

# 超低鉄損軟磁性材を用いた高効率モータ

Highly Efficient Motor Using Soft Magnetic Material with Super-Low Iron Loss

西川 幸男

Yukio Nishikawa

谷本 憲司

Kenji Tanimoto

小島 徹

Tohru Kojima

小川 登史

Takashi Ogawa

瀬川 彰継

Terutsugu Segawa

金城 賢治

Kenji Kinjo

## 要 旨

ナノ結晶軟磁性薄帯をモータの固定子鉄心に応用することで、冷蔵庫用モータの効率を向上できた。筆者らは、このモータの製作工程の開発と駆動実証に成功した。製作工程は、溶融合金を急冷して薄帯にする工程、薄帯を鉄心材へ形状加工する工程、鉄心材をナノ結晶組織化するための熱処理工程、鉄心材の積層工程と、巻線工程からなっている。製作したモータの効率は、電磁鋼板品に比べ+3.1%と大幅に向上する。これは、エネルギー損失である鉄損が60%削減したためである。さらに圧縮機への搭載評価では、COP（成績係数）が+2.9%の大幅な向上を示す。この開発されたモータにより、冷蔵庫の省エネルギーが可能になる。

## Abstract

The aim of this study is to improve the efficiency of motors for refrigerators by using a soft magnetic film with a structure of nanometer-size grains. The authors succeeded in developing a manufacturing process for the motor and demonstrating its rotation. The manufacturing process consists of rapidly quenching a molten alloy to produce a thin film, forming the thin film into core sheets, annealing the core sheets to generate a nanometer-sized grain structure, piling the core sheets, and wiring. The efficiency of the experimental motor is greatly improved, +3.1% compared with a magnetic steel one. This is the result of reducing iron loss, which is an energy loss, by 60%. Furthermore, a compressor using this motor has a large improvement in Coefficient of Performance (COP), +2.9% compared with a magnetic steel one. The developed motor will make it possible to save electric energy in refrigerators.

## 1. はじめに

東日本大震災以降、電気エネルギーの安全な製造と効率的な使用が喫緊の課題となり、一般家電にも厳しい性能向上が求められている。家電の電気使用量の上位4機種は、電気冷蔵庫が1位で14.2%、2位が照明器具で13.4%、3位がテレビで8.9%、4位はエアコンで7.4%という報告がある[1]。ただし、順位や数値は、地域や時期により変動する。

電気冷蔵庫やエアコンなどに用いるモータには、鉄心（コア）材料が使われる。鉄心材料には、数十年にわたり主に電磁鋼板が用いられ、地道に電力損失の低減が行われている。しかし、モータや変圧器の鉄心からの電力損失は、国内で消費される電力量の約3.4%を占める[2]。この損失は、50万 kWhクラスの火力発電所7基分に相当するほど大きい。

この電力損失を画期的に向上する方法として、材料革新がある。その1つが、軟磁性に優れた非晶質合金の鉄心材料への適用である。しかし、非晶質合金は飽和磁束密度が小さいため、鉄心が大型化し、適用できるモータも限定されるという欠点がある。

それに対して、東北大学が開発したFe-Si-B-P-Cu系ナノ結晶合金NANOMET<sup>(注1)</sup>は、電力損失が非晶質合金並みに小さく、また非晶質合金の課題であった低い飽和磁

束密度をはるかに上回るため、鉄心の小型化や家電製品の消費電力低減に大きな期待をされている[3]。しかし、モータなどの実製品での省エネルギー効果の実証は行われていない。

ナノ結晶合金をモータに用いるには、薄帯にして積層する。薄帯は、溶融した母合金を回転する金属ロールの表面に注湯して薄く伸ばし、急冷して製作される。これを加熱処理して結晶化する。この結晶化により、薄帯は脆（ぜい）化し破損しやすくなるので、後工程のモータ用の加工や組み立てが難しい。そのため、モータ製作技術の開発が課題である。

