

平成25年度 戦略的基盤技術高度化支援事業  
「蓄電池充放電管理用の高精度直流電流センサの研究開発」

## 研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 東北経済産業局

委託先 公益財団法人みやぎ産業振興機構

# 目 次

## 第1章 研究開発の概要

### 1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1－2 研究体制

#### 1－2－1 研究組織及び管理体制

#### 1－2－2 研究員及び管理員

#### 1－2－3 他からの指導・協力者及び指導・協力事項

### 1－3 成果概要

### 1－4 当該研究開発の連絡窓口

## 第2章 本論

### 2－1 磁性ナノ粒子及び樹脂と混合したコア材料の開発

### 2－2 センシング構造の開発

### 2－3 発振及び受信回路の開発

### 2－4 高精度直流電流センサのパッケージ品の開発

## 第3章 全体総括

## 第1章 研究開発の概要

環境自動車に搭載されている蓄電池の充電レベル監視用に使用されている電流センサは、検出値のばらつきが大きく、さらにゼロ点のズレ（オフセット誤差）が電流値に反映されてしまうことが問題とされている。自動車・蓄電池メーカーより提示されている要求性能（検出精度 $\pm 0.1\%$ 、オフセット誤差がほぼゼロ、既存電流センサよりも小型・軽量・安価であること）を満たす、直流電流測定用の電流センサを開発することで、走行距離の増加や、蓄電池の小型化に寄与する。

初年度（平成24年度）は、磁性ナノ粒子を含有する独自の磁性コアの基本的な製法・評価方法を確立し、また直流電流検出のためのセンサ機構の選定、電流センサを制御するための入出力処理方法の設計・評価を、各々の研究機関が主体となり進めた。

最終年度（平成25年度）は、前年度に開発された材料・機構・制御についてのアウトプットをもとに、実用レベルの電流センサのパッケージ化を大きな目標とし、研究機関間の協力のもと最適化設計を進め、目的とする安価で小型・高性能の直流電流センサのプロトタイプを完成させることを目指した。

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 「研究開発の背景」

低炭素化社会の実現のため、自動車メーカー各社により電動機を駆動源とする環境自動車（ハイブリッド自動車 HEV、プラグインハイブリッド自動車 PHEV、電気自動車 EV 等）の開発・事業化が強力に推進されている。この環境自動車を普及させるための重要技術課題として、蓄電池の効率的な使用方法の確立が挙げられる。

これら環境自動車の価格・走行距離・重量・安全性のいずれも、蓄電池の性能に大きな影響を受ける。高性能蓄電池としてよく知られるリチウムイオン蓄電池は、小型・軽量・高エネルギー密度という優れた性能をもつ一方、適切でない充放電制御を行うと深刻な品質影響が出てしまう欠点を持つ。例えば過充電を生じた場合、熱安定性の悪化で発熱・発火などの危険が生じ、逆に過放電を生じた場合には、蓄電能力が大きく劣化してしまう。既存のニッケル水素蓄電池においても、過充電での発熱による破壊や過放電による急激な性能低下が問題となっている。

蓄電池容量内の充電レベルは、“SOC（State of Charge）”と呼ばれる指標にて管理される。現在の環境自動車で使用される蓄電池の SOC 使用範囲は各社で異なり、その管理手法等の詳細はブラックボックス化されているものの、一般的に、全容量の半分程度（もしくは以下）の領域にて管理されると言われている。

すなわち、蓄電池の安全領域として、全体のかんりの容量は使用されていない。直接的に、充電レベルを正確に判定する手法がないことから、蓄電池に入出力する電流を経時的に積算することで SOC を推定しており、高精度のデバイスで誤差を削減して未使用領域を活用できれば、1回の充電あたりの走行距離が向上でき、また蓄電池自体の小型化・軽量化も可能となる（図1）。

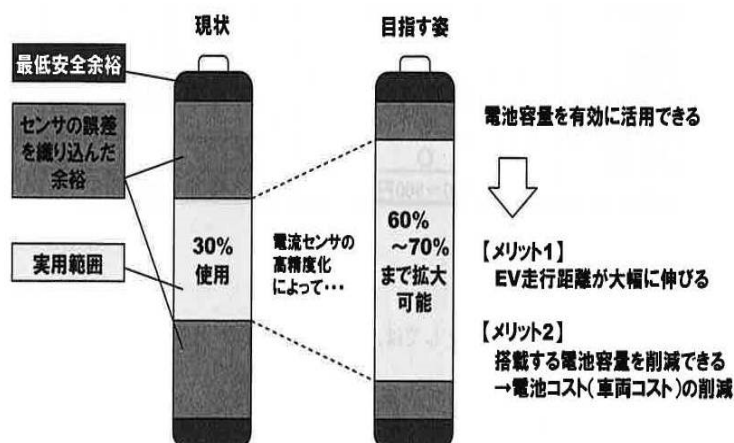


図1 電流センサ高精度化によるメリット

出典：矢野経済研究所“電流センサ市場の最新動向と将来展望 2012”

既に市販され使用されている、蓄電池管理用の直流測定用電流センサの特徴・課題を以下に示す。

#### 既存製品1 磁気比例式 電流センサ（図2-1）

（特徴）

- 一般的な軟磁性材コアと磁束検出素子を使用したシンプルな電流センサ
- 安価

（主な課題）

- 測定誤差が大きい（切込による反磁界の影響、材料に起因するヒステリシス誤差）
- 重い（コア材料の特徴）
- 温度依存性が大きい（コア材料・検出素子の特性）など

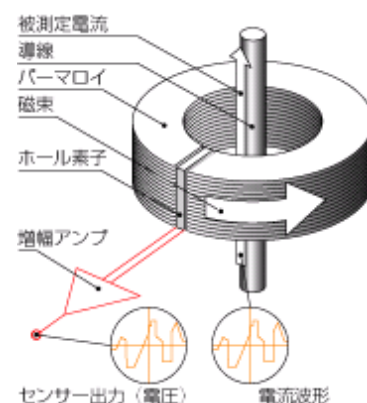


図2-1 磁気比例式センサ

#### 既存製品2 磁気平衡式 電流センサ（図2-2）

（特徴）

- 磁気比例式を改良し、磁気ヒステリシスの影響を減らした電流センサ

（主な課題）

- ゼロ近辺での検出精度が低い（コア材料・検出素子の特性、コア切込の影響）
- 突入電流等でゼロ点変動する（コア材料・検出素子の磁気ヒステリシス）
- 重くて大きい（コア材料の特徴、巻線）
- 磁気比例式と比べコストがかかるなど

