# 五月十五三八天

レース「優勝」を目指してモータ独自設計&製作,そして連覇達成!

# アモルファス&コアレス・モータの開発

開発動機から設計・製作・失敗と試行錯誤&評価まで

モータ用コア材の選定方法と磁気回路の設計法

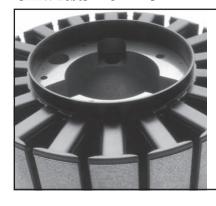
日なた/日陰でも太陽電池から常に最大電力を獲得する"MPPT"

http://toragi.cqpub.co.jp

ご購入はこちら.

http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MTR/MTRZ201610.html

# 〈基礎編〉第1章



~簡単でないトレードオフ:アモルファスか 電磁鋼板か、永久磁石との相性は…~

# モータ・コア材選択の基礎知識と 磁気回路の考え方

中島 晋

モータに関心がある方は、そこで使われる"モータ・コア材"がモータの性能を決める重要な鍵を握っていることはよくご存じであろう。コア材は、モータの損失要素の一つである"鉄損"の増減に関わるからである。しかし、モータに最適なコア材は簡単には決まらないという。鉄損の少ない効率の良いコア材を求めても、飽和磁束密度が小さい材料では大きな磁力が出せない、加工しにくく劣化しやすいものでも困る、永いとコア材の選定はできないという(モータ用とトランス用とでも求められる特性が異なる)。ここでは、モータ・コア材を選定するために必要な磁気回路の基礎とコア材の種類と特性を学ぶ。(編集部)

## 1. モータ省エネ化とコア材開発

### ● 電力消費の1/2以上がモータ機器で消費

日本でも世界でも、全電力消費量の1/2以上がモータ機器によって消費されているといわれています。原子力発電へ大きく依存することが難しい日本では、地球温暖化の進行を抑えるためにも、モータ機器の高効率化による、地球温暖化 $CO_2$ の排出量の抑制が一層強く求められています。

このため、わが国でも2016年4月から商用周波数で駆動される"単一速度かご形三相誘導モータ"が省エネのためのトップランナー製品の対象に加えられまし

た<sup>(1)</sup>. また、このトップランナー基準を超えた高効率モータも開発されています。

### ● 高効率モータ開発の鍵はコア材

こうした "高効率モータ" 実現の鍵を握るのが "コア材" です. モータのコアの材料は、日本語で鉄芯というように、鉄材でできています (コラムA).

コア材は磁性体でできていて、モータの磁束をコントロールする(磁気回路を形成する)重要な働きを持つ一方、鉄損(ヒステリシス損や渦電流損)による発熱源でもあります。

では、鉄損の小さなコア材を選択すれば「必ず高効率モータを実現できるか」といえば、そうではありません。

コア材の特性にはいろいろなものがあります。また、同じコア材でも、モータ用コアと変圧器(トランス)用コアでは、求められる特性が異なります。最近開発された高効率モータの中にはコア材として無方向性電磁鋼板をアモルファス合金に置き換えフェライト磁石と組み合わせることで、これまで実用レベルで不可能とされた超高効率を達成した事例が公表されています(2)。ここでは、この事例も含めモータのコア材の選択と活用法について解説します。

## 2. コア材を活用するための 基礎知識(3)(4)

初めに、モータのコア材を選定するのに必要な磁気 工学の基礎について解説しておきます.

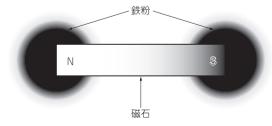
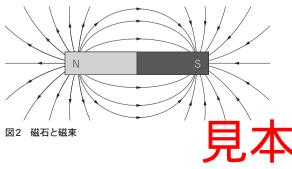


図1 磁石と磁極



## ■ 2.1 磁石の磁極と磁石間で働く力

### ● S極とN極 ―― +極と一極の関係と同じ?

棒磁石に鉄粉を振り掛けると、鉄粉の大部分は図1のように棒磁石の両端に付着し、その中央部分にはほとんど付着しません。このように吸引力の最も強い部分を磁極と呼びます。また、この棒磁石の中央を糸で釣り下げたときに北を向く磁極をN極、南を向く磁極をS極と呼びます。

N極とS極の周辺には多くの鉄粉が付着するのですから、そこには強い磁場があると考えます.この磁場を説明するのに、磁束という概念を使います.N極から磁束が発散し、S極で収束して戻ってくると考えます(図2).