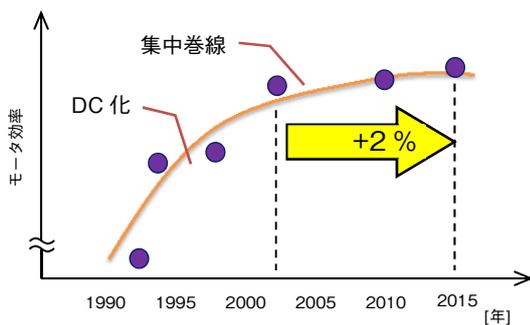
本稿の目的は、ナノ結晶合金の軟磁性薄帯を用いたモータの製作技術の開発、モータの駆動実証と、その効果の確認である。東北大学より結晶化前の急冷薄帯の提供を受け、それ以降の加工と組み立てを行い、モータを製作し評価する。さらに、それを搭載した冷蔵庫用の圧縮機を評価することで、ナノ結晶薄帯による効率向上を明らかにする。

(注1) (株) 東北マグネットインスティテュートとNECトキン(株)の登録商標または商標。

## 2. 開発の考え方と目標

### 2.1 現状のモータ効率

第1図は、冷蔵庫の圧縮機用モータ効率の変遷である。これまでの効率化の取り組みには、DC化や集中巻線などがある。しかし、2000年以降の効率は2%程度の微増で、現状の効率は約93%である。構造面から種々取り組まれてきたが、今後も効率が大きく向上する可能性は小さい。画期的な向上には、磁性材料など別の取り組みが必要である。



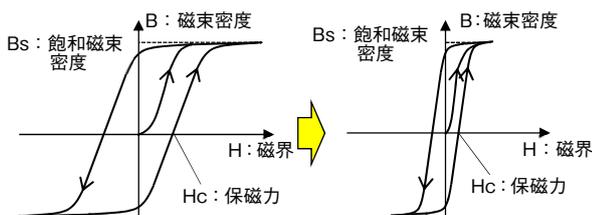
第1図 冷蔵庫圧縮機用モータ効率の変遷  
Fig. 1 Change of efficiency in compressor motor for refrigerator

### 2.2 モータ効率向上の考え方

モータで発生する損失は、鉄損、銅損、風損と、漂遊損に分類される。本稿で扱う冷蔵庫の圧縮機用モータでは、鉄損が損失の約70%を占める。これより、鉄損の低減が、モータ効率の向上には重要なことがわかる。

鉄損は、磁界により鉄心に発生する損失である。鉄損の中身は、ヒステリシス損失とうず電流損失に大別される。

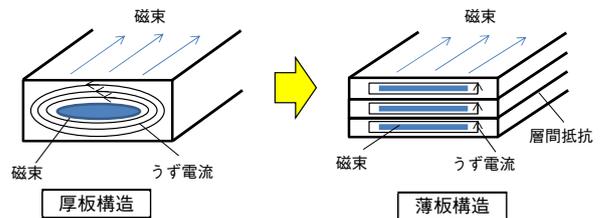
第2図は、ヒステリシス曲線の説明図である。材料は磁化されると、ヒステリシスにより磁化の履歴が残る。交流では電流の正負で磁化が反転を繰り返す、ヒステリシス損失は、その回転に必要なエネルギーとなる。右側の図のように保磁力が小さくなり、ヒステリシス曲線の



第2図 ヒステリシス曲線の説明図  
Fig. 2 Illustration of hysteresis curve

幅が狭くなると、反転によるヒステリシス損失は小さくなる。

第3図は、うず電流の説明図である。うず電流損失は、磁化力の変動により材料内部で誘導起電力が生じ、それにより流れるうず電流で発生するジュール熱である。同じ材料でうず電流損失を低下させるには、うず電流の経路を遮断すれば良い。それには、左側の厚板を使う構造から、右側の図のように層間抵抗の高い状態で薄板を積層する。



第3図 うず電流の説明図  
Fig. 3 Illustration of eddy current

第1表は、第2図と第3図でも述べた鉄損を小さくする材料の方策である。保磁力、板厚、表面抵抗以外の因子である磁区は、磁気モーメントの方向がそろった小領域である。この磁区を小さくするために、結晶粒径を小さくする。ナノ結晶薄帯は、保磁力、板厚と結晶粒径が小さく、鉄損を小さくする方策に適した材料である。

