3次元微細加工によるマイクロコイルの製造

概要

- 1. マイクロコイル開発の背景と経過
- 2. 要素技術の紹介
 - 1) アモルファスワイヤ
 - 2) ワイヤ精密組立装置の開発
 - 3) 3次元微細加工によるマイクコイルの製造
- 3. マイクロコイルの性能と実用化状況
- 4. 将来展望

マグネデザイン株式会社 代表取締役 本蔵 義信 (元日本磁気学会 副会長)

- 【経営理念】 20世紀はElectronicsの時代、21世紀はMagneticsの時代、Magnetics技術で世界をリードする。
- 【沿革】 第1段階 :12年9月MDC設立(愛知製鋼の専務退任後)~17年1月まで 順調に拡大の時期
 - ・GSRセンサを発明⇒16年1月NHK報道・国際会議で紹介
 - ・3次元マイクロ技術開発⇒16年4月 ナビ白金に自前のクリーンルームを建設
 - 第2段階 :17年2月愛知製鋼が特許・刑事裁判~22年4月特許有効・無罪確定まで 冬ごもりの時期
 - ・朝日インテック カテーテル自動誘導システムの開発委託
 - ・ライセンス販売(カテーテル用限定の実施権)
 - 第3段階 :22年4月再建~23年2月現在 開発を再開加速
 - ・美浜研究所(第2クリーンルーム)を建設、米国子会社の設立,スタンフォード大学と共同研究で合意
- 【会社概要】 社員:27名 資本金:9000万円 国内特許:41件取得 米国特許3件
- 【経営状況】 開発委託事業とライセンスビジネス 22年3月期:売上げ6億円、利益1.4億円



MDC(子会社連結)の売上と利益

製品・技術紹介 GSRセンサと3次元微細加工技術

パターン



投資額: 2億円

高感度マイクロ磁気センサの開発の背景

①高感度マイクロ磁気センサとは?

基本的な考え方



図15 各種センサのコイル電圧の周波数依存性

3 次元微細加工によるマイクロコイルの製造



- 1. マイクロコイル開発の背景と経過
- 2. 要素技術の紹介
 - 1) アモルファスワイヤ
 - 2) ワイヤ精密組立装置の開発
 - 3) 3次元微細加工によるマイクコイルの製造
- 3. マイクロコイルの性能と実用化状況
- 4. 将来展望

マグネデザイン株式会社 代表取締役 本蔵 義信 (元日本磁気学会 副会長)

2章 要素技術の開発(1)センサ素子の開発経過

①1887年~1998年以前 機械式コイルの時期
 TDK, 名大の素子の構造と ⇒ワイヤの磁気特性確保+手作り製作



②2000年~2008年 愛知製鋼 メッキコイルの開発に成功

・内径30µm、コイルピッチ30µm

・整列精度 ±10µm

基板に<mark>自動貼付け</mark>技術の確立 アモルファスワイヤの磁気特性を確保





③2014年~2022年 マグネデザイン
 ・内径15µm、コイルピッチ3µm)
 ・精度 ±1µm

蒸着膜によるマイクロコイルの開発 → on-ASICタイプコイルの基板

Si基盤⇒ASIC基板上のレジスト膜上の素子を形成



(2)要素技術 アモルファスワイヤの製造と特性

①製造装置の外観写真



②ボビンに巻付けた ワイヤ製品



④製造の様子



③装置の詳細部



(3)アモルファスワイヤの特性 化学成分、寸法、磁気特性

①磁気特性 最適組成の選択



②合金組成 Co-Fe合金+Si/Bのアモルファス形成元素

Alloy	Fe	Co	Ni	В	Si	Mo	Cr	Mn	С
5295 <mark>.</mark>	3.59	71.32	0.19	13.37	10.45	0.86			

③ワイヤ寸法 直径12µm+ガラス被覆付き

Sample	Alloy	Glass	Length	dm	dw	t	R
5295D457	5295	Duran	1,342	12,4	15,8	1,7	9,275

(4)アモルファスワイヤの特性 磁区構造 ⇒ バンブー構造

カー効果顕微鏡による磁区観察の研究

1)山崎 九工大教授ほか 直径50µm



2) 竹沢九工大教授ほか 直径10µm



(5)アモルファスワイヤの特性 弾性限界

アモルファスワイヤの引張試験

弾性限界 40kg/mm2



磁気特性の低下 と その対策

アモルファスワイヤーにかかる応力とB-H曲線の関係



2020年3月11日作成

(7)アモルファスワイヤの磁気特性に及ぼす 張力熱処理 の影響



(8)アモルファスワイヤのGSR特性に及ぼす 張力熱処理 の影響

直線的から正弦関数に変化

 $B = \mu H \Rightarrow sin 2\theta(H)$



3 次元微細加工によるマイクロコイルの製造

概要

- 1. マイクロコイル開発の背景と経過
- 2. 要素技術の紹介
 - 1) アモルファスワイヤ
 - 2) ワイヤ精密組立装置の開発
 - 3) 3次元微細加工によるマイクコイルの製造
- 3. マイクロコイルの性能と実用化状況
- 4. 将来展望