### ● N極だけを取り出すことはできない

それでは、その棒磁石のN極部だけを切り出せば「N極だけの磁石になるか」といえば、そうではありません、不思議にも切断面はS極になっています。磁石

は、これをどれだけ細かく分割しても、どれも必ずN極とS極が同時に現れ、磁極の持つ磁気の量である磁荷はN極とS極を切り離して自由に取り出せません( $\mathbf{図3}$ ).

また、磁荷は電荷と異なり、磁石の中を自由に動くこともできません。

### ● クーロンの法則と磁界と磁気力と透磁率

電磁気学の基本法則に"クーロンの法則"というものがあります。高校の物理でも習うと思いますので、知っている方は多いでしょう。

ご存じのようにN極とS極の間には吸引力、N極同士、S極同士の間には反発力が働きます。二つの磁極間に働く磁気力F(以下、太字斜体はベクトルであることを示す)は「その方向が両極間を結ぶ直線状にあり、それらの磁極の強さ $m_1$ 、 $m_2$ の積に比例し、相互間の距離r [m]の2乗に反比例」します。これがクーロンの法則です。

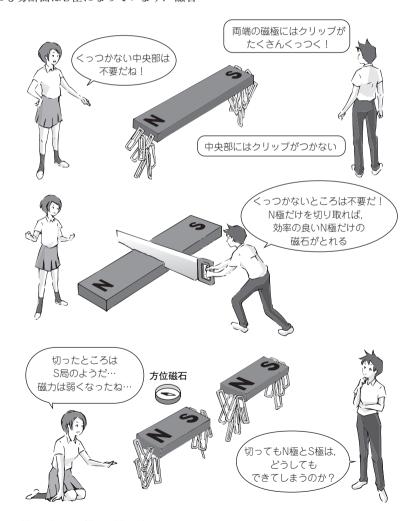
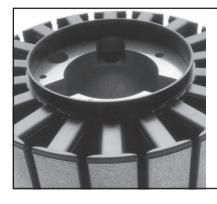


図3 磁石のN極だけを取り出せるか?



# 〈基礎編〉第2章



~モータ設計のトレードオフの中で コア材をどう選定するか~

# モータ設計者が考える コア材とモータ設計

内山 英和

ここでは、モータ設計者の立場から「コア材をどう選択し、どのように磁気回路設計をするか」の考え方を示す、当然のことながら、モータ設計には具体的な用途・目標があり、それによってコア材の選択肢も変わる、コア材を選定すれば、それによってモータ設計もいろいろと変えざるをえない、しばしば静的磁気回路(つまり永久磁石からの磁束)のみに注目してモータ設計することもあるが、コイル側からの磁束にも考慮しなければならない、このように、トレードオフ関係はかなり複雑である. (編集部)

## 1. モータ設計とコア材

### ● モータ・コアは、なくてもいい!?

モータを構成する重要な要素に"コア"があります。 モータ・コアの役割は、磁石からの磁束の通り道となることです。しかし、磁束は、コアがなくても、空気中でも、真空中でも通ることができます。 つまり、コアのないモータ "コアレス・モータ" というものも存在します。

しかし、磁性材のコアを用いて磁路(磁束の通り道、磁気回路)を作ることで、より多くの磁束を利用することができます。多様な性能を求められる一般的な

モータでは、磁気回路の制御性を高めるためにも、コ アはとても重要なのです. コアの設計で重要なのはコ ア材です.

例として「CQブラシレス・モータ&インバータ・ キット」のモータの分解図を**図1**に示します.