第1表 鉄損を小さくする材料の方策

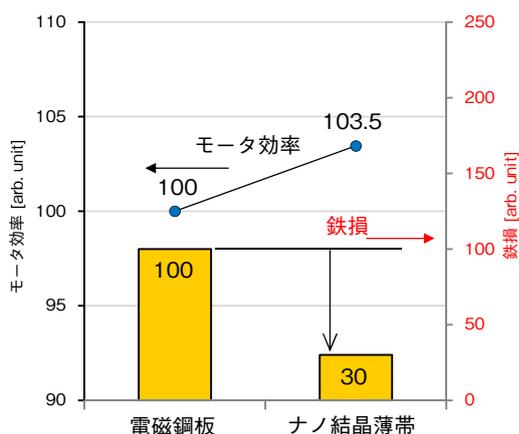
Table 1 Way to reduce iron loss with material

鉄損種類	鉄損要因	鉄損を小さくするには
ヒステリシス損失	透磁率	高くする (保磁力を小さくする)
うず電流損失	抵抗率	表面抵抗を大きくする
	板厚	板厚を薄くする
	磁区 (結晶)	結晶粒径を小さくする

### 2.3 開発目標

第4図は、鉄心材料の磁気特性の公表値と、鉄心形状を用いて試算した冷蔵庫の圧縮機用モータの効率と鉄損である。現行の電磁鋼板品を100とし、ナノ結晶薄帯品の特性を比較する。ステータ (固定子) の鉄心材料を電磁鋼板 (35A300) からナノ結晶薄帯に置き換えることで、試算した鉄損は70%減少する。その結果、モータ効率は+3.5%向上する。

そこで本稿では、冷蔵庫の圧縮機用モータの効率向上目標を+3%とする。これは、第1図の効率の変遷から考えて、従来の上昇率の延長では、約20年分の進化に相当する。



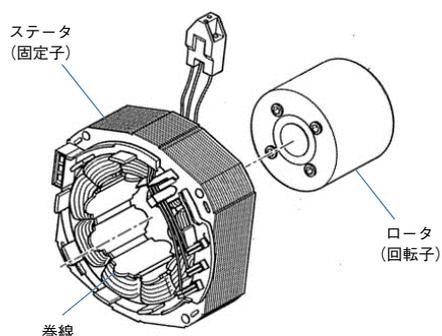
第4図 モータの効率と鉄損の試算  
Fig. 4 Estimation of efficiency and iron loss in motor

### 3. モータ試作実証と評価結果

#### 3.1 試作モータの構造

本稿のモータでは、材料変更の効果を明確にするため、板厚以外の鉄心材の形状や、銅損と関係する巻線仕様は変えない。鉄心材料だけを変更し、ナノ結晶薄帯と電磁鋼板を用いたモータの効率を比較する。

第5図は、製作するモータの構成図である。モータの種類は、冷蔵庫用の圧縮機に使用されるハーメチックモータである。ステータには軟磁性材料、ロータ（回転子）には硬磁性材料（永久磁石）が用いられる。ナノ結晶薄帯の鉄心材を現行の電磁鋼板品と同じ積層厚さの26 mmで積層し、ステータの積層部を形成した後、巻線を施す。ステータの内径部にロータを挿入し、通電してモータを駆動する。また、比較用モータには、ステータに電磁鋼板（35A300）を用いる。



第5図 製作するモータの構成図  
Fig. 5 Construction of developed motor

#### 3.2 ステータ製作工程

ステータの主要製作工程は、①急冷薄帯の製作、②鉄心材の形状加工、③鉄心材の結晶化熱処理、④鉄心材の積層と、⑤巻線である。ナノ結晶薄帯のステータ製作には、2つの課題がある。それらは、鉄心材の磁気特性を面内で均一にする技術と、結晶化により脆化した鉄心材を積層し固定する技術である。各工程について、以下に述べる。

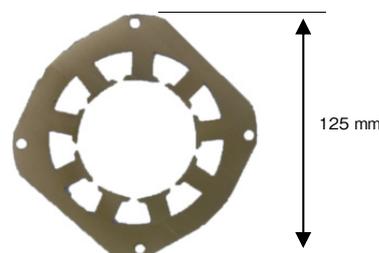
##### 〔1〕急冷薄帯の製作

急冷薄帯は、溶融合金からの急冷凝固法のうちの単ロール法で製作される。まず、調査された薄帯用合金材料を溶融する。それを回転する銅ロールの上に注湯し、凝固させて急冷薄帯が製作される。NANOMETの急冷薄帯では、2015年6月時点の最大幅は120 mm、板厚は約0.04 mmである[3]。