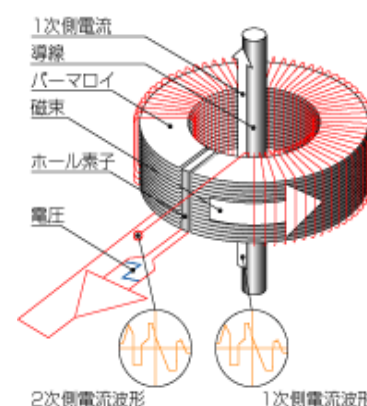


図2-2 磁気平衡式センサ

高精度に直流電流を測定するにはフラックスゲート式電流センサが存在するが、コアにパーマロイやアモルファスといった高価な高透磁率材料が用いられ、構造上も複雑であることから、車載部品として用いるにはコスト面で現実的でない。また突入電流等でコアの磁気特性が変化するリスクは残るため、精度の保証には限界がある。

以上の様に、いずれの方式においても、使用している材料（コア材料、検出素子）が変わらない限り、ヒステリシス誤差・オフセット誤差の程度・リスクを解消することはできない。この検出精度は、こういった材料依存の誤差・リスクと温度変化の影響をいかに補正するかには依存しているため、根本的な解決には、新たなヒステリシスのない磁性材料を用いる手法が残された道であった。

本開発テーマに至るにあたって、ナノサイズ磁性粒子を溶媒へ均一に分散させた磁性流体のヒステリシスのない磁気特性※に着目し、図3の様に常にゼロ点を経由する磁気挙動を示す、従来にない新たな固形のコア材料 *Hzero*<sup>TM</sup>を開発した。

（特開 2011-119661）

※ 磁性流体に使用される10nmサイズの磁性粒子は、強磁性体の磁区の大きさよりも小さいため、安定な磁区を形成しない。粒子の磁気モーメントは、熱ブラウン運動と印加磁界のエネルギー平衡のみで決まるため、残留磁化状態を生じないことが知られている。

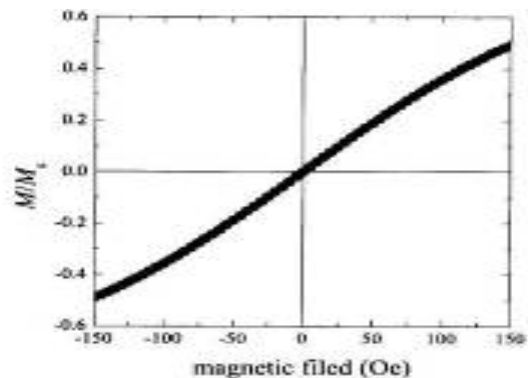
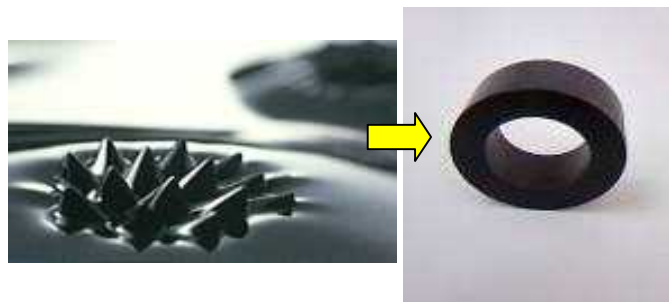


図3（上）磁性流体を用いたコアイメージ  
（下）磁気ヒステリシスのない挙動

新しく開発したコア材料を用い、磁気ヒステリシス・オフセット誤差がなく、ゼロ点を保証できる高精度直流電流センサの基礎開発を開始した。

基礎開発にあたっては、

- ・既存の検出素子（ホール素子、MR素子等）を用いないこと
- ・透磁率の大きさに依存する機構でないこと
- ・特にゼロ点近傍の検出精度が高いこと

を目標（必須条件）とし、検討された様々な検出機構の中で、励磁検出方式を採用することで、新たな磁性コアの特徴的な磁気特性を十分に生かし、従来の問題を一挙に解決できる電流センサが考案された。（特願 2012-054623）

本方式は、新たな磁性コアが有する透磁率が低いという欠点を無視できるだけでなく、広い磁場（測定電流）範囲にて特徴的に変化する磁気特性を生かすことができる。またホール素子等を用いることなく、以下の電流センサとしてのメリットを引き出す可能性を有する。

- ・微小電流から大電流まで、単独の機構で測定可能（高ダイナミックレンジ）
- ・ヒステリシスでゼロ点がずれず、ゼロ近辺の精度が高い（ゼロオフセット誤差）
- ・軽量化・小型化が可能（樹脂系の新コンポジットコア材料）
- ・高いコスト競争力（高価な高透磁率材料が不要） など

新たな磁性コアを用いた電流センサ試作品について、被検出電流を±200A の範囲で20 回ループさせた時の出力データを、図4に示す。繰り返し測定データは全て重なり、極めて良好な再現性を得た。本データは、正方向と負方向のデータを絶対値としてプロットしており、仮にオフセット誤差がある場合には、データにずれが生じる。

