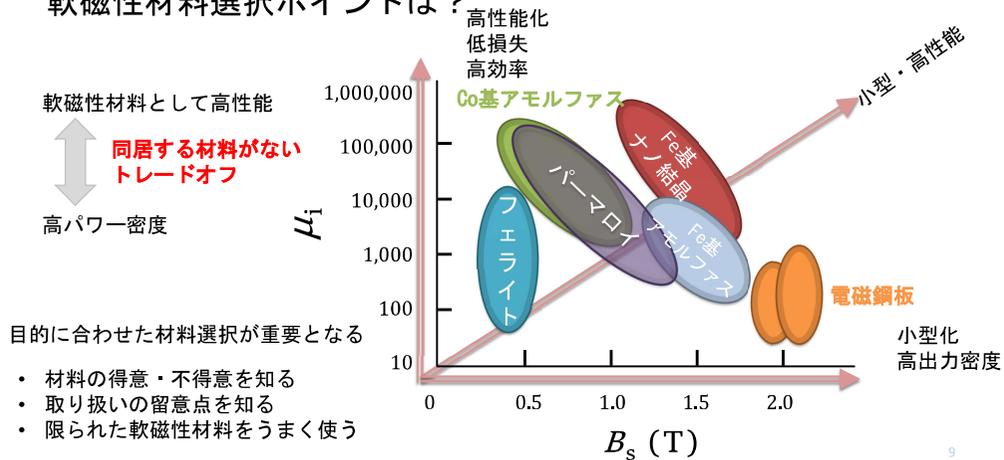
# 応用分野 (周波数とアプリケーション)



(基)

# 良好な軟磁気特性と高パワー密度はトレードオフ

形態・形状の制御である程度  $B-H$  ループは制御できる  
軟磁性材料選択ポイントは？

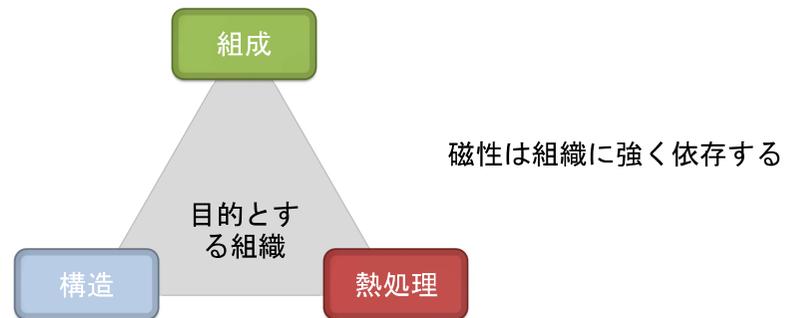


(基)

# 知っておくとスムーズに材料の話ができる知識

(材料系と話ができるようになるために)

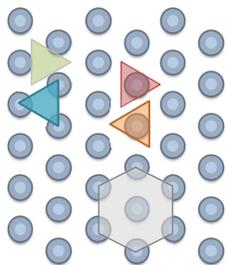
- 軟磁性材料の軟磁気特性は絶妙なバランスの上で成り立っている
- 構造、組成、熱履歴(熱処理・冷却条件)



(基)

# 構造

結晶構造



六方最密充填  
隣り合う原子の数が多く  
原子間距離が短い



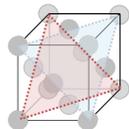
hcp  
六方最密充填構造... Co



面内と面直方向で原子の存在確率が違う  
...異方性が強い



fcc  
面心立方構造... Ni

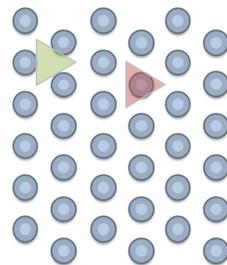


見方を変えると立方晶になる

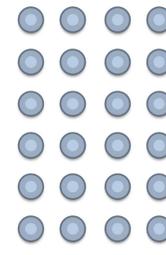
(基)

# 構造

結晶構造と非晶質構造(アモルファス構造)

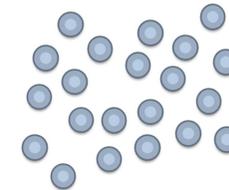


六方最密充填  
隣り合う原子の数が多く  
原子間距離が短い  
面心立方構造... Ni  
六方最密充填構造... Co



bcc  
体心立方構造... Fe

立方最密充填  
隣り合う原子の数が減る  
原子間距離が長くなる

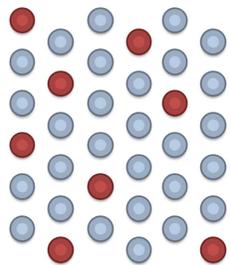


非晶質構造 = アモルファス構造

(基)

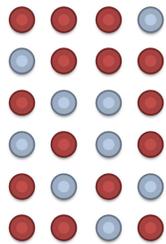
## 組成 原子パーセント (at.%)

合金...異種元素が混ざり合った状態 その比率 組成 (100分率)



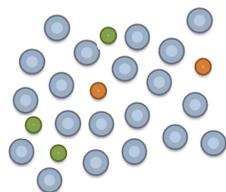
● ... 27  
● ... 9  
27:9 = 75:25

呼び方 ● 基合金



● ... 8  
● ... 16  
8:16 = 33:67

呼び方 ● 基合金



● ... 20  
● ... 3  
● ... 2  
20:3:2 = 80:12:8

呼び方 ● 基アモルファス合金

13

(基)

## 組成 重量パーセント (mass.%) あるいは (wt.%)

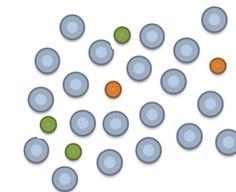
組成を重さの比で表す (at.% と mass% 間では、原子量使って換算する必要あり)

製造する際の原料の重さの比... 作るときは便利 → 元素の作用や効果を考えるのには不便

ただし、飽和磁束密度  $B_s$  の管理には mass% の方が at.% よりも使いやすいことがある

ある体積中に 磁性の担い手 (Fe, Co, Ni) がどれだけ存在するかが重要

• mass% はその元素がその物質中どれだけの重さを占めているかの指標であり密度を介して体積として捉えることができる



例えば、Fe基アモルファス合金

Fe:B:Si=80:12:8 → 約 92.7:2.7:4.6

mass%に換算

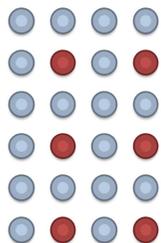
それなりに Fe が入っていることがわかる

14

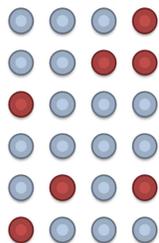
(基)

## 熱履歴

熱の入り方、抜き方で得られる原子配列に違いが生じる



規則相



不規則相

15

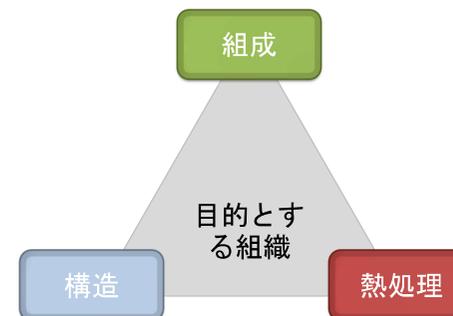
(基)

## 材料の性能に関わる材料組織のコントロール

例えば、不規則相やアモルファス相といった規則性の低い相に熱を加える



適当な温度を選べば、原子の再配列をコントロールできる



16

(基)

## 軟磁性に向いている材料

- 基本的に Fe の含有量（重量）が高いほど  $B_s$  は高い（一部例外あり）
  - Fe は磁気と体積の関連が強い・・・ひずみや応力には十分注意する必要がある
- 軟磁気特性(磁化の磁場追従性)には、**等方的構造**が有効
  - アモルファス相やナノ結晶相のような**ランダム構造**
  - **規則度が少し低下**した構造
  - 異方性が付きやすい構造よりも、各方位に対して近いエネルギー状態となる構造

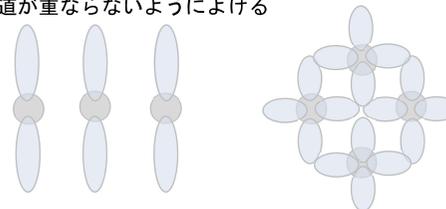
17

(基)

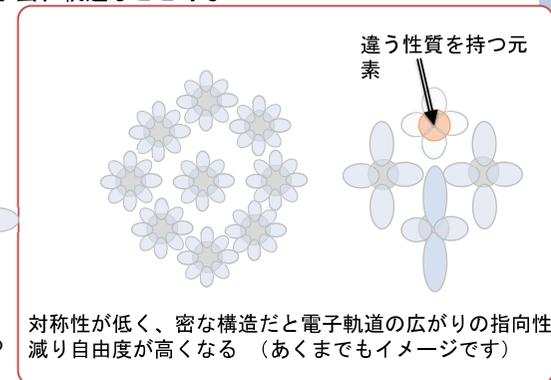
## 結晶中の電子構造（電子軌道の広がり方）

- 固体の中では、原子内の電子と周りの原子内の電子とのやり取りがある
  - 電気的な引力や斥力によって、電子が存在しやすい方向に指向性が出てくる
  - 原子周辺の電子の存在確率が高い範囲を電子雲、軌道などと呼ぶ
  - 広がりやすさの方向的な差は異方性
  - 同じ電荷の軌道が避け合うように配置

軌道が重ならないようによける



対称性が高いと電子軌道の広がる自由度は低くなる



的が定まらない = ランダム（無原則）さが適度にあると、軟磁性は良くなる。  
局所環境の多様性…ダイバーシティ

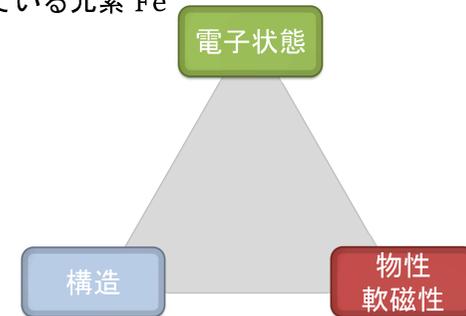
18

## 軟磁性材料と Fe

(基)

## Fe は鉄心材料の基本

- 鉄心材料として最も広く使われている元素 Fe
  - 磁化が大きい
  - 軟磁気特性良好
  - 入手しやすい(安価)
- 軟磁気特性の制御
  - Fe の様々な形態による制御
    - ✓ 高純度化
    - ✓ 合金化
    - ✓ 酸化物化
    - ✓ アモルファス化
    - ✓ ナノ結晶化
  - 電子数・価数の制御
    - ✓ 合金では: Co, Ni などとの置換 → フェルミー面の位置
    - ✓ フェライトでは: Mn, Zn, Ni などとの置換 → ユニットセルの磁気モーメントの制御



20

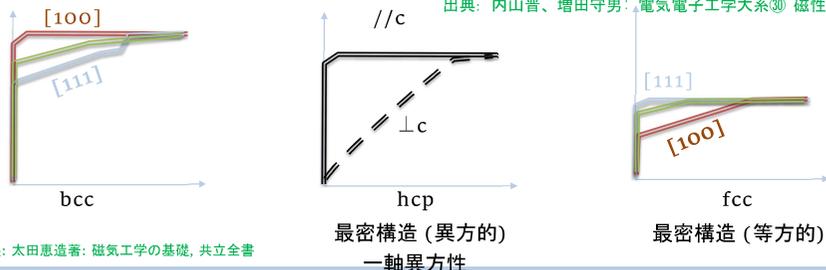
(基)

# Fe, Co, Ni の結晶磁気異方性・磁気ひずみ

構造的に一軸異方性のCoで大きな値となり  
等方的で高充填のNiで性磁気モーメントの減少の影響もあり異方性は減少  
Fe-Niでは、Fe → Niで符号が反転。パーマロイにも関連

[J/m<sup>3</sup>]

Element	$K_1$	$K_2$
bcc-Fe	$4.2 \times 10^4$	$1.5 \times 10^4$
hcp-Co	$4.1 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5$
fcc-Ni	$-5.1 \times 10^3$	$\sim 0$



出典: 内山晋、増田守男: 電気電子工学大系⑩ 磁性体材料 コロナ社 (1980)

出展: 太田恵造著: 磁気工学の基礎, 共立全書

21

(基)

# Fe, Co, Ni の磁気ひずみ

構造の変化に伴い、磁気ひずみの値も正負も変化する  
磁気モーメントが大きいFe-Coや異方性が高いCoで大きな磁歪になる傾向がある  
[ $\times 10^{-6}$ ]

Element	$\lambda_{100}$	$\lambda_{111}$
bcc-Fe	20.7	-21.2
hcp-Co	(-140)	(50)
fcc-Ni	-45.9	-24.3
Fe-Co (50%)	119.3	41.3

<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/magnetostriction>

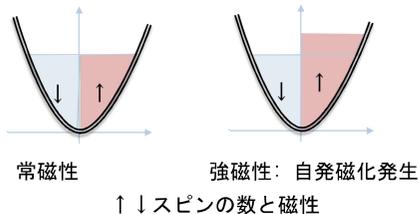
Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, 2014

22

(ト)

# 磁性と結晶構造にまつわる話

表 ↓スピン数と結晶構造の関係



bcc	↑	↓	Total	↓ × 2	↑ - ↓
Fe	4.4	2.2	6.6	4.4	2.2
Mo	2.25	2.25	4.5	4.5	0
W	2.15	2.15	4.3	4.3	0

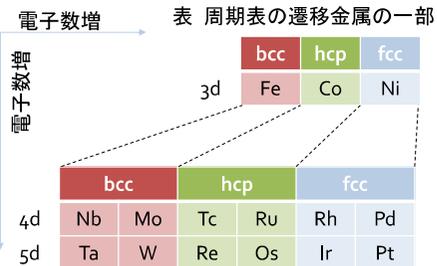
疎  
等方的

hcp	↑	↓	Total	↓ × 2	↑ - ↓
Co	4.6	2.9	7.5	5.8	1.7
Ru	3.25	3.25	6.5	6.5	0
Os	3.1	3.1	6.2	6.2	0

密  
異方的

fcc	↑	↓	Total	↓ × 2	↑ - ↓
Ni	4.6	4.0	8.6	8.0	0.6
Rh	3.8	3.8	7.6	7.6	0
Ir	3.6	3.6	7.2	7.2	0
Pd	4.35	4.35	8.7	8.7	0
Pt	4.2	4.2	8.4	8.4	0

密  
等方的



P. Söderlind et al. Phys Rev. B, 50 5918 (1994).

(基)

# Fe という物質の磁性の特徴

- 磁気異方性とひずみは磁化過程に大きな影響を与える
- 磁気異方性とひずみの関係は深い  
(磁気弾性効果、磁気体積効果)

24

(基)

# 軟磁性材料

材料で決まる (組成、組織)

- $K$ : 磁気異方性定数
- $\lambda$ : 磁歪定数
- $\rho$ : 電気抵抗率
- $E$ : ヤング率
- $B_s (M_s)$ : 飽和磁束密度

外的因子

- $H$ : 磁場
- $w, d, h$ : 寸法、形状 (体積・面積率)
- $\sigma$ : 応力

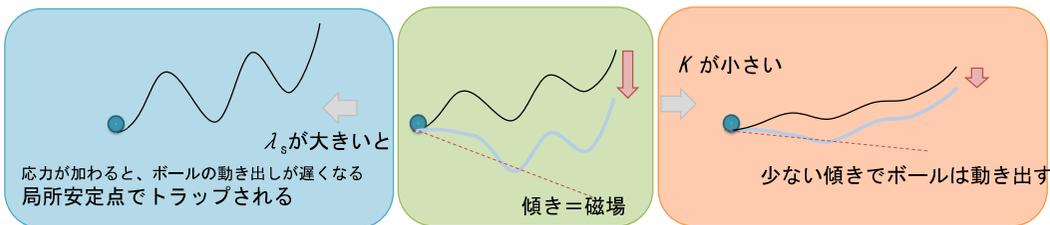
率

$$\mu_i \propto \frac{B_s^2}{K + \alpha \lambda_s \sigma}$$

$\mu$ : 透磁率  
 $\mu_0$ : 初透磁率、 $a$ : 比例定数

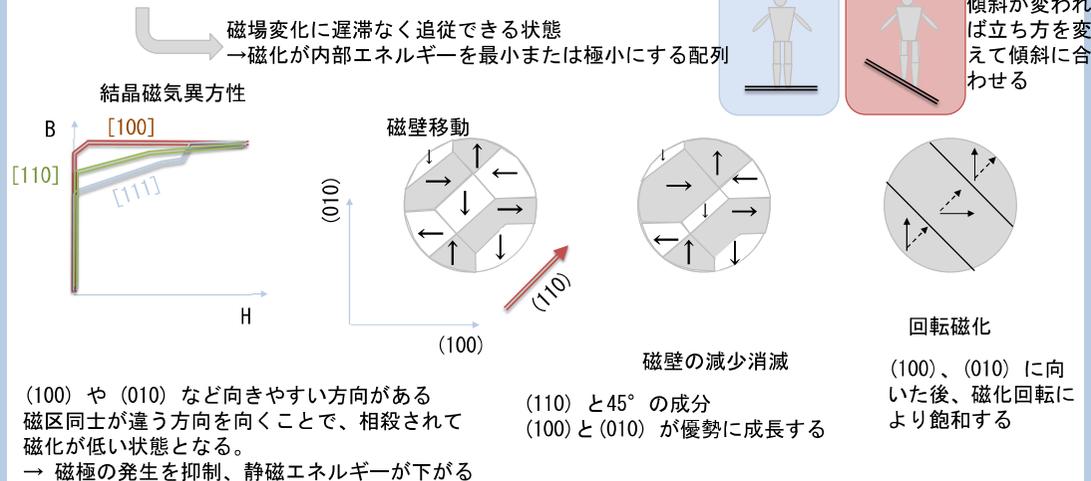
ゼロ点からの初動の際には、異方性とひずみに対する感受性(が鈍い方が良い)