### ● 最高の材質を選べるか?

モータを設計する時、常に世の中にたくさんあるコ ア材の中からどれかを選択します。

理想的には、最高の材質で最高の性能を発揮する モータを作りたいところですが、現実はそうはいかな いことが多いのです。特に量産品開発の場では、性能 は確かに重要な要件の一つではありますが、そこにコ スト(材料費や加工しやすさ、設備など含む)の条件、 モータ体格・形状の制約など、さまざまな制約の中で 総合的に判断して進めなければなりません。

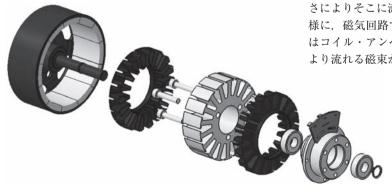
いわゆる, 現実の開発の場では, ベスト設計という わけにはいかないのが通常です. 「このコア材を使え ば性能が出る」と確信しても, 高価あるいは入手難な どの理由で簡単には選べないのが常なのです.

### ● モータ性能に及ぼすコア材の差

コア材の選択で、どれだけの性能差が出るのでしょうか? まずは理論的に考えてみましょう.

コアは、磁気回路での「磁束の通り道だ」と説明しました。電気回路で考えると電流が磁束、電圧が起磁力に相当します。

電気回路では、同じ電圧でも、回路の抵抗値の大きさによりそこに流れる電流値が変化します。これと同様に、磁気回路では、同じ起磁力(マグネットあるいはコイル・アンペア・ターン)でも磁気回路の抵抗により流れる磁束が変化します。



磁気抵抗をRmとすると

で表されます.

ここで、I: 磁路の長さ、A: 磁路 (磁束の通り道) の断面積、 $\mu$  は透磁率 ( $\mu_0$ =4  $\pi$  × 10  $^{-7}$ : 真空中の透磁率、 $\mu_r$ : 素材の $\mu_0$ に対する透磁率 = **比透磁率**)

磁気回路設計では、磁路を構成する各部での磁気抵抗の和を求めて計算します.

- 磁気抵抗を抑えるには 磁路は短く断面積は広く この式(1)から、磁束の流れやすさが想像できます。 つまり、磁気抵抗は、
  - ・磁路の長さに比例
  - ・ 磁路の断面積に反比例

することが分かります. ここは電気回路によく似ています. 電気抵抗は, 導体の長さに比例しその断面積に 反比例でした.

電気回路と違う点もあります。磁気抵抗では式(1) のように分母に透磁率 $\mu$ が掛けられています。例えば、真空中を考えると $\mu_0$ が分母に掛かります。その値は、 $4\pi \times 10^{-7}$ なので相当大きな数値になりますね(分母にあることに注意)。なお、空気の透磁率は真空の透磁率とほぼ同じです。

### ● コアレス・モータでの基本方針は

一方、コアレス・モータでは、磁路は空気または非磁性体と考えていいでしょう。つまり、磁気抵抗がとても高くなります。そこで、磁気回路の形状を工夫して、なるべく磁極面積を大きく、磁路を短くする形状にします。

#### 表1 代表的なコア材の比誘電率

コア材	板厚 (mm)	比透磁率
無方向性ケイ素鋼板	0.35	18000
方向性ケイ素鋼板	0.10	24000
アモルファス	0.025	300000
純 鉄		200000



写真1 日産リーフ駆動モータのロータ外観

真ん中で色が違って見えるのは、そこでコアの抜き方向が反対になっているため、これによりマグネット位置が左右の回転方向で若干ずれるスキュー効果を出していると推測される

#### ● コアありモータ

一般的なコアありモータではどうでしょうか?

式(1)のとおり、コアなど磁路に磁性材料を使うと磁気抵抗の式の分母にその材料の比透磁率が掛けられます。具体的に比透磁率の値(例)を見てみましょう(表1)。

つまり、無方向性ケイ素鋼板を使うと真空中(空気中)よりも磁気抵抗が1/18000、アモルファスに至っては1/300000になるというわけです。

ちなみに、磁極を構成するマグネット(ネオジム磁石やフェライト磁石)の比透磁率は約1.05~1.10です。磁力の強い磁石だから比透磁率は高いと思われるかもしれませんが、逆で、ほぼ空気と同程度の磁気抵抗(つまり磁束が流れづらい)になります。