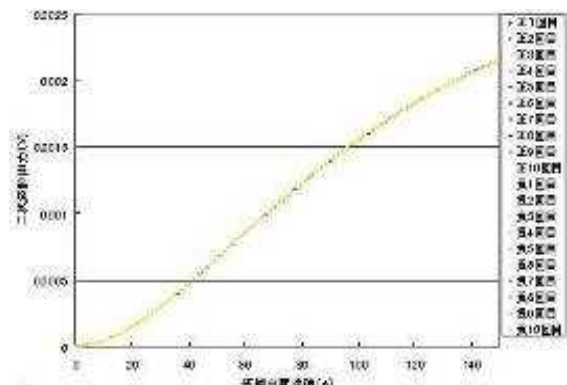


図4 試作品の出力データ

測定誤差は、測定範囲全域で0.5%以下と磁気平衡式より優れた実力を示し、特にゼロ近辺の繰り返し誤差は完全なゼロ、すなわち出力にヒステリシス（電流オフセット）が全くみられないことが確認された。

このように、先進的な電流センサの基礎動作・性能は確認されたものの、実用に耐えうる電流センサ設計に至るには解決すべき技術課題が存在する。市場でのニーズは高まっており、製品化に向けた速やかな課題の解決が重要と考えた。

### 「研究目的及び目標」

磁性材料およびセンシング機構の最適化という課題は、先述の通り、既にある独自技術を発展させたものである。また、目的とする高精度電流センサを実用化するための制御システムの開発は、“目標仕様に応じた実装電子回路の設計・開発”とも表現できる。

よって本開発の本質は、独自性のある素材からなる新センシング機構と電子回路の連結設計であり、“センサ機器の実装構成技術の高度化”という国の指針に合致するといえる。すなわち、新素材からなる電流センサ構造と、適切な制御システムとを複合化することで、独自性・付加価値の高い、次世代電子デバイスの実装設計・製品化を目指す。

以上の研究目的を鑑みて、本開発における技術的な諸目標を設定した。最終的な目標として、市販されている電流センサ製品をベンチマーク候補とし、実測比較による評価を最重要と位置づける。各段階での目標を以下に記す。

## 磁性ナノ粒子及び樹脂と混合したコア材料の開発

磁性ナノ粒子を樹脂に混練して作製する磁性コアの作製・評価手順を明確にする。また、磁性コアの物理特性を改善し、実用に耐えうるコア材料を開発する。標準のコアを選定次第、試作ロット誤差を確認した上で関連する要因を明確にし、要求仕様を満たすコアの量産技術を整備するとともに、物理特性・耐久性能についての評価を幅広く実施する。基幹技術として、センシング材料にふさわしい磁性ナノ粒子そのものの検討も並行して進める。

## センシング構造の開発

新たな磁性コアを用いた最適なセンシング構造を見出すにあたり、特徴的である磁気特性から出力される信号の検出挙動を把握する。その特性を生かすための電流センサ構成として、基本アーキテクチャを提案し、それらの最適化・組合せにより最適なセンシング機構を見出す。

## 発振及び受信回路の開発

高精度励磁正弦波信号を生成する発振回路、センサ信号を高精度に受信する回路を設計する。将来の回路安定性・低コスト化を視野に入れ、可能な限りシンプルな回路構成を実現する。

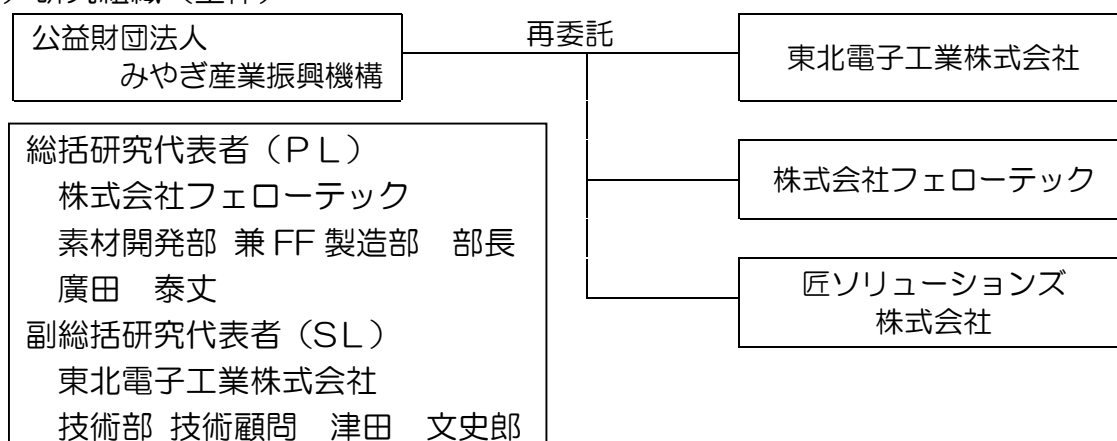
## 高精度直流電流センサのパッケージ品の開発

高精度直流電流センサおよび制御基板を含むパッケージ品の開発を目標とする。ただし、制御回路は小型化（IC 化）を追求すると初期投資が過大となり研究目的から逸脱してしまう為、本研究期間内ではディスクリートを用い、将来的に小型化（IC 化）が可能な回路構成の実現に留める。電流センサのユニット試作については、ベンチマーク製品の形状、重量、特性値を目標とする。