でこぼこの坂道の底にボールがあって、傾きを変えてボールを転がす



(基)

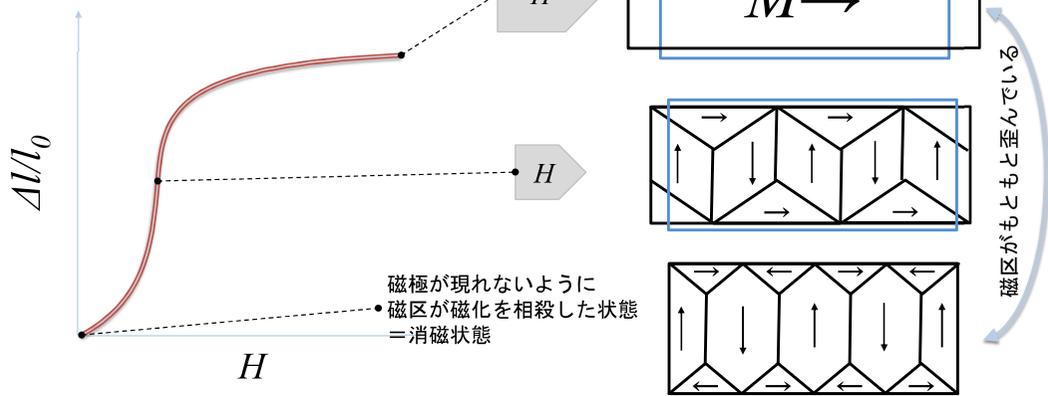
# 強磁性体の静磁的磁化過程



(基)

# 磁歪について

線磁歪 (強制磁歪)



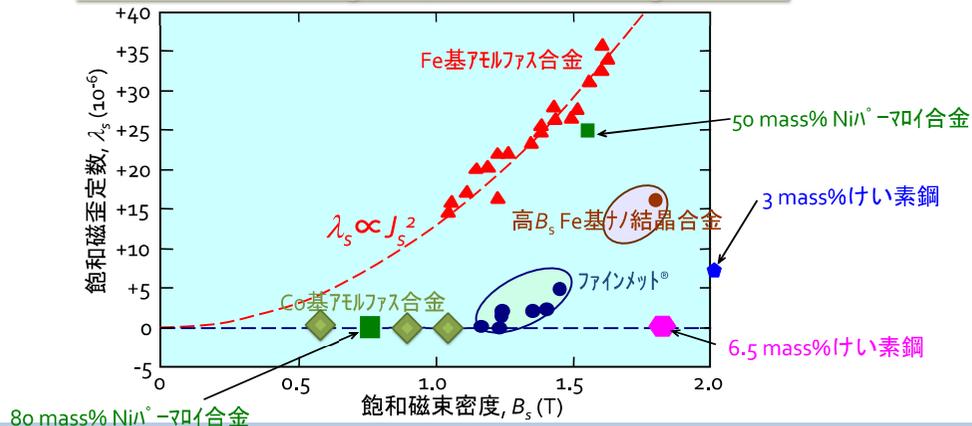
電子軌道の避け合いなどの影響で、構造が歪んだ方が安定になる

(基)

# 低磁歪材

小型化 → 高 $B_s$ 化  
 応力による特性劣化・騒音低減 → 低磁歪化

## 飽和磁歪定数 $\lambda_s$ と飽和磁束密度 $B_s$ の関係



(基)

## 軟磁性材料とひずみ

- ひずみと磁気異方性は磁化過程に大きな影響を与える
- 軟磁気特性を良くするための方針
  - 構造特性と電子数の関係からゼロ磁歪組成
  - 磁気異方性や磁歪の影響が表れにくい使い方
  - 加工時の応力低減・応力緩和処理
- ひずみの要因
  - 加工時
  - 熱処理時・使用時の熱履歴
  - 使用中の衝撃による破損 (落とす・ぶつける)

29

## 結晶磁気異方性、飽和磁歪が低くなる組成の金属系(メタル)軟磁性材料

(各)

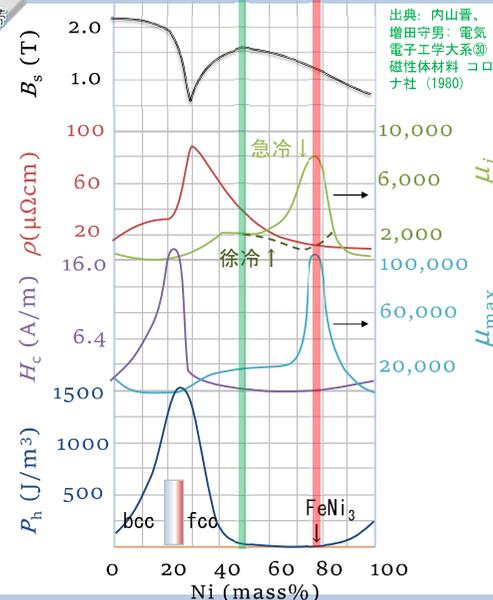
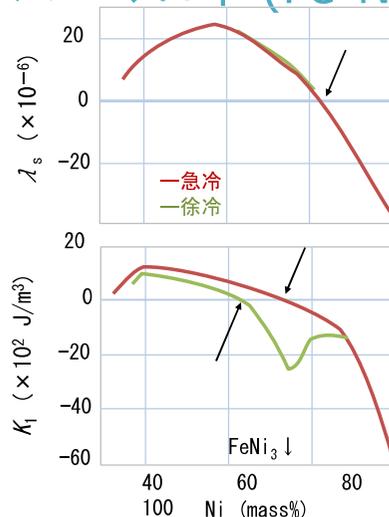
## 異方性のコントロール (化学量論組成をうまく使う)

- 化学量論組成 (Stoichiometry) の存在
  - 1:1、1:3 など整数比で構成元素の組成比率が整数のもの
  - 異種元素が規則的に配列する**規則相**が現れることが多い ⇄ 不規則相
- 化学量論組成では
  - ✓ 構造の対称性が高く、周期性が高い
  - ✓ 様々な物性が特異点を示しやすい (物性のピーク)
  - ✓ 硬くなりやすい (例、 $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$  など)
  - ✓ 超格子 (Superlattice) の影響
    - 同一元素で異なる局所環境 (サイト) が現れる
    - 磁気モーメント方向や配向性が異なる

31

(各)

## パーマロイ (Fe-Ni)

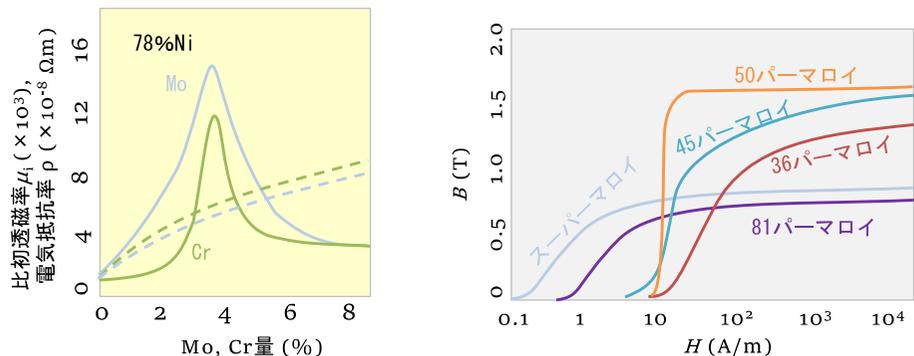


R. M. Bozorth, "Ferromagnetism", D. Van Nostrand, Co. Inc., N. J. (1951), p114.  
 川西健次, 近角聡信, 櫻井良文 編: 磁気工学ハンドブック 朝倉書店 (1998)

(各)

## スーパーマロイ

- Fe-Ni の Ni が 70~85% の組成領域において、Mo, Cr, Cu など置換すると、 $Fe_3Ni$  規則相の生成が抑えられる
- 熱処理時の冷却条件が緩和
- 高透磁率を実現 + 電気抵抗増加 → 軟磁気特性向上
- ただし、 $B_s$  が 0.8 T 程度に低下



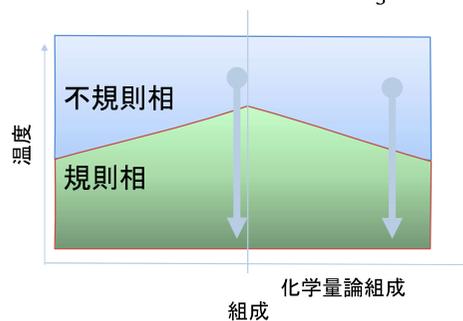
出典: 電気学会マグネティクス技術委員会編: 改訂 磁気工学の基礎と応用 コロナ社 (1999) (改訂2018)

33

(各)

## 規則配列を少しだけ壊す

- 不規則相を出す
  - 急冷により不規則相を出す (パーマロイ)
  - 添加元素を加えることで不規則相を出やすくする (スーパーマロイ)
- 組成によるずらし
  - Fe-Si-Al (センダスト) は  $Fe_3Si$  と  $Fe_3Al$  の混ぜ物のような組成



少しずらすと規則-不規則変態温度が下がり安定して、不規則相が得られやすい

34

(各)

## パーマロイの加工性

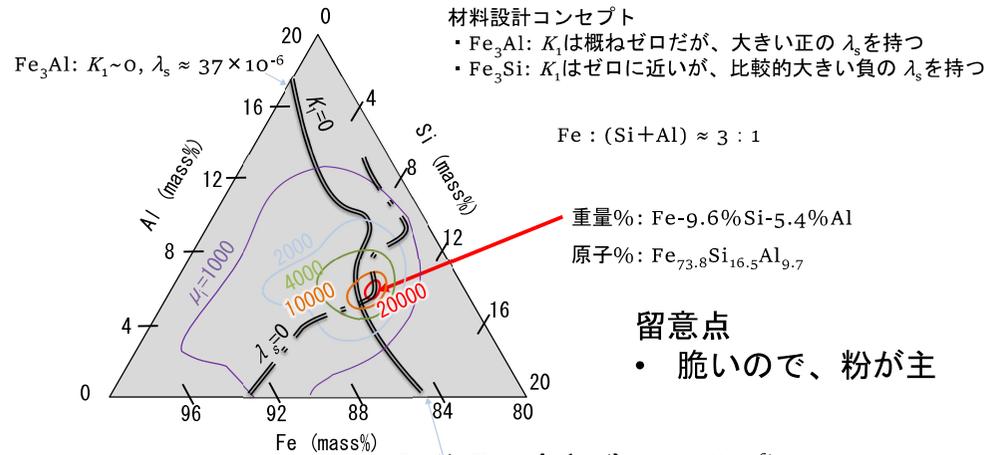
- パーマロイの加工はフレキシブルで、曲げ・切削・絞り加工に対応している。
- しかし、硬く粘りのある材質のため工具の持ちが悪く、切削加工は非常に難しいとされている。
- 熱伝導率の低さも、切削を難しくしている一因と言える。
- 一般材の工具で切削すると工具先端がすぐに摩耗、または溶けて使えなくなることもしばしば起こる。

参考にさせていただいた情報源:(株)タイセイ製作所 HP: <https://taiseiseisakusyo.com/difficult/permalloy/>

35

(各)

## センダスト

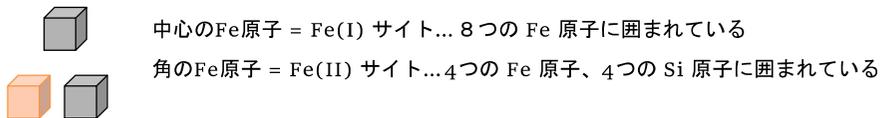


本間基文, 北田正弘 編: 機能材料入門 アグネ(1981) D. Odckhuu, et al., J. Appl. Phys. 111, 063911 (2012)

36

(各)

## 超格子の例 Fe<sub>3</sub>Al、Fe<sub>3</sub>Si



Fe<sub>3</sub>Al 磁気モーメント Fe(I) × 4 : 2.18 μ<sub>B</sub>、Fe(II) × 8 : 1.50 μ<sub>B</sub>

2種類のFe元素が、数的にアンバランスを持って存在している  
ほど良いランダムネスが生まれ、ターゲットが絞られない

**規則相は必ずしも究極の軟磁性を示さないが、変化を与える基点になる**

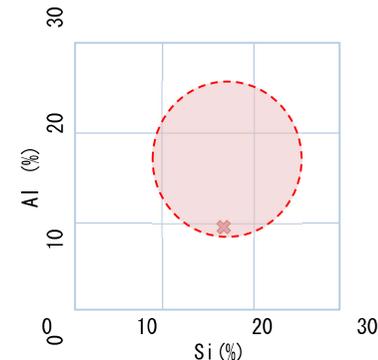
$$\text{Fe}_3\text{Al}: K_1 \sim 0, \lambda_s \approx 37 \times 10^{-6}$$

37

(次)

## Fe-Al-Si の高透磁率の組成範囲を広げる研究

- バルク状態では、優れた軟磁気特性を示す範囲は極めて狭い → ほぼ点
- スパッタによる急速冷却により、規則相の割合を低下 + Al量調整
- 熱処理によって、規則相の割合を調整
- 優れた軟磁気特性が得られる組成範囲拡大



現行のセンダストやパーマロイは  
規則相の性質を使いつつ、  
軟磁気特性が発現しやすい  
少しだけランダムさが加わった  
原子構造を実現している

東北大学 プレスリリース 2022/6/17

38

## 小括 パーマロイ、センダスト

材料 (at%)	d (μm)	B <sub>s</sub> (T)	H <sub>c</sub> (A m <sup>-2</sup> )	μ <sub>i</sub>	λ <sub>s</sub> (10 <sup>-6</sup> )	T <sub>c</sub> (K)	ρ (μΩ m)
センダスト(Fe-Al-Si)	—	1.0	1.6	30,000	<+1	773	0.80
パーマロイ(Ni-Fe + α)	—	0.79	0.16	100,000	<+1	673	0.60
78パーマロイ (78.5Ni)		1.07	4	8,000	<+1		0.16
45パーマロイ (45Ni)		1.60	24	4,000	25		0.45

- 金属系の軟磁性材料としては、**ゼロ結晶磁気異方性、ゼロ磁歪が実現される数少ない合金**
- パーマロイは加工性も他の軟磁性材料と比べれば比較的良好であり、板、バルク、粉末の形態があることから、**最も無難な選択肢**となる
- センダストは脆いため、バルク上では得られにくく、圧粉磁心の形態が一般的であり、中周波以上の用途に適している
- いずれの合金系も飽和磁束密度 B<sub>s</sub> が低いことが懸案事項となり、B<sub>s</sub> が必要な用途には向かないことがある

(私見) 純Fe と比べて磁気モーメントが小さくなり始めていることも  
ソフトさの要因と考えられる

出典: 吉沢克仁: 第34回MSJサマースクールテキスト ソフト材料 (2011)

39

## 金属系(メタル)軟磁性材料

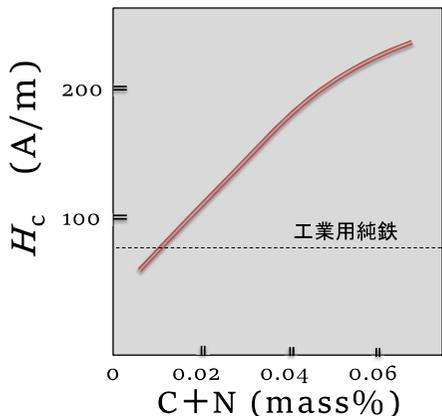
40

(各)

# 純鉄 (電磁厚板)



- 製錬により、C や N の含有量を極力低くする
- $H_c$  が 80 A/m (= 1 Oe)



出典: 吉沢克仁: 第34回MSJサマースクールテキスト ソフト材料 (2011)

43

(各)

# カルボニル鉄粉



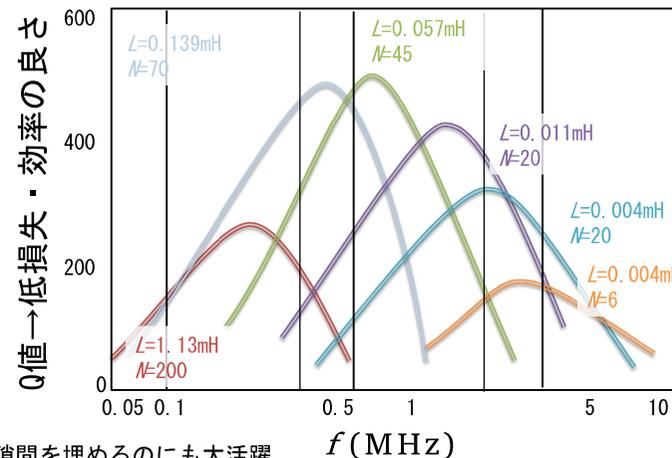
- 高圧・高温・一酸化炭素中
- 還元により  $Fe_3(CO)_5$
- 350°Cで分解
  - + 水素還元でさらに低炭素化

大きさのそろった球状粒子 (3-20 μm)

- $\mu$ : 5-20 程度
- 低透磁率高周波磁心
- 軟らかい

- 大きな粒径の他材質粉末間の隙間を埋めるのにも大活躍

出典: 内山晋、増田守男: 電気電子工学大系 磁気体材料 コロナ社 (1980)



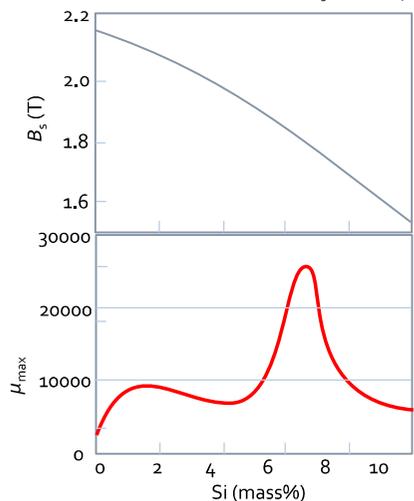
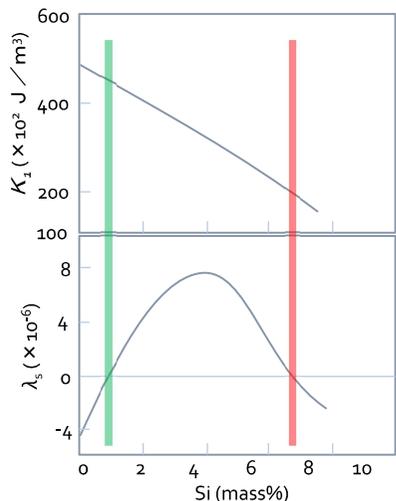
42

(各)

# Fe-Si (電磁鋼板)



全体的に高い  $B_s$  と高い  $\mu_{max}$



1% 近傍  
磁歪が正→負  
 $\mu_{max}$  小ピーク

6.5% 近傍  
磁歪が負→正  
 $\mu_{max}$  大ピーク

※小ピークでは  
 $\lambda_{100} \sim 20 \times 10^{-6}$   
 $\lambda_{111} \sim -14 \times 10^{-6}$   
 $\lambda = \frac{2}{5} \lambda_{100} + \frac{3}{5} \lambda_{111}$

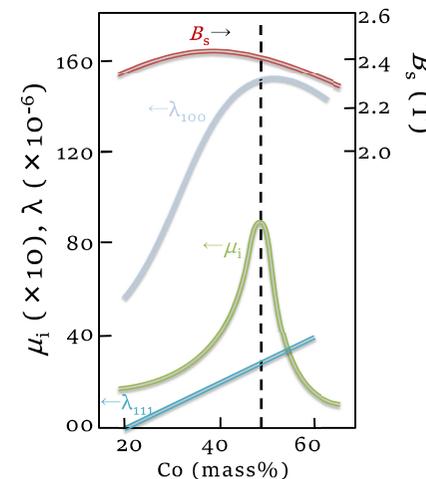
出典: 吉沢克仁: 第34回MSJサマースクールテキスト ソフト材料 (2011); W. J. Carr Jr. et al: Phys. Rev., 83 1236 (1951); R. C. Hall: J. Appl. Phys., 30 816 (1959); L. P. Tarasov: Phys. Rev., 56, 1231 (1939); R. M. Bozorth: "Ferromagnetism", D. Van Nostrand, Co. Inc., N. J. (1951)

# Fe-Co (パーメンジュール)



- 構造としては、bccに近い構造
  - Coを含むが hcp ではない
  - Fe:Co が 1:1 の組成で高透磁率
  - 特性が良いのは規則相
  - 規則相は難加工
  - 製造工程終盤で、規則加熱処理が必要
- 製造面から 2%程度 V などを置換する
- 最高  $B_s$  + 比較的良好な軟磁気特性
  - $B_s$  は約 2.4 T,  $H_c$  は 30 A/m 以下
  - 初透磁率  $\mu_i$  は 800 以上

大トルクモータ用途などで注目されている

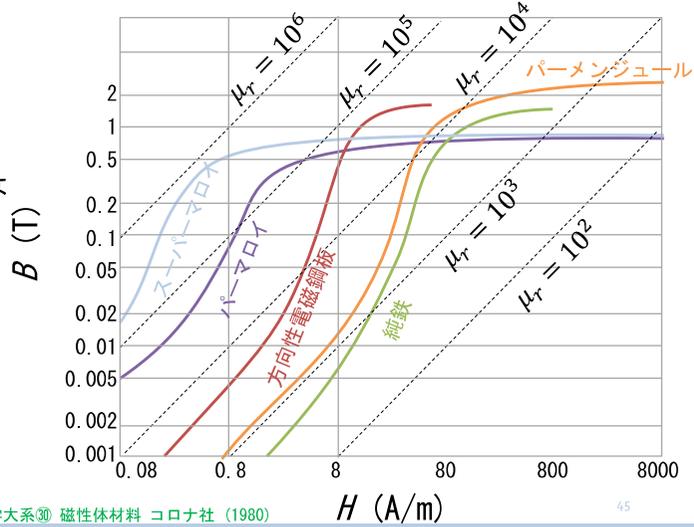


出典: 電気学会マグネティクス技術委員会編: 改訂 磁気工学の基礎と応用 コロナ社 (1999) (改訂2018)

44

# Fe系材料の B-H 曲線 (縦軸も対数表示)

- 軟磁気特性なら
  - パーマロイ
- 高  $B_s$  なら
  - パーメンジュール
- 使えるなら、安価なのは
  - 純鉄
- バランスが良いのは
  - 電磁鋼板



出典: 内山晋、増田守男: 電気電子工学大系 磁性体材料 コロナ社 (1980)

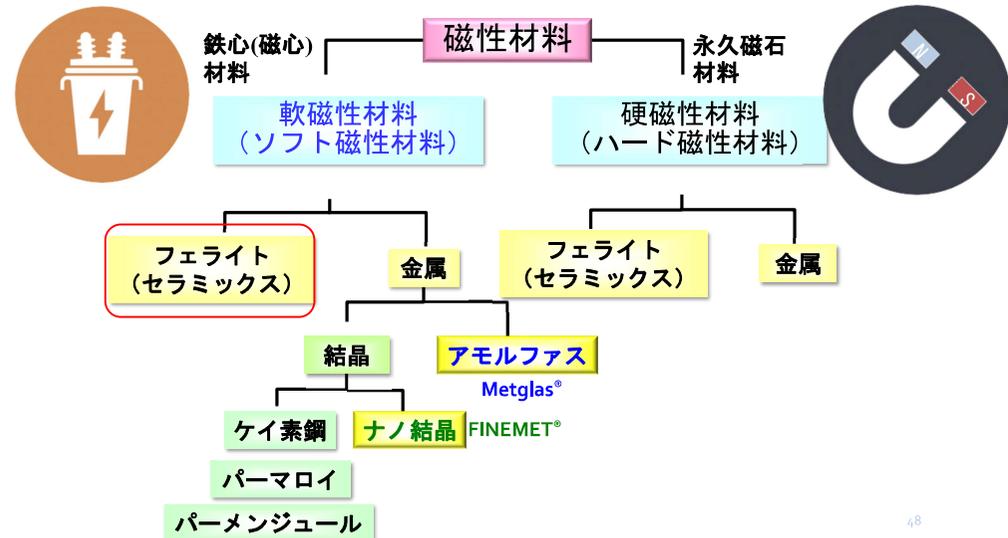
# (基) 金属合金系軟磁性材料の用途と利用特性

出典: 内山晋、増田守男: 電気電子工学大系 磁性体材料 コロナ社 (1980)

利用分野	高 $\mu$	低 $H_c$	低 P ロス	高 $B_s$	高 $B_s/B_m$ 角形比	強度	代表的な材料
電磁石磁極			△	○			電磁軟鉄(純鉄)、パーメンジュール
加速器磁極			△	○			純鉄(電磁軟鉄)、電磁鋼板
回転機磁極						○	磁極鋼
磁気シールド(強磁場)	△			○			電磁軟鉄(純鉄)、電磁鋼板
磁気シールド(弱磁場)	○						パーマロイ、方向性電磁鋼板、アモルファス、ナノ結晶
回転機(回転子)				○			電磁軟鉄、電磁鋼板
回転機(固定子)			○	○			電磁鋼板
↓(別タイプ)	○		○	○			方向性電磁鋼板
変圧器	○		○	○			方向性電磁鋼板、アモルファス
安定器			○	○			電磁鋼板
変成器	○	○	○	○			方向性電磁鋼板、電磁鋼
↓(商用周波数以外)	○	○	○				パーマロイ
磁気ヘッド	○	○	○			○	パーマロイ、センダスト
磁気増幅器			○		○		パーマロイ
↓(別タイプ)				○	△		方向性電磁鋼板

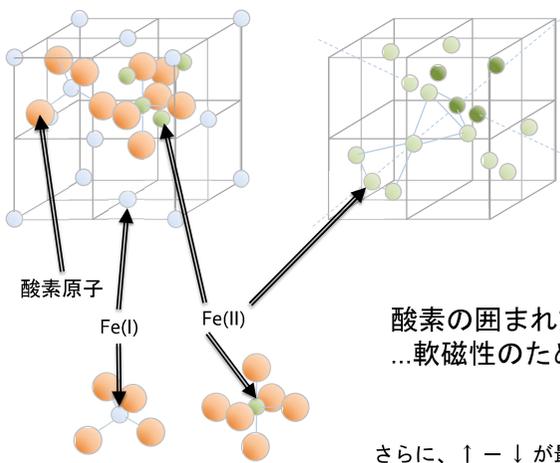
# フェライト系材料

# (基) 磁性材料の分類



(各)

# ソフトフェライトの軟磁性の起源



立方晶の等方的な構造



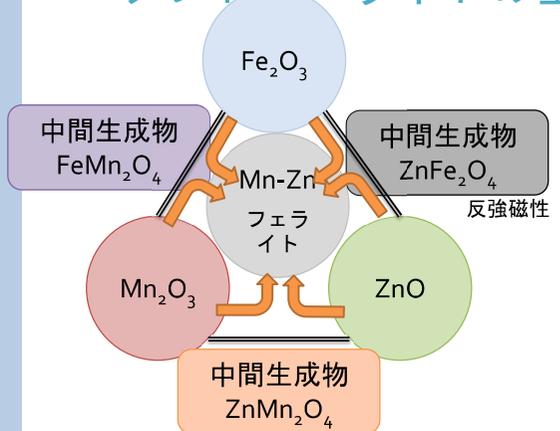
酸素の囲まれ方が違うサイト2つのサイトが存在  
...軟磁性のためのランダムネス

さらに、↑ ↓ が最大になる組み合わせを元素置換により探索

出典: 太田恵造・磁気工学の基礎 I, II 共立出版 (初版1973) (1994版)

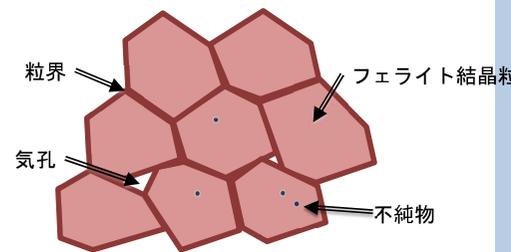
(各)

# ソフトフェライトの基本的な考え方



酸化物(SnO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、CrO<sub>2</sub>など)が微量添加物

フェライトの微細構造



酸化物と比べて電気抵抗率が高い

メタル系: 10<sup>-7</sup>~10<sup>-6</sup> Ωm

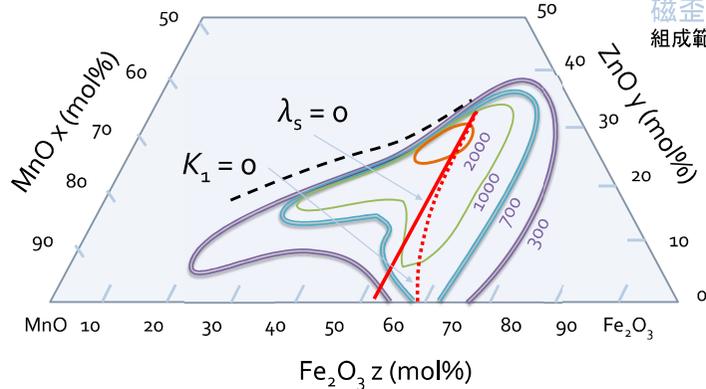
Mn-Znフェライト: 10<sup>-2</sup> Ωm

Ni-Znフェライト: 10<sup>4</sup> Ωm

渦電流損失抑制

(各)

# Mn-Zn フェライト



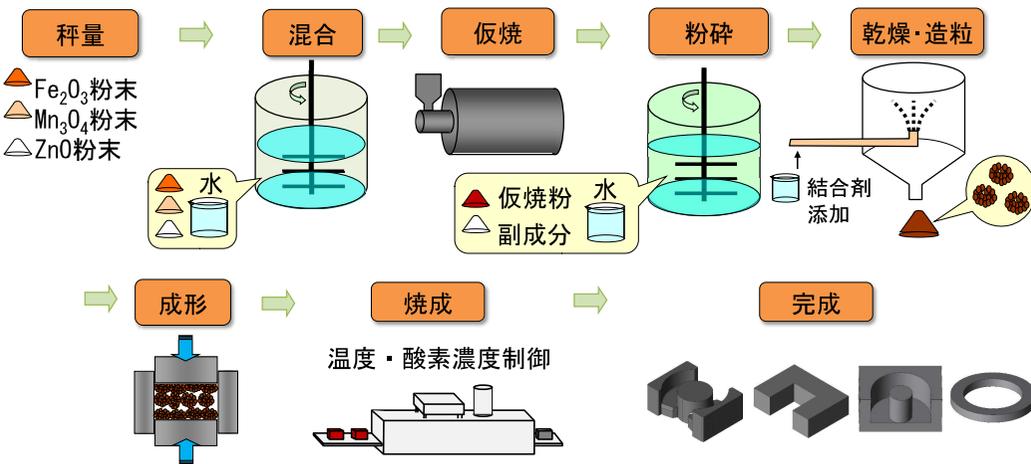
メタル系軟磁性体と同様  
磁歪ゼロ、結晶磁気異方性ゼロの  
組成範囲を中心に高透磁率が得られる

粒子径などで透磁率を制御

(各)

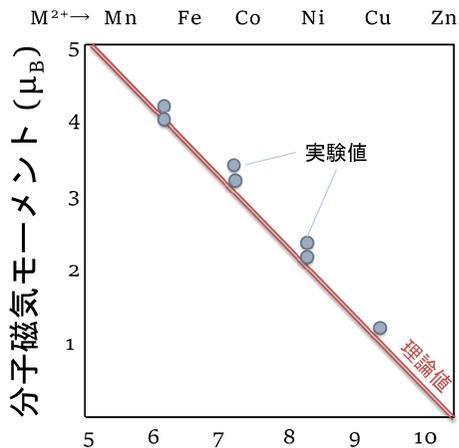
# フェライトの製造工程

一般的な粉末冶金プロセスによるセラミックス製造技術



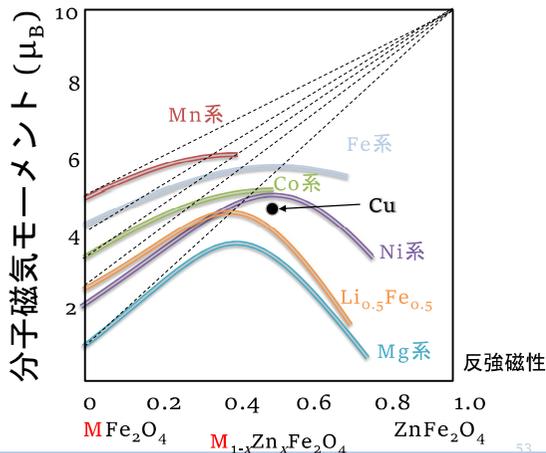
(各)

# フェライト



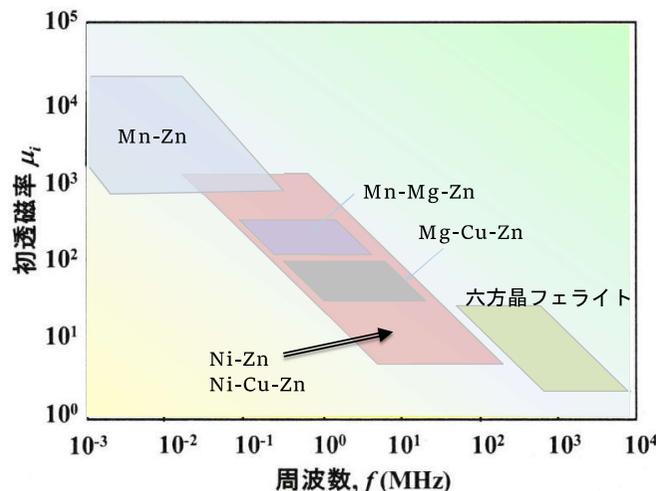
出典: 太田恵造: 磁気工学の基礎 I, II 共立出版 (初版1973) (1994版)

## 置換による分子磁気モーメントの推移



反強磁性

# フェライトの初透磁率と周波数マップ



高周波では、NiZn系フェライトが使われる

- ✓ 電気抵抗が非常に高い
- ✓ 初透磁率は300未満
- ✓ 高周波用途に適している

六方晶フェライトはさらに高い高周波域で主に磁気シールドとして用いられる

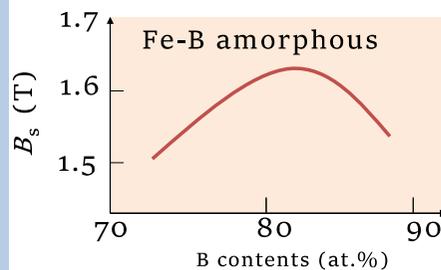
- ✓ 一軸異方性を有する

参考にさせていただいた情報源: 吉沢克仁: 第34回MSJサマースクールテキスト ソフト材料 (2011); 平賀貞太郎等: 電子材料シリーズ フェライト, 丸善 (1986) 54

# 液体急冷材料

(基)

## Fe 基アモルファス合金の $B_s$



結晶材  $B_s \propto Fe$  濃度

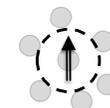


Fe 基アモルファス合金

80% 近傍でピーク



上限: 1.65 T 以下



アモルファス相中で原子が疎な状態  
中心の磁気モーメントは大きくなる  
(ヒント: bcc のような局所環境)



密な局所環境では磁気モーメント  
が失われる  
(ヒント: fcc のような局所環境)

Bが減る 密な局所環境が増える  
Bが増える トータルの Fe の重量が  
下がる

磁気モーメントの大きさは局所環境に大きく依存する  
磁気と体積に強い関係が見られる  
アモルファス相では、局所環境の多様性が見られる

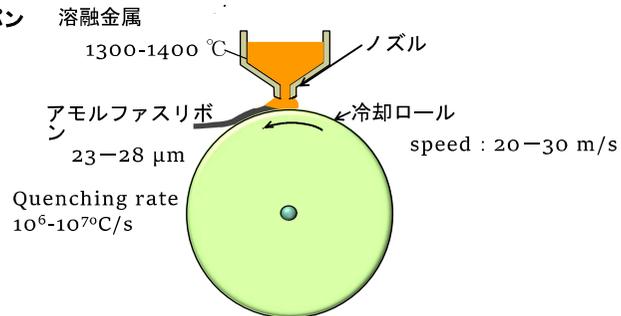
インパー効果, 磁歪現象,  
磁気体積効果, 磁気弾性効果...

磁気と体積の協力現象が多く現れる

(基)

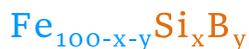
## 液体急冷合金

液体急冷法、メルトスパン  
高い生産性が得られる



急冷状態 (As-Quenched state)

アモルファス相



Fe: 磁気之源 (狙い値: over 92 wt.%)

Si & B: アモルファス系性能向上のかなめの元素

商業的に広く流通している組成

(基)

## Fe-基アモルファスリボンの特徴

ランダムネス

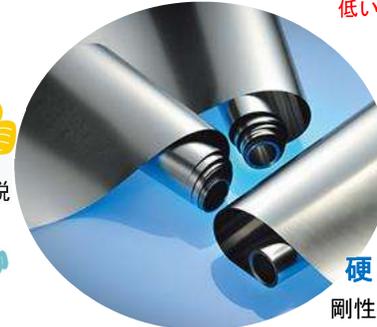
結晶磁気異方性がゼロ  
低いヒステリシス損失  $P_h$

Low  $B_s$

やや高めの  
磁歪  
( $\sim 30 \times 10^{-6}$ )

誘導磁気異方性の  
起源を与えている説

ノイズ、振動  
損失増加の要因



薄さ (0.025 mm)

渦電流損失  $P_e$  の抑制

生産性低下

硬さ (over 900 Hv)

剛性の確保

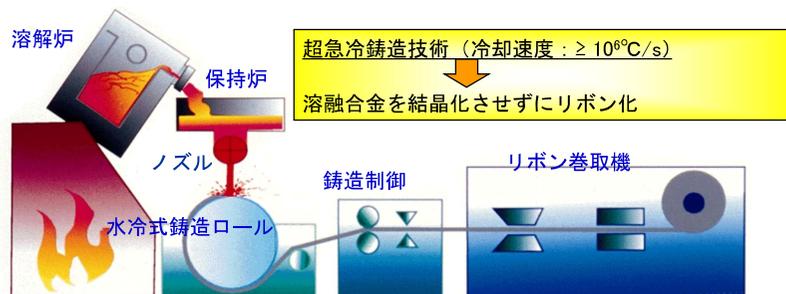
生産性低下 (難加工)

アモルファスには多くのユニークな特徴があり、  
これは、軟磁気特性にとってプラスにもマイナスにもなり得うる  
それを利用して長所を強化し、短所を補う努力がなされてきた

(紹)

## アモルファス合金リボンの製造方法

材料 Alloy Name	構成元素 Constituent Elements	板厚 Thickness	結晶粒 Grain Size	磁束密度 Induction	鉄損 Core Loss
電磁鋼板 Grain Oriented Si Steel	Fe, Si	230 μm	~10 mm	◎	△
鉄系アモルファス合金 Fe-based Amorphous	Fe, Si, B	25 μm	—	○	○
ナノ結晶軟磁性材料 Nano-Crystalline Alloy	Fe, Si, B, Cu, Nb	18 μm	~10 nm	△	◎



プロテリアル 提供資料 (カタログ、HP より)

(紹)

## アモルファス合金と「ファインメット」を用いた応用製品



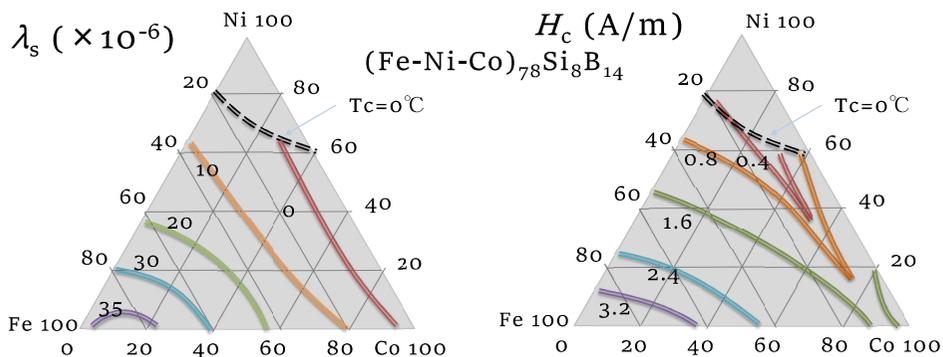
ナノ結晶アモルファス合金 「ファインメット®」 「ファインメット®」を用いた応用製品

プロテリアル 提供資料 (カタログ、HP より)

(各)

## 3d金属基アモルファスリボン

性質は 3d 電子数の変化に伴い連続的に変わる ⇨ 結晶材との違い  
基本的に Fe 近傍で  $B_s$ 、 $\lambda_s$ 、 $H_c$ 、 $T_c$  が高く Ni に向かって低くなる



出典: 電気学会マグネティクス技術委員会編: 改訂 磁気工学の基礎と応用 コロナ社 (1999) (改訂2018)

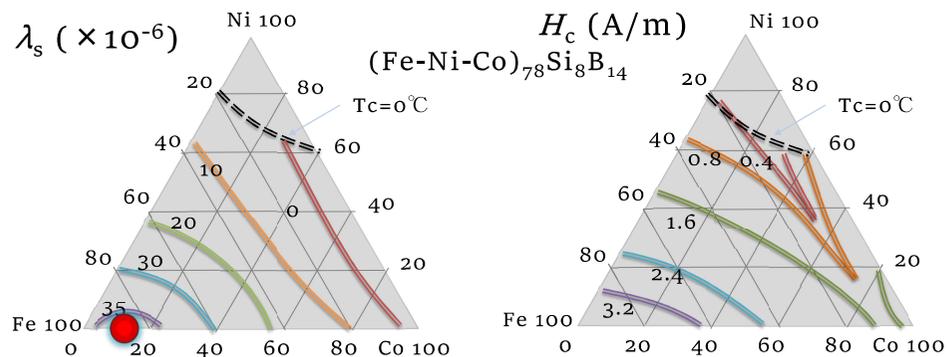
61

(各)

## Co-Fe アモルファスリボン

Fe リッチ側で磁歪が最大になるあたりで、 $B_s$ も最大の1.8 T  
Metglas® 2605CO

Metglasは(株)プロテリアル登録商標です



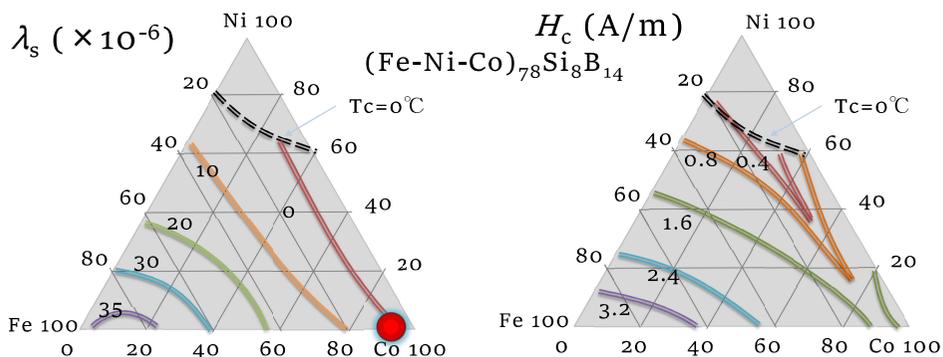
62

(各)

## Co-Fe アモルファスリボン

Co リッチ側で磁歪がゼロの組成域が存在  
もともと、アモルファスには結晶磁気異方性がない  
ただし、 $B_s = 0.6$  T未満 Metglas® 2714A

Metglasは(株)プロテリアル登録商標です



63

(各)

## アモルファスの粉末

- アモルファスリボンの粉碎粉
  - 比較的高い  $B_s$
  - きちんと熱処理すれば、低めのコアロス
  - 性能から考えると比較的安価
  - 扁平粉になるので、磁路に対して、長手方向を向いている割合を増やせば、高透磁率化
  - 透磁率を 50 程度に調整したコアは、100kHz 程度の周波数で使われている
- 注意点
  - 磁歪が大きく、粉碎時のひずみ
  - 硬く、変形しにくい→占積率が低い
- 上記を回避するために



リボン → 粉碎 → 成形・プレス → ひずみ取り熱処理 → 製品

64

(紹)

# リボンを巻いたコアとダストコアの比較

**巻コア**  
Wound Core

ギャップ  
Gap

磁束  
Magnetic Flux

アモルファスリボン  
Amorphous Ribbon

- Merit  
比較的大型のコアの作成が容易
- Demerit  
リアクトルの透磁率を下げるためにギャップを開ける必要があり、漏れ磁束に起因する損失が増える。

**ダストコア**  
Dust Core

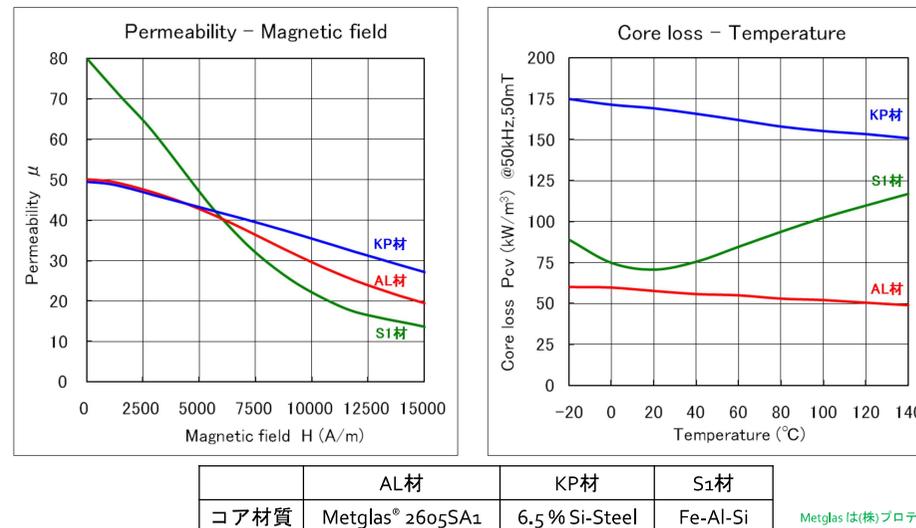
ギャップ  
Gap

- Merit  
大きなギャップなしに透磁率を下げられる。
- Demerit  
大型コアの製造が困難  
高透磁率化困難 (透磁率120程度以下)

プロテリアル 提供資料 (カタログ、HPより)

(紹)

# 直流重畳特性及びコアロスの温度依存

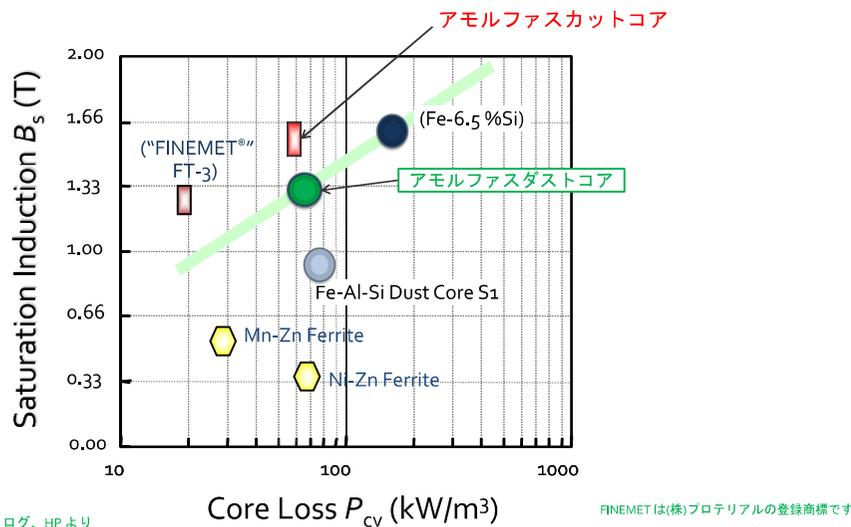


プロテリアル 提供資料 カタログ、HPより

Metglasは(株)プロテリアルの登録商標です

(紹)

# コアロスと飽和磁束密度の比較 at 50 kHz, 50 mT

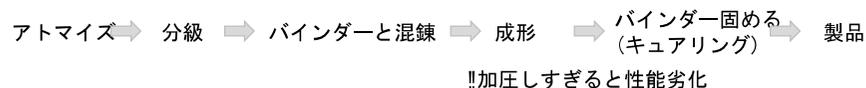


プロテリアル 提供資料 カタログ、HPより

(各)

# アモルファスの粉末

- アモルファスアトマイズ粉
  - 比較的高い  $B_s$
  - きちんと処理すれば、低めのコアロス
  - 急冷可能な高性能アトマイズ装置で製造
- 注意点
  - 磁歪が大きく、プレスは困難
  - 硬く、変形しにくい → 占積率が低い
- 上記を回避するために
  - 微粉をませて、占積率を上げる
  - 成型時の圧力を制限する
 ⇒ 流動性が高いとGood



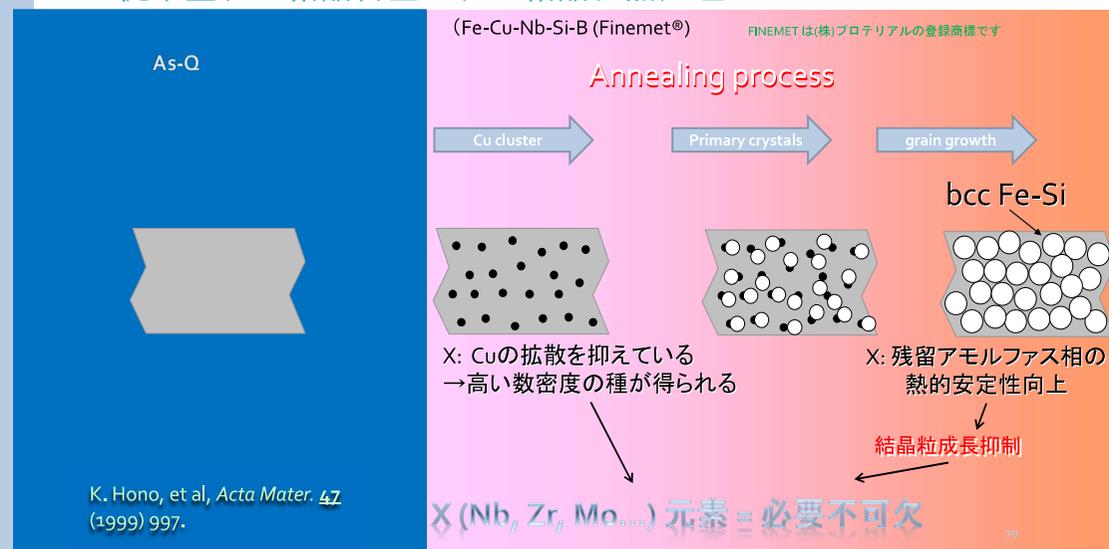
(各)

# Fe 基ナノ結晶リボン (Fe-Cu-Nb-Si-B、Fe-Zr-B)

- 製法
  - 液体急冷法でアモルファスリボンを製造 (冷却速度の制約で 板厚 20 μm 以下)
  - 熱処理により、結晶粒径が 10 nm 程度のナノ結晶粒がアモルファス相中に析出した集合組織をえる
  - 熱処理時に磁場を印加することで、初透磁率を数千~十万まで制御できる
- 特徴
  - 正の磁歪を有するアモルファス相と負の磁歪を有する結晶相で磁歪が相殺され、見掛け上ゼロ磁歪となっている
  - ランダム磁気異方性により、結晶磁気異方性が相殺されている ← ゼロ
  - 理想的な軟磁性材料の要件を満たす
  - パーマロイやセンダストよりも高い  $B_s$  を有する
- 注意点
  - 結晶化後は脆く、加工には不向きとなる

69

# 従来型ナノ結晶合金のナノ結晶化熱処理



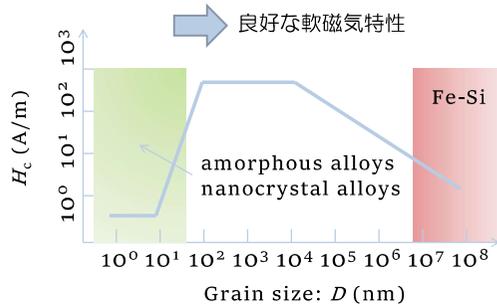
70

# 磁壁移動多ブでは組織のサイズが重要

$H_c$  の結晶粒  $D$  依存性 かつては、 $D$  増加により  $H_c$  減少 → 常識

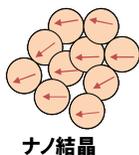
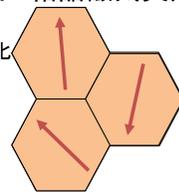
## アモルファス & ナノ結晶

合金の発見 → 軟磁性に大きな変化  
20 nm 以下の結晶粒サイズ (磁壁幅よりも小さいディメンジョン)  
極端に低い結晶磁気異方性



出典: G. Herzer: *IEEE Trans. Mag.* 25 (1989) 3327.

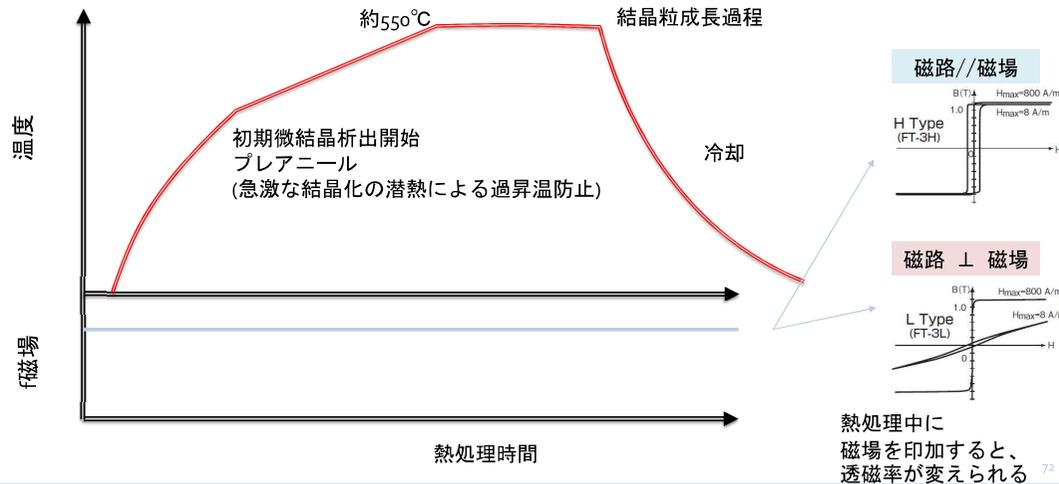
結晶 結晶磁気異方性: 大



ナノ結晶  
磁化回転: 容易

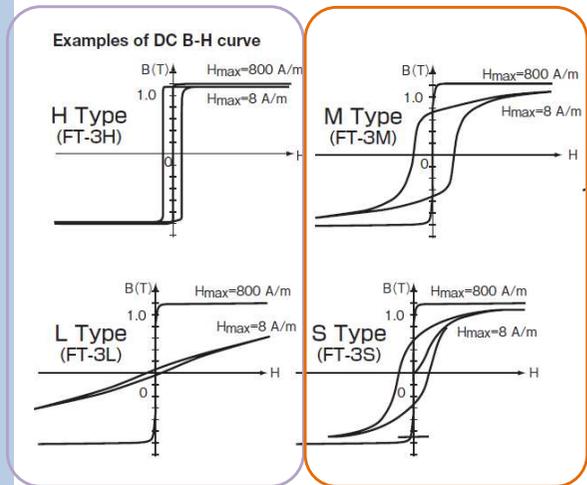
71

# ナノ結晶組織を得るための標準的熱処理パターン



72

(基) **B-H loop の形状制御 → 透磁率制御**



B-H 曲線の形状は熱処理時の磁場の有無や磁場の向きとタイミングで制御されている



“いつ磁場印加されたか”は重要なポイント!

材料にいろいろな軟磁気特性を持たせられる

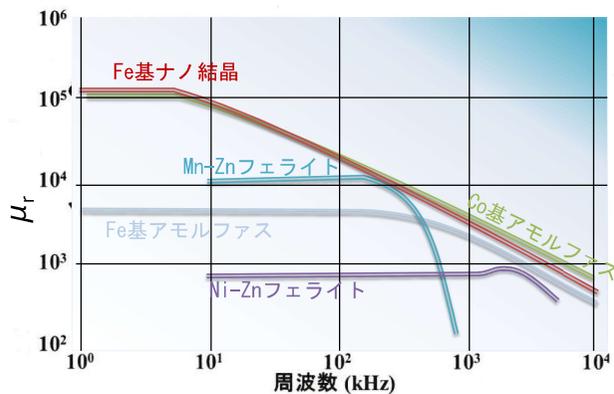


広いアプリケーション分野

(紹) **ナノ結晶合金「ファインメット」の主な用途**



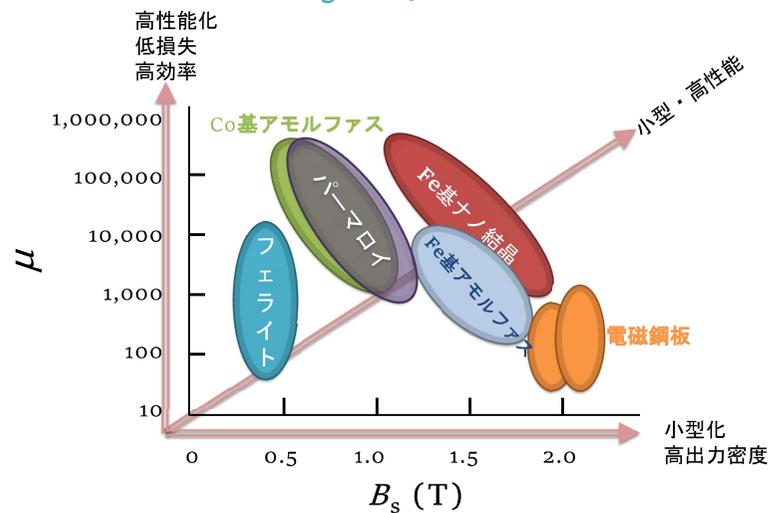
(紹) **主な軟磁性材料の被透磁率の周波数依存性**



実際には、 $B_s$ 、渦電流損失等を勘案して材料選定を行う

重畳特性などは、アモルファス合金、ナノ結晶合金が有利

(紹) **ソフト材料の  $B_s$  と  $\mu$  の関係**



## 主な軟磁性材料の特性

材料 (at%)	d ( $\mu\text{m}$ )	$B_s$ (T)	$H_c$ ( $\text{A m}^{-2}$ )	$\mu$	$\lambda_s$ ( $10^{-6}$ )	$T_c$ (K)	$\rho$ ( $\mu\Omega\text{m}$ )
$\text{ナノ結晶 Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15.5}\text{B}_7$	21	1.23	0.4	110,000	$\sim 0$	843	1.2
$\text{ナノ結晶 Fe}_{80.6}\text{Cu}_{1.4}\text{Si}_5\text{B}_{13}$	21	1.80	5.7	7,000	+12	>873	0.80
$\text{ナノ結晶 Fe}_{86}\text{Cu}_1\text{Zr}_7\text{B}_6$	20	1.52	3.2	41,000	$\sim 0$	—	0.56
電磁軟鉄	—	2.12	4.0	5,000	-7	1043	0.10
方向性電磁鋼板	230	2.03	8.0	1,500	-0.8*	1013	0.48
無方向性電磁鋼板	350	1.96	40	500	+7.8	1003	0.57
6.5 mass % Si電磁鋼板	100	1.80	45	1,200	+0.1	973	0.82
パーメンジュール	200	2.45	64	800	—	1253	0.28
センダスト(Fe-Al-Si)	—	1.0	1.6	30,000	<+1	773	0.80
スパーマロイ(Ni-Fe + $\alpha$ )	—	0.79	0.16	100,000	<+1	673	0.60
アモルファス $\text{Fe}_{80}\text{Si}_9\text{B}_{13}$	25	1.56	1.7	5,000	+27	688	1.3
アモルファスCoFeNiSiB	25	0.54	0.16	120,000	$\sim 0$	483	1.3
Mn-Znフェライト	—	0.42	3.2	12,000	—	398	$2.0 \times 10^4$
Ni-Znフェライト	—	0.41	22	800	—	443	$1.0 \times 10^{12}$

出典: 吉沢克仁: 第34回MSJサマースクールテキスト ソフト材料 (2011)

\*: 縦磁歪

## 各種パワーエレクトロニクス デバイスに求められる軟磁気特性

78

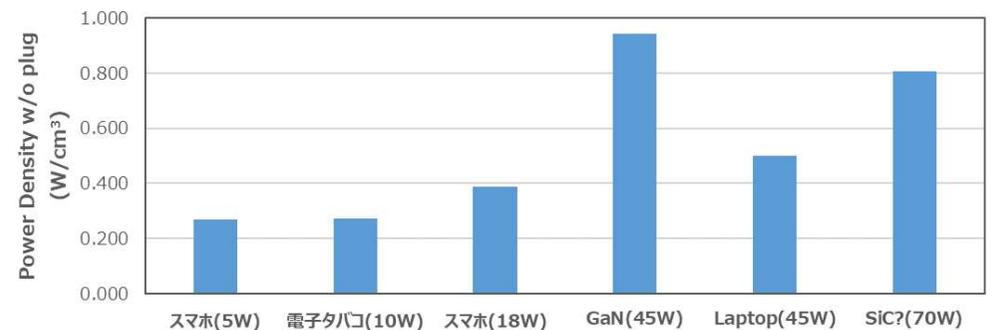
## パワーエレクトロニクス

- （英語: power electronics）は、電力用半導体素子を用いた電力変換と制御に関する技術であり、電力変換と制御を中心とした応用システム全般の技術である。(Wikipedia より)
- エレクトロニクスの中でも、電力変換に関わる分野
  - 変圧器(トランス)
  - インダクタ(リアクトル、コイル、チョークコイル、チョッパ)
- 抵抗を用いた電圧・電流調整よりも、損失が少ない
  - 基本的に抵抗における電力消費  $RI^2$  は熱になって失われる

79

## 充電器の出力密度

SiC/GaNの登場により、パワエレ機器の出力密度が上昇している



80

# 車載充電器におけるパワエレの例

トランス

EMI filter (L<sub>CM3</sub>, L<sub>CM4</sub>) FT-3K50T (Behind)

Transformer ML29D

PFC (L<sub>i</sub>) HLM50

EMI filter (L<sub>CM1</sub>, L<sub>CM2</sub>) FT-3K50T

20 mm

112 mm

40 mm

01

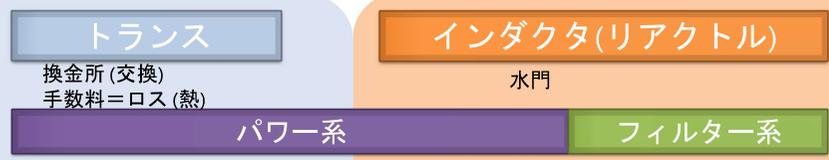
コモンモードチョークコイル アモルファスパウダーコア (インダクタ)

Ref) 日立金属技報 36 (2020) P34. (株)プロテリアル HP: proterial.com/

FINEMET は(株)プロテリアルの登録商標です

# トランスとリアクトル

コイルで発生する電流のリアクションを使う  
 ・電流が連続的にしか変化しない性質を利用 ⊕ 電圧はスイッチのON/OFFで離散的になりうる



回路に流れる交流電流を利用して電力変換 (1次・2次電流の周波数は変わらない)

電氣的絶縁性

スイッチングにより突発的な電気信号等を有限時間をかけて変化させる

コンデンサーと合わせて使うことでスイッチング等で離散的に供給電圧を制御すると電流が有限時間でリアクションを起こし、エネルギーを蓄えたり放出したりする

# 電力変換

トランス

誘導起電力

$$v = - \frac{d\Phi}{dt}$$

磁束が時間変化していれば起電力が発生する

インダクタ: 磁束密度よりも電流に注目  
電流の連続的時間変化を利用

インダクターに蓄えられるエネルギー

$$I = \frac{1}{L} \int v dt$$

$\Delta t$  間のエネルギー

$$v = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \rightarrow v i \cdot \Delta t \rightarrow E_L = \frac{1}{2} L I^2$$

※  $N\Phi = Li$  変形すれば、式としては同じだが、エネルギー蓄積の表現のためあえて

詳しくは(公)日本電気技術者協会 HP などにあります [https://jeea.or.jp/course/contents/01158/index\\_small.html](https://jeea.or.jp/course/contents/01158/index_small.html)

# リアクトル

電圧を比例定数として、時間とともに電流は増減する

$$\Delta I = \frac{1}{L} V \Delta t$$

ループが閉じているとき閉じている時間に比例して電流増 (実際には、Lにも抵抗があり閉じたままだと燃える)

$$\Delta I_{on} = \frac{V_{in} \cdot t_{on}}{L}$$

$$\Delta I_{off} = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot t_{off}}{L}$$

