

# Magnetics開発戦略

20世紀はElectronicsの時代、21世紀はMagneticsの時代

1. はじめに 自己紹介
2. IOT時代の磁気センサの開発
  - 1) 超感度マイクロ磁気センサ(GSRセンサ)の発明
  - 2) GSRセンサの応用  
自動車用・電子コンパス・生体磁気検出・生体内ナビ
3. エネルギー問題への挑戦 Energy Magnetics専門研究会
4. 21世紀Magneticsによるビッグイノベーション 未来テーマ
5. Magnetics分野から見た日本産業への提言

2019年05月30日

本蔵義信

工学博士

マグネデザイン(株)代表取締役社長

元日本磁気学会副会長

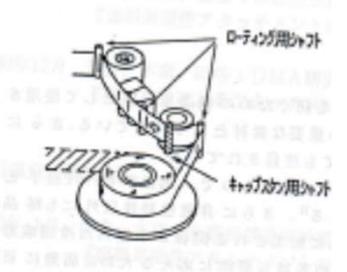
# 自己紹介 愛知製鋼時代のMagnetics新製品開発と事業化経験

## 非磁性材料 1975~1985年

MRI、JT60、リニアモータ、トリストラン、真空装置など採用

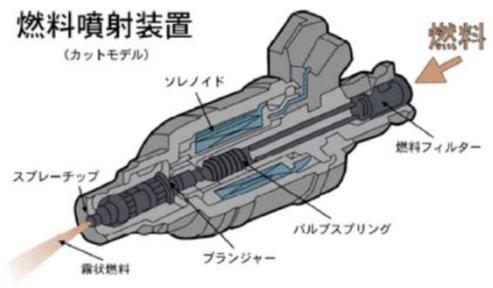


マイクロシャフト 径6→2mm 世界市場を独占



## ソフト磁性ステンレス材料 1985~1995年

EFI用磁性ステンレス鋼AUM25を開発 トヨタ、Boschに採用

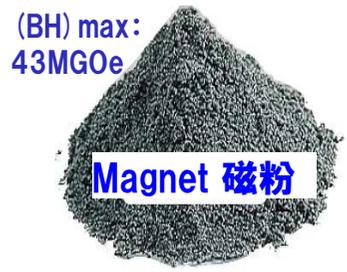


医療用磁性ステンレス鋼AUM20を開発 世界初 世界シェア70%を獲得



## 磁石 1992~2012年

世界最強のDyフリーボンド磁石を開発



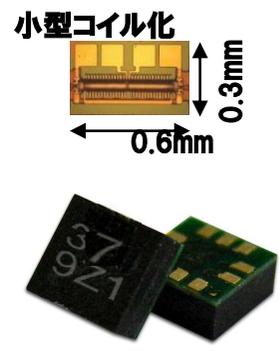
自動車用小型モータの世界シェア40%

## 磁気センサ 1995~2012年

世界1の電子コンパスを開発 Google 안드로이드携帯に採用 1億個販売

2012年9月MIセンサの開発 産官学連携功労文部科学大臣賞を受賞

2012年11月 Dyフリー磁石 山崎貞一賞を受賞



# 【会社概要】 詳細はホームページ参照

**【沿革】** 当社は、Magnetics技術の研究開発とその成果の普及を目指して、本蔵義信が愛知製鋼専務取締役を退社後、2012年9月に設立した会社です。13年8月から名古屋大学との共同研究を開始し、15年1月に超高感度マイクロ磁気センサを実現するGSR原理を発見した。

現在GSR原理を基礎に①ウェアラブルコンピュータ用の磁気ジャイロコンパス、生体磁気検知用pT(ピコテスラ)センサおよび自動車用磁気センサ向けのGSRセンサを開発中である。16年4月には開発拠点となる試作センタを設立・立ち上げた。

**【会社概要】** 従業員:15名 資本金:5700万円 GSRセンサ関連国内特許:8件取得 米国特許は申請中

**【場所】** 名古屋 ナビ白金(名古屋市のインキュベーションセンター内)

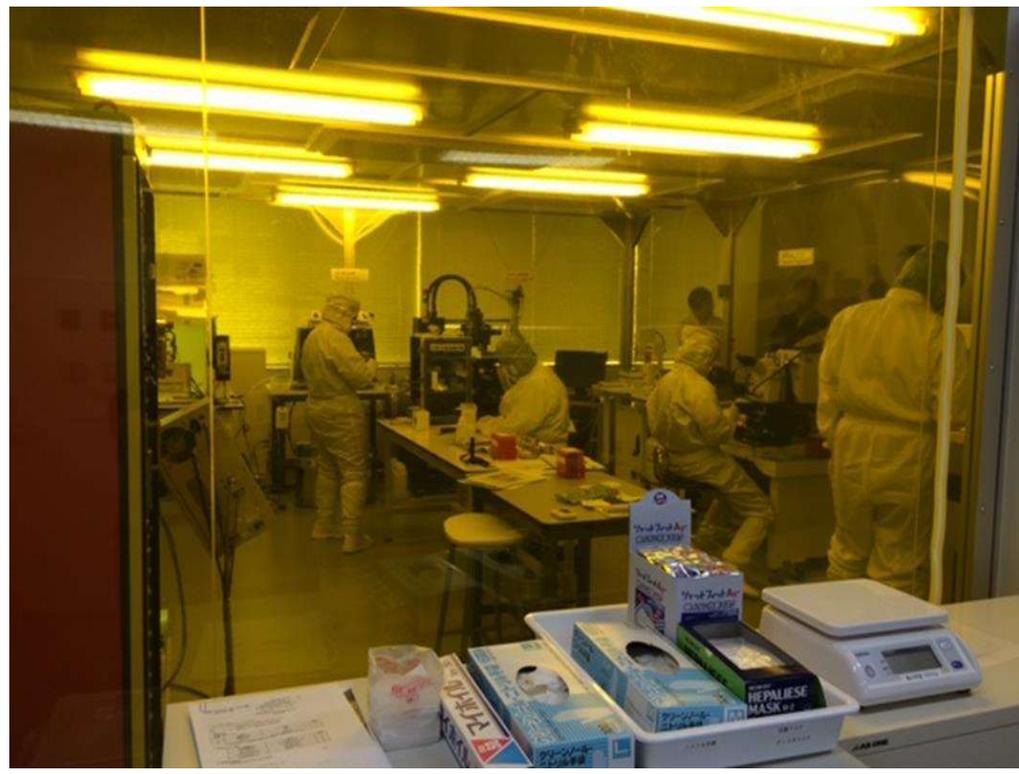
**【業種】** 磁気センサの研究開発



■ 〒466-0059 名古屋市昭和区福江2丁目9-33  
名古屋ビジネスインキュベータ白金408  
TEL: 052-872-6111 FAX: 052-872-6123



# 図1 試作センター（世界初の3次元フォトリソグラフィ技術の研究所）



3元蒸着装置、RIE、露光装置、スピコート、ドラフト加熱炉、ワイヤ整列装置、ワイヤ熱処理装置ほか



素子抵抗測定器・ワイヤボンディング装置ほか



顕微鏡・3次元顕微鏡・電子顕微鏡(SEM)

### 図3 ナビ白金の事務所風景



# NHK マグネデザインのシリコンバレーへの挑戦が紹介されました



2015年10月29日 (木)

## “シリコンバレーにチャンスあり” 日本企業の挑戦



NHK  
小宮理沙記者



石井

本蔵

Dr. Brian



Dr. Brian

マグネデザイン 本蔵義信社長

「日本のテクノロジーとシリコンバレーのビジネスパワーを融合させると、世界を変える力が生まれるんじゃないか。」

医療機器メーカー担当者 Dr. Brian

「彼の技術には将来性があります。」

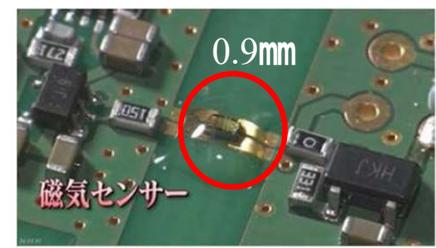
（医療の）新しい分野を開発でき、生産性があり、満足のいく関係が築けると思います。」

シリコンバレーにサンプルを持ち込み、医療機器メーカーに見せたところ、技術が高く評価され、一気に商談が成立。

一緒に最新の医療機器を開発することになりました。

もっとも期待されているのが、MRIなど大型医療機器を小型化し、コストを抑えることです。

一般の病院にも機器を置くことができるようになるため、巨大なビジネスにつながるとみられています。



0.9mm

磁気センサー



MRI

MRIなど大型医療機器を小型化 コストを抑える

# Magnetics開発戦略

20世紀はElectronicsの時代、21世紀はMagneticsの時代

1. はじめに 自己紹介
2. IOT時代の磁気センサの開発
  - 1) **超感度マイクロ磁気センサ(GSRセンサ)の発明**
  - 2) GSRセンサの応用  
自動車用・電子コンパス・生体磁気検出・生体内ナビ
3. エネルギー問題への挑戦 Energy Magnetics専門研究会
4. 21世紀Magneticsによるビッグイノベーション 未来テーマ
5. Magnetics分野から見た日本産業への提言

2019年05月30日

本蔵義信

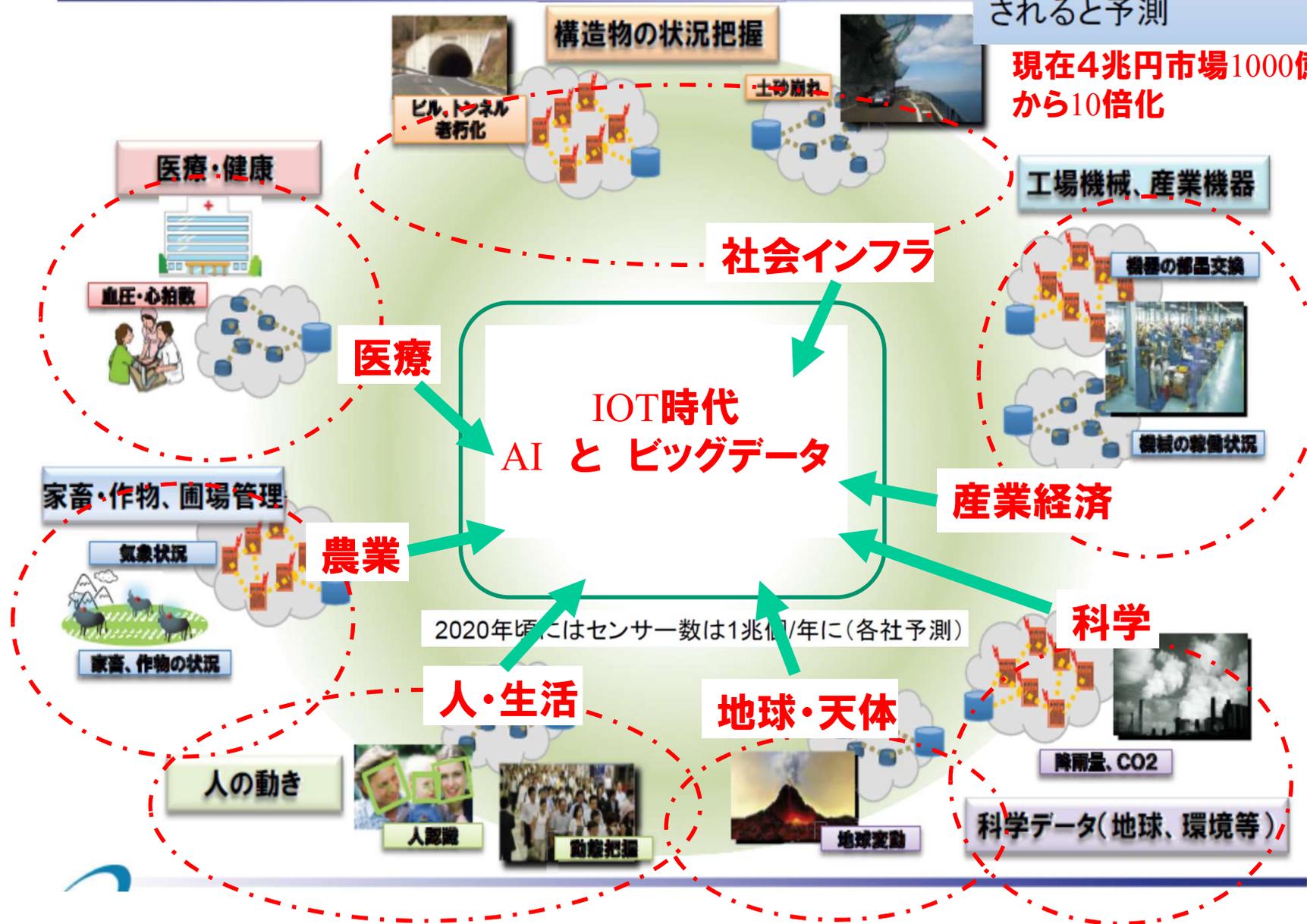
工学博士

マグネデザイン(株) 代表取締役社長

# IOT時代のセンサの役割

Intel, HP等の有力ベンダは、2017～2020頃には1兆個/年のセンサーが生産されると予測

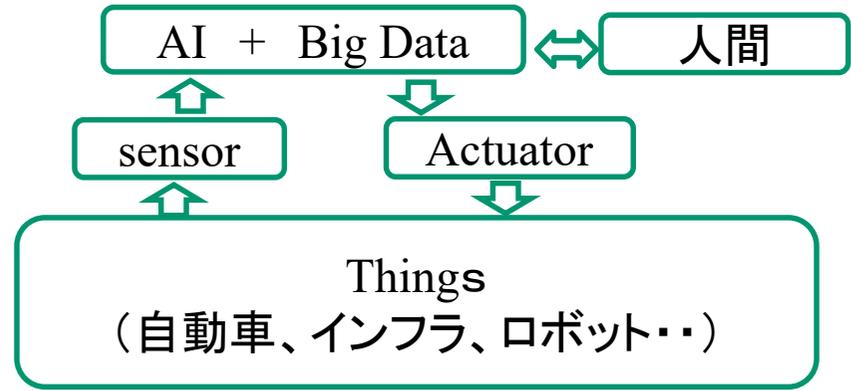
現在4兆円市場1000億個から10倍化



# IOT (AI制御) 時代のセンサの特徴

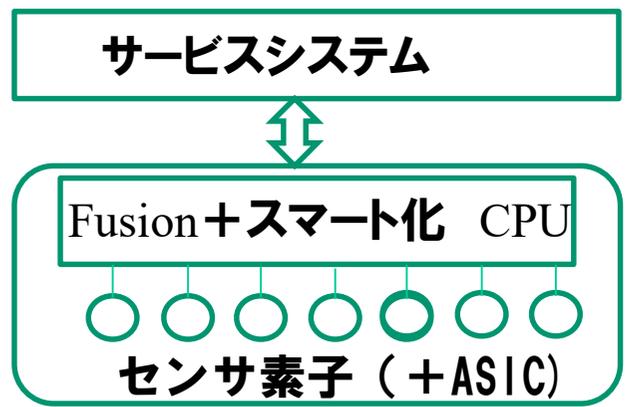
## 人間センサの100倍の性能

- 正確さ(時間+空間)・信頼性・耐環境性
- 精密さ(超高感度)
- リアルタイム性(超高速測定)
- マイクロサイズ
- 低消費電力(パルス駆動・データ保存)
- Fusion仕様



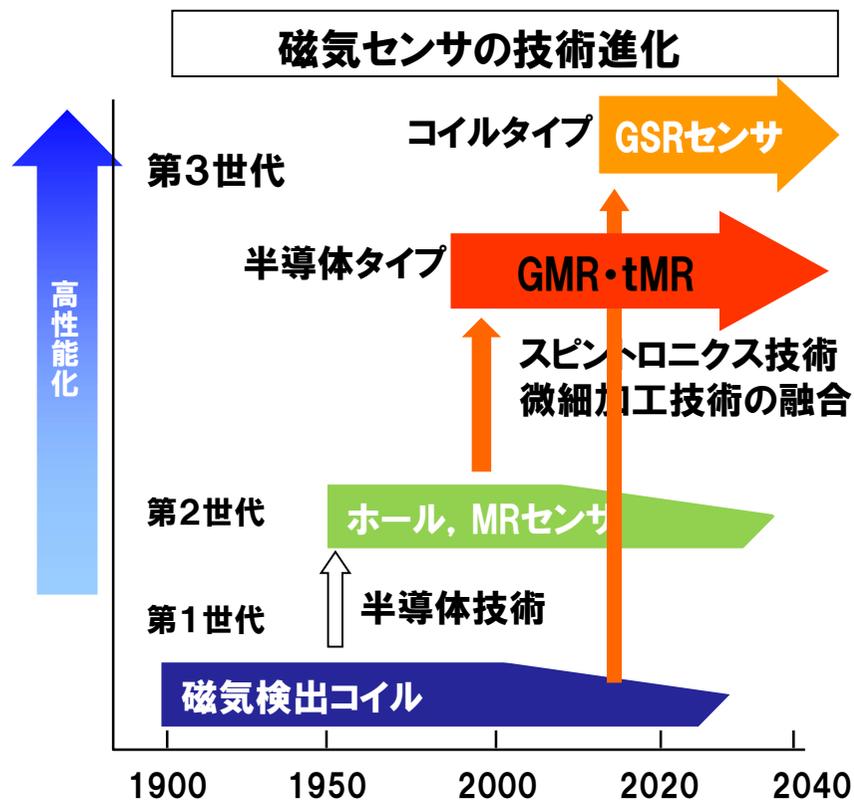
## センサ技術の進化

- 新原理センサで100倍以上の性能  
⇒ 超高感度 + 高速化 + マイクロを実現
- Fusionセンサ仕様  
⇒ 誤差補正して正確な情報を保存
- いつでもどこでも  
⇒ 低消費電力 + 小型安価 + 安定性 + 自律電源
- 統一規格: アクセス・無線通信  
⇒ ビッグデータに保存



# IOT時代と磁気センサの進化

- 磁気センサの位置づけ センサ市場全体 30%
- IOT時代に磁気センサの新原理： スピントロニクス技術



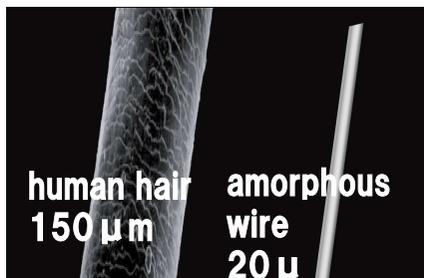
**磁気センサ技術の進化**  
 半導体スピントロニクスタイプの磁気センサが先行  
 GMRセンサ (2007年 ノーベル賞を受賞)

**コイル型スピトロニクスタイプが発明**  
 GSRセンサ(2015年)

- **スピン制御型**の新原理センサ
- Fusionセンサ仕様
- スマート化で誤差補正プログラム
- いつでもどこでも⇒ **パルス駆動** + 半導体プロセス
- アクセス・無線通信⇒ **スマホ標準部品**

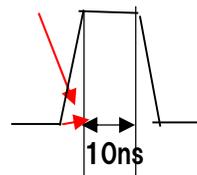
# 背景 コイル型スピトロニクスタイプの磁気センサ(GSR)の開発 GSR:GHz-Spin-Rotation

Fe-Co base Amorphous wire

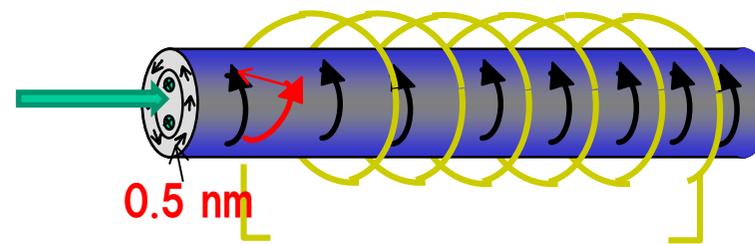


検出原理

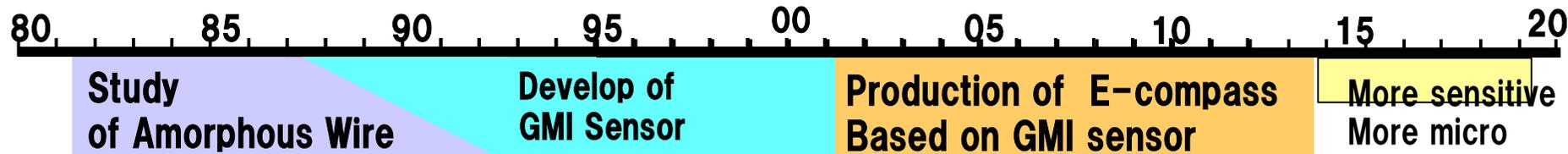
立上り速度  
0.5 ns



外部磁界 Hex⇒  
円周向きに整列したスピン



Coil Output voltage  $V \propto f \cdot N \cdot M (= \mu \cdot Hex)$



## Amorphous type Magnetic sensor

1982  
Prof. Masumoto  
invention of  
Amorphous Wire

1987  
TDK  
FG sensor  
by KHz pulse

立上り: 5000nsec

1999  
Prof. Mohri  
GMI sensor  
by MHz pulse

立上り:  
50nsec

1991  
Prof. Makhotkin  
Discovery of  
MI effect

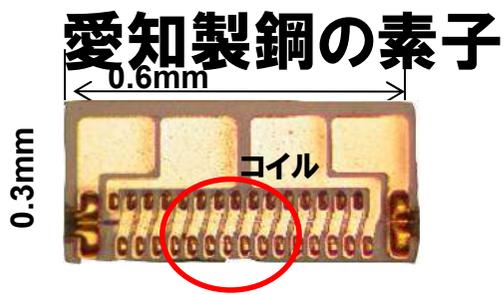
1995  
Prof. Mohri  
GMI sensor  
by MHz pulse

Aichi Steel  
Electronics compass  
Size: 2mm×2mm×1mm

2015  
Honkura  
GSR sensor  
by GHz pulse

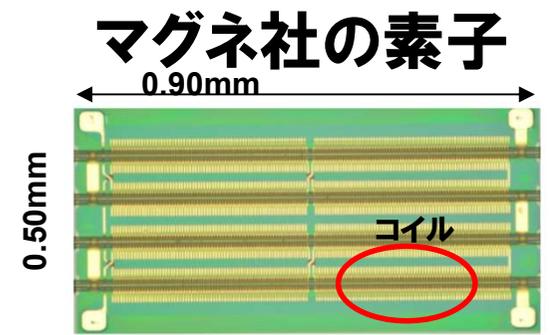
立上り:  
0.5nsec

# マイクロコイルの製造プロセス



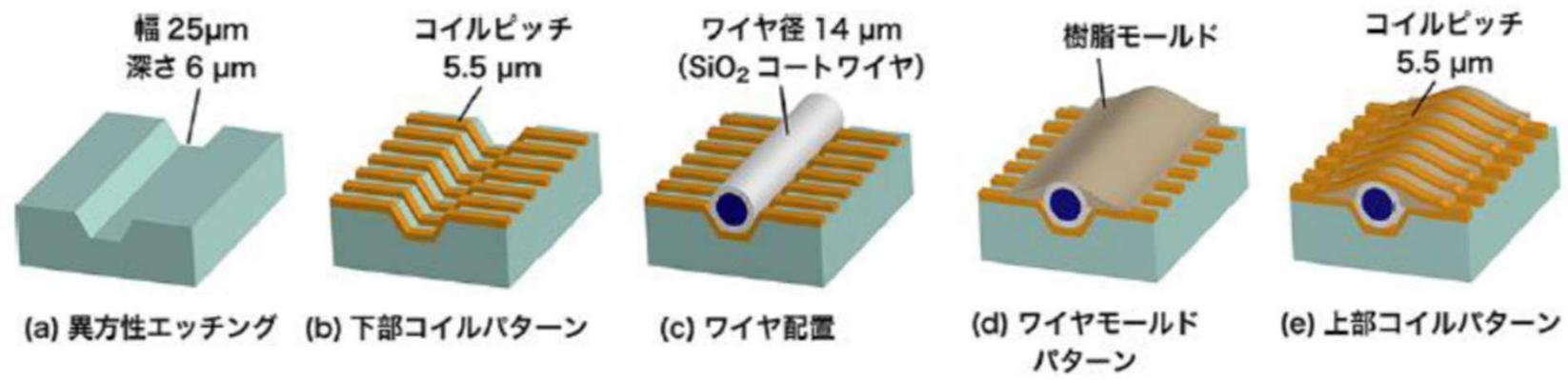
コイル数: 88回/mm<sup>2</sup>

⇒  
14倍向上



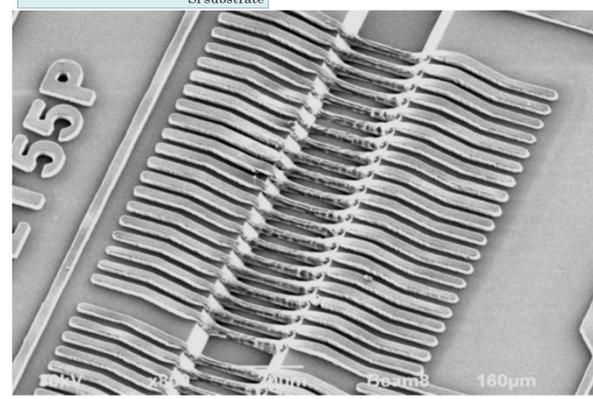
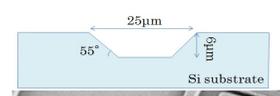
コイル数: 1250回/mm<sup>2</sup>