## 1－2 研究体制

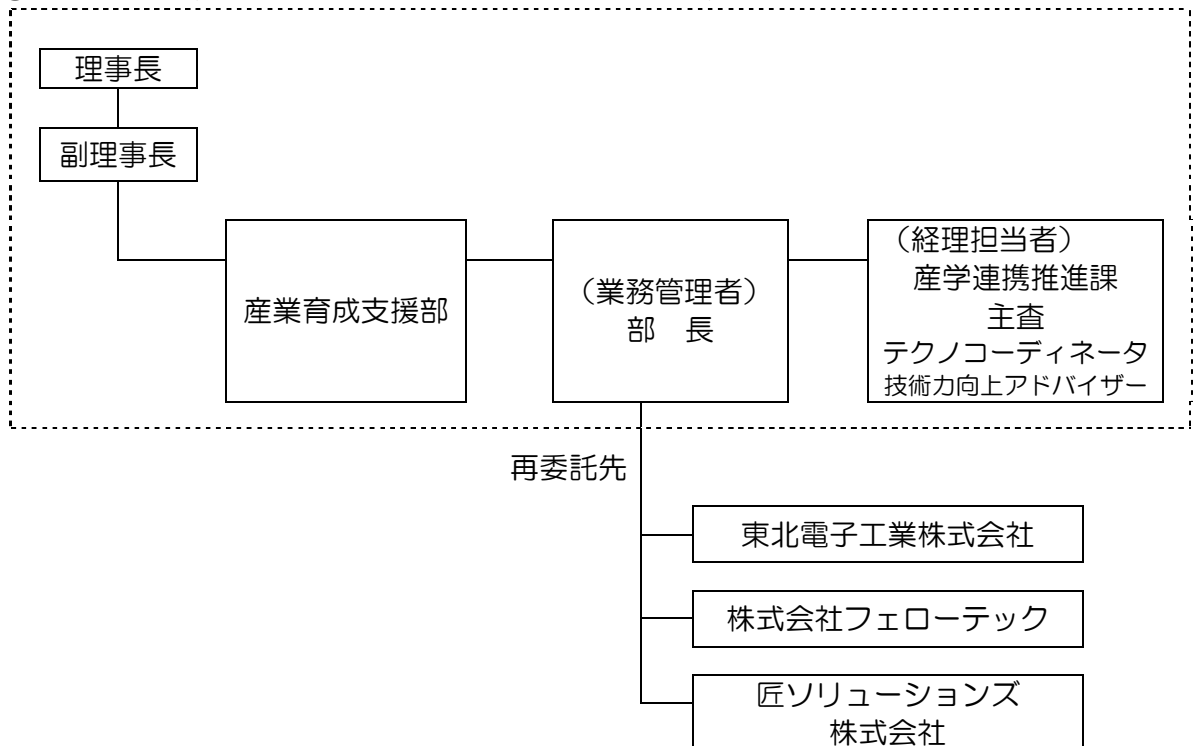
### 1－2－1 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織（全体）

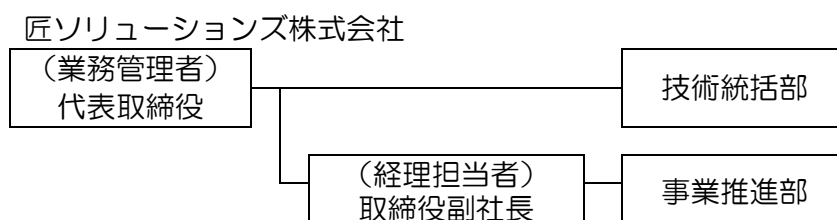
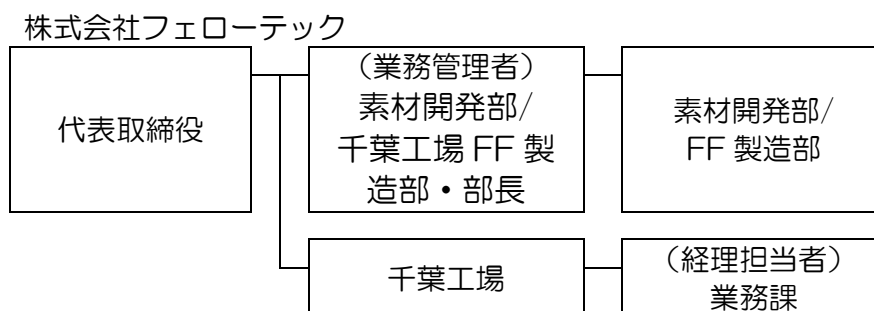
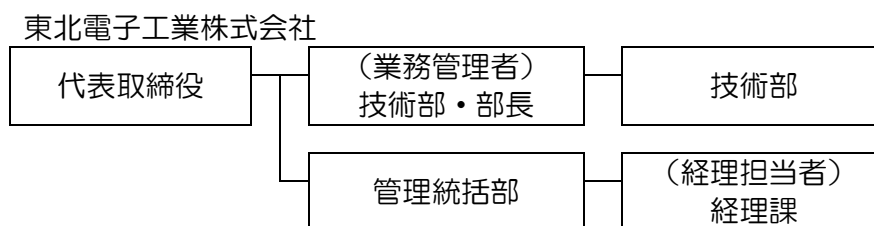


## 2) 管理体制

### ① 事業管理機関（公益財団法人みやぎ産業振興機構）



### ② (再委託先)





## 1-2-2 研究員及び管理員

【事業管理機関】公益財団法人みやぎ産業振興機構

管理員

| 氏名     | 所属・役職                         | 実施内容（番号）* |
|--------|-------------------------------|-----------|
| 中塚 朝夫  | 産業育成支援部 部長                    | ⑤         |
| 千葉 雄三  | 産業育成支援部 次長                    | ⑤         |
| 菊地 智   | 産業育成支援部産学連携推進課 課長             | ⑤         |
| 石川 宙生  | 産業育成支援部産学連携推進課 主査             | ⑤         |
| 八重樫 順一 | 産業育成支援部産学連携推進課<br>テクノコーディネーター | ⑤         |
| 小野寺 桂三 | 産業育成支援部産学連携推進課<br>技術力向上アドバイザー | ⑤         |

【再委託先（研究員）】

東北電子工業株式会社

| 氏名     | 所属・役職    | 実施内容（番号）* |
|--------|----------|-----------|
| 武山 伝実  | 技術部 部長   | ①、②、④     |
| 津田 文史郎 | 技術部 技術顧問 | ①、②、④、SL  |
| 千葉 周作  | 技術部 技師   | ①、②、④     |

株式会社フェローテック

| 氏名    | 役職・所属                | 実施内容（番号）* |
|-------|----------------------|-----------|
| 廣田 泰文 | 素材開発部 部長 兼 FF 製造部 部長 | ①、PL      |
| 藤岡 里美 | 素材開発部 FF 開発課 課長代理    | ①         |
| 鈴木 久雄 | FF 製造部 品質管理課 課長      | ①         |
| 青柳 道明 | FF 製造部 品質管理課 主任      | ①         |