磁性材料を使えば、磁束が数万倍から数十万倍も流れやすくなると述べましたが、電気回路に比べるとその値は、抵抗損失エネルギーの観点からは大きいとは 言えません。

磁束は真空中(空気中)も流れますが、電流はそこ には流れません。

### 2. ロータ・コアとステータ・コア

### ● モータ・コアは二つある

モータ・コアというと、コイルが巻かれている鉄芯を思い浮かべる方が多いでしょう。しかし、一般にモータでは、磁束の通り道であるコアには2通りあります。例えば、ブラシレスDCモータとブラシ付きモータでは、コイル側のコアと永久磁石側のコアの二つです。つまり、

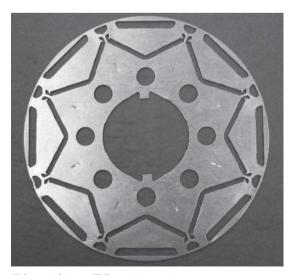


写真2 日産リーフ駆動モータのロータ・コア ロータ・コアに開けられた空隙部(穴)に強力なネオジーサイ ている(IPM構造)

24

# 〈開発編〉第1章



# ~ "WEM"の魅力と"モータ開発"の魅力~

# DDモータ独自開発の動機

籾井 基之

本特集の〈開発編〉では、EVエコラン・レース(WEM)で名をはせた筆者に登場してもらう。モータ開発の専門家でない筆者が、まだ誰も挑戦していないオリジナルのダイレクト・ドライブ(DD)モータを開発・製作してレースに優勝することを目標に開発を続けた16年間の開発物語である。筆者は、鉄損をできうる限り低減化することで、メーカ製モータよりも良い性能を出そうと、文献収集から材料選択・購入、モータ仕様決定・設計・製作・レース車に搭載までを手探りしながら進めていく、開発したのは、アモルファス・コア採用モータを3機、鉄損ゼロを目指したコアレス・ボータを2機だ、鉄損は下げられても、渦電流損が増えるなど、苦難な試行錯誤が続くが、目標のレースで4連覇を達成する。(編集部)

# はじめに —— 独自モータ開発で レースに挑み 16年

"WEM (ワールドエコノムーブ)"優勝を目指して「オリジナル・モータ作り」にチャレンジ、苦節12年で2009年にやっと優勝して以降、奇跡的に4連勝することができました(車名: Tachyon、写真1-1). 集大成として製作した新型コアレス・モータで、さらに連勝を狙っていましたが、2014年・2015年と2年連続パンクでレースを終えてしまい、結果を残せずにいました。2016年の大潟村大会決勝では、周回後すぐにトップへ立ち快調に飛ばしていましたが、2時間のレース終了30秒前で競り負け、113m差の2位となりました。

しかし、自己記録、コース・レコードを突破し、久し ぶりに良いレースができました。

これらのモータについては、大潟村大会で優勝できたら内容を公開するつもりでいたのですが、前年の "Ene-1もてぎ"で優勝、大潟村においてもトップ・クラスの性能であることが証明できたので、お披露目することにしました。

最近は、モータに興味を持つ人も増えてきており、 ものづくりの一歩を踏み出す際の刺激になればと思い、16年間にわたる苦しく楽しい、試行錯誤の過程 をお伝えします。

### 1. ワールドエコノムーブ

### ■ 1.1 WEM(ワールドエコノムーブ)とは?

### ● 秋田県大潟村で毎年5月のGW に開催

WEMとは、1995年から秋田県 "大潟村ソーラースポーツライン" (図1-1、写真1-1、写真1-2)で、毎年5月のGWにC.E.A. (クリーン・エナジー・アライアンス)が主催する1人乗り電気自動車のエコラン競技です。大会から支給されるイコール・コンディションの鉛バッテリ (12V-3Ah@10時間率) 4個 (写真1-3) を使い、「2時間でどれだけの距離を走行できるか」を競います。

### ● みんなで大会を作り上げている雰囲気がいい

大会のある5月は、菜の花が満開になった行楽日和 の中で開催され、レジャーと真剣勝負が混じったよう



**写真1-1 4連覇した "Tachyon"** (ドライバー:筆者)

見本

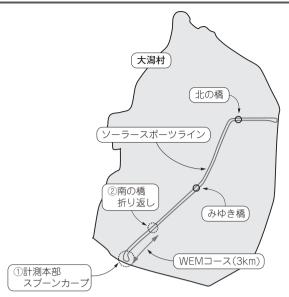


図 1-1 大潟村ソーラースポーツラインのコース図

秋田県大潟村は八郎潟の干拓地の村. 広大でほぼ平らな農地が広がる中に、全長25kmの(一般車両が通れない)村営のソーラーカー専用道路がある. ①の計測本部がスタート地点. 折り返し地点はレースによって異なるが、WEMでは②が折り返しとなる.