## マイクロコイルの製造プロセス

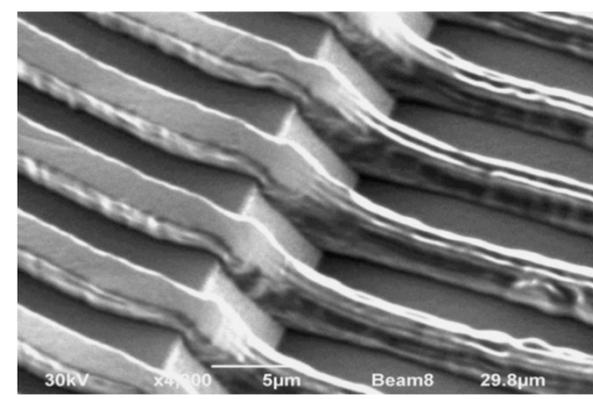


# コイルピッチ5 $\mu\text{m}$

## 下コイル配線 ピッチ5 $\mu\text{m}$

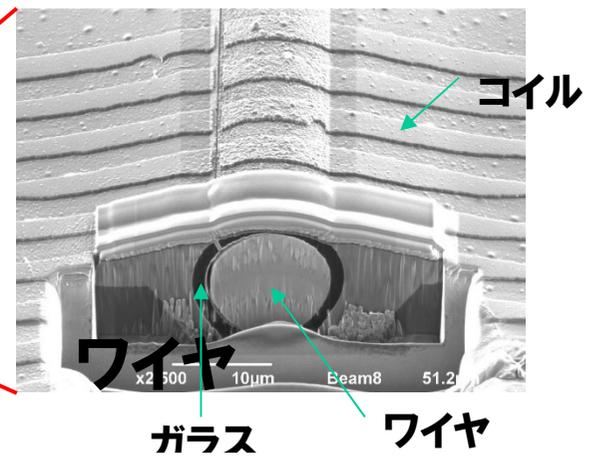
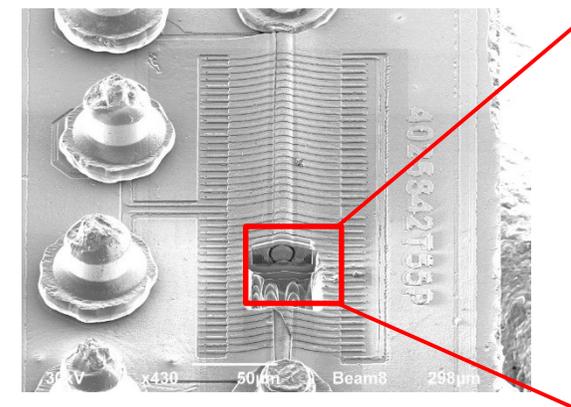


V溝を越えて形成した



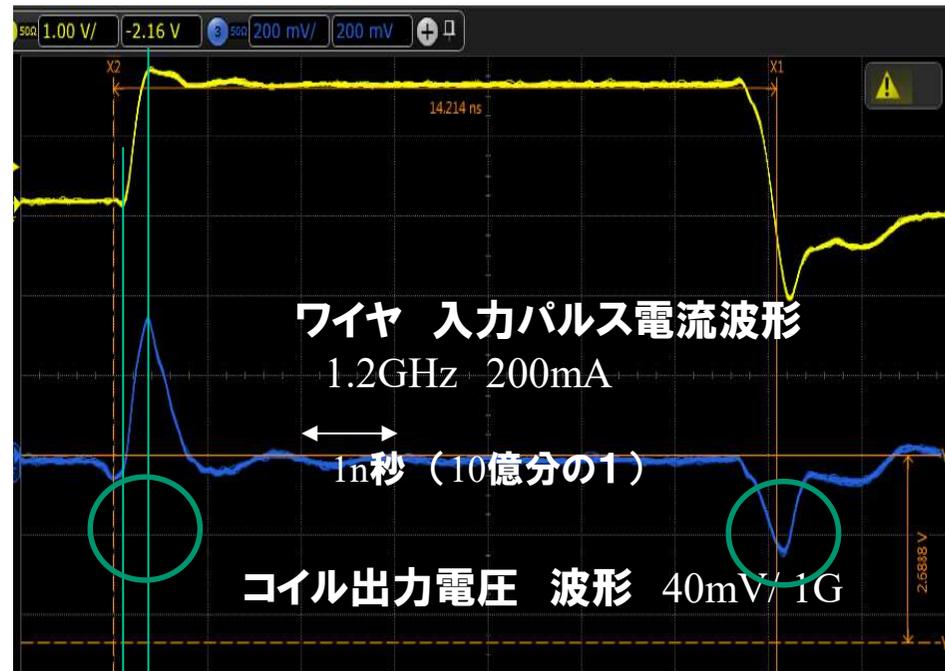
拡大したV溝段差部

## 上コイル配線 ピッチ5 $\mu\text{m}$

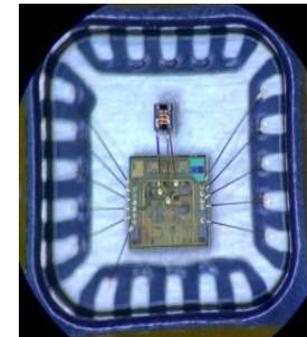
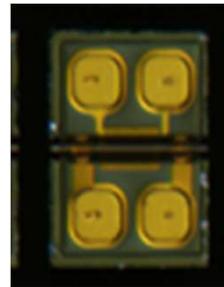


ワイヤ  
ガラス  
ワイヤ

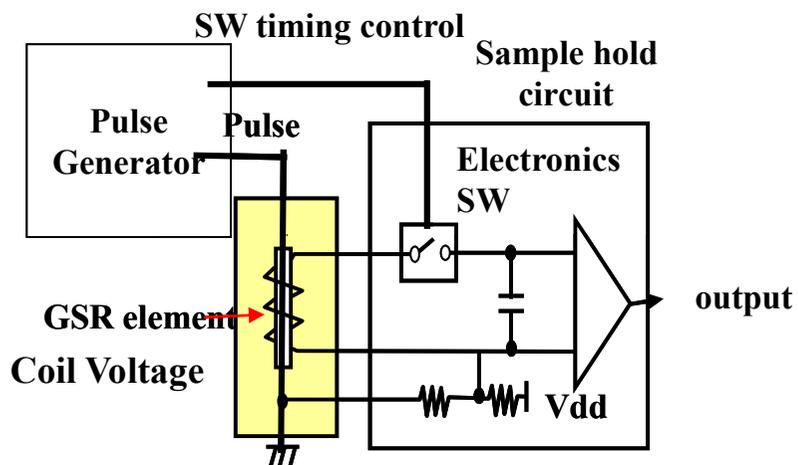
# 駆動パルス波形と コイル電圧波形



0.3n秒  
コイル電圧波形



b) Block Diagram



# 検出感度 パルス周波数、コイル巻き数、ワイヤ透磁率の影響

The Sensitivity increases with increase of pulse frequency and shows saturation over 3GHz  
 And with increase of coil turn numbers proportionally and with increase of the effective permeability of the wire.

These experimental results accord to

the theoretical equation as  $V \propto f^{1/2} \cdot N \cdot M (= \mu \cdot H_{ex})$

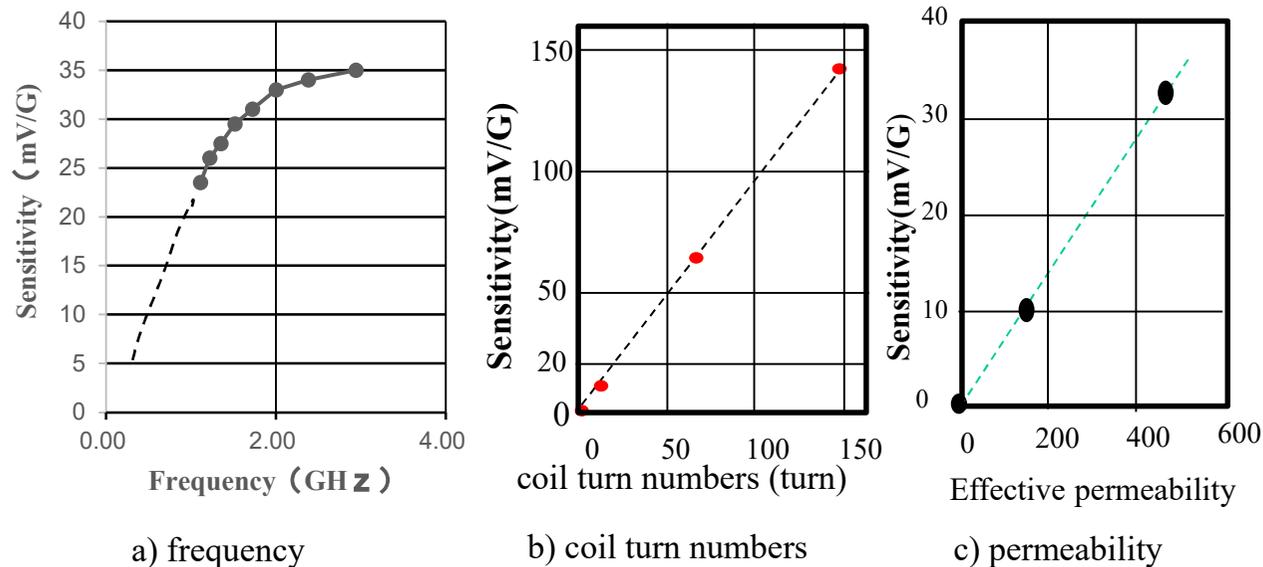
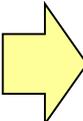
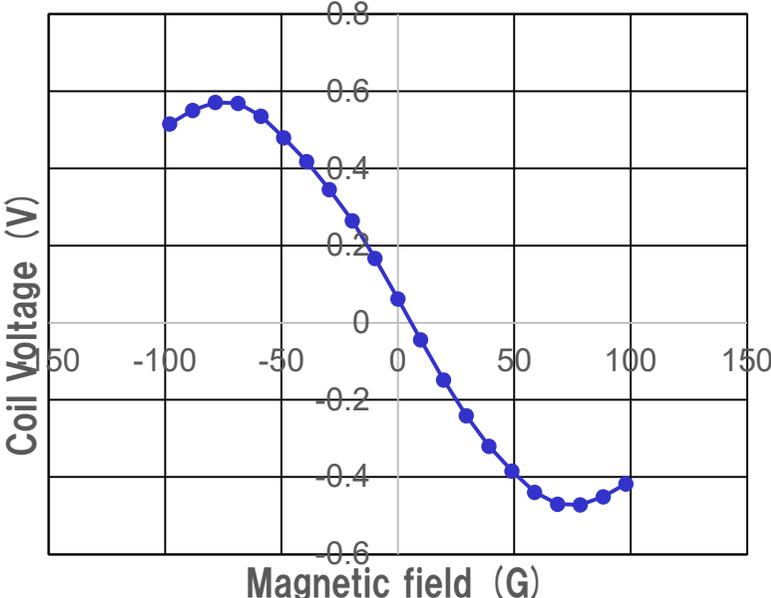


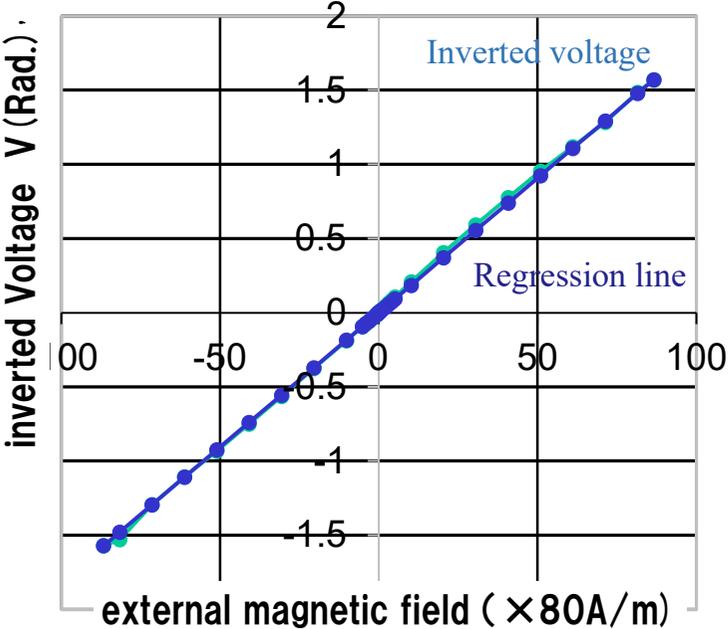
Fig. 7 Effect of frequency, coil turn numbers and wire permeability on Sensitivity

# 正弦波出力 と直線性

Result (2) the sine functionality between the magnetic field and the coil voltage

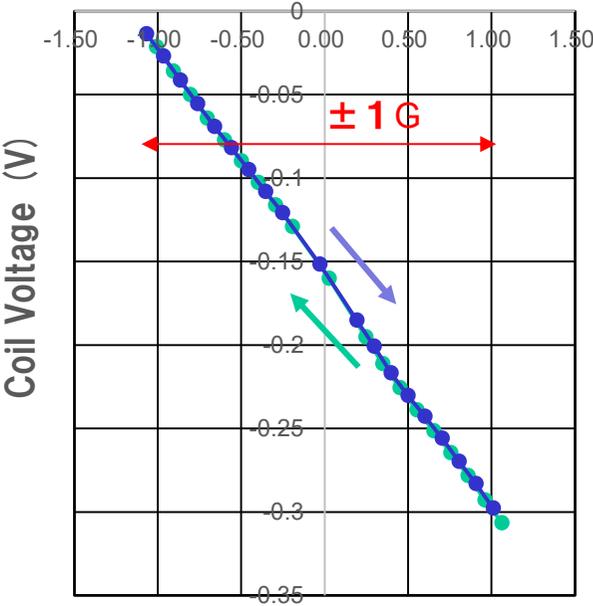


Inverted voltage has a linearity of 0.5%FS  
プログラム補正後は 0.1%

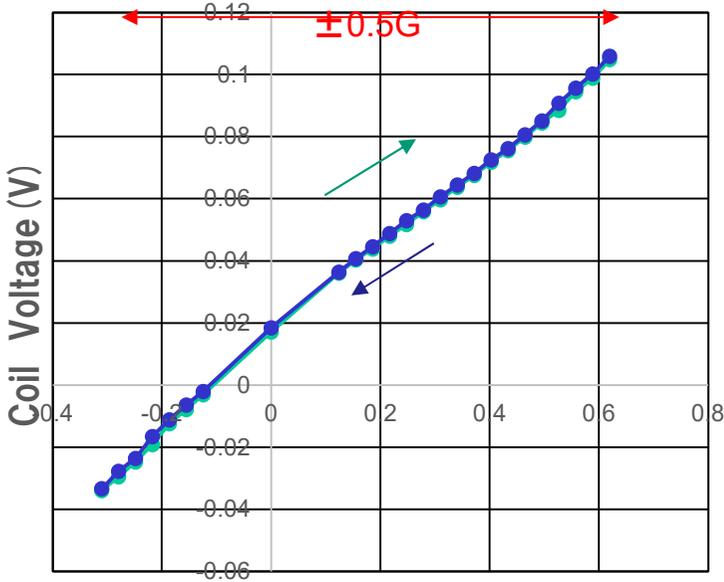


# 磁気センサの欠点：出力のヒステリシス特性の解消

Falling edge



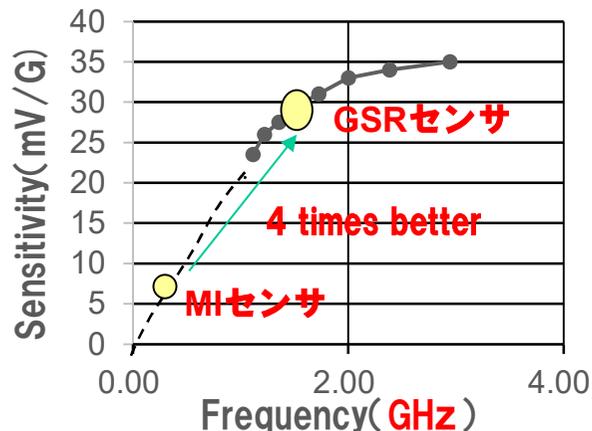
Rising edge



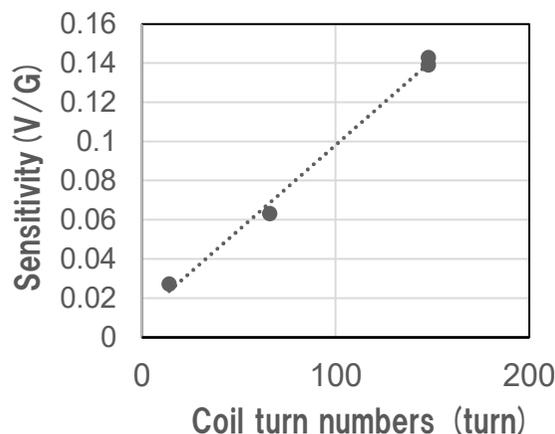
# まとめ GSRセンサの特質

感度140mV/G  $\sigma$ 電気ノイズ40 $\mu$ V  $\Rightarrow$   $\sigma$ 磁気ノイズ30nT@1KHz ( $\Rightarrow$  3 nT@10Hz)

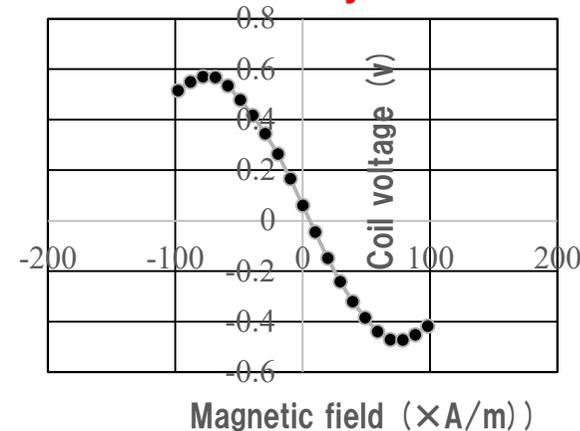
パルス周波数GHz



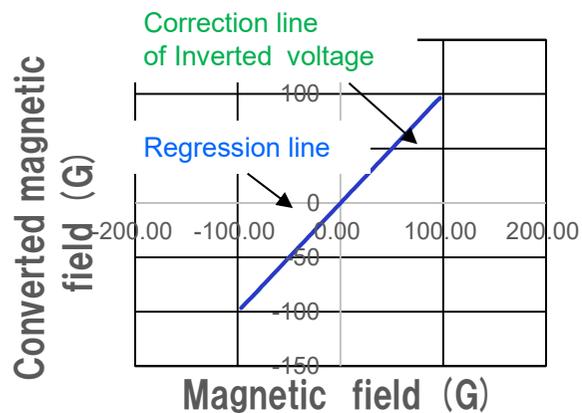
コイル巻き数160



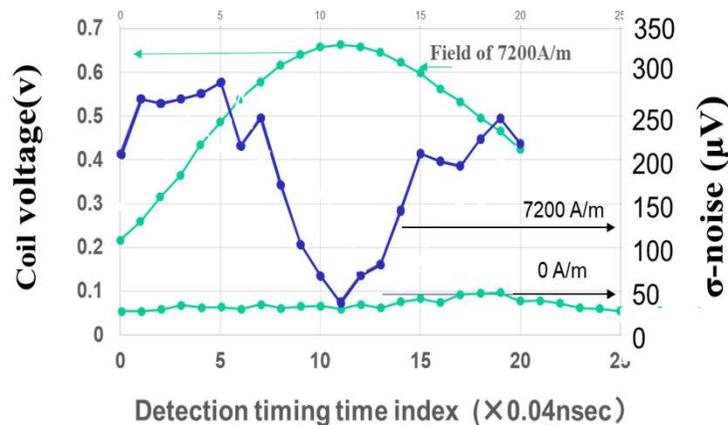
Sine functionality



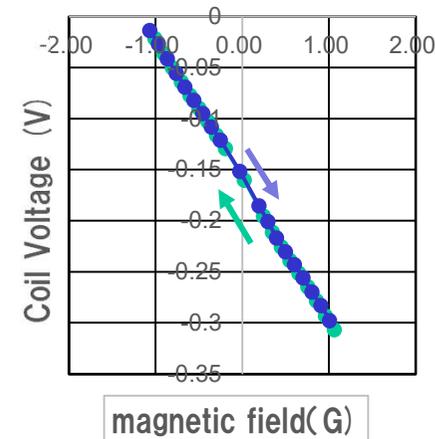
Good linearity



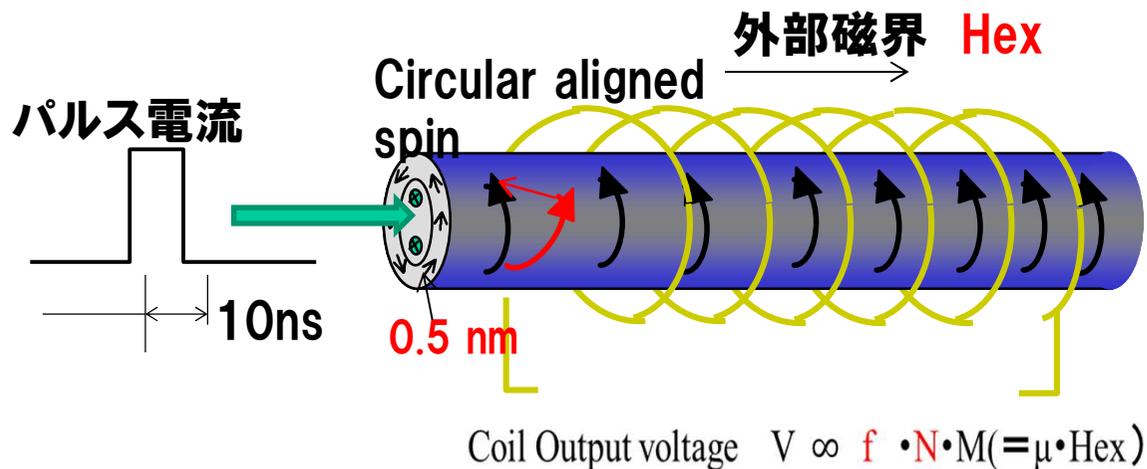
Low noise at peak detection timing



Nearly no hysteresis



# GSRセンサの潜在力 SQUIDに匹敵するマイクロpTセンサの開発



スピンの一斉回転現象で磁壁移動を伴わないなら、磁気ノイズは以下の理論で予測される  
 ⇒ 1pT以下も夢ではない

磁気検知部の大きさ

磁気NOISE  $\beta = \sqrt{2\alpha K_B T / \gamma M_0 \pi a^2 l} \rightarrow \beta = 0.01 \text{ pT}$

where,  $\alpha$ : magnetic damping factor,  $K_B$ : Boltzmann Factor T: Temperature  
 $\gamma$ : gyro ration,  $M_0$ : saturated magnetization, a: diameter, l: length

➡ 1pT以下の超高感度マイクロ磁気センサの開発に取り組む

# Magnetics開発戦略

20世紀はElectronicsの時代、21世紀はMagneticsの時代

1. はじめに 自己紹介
2. IOT時代の磁気センサの開発
  - 1) 超感度マイクロ磁気センサ(GSRセンサ)の発明
  - 2) GSRセンサの応用  
自動車用・電子コンパス・生体磁気検出・生体内ナビ
3. エネルギー問題への挑戦 Energy Magnetics専門研究会
4. 21世紀Magneticsによるビッグイノベーション 未来テーマ
5. Magnetics分野から見た日本産業への提言

2019年05月30日

本蔵義信

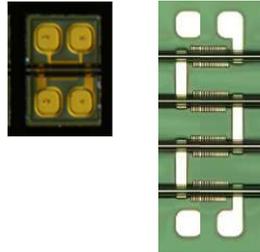
工学博士

マグネデザイン(株) 代表取締役社長

# Promising Applications for GSR sensor

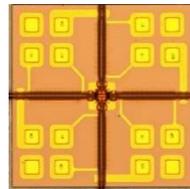
## Project 1) Standard type for **car use**