匠ソリューションズ株式会社

| 氏名    | 役職・所属   | 実施内容（番号）* |
|-------|---------|-----------|
| 岩本 正美 | 代表取締役社長 | ②、③       |
| 佐藤 崇  | 技術統括部   | ②、③       |
| 阿部 久市 | 技術統括部   | ②、③       |
| 鈴木 彰  | 技術統括部   | ②、③       |

\* 実施内容（番号）について

- ①磁性ナノ粒子及び樹脂と混合したコア材料の開発
- ②センシング構造の開発
- ③発振及び受信回路の開発
- ④高精度直流電流センサのパッケージ品の開発
- ⑤研究全体の統括、プロジェクトの管理運営

### 1-2-3 他からの指導・協力者及び指導・協力事項

| アドバイザー<br>氏 名    | 主な指導・協力事項              |
|------------------|------------------------|
| 佐藤 佳彦            | センサデバイスを利用する立場からのアドバイス |
| 村山 僚悟            | センサモジュール設計に関するアドバイス    |
| 田路 和幸            | インフラ用蓄電池に関するアドバイス      |
| 青木 孝文            | 情報処理回路設計に関するアドバイス      |
| 中谷 功             | 磁性コアの開発に関するアドバイス       |
| 間宮 広明            | 磁性コア信号処理に関するアドバイス      |
| バラチャンドラ・<br>ジャゲッ | 磁性材料選定に関するアドバイス        |

## 1-3 成果概要

### 1-3-1 磁性ナノ粒子及び樹脂と混合したコア材料の開発

開発全体として共用する標準の磁性コアを制定し、品質・コスト・耐久性の要求仕様を満たすコアの量産技術を整備するとともに、その量産コア試作品をもって物理特性・耐久性能の評価を幅広く実施した。

### 1-3-2 センシング構造の開発

交流励磁方式の動作確認を行い、磁気ヒステリシス由来の誤差がないことを検証した。またセンサ制御方法としての複数のアーキテクチャを組み込んだシステムを検討し、センシング機構としての有効性を追求した。特性値として、ゼロ付近のヒステリシスが小さく、高精度の電流センサ実現のめどが得られた。一方、応答速度に関する課題が残ったが、シミュレーション等により解決方向を示せており、回路の改良等で対応できる見込みである。

### 1-3-3 発振及び受信回路の開発

目標の電流検出精度を達成するため、アナログ式の発振回路及び受信回路の特性を改良した。また将来的な回路の安定性、コストや実装面積を改良するためにデジタル式回路の適用について検討を行った。

### 1-3-4 高精度直流電流センサのパッケージ品の開発

電流センサをパッケージ化するため、主に検討されてきたサイズの磁性コアを、重量比で 1/8 にサイズダウンし、同等の特性が得られることを確認した。また同磁性コアを用いた交流励磁方式のセンサ設計を進め、パッケージ品試作を完了した。

#### 1－4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人みやぎ産業振興機構

〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉一丁目14番2号

TEL：022-225-6638 FAX：022-263-6923

E-mail：[koudo@joho-miyagi.or.jp](mailto:koudo@joho-miyagi.or.jp)

産業育成支援部

中塚 朝夫

千葉 雄三

//

産学連携推進課

菊地 智

片桐 正幸

石川 宙生

八重樫 順一

小野寺 桂三

## 第2章 本論

### 2-1 磁性ナノ粒子及び樹脂と混合したコア材料の開発

主管研究機関：株式会社フェローテック、東北電子工業株式会社

磁性コアの最適化を検討するにあたり、基本となる磁性コア作製・評価手順を設定した。その基本手順を元に、磁性コアの物理特性を改善し、実用に耐えうるコア材料を設計した。

初年度に開発した基準コア（図5a）は、量産性・部位毎の均一性・硬度等に改善の余地があったため、組成面・プロセス面で工夫を重ねた。樹脂に練りこむバインダーの種類を変更して成型した磁性コア改良品（図5b）、電流センサのパッケージ試作品のための小型磁性コア（図5c）はその一例であるが、改良された磁性コアは、成型前の材料特性としてハンドリングが容易となり、量産性についても改善された。



図5 a 磁性コア基準品



b 成型改良磁性コア



c 小型磁性コア

この小型磁性コアは、磁場解析ソフトウェアでのシミュレーション結果もふまえ、暫定的に寸法（外径 $\phi$ 30mm、内径 $\phi$ 18mm、厚さ 5mm）とした。このサイズは、100A を超える直流大電流の測定を目標とした電流センサのコアとしては、極めて小さいものといえる。小型磁性コアならびに基準コアの熱重量分析データを図6に示す。試験条件としては、20℃から 1000℃、40℃/分、N2 フロー、試料量約 25mg、Pt セルを使用した。

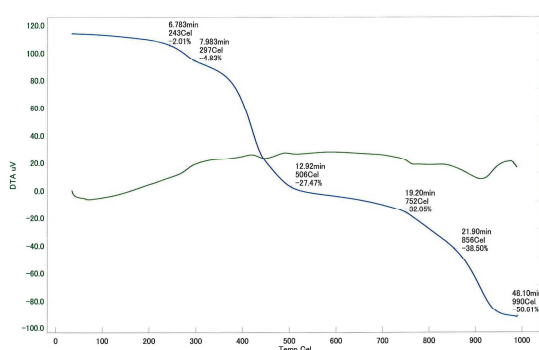
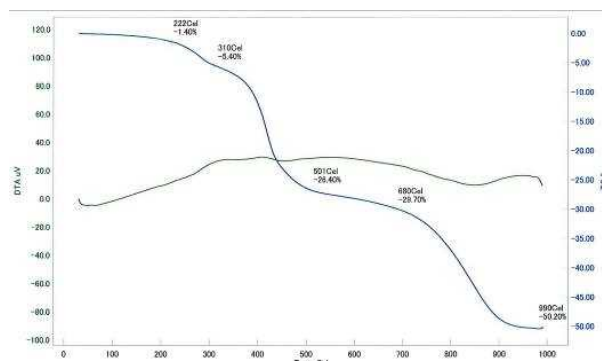


図6 a 小型コアの熱重量変化



b 基準コアの熱重量変化

150℃以下の領域での熱重量変化は、実用温度域における樹脂成型物の安定性を示し、一方で 1000℃付近での重量減少割合は、磁性コア中に含まれる無機物の大まかな含有率を表す。本分析などにより、試作した磁性コアは、実用温度領域では熱による分解は起こらず安定で、組成面においてはロット内外・部位等による違いも小さいことが確認された。

小型磁性コアの物理特性を仕様化し、耐久性能評価を開始した。その主な評価項目は以下の通り。評価ごとに、磁性コア単体、巻線を施した磁性コア、樹脂に封入した磁性コアなど、適切な形態で試験を行った。

- 耐熱試験
- 耐寒試験
- 熱衝撃試験
- 耐高温高湿試験
- 耐衝撃試験
- 耐振動試験

一部試験については評価継続中であるが、極度の条件での評価を除き、実用上概ね優れた耐久性を有することがわかった。また、環境性能評価として、RoHS 規制（自動車環境基準 ELV 規制も準拠と判断）に係る有害化学物質、環境ホルモン物質等の含有調査を実施した。また REACH 規制に係る SVHC の分析調査も実施したが、これは ECHA が 2013 年 12 月に示したリスト記載の 151 の懸念化学物質についての調査である。全ての懸念化学物質は検出されなかった。

基幹技術として、センシング材料にふさわしい磁性ナノ粒子の検討も並行して進めた。特性が異なる磁性粒子を含むコアを用いた時の磁束分布のシミュレーションを行った結果を図 7 に示すが、基準のコアと比較してコア内部に発生する磁束は大きく増加した。将来的にゼロ点近辺の感度を更に向上させるなどの必要が生じた際、コア側面からの改善策として、より最適なナノ粒子を用いることが考えられる。

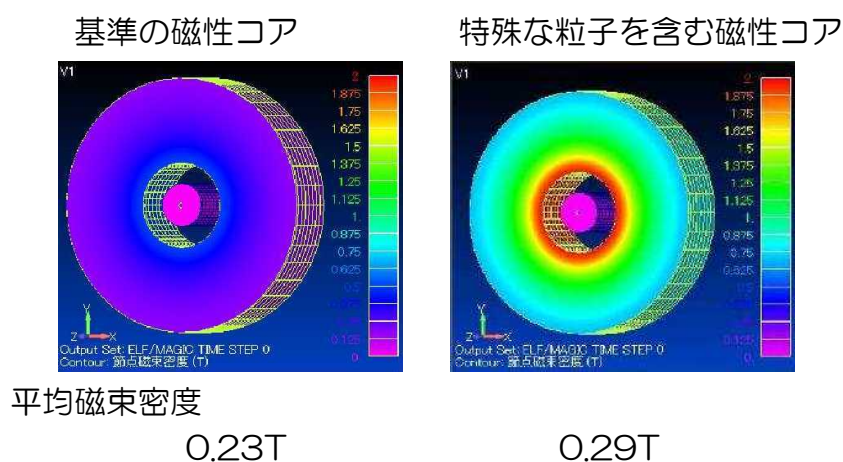


図7 コア組成による磁束分布の違い（被測定電流 50A）

## 2-2 センシング構造の開発

主管研究機関：東北電子工業株式会社、匠ソリューションズ株式会社

目標仕様を満たす電流センサパッケージ品の作製のため、交流励磁方式を基本とし、複数のアーキテクチャ（基本構成）を有するセンサ構成の提案とその基礎的な研究から、それらの組み合わせにて詳細な検討を行った。その中で、センサ感度を向上させる技術、さらにセンサの動作範囲と精度向上が期待できる技術について注力した。

本研究で使用する超常磁性の磁性コアを活用する方式として、AC励磁方式が最適であるが、2個の磁性コアを使用した差動検出によるセンサユニットについて検討を進めた。図8に示す様な構成であるが、励磁巻線と検出巻線を有する2個の磁性巻線コアを用いる。励磁側は逆位相、検出側は同位相になるように接続し、被測定電流（ $I_m$ ）線がコア内部を貫通する構成となる。2つのコアの励磁電流  $I_1$  による差動巻線出力  $V_2$  は、2個の2次巻線出力の加算成分となる。コアの磁気特性モデル（同図b参照）を基本とし、本構成の動作モデルを同図cに示す。

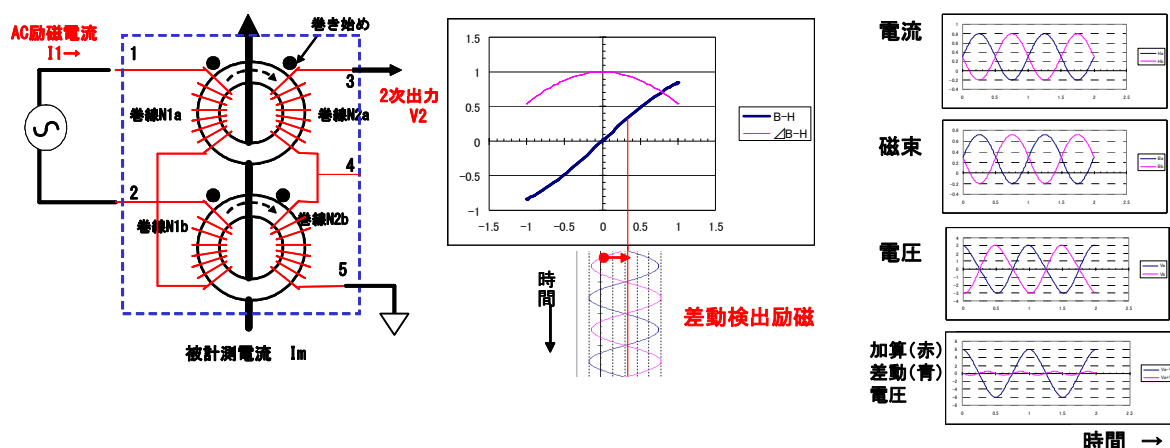


図8 a 電流センサ巻線構成

b 磁性コアの磁気特性

c 電流、出力の関係

被測定電流  $I_m$  により、それぞれの磁性コア内部の磁束は片側にバイアスされた状態になる。このとき、コアの磁界-透磁率カーブは直線でないため、磁束に非線形歪が発生する。2次巻線出力  $V_2'$  は磁束の微分量に比例することから、 $V_2'$  は基本波成分  $V_{21}'$  と2次高調波成分  $V_{22}'$  の合成量として検出される。従って2次高調波成分  $V_{22}'$  は  $I_m$  に依存した変化を示し、周波数スペクトラムの観測などで計測可能となる。但し、そのままでは2次高調波成分  $V_{22}'$  は、基本波成分の1/200～1/100程度と小さいため、2個の巻線コアを差動動作するように構成し、2次歪成分を検出しやすくすることで、基本波と2次高調波  $V_{22}$  の成分比を1/2から8倍程度にまで改善できた。