マグネデザイン株式会社 代表取締役 本蔵 義信 (元日本磁気学会副会長)

1) 要素技術2 ワイヤ精密組立装置の開発 名大⇒愛知製鋼⇒マグネデザイン社

- 1名古屋大学の手作り試作
- ・張力 超低張力 5 kg/mm2
- ・両面テープ止め 張力残存



②愛知製鋼の全自動ワイヤ整列装置(愛知製鋼の特許より) 工程:ワイヤ引出⇒端部固定⇒ワイヤ固定⇒切断⇒繰り返し 位置決め精度:±10µm

工程概要





③愛知製鋼の張力解放タイプ

- ・張力:弾性限以下の小さな張力40kg/mm2
- ・磁石式固定で張力解放







(2)マグネデザイン社:GSRセンサ用のワイヤ精密組立装置の開発

1市販のワイヤ整列装置の購入
 ・ワイヤ整列精度:±5µm
 ・ワイヤ張力制御 5~100kg/mm2
 ・ワイヤ引出速度 50M/秒と高速



 ②マグネデザイン社による改造
 ・ワイヤ整列精度: ±1µmの精度実現 in-Line タイプのFeedbackシステムを導入
 ・張力熱処理によるGSR特性改善 弾性限界以上の張力+テープ止めで張力残存+熱処理







GSR特性に及ぼす張力の影響



3次元微細加工によるマイクロコイルの製造

概要

- 1. マイクロコイル開発の背景と経過
- 2. 要素技術の紹介
 - 1) アモルファスワイヤ
 - 2) ワイヤ精密組立装置の開発
 - 3) 3次元微細加工によるマイクコイルの製造
- 3. マイクロコイルの性能と実用化状況
- 4. 将来展望

マグネデザイン株式会社 代表取締役 本蔵 義信 (元日本磁気学会副会長)



マイクロ素子の上面図(on0ASIC**タイプ**)



② ワイヤ接合方法 感度2倍

1 マイクロ素子の断面図





(2) マイクロコイル製作のプロセス

1課題

・ASIC面上にの樹脂膜を形成し、そこに素子を形成する

1)予備工程



(3) マイクロコイル製作プロセスの技術的ポイント 最終完成図

① 凹凸のあるASIC基板上にマイクロ素子を形成 2層樹脂被膜法を考案

素子部

アライメント部



(3)素子とマークの配置図



工程1)第1台座の形成

狙い: ASIC上面 2-3 µmの凹凸の解消

詳細工程:ネガレジスト樹脂塗布→研磨→キュア処理

ネガレジストのキュア処理後⇒変形しない 硬い





測定位置

ASIC上面 2-3µmの凹凸の図:計測データ



工程2)十字マークの形成

詳細工程:レジスト塗布→マスク露光→RIEエッチング ⇒金属反射膜塗布(識別性アップ)

十字マークの写真

光学画像

マスクアライナー 読み取り画像











工程3)溝加工



詳細工程:ポジレジスレジスト塗布→マスク露光→プリ露光→完全キュア処理 課題:溝を 丸みのある台形状+左右対称に形成

①RIE加工による直方形の溝の形成 ②ポジレジスト層キュア処理⇒ 丸みのある台形状溝



問題:左右端に凹凸むらが出る

80

工程4)下コイル形成



詳細工程:Au**薄膜⇒レジスト塗布⇒擬3**Dマスク露光⇒現像⇒エッチング⇒下コイル

疑3次元マスクを採用(回折現象を考慮)

- マスクの一例 3µmピッチ
- ・スリット形状と溝底の線幅との対応関係
 - ⇒溝深さに依存

⇒溝底とレジスト膜厚にも依存



Fig.13 Diffraction phenomena by mask lattice



工程5)ワイヤ整列⇒工程6)ワイヤ固定

詳細工程:

満にワイヤ整列⇒両面テープで固定⇒ワイヤ切断⇒接着塗布・ベーク⇒基板取り出し⇒キュア⇒ その後の工程:素子完成⇒張力熱処理)



ワイヤ整列 樹脂でワイヤ固定

溝にワイヤを設置の難しさ

- 1)満とワイヤはマイクロサイズ
 - ・溝は幅15µm×深さ7µm + ワイヤは直径10µm
 ⇒精度±1µmで整列
- 2)磁気特性は張力に過敏に反応
- ・内部歪の均一化⇒張力76kg/mm2(弾性限界40kg/mm2以上)
- ・GSR特性の付与⇒低温張力熱処理
- 3) 基板溝にワイヤを固定する方法は難解 固定と張力開放のバランス
- ・ワイヤ整列⇒両面テープで固定 ⇒切断 ⇒ 張力熱処理