写真1-3 イコール・コンディションのバッテリとして大会当日 に供給される電池

古河電池製FTX4L-BS×4個

な独特の雰囲気があります.

また、車検員やコース・マーシャルはボランティア・スタッフが参加して、運営側とエントラントが協力して大会を作り上げている…、こういうのは他にない特徴です。

### ● 大潟村はWEMの聖地

WEMは、2002年よりシリーズ戦として各地(過去、タイ開催もあった)で大会が行われ、それぞれの場所ごとに特色があります。

この「大潟村大会」は発祥の地であることに加えて、 平坦で直線のコースなので、純粋な車両の走行抵抗 (空力、転がり)やモータ効率で勝負が決まること(運 転テクニックよりモノ作り技術)、競技規則がとても



(a) スタート・ゲート(計測ポイント) 計測本部があるスプーン・カーブ



(b) WEMの折り返し地点

写真 1-2 ソーラースポーツラインの衛星写真 (Google マップより)

シンプルで自由度が高く、初回からほとんど変更がないことなどから、現在でも競技者の間では、WEM界の「聖地」として扱われています.

● 2時間で92kmを走行 — 記録は年々向上中! 2016年の第22回大会(写真1-4)の優勝記録は、 チーム「PROJECT MONO◇TTDC」の"MONO-F" が出した92.354km(平均46km/h)でした. 空気抵抗 は速度の2乗に比例することから、記録はそろそろ頭 打ちになるはずですが、まだ右肩上がりで向上してい

るように見えます.

第1回大会の優勝記録63.798kmから見ると44%の向上で、平均すると毎回1.36km (28.556km/21回) ほど記録が向上していることになります (**図1-2**).

### ■ 1.2 WEM出場のきっかけ

● エンジン・エコラン/ソーラーカーからWEMに! 大学入学以来,エンジン・エコランのサークル活動をしたり,ソーラーカー・レースに参加

# 〈開発編〉第2章



# ~飽和磁束密度には気を付ける!~

# 改良を重ねて4連覇を達成 アモルファス・コア DD モータの製作

籾井 基之

コア材の選択はモータ効率化の鍵だ。それぞれ特性が 異なるのだが、モータ性能にどのように反映されるの か実感しにくい. 本章は. エコラン型EV用に"アモ ルファス・コア"を採用したモータ開発の話である. アモルファス・コアは、鉄損を大きく低減できる特徴 を持ち、筆者もその特徴を活かしてEVエコラン優勝 を目指そうとした. しかし、広く使われているケイ素 鋼板をアモルファス鋼材に置き換えるだけ、というわ けにはいかなかった。 アモルファスは飽和磁束密度が 低い特性もある。電気回路と同様に"磁気回路"におい ても充分に考慮しないと期待どおりの結果が出ない. また、アモルファス材は、固くて脆く、極薄で、極め て加工しにくい. 筆者は、9年間の試行錯誤を経て独 自コアレス・モータを開発した. そしてレース4連覇 を果たした、その開発物語になっている. (編集部)

# 1. アモルファス選定と モータ開発コンセプト

前章で述べたように、ワールドエコノムーブ(WEM)に参加していた筆者は、"ヨイショット・ミツバ"チームがオリジナルの「ダイレクト・ドライブ・モータ」で参加し優勝したことに衝撃を受けました。このレースで優勝するには、既製品のモータではなくオリジナルのモータを開発するしかないと考えました。そして、日本では市販されておらず、WEM出場者の間では、まだ誰も作成していなかった「アモルファス・コアを採用したダイレクト・ドライブ・モータを作る」と決心しました。アモルファス・コアを採用して鉄損を下げ、モータ効率が上がれば、優勝に向けて大きな戦力になるのではないか、と考えたのです。