以降、実験を進める上で、回路部品や定数の変更が発生した際に修正がしやすい様に、コネクタソケット等を多用した試験用基板を作製した。その例を図9に示す。



図9 センサユニット評価用ユニバーサル基板

この様に、改良を重ねた評価用基板と磁性コアからなるセンサユニットを組み合せ、電流センサ制御の実験検討を進めた。励磁条件については、励磁波形の影響をはじめ、各アーキテクチャにて影響を受けるファクターを明確にすることで、最適な条件出しを進めた。主要な個々の要因とその現象をもとに、センサ全体を設計する上での要因を明確にした。

### 2-3 発振及び受信回路の開発

主管研究機関：匠ソリューションズ株式会社

高精度直流電流センサを制御するため、高精度の発振回路、受信回路の開発を進めた。発振回路としては、当初は高精度なアナログ式正弦波生成回路を開発したが、その後の研究の進展により DA コンバータ方式の検討を開始した。受信回路としては、微小信号をDC的に抽出する回路を採用している。

本電流センサの動作原理は、磁性コアの一次側巻線 N0に励磁電流を流し、N1に直流重畳する事により生じる「二次側巻き線 N2 に現れる高調波歪みの量」から電流値を測定するものである（図 10）。

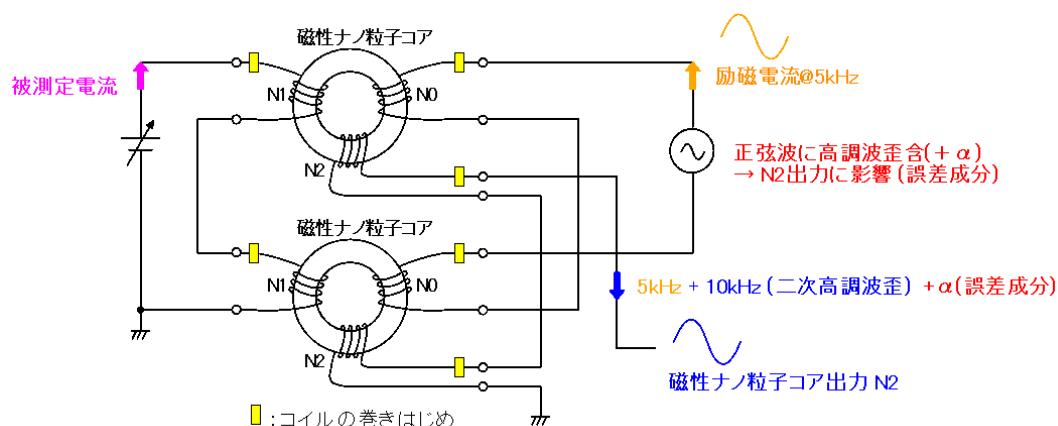


図10 磁気平衡方式の概略図



動作原理およびこれまでの研究成果から、励磁信号にて不要な高調波が電流検出精度を悪化させるものと判断し、高精度のアナログ正弦波発振回路を設計した。その後の研究進展において、励磁信号の精度はある程度妥協できる見込みがついた。このため、将来の小型化・ＩＣ化を視野に入れて発振回路は汎用ＤＡコンバータを用いた方式に変更し、回路の簡素化と実装面積の削減を図った。ＤＡコンバータはマイコン内蔵の物を使用している。開発した発振回路のブロック図を図 11 に、仕様を表 1 に示す。

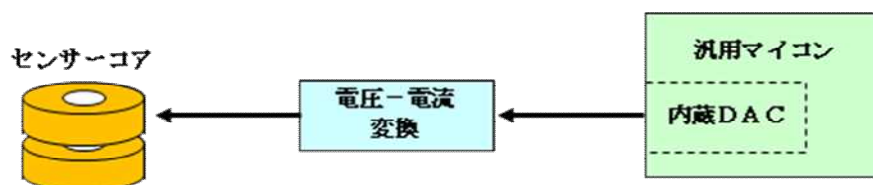


図 11 発振回路のブロック図

表 1 試作発振回路仕様

| 項目        | スペック           |
|-----------|----------------|
| 正弦波発生方式   | ＤＡコンバータ（１６ｂｉｔ） |
| 発振周波数     | ５kHz±0.1%      |
| 二次高調波ピーク値 | －90ｄＢ以下        |
| 励磁電流能力    | ±１２０mA（最大）     |

使用したＤＡコンバータは１６ビット精度である。これは使用したマイコンの内蔵ＤＡＣがオーディオ用であった為だが、原理構造的には８ビットＤＡＣでも十分な電流測定精度を発揮できると考える。

本方式においては、複雑な演算処理を必要とせず、自律制御が可能であることが大きなメリットである。一方で測定に時間を要するため、実用化にあたっては応答速度の高速化が課題である。高速化のアプローチは幾つかあるが、その一つとして回路の一部もしくは全てをデジタル処理に置き換えることが挙げられる。

## 2-4 高精度直流電流センサのパッケージ品の開発

主管研究機関：東北電子工業株式会社

高精度直流電流センサおよび制御基板を格納するパッケージ品につき、ベンチマーク品を目標に、小型化・高性能化を目指し検討を進めた。

磁性コアの選定については、研究の進展により、当初に比べて重量比で約１／８のサイズにて、電流範囲としては同等の性能を得ることができた。ただし、磁性コアの形状によって、基本的な特性に大きな違いは生じないものの、磁気特性の一部に



差異が生じることがわかった。

小型磁性コアを搭載したユニット品の設計において、他社ベンチマーク品を参考に、被測定電流貫通孔をできるだけ大きくできる様に配慮した。ケースは3Dプリンタによる試作をおこない、材質は試作都合上ナイロン系素材を用いた。将来的には成形金型によるケースを想定しているが、ほぼ最終形状に近いと考える。またコア、巻線の保護、熱的バランスを目的にして、コアケースには柔軟性を有する樹脂を充填した（図12）。

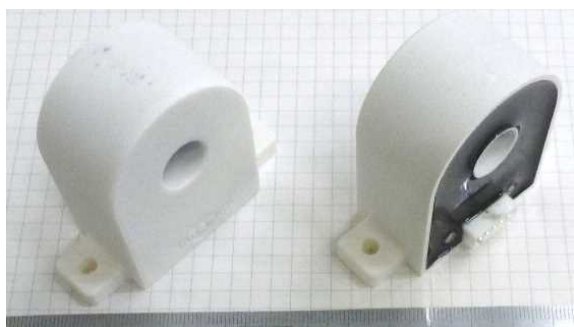


図12 パッケージ品の外観

パッケージ化したセンサユニットおよび制御回路の出力特性について、実電流との関係において、2%以下の直線性を $\pm 0.5\text{A}$ ～ $\pm 100\text{A}$ の領域で確認した。この領域外においては、制御回路等の要因を把握できているため、条件設定などで更に改善できることがわかっている。

大電流通電状態からゼロ電流復帰時のヒステリシスについては、0.1%以下（電圧換算で10mV以下）であることを確認した。コアの特性は、ゼロヒステリシスの特性を明らかに示していることから、回路条件の調整などにより、更なる改良が見込まれる。上記の直線性と併せ、ベンチマーク上位品と同等以上の特性を有すると言える。

一方、応答速度については、ベンチマーク品に劣る結果となっている。コア・制御条件等の最適化により、本研究目的としての車載用蓄電池の管理として対応できるレベルに改善が必要であるが、その対応策・見込みは立っている。

パッケージ品全体として、市販されている製品のうち上位品と同等以上の性能を示すものが設計された。コスト面、設計の自由度の面も含め、今後、電流センサの製品としての優位性を十分に引き出せる基礎が確立された。

### 第3章 全体総括

#### 「研究開発成果」

①研究開発項目である2-1から2-4について、各機関において、ほぼ計画通り実施された。

②各開発項目について、各々継続していくべき課題はあるものの、本研究において製品化を目指す上で本質的な障害になり得る要素は解決されており、材料・構造・制御の開発成果を組み合わせることで、製品レベルの電流センサの製品設計のステージへ進むことができると考えられる。

#### 「研究開発後の課題・事業化展開」

最終ユーザーの第一候補での採用を目指し、既に実装部品で実績のある商流を活用する。その他蓄電池メーカー、各自動車メーカーの環境自動車への採用に向けアプローチする。高精度直流電流センサのパッケージ品の開発を達成することで、自動車用蓄電池での実装試験をH26年度中に開始し、また水平展開として電力供給元での用途やスマートハウス等のインフラ向けへの事業展開を進める予定である。

#### 【想定する市場（今後の動向）】

車載用に限定した直流電流センサ市場は、現在は約200億円程度であるが、EV市場拡大に伴って大きく成長が見込まれ、2020年には500億円を越える規模になると推測されている（出典：矢野経済研究所）。そのうちEV関連市場は、2020年には116億円まで伸びると見込まれている。この予測はかなり堅実なものであり、別の調査機関による予測では、蓄電池監視用の電流センサのみで2015年には252億円という数値が公表されている。現在のHV/EVへの移行の高まりを勘案すれば、さらなる需要増加の可能性は極めて高いと言える。

#### 【新たな事業展開の可能性】

本開発での直流電流センサは、高精度での大きな直流電流の管理だけでなく、比較的小中規模の電流を高精度に管理する用途や、スマートハウスやスマートグリッドなどでの電流を監視する小型の交流・直流複合センサへの応用等も可能である。その応用範囲は、クリーンエネルギー施設、鉄道・住宅等のインフラ、工業用途など多岐にわたる。

本開発品の適用が展開できる領域を、以下に列挙する。

- ① 一般家庭用蓄電池（スマートメーター、緊急用電源など）
- ② オフィスビル・工場など（使用電力量の管理）
- ③ 高速列車・都市交通網（駆動用出力の制御、電力量管理）
- ④ 太陽光・風力を含む発電所（電力モニター・インバータ制御）
- ⑤ エレベーター（ドア制御、巻上モータ制御）
- ⑥ フォークリフト（リフトトルク制御、移動用駆動モータ制御など）
- ⑦ 電気メッキ処理（電力制御）
- ⑧ 抵抗加熱ヒーター（溶解炉の電力制御）

- ⑨ 工機・生産施設（溶接・放電などの電流制御、工作機械の負荷トルク制御）
- ⑩ ケミカルプラント（電気分解の制御など）
- ⑪ 鉄筋コンクリート建造物、橋梁、高圧送電用鉄塔など（陰極防蝕電流測定）など

#### 【その他】

本開発の成果は、環境自動車や蓄電池の一般普及の早期化を実現することで、国内の生産拠点の拡充による雇用創出、国内市場の活性化、環境対応技術製品の海外企業に対する強力な競争力確保に貢献する。また開発主体と製品化した時の量産は、東日本大震災の被災地域である石巻市を中心に想定しており、雇用の創出をはじめとする被災地域の振興に貢献する。

#### 【事業化担当者（所属・役職・氏名）】

株式会社フェローテック 素材開発部長 廣田 泰丈

東北電子工業株式会社 取締役会長 佐藤 幸太郎

匠ソリューションズ株式会社 代表取締役社長 岩本 正美