##### 〔2〕鉄心材の形状加工

急冷薄帯は非晶質状態であり、軟磁気特性向上のため、熱処理して結晶化する。しかし、熱処理により結晶化した薄帯は、脆化し形状加工が困難なため、先に急冷薄帯を加工する。

第6図は、鉄心材の外観写真である。これは対角125 mmの実製品と同じ形状で、幅120 mmの急冷薄帯を加工したものである。



第6図 鉄心材の外観写真  
Fig. 6 Appearance of core

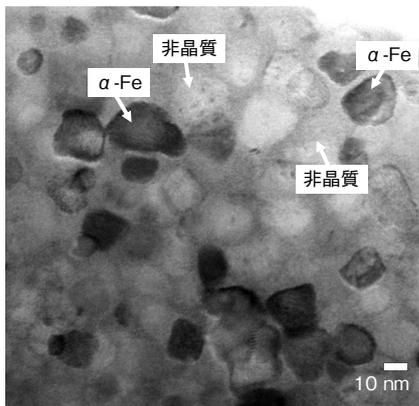
##### 〔3〕鉄心材の結晶化熱処理

急冷薄帯を熱処理すると、昇温過程の660 K付近で体心立方格子構造の $\alpha$ -Fe（純鉄）が析出し、さらに820 K近傍の温度で化合物の析出が生じる。このときの合金組織は昇温速度依存性が高く、磁気特性に最適とされる直径10 nm程度の結晶粒からなる均一組織を得るには、毎分100 Kの急速加熱が必要であることが報告されている[3]。

結晶化熱処理で開発した方式は、加熱速度が毎秒数10 K以上である。処理温度における鉄心材面内の温度幅は、8 K以内である。また、結晶化時には、薄帯の自己発熱による急激な温度上昇が起こり、磁気特性が影響される。

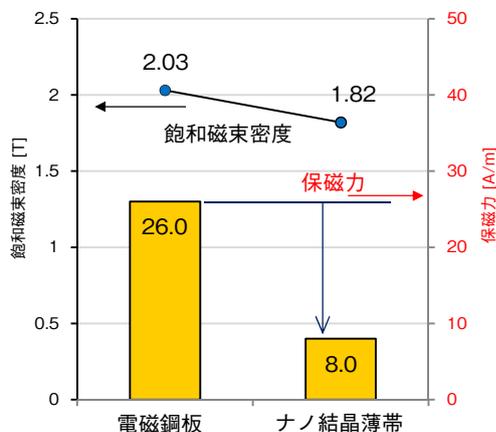
開発した方式は、処理温度に保たれた加熱媒体が鉄心材に絶えず接することで、薄帯の温度を制御する。

第7図は、結晶化熱処理した鉄心材の透過電子顕微鏡写真である。 $\alpha$ -Feの結晶粒径は10 nm~35 nmである。結晶粒間は非晶質である。結晶粒の核発生位置が多い非晶質を急速加熱することで、微細な $\alpha$ -Fe粒が多数生成する。また、設定温度での保持時間の最適化や、 $\alpha$ -Fe粒の周囲の相が結晶粒の成長を抑制し、微細な粒になったと考えられる。



第7図 熱処理した鉄心材の透過電子顕微鏡写真  
Fig. 7 Transmission electron micrograph of annealed core film

第8図は、鉄心材の磁気特性の比較である。ナノ結晶薄帯の最大値は、飽和磁束密度 ( $B_s$ ) が1.82 T、保磁力 ( $H_c$ ) が8.0 A/mである。同じ鉄心材の面内で測定した最小値との差の幅は、飽和磁束密度が2.8%、保磁力が6.6%である。比較用の電磁鋼板のカタログ値は、飽和磁束密度が2.03 T、保磁力が26.0 A/mである。ナノ結晶薄帯の飽和磁束密度は、電磁鋼板よりも約10%小さいが、これは、



第8図 磁気特性の比較  
Fig. 8 Comparison of magnetic properties

冷蔵庫の圧縮機用モータには問題ない大きさである。ナノ結晶薄帯の保磁力は、電磁鋼板の1/3以下と小さい。この場合の磁化曲線の傾きから求めた透磁率は、ナノ結晶薄帯の方が約5倍大きく、軟磁気特性に優れている。