注1:日本非晶質金属(株)は、2004年に日立金属(株)の完全子会社となり、2008年に会社としては解散し日立金属に集約された。ちなみに、日立金属は、1988年にナノ結晶磁性体である"ファインメット"という高機能コア材を開発していた。また、2003年には米国Honeywell社から同社のアモルファス Metglas事業部門を買収していた。

### ■ 1.1 アモルファスの入手

### ● 専門業者の門を叩いて幸運にもサンプルを入手

アモルファスに注目したものの、どのような材料なのか、どうやって入手するのか等々、まったく分からない状況でした。しかし、現状を打開するためには新たな一歩を踏み出すしかありません。

モータ・コアの加工を自分でやる覚悟があるのですが、ともかくアモルファス・コア材を入手するしかありません。そこで、当時日本でアモルファス材料を販売していた日本非晶質金属注1に「自作EV用にアモルファス・モータを作りたい」旨を直接相談したところ、興味を持ってもらえたようで好感触でした。

もちろん高価な材料でも購入する覚悟で伺ったのですが、何とありがたいことに、素人の個人活動にも関わらず、サンプルを提供していただけることになりました。また、いろいろなアドバイスもいただきました。

### ● アモルファスの加工性

日本非晶質金属からのアドバイスはとても参考になりました. コア材としては従来からあるケイ素鋼板より鉄損が大きく減少できるので、とても魅力があると思っていたのですが、意外にも期待ほど普及が進んでいないとのことでした.

当時のアモルファスは、インダクタや測定機などの 特殊用途に限定されており、同社の営業戦略としては 電柱トランス (用途としてアモルファス化による省エ ネ効果が大きい) に注力していくとのことでした.

ケイ素鋼板の材料置換として一気に普及しにくい原因として材料の特性があり、以下のようなことを教わりました.

- (1) 板厚が薄く (0.025mm), 厚みを稼ぐには大量に 積み重ねる必要がある.
- (2) 表面に絶縁コーティングがされていない.
- (3) 硬くて(Hv900), 脆く, 板厚が薄いことから, プレス加工による打ち抜きが困難.
- (**4**) 少し異方性があり、焼鈍 (消磁化) すると格段 に 性能がUPするが、さらに脆くなって、焼き

苔のようにパリパリになってしまう。

- (5) 結晶構造がないのでさびにくい。
- (6) コイル幅が一番大きいのは213mmで鉄系のみ.

想像以上にモータ・コアの形状に加工するのは難易 度が高いと感じました. 少し後ろ向きになりかけたの ですが、逆にこういう困難があるので、多くの人はア モルファスに乗り換えにくい、その困難を乗り越えれ ば大きなアドバンテージが得られるのではないかと考 えました。

### ■ 1.2 アモルファスの型番選定

### ● アモルファスの品種は多様

一口にアモルファス材といっても、非晶質の鉄の 合金なので、成分違いでいるいろな種類があります。 まず、そのうちのどれを選ぶかを決めなくてはなり ません.

コア材の特性の要素としては、主に

- ①透磁率(どれだけ敏感に磁束が通るか?)
- ②飽和磁東密度
- ③ヒステリシス損(磁東がN⇔S変化する時の発熱) の三つに分類できます.

モータ・コアの用途としては、磁気抵抗(透磁率の 逆数)の大きなエア・ギャップ(モータのステータと ロータの隙間) が存在するので、コアの透磁率はさほ ど重要ではありません。ただし、低ヒステリシス損で あることは重要です.

その他にも.

- 大径のコア・サイズが切り出せるコイル幅である
- 軽量で高いトルクを出せる

も重要なファクタです.

東密度が高い、鉄系の "2605TCA" (現在は2605SA1) が最適と判断しました。

## 2. アモルファス・モータ1号機の製作

### ■ 2.1 モータの設計

### ● 飽和磁束密度が小さいのでモータ直径を大きく

いざモータを設計してみると、まず何から設定した らよいのか分かりません. ただし、目標は、ミツバ・ チームのダイレクト・ドライブ・モータ(以下. DD モータ)より性能を上げることです.