- wide range of 80G
- high resolution of 3mG/LSB in 16bits
- Analog circuit Bandwidth of 1MHz



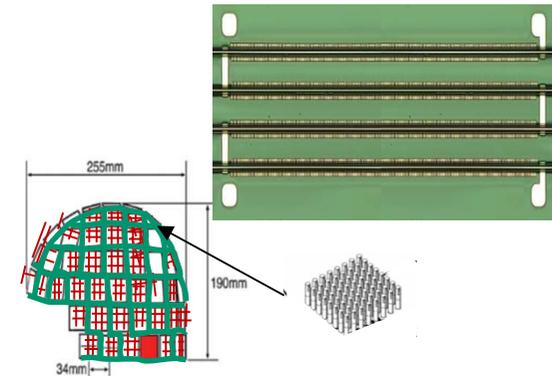
40 sensors used in one car

- Angle sensor,
- speed sensor,
- Current sensor



## Project 3 ) pT meter to **detect the bio-magnetism**

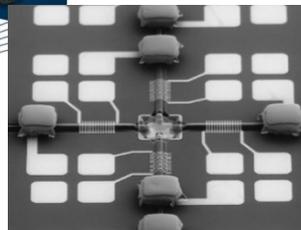
- noise under 1nT
- **Developing** for a wearable type of magnetoencephalography instead SQUID



## Project 2) the XYZ dimensional type for **Gyro-Compass**

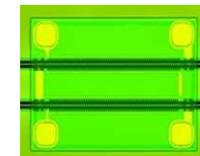
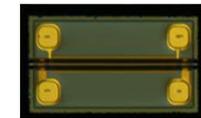
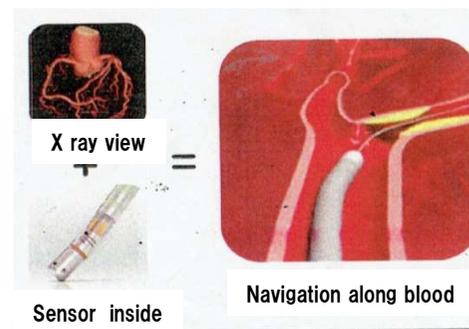
used in wearable computer

- 3 dimensional type GSR element
- Low noise under 1mG and high speed mearing 1KHz



## Project 4) ultra small type for **catheter navigation in Body**

- size of width 0.4mm and length 1.2mm
- keeping the performance of the standard type



# Application : producing Various prototypes of GSR elements

| Length            | 0.16mm | 0.45mm | 0.96mm |
|-------------------|--------|--------|--------|
| Coil turn numbers | N=16   | N=66   | N=148  |

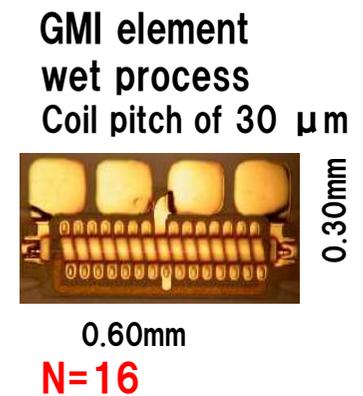
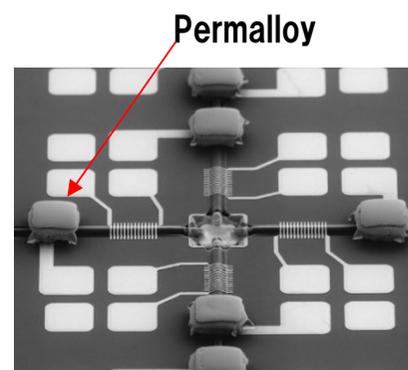
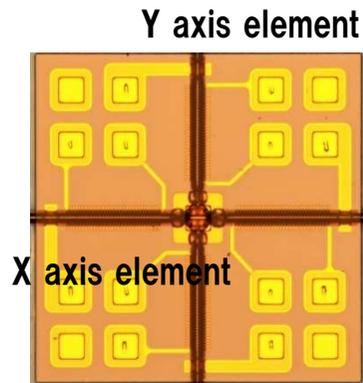
a) One wire types

b) Two wire types

c) Four wire types

d) X=Y axis wire types  
 $N=31 \times 4 = 124$

e) X=Y=Z axis wire types  
 $N=14 \times 4 = 56$



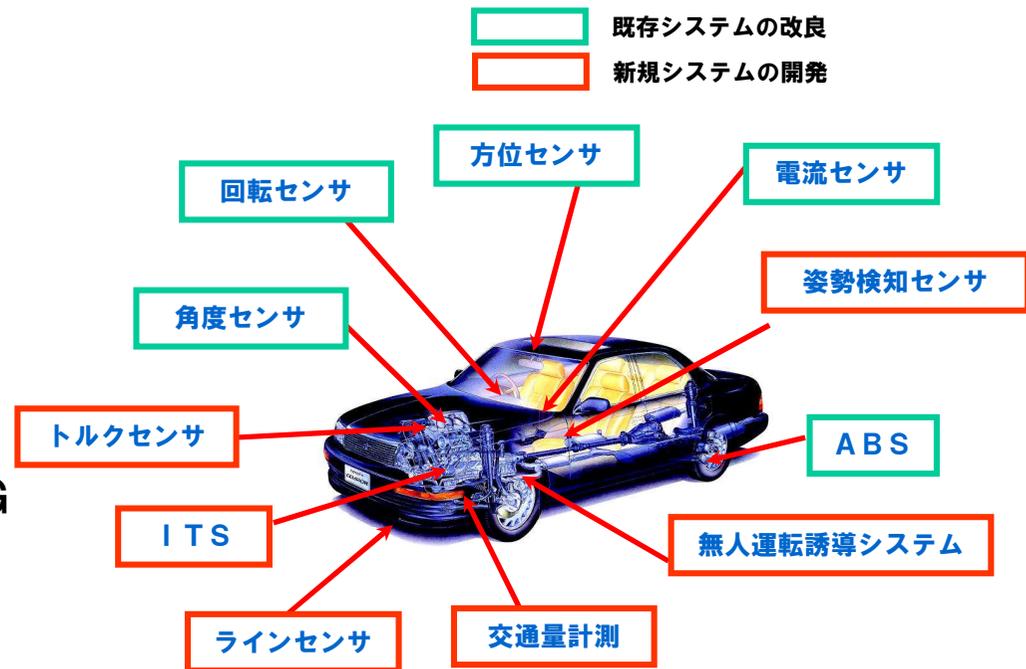
# ターゲット 1 : 自動車用GSRセンサの開発

## 1) 磁気センサは多数(35個/台) 使用されている

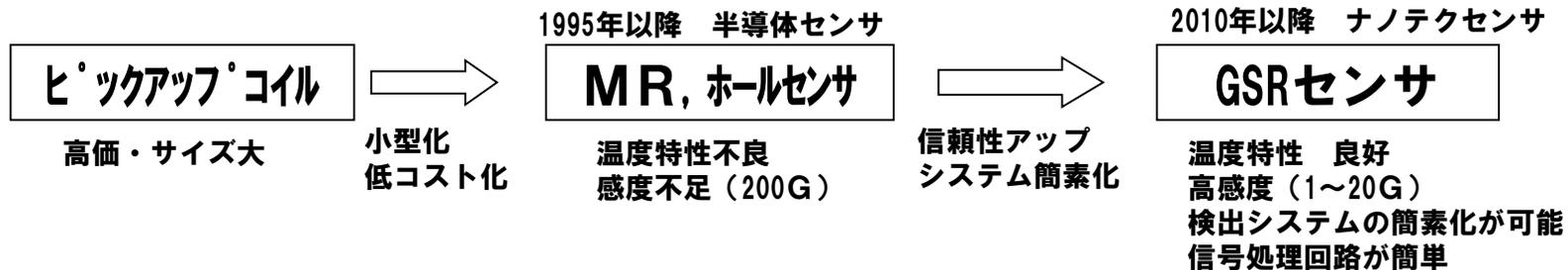
→ 無人運転時代、運転者並みのより精密なデータが求められる

### 課題

- ・磁石・電流磁界の検出 測定レンジ±100G  
⇒アモルファスワイヤ長さ 0.2mm程度
- ・高分解能の維持 5mG検出し 16ビット
- ・直線性 2%⇒0.1%
- ・高速 500KHz



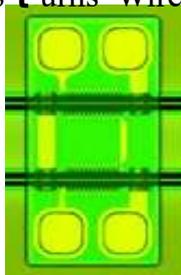
## 2) 自動車分野の磁気センサの動向



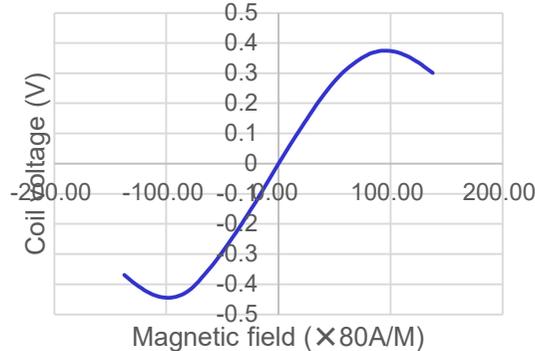
# Basic properties of Prototype of GSR sensor for Automobile use

Element size is very small

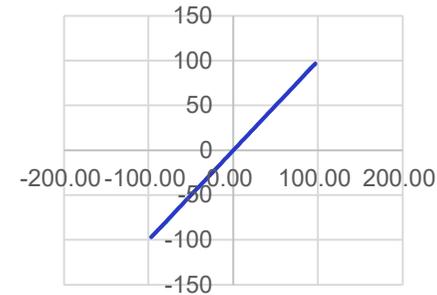
L:0.22mm W:0.34mm  
N: 28 turns Wire: 2



Sin functional relationship  
High sensitivity is 10mV/G



Arcsin transformation to make linear relationship  
(Linearity of 0.5%FS) Linearity correction will improve under 0.1% FS  
Measuring range extend to 80G



磁場換算値[G] 直線[G]

Output voltage vs magnetic field

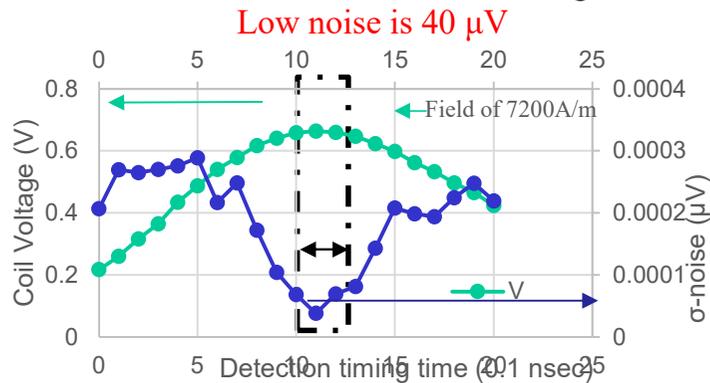
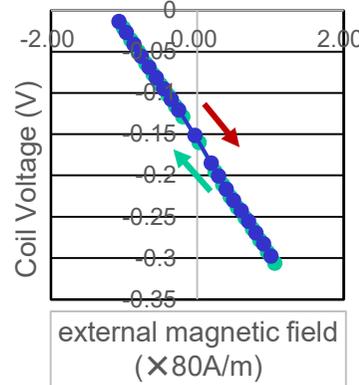


Fig.12 detection timing vs  $\sigma$ -noise

No hysteresis



Analog Circuit bandwidth : 500KHz  
⇒1MHz possible  
ODR is 5KHz  
Power consumption is 0.4mA  
ADC has 16 bits

1MHz is possible  
Under conditions of  
• Power consumption : 10 times larger  
•  $\sigma$ -noise : 3 times higher

# ターゲット2：ウェアラブルCPU用の第3世代電子コンパス

- 6軸Fusionは、**電子コンパス（第2世代）** + 加速度センサを融合
- 9軸Fusionは、**電子コンパス（第3世代）** + 加速度センサ + MEMSジャイロ  
⇒方位精度 3倍 + リアルタイム性 + 小型化

6軸コンボパーツ

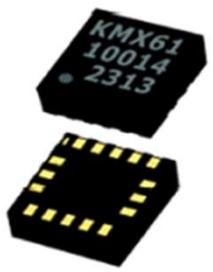


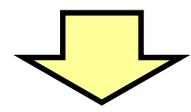
図1. Kionix社の磁気ジャイロを内蔵した6軸Fusionセンサ  
サイズ: 4×4×0.9mm



図4 開発が進むウェアラブルコンピュータ



図3 MEMSジャイロを内蔵した9軸Fusionセンサ サイズ: 4×4×1mm



**第3世代電子コンパスの開発**

- ①方位精度 3倍 (±10度⇒3度)
- ②磁気ジャイロ MEMSジャイロ省略
- ③小型化 1/5

# 第三世代電子コンパスの仕様

2000年代

第一世代: 携帯電話用電子コンパス

3次元方位計 (加速度センサ併用)

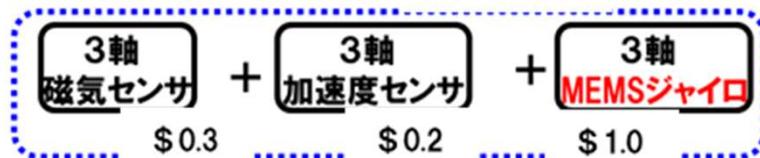
カーナビ、歩行者ナビ、ARサービス応用

第2世代: 次世代電子コンパス

モーションセンサ機能を付与(ジャイロ併用)

MEMSジャイロ融合の3次元方位計  
(9軸Fusion)

合計 \$1.5



第三世代電子コンパス

磁気ジャイロ活用で、低消費電力化

ウェアラブルコンピュータ用 合計0.5 \$



## ・第3世代

ウェアラブルコンピュータ用 Apple仕様 Googleも同様

Apple 次世代電子コンパスの仕様

AMI306 に比較して基本性能を 32 倍アップが必要 ノイズ 4 倍、サイズ 1/2、レンジ 2 倍、消費電流 1/2=32 倍

Compass ERS Addendum: For Justification please see Compass ERD

Component Specification Summary

| Parameter                            | Request Specification     | Note   |
|--------------------------------------|---------------------------|--|
| Dynamic Range                        | ± 2400µT                  | Each axis. Vendor to provide schedule guidance.                      |
| Alternative Dynamic Range            | ±1200µT                   | Each axis. Vendor to provide schedule guidance.                      |
| Power Consumption                    | < 0.25mW                  | At 200Hz ODR   |
| Minimum supply Voltage               | < 1.71V                   | Nominally operating at 1.8V  |
| Noise                                | < 0.1 µT                  | At 200Hz ODR <b>10倍精密</b>  |
| Output Data Rate                     | ≥ 200Hz                   | <b>4倍高速</b>  |
| Wake-up Time                         | ≤ 10ms                    | From Standby to First Sample   |
| Compass Axial Measurement Delay      | ≤ 50 µsec                 | Delay between X-, Y-, Z-, and temperature measurement                |
| Thermal Offset Coeff.                | ≤ 0.05 µT/°C              |  |
| Strain Offset Coeff.                 | ≤ 2.5nT/ µ-strain         | 4-pt bending test, strain applied parallel to sensor X- and Y- axis. |
| Cross Axis Sensitivity               | ≤ 0.5%                    | All axis.  |
| Sensitivity Mismatch                 | ≤ 1%                      | Maximum between all axis.  |
| External Magnetization Survivability | ≥ 0.5T                    | *See <i>Compass External Field Exposure</i> for test method          |
| Self Test                            | Yes                       | Sensing axis functional test.  |
| Interface                            | I2C + SPI                 |  |
| Maximum Size                         | ≤ 1.68mm x 1.68mm x 0.8mm |  |

\*: External magnetization survivability test as followed-

- 0.5T permanent magnet affixed to sensor, with magnetic axis aligned with the Z-axis of the compass.
- Sensor and permanent magnet are placed in a temperature chamber at 85°C for 24hr.
- After the 24hr temperature soak, the chamber is cooled down to room temperature at the fastest ramp rate possible.
- The magnet is removed in the Z-axis of the compass.

# ①電子コンパスの方位精度目標 方位精度 0.2° 方位分解能0.1°

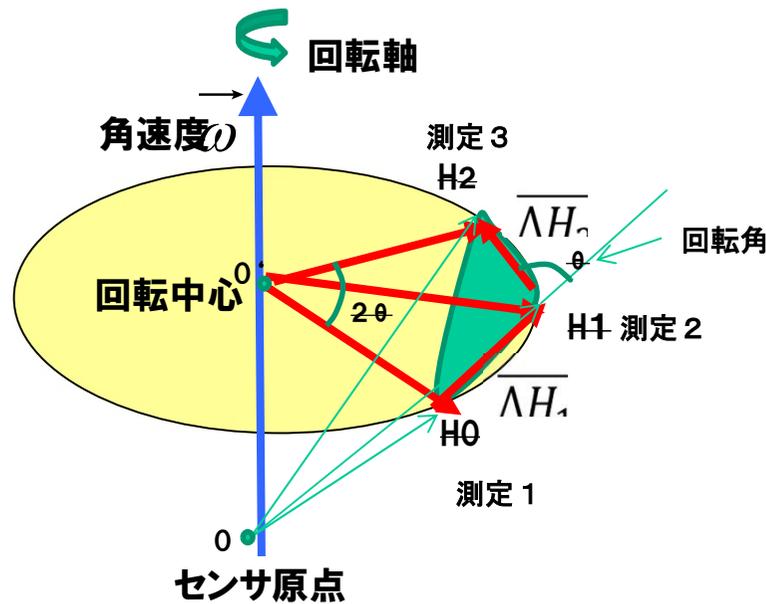
表1 MIセンサ方式が最も優れた方位精度を示す

|      | MI センサ<br>愛知製鋼 AMI304   | ホールセンサ<br>AKM8974   | GMR センサ<br>YS525   | MR センサ<br>HMC5843  |
|------|---|---|--|--|
| 生データ | <p>Y axis magnetic field strength</p> <p>X axis magnetic field strength</p>   | <p>Output Hy (G)</p> <p>Output Hx (G)</p>   | <p>Output Hy (G)</p> <p>Output Hx (G)</p>  | <p>output Hy [G]</p> <p>output Hx [G]</p>  |
| 方位誤差 | <p>方位誤差: <math>\pm 0.72^\circ</math><br/>分解能 : <math>\pm 0.31^\circ</math></p> <p>Accuracy : <math>\pm 1.1^\circ</math><br/>resolution: <math>\pm 0.8^\circ</math></p> <p>Azimuth error(deg.)</p> <p>Azimuth(deg.)</p> <p>Azimuth error <math>\pm 0.72</math> deg.</p> <p>Resolution <math>\pm 0.31</math> deg.</p> | <p>方位誤差: <math>\pm 1.89^\circ</math><br/>分解能 : <math>\pm 4.22^\circ</math></p> <p>Azimuth error(deg.)</p> <p>Azimuth(deg.)</p> <p>Azimuth error <math>\pm 1.89</math> deg.</p> <p>Resolution <math>\pm 4.22</math> deg.</p> | <p>方位誤差: <math>\pm 1.32^\circ</math><br/>分解能 : <math>\pm 0.82^\circ</math></p> <p>Azimuth error(deg.)</p> <p>Azimuth(deg.)</p> | <p>方位誤差: <math>\pm 1.34^\circ</math><br/>分解能 : <math>\pm 3.90^\circ</math></p> <p>Azimuth error(deg.)</p> <p>Azimuth(deg.)</p> |
|      | <p>最新307<br/>Accuracy : <math>\pm 0.3^\circ</math><br/>resolution: <math>\pm 0.3^\circ</math></p>   |   | <p>Accuracy : <math>\pm 1.1^\circ</math><br/>resolution: <math>\pm 0.8^\circ</math></p>  | <p>28</p>  |

# 磁気ジャイロの原理

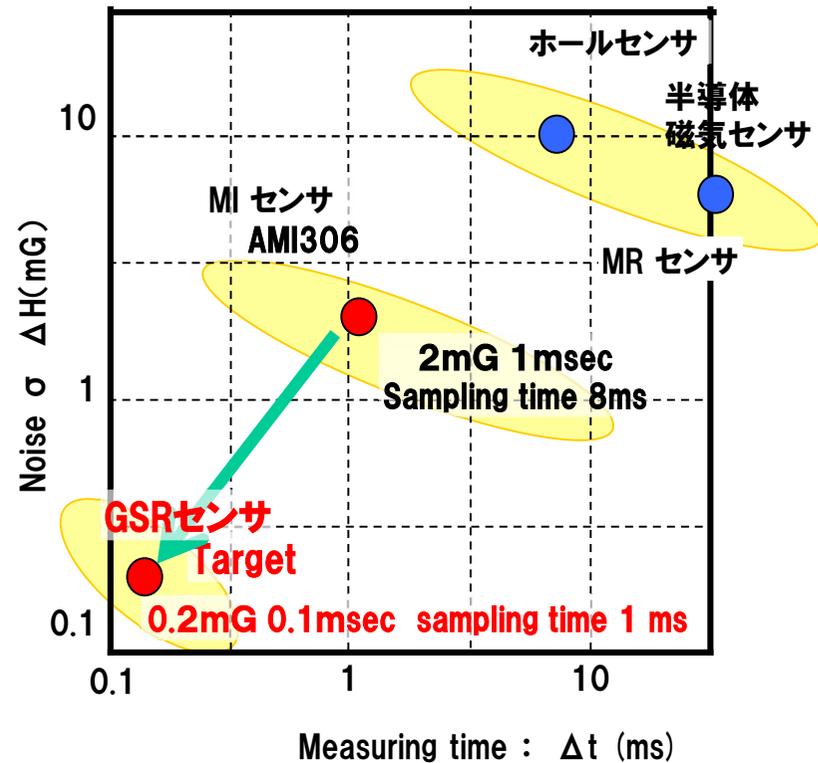
微小時間内  $\Delta t$  (超高速) で 微小変化量  $\Delta H$  が測定できれば、角速度を計算できる

⇒微小磁界検出能 0.2mG 微小時間内 1m秒



磁気ジャイロ角速度の計算式

$$\vec{\omega} = \frac{\overline{\Delta H_1} \times \overline{\Delta H_2}}{|\overline{\Delta H_1}| |\overline{\Delta H_2}| \Delta t} \quad (3)$$



# 試作磁気ジャイロの性能 フリーハンドの回転 回転速度+方位変化

特許取得済み 2015年2月 ⇒米国出願中

## 角速度

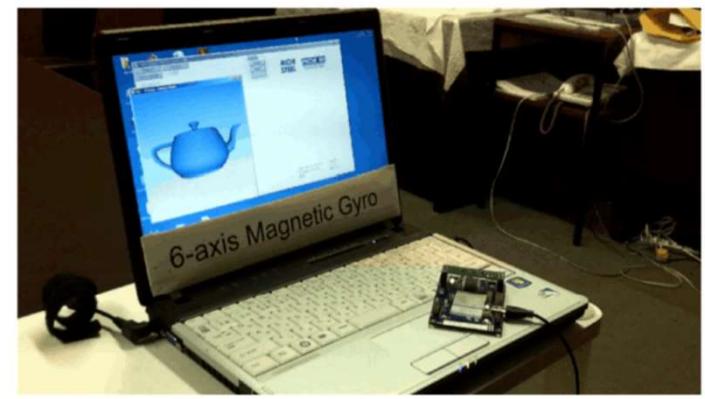
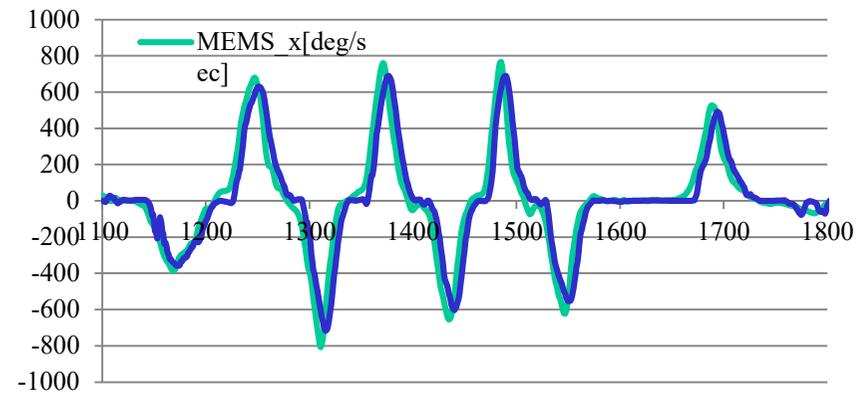
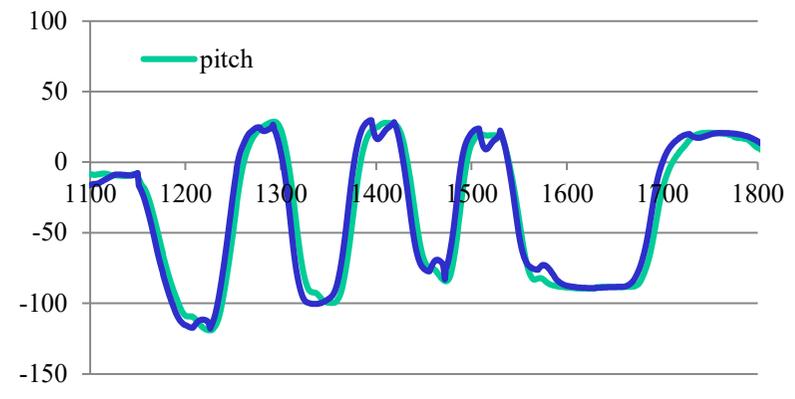


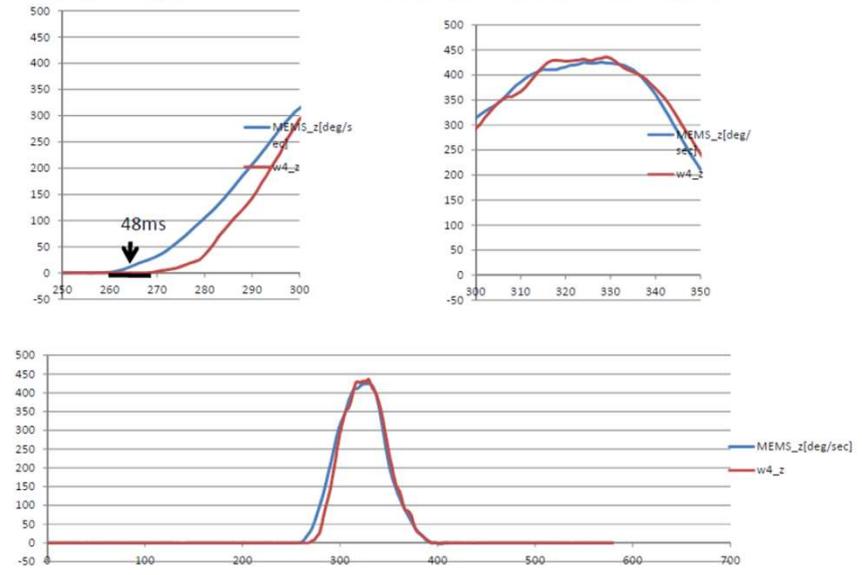
図 磁気ジャイロの性能デモ (ポットが6軸Fusion コントローラで自由回転する)

方位変化 MEMSは静止タイミングが不安定  
ジャイロから姿勢への変化  
磁気ジャイロは計算途中で、融合を実施している

## 方位変化



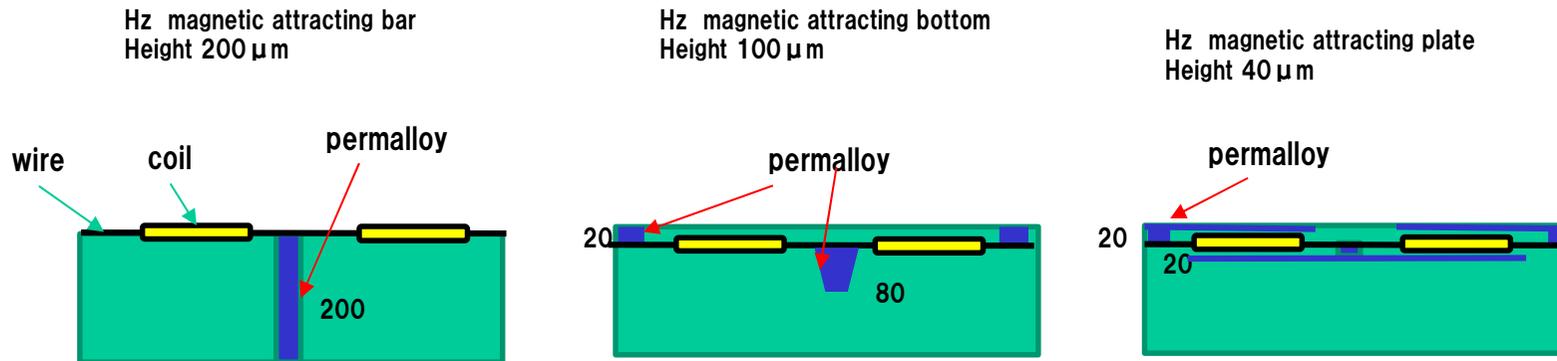
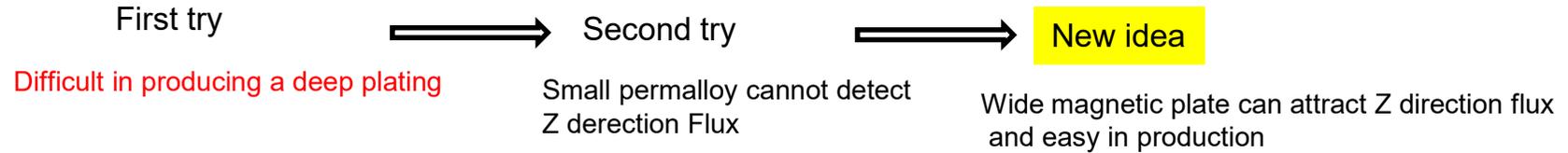
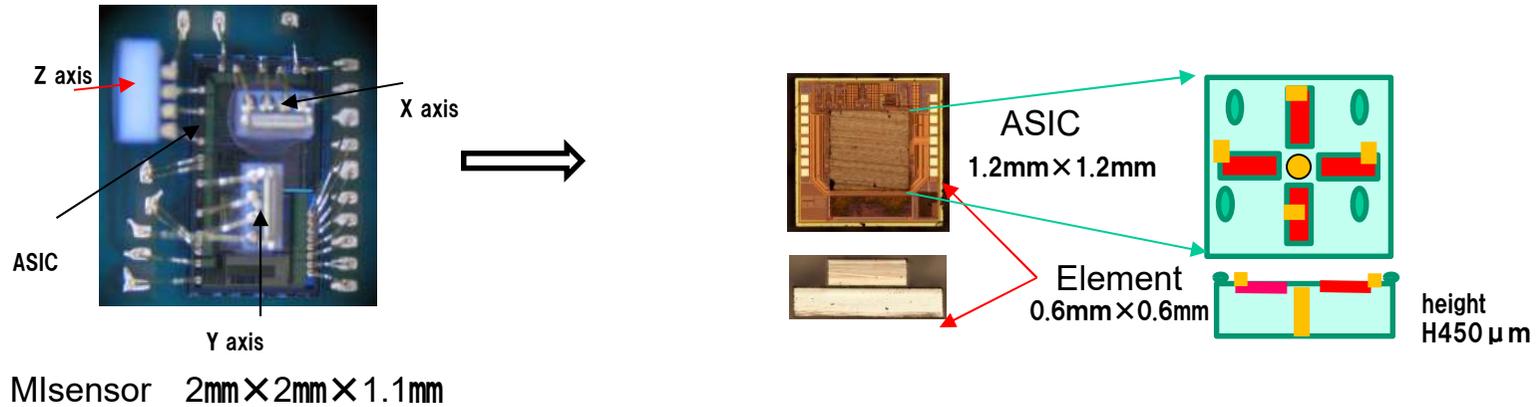
### (5) 問題点 遅れ (ノイズ低減を図る平均化のため)



# 3軸素子の開発

X,Y,Z elements Asembling type during 2002年 to 2012

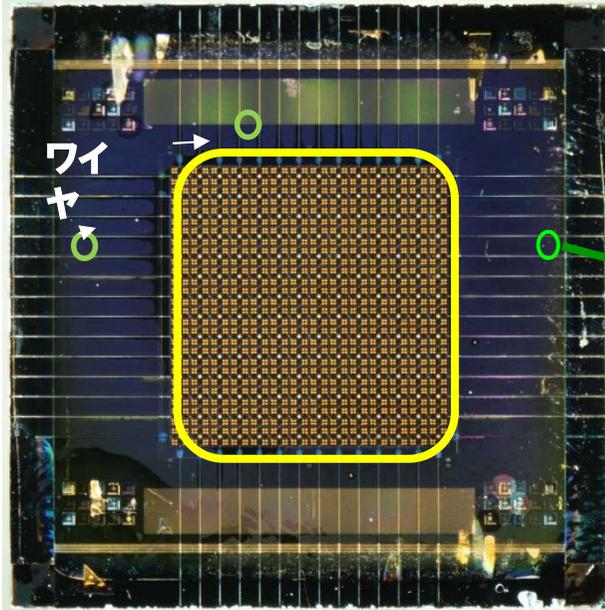
Challenge the development of XYZ element from 2013



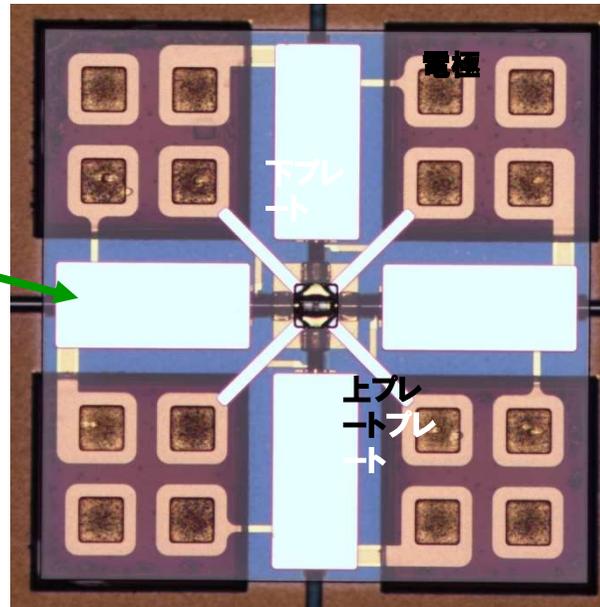
# 3-1(2) 今回の成果: 3軸磁気センサ内蔵 **今回** 超小型3軸センサの試作

confidential

Wafer size 20mm×20mm



Element size : 0.6mm×0.6mm



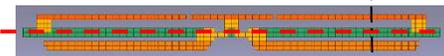
Magnetic attracting plate

W:500 $\mu$ m×L:500 $\mu$ m×t:5 $\mu$ m

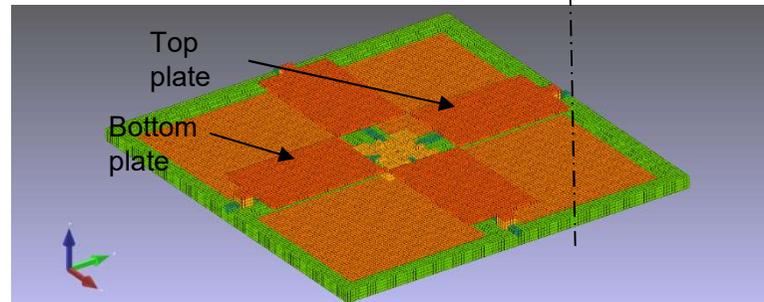
Top plate

GSR element

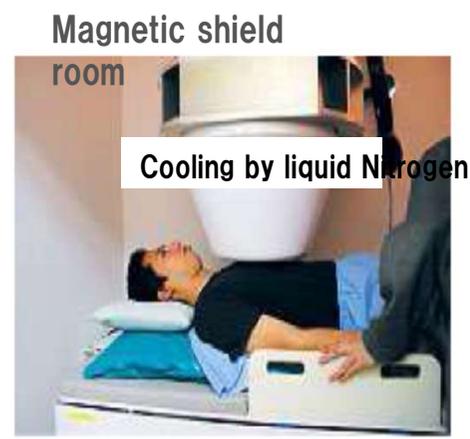
Bottom plate



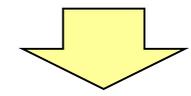
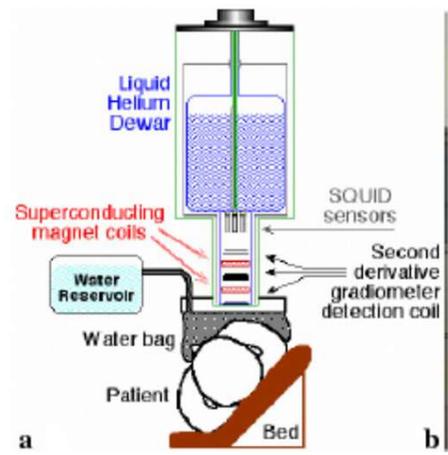
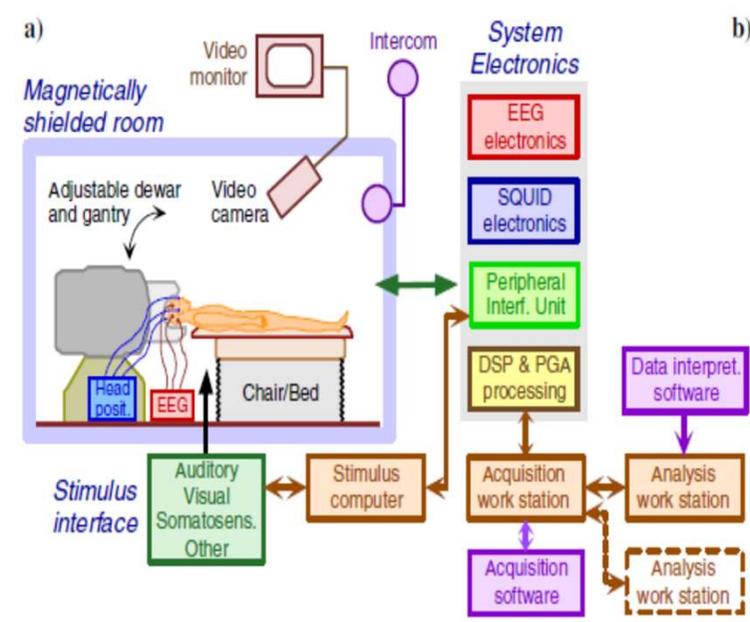
Thickness  
 $\pm 20\mu$ m



# ターゲット3: 生体磁気検出 SQUIDを使った心磁図計と脳磁図計の代替



Magneto-cardiogram using SQUID



SQUID は高性能だが

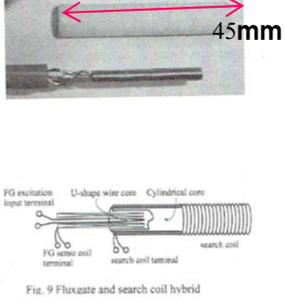
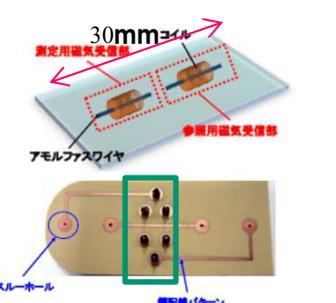
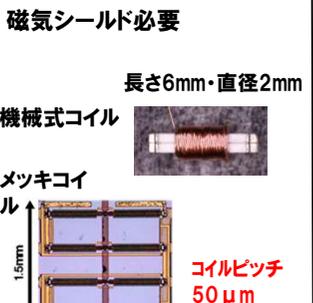
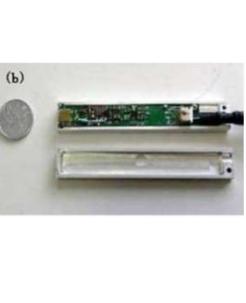
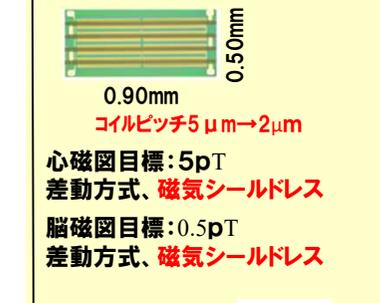
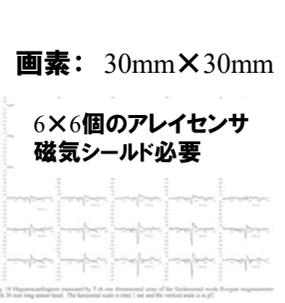
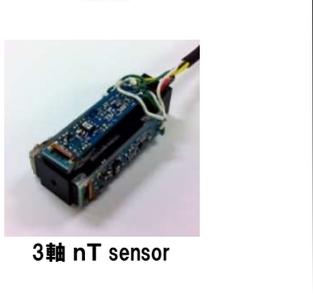
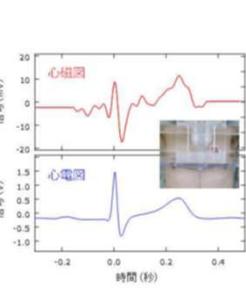
- ・高価
- ・極低温保持装置
- ・磁気シールドルーム
- ・サイズが大きい

⇒ ハンディな装置として使用できない

# SQUID代替を目指した 各種pTセンサの開発状況

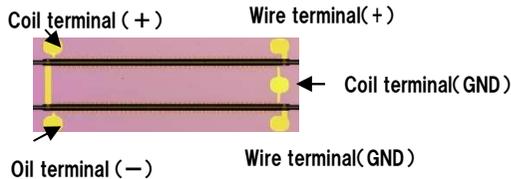
心磁図(100pT以下)・脳磁図(10pT以下)

- 第1ステップ 10pT以下センサで:極低温装置の省略→磁気シールドルームの省略
- 第2ステップ 1pT以下+小型化センサで:3次元化+グラジオ化(深さ位置)

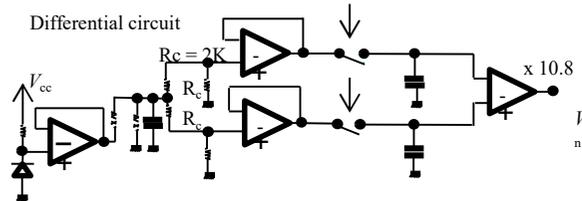
|      | 笹田教授 (九州大学)  | 内山教授 (名古屋大学)  | アイチ製鋼   | 安藤教授 (東北大学)   | マグネデザイン  |
|------|--|---|---|---|--|
| 原理   | FGセンサ  | MIセンサ   | MIセンサ   | tMRセンサ  | GSR センサ  |
| サイズ  | 長さ45mm 直径3mm   | 長さ10mm 直径3mm  | 長さ6mm・直径2mm   | 幅5mm×長さ5mm  | 長さ0.90mm 幅0.50   |
| 素子   | 機械式コイル巻  | 機械式コイル巻   | 機械式コイルとメッキコイル   | 1万個アレイ素子  | 微細加工マイクロコイル  |
| 性能   | 5pT, 磁気シールド必要  | 5pT差動方式、磁気シールドレス  | 10pT (メッキコイルは200pT)   | 100pT⇒性能実現が困難   | 目標:0.5pT   |
| 素子価格 | 2000円/個  | 2000円/個   | 1000円/個(メッキ式200円/個)   | 100円/個  | 40円/個 (小型化で低価格実現)  |
| 素子形状 |  <p>Fig. 9 Fluxgate and search coil hybrid</p>         |                             | <p>磁気シールド必要</p> <p>長さ6mm・直径2mm</p> <p>機械式コイル</p> <p>メッキコイル</p>  |   |  <p>0.90mm<br/>0.50mm<br/>コイルピッチ5µm→2µm</p> <p>心磁図目標:5pT<br/>差動方式、磁気シールドレス</p> <p>脳磁図目標:0.5pT<br/>差動方式、磁気シールドレス</p>  |
| 開発進度 | <p>画素: 30mm×30mm</p> <p>6×6個のアレイセンサ<br/>磁気シールド必要</p>  | <p>固定治具</p>  <p>センサヘッド</p> |  <p>3軸 nT sensor</p>   |  | <p>新方策<br/>GSR原理<br/>マイクロコイル<br/>+<br/>素子デザイン<br/>グラジオ化<br/>3次元化<br/>↓<br/>研究開始</p>  <p>電極端子</p> <p>Z軸回路<br/>X軸回路<br/>Y軸回路</p> <p>40mm<br/>または</p> <p>X軸素子<br/>Y軸素子</p> <p>8<br/>3.3</p> <p>コイルピッチ:<br/>2µm</p> |

# nTセンサの開発

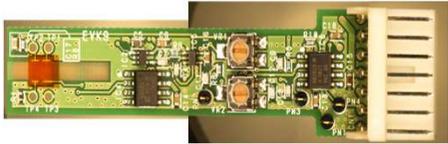
### 1) differential element



### 2) differential circuit



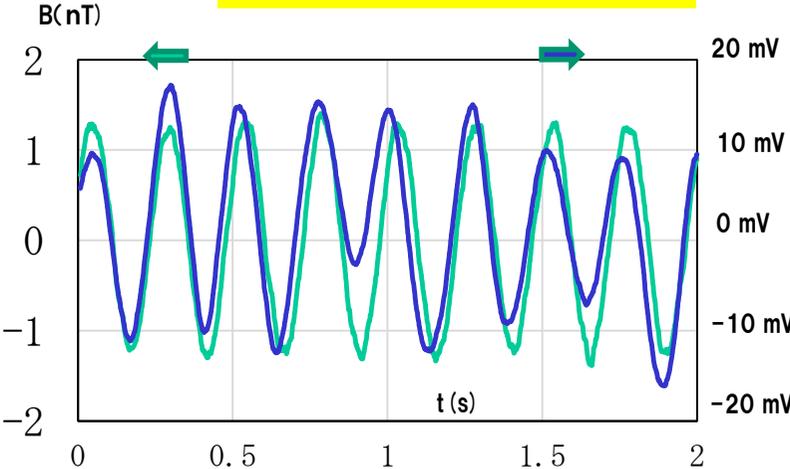
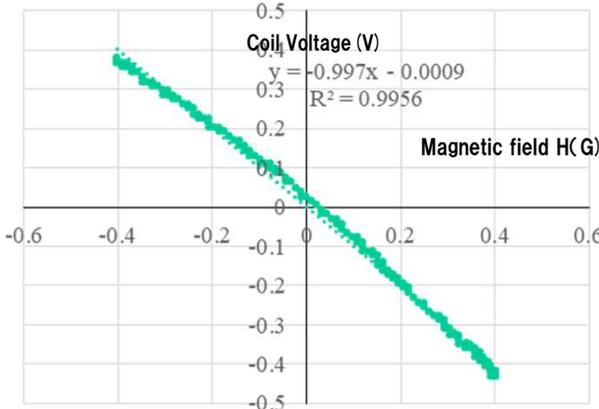
### 3) Circuit board



### 3) Experimental result

**Sensitivity = 1000mV/G**  
**@ GSR element length of 3mm**

**• l=3mm N=528turns**  
**• sensitivity = 1000 mV/G**  
**•  $\sigma$  noise 0.6nT@10HZ**

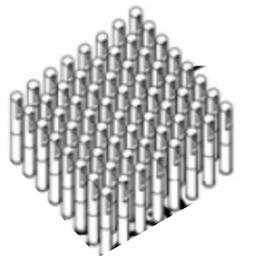
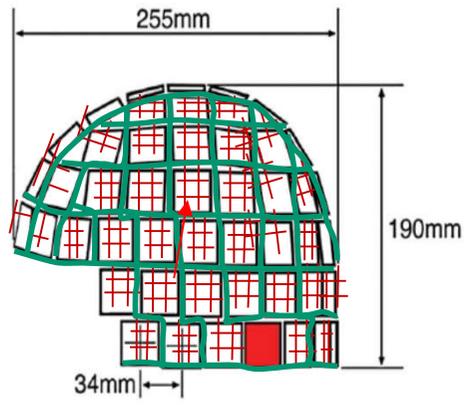


# (4-3②) 磁石内蔵式 今回:3軸センサの2次元グリッドの試作

Cloudnaviに提供済み⇒磁石式ソフトの製作に利用

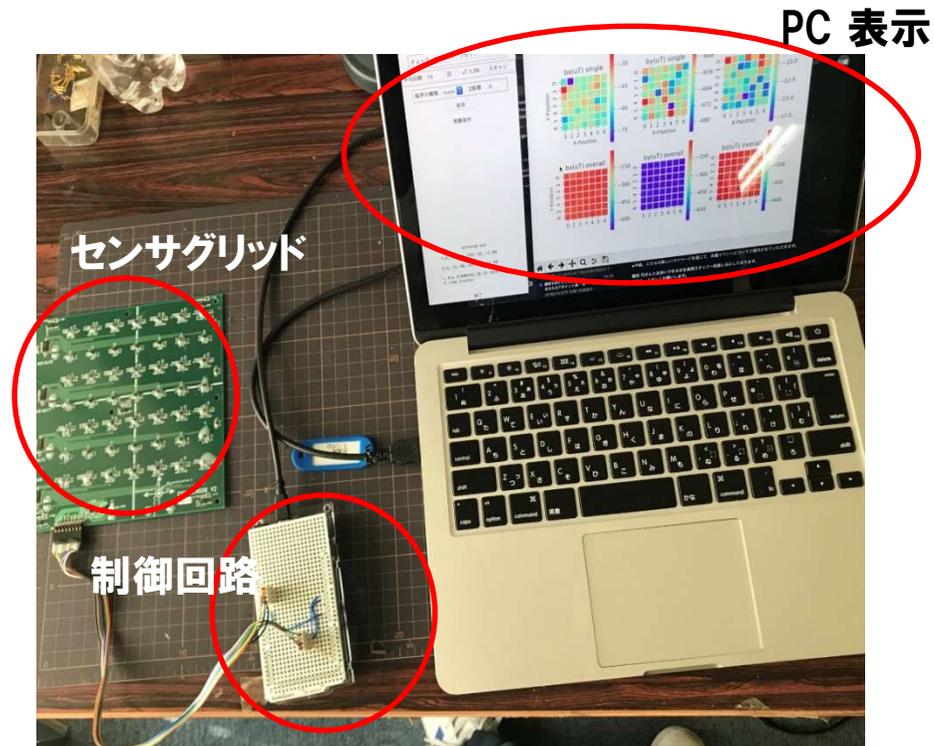
ただし、市販品3軸センサ ⇒ 今後:GSRセンサに置き換える

## 1) センサの設置イメージ



センサグリッド

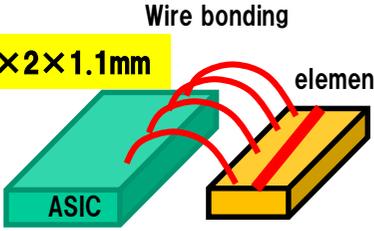
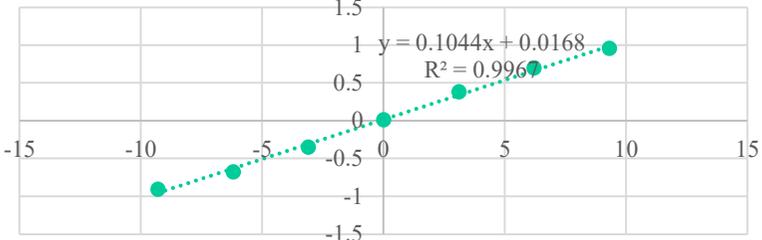
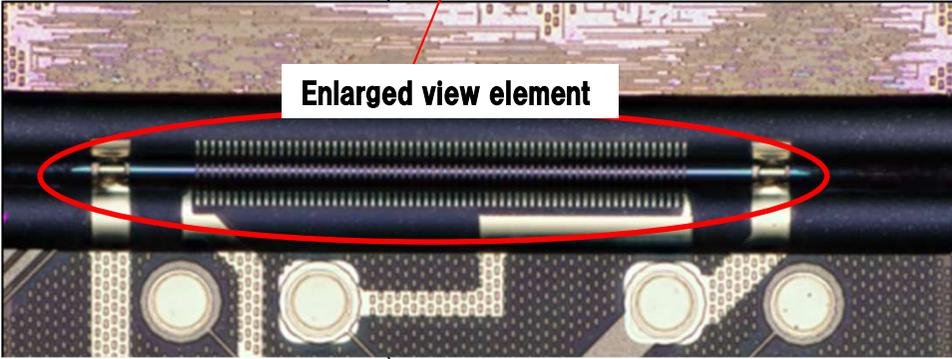
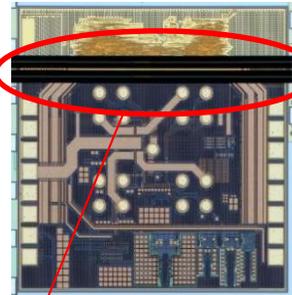
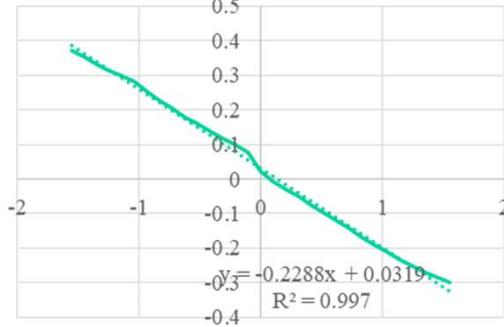
## 2) センサグリッドの試作



# ターゲット4:生体内ナビ 超小型GSRセンサ

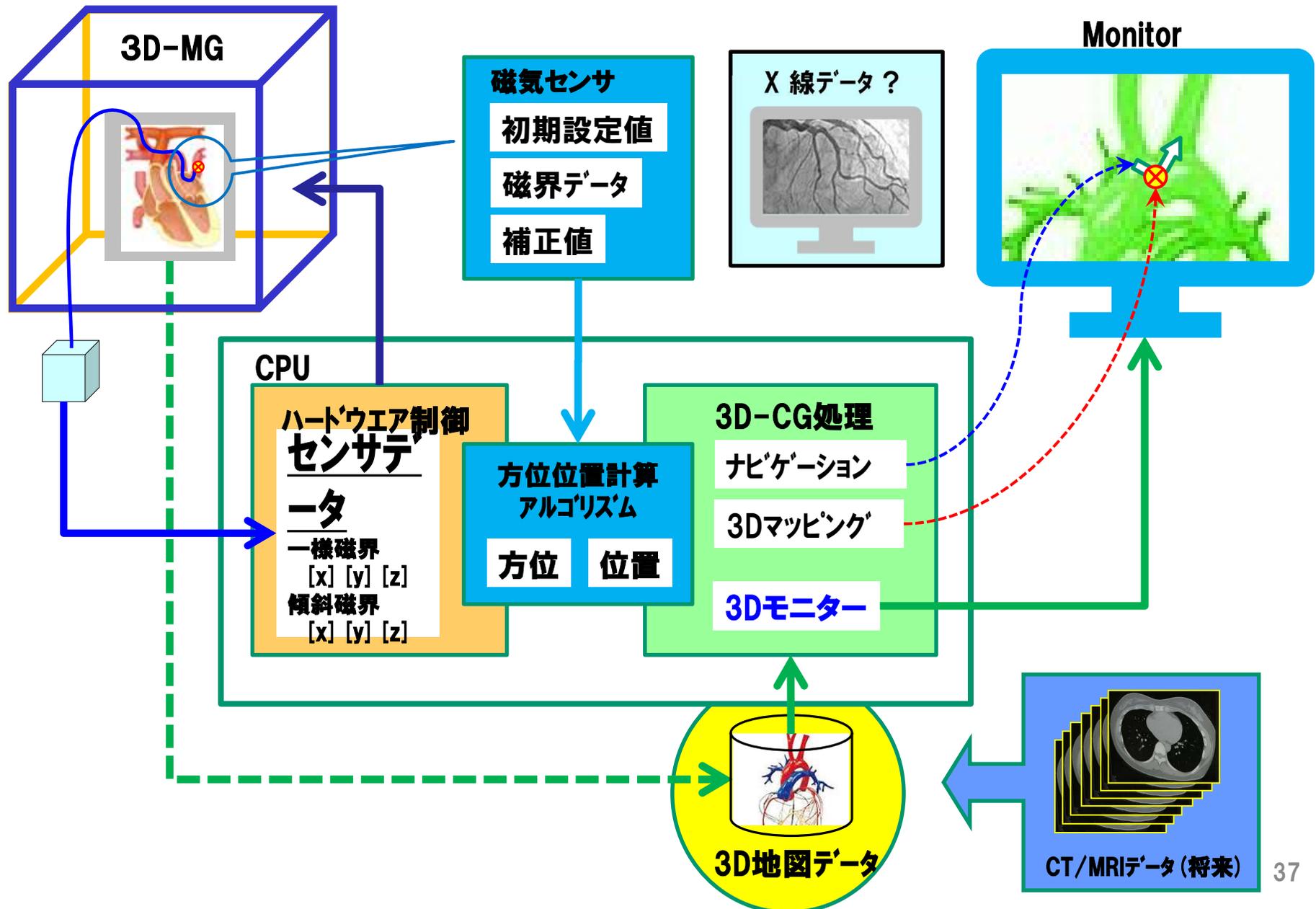
confidential

## On-ASICタイプのGSRセンサ

| Concept  | Prototype   | Output of the sensor   |
|--|---|--|
| <p>Wire bonding</p> <p><b>2×2×1.1mm</b></p>  <p>ASIC</p> <p>element</p>   | <p><b>Element</b></p> <p>Wire length=450 μm<br/>Coil turns=66<br/>Wire resistance=7.7 Ω<br/>Coil resistance=470 Ω</p>  <p>ASIC</p>   | <p><b>Sensitivity: 100mV/G</b><br/><b>ノイズ: 1mG @1KHz</b></p>  <p><math>y = 0.1044x + 0.0168</math><br/><math>R^2 = 0.996</math></p>     |
| <p>GSR sensor On ASIC<br/>(by Semiconductor process)</p> <p><b>ASIC size: 1.2 × 1.2 × 0.2mm</b></p>  <p>element</p> <p>ASIC</p>  <p><b>Enlarged view element</b></p> | <p><b>ASIC size: 1.2 × 1.2 × 0.2mm</b></p> <p><b>Element</b></p> <p>Wire length=450 μm<br/>Coil turns=66<br/>Wire resistance=7.7 Ω<br/>Coil resistance=470 Ω<br/>Thickness = 20 μm</p>  | <p><b>Sensitivity: 230mV/G</b><br/><b>ノイズ: 0.5mG @1KHz</b></p>  <p><math>y = -0.2288x + 0.0319</math><br/><math>R^2 = 0.997</math></p> |

# 3-2①)ナビゲーションプログラム

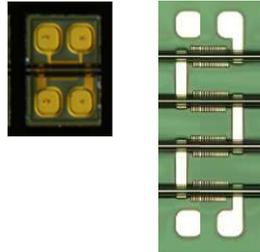
3軸磁気センサ活用のメリット ①特異点解消 ②リアルタイム性改善



# Promising Applications for GSR sensor

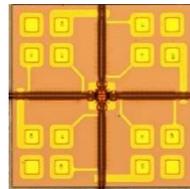
## Project 1) Standard type for **car use**

- wide range of 80G
- high resolution of 3mG/LSB in 16bits
- Analog circuit Bandwidth of 1MHz



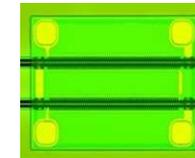
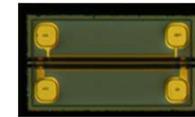
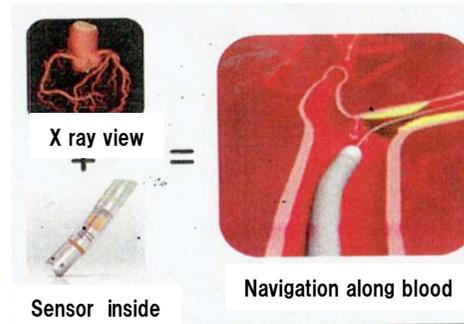
40 sensors used in one car

- Angle sensor,
- speed sensor,
- Current sensor



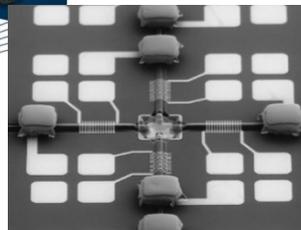
## Project 2) ultra small type for **catheter navigation in Body**

- size of width 0.4mm and length 1.2mm
- keeping the performance of the standard type



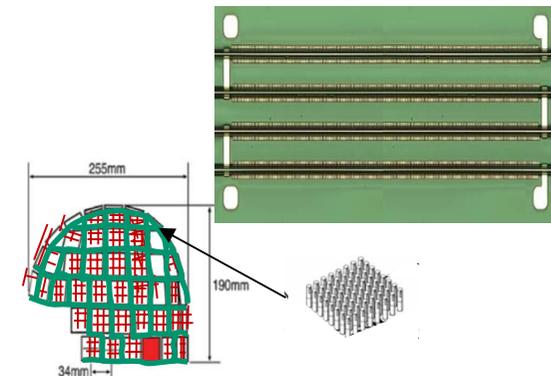
## Project 2) the XYZ dimensional type for **Gyro-Compass** used in wearable computer

- 3 dimensional type GSR element
- Low noise under 1mG and high speed mearing 1KHz



## Project 4) pT meter to **detect the bio-magnetism**

- noise under 1nT
- **Developing** for a wearable type of magnetoencephalography instead SQUID



# Magnetics開発戦略

20世紀はElectronicsの時代、21世紀はMagneticsの時代

1. はじめに 自己紹介
2. IOT時代の磁気センサの開発
  - 1) 超感度マイクロ磁気センサ(GSRセンサ)の発明
  - 2) GSRセンサの応用  
自動車用・電子コンパス・生体磁気検出・生体内ナビ
3. エネルギー問題への挑戦 Energy Magnetics専門研究会
4. 21世紀Magneticsによるビッグイノベーション 未来テーマ
5. Magnetics分野から見た日本産業への提言

2019年05月30日

本蔵義信

工学博士

マグネデザイン(株) 代表取締役社長

## 磁気工学のエネルギー分野への革新的展開

### 基調報告

### Energy Magneticsの研究開発課題

The Progress and challenges of Energy Magnetics to improve Energy Efficiency

- 1) 背景と緊急課題
- 2) Magnetics技術の進展状況
  - ・磁石 ・磁性材料 ・モータデザイン ・デバイス設計
- 3) 将来に向けての戦略的取り組み と 提案
- 4) Magneticsフロンティア分野
- 5) まとめ

2014年12月3日

本蔵義信

日本磁気学会 副会長

マグネデザイン(株) 社長

# 1-1) 背景 21世紀の世界経済とエネルギー使用量の拡大

- 1) 世界経済の拡大 8億人→80億人、自動車、家電 2倍に急増
- 2) **モータ**応用の拡大と技術革新
  - ・モバイル用モータの拡大 (EV自動車、農機具など)⇒軽量・高効率化
  - ・大出力モータの拡大 (リニア、工場自動化、ビル空調など)⇒高効率96%
- 4) **発電**の資源問題 (化石燃料、原子力)⇒再生エネ対応の発電機、新送電システム
- 5) **高効率**装置のフロンティア(磁気冷凍、磁気アクチュエータ、磁気浮上など)

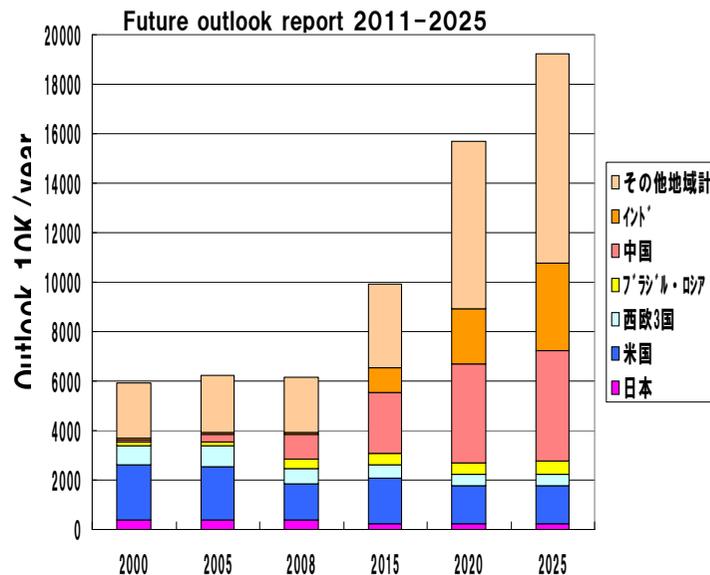


Fig.1 Market trend of automotive use

図1-1) 20年には**自動車の生産量**が2倍に増大

- ・開発途上国で大幅に拡大
- ・先進国は現状レベル



図1-2) **モータ応用用途の拡大** 3分野

# 1-2) 背景 エネルギー・資源問題の重大化と緊急課題

## 1) 原油価格の値上がり

25\$ → 100\$に4倍化

## (2) レアメタルの供給不安

・希土類元素生産は中国に一極集中

Dy,Nd元素価格が10倍暴騰

30\$ /kg→300\$ /kg

・すべて資源が高騰

⇒EVモータの高效率・小型・軽量が重要

⇒MAGHEM (次世代モータ用磁性材料の開発)

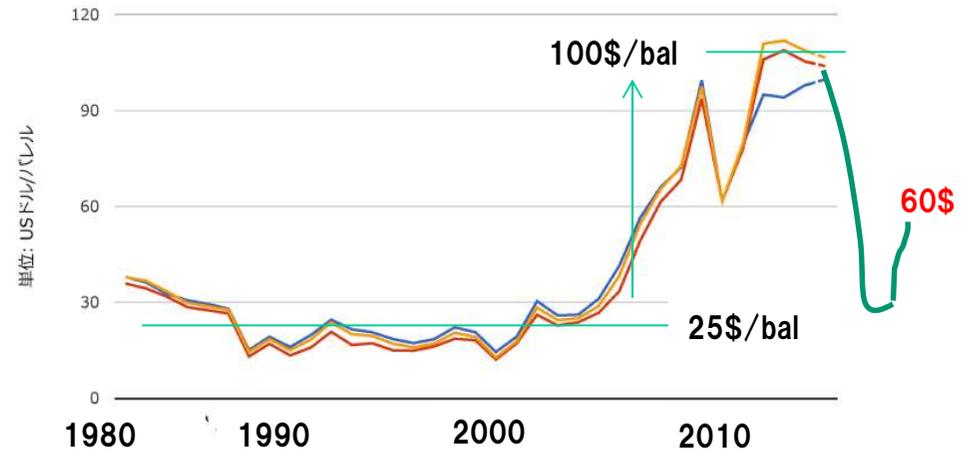


図1-3) 原油価格の推移

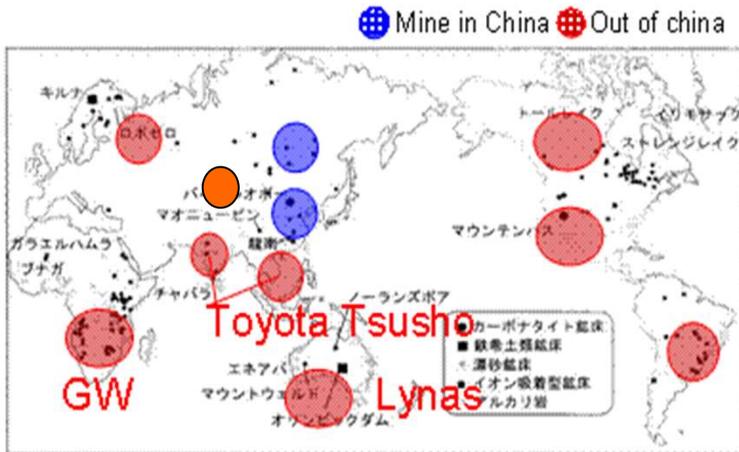


図1-4) 希土類元素の鉱山  
Nd鉱山は広く分布、Dyは中国の偏在

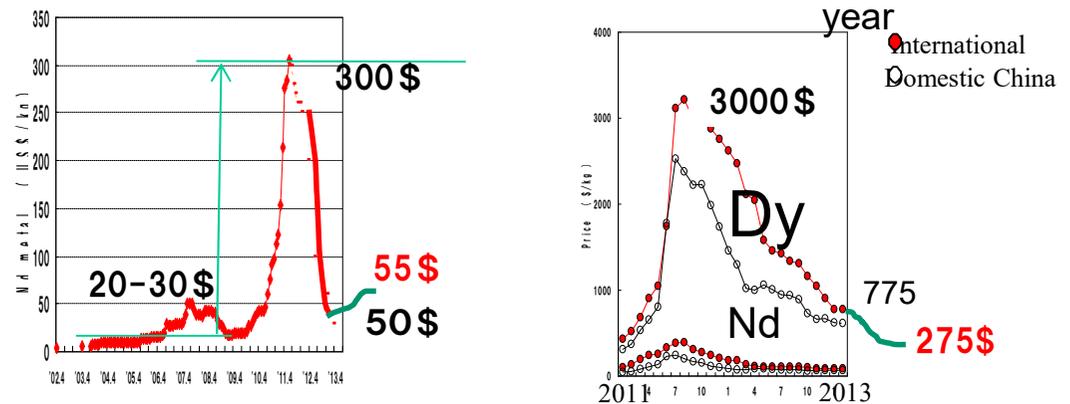


図1-5) Nd/Dy価格の暴騰

⇒2015年 原油・資源ともに暴落  
長期対策の好機

# 米中 貿易摩擦 と レアアース

3 日 版 2019年(令和元年)5月29日(水曜日) 中 日 新

## レアアース対米禁輸 中国当局が検討報道

【北京＝共同】二十九日付の中国共産党機関紙、人民日報は、貿易摩擦を巡る米国の対中制裁強化への報復措置として、レアアース(希土類)の対米輸出を規制する可能性を強く示唆する論評記事を掲載した。習近平国家主席がレアアースを「戦略資源」と呼んだことから、米中貿易摩擦で圧力を強める米国への対抗手段として注目が集まっている。

人民日報系の環球時報の胡錫進編集長も二十八日、中国がレアアース対米輸出規制を「真剣に検討している」とツイッターに書き込んだ。

米国は中国通信機器大手、華為技術(ファーウェイ)向けの部品輸出を禁止し、中国のハイテク産業に圧力を強めている。米中両国による報復の連鎖がエスカレートする恐れもある。

人民日報は米国が軍用品や電子部品の生産で中国のレアアースに過度に依存していると指摘。「米側が、中国のレアアースで作った製品を用いて中国の発展を抑え込もうと考えているなら、中国人民は決して納得しない」と強調した。胡編集長は規制の具体的な進め方には触れなかった。

中国は二〇一〇年九月に沖縄県・尖閣諸島付近で起きた中国漁船衝突事件を機に、日本向けレアアース輸出の規制を強めた過去がある。また経済政策の司令塔役である国家発展改革委員会も二十八日、米中摩擦とレアアースを結び付け、対米輸出規制を示唆した。レアアースは米国などに輸出され、多くのハイテク製品に使われている。

# 1-3) 緊急目標 Energy Magnetics によるモータ効率改善

- 総合効率: **30%ロス**→**5%**に改善
- 磁石の希土類元素使用量低減 **Nd:50%減、Dy:フリー**



高周波駆動に対応した  
新磁石・磁性材料の開発  
それを活用したデバイス設計

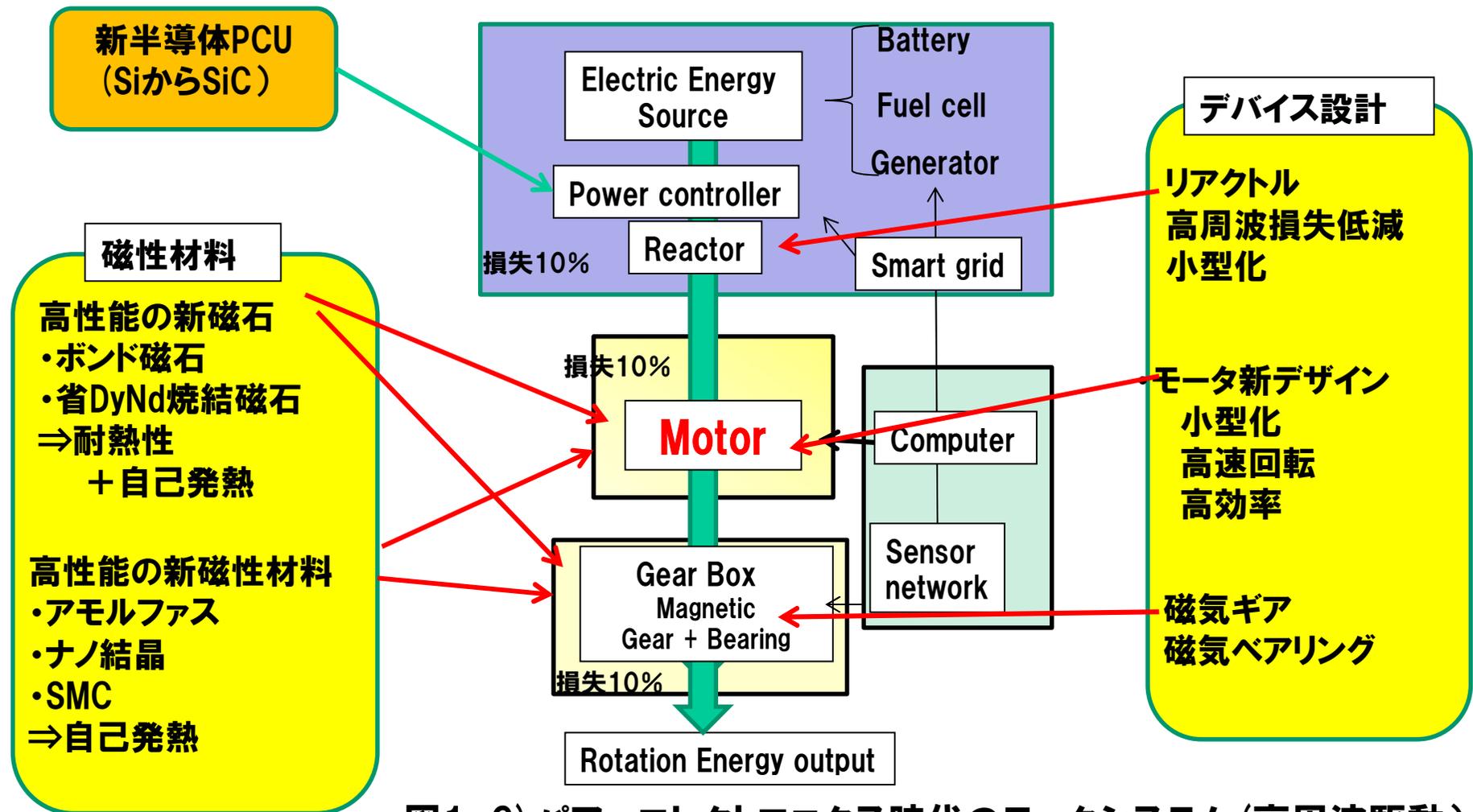


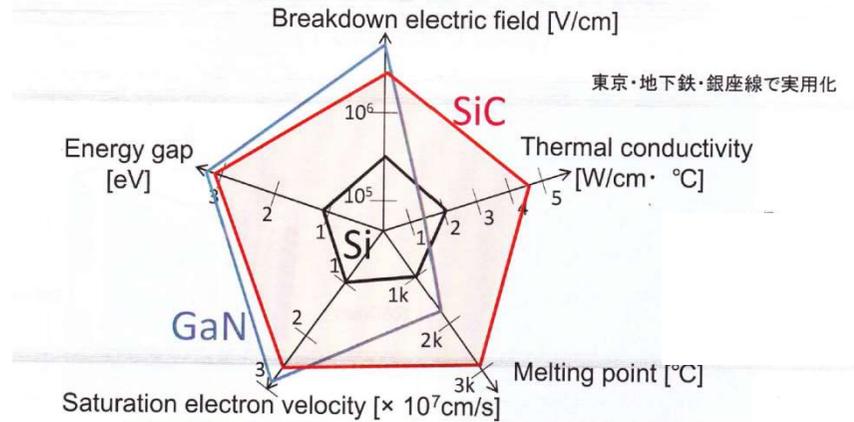
図1-6) パワーエレクトロニクス時代のモータシステム (高周波駆動)

# ボッシュの電気自動車向け "新発想" パワートレイン「eAxle」

eAxleの特徴は、**モーター、パワーエレクトロニクス、トランスミッションという3つのパワートレインコンポーネントを1つのコンパクトなユニットに統合し、車軸をダイレクトに駆動させる点だ。**これにより、パワートレインの効率が一層向上するだけでなく、低コスト化も実現できる。



# 1-4) パワーコントローラPCUの開発状況 Si から SiC へ



- 高周波(5kHz→500kHz)
- 高耐圧化(高電圧)(440V → 6600V)
- 高温化(30°C → 300°C)

図1-7) Si とSiC製PCUの性能比較



図1-8) 新聞記事 14年自動車技術展

# 1-5) 高速回転に伴う磁石の発熱問題 (6000rpm→12500rpm)

## モータ運転中の磁石にかかる磁界測定

- 回転数+スロット数による周波数⇒1KHz~10KHz
- キャリア周波数 ⇒5KHz, 10KHz

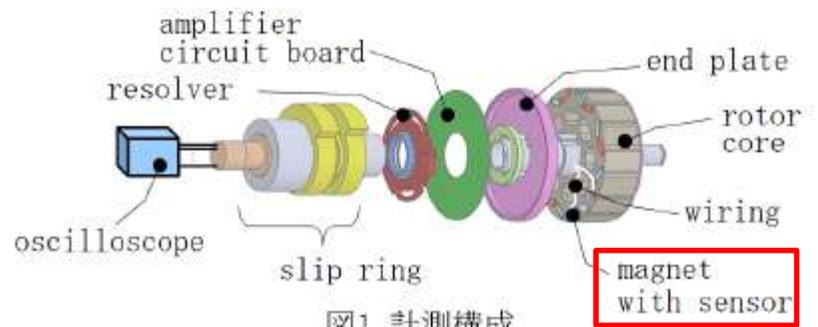


図1 計測構成  
Fig. 1. Measurement setup

表1-1) モータ運転条件

|                            |      |
|----------------------------|------|
| rotation speed [rpm]       | 3000 |
| torque [N·m]               | 40   |
| carrier frequency [kHz]    | 5.4  |
| inverter input voltage [V] | 650  |
| magnet temperature [°C]    | 39   |

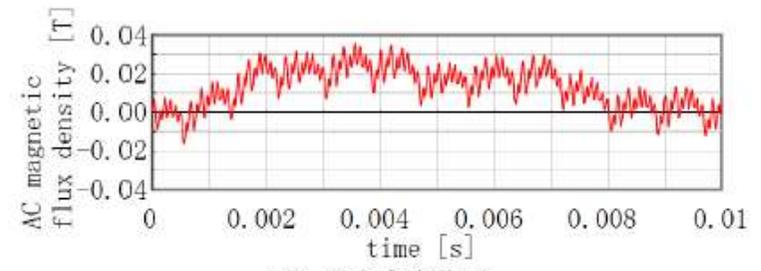


図3 磁束密度波形

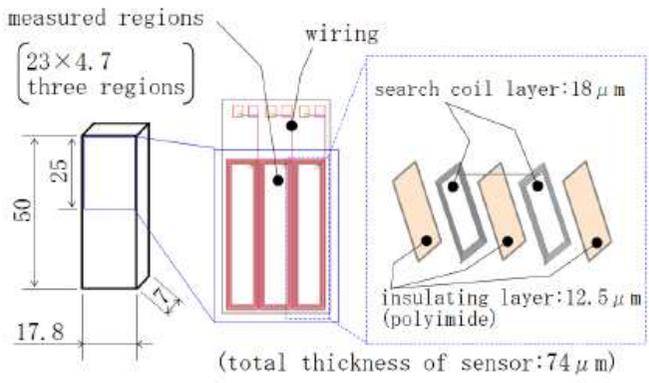


図2 磁束密度センサ

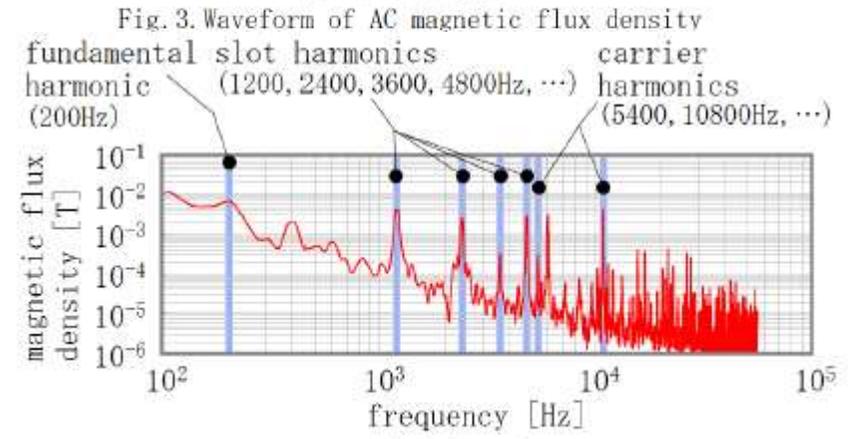


図4 周波数解析結果

図1-9) 薄膜磁気センサと磁界測定装置

図1-10) 測定磁界の周波数解析

# 1-7) 磁性材料の高周波損失 (50Hz+10KHz)

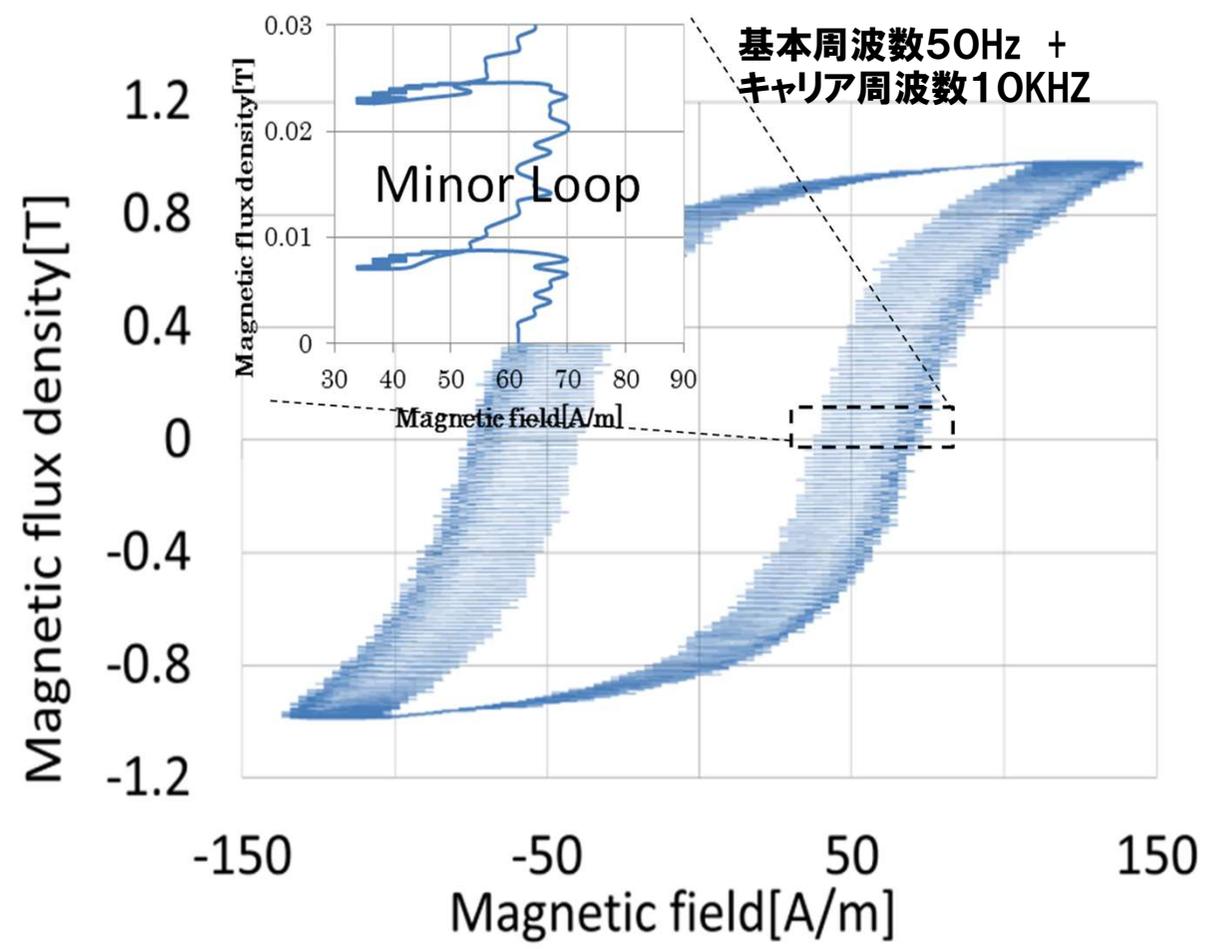


図1-14) インバータ励磁磁の電磁鋼板の磁気特性  
⇒ 損失30%増加  
⇒ 電気抵抗の高い磁性材料の開発

# 2-1) 磁石開発の進展 磁石の高性能化とDy・保磁力対策

①NdFeB磁石の発明  
⇒大出力PMモータ誕生

大出力+モータ効率の大幅アップ

②発熱問題はDy添加で解決  
耐熱温度120℃⇒180℃

中国  
Dy資源問題が発生

③ナノ微細構造で省Dy実現  
(添加量5%から2-3%低減)  
⇒Dy・耐熱性問題の解消

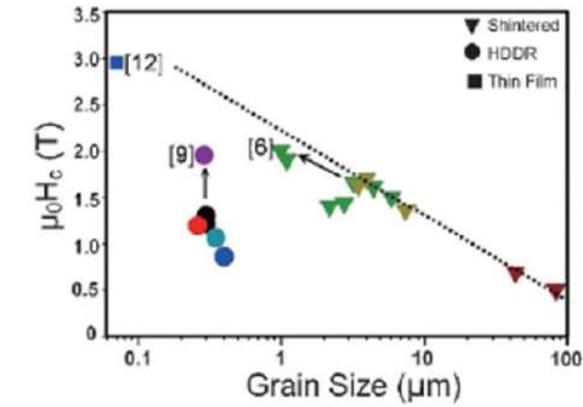


図2-2) 結晶粒微細化で保磁力改善

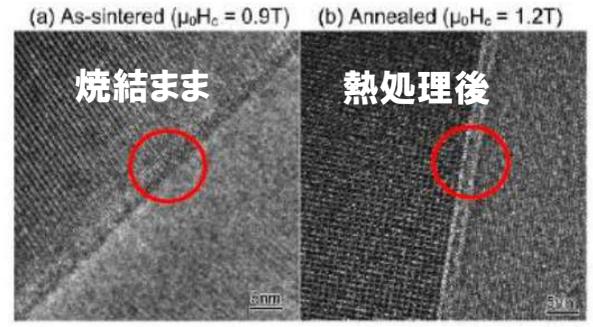


図2-3) 結晶粒相の平滑化による保磁力改善

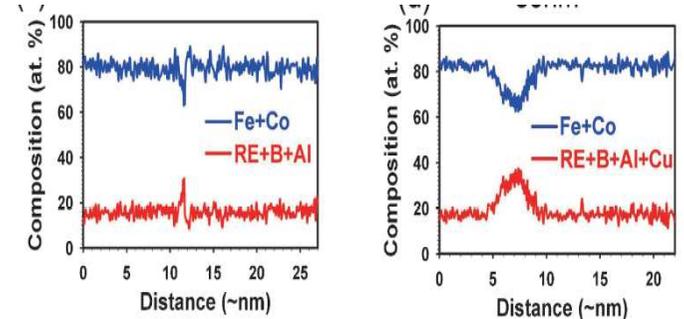


図2-4) 結晶粒Cu濃縮による保磁力改善

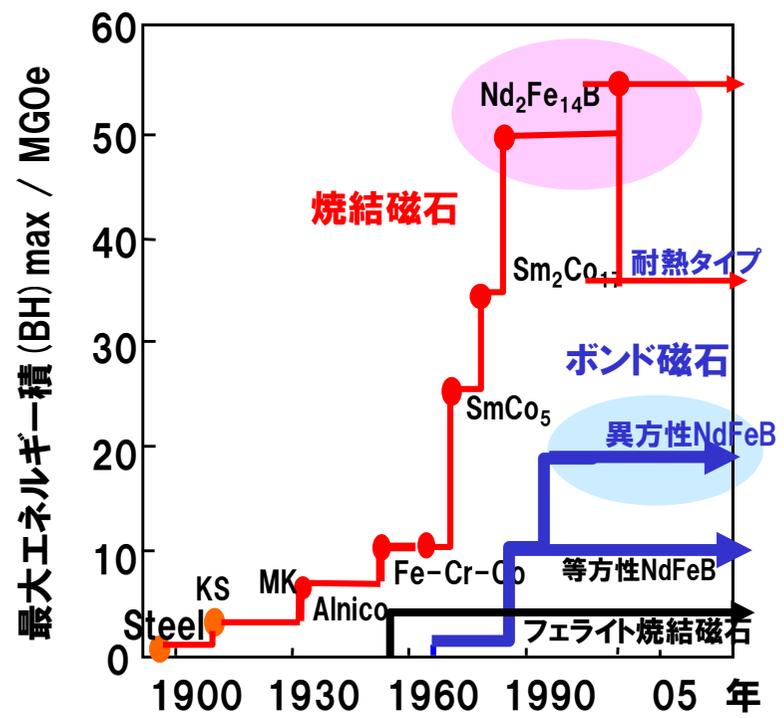


図2-1) NdFeB磁石の発明

# 2-1) Dyフリーのボンド磁石発明 磁石原理

HDDR法によりNd系異方性ボンド磁石の開発(2000年)と量産工場建設生産開始(2010年)  
\*商品名はMAGFINE

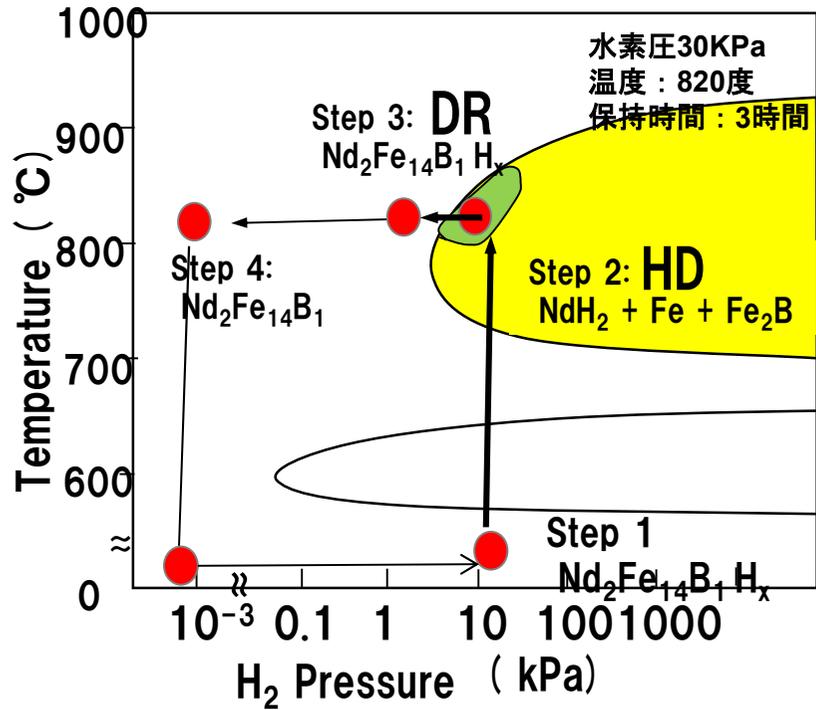


図2-5) d-HDDRの原理と水素熱処理の工程  
⇒ HDDR反応域で異方性発現領域を発見

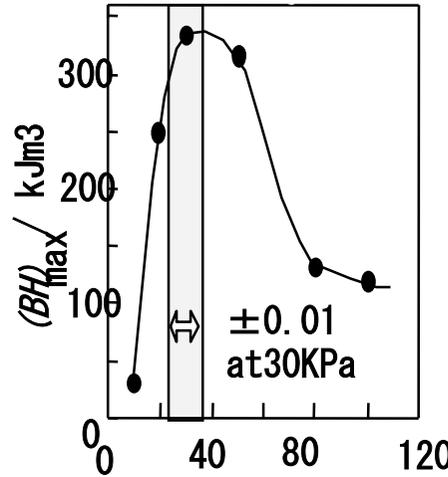


図2-6) 異方性と水素圧力の影響



図2-7) HDDR後の微細組織  
Br=1.38T Hc=14KOe  
BHmax=43MGOe



図2-8) 愛知製鋼(株) HDDR磁粉量産工場

# 2-1) Dyフリーボンド磁石の発明 Dyフリーを実現した技術原理

Dy添加せずに、NdCuAl拡散法で保磁力アップ ⇒ Nd焼結磁石と同等のBHmaxを持つ磁粉ができた ⇒耐熱性+自己発熱問題の解決のめどがたった

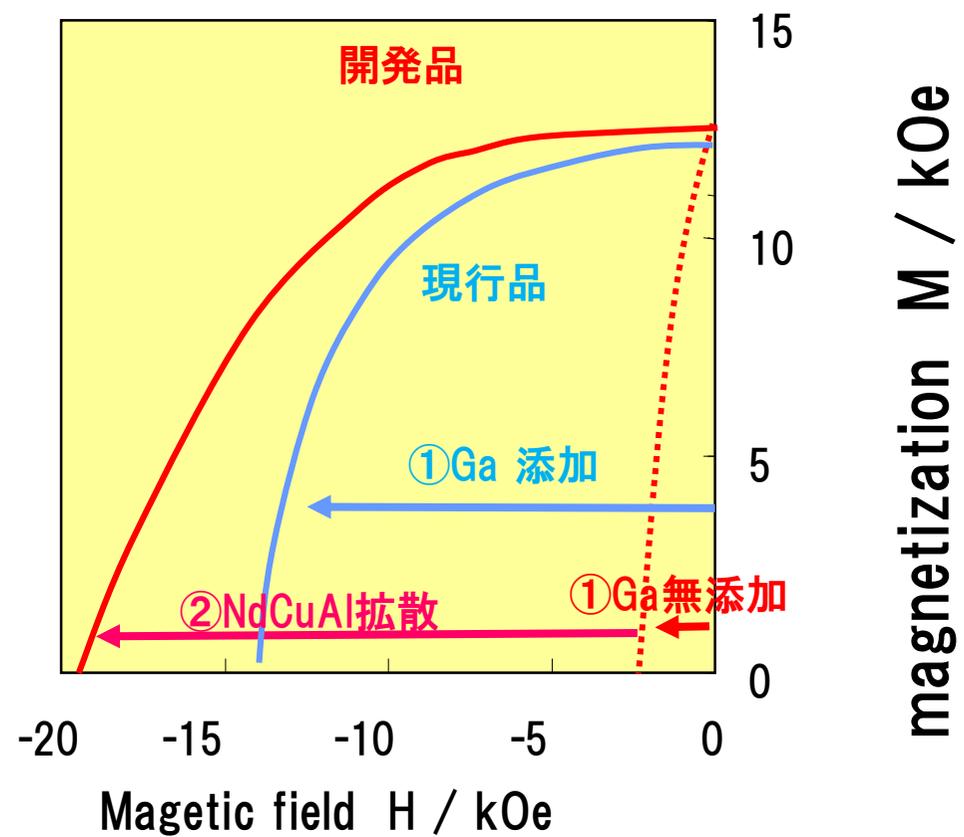


図2-9) Ga+Dy省略=NdCuAl拡散法による保磁力改善  
 Nd焼結磁石: Hc=18kOe, Bhmax=46MG0e  
 MAGFINE: Hc=18kOe, Bhmax=43MG0e

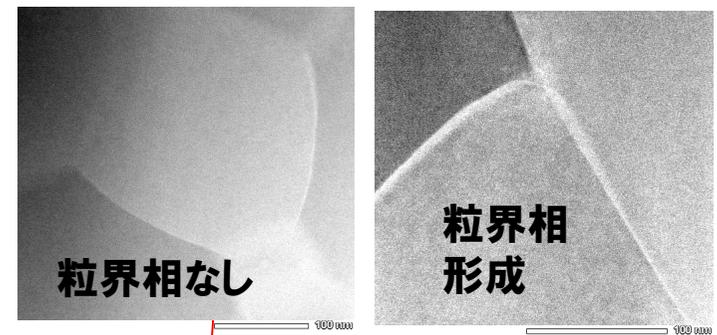


図2-10) NdCuAl拡散処理後のTEM組織

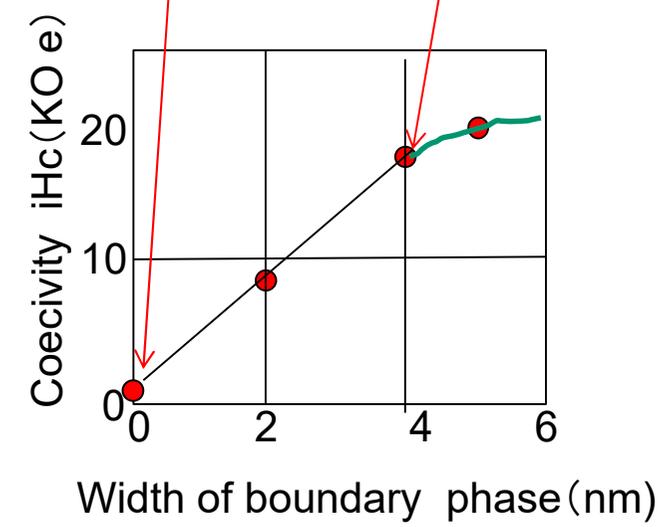


図2-11) 保磁力と粒界相厚さとの関係

# 2-1) 磁石開発の進展 ボンド磁石の成形法の確立

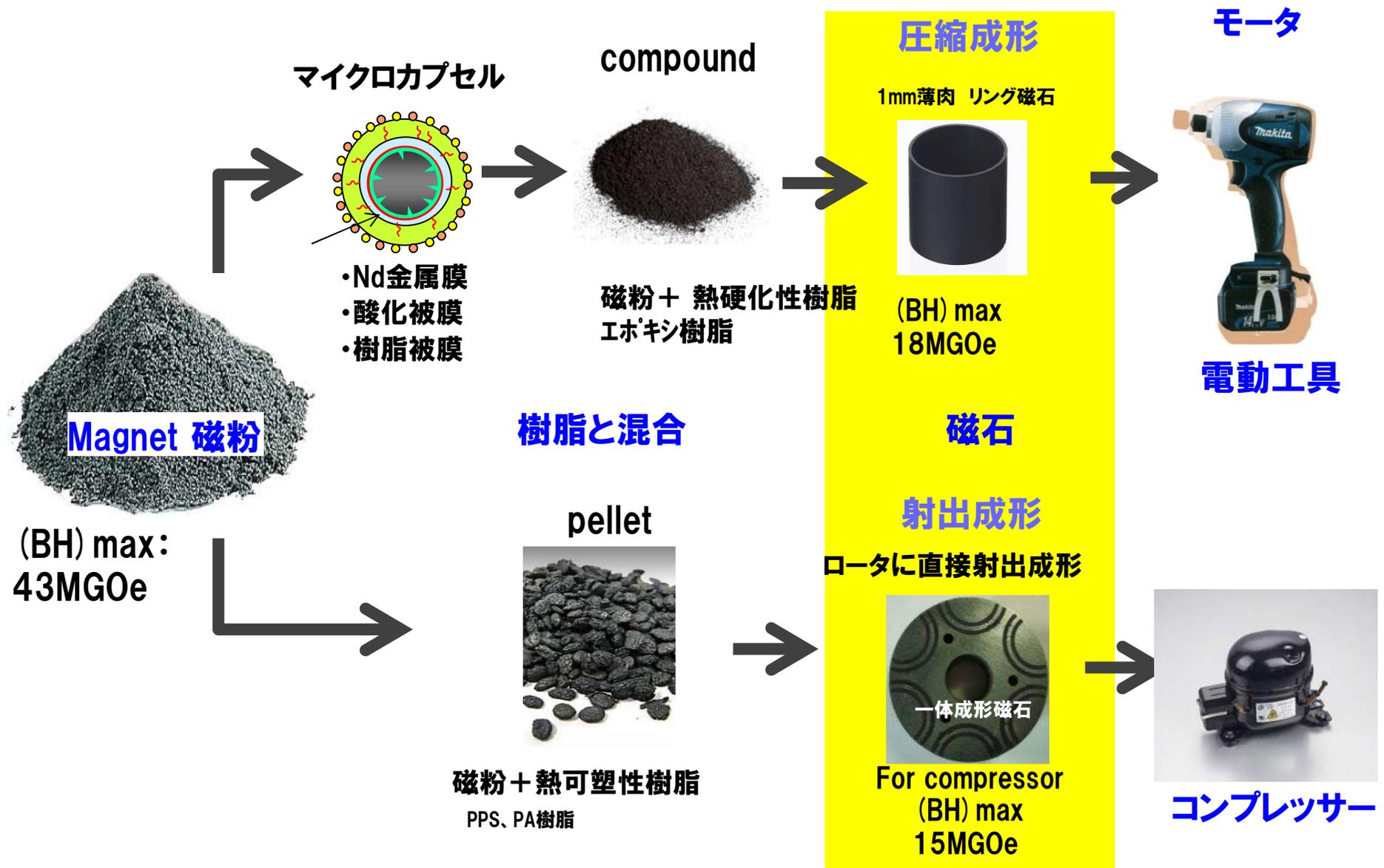


図2-12) Nd系異方性ボンド磁石MAGFINEの成形工程

・磁石成形が容易 + モータ設計が自由

# 2-1) 磁石開発の進展 ボンド磁石を使った新デザインモータ開発



図2-13) 小型DCモータ (30Wから300W)



図2-14) 電動バイク用モータ アクシャル型+1.4Kw

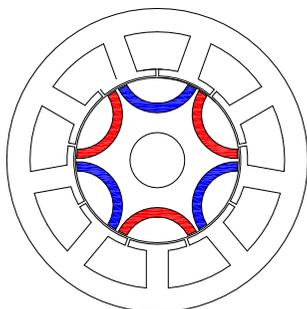


図2-15) エアコン用モータ (1Kw級)

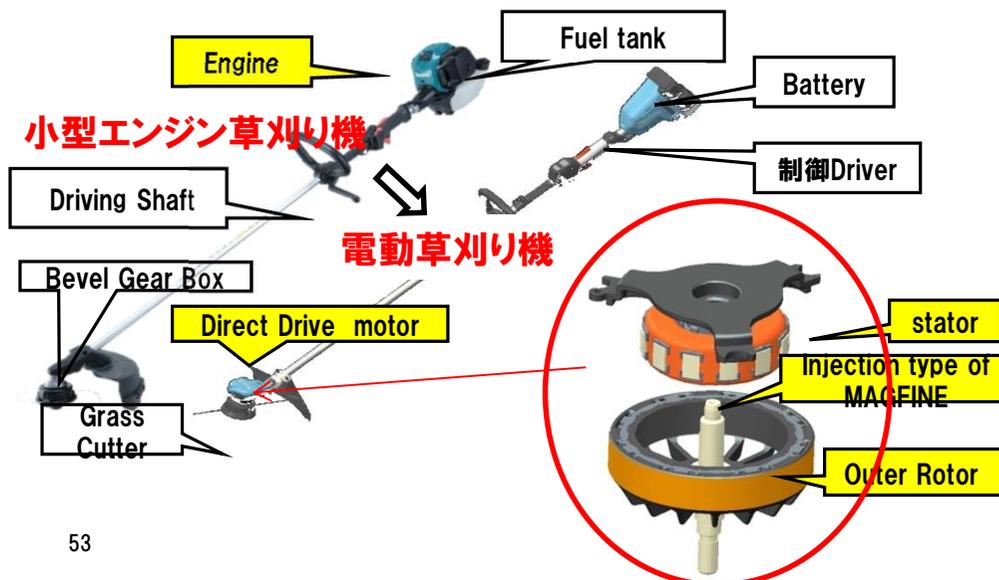


図2-16) 電動草刈機用モータ(1Kw級)

# 高速モータの拡大

- 1) Dyson 1Kw級 掃除機(12.5万RPM回転)、扇風機、エアブロー(20万回転)
- 3) Maxson 高速小型モータ 12万回転 500W 以下 火星探査機ソジャーナ
- 3) ロボット用小型モータ 4-6万回転 直径13-16mm 50W-200W
- 4) EVモータ(100Kw級) 6000回転⇒1.2万回転⇒将来3万回転
- 5) 航空機 エンジン⇒ 高速モータ 例) ドローン

中日新聞 5月30日

## 小型化の原理

モータ出力=トルクF×回転数N

トルクは、モータサイズに依存

⇒

高速回転すると、トルクとサイズを小さくできる

課題は 渦電流による磁石の発熱

対策は、ボンド磁石の採用(発熱しない)



# 2-3) モータデザインの革新 EVモータの基本デザインの戦国時代



本命デザインは？ 対応する磁石は？ Nd焼結磁石、Nd異方性ボンド磁石、フェライト

### ①Nd焼結磁石+1層



### ③スポークタイプの構造 (GE) 磁極の鉄を飽和させる構造

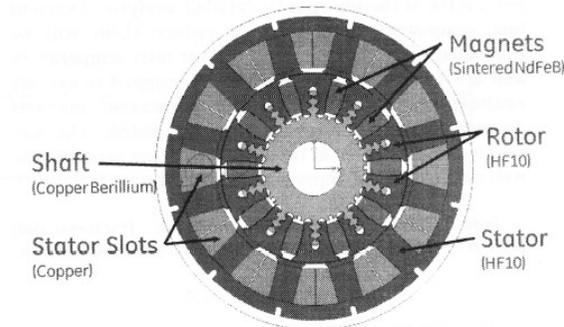
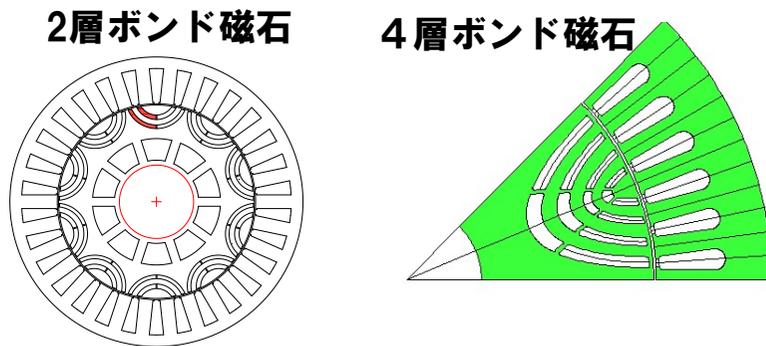


Fig 2: Cross-section of the full motor

### ②ボンド磁石+2層or4層



### ④3次元デザイン (Nova Torque 北大)

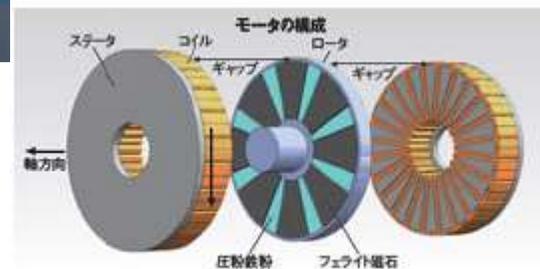
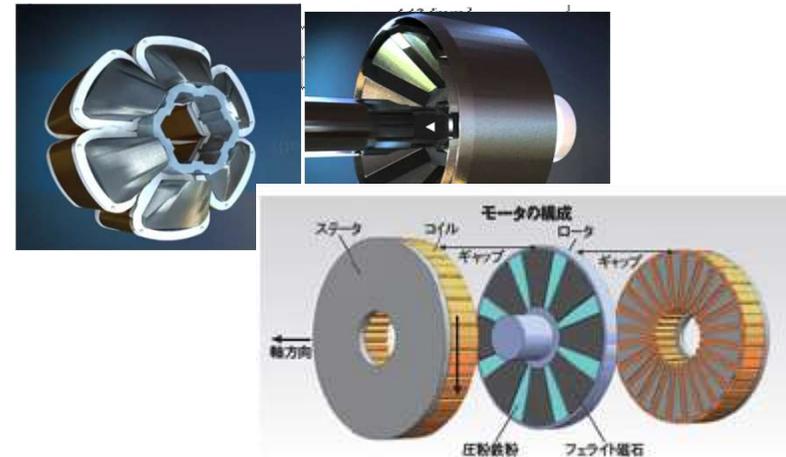


図12 ● アキシアル・ギャップ・モータの構造

図2-27) IPMモータと 磁石の多層化・多極化  
⇒高速回転化

## 2-5) 昇圧リアクトルの新デザイン

### HEV自動車

- モータ回転数 6000RPM → 15000RPM
  - 電源: リアクトルで200V → **600Vに昇圧**
  - リアクトル材料: 電磁鋼板 → FeSi粉SMC
  - 小型化: キャリヤ周波数のアップ
- 高周波特性に優れた磁性材料



図2-31) プリウスのリアクトル

### リアクタ

高周波ロス抑制などへ

### コア材の開発活発化

太陽光発電などのパワーで、新しいコア材の開発が活発化して来た。リアクタが高周波動作する部品の一つである。コイルには飽和磁束密度に伴い、高周波ロスを抑制するために、高周波特性に優れたコア材が用いられている。また、FeSi粉SMCが用いられている。また、FeSi粉SMCが用いられている。また、FeSi粉SMCが用いられている。

その新製開発において、波スイッチング化に伴った。また、丸型鋼板が用いられている。また、丸型鋼板が用いられている。また、丸型鋼板が用いられている。

コアの材質が多様化する小型、高効率リアクタ  
= 縦型 (写真④) で約90×65×100 (高さ) mm

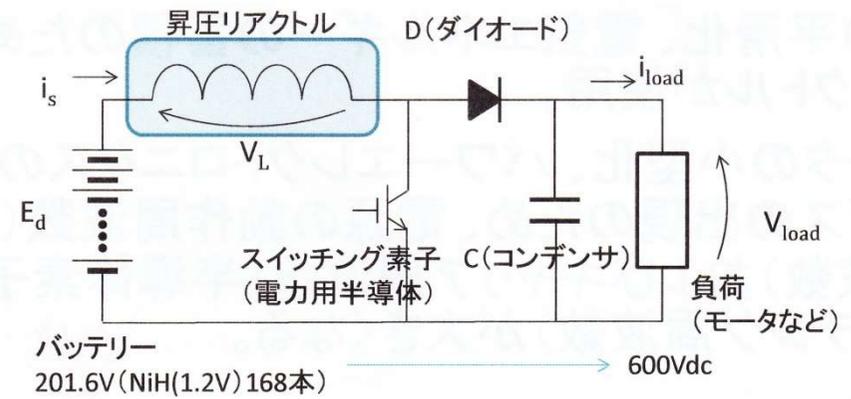


図2-32) 昇圧チョッパーの動作原理

# 2-6) Magnetic Gearの発明

- 2001年 伝達能力が機械式ギアボックス同等の磁気ギアが発明
- 2006年 **Magnumatics** (英ベンチャー企業)設立、米国、日本で開発・事業化が活発化
- 2011年 NEOMAXエンジニア社が 商品化

損失: 10% → 3%以下

課題 : 高Bs+高周波損失の少ない 磁石+ SMC の開発

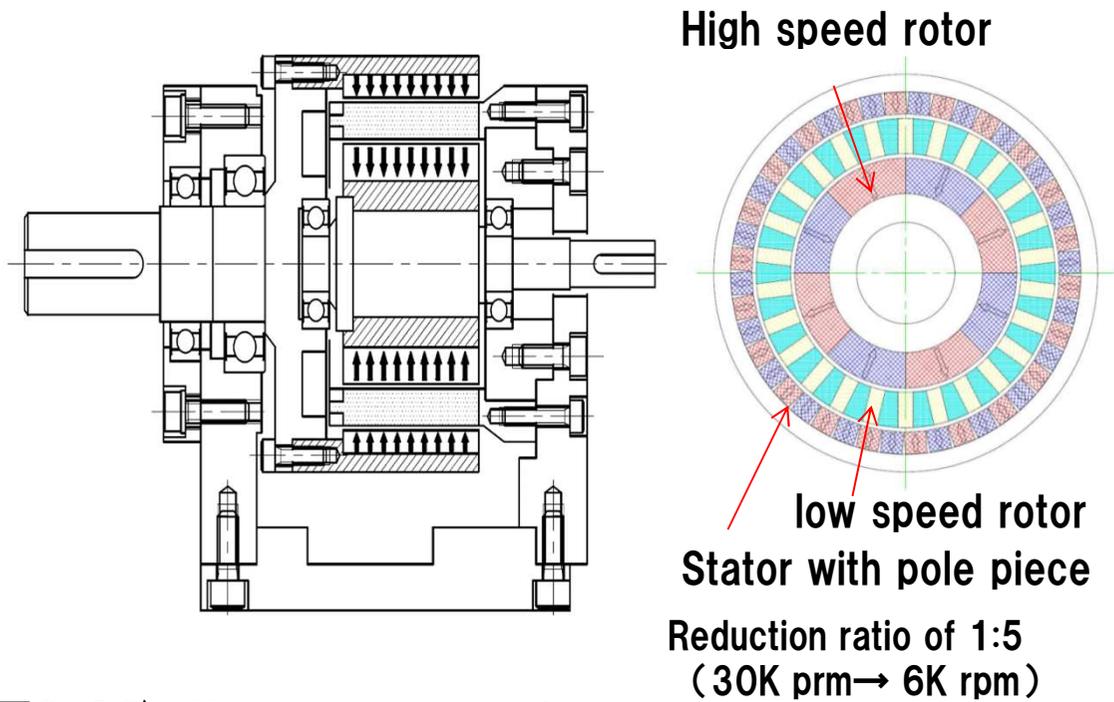


図2-33) New design magnetic gear

伝達効率 95%  
出力: 750W



高トルク伝達密度磁気ギア「ビートマックス™ (Beat-Max™)」

図2-34) NEOMAXエンジニアリングが開発した磁気ギア

# 2-7) 磁気ベアリングの開発

## 構造

ベアリングレスモータは磁気力で回転軸を支持する磁気軸受機能と、モータの機能を一体化した電磁機械であり、

## 特徴

- 1) 機械的な摩擦がない高効率、
- 2) メンテナンスが容易で寿命が長い
- 3) 高速・高出力化が可能

## 用途

メンテナンスが困難な環境(宇宙空間、原子炉内など)や潤滑剤による汚損が問題になる環境(真空中、液体中など)のドライブ装置に適しています。



将来の高速回転モータにおいて、安価な電磁誘導原理を利用したベアリングレスモータの開発が期待される

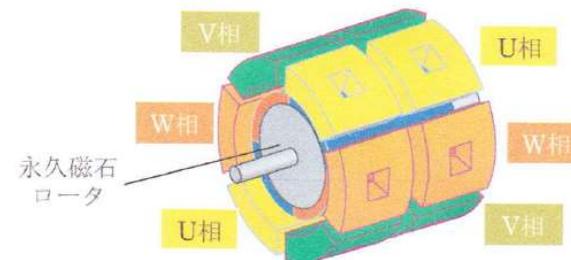


図1 ベアリングレスモータの構成

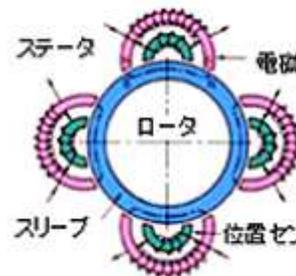


図2-35) 電磁磁石式  
Active Magnetic Bearing

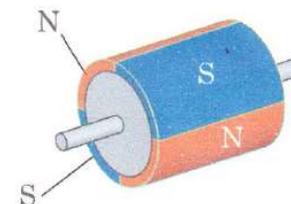


図2 永久磁石ロータ

図2-36) 電磁誘導原理  
制御システム不要



図2-37) Synchrony 社のActive Magnetic Bearing

# 3-4) 戦略的取組み 産官学連携Projectを提案

目標: 次世代高効率(損失30%→5%)・小型・軽量モータ (50%)を実証

方策: **すべての新技術を融合して実機評価** + **3万回転** + **新コンピュータ解析**

①新半導体PCU

(SiからSiC)

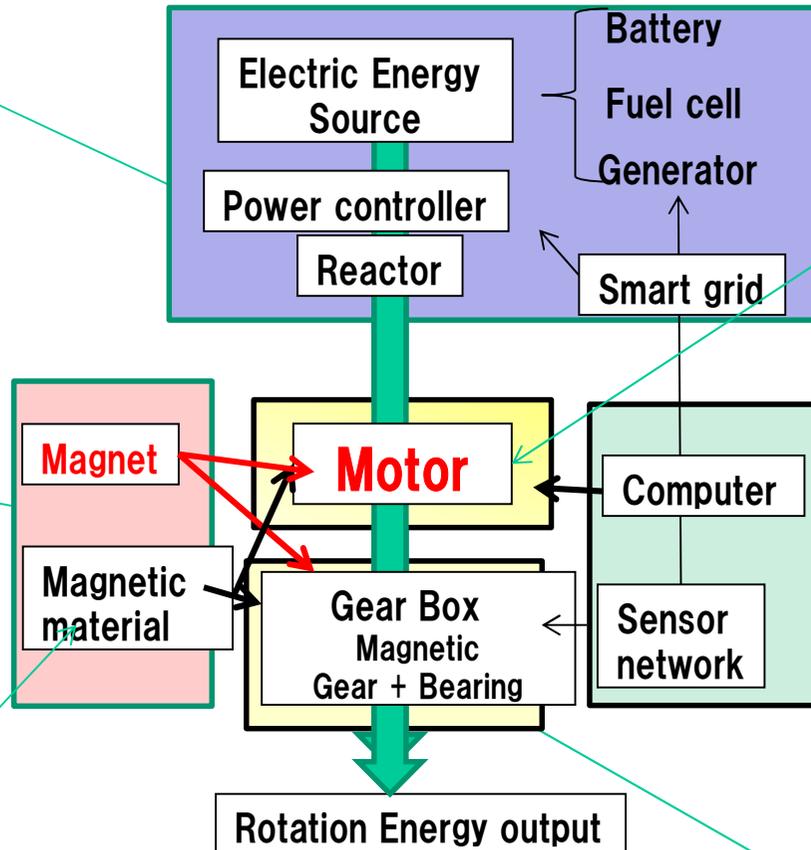
- ・キャリア周波数
- ・電圧

②高性能の新磁石

- ・第3世代MAGFINE

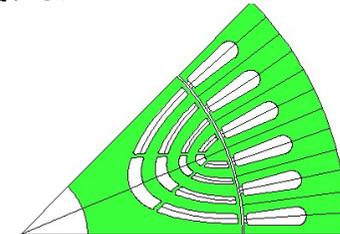
③高性能新磁性材料

- ・ケイ素鋼板
- ・アモルファス
- ・ナノ結晶
- ・SMC



⑤リアクトル  
小型・低損失

④小型・高効率モータ  
・4層タイプ



・3次元デザイン

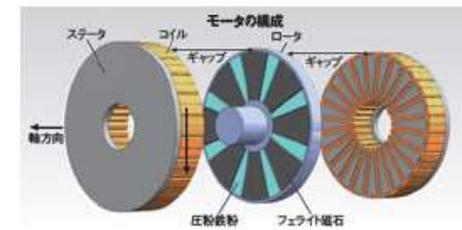


図12 ● アキシアル・ギャップ・モータの構造

図3-4) 実証システム構成

他に、⑧冷却、⑨センサ制御の精度

⑥磁気ギア

⑦磁気ベアリング

## 3-5) 戦略的取組み 高速モータのコンピュータ設計技術の開発を提案

最終目標:

次世代高速モータのコンピュータ設計技術の開発

課題

- ①高周波特性＋高性能磁性材料の開発
- ②高周波の磁性材料への影響評価試験装置
  - ・高周波磁界の影響の調査とデータベース作成
  - ・試験計測装置の製作と規格化
- ③モータ性能評価ベンチ 高速回転の実験も可能
- ④次世代モータデザイン の設計標準
  - ・形態（ラジアル、アクシャル）
  - ・素材（新磁石＋新磁性材料）
  - ・運転条件（回転数、キャリア電圧周波数など）
  - ・変速装置
- ⑤設計ツールの検証チーム
  - ・FEM磁場解析 ヒステリシス損失を組込んだ解析
  - ・micro-magnetics 高周波磁界での磁壁の運動解析

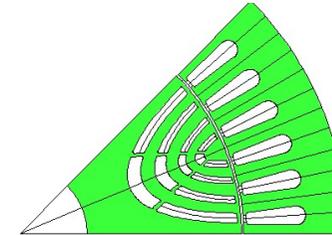


図3-5) ラジアル型

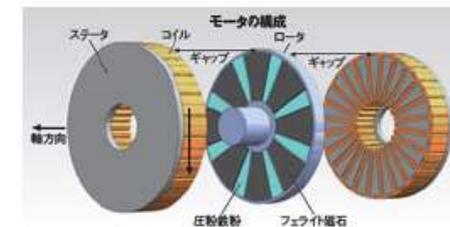


図12●アクシヤル・ギャップ・モータの構造

図3-6) アクシヤル型

# Magnetics開発戦略

20世紀はElectronicsの時代、21世紀はMagneticsの時代

1. はじめに 自己紹介
2. IOT時代の磁気センサの開発
  - 1) 超感度マイクロ磁気センサ(GSRセンサ)の発明
  - 2) GSRセンサの応用  
自動車用・電子コンパス・生体磁気検出・生体内ナビ
3. エネルギー問題への挑戦 Energy Magnetics専門研究会
4. 21世紀Magneticsによるビッグイノベーション 未来テーマ
5. Magnetics分野から見た日本産業への提言

2019年05月30日

本蔵義信

工学博士

マグネデザイン(株) 代表取締役社長

# Magnetics技術 による 21世紀ビッグイノベーション

- 情報 1) Spintronics **次世代スーパーコンピュータ**  
ナノ磁気ロジックは消費エネルギー1/100  
\*\*量子コンピュータ
- エネルギー 2) MRAM**磁気メモリ**  
ナノセル磁気記録(電流⇒電圧)
- 3) **超伝導磁石**と輸送システム革命  
磁気浮上と磁気ガイド
- 4) **磁気冷凍**  
冷凍効率10倍
- 医療 5) **発電機、トランス、EVモータ**  
小型化・効率化(損失30%⇒5%)
- センサ 6) **生体磁気診断装置**  
小型MRI, 脳・心磁図診断
- 7) MEMS**発電機と自律センサ**  
モバイル機器用センサのワイヤレス化

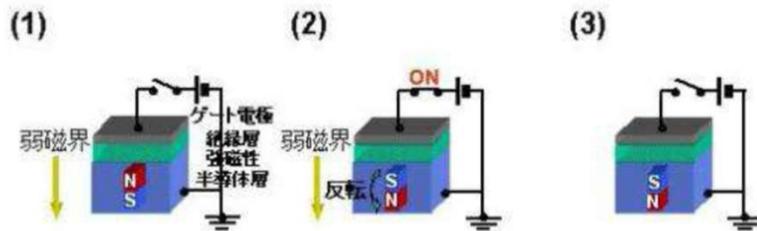
# 次世代コンピュータ 半導体技術と磁気技術のLSI上での融合

## 論理LSIと記憶の不揮発かによる消費電力の大幅低減

### 磁気デジタル回路

ゲート電圧on/offでSWのon/off⇒磁気N/S

電界アシスト磁化反転の模式図



強磁性半導体FET

半導体で、かつ電圧on/offで磁化N/S反転

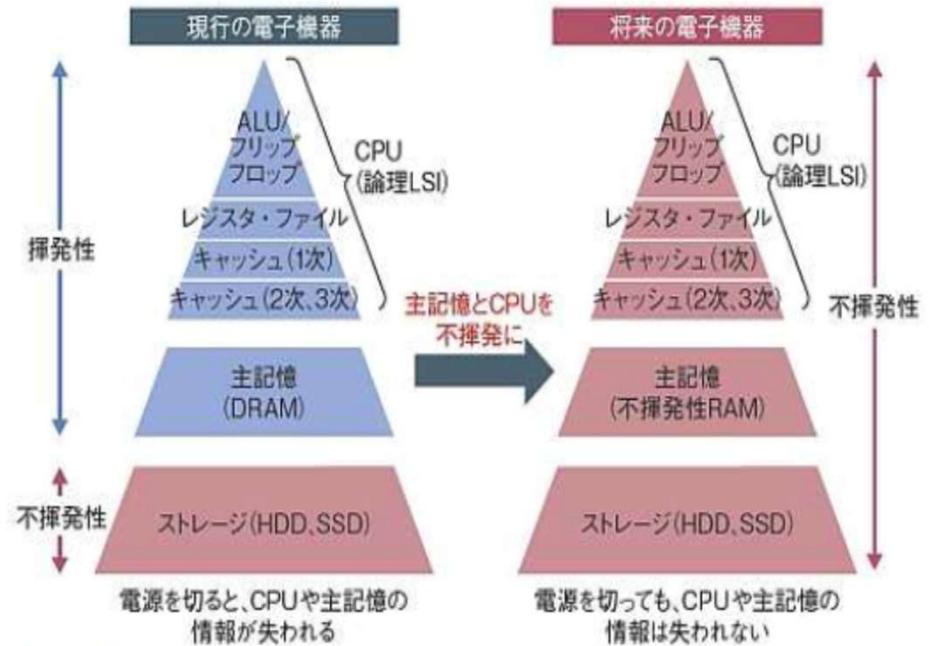
### スピン磁気記録素子+磁気デジタル回路の融合

スピン素子と論理集積回路の融合により打破

従来の論理集積回路 → スピントランジスタ論理集積回路

1. スピン素子(磁気)が採用 ⇒ 低消費電力
2. スピン素子(磁気)が採用 ⇒ 磁気素子 ⇒ 高信頼性、超高速
3. スピン素子(磁気)が採用 ⇒ 磁気素子 ⇒ 低消費電力、高信頼性、コスト減

低エネルギー、高信頼性、超高速にするにはパラダイムシフトが必要  
 干渉性スピン材料・素子が実現を大々(変革)型LSI(磁気)設計技術を開発  
 2010年以降は磁気LSIが主流になる



- 機器の状態
- × ノーマリー・オン動作が基本なので機器の電力をムダに消費
  - × 突然の電源遮断で重要なデータやプログラムが失われる懸念
  - ノーマリー・オフ動作が可能のため機器の消費電力を最小限にできる
  - 突然の電源遮断があっても重要なデータやプログラムが保全される



半導体技術と磁気技術の組み合わせでできること

ハードウェアは量子ゲートを組み合わせた量子回路によって実現されるが、

数学的に等価な量子ゲートが物理的には  
核磁気共鳴、量子光学、量子ドット、超伝導素子など  
によって構成出来るため、様々な実験的ハードウェアの実現  
法が研究されている

# 次世代MRAM MRAMと同性能で消費電力を1/1000低減

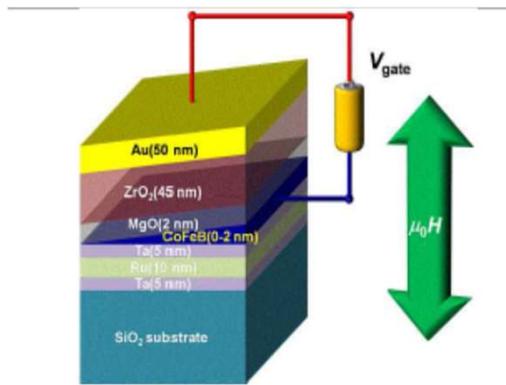
金属磁性の電界効果は2007年に発見された現象

ナノサイズセルに電圧印加でN/Sを書き込み MR効果(ナドットの抵抗変化)で読み出す

Flashメモリ(USB) 高速だが揮発性 vs 不揮発の磁気記録HDD(垂直磁気記録)

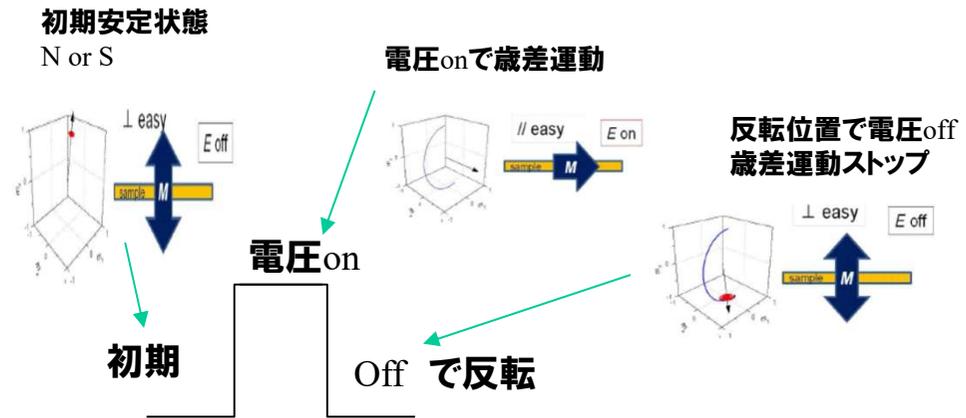
⇒融合型 MRAM 配線書き込み(電流)+セル磁気記録

⇒次世代MRAM 書き込みが電流から電圧



### 素子構造

左の模式図のように素子は絶縁膜を上下の金属層で挟んだコンデンサ構造になっています。片側の電極にCoFeBを用いて、電極間に電圧を印加することにより、CoFeB層の磁気特性が変化します。磁気特性は矢印の方向に外部磁界 $\mu_0 H$ を印加したときに誘起される磁性層の磁化の大きさにより評価します。



### 電界誘起磁化反転

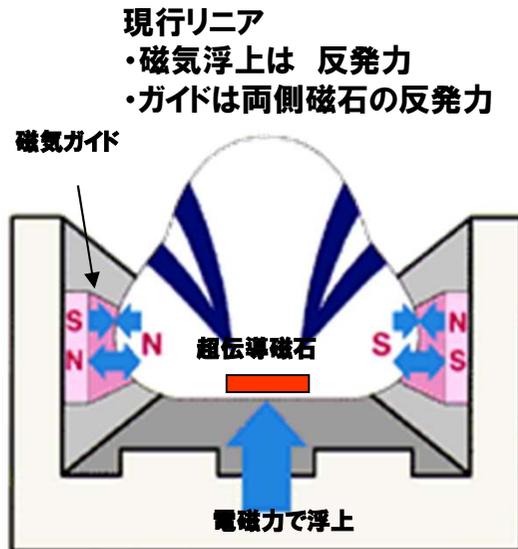
金属磁性の電界制御を用いたデバイス応用の一例として、電界による磁化反転を応用した磁気記録方式が考えられます。この手法による磁化反転は、近年注目されている、スピン注入磁化反転方式と比較しても、さらに千倍程度消費電力が小さくなることが予想されており、超低消費電力デバイスの実現が期待されています。

# 未来の乗り物 磁界の上を走る 磁気浮上と磁気ガイド

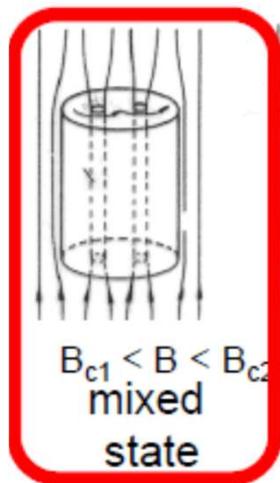
INTERMAG 08  
Madrid, May 7, 2008

Ludwig Schultz特別講演  
IFW Dresden所長

今年の国際磁気学会の記念講演で  
未来の乗り物と題して  
超伝導技術の進歩が紹介された

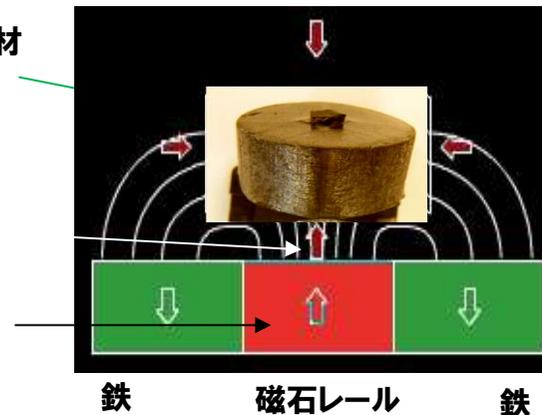


超伝導バルク材料  
を使った  
磁気浮上と磁気ガイド  
システム

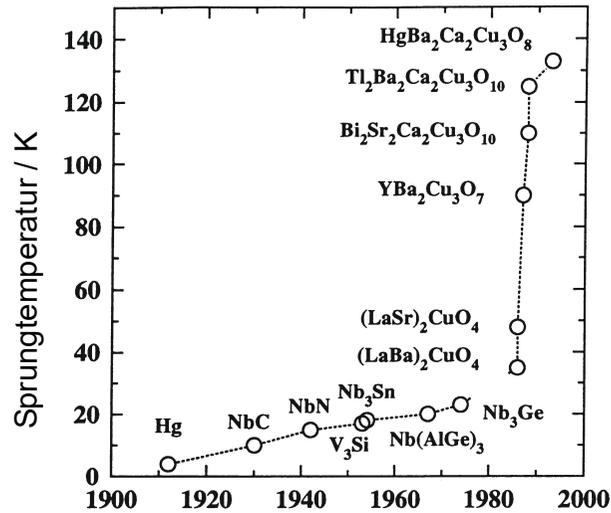


超伝導バルク材  
 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$   
seed crystals

磁気ガイド  
磁気浮上

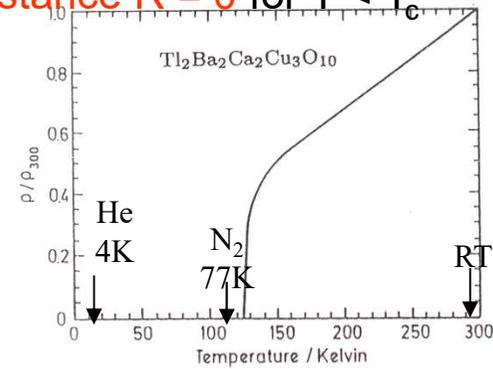


# Superconductivity Development of the critical temperature $T_c$

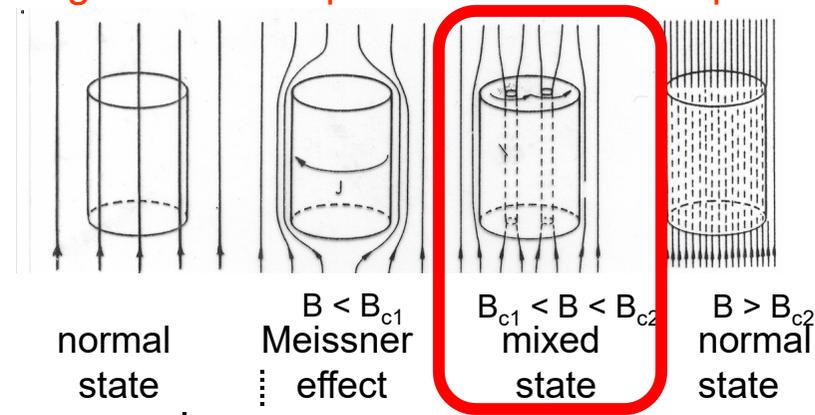


Two properties:

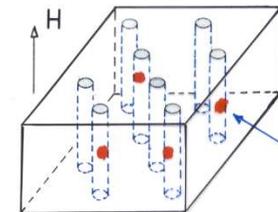
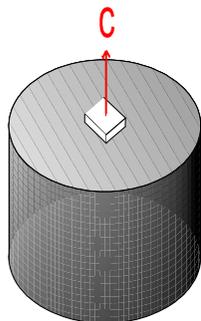
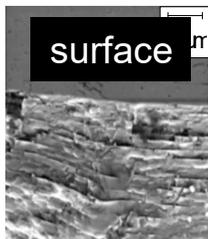
Zero resistance  $R = 0$  for  $T < T_c$



2) Magnetic field is pushed out of the superconductor



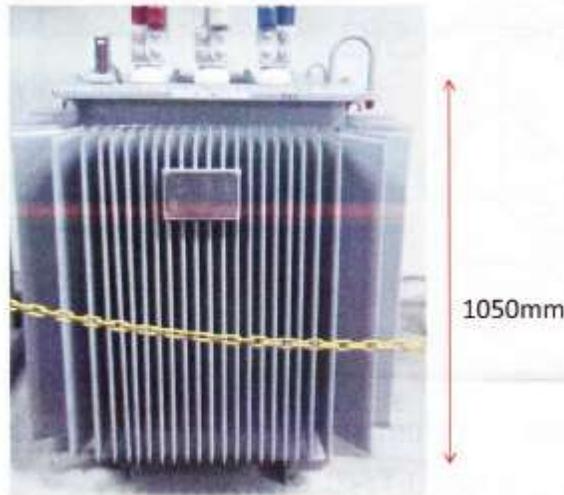
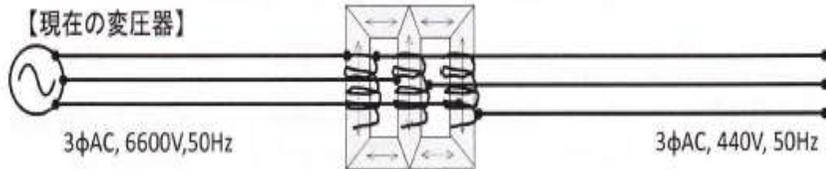
- Orientation of the grains by using **SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>** seed crystals



Pinning of flux lines by defects (pinning centers)

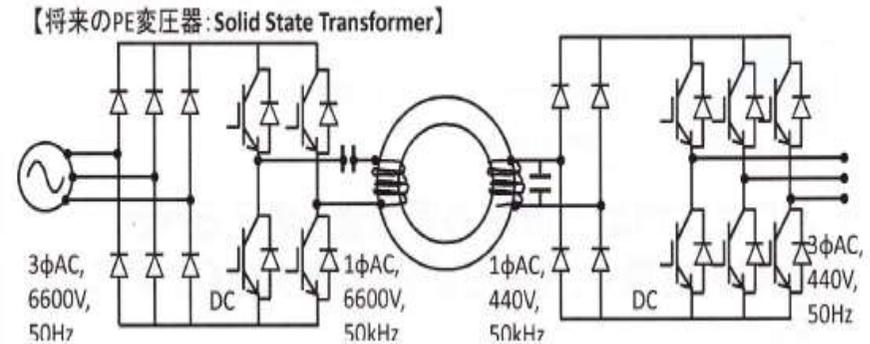
# 4-1) フロンティア 将来の変圧器構造 solid state transformer

- ① トランスの小型化・高効率化
- ② 磁気浮上
- ③ 磁気冷凍
- ④ 再生エネ PM発電機
- ⑤ MEMS発電機 など



200kW/60Hz, 6600V-3φ/100V-3φ,  
Conventional Si-Fe Transformer in TTI(1993)  
1050mmH × 700mmW × 1100mmL

図4-1) 現行のトランス構造



既存変圧器とPE変圧器  
(体積で95分の1)



図4-2) Solid state 型のトランス構造  
大きさ 1/100化

# 4-2) フロントア 常温磁気冷凍の開発の進展

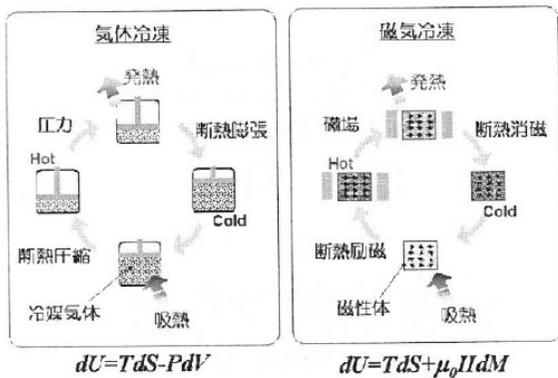


図2 気体冷凍と磁気冷凍の熱サイクル

## 図4-3) 磁気冷凍の原理

- 極低温では一般的方法
- 気体冷凍式の冷凍効率より10倍高い
- 相転移点近傍で磁気冷凍能力は最大

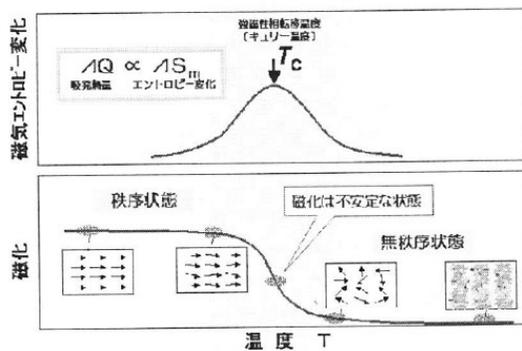


図4-4) 磁気エントロピー変化の模式図

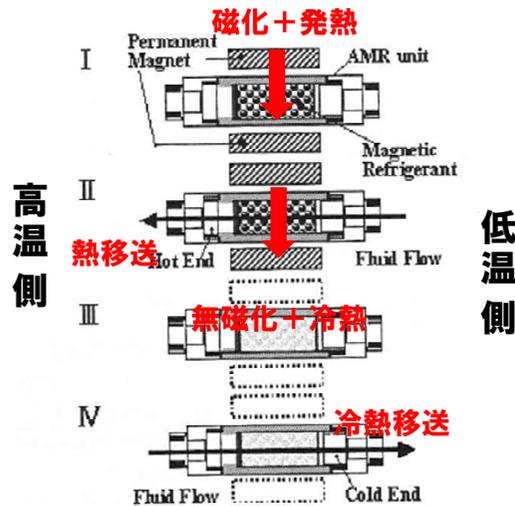


図4-5) 82年AMR方式 (常温磁気冷凍の原理)

- 磁化サイクルと同期して熱移送方向反転

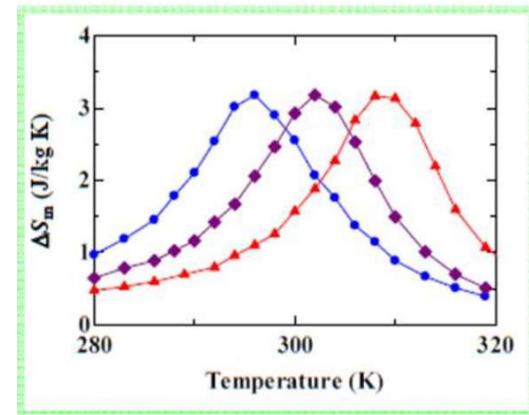


図4-6) 冷凍材料の開発: La(FeSi) 常温で磁気冷凍能力の高い材料の開発

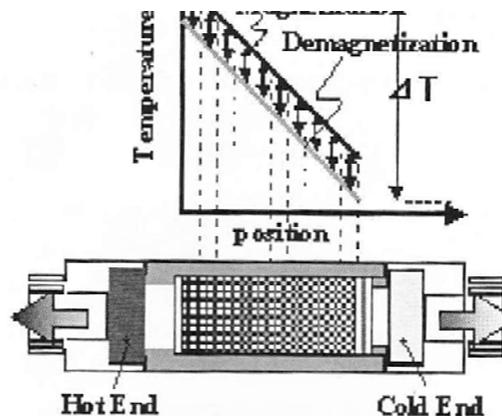


図4-7) 磁気冷凍作業室内部の温度勾配 永久磁石を使用

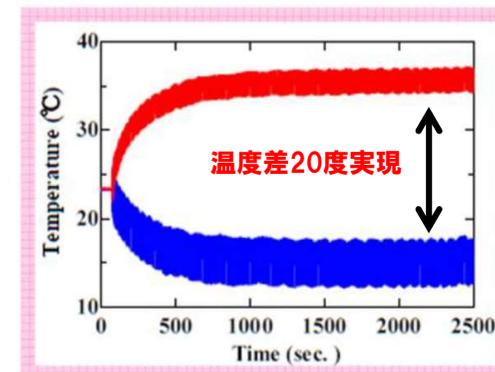


図4-8) 試験結果 温度差20°Cを実現

# Magnetics開発戦略

20世紀はElectronicsの時代、21世紀はMagneticsの時代

1. はじめに 自己紹介
2. IOT時代の磁気センサの開発
  - 1) 超感度マイクロ磁気センサ(GSRセンサ)の発明
  - 2) GSRセンサの応用  
自動車用・電子コンパス・生体磁気検出・生体内ナビ
3. エネルギー問題への挑戦 Energy Magnetics専門研究会
4. 21世紀Magneticsによるビッグイノベーション 未来テーマ
5. **Magnetics分野から見た日本産業への提言**

2019年05月30日

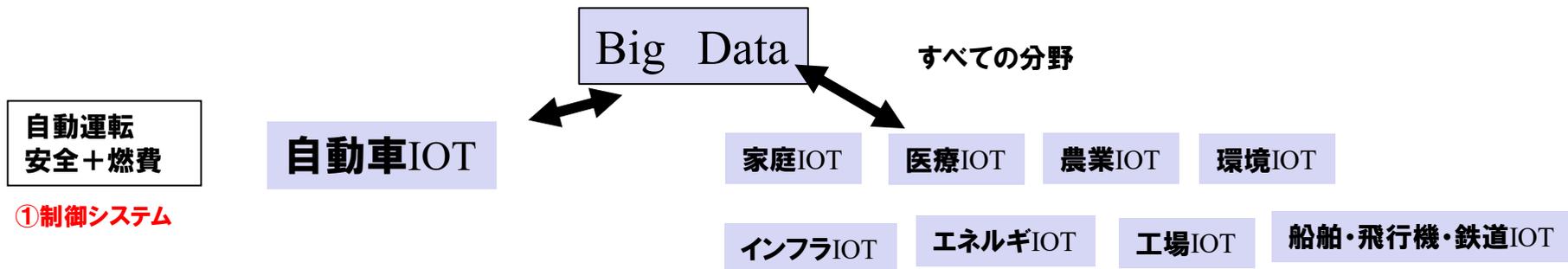
本蔵義信

工学博士

マグネデザイン(株) 代表取締役社長

# 21世紀 IoT時代とMagnetics 20世紀はElectronicsの時代、21世紀はMagneticsの時代

## 1) IOT時代 社会のすべての機器・サービスが革新



## 2) IoTの革新技術の柱の一つは、Magnetics

### ①制御システム

- CPU** 人工知能  
半導体+磁気コンピュータ  
次世代MRAM
- モータ** パワエレクトロニクス  
磁性材料  
(磁石+電磁石+ヨーク)
- センサ** 光・電波  
+磁気30%+慣性+その他

### ②動力システム 磁性材料がコア技術

- 発電機 → トランス → 動力モータ
- 冷凍機 コンプレッサ → 磁気冷凍
- 駆動系 省エネ(摩擦レス)  
磁気ベアリング、磁気ギア、磁気ばね
- 移動装置と超伝導

### ③人間系システム

- 生体磁気、MRI、方向感覚

## 3) Magneticsの遅れがネックになっている ⇒ 日本は磁性材料は世界をリード ⇒ 日本経済の競争力強化に活用すべき

# Thank you for your kind attention!

## まとめ

### 1. Magneticsによる新産業創出

#### (1) ビッグデータ時代の磁気センサ分野

- 新センサ 超感度マイクロ磁気センサの発明
- 応用 スマホ・医療・自動車用ほか

#### (2) エネルギーの高効率化

- Magneticsのコア企業として磁石会社の育成
- EVモータ戦略的開発

#### (3) Magnetics 7大未来テーマへの投資

### 2. Magnetics分野から見た日本産業への提言

日本の強みMagnetics技術とシリコンバレーのビジネス力の連携