#### 〔4〕鉄心材の積層と巻線

結晶化した鉄心材は、脆化し破損しやすい。破損を防ぐため、移送、積層と巻線は、曲げの発生を抑えて行い、ステータを製作する。

ステータは、後述のモータ評価と圧縮機搭載評価において、基台にボルト締結される。締結力は、圧縮機搭載時の方が大きい。締結部近傍には、積層方向の圧縮とねじれによる応力でひずみが発生し、これが大きくなると鉄心材は破損する。発生する応力は、積層方向の端部ほど大きい。また、ナノ結晶薄帯は、電磁鋼板よりも鉄損の応力感受性が高い。試算したナノ結晶薄帯の鉄損の応力感受性は、電磁鋼板の1.2倍以上である。この応力感受性が高い課題を克服するために、新たな締結構造を開発した。開発前の締結構造と比較し、開発した締結構造では、圧縮機搭載時の発生応力は、試算で85%減少する。その結果、開発前の締結構造に比べ、モータの鉄損は、実測値で約40%減少する。

第9図は、製作したステータの外観写真である。結晶化熱処理した鉄心材を積層し、絶縁用の樹脂部品を組み付け、巻線したステータである。巻線材は、線径0.5 mmの銅線である。このステータの内径部の軸方向にロータを挿入し、配線することでモータ駆動が可能となる。



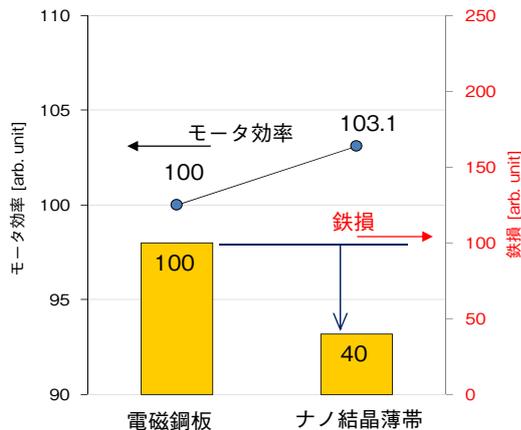
第9図 製作したステータの外観写真  
Fig. 9 Appearance of manufactured stator

### 3.3 特性評価

#### 〔1〕モータ特性評価

第10図は、ナノ結晶薄帯で製作したモータの効率と鉄損を電磁鋼板品と比較したものである。試験条件は、冷蔵庫の定格駆動条件である。電磁鋼板品と比べ、ナノ結晶薄帯品の鉄損は60%小さく、モータ効率は+3.1%向上する。

モータ効率の+3.1%向上は、開発目標以上である。前



第10図 モータの効率と鉄損の比較

Fig. 10 Comparison of efficiency and iron loss in motor

述したように、これは約20年分の進化に相当する。電磁鋼板を用いたモータでは、薄板化や鉄損の動向から考え、ナノ結晶薄帯品と同様の数値は困難と予測する。また、ナノ結晶薄帯の特性を考慮し、鉄損と銅損の合計量を低減する最適な鉄心形状により、効率がさらに向上する可能性がある。

ナノ結晶薄帯による鉄損の削減率60%とモータ効率向上+3.1%は、第4図の試算値より小さい。その理由として、積層した薄帯には締結による発生応力が残り、これが鉄損を大きくしたことが考えられる。これら組み立て上の問題点の改善も、モータ効率の向上に寄与する。

著者らの試算では、国内の全モータの鉄損が60%削減すると、約140億 kWhの電力削減になる。これは、50万 kWの発電能力をもつ火力発電所の約4基分に相当する。

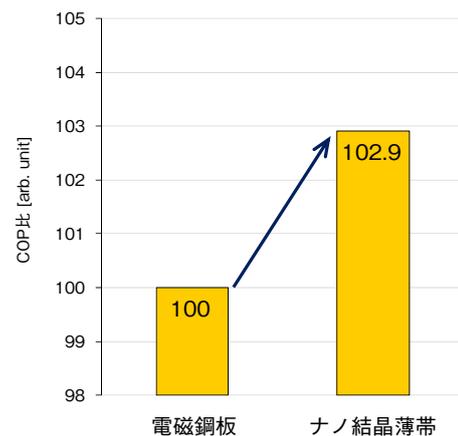
## [2] 圧縮機搭載評価

モータ効率の向上により、圧縮機も効率向上が期待できる。圧縮機評価の方がボルト締結力は大きく、この影響を減らす構造にしたことは、ステータ製作工程で述べたとおりである。また駆動環境は、モータ評価が大気中で、圧縮機評価は冷媒と冷凍機油中である。モータの効率向上により発熱が減ると、冷媒の温度上昇は低減され、冷凍能力は向上する。一方、油の粘度は大きくなり、回転部などの摺動（しゅうどう）損失は大きくなる。これらの背反する影響があるため、圧縮機の効率を評価する。