ミツバのDDモータは、コアがケイ素鋼板です。ア モルファスでは、鉄損は少なくなるものの、ケイ素鋼 板より飽和磁束密度が小さいことが気になります。磁 東が少ないとトルクが不足すると考え、ざっくりとミ ツバさんのDDモータより見た目で少し直径を大きく することからスタートしました(図2-1).

また. 同じ理由(飽和磁束密度が小さい)から. コ イルを巻く部分のティースは太くする必要があること は想像していました. しかし. 今から見れば磁気回路 設計(磁石厚みに対してギャップをどの程度にすれば よいか)をまったく理解していませんでした.

### ● 設計方針の決定

悩んだ結果.

- ティースに磁束を多く流す
- コイルのターン数は減らす

すると、 電気抵抗が下がるので、 銅損は減ると思い、

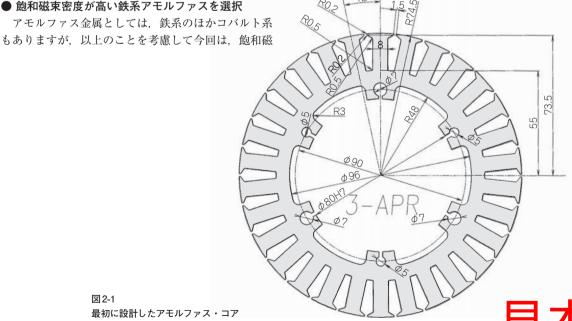


図 2-1 最初に設計したアモルファス・コア

# 〈開発編〉第3章



# ~コアレスでも渦雷流損は生じる!~

# 優勝は逃したが大きな成果 アキシャル型コアレス DD モータの製作

籾井 基之

前章では、筆者初めての自作モータ「アモルファス・コアDDモータ1号機」をはじめ、改良版を含め3機のアモルファス・モータを開発し、実際に優勝したことを紹介した。じつは、アモルファス1号機のモータのあとに、鉄損ゼロの魅力から「コアレス・モータ」を開発している。この章では、そのコアレスDDモータ1号機の開発の話である。まだコアレス・モーター 情報がきわめて少ないなか、筆者は、海外文献のかすかな情報を頼りに開発に着手する。コアレス・モータ は、コアがないのだから、鉄損はなくなるのだが、渦でなけるないのだから、鉄損はなくなるのだが、渦電流損はあるらしい、筆者は、このモータでレースには勝てなかったが、モータについて理解を深め、いろなノウハウを身に付けたといえる。(編集部)

### 1. コアレス・モータ製作の契機

### ● アモルファス・モータ (1号機) に対する失望…

初めての自作モータであるアモルファス・コア DD モータの1号機を完成させ、そのモータで2001年と2002年(改良版で)とレース(WEM)に臨み、優勝はできなかったものの連続で3位でした。

アモルファス・モータで、まずまずの成績を収める ことはできましたが、当初の目的である「圧倒的なア ドバンテージ」は得られませんでした。それゆえに、またもや新しいモータを作りたくなったのです。修行のような辛い作業はできるのですが、その反面飽きっぽいようで、今までに見たことのない世界を求めてしまいます。

### ● 気になっていたコアレス・モータ

筆者は、学生時代からソーラーカー・レースにも参加していて、オーストラリアの大陸縦断レース(World Solar Challenge)には今までに6回、参加しています。モータを作り始めたばかりの1999年当時、すでにソーラーカーのモータ技術は意欲的なチャレンジが行われていて、筆者にとって常に関心の的でした。いろいろな書籍やインターネットが普及したタイミングも重なりいろいろな情報を探していました。

そうしたなかで、ソーラーカーの豪 AURORAチームが搭載していた不思議なコアレス・モータを見つけました。これは、1996年WSCの解説書 "Speed of Light"に断面図が載っていましたが、「どこの部分が回るのか?」からして分かりません。しかし、アモルファスの中途半端な結果でモヤモヤしてときに、このコアレス・モータを思い出し気になってきました。

### ● アモルファスよりコアレスの方が鉄損は少ない!

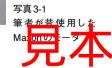
アモルファス・コアがどんなに鉄損が少なくても, 「コアがない"コアレス・モータ"に勝ることはないの

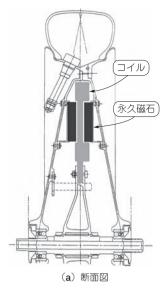


(a) 外観



(b) ロータとステータとに分解







(b) 大量のマグネットで構成されたハルバッハ配列磁石リング



(c) 不思議なコイル

図3-1 コアレス・モータを設計するのに参考にした論文

V. S. Ramsden, B. C. Mecrow and H. C. Lovatt, "Design of an in-wheel motor for a solar-powered electric vehicle" から

では?」と興味が湧いてきました(もちろん, コアの効果は充分にあるのだが…).

よく考えると、最初に筆者がエコノムーブで使用したスイス Maxon社のモータも代表的なコアレス・モータでした(写真3-1). このときは、コントローラも使わずにスイッチ・オンだけの低レベルの使い方だったのです。モータ本体は、無負荷電流が少なく、効率が良いことを思い出しました。

### ● 新たに開発するコアレス・モータのコンセプト

先ほど述べた1996年WSC (豪州縦断)でAURORA チームのソーラーカーに搭載された豪CSIRO社のコ アレス・モータを参考することにしました.

エコノムーブ (WEM) では、ソーラーカー用モータ 程のトルクは必要ないので、WEMにちょうどよい小 型版を作りたかったのです。

海外のソーラーカー・チームは, いろいろな技術論 文を発表してくれているので, インターネットで情報 を必死で探しました.

### ● 文献からモータの内部構造を隅々まで読み取る

ネット上で一つの論文を見つけました。モータの内部構造が公開されていて(図3-1),これを印刷して常に持ち歩き、極数、直列数、結線方法、画像から長さを測る等、ここから得られる情報は細かい部分まで穴が空くほど観察しました。

それでも今から思えば、せっかくいろいろな情報が ネット上に公開されているのに、きちんと意味を理解 できていないまま見切り発車で製作に入ってしまいま

$$P_e = \frac{\pi B^2 \omega^2 R^4 \ell}{8\rho}$$

 $P_e$ : 損失 B: 磁束密度  $\omega$ : 周波数

R : 導体(1本)の半径

1 : ギャップを通る導体の長さ

ρ : 導体の抵抗

### 図3-2 論文中にあった渦電流の公式

した. 特に重要な計算式(図3-2)に関しても, 頭では分かったつもりになっていたものの, 実感していませんでした.

### 2. コアレス・モータの動作原理

### ● フレミングの法則でトルクを発生

コアレス・モータは, "フレミングの法則"でトルクを発生させる, シンプルな原理のモータです. 磁束の中に置かれた導体に, 電流を流すとその導体に力が発生するのです.

回転しているモータには、次のような現象が起こっていることになります。

### (1) 回転するモータは常にコイルで誘起電圧が発生

モータでは、回転している間、ロータの永久磁石から出る磁東をコイル(導体)が横切るので「常に誘導起電力により電圧を発生(誘起電圧)」しています。これが"フレミングの右手の法則"です。この誘起電圧は、コイル端に電圧を掛け駆動している時も、電圧を掛けていないときも、回転しているときには必ず発生します。

### (2) コイル端の誘起電圧から電流取り出すと回生

モータが回転し、コイル端に誘起電圧が発生し、そこから電流を取り出した場合は、"フレミングの右手法則"によって発電機として作用し、回転の反対方向に力が働きブレーキが掛かります[図3-3(a)].

### (3) 誘起電圧を超える電圧を印加すると…

誘起電圧を超える電圧を印加して電流を流し込んだ場合は、"フレミングの左手の法則"によってモータとして作用し、駆動力を発生します[図3-3(b)].

### ● コアレス・モータがほとんど作られない理由

おもちゃに使われる小型のモータから、産業用の巨大なモータまで、一般的にモータと言えばユー にユ

自作モータで筑波サーキットