

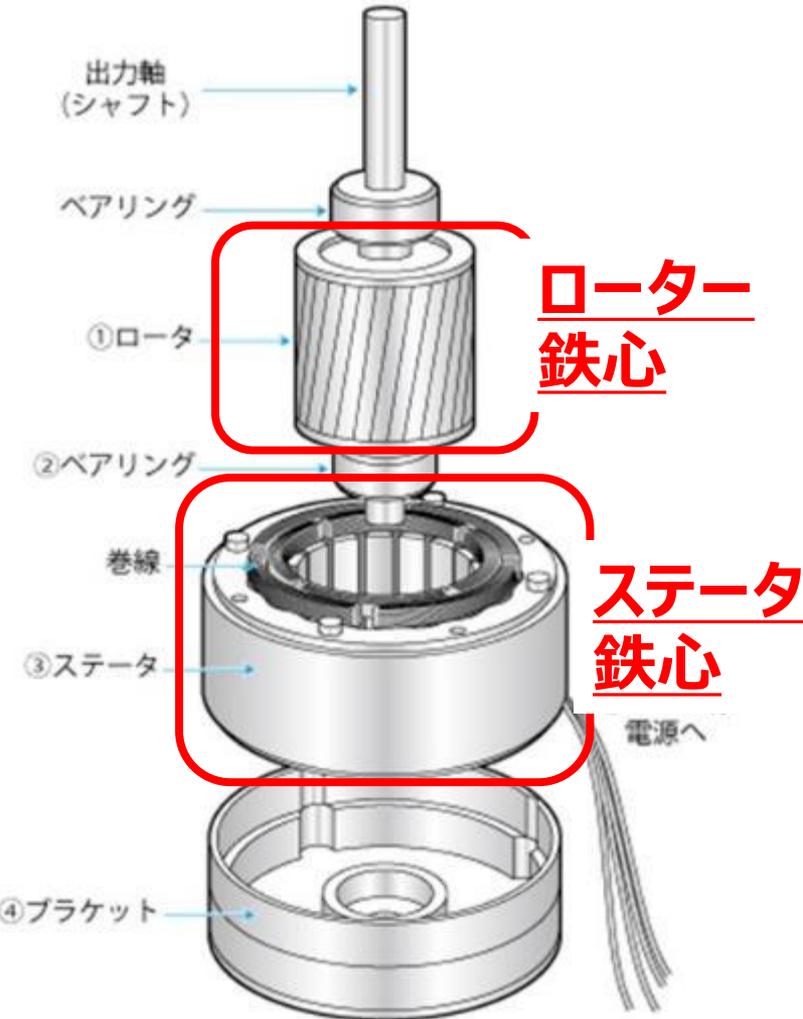
モーターやリアクトルなどの電磁気応用製品用鉄心への応用を指向した  
磁化容易軸を配向した磁気特性に優れる軟磁性鉄粉

九州工業大学 大学院 工学研究院  
物質工学専攻 マテリアル工学コース  
准教授 本塚 智

# 背景

# 研究開発テーマの概要

## モーターの構造



## 鉄心が支配するモータ特性と各鉄心材料の得失

	エネルギー変換損失		出力密度
	ヒステリシス損特性	渦電流損特性	磁束密度
従来技術1 <b>電磁鋼板</b>	○	×	○
従来技術2 <b>純鉄粉末</b>	×	○	△
開発中 <b>ナノ結晶合金</b>	◎	○	○

現状の材料：得意不得意を持つ

### 提案する技術

**金属粉末の結晶方位の制御技術(世界初)**

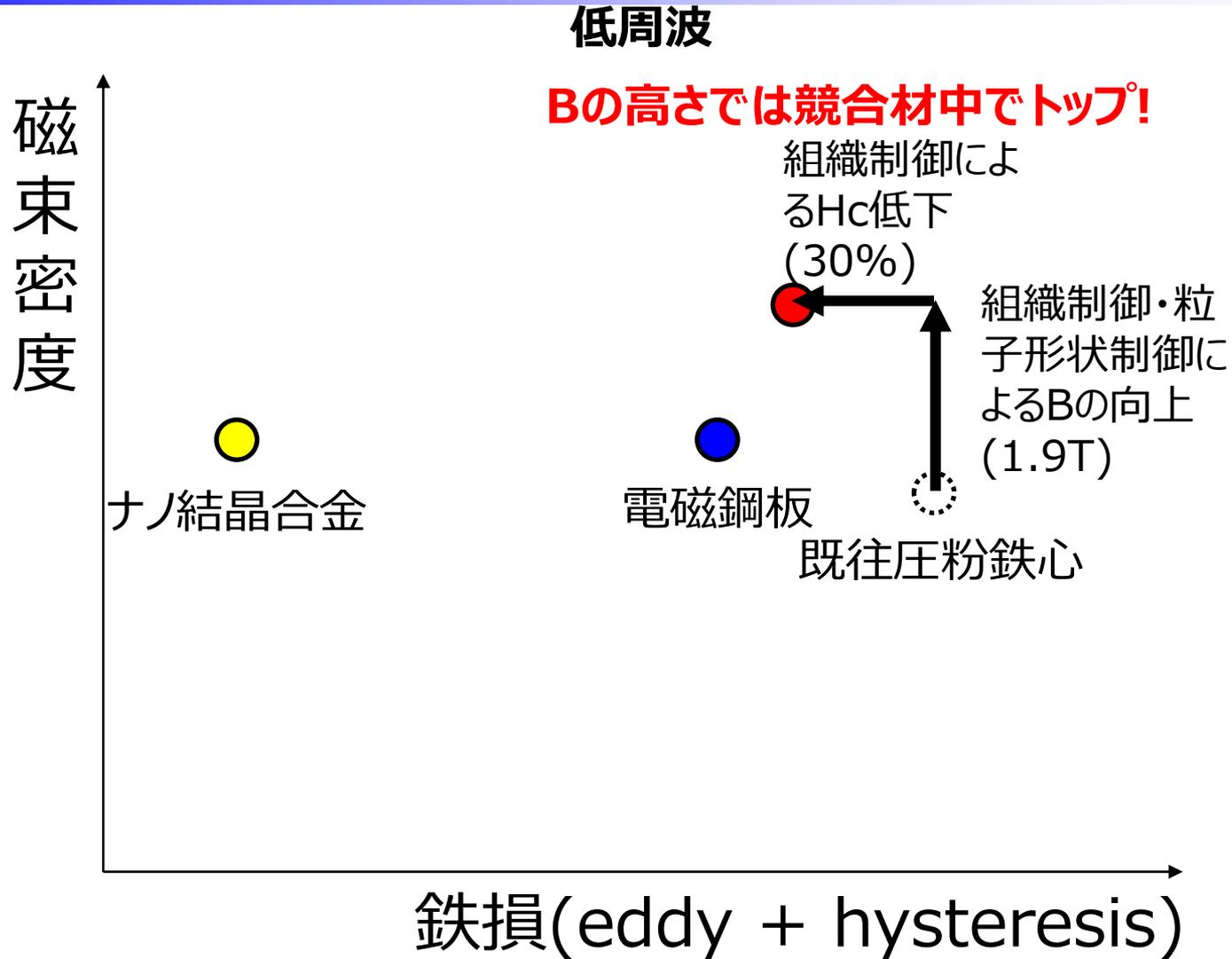
### 本研究開発の目的

全特性に優れる低損失かつ  
高磁束密度の鉄粉末を創出

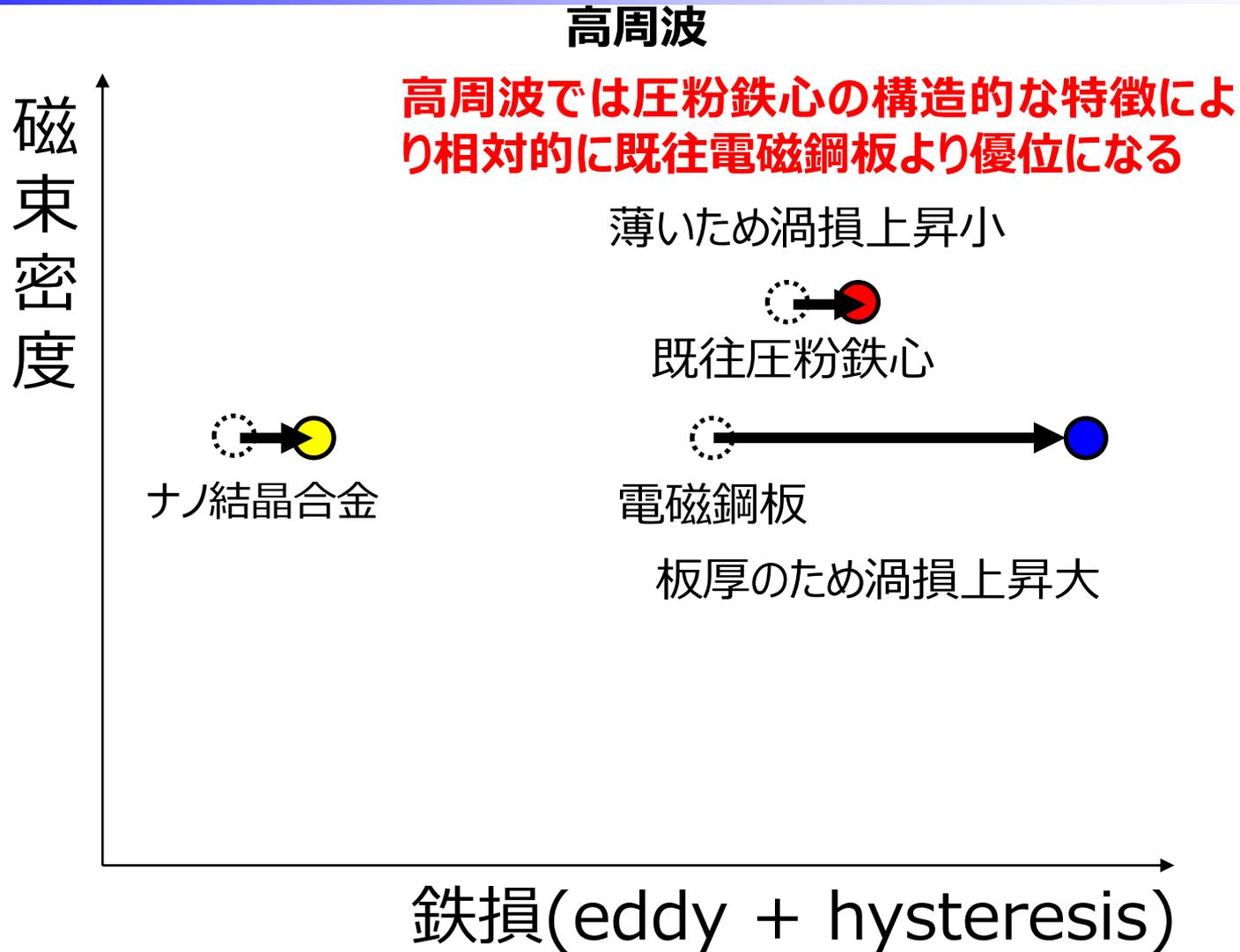
<b>RQ</b> <b>純鉄粉末</b>	○	○	◎
--------------------------	---	---	---

革新技術

# 本材料の立ち位置



# 本材料の立ち位置



# 磁化容易軸を配向させた軟磁性鉄粉の特徴

2:00

# 電磁鋼板の特徴

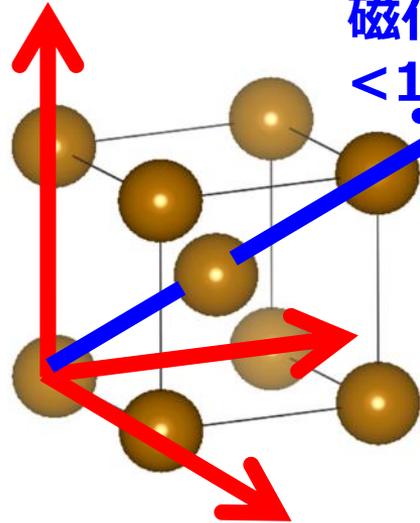
## 鉄の結晶の磁気異方性

磁化容易軸

$\langle 001 \rangle$

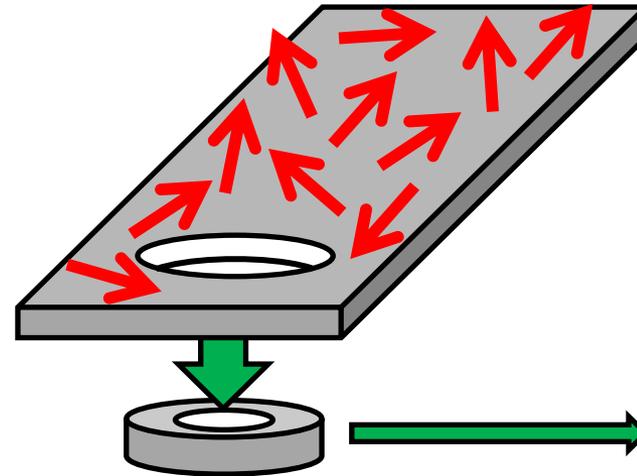
磁化困難軸

$\langle 111 \rangle$



鉄は結晶の $\langle 001 \rangle$ 方向に磁化し易く、 $\langle 111 \rangle$ 方向に磁化し難い

## 無方向性電磁鋼板



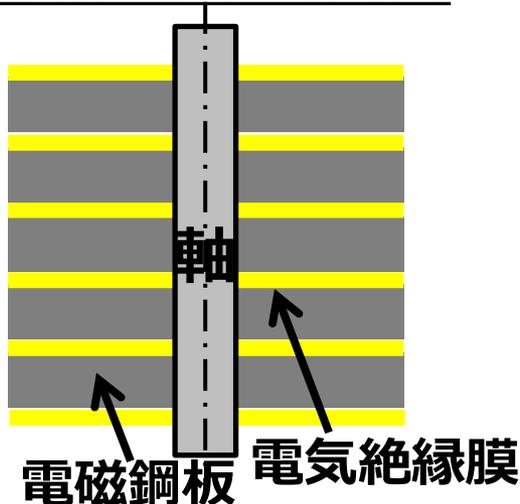
打抜いて積層し、積層鉄心化

- ・磁化容易軸をランダム化
- ・Si添加でヒステリシス損低減

低ヒステリシス損  
相対的に高うず電流損

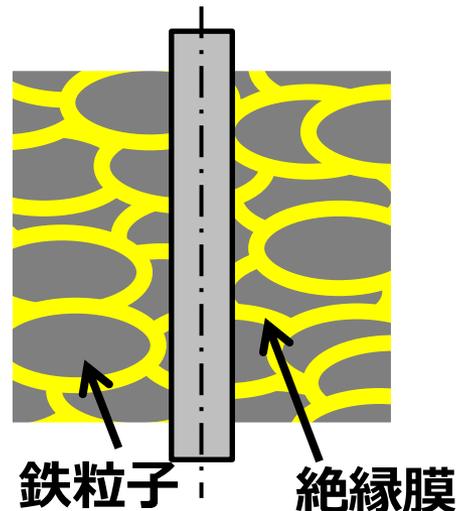
# 圧粉鉄心(純鉄粒子)の特徴

電磁鋼板製  
積層鉄心の断面図



**渦電流**  
導体を絶縁層で細分化  
するほど低下

圧粉鉄心の断面図



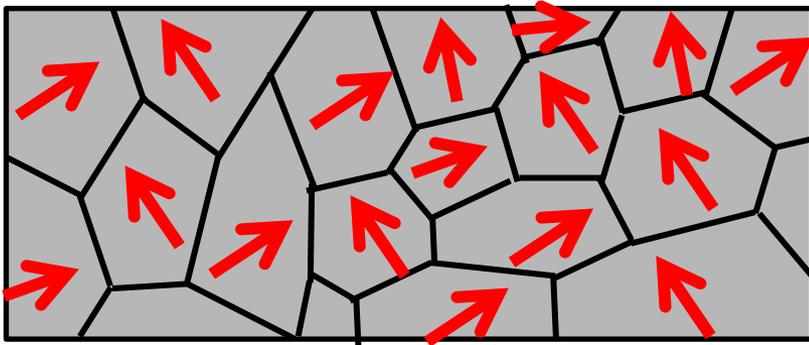
**圧粉鉄心**  
絶縁膜を被覆した鉄粒子を圧縮  
導体をより細分化し低渦電流損

低うず電流損

相対的に高ヒステリシス損(Si添加不可のため)

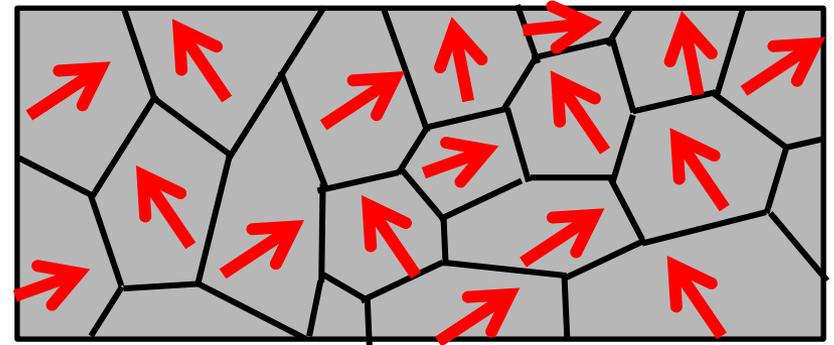
# 理想の電磁鋼板

## 実用されている電磁鋼板 (無方向性電磁鋼板)



- ・磁化容易軸の向きが完全なランダム

## 理想の電磁鋼板

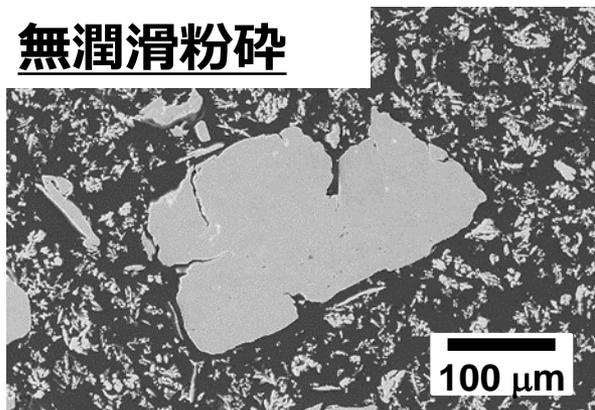


- ・上から見ると磁化容易軸はランダム
- ・横から断面をみると磁化容易軸の向きは面内に配向  
→無方向性電磁鋼板比で3割鉄損が下がることはわかっているが、プロセス上の課題のため実用化されていない。

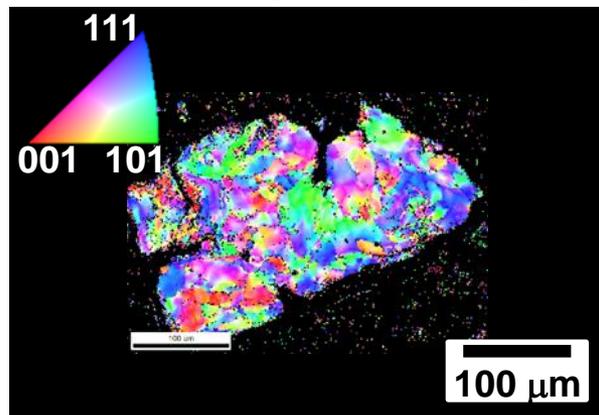
# 研究グループの独自技術

SEM

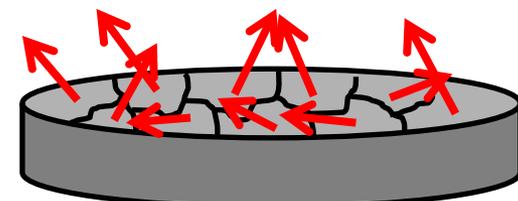
無潤滑粉碎



方位マップ(EBSD,ND)

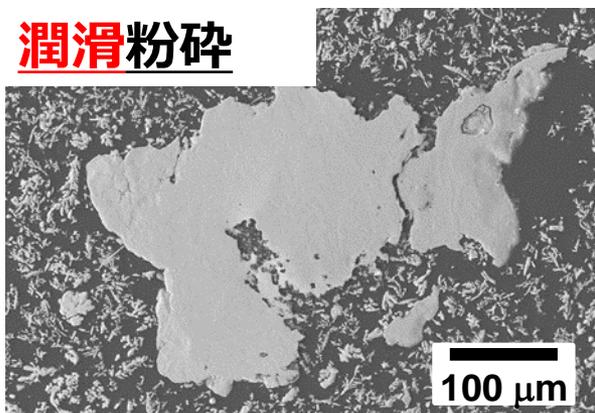


扁平鉄粒子中の  
001の配向イメージ

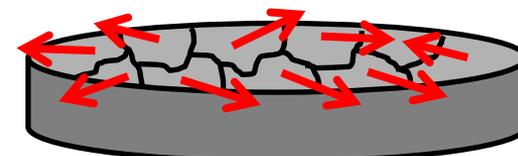
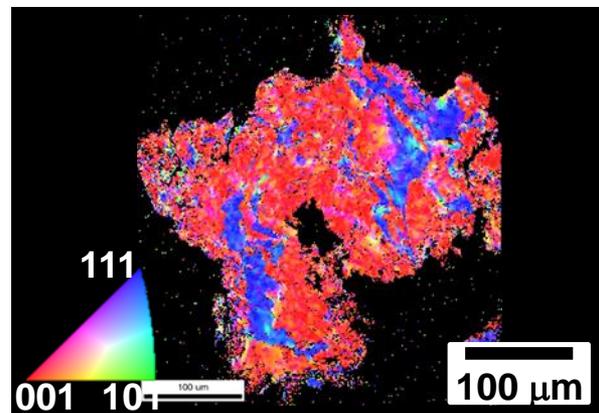


磁化容易軸<001>は  
ランダム

潤滑粉碎



※周辺の微粉：導電性埋め込み樹脂中の銅粉



磁化容易軸<001>は  
偏平面内でランダム



ランダムキューブ組織  
({001}繊維集合組織)

潤滑粉碎により理想の電磁鋼板と同じ組織(ランダムキューブ(RQ)組織)を形成

S. Motozuka, H. Sato, M. Morinaga et al., Powder technol., 321, 9-12, (2017).

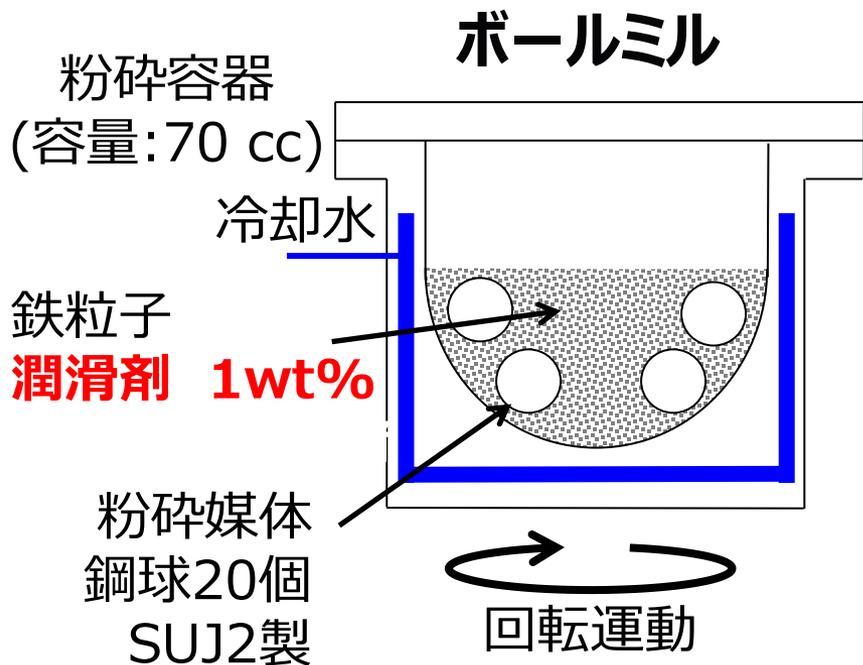
# 磁化容易軸を制御した 鉄粉の製造工程と磁気特性

5:00

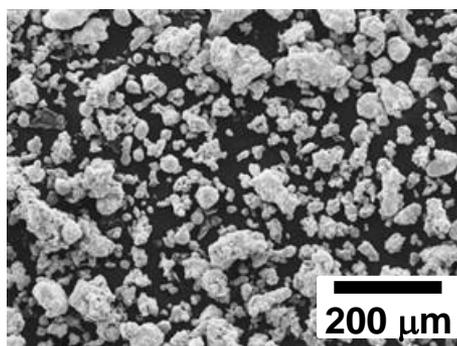
# 潤滑下のボールミル粉碎による ランダムキューブ(RQ)組織の形成

## 作製方法

## 材料

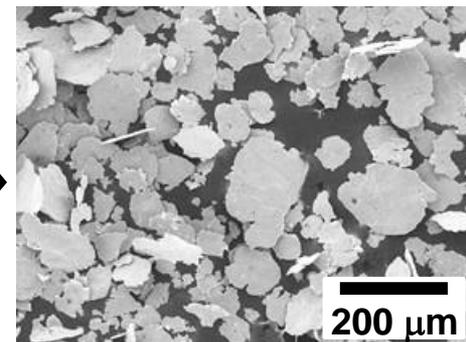


粉碎前



神戸製鋼所製  
アトメル300M  
(純鉄粒子)

粉碎後



扁平化された鉄粒子

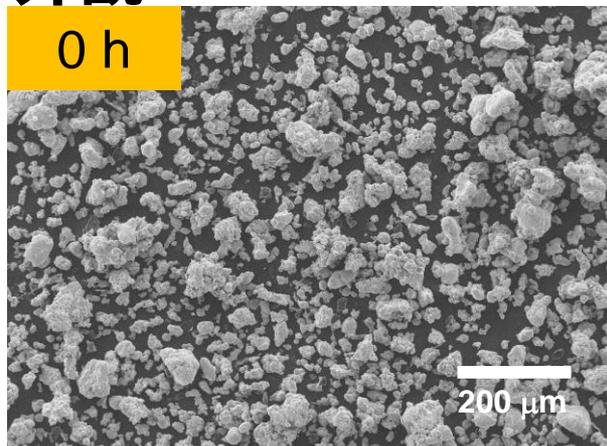
純鉄粉と少量の潤滑剤 (例: 黒鉛) をボールミル処理するだけで製造可  
**量産性良好、実用化のハードル低**

S. Motozuka, M. Morinaga et al., AIP advances, 5, 097127 (2015).

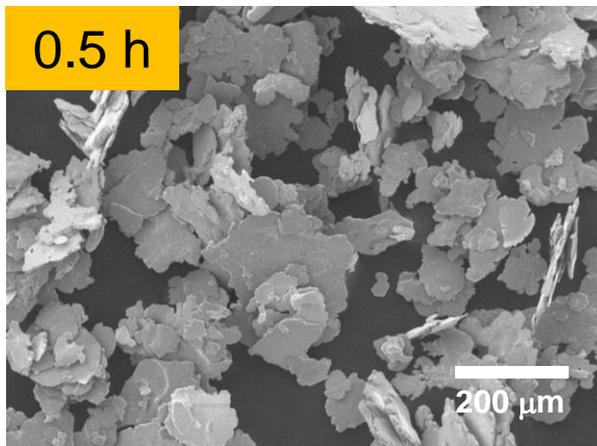
# 扁平化処理に伴う鉄粒子形態の変化(代表例)

## 外観

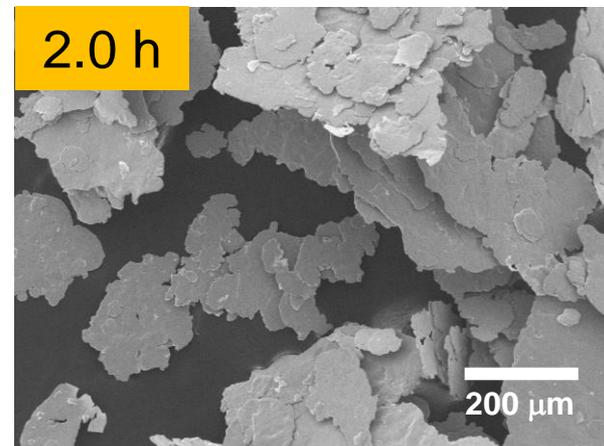
0 h



0.5 h

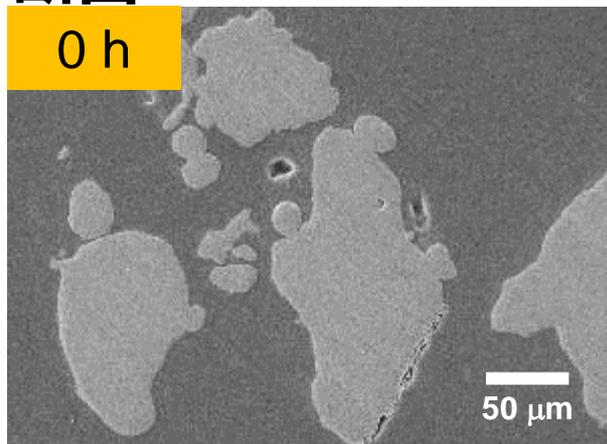


2.0 h

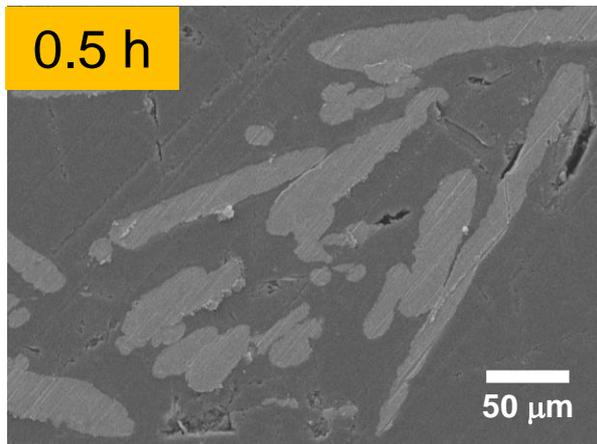


## 断面

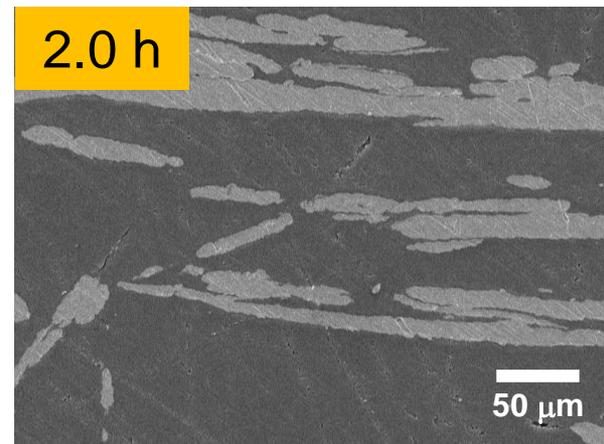
0 h



0.5 h



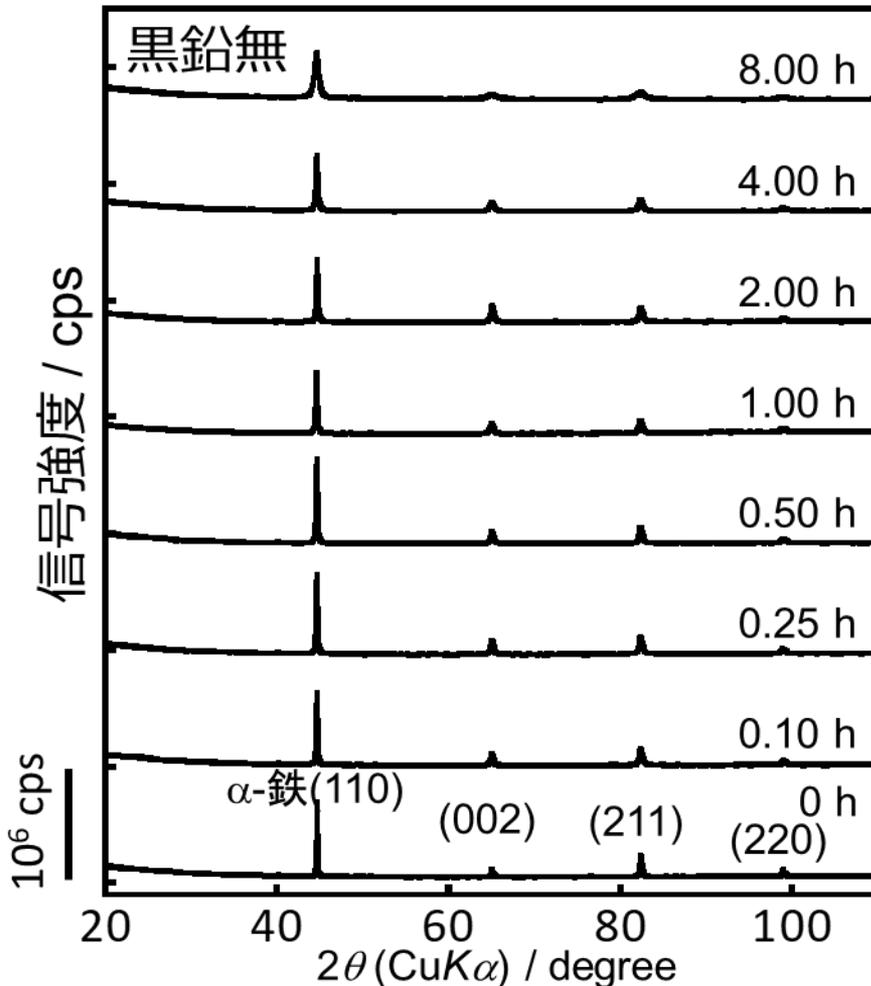
2.0 h



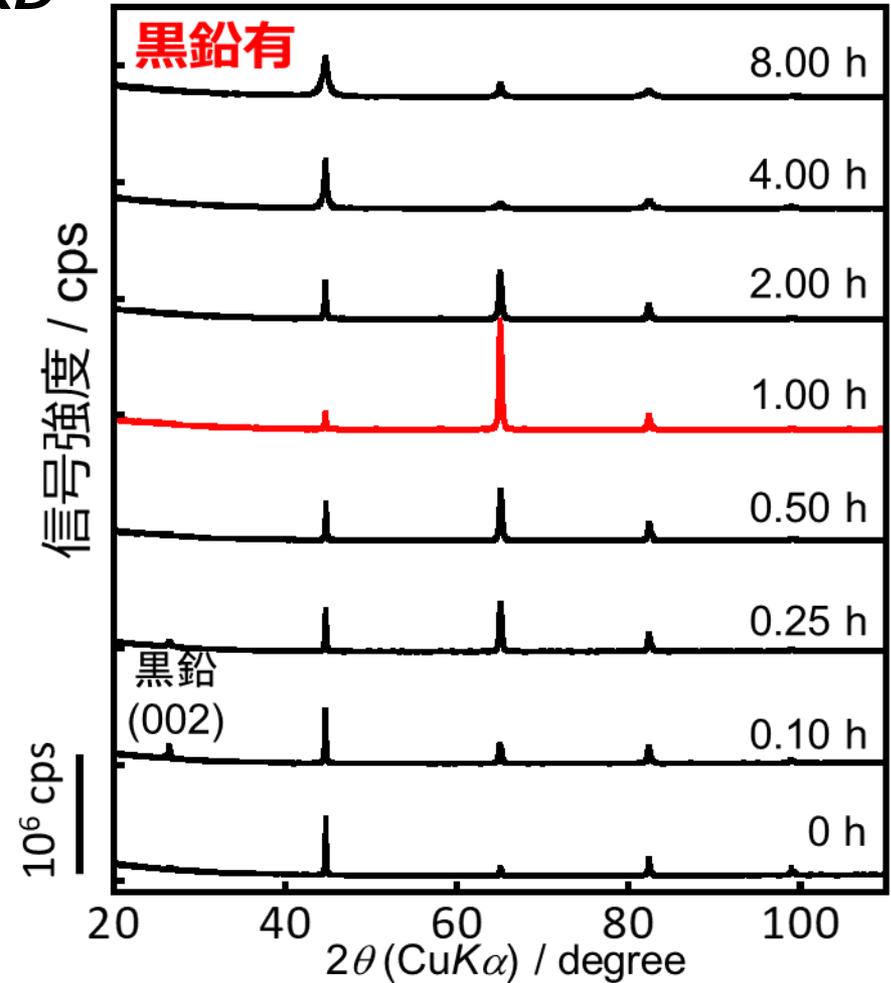
粉碎に伴い鉄粒子は顆粒状から扁平形状に変化

# プロセス詳細：粉砕に伴う結晶構造の変化

XRD



粉砕に伴う、ひずみ、結晶子サイズ減少によるブロード化

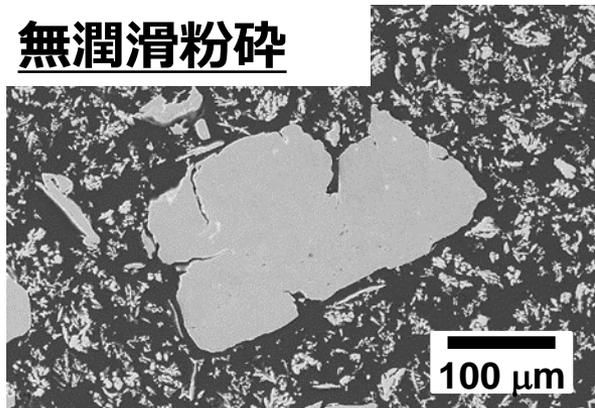


塑性変形に伴う集合組織形成を示唆

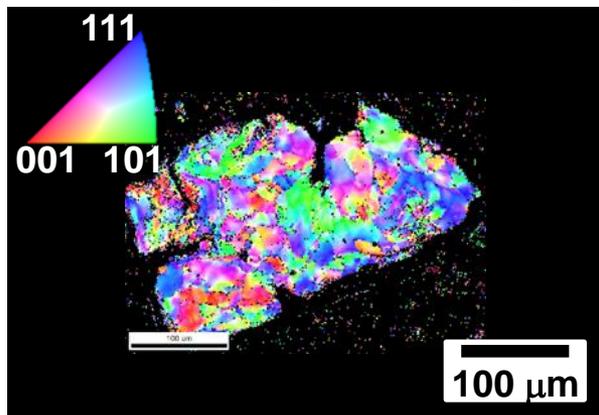
# 潤滑下のボールミル粉碎による ランダムキューブ(RQ)組織の形成

SEM

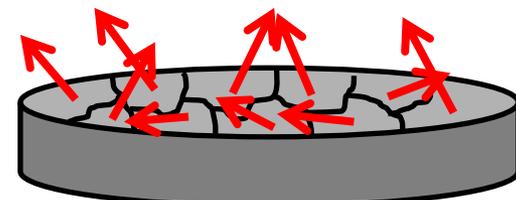
無潤滑粉碎



方位マップ(EBSD,ND)

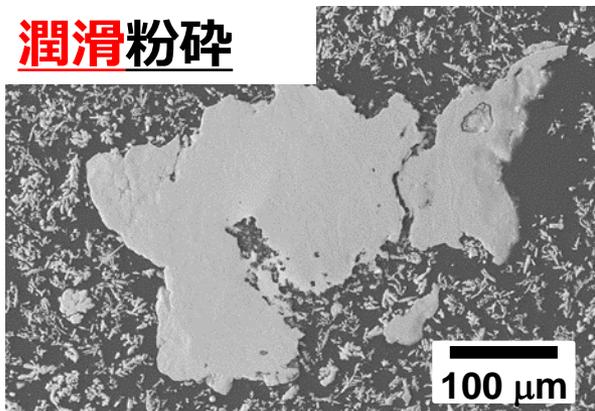


扁平鉄粒子中の  
001の配向イメージ

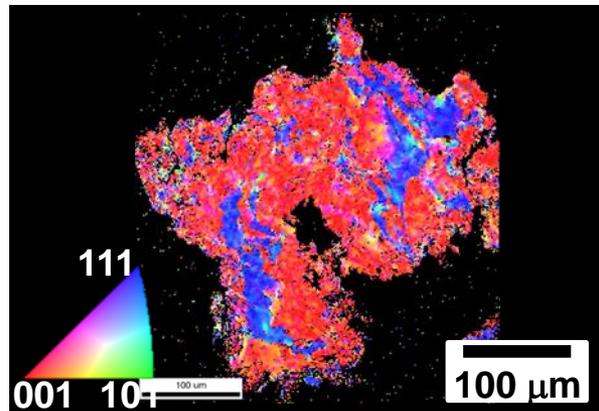


磁化容易軸<001>は  
ランダム

潤滑粉碎



※周辺の微粉：導電性埋め込み樹脂中の銅粉



磁化容易軸<001>は  
偏平面内でランダム



ランダムキューブ組織  
({001}繊維集合組織)

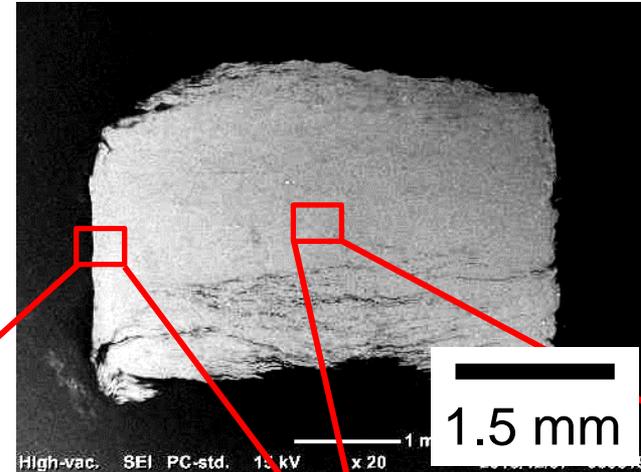
潤滑粉碎により理想の電磁鋼板と同じ組織(ランダムキューブ(RQ)組織)を形成

S. Motozuka, H. Sato, M. Morinaga et al., Powder technol., 321, 9-12, (2017).

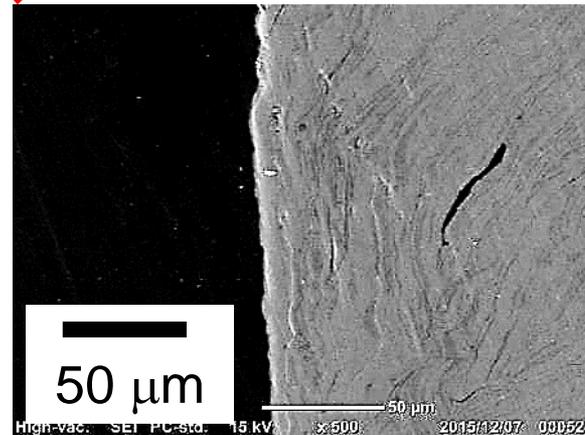
# 成形体中の粒子配向



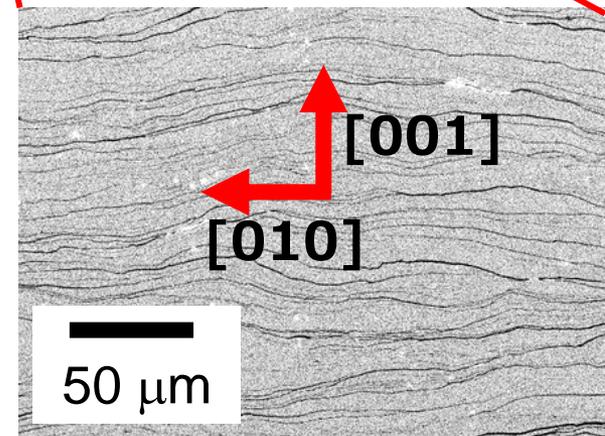
鉄心断面SEM



鉄心側面



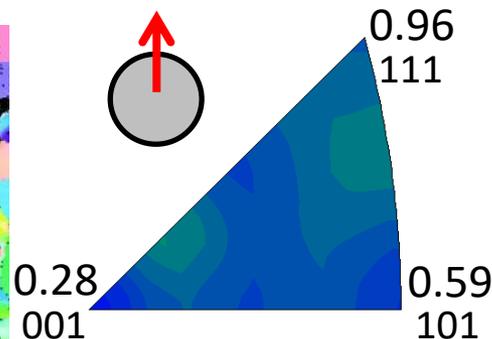
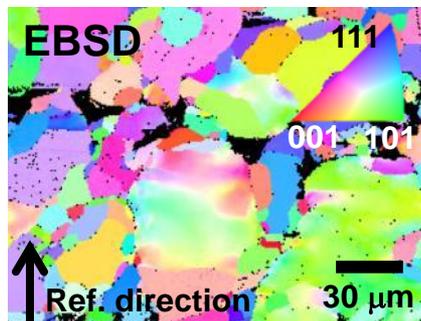
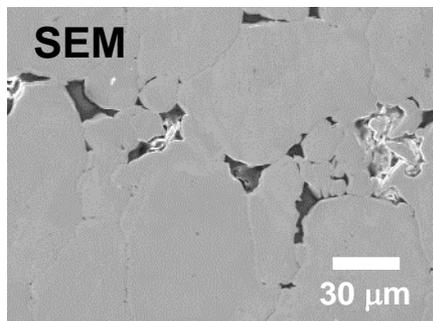
鉄心断面中央



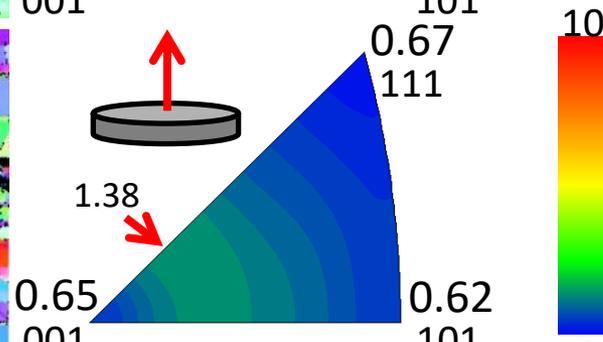
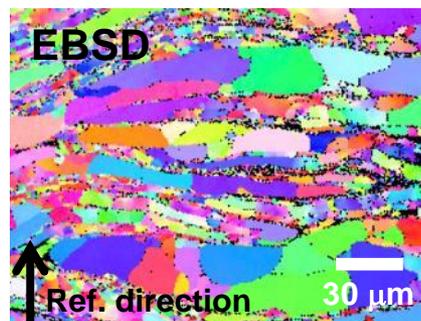
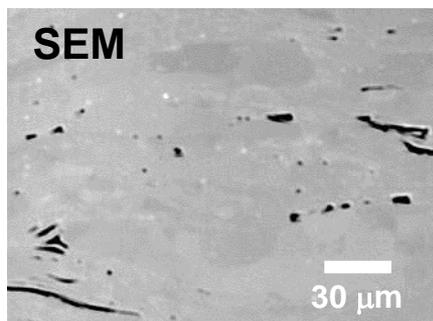
型中の粒子配向でフレーク面とともに磁化容易軸が半径方向に配向

# コアの組織(EBSD・方位マップ・逆極点図)

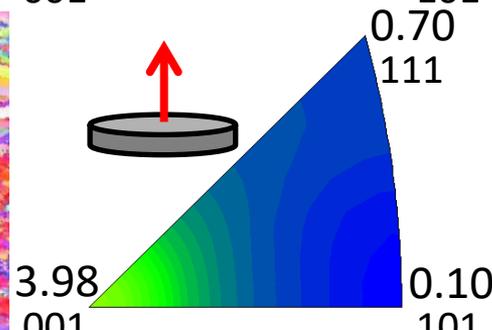
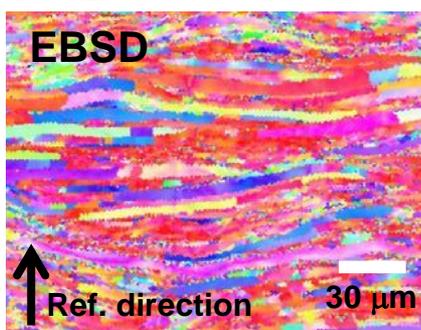
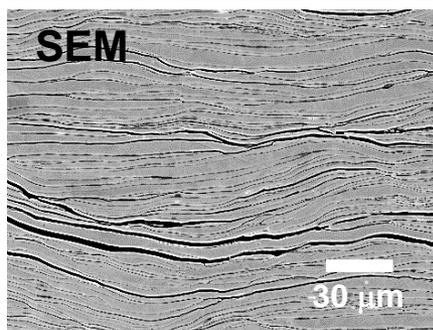
原料粉



無潤滑



潤滑粉碎



周方向に磁化容易軸をランダム配向させたリングコアを作成できた

# リングコア化した場合の磁気特性

	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	比透磁率 $\mu_{max}$	磁束密度 $B_{10k}$ (T)	保磁力 $H_c$ (A/m)
原料粉	<b>7.62</b>	526	1.66	154
無潤滑粉砕	<b>7.21</b>	711	1.60	236
潤滑粉砕	<b>7.38</b>	1285	1.72	271

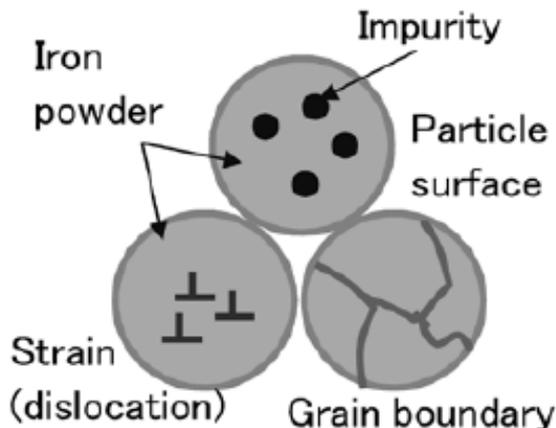
密度が低いにも関わらず、透磁率は2.5倍、磁束密度も原料粉を上回っている  
保磁力が高い原因は後述

# 今後の開発の方向性

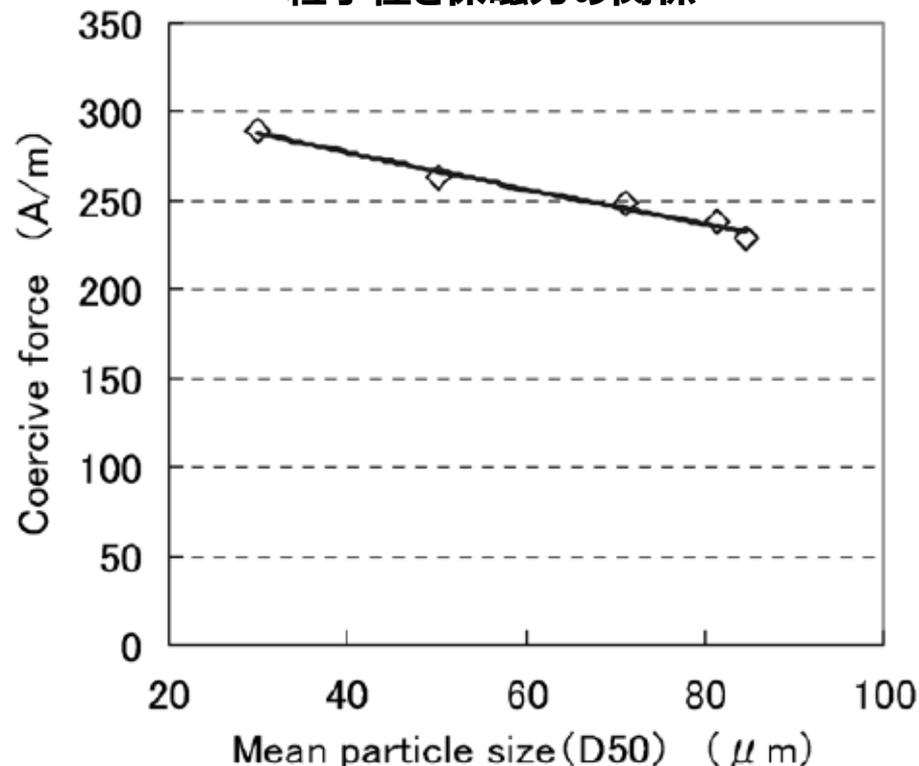
10:00

# 損失の高い理由と今後の研究の方向

## 粉末におけるヒス損の要因



## 粒子径と保磁力の関係



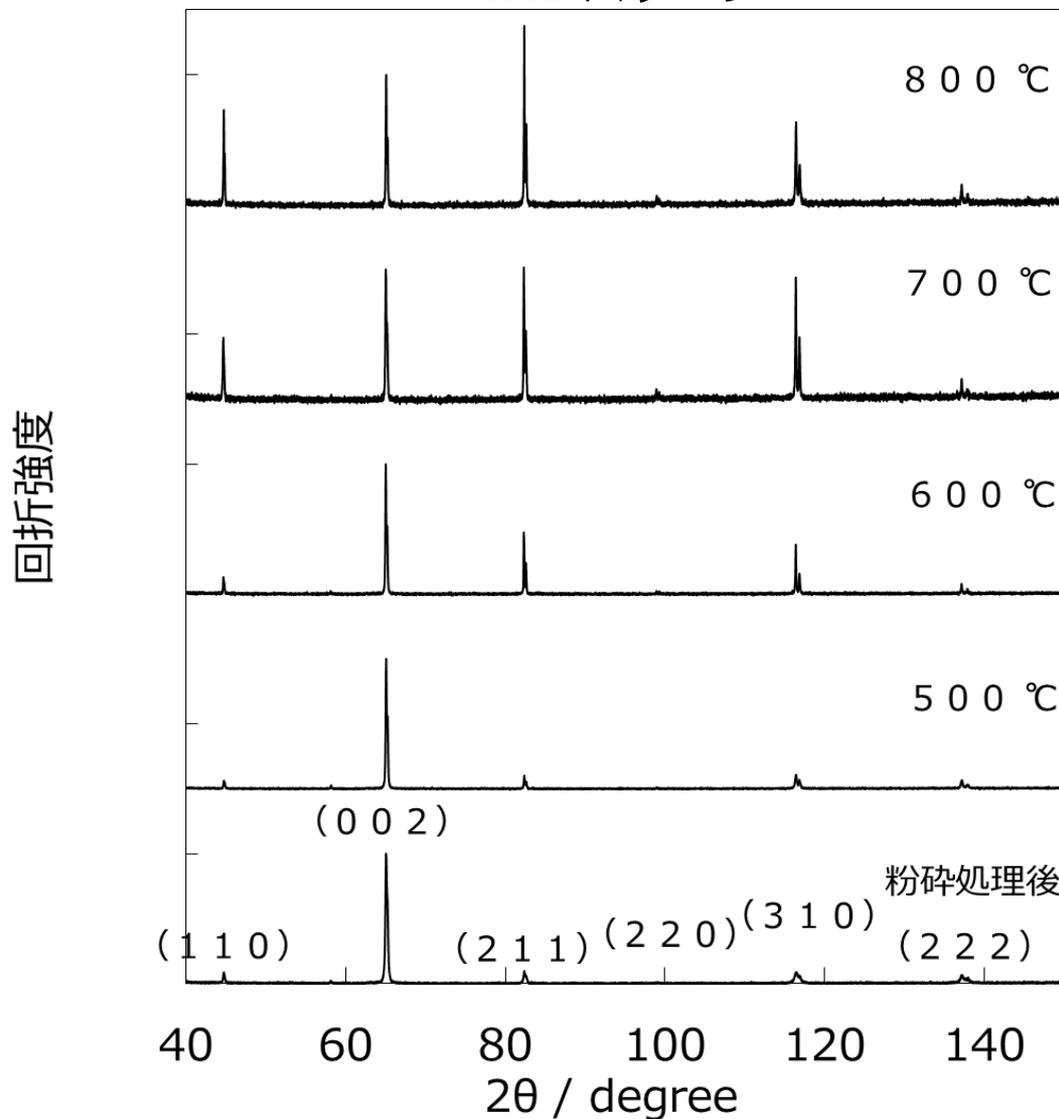
鉄粒子表面は保磁力増加の要因となる 実際には粒子径が大きい程保磁力低下

KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS/Vol. 66 No. 1 (Sep. 2016)

球は体積当たりの表面積が最も小→フレーク化によって表面積増大  
フレーク化しないと磁化容易軸配向しない (トレードオフ) →原料の粒径を大きくする  
→最初の試行で市販品レベルまで保磁力低下、現在条件最適化中

# 熱処理による組織制御

## XRDパターン

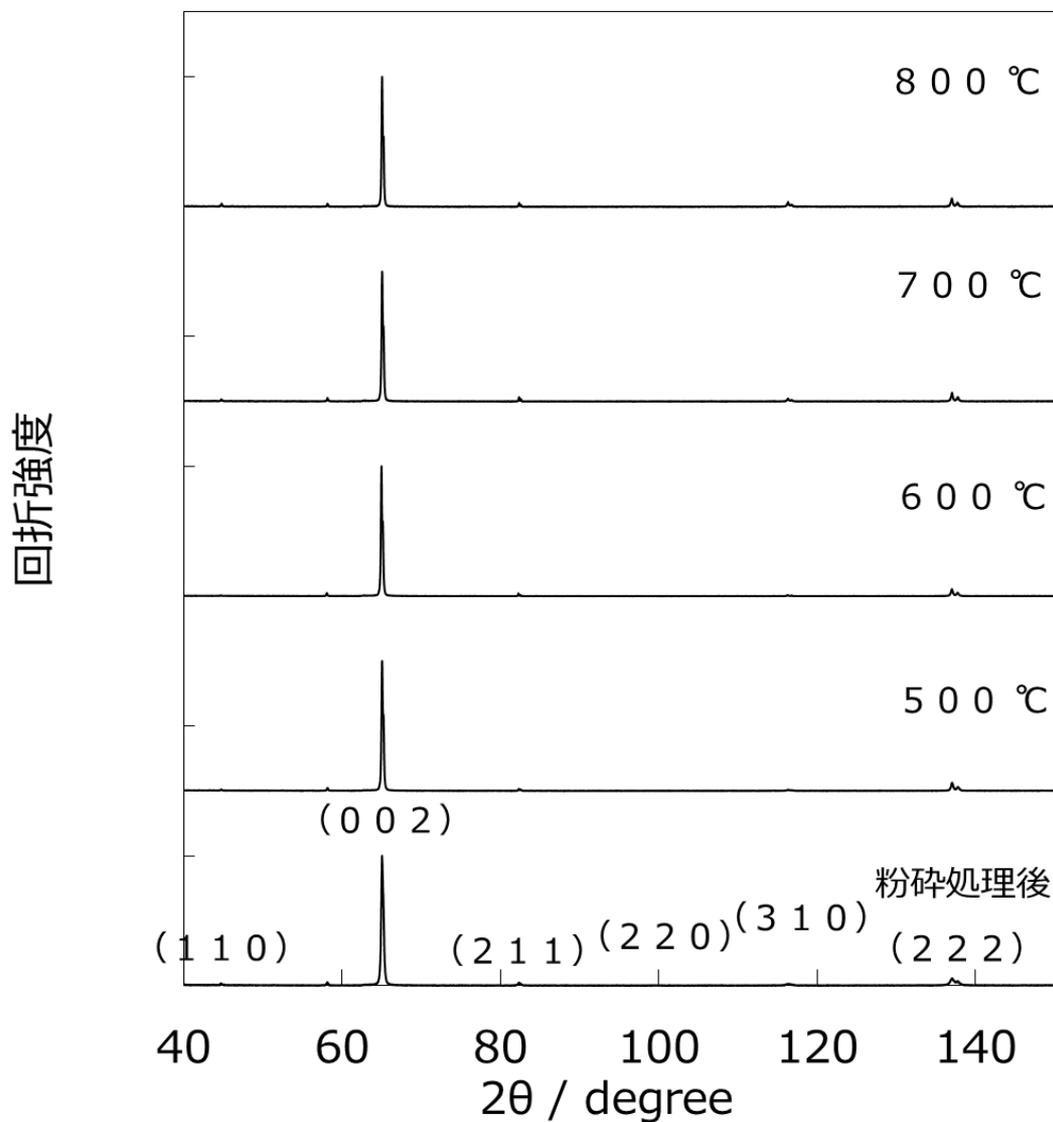


ひずみ除去のために熱処理による再結晶が必要



同時に磁化容易軸の方向がバラバラになる

# 熱処理による組織制御



熱処理方法の工夫によって、  
再結晶後も磁化容易軸の方向を維持する手法を開発



組織制御技術による課題の  
解決を推進

# 主要鉄心材料との比較と開発目標

	損失 $W_{10/400}$ [W/kg]	磁束密度 $B_{10k}$ [T]	製品例・備考
電磁鋼板	23	1.81	
ナノ結晶合金 (開発競合品)	2	1.80	
既往鉄粉 (顆粒状鉄粉)	34	1.70	
本鉄粉	34	1.70 (成形最適化 1.84)	
開発目標値 (過去の論文からの推測値)	24	1.90	<p>損失 : T. Tomida, (100)-textured 3% silicon steel sheets by manganese removal and decarburization</p> <p>磁束密度 : S. Tajima et al., Properties of High Density Magnetic Composite (HDMC) by Warm Compaction Using Die Wall Lubrication</p>

組織制御技術によって $W_{10/400}$ で電磁鋼板並み、磁束密度1.9 T@10kA/mを目指す

ご清聴ありがとうございました。