圧縮機の性能評価には、成績係数 COP (Coefficient of performance) が用いられる。COP値は、冷凍能力/圧縮動力という比で定義され、この値が大きいほど効率は良い。

第11図は、ナノ結晶薄帯で製作したモータを搭載した

冷蔵庫用の圧縮機のCOP値を、電磁鋼板品と比較したものである。同一の圧縮機で、ステータのみを入れ替えた試験の結果である。試験条件は、冷蔵庫の定格駆動条件である。電磁鋼板品のCOP値を100としたとき、ナノ結晶薄帯品のCOP値は+2.9%向上する。冷蔵庫用の圧縮機では、直近の3年間のCOP増加がこの1/6程度というデータもあり、ナノ結晶薄帯品は材料変更だけで圧縮機の効率を大幅に向上できる。



第11図 成績係数COPの比較

Fig. 11 Comparison of coefficient of performance

## 4. まとめ

冷蔵庫の省エネルギーを目的に、軟磁性のナノ結晶薄帯を用いたモータを初めて製作した。さらに、そのモータおよびそれを搭載した圧縮機を駆動し、電磁鋼板品との比較より材料変更の効果を確認した。モータ製作では、これまで課題とされていた加工や組み立ての技術開発を行った。

ナノ結晶薄帯を用いたモータは、エネルギー損失の70%を占める鉄損が電磁鋼板品と比べ60%削減し、効率は開発目標以上の+3.1%向上する。また、圧縮機の効率は、COP値が+2.9%向上する。したがってナノ結晶薄帯は、モータおよび圧縮機の高効率化や小型化に大きく貢献すると考えられ、冷蔵庫の省エネルギー化が可能である。

鉄損の削減結果を国内の全てのモータに適用した場合の試算結果は、50万 kWの発電能力をもつ火力発電所の約4基分に相当する大きな電力削減効果である。また、ステータの材料変更だけでなく、鉄損と銅損の合計量を低減する最適形状ができれば、一層の効率向上を期待できる。

今後は、「トップランナー方式」の数値目標を先導する家電製品の実現に向け、量産技術の開発を進める。また、冷蔵庫以外の種々なモータへの展開も推進する。

本稿の推進にあたり、NANOMET急冷薄帯の提供と、その熱処理に関する助言をいただいた東北大学金属材料研究所 牧野彰宏 教授、西山信行 特任教授に謝意を表す。

### 参考文献

- [1] 省エネ性能カタログ2013年冬版, 経済産業省 資源エネルギー庁.
- [2] 東京電力事業レポート, 資源エネルギー庁総合エネルギー統計, JFE21世紀財団鉄鋼プロセス資料.
- [3] 牧野彰宏, “超低磁心損失・高鉄濃度軟磁性合金「NANOMET<sup>®</sup>」の最新研究開発動向,” まてりあ, vol.55, no.3, pp.89-96, 2016.

### 執筆者紹介



西川 幸男 Yukio Nishikawa  
生産技術本部 生産技術研究所  
Production Engineering Lab.,  
Manufacturing Technology and Engineering Div.  
工学博士



小島 徹 Tohru Kojima  
生産技術本部 高度生産システム開発センター  
Advanced Production System Development Center,  
Manufacturing Technology and Engineering Div.



瀬川 彰継 Terutsugu Segawa  
生産技術本部 環境生産革新センター  
Green Manufacturing Innovation Center,  
Manufacturing Technology and Engineering Div.



谷本 憲司 Kenji Tanimoto  
生産技術本部 生産技術研究所  
Production Engineering Lab.,  
Manufacturing Technology and Engineering Div.



小川 登史 Takashi Ogawa  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社  
メカトロニクス事業部  
Electromechanical Control Business Div.,  
Automotive & Industrial Systems Company



金城 賢治 Kenji Kinjo  
アプライアンス社 技術本部  
Corporate Engineering Div.,  
Appliances Company