ワイヤ整列用の台座



ワイヤ整列後の写真



ワイヤ

工程7)ワイヤ電極の形成

詳細工程:レジスト塗布→マスク露光・現像→RIE(CF₄ガス)でガラス除去⇒Au**蒸着で配線薄膜**

ホトリソ

RIE ガラス除去







写真 ガラス 在り⇒除去

写真 ワイヤ電極

工程8)上コイルの形成

詳細工程:Au薄膜⇒レジスト塗布⇒擬3Dマスク露光⇒現像⇒エッチング⇒上コイル



<mark>疑3次元マスク</mark>を採用 回折現象を考慮 レジスト厚さの違い

マスクの一例

- ・スリット形状と凸部の線幅との対応関係
 - ⇒ワイヤ径に依存
 - ⇒ワイヤ上部と平坦部のレジスト膜厚にも依存



Fig.13 Diffraction phenomena by mask lattice



On-ASICタイプの素子の完成



完成素子

ASIC size: $1.2 \times 1.2 \times 0.2$ mm







Element Length=450 µ m Coil turns=66 Thickness=20 µ m

3 次元微細加工によるマイクロコイルの製造

概要

- 1. マイクロコイル開発の背景と経過
- 2. 要素技術の紹介
 - 1) アモルファスワイヤ
 - 2) ワイヤ精密組立装置の開発
 - 3) 3次元微細加工によるマイクコイルの製造
- 3. マイクロコイルの性能と実用化状況
- 4. 将来展望

マグネデザイン株式会社 代表取締役 本蔵 義信 (元日本磁気学会副会長)

2) 測定方法

パルス電流波形とコイル電圧波形

② コイル電圧波形と磁界強さ



31

30

3) 測定結果 磁界依存性

磁界依存性 正弦関数

 $V = V_0 \sin (\pi H/2Hm)$







Fig.5 coil voltage vs magnetic field

4) 測定結果 磁界依存性



 $V = V_0 sin (\pi H/2Hm) = V_0 sin (\pi H/2Hk) = V_0 sin (2\theta)$ **コイル電圧**V ⇒ θ (H) 検出 ⇒ Hを算出 $tan\theta$ (H) = H_{eff} /Hk FGとMIセンサは、 **コイル電圧**V ⇒ M(H) 検出 ⇒ Hを算出

5) 測定結果 感度

周波数依存性



Frequency (GH ${\bf Z}$)

コイル巻き数依存性





検波タイミングとノイズ





6)測定結果 on-ASICタイプの感度





On-ASICタイプは ワイヤ接合の 感度が2倍になる



8)GSRセンサとMIセンサの比較

①技術要素

共通点:

・測定原理 ∨=dMx/dt

・センサの基本構成(磁性ワイヤ+コイル+信号処理回路) 相違点:

- ・アモルファスワイヤの磁区構造(張力熱処理)
- ・パルス周波数 0.2GHz ⇒ 2GHz





メカニズムの違い MI:磁壁移動 GSR:スピン回転

















3 次元微細加工によるマイクロコイルの製造

概要

- 1. マイクロコイル開発の背景と経過
- 2. 要素技術の紹介
 - 1) アモルファスワイヤ
 - 2) ワイヤ精密組立装置の開発
 - 3) 3次元微細加工によるマイクコイルの製造
- 3. マイクロコイルの性能と実用化状況

4. 将来展望

マグネデザイン株式会社 代表取締役 本蔵 義信 (元日本磁気学会副会長)

開発ターゲット1: GSRセンサグリッドと手術ロボットのナビゲーション技術の開発

先行メーカのカテーテル治療ロボット 位置精度を10倍、リアルタイム性を改善



先行メーカの<mark>インプラント治療ロボット</mark> アシスト型から 全自動タイプ(磁気式誘導システム)



先行メーカのインプラント治療ロボット





位置決め精度0.1 mm

磁気センサ

グリッド

開発ターゲット2: 磁気顕微鏡

0

IPS細胞の研究者から磁気顕微鏡開発の要請を受けています







磁気顕微鏡 (差動pT素子グリッド)



開発ターゲット3: on-ASICタイプのGSRセンサの生体磁気診断装置への応用

【超小型nTセンサの製造工程】



性能 ・0.05nT(=50pT)

生体磁気検出 心臓からの磁界検出可能 脳からは、1pTが必要

【超小型3次元nTセンサを使った生体磁気診断装置】

現在の脳磁図診断装置 10億円の巨大装置



脳の活性度を診断できる MRIは、脳の組織構造の診断



ウェアラブルタイプの 診断装置を目指す





期待されるGSRセンサ新市場



1. 背景

・半導体技術の超微細化の進展に伴い、センサの高画素化と小型化が求められている。
 ・磁気センサは、感磁素材+マイクロコイル形成+IC一体化技術の3要素からなっている。

2. マイクロコイル型の磁気センサにおける3大技術要素

・アモルファスワイヤ: 当初125µm→10µm
 ・マイクロコイル:直径200µm→直径15µm、コイルピッチ50µm→3µm
 ・一体化:ICとワイヤ接合→on-ASIC接合

3. 高感度磁気センサの小型化・高性能化

・長さ60mm×直径4mm (IC は別) → 1mm×1mm(ICと一体) ・高画素化・低消費電力・高速応答

4. 医療分野への応用

・生体内ナビゲーション、・磁気顕微鏡 ・生体磁気診断装置 など