大きなIが流れているところでonが長いと  $\Delta I_{on}$ が増え  
**Lが低下 → 不安定化**

長くonにできるほど  $V_{out}$ は増える

蓄電されたエネルギーが直流電流に乗るとするのが  
 ・直流重量と講演者は理解している

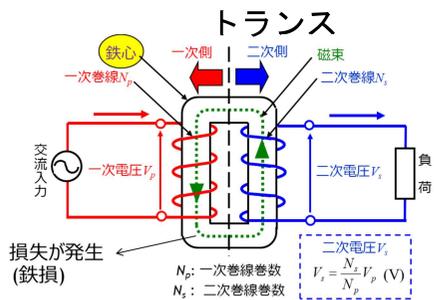
詳しくは: 舞鶴高専・平地研究室技術メモHPなどにあります  
<http://hirachi.cocolog-nifty.com/kh/cat7707054/index.html>

Q (スイッチ) が ONのとき… 青のループ  
 Q がOFFのとき… 赤のループ  
 → Lに蓄えられたエネルギー放出分だけ  $V_{out}$ の電圧は増す

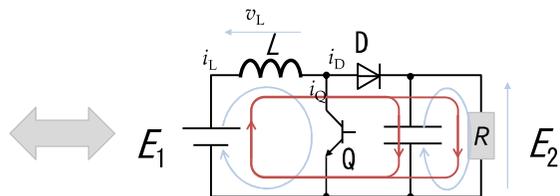
$$\alpha = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad t_{on}: QがONの時間 \quad t_{off}: QがOFFの時間$$

$$V_{out} = \frac{1}{1 - \alpha} V_{in}$$

## トランスとリアクトル



リアクトル (昇圧回路): 直流重畳特性



コイルと鉄心材だけの構成のインダクターを回路の一部として取り入れられる

## 損失の単位

電気回路的考え方 → 電力損失

$$P = V_1 I_1 - V_2 I_2$$

トランスでは、入力電力と出力電力の差が損失に相当

$$VA = W$$

電流を電荷 (C/s) の流れと考えることもできる

磁氣的に考えると → ヒステリシスの内部の面積

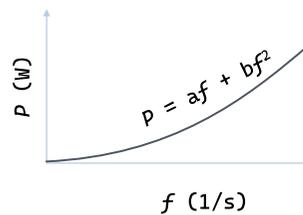
$$E_{\text{mag}} = 1/2 M H$$

エネルギーの単位  $J$

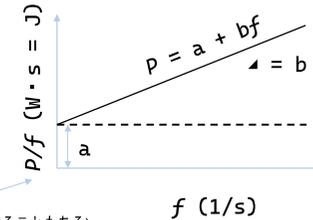
$$W = J/s$$

● 単位時間当たりのエネルギー損失

考え方



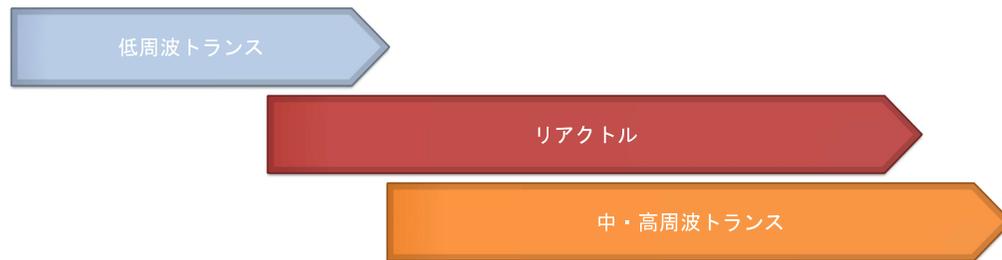
◎ 1 サイクル当たりのエネルギー損失



(これをそのまま  $P$  とすることもある)

## 用途ごとの B-H 曲線の形

## 周波数と各種デバイス



Hz

kHz

MHz

周波数

# 各用途ごとの軟磁性材料に求める要件

優先順位

インダクタ(リアクトル)

トランス

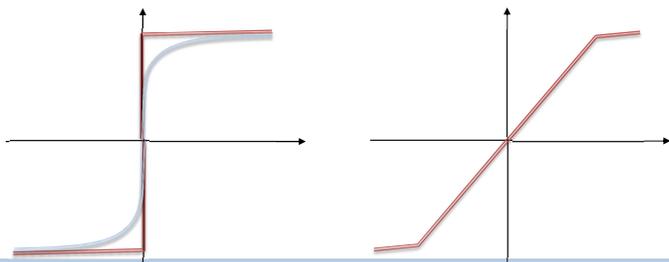
パワー系

フィルター系

- 低ロス
- 高 $B_s$
- 低周波では高透磁率

- 直流重畳特性 = 高 $B_s$
- 線形性 = 透磁率一定
- 低発熱 = 低ロス

- 用途に合わせて様々な特性  
(andではなくorで良い場合あり)
- 高透磁率
  - 高インピーダンス
  - 高 $B_s$

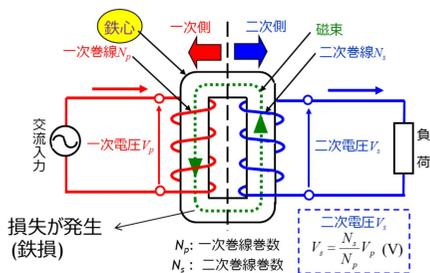


# トランスにおける軟磁性材料



# トランスにおける軟磁性体

- 1次コイルで発生させた磁束を2次コイルに伝える
- 鉄心は磁束を効率良く伝える道の役割
  - 透磁率が高い (磁場vs磁束密度曲線の傾きが急) → 磁場に対する磁束密度の追従性
- 低周波では、特に高透磁率材料が好まれる傾向

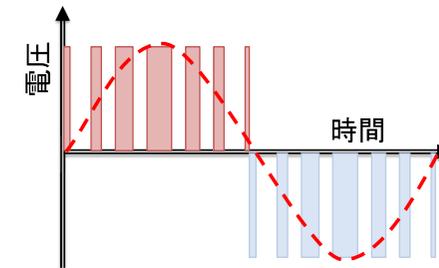


# 入力波の種類

- アナログ的入力... 発電機による電力
  - 発電機により周波数が決まる
- デジタル的入力... PWM (Pulse Width Module) など
  - 太陽光発電などの直流電源から交流を作る
  - 直流電源をスイッチ開閉時間により波形制御
  - 対称性が悪い



軟磁性体に求められる要件が変わってくる



PWMの例

# 配電用変圧器 (アナログ波入力)

中国、インドなどの急速な経済発展  
電力などエネルギー需要増加  
二酸化炭素排出量増加

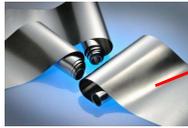
地球規模での気候変動リスク  
(地球温暖化など)



変圧器の高効率・低損失化

変圧器に対してより厳しい規格

鉄損低減



Fe基アモルファス合金薄帯  
ハイグレード方向性電磁鋼帯

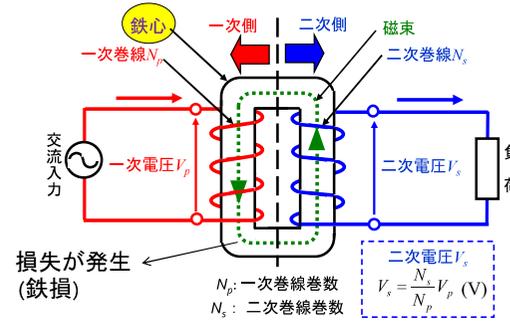
結晶粒が存在しない

電磁鋼板  
よりも低損失

# 変圧器の機能とアモルファス材料に要求される特性

変圧器の機能

電圧変換 (例: 6,600 V → 100 V)  
1次側と2次側を電気的に絶縁



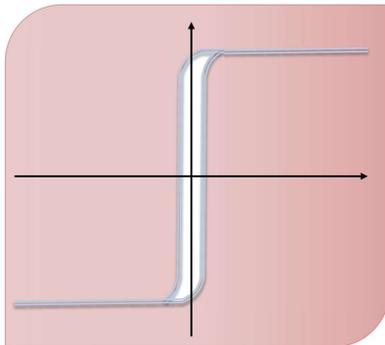
アモルファス鉄心材料への要求特性

- 小型化 → 高飽和磁束密度 ( $B_s$ )
- 高効率化 → 高占積率
- 低騒音 → 低鉄損
- 低励磁電力 (飽和性良)

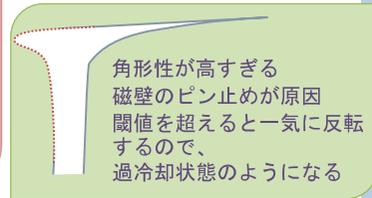
# 低周波トランスにおける軟磁性体の B-H

- 角形性が高い
- 磁壁移動の磁化反転の割合が高い
- 飽和性が良い
- $H_c$ が低い
- $B_s$ が高い

磁壁移動の妨げにしなければ、  
磁気異方性や磁歪は許容される



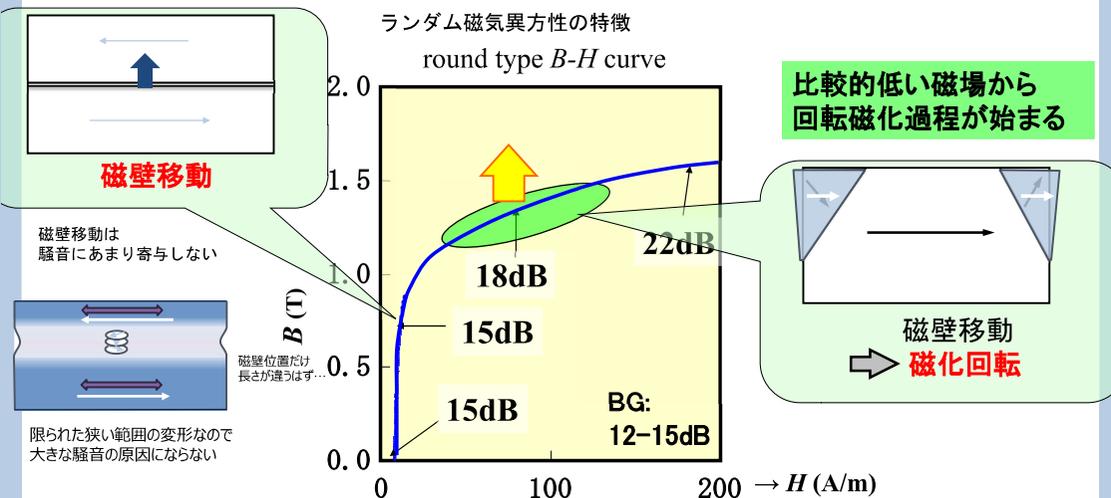
こんな B-H ループは嫌だ



# 配電用トランス用 Fe基アモルファス合金の課題 ~ 騒音

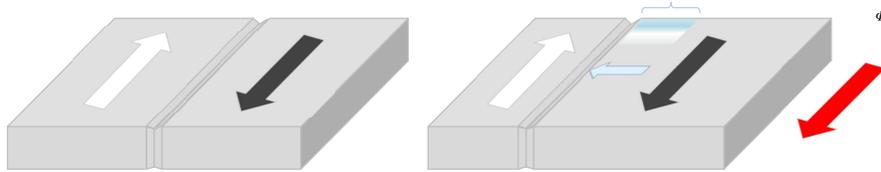
ランダム磁気異方性の特徴

round type B-H curve



# 180° 磁壁の場合

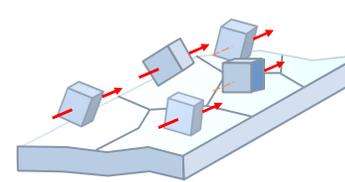
磁壁が  $\Delta x$  動くと、増えた  $\Delta x\phi$  と減った  $-\Delta x\phi$  の  $2\Delta x\phi$  だけ磁束が増える  
φは単位長さあたりの磁束



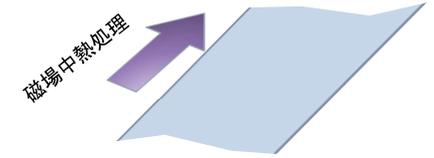
- 180° 磁壁の場合
    - 厳密には、磁壁部分だけ磁歪が相殺されている
    - 磁壁が移動に合わせて、くぼみが動くが全体の長さ変化はほとんど起きない
    - コア全体が収縮するわけではないので振動がほとんど発生しない
  - 同様の概念は方向性電磁厚板でも用いられている
    - 磁歪やそれに伴う応力誘起の異方性とうまく付き合う方法
    - 180° 磁壁がスムーズにさえ動いてくれば、問題ない
- ☞ 引っ掛かり(ピン止め)が起きると良くない

# 高角形 B-H ループ材料

- あえて異方性を与えて 180° 磁壁を安定化
- 磁壁移動の妨げ(粒界、不純物、欠陥)を排除

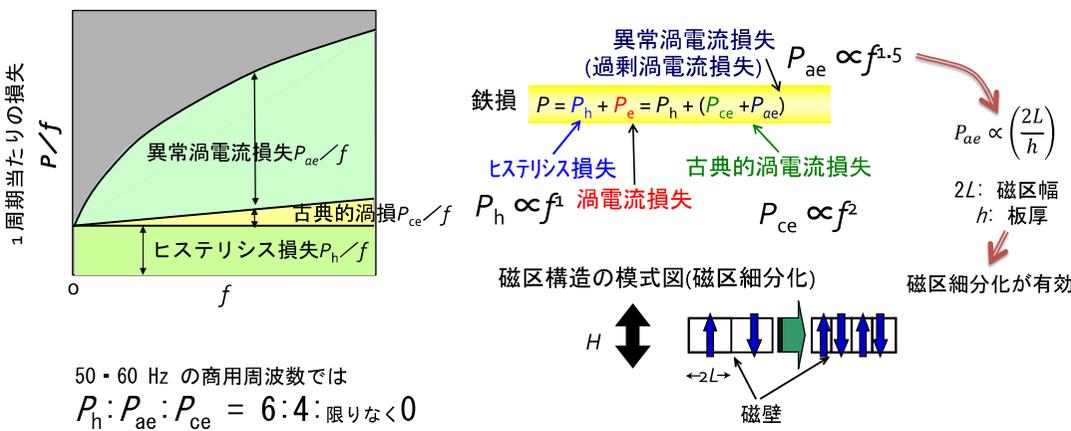


方向性電磁鋼板の例  
 • 圧延等により、結晶粒の方向を揃える  
 • 熱処理により、結晶粒を大きくする



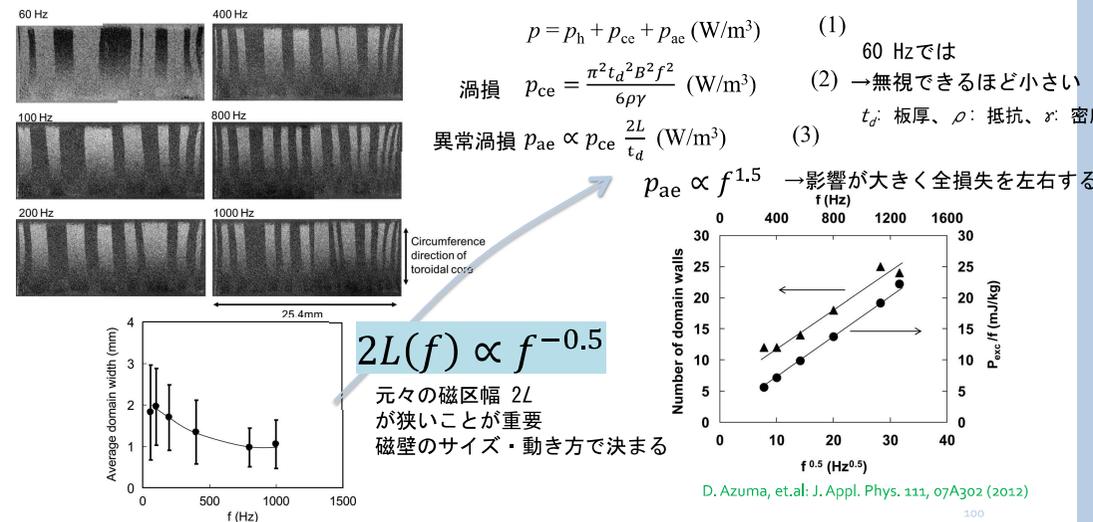
Fe基アモルファスリボンの例  
 • キュリー温度  $T_C$  以下で磁場中熱処理  
 • 熱緩和により原子が動きやすくなる  
 • 磁場中でひずみが小さくなるように再配列

# 高角形軟磁性体の鉄損の課題と磁区細分化効果



出典:T. Sato, et. al: IEEE Trans. Magn. MAG-14 (1978) 350.

# 磁区細分化と異常渦損



## 高角形の軟磁性材料は異常渦損が増えやすい

- 1 kHz以上程度で、異常渦損が主となる
- 数十kHz 以上では、磁壁の枚数も増えなくなり、鉄損爆増

このままではパワーエレクトロニクス応用には使いにくい

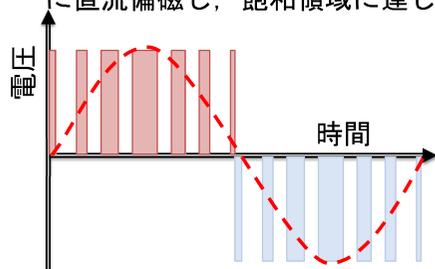
同じ材料でも、処理方法を変えれば磁場に平行な磁壁移動による磁化反転を抑え異常渦損の発生を抑制できる

101

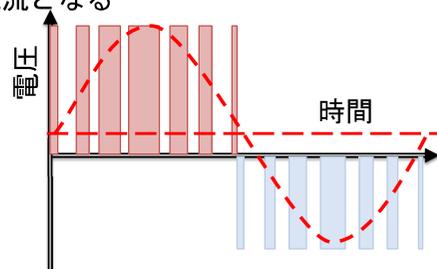
## 直流電源から作られる交流デジタル波形のトランスにおける軟磁性材料

## デジタル波電源のトランス

- 入力電圧曲線の対称性が低いので偏磁が起きやすい
- 自励式交直変換器は電圧源として作用するために、出力電圧の正負のアンバランスが生じ、直流成分が発生すると、変換器用変圧器が急速に直流偏磁し、飽和領域に達して、過電流となる



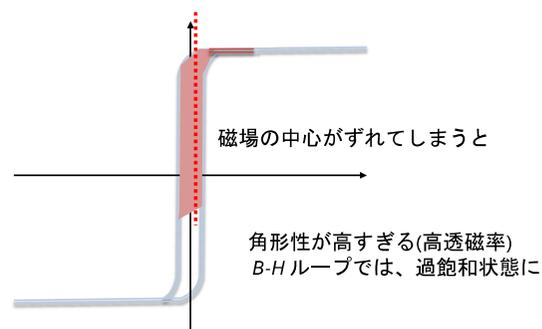
理想のPWMの例



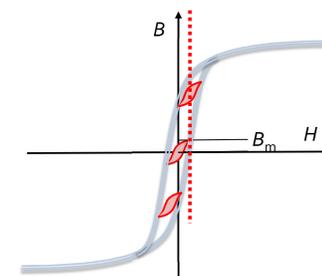
アンバランスがあるPWMの例

103

## 偏磁の影響



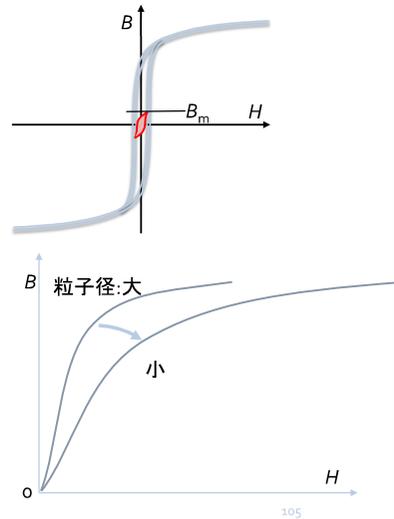
- これを避けるには
- ✓ 透磁率を低くする
  - ✓ 磁場の振り幅を小さくする



104

## デジタル電源のトランスの B-H 曲線の傾向

- 低損失・低発熱が最重要
- 低ヒステリシス
- 高周波の場合、低渦損はさらに重要
  - パウダーを使用する
  - 結果的に反磁場が強くなる
- B-H が少し寝る
- $B_s$  にはそこまでこだわらない
- 周波数を上げて、出力密度を上げる
- 磁歪による振動・騒音への対処
  - 低磁歪材を使う
  - 可聴域を外す



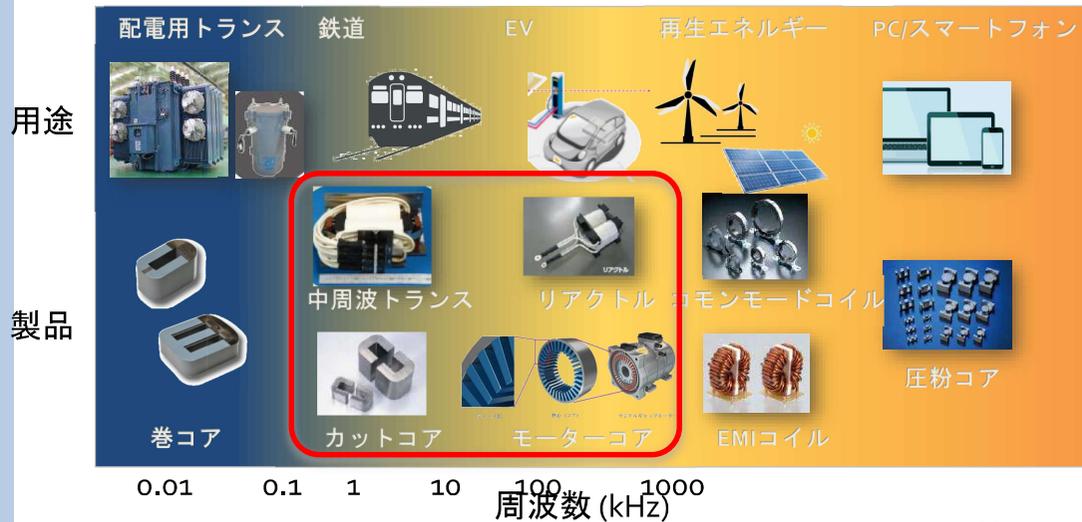
磁壁移動を利用した高透磁率コアよりも  
回転磁化過程が主のコアの方が使いやすい

105

## インダクター リアクトルにおける軟磁性材料



## 応用分野（中周波領域）



写真：日立金属(株) 製品カタログ (2015)

107

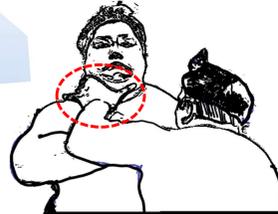
## リアクトル

- Reactor → リアクションするもの
- スイッチングによる離散的電圧変化に対して磁束・電流が連続的にリアクションを起こす
  - 磁束が入ってこようとすると、その動きを妨げる
  - 外部磁場がなくなれば、磁場を維持し続けようとする
- デバイスとしてはインダクタを含む回路
- 動作としてはチョッパ、チョーク
  - Chopper: 細切れに切り刻む
  - Choke: 喉を詰まらせる

108

## リアクトルにおける軟磁性材料

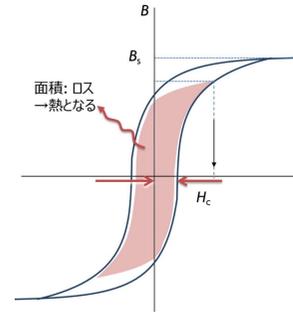
- インダクタを構成するコイルは、直流電流を通し、交流電流の変動を妨げるように作用
  - (コンデンサは、逆 直流×、交流○)
- コイルは、電流の変動を妨げるように磁束を発生
- コイルの流れをふさぐ・詰まらせる こと = choke でエネルギーを蓄える
  - チョークコイル
- チョークコイルにも軟磁性体が使われる
  - 磁力の道の役割よりも、磁束を集めるスポンジの役割
  - $B_s$ が高い方が多くのエネルギーを蓄えられる
  - かつてはロスを気にしていなかったようだが...
    - ⇒ コアの発熱を抑える上では非常に重要
    - ⇒ 発熱を抑えるため、出力を抑えるとデバイス大型化



相撲 のど輪

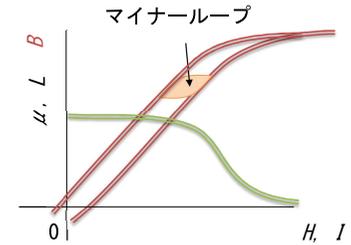
## トランスとリアクトルのB-Hループの使い方

トランスのB-H曲線の使い方



原点付近を使う

リアクトルのB-H曲線の使い方



磁気飽和しにくく、 $\mu$ が高Hまで一定

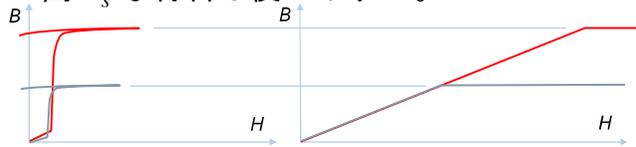
## インダクタにおける軟磁性材料

- 軟磁性体は、周囲の磁束を吸い寄せ(スポンジのように)
- コイルの働き = インダクタンス:  $L$

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A_e}{l_e}$$

- 透磁率  $\mu$ 、コイル巻き数の2乗  $N^2$ 、断面積  $A_e$  に比例、
- 磁路長  $l_e$  に反比例

- 高  $B_s$  な材料は使いやすい。



ギャップや形状で  $\mu$  を調整した場合  
高  $B_s$  材の方が広い範囲で  $\mu$  が一定

## 大きなエネルギー蓄積には高 $B_s$ 低 $\mu_r$

$$E_L = \frac{1}{2} LI^2$$

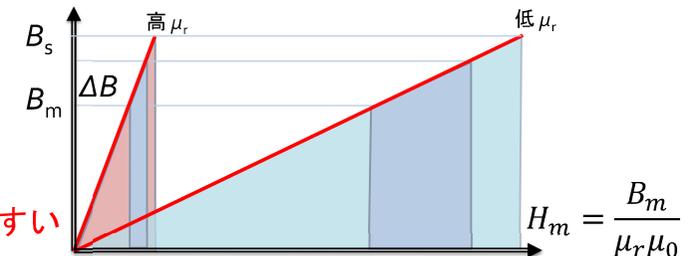
$$I_m = \frac{H_m l_e}{N}$$

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \mu_0}$$

$$\therefore B_m = \mu_r \mu_0 H_m$$

$$E_{Lm} = \frac{1}{2} \frac{B_m^2 A_e l_e}{\mu_r \mu_0 N^2}$$

$$\therefore L = \frac{A_e}{l_e} \mu_r \mu_0 N^2$$

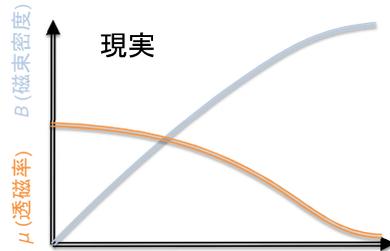
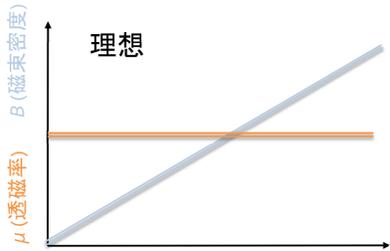


寝たB-Hループが使いやすい

## リアクトルに向けた B-H 曲線

- 電流が流れても飽和しにくい(低透磁率)
- リニアリティーが高い

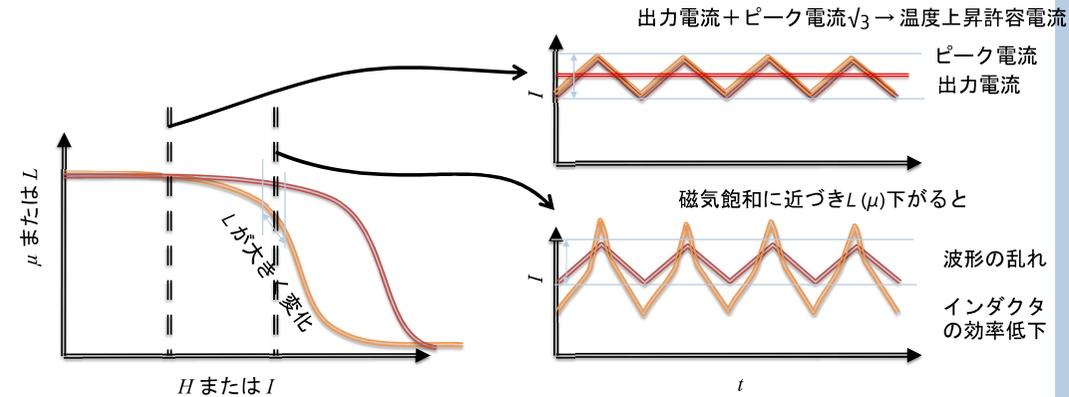
リニアリティーが低下する  
分散ギャップの影響  
磁気応和飽和しにくい成分の存在  
磁気飽和しても電流は流れ続けるので  
コイル・回路の発熱→故障→発火



113

## 実際の B-H 曲線の例

- 飽和磁束密度  $B_s$  が高い→大電流 OK



114

## 磁気飽和をコントロール

$$L(H) = \frac{\mu_0 A_e N^2}{l_e} \mu_r(H)$$

インダクタンス  $L$  は透磁率  $\mu$  に比例  
 $\mu$  は磁場 ( $H$ ) や電流 ( $I$ ) の関数  
→ 磁気飽和に近づけば低くなる

磁気飽和をコントロールするには

- 高い  $B_s$  の材料を使う
- 材料を変えて  $\mu$  を変える
- 材料の形態 (巻磁心、圧粉磁心など) を変えて、 $\mu$  を変える
- 断面積や磁路長または、コイルの巻き数を変える



$B_s$  が低くても面積を大きくすれば対応はできる

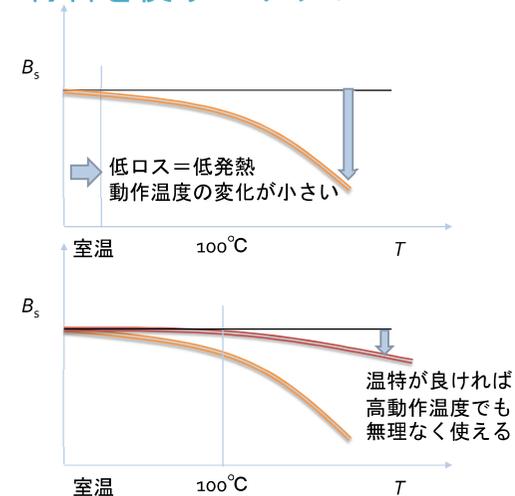
- 断面積を大きくする→コアの大型化
  - 断面積が増えると、コイルの長さが長くなりジュール発熱が増える
  - $l_e$  が短くなると、内外径の差が大きくなり、磁気飽和に内外の差が現れる→ $L$  がだんだら変化

115

## 低ロス材料・温度特性の良い材料を使うメリット

- 一般的な強磁性体
  - 温度上昇とともに  $B_s$  低下
  - 自己発熱が大→特性劣化
  - $T_c$  が低い場合→効率低下→悪循環
- 低ロス=高効率で有利
  - 消費電力が少ない
  - 発熱が少ない
  - 温度上昇しにくい
- 温度特性
  - 温度による変化率の低さ
  - 温度が上がっても性能劣化少ない
  - $T_c$  が高い方が有利 (メタル結晶系有利)

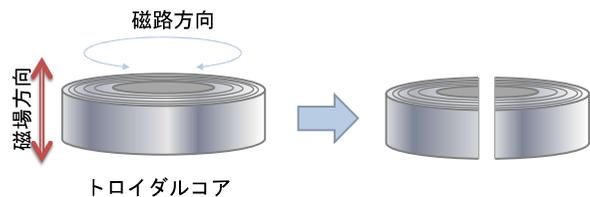
インダクタ: 発熱量が大きいデバイス



116

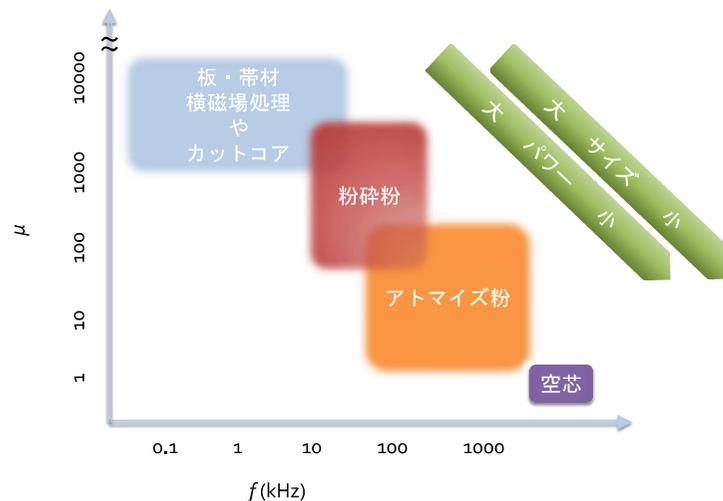
## B-H 曲線を寝かせる(低透磁率化)の方法

- 磁路方向に対して、垂直方向に誘導磁気異方性や応力誘起異方性をつける(透磁率 4桁程度)
- コアをカットして、ギャップを設ける(高透磁率箇所と低透磁率箇所を混ぜる)(透磁率 3~4桁)
- 粉末や粉碎粉などを用いて、ギャップを分散させる(透磁率 1~3桁)



117

## 材料形態のコアの透磁率と周波数の関係

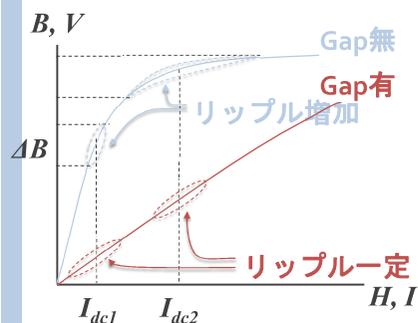


118

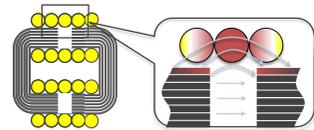
## これからのインダクタに求められる特性

変換器の高出力密度化に伴い、インダクタの大電流、高周波対応が求められており、フリッジング損が発生しづらい分散Gap型の圧粉鉄心のニーズが増加している

### ●チョークコイルの動作

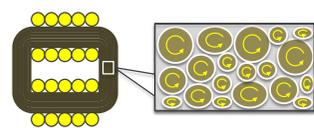


### 薄板カットコア



- Gap導入で低透磁率化
- Gap近傍のコイルと、コア側壁でフリッジング損(渦電流損)発生

### 圧粉磁心

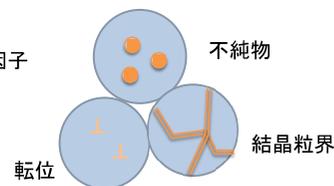


- 分散Gapによる低透磁率化
- 極微小Gapのため、フリッジング損を抑制可能

119

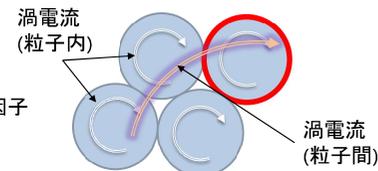
## パウダー材料の特徴

ヒステリシス損失増加因子



- 粒子内に不純物があると、磁化反転の妨げになりやすい
- 転位や結晶粒界では磁壁がピン止めされやすい
- 原料・素材の製造工程に大きく依存する

渦電流損失増加因子



- 粒内の渦電流は、素材の抵抗率を低く
- 粒子のサイズ(磁束が通る断面積)を小さく
- 絶縁皮膜を付けて、粒子間に渡る電流を抑制する

参考にさせていただいた情報: 神戸製鋼技報 65 No.2 (2015)

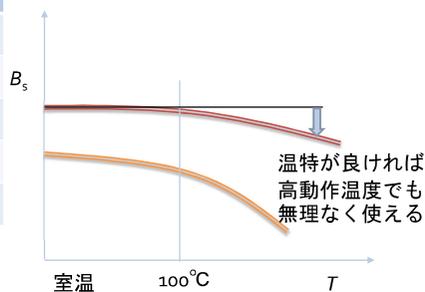
120

## メタルコアとフェライトコアのすみわけ

メタルコア: 金属粉末をバインダーとともに固めたコア

フェライトコア: フェライト粉末を焼結で固めたコア

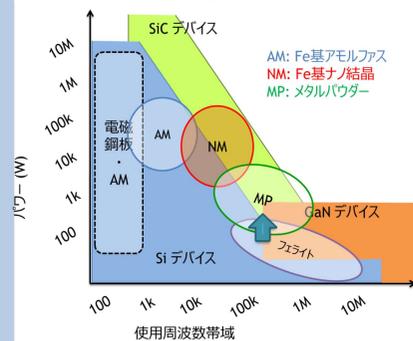
	フェライト	メタルコア
透磁率	◎	○
飽和磁束密度	△	○
直流重畳特性	△	○
温度特性	△	○
小型化	○	◎



参考にさせていただいた情報源: TDK(株) HP: <https://www.tdk.com/ja/tech-mag/core-technologies/12>

121

## パワーと周波数からみた推移



- パワー半導体 SiC, GaN の汎用化
- 高パワー密度化加速
- 中周波数領域: リアクトル、トランス
- 高周波数領域: パワー系はメタルパウダー  
高周波でも、GaN の汎用化により  
直流重畳させるデバイスも出始めている

	用途・目的	メリット	デメリット
Fe・Fe-Si	ノイズ対策	◎価格	高周波特性
センダスト	スイッチング電源	○高周波特性 ◎直流重畳特性	加工性 (硬く脆い)
パーマロイ	高周波回路の小型化	◎高透磁率	高価
Fe基アモルファス	高周波回路の小型化	◎低損失	高価
ナノ結晶合金	高周波回路の小型化	◎低損失	高価 熱処理

情報源: [engineer-education.com](http://engineer-education.com)

大まかな傾向



高透磁率と低損失はトレードオフ関係→材料の軟磁気特性で補う

122

## 粉末に使われる代表的なメタル系軟磁性材料 (注意: 表は粉末の数値ではない)

材料	代表組成 (%)	比初透磁率 $\mu_i$	$B_s$		特徴
			T	A/m	
PBパーマロイ	Fe-(40~50%)Ni	5,000	1.5	4.0	磁化が大
PCパーマロイ	Fe-(70~80%)Ni	60,000	1.1	0.8	透磁率が高
スーパーマロイ	Fe-79%Ni-5%V	1,000,000	0.8	0.2	透磁率が最高
センダスト	Fe-5%Al-10%Si	30,000	1.0	1.6	硬い、耐摩耗性
パーメンジュール	Fe-49%Co-2%V	1,250	2.4	16.0	磁化が最大
Fe基アモルファス	Fe <sub>78</sub> Si <sub>9</sub> B <sub>13</sub> (at. %)	5,000	1.56	1.7	低損失

情報源: <https://engineer-education.com/high-permeability-material/>

123

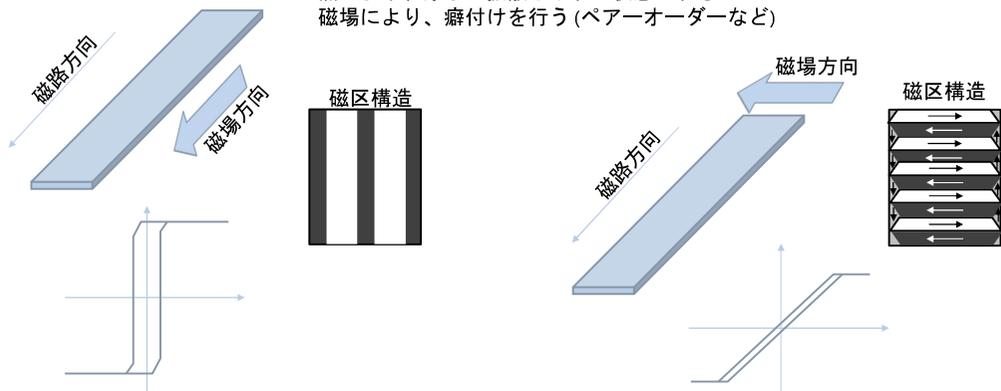
## B-H ループの形状の制御

## 材料で行えるB-Hループ制御～誘導磁気異方性

### 磁場中熱処理

結晶磁気異方性が正の場合

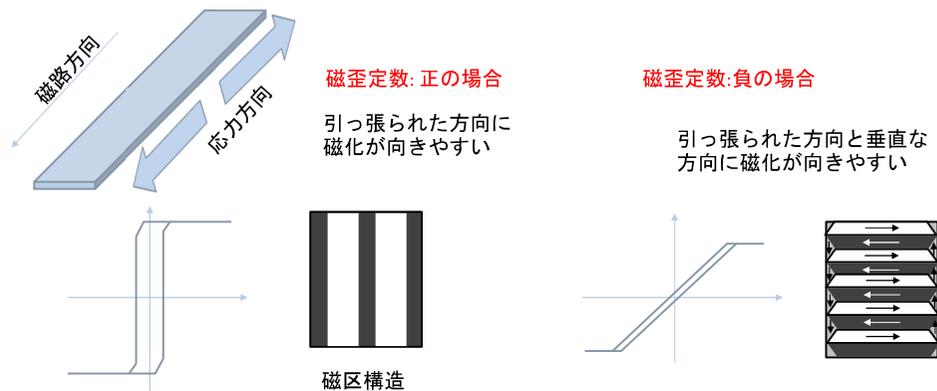
熱により、原子が拡散しやすい状態にする  
磁場により、癖付けを行う(ペアーオーダーなど)



125

## 材料で行えるB-Hループ制御～応力誘起磁気異方性

### 応力中熱処理 (応力誘起磁気異方性)



磁歪定数: 正の場合

引っ張られた方向に  
磁化が向きやすい

磁歪定数: 負の場合

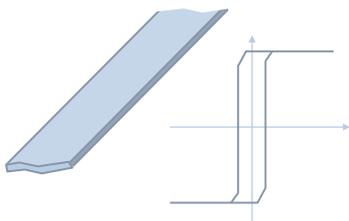
引っ張られた方向と垂直な  
方向に磁化が向きやすい

磁区構造

126

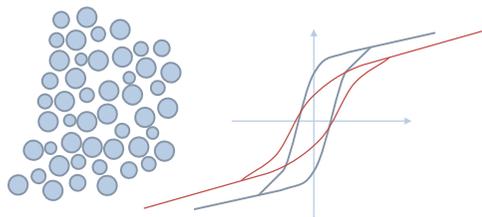
## 材料で行えるB-Hループ制御～形状の影響

### 板状・帯状連続体



透磁率が高く、エアギャップが少ないので  
低ヒステリシスロスになりやすい  
抵抗が低く、渦電流ロスは増えやすい

### 粉体・ダスト



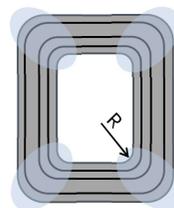
反磁場の影響で透磁率が低く、  
小粒径ほどエアギャップが多く  
高ヒステリシスロスになりやすい  
抵抗が高く、渦電流ロスは抑えられる

127

## コアの形状と B-H 曲線

磁歪が大きい材料では特に注意が必要!

カットコアでもトロイダルコアでも、最小曲率Rが小さいと  
B-H曲線は飽和しにくくなる



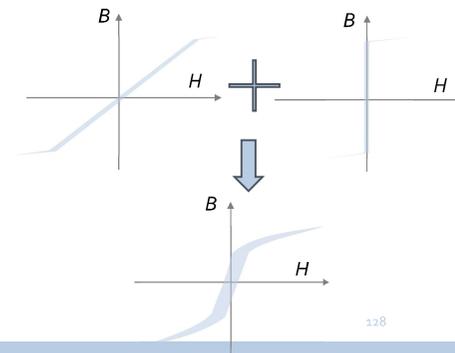
中立線の内側で圧縮、外側で引張の応力が発生



コアの厚みがあると  
内周と外周で磁場が異なる

$$H = \frac{ni}{l}$$

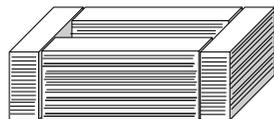
同じ電流なら磁路が短い内側の方が磁場が高くなる



128

## 曲率対策

- ひずみ取り熱処理を行う
- 低磁歪材料に変更する
- パウダーを使う
- ブロックを組合わせたコアを使う

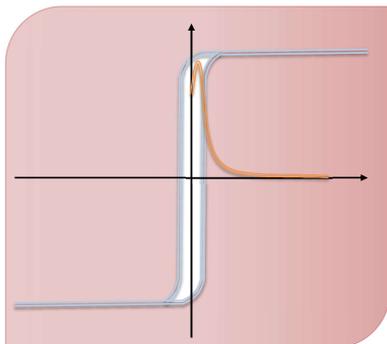
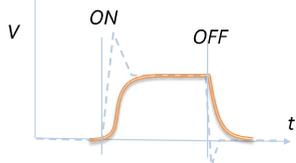


129

## パワエレ周辺のインダクタ

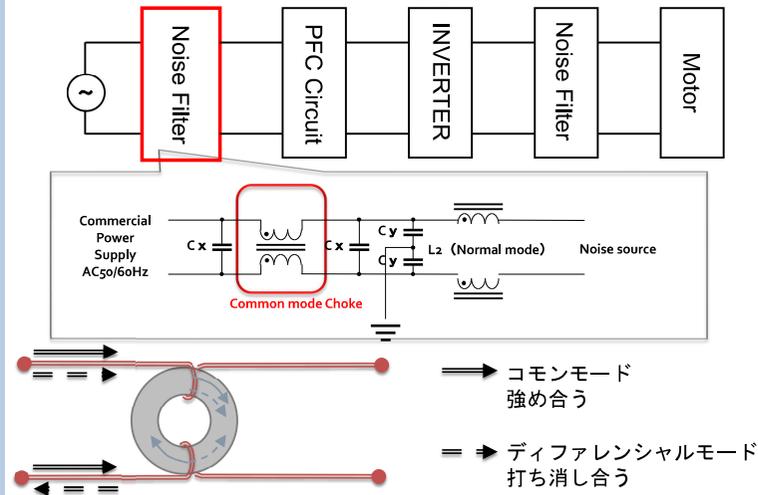
## 過飽和リアクトル

- 高周波並みの入力でも高角形  $B-H$  ループの出番はある
- スイッチ投入時など急激に電圧が変わる際など、高い  $L$  が抵抗になり、電圧上昇を和らげる
- スパークの防止など
- 入力直後は、誘導起電力の式に従い、緩やかに増加、 $B-H$  曲線が飽和すると、コイルは導線のように振舞う



131

## 「ファインメット®」コモンモードチョーク&コア



プロテリアル 提供資料 カタログ、HP より

Page 24

## まとめ

### アプリケーションと $B$ - $H$ ループの形

ループ	透磁率	周波数	磁化反転過程	アプリケーション	留意点
高角形	高	低	磁壁移動	トランス	異常渦損
ラウンド	中	中→高	磁壁+磁化回転	トランス	古典渦損対策
寝ている	低	中→高	磁化回転	リアクトル	

#### 材質由来

##### 磁気異方性

##### 結晶磁気異方性

飽和磁歪定数応力誘起の異方性(磁気弾性特性)

#### 材料由来

形状の影響(反磁場の影響)

133

## まとめ

- 軟磁性材料の軟磁気特性は絶妙なバランスの上で成り立っている
  - 組成、構造、熱履歴(熱処理・冷却条件)
- $B_s$  は基本的に Fe の含有量(重量)が高いほど高い(一部例外あり)
- Fe は磁気と体積の関連が強い
  - ひずみや応力には十分注意する必要がある
- 軟磁気特性(磁化の磁場追従性)には、等方的構造が有効
  - アモルファス相やナノ結晶相のようなランダム構造
  - 規則度が少し低下した構造
  - 各方位に対して近いエネルギー状態となる構造

134

## 材料選択のポイント

- 目的は何か(優先順位)
  - 小型化
  - 高効率化
  - トランス、インバータ、フィルター
- 仕様を定める  
入出力、サイズ  
⇒ 電流( $B_s$ )、コアロス、 $\mu$ 、周波数 など
- 使用環境
  - 高温になる または 温度上昇を抑える必要がある
    - キュリー温度
    - 温度特性
    - 低ロス→低発熱
  - 大きな力が加わる可能性がある
    - 低磁歪
- 譲歩できそうな項目はあるか
  - 大きさ、振動・騒音、温特、ロス・温度上昇、コスト

135

## 材料取り扱いのポイント

- 磁歪が大きめの材料でも使える可能性がある
  - 加工の順番を工夫する → 完成に近い状況でひずみ取り焼鈍
  - 磁気異方性のコントロールにひずみを使う
- 熱処理によって、 $B$ - $H$  ループの形状を変えられる可能性がある
- 磁路にエアギャップを入れれば透磁率を下げるができるが、入れ方次第ではロスが大幅に増大する
  - 分散ギャップ
  - 粉末粒径調整(粉末が小さいほど、透磁率は下がる)
  - 複合材質(例えば、アモルファス粉末+カルボニル鉄粉)
- 既存の製造工程に新材料を載せる場合には工程の制約上性能を犠牲にせざる得ない状況があるが、材料メーカーとデバイスメーカーが協力することで改善できる可能性があり、限られた材料の選択肢から最大限の特性を効果を出すには、メーカー間の連携が必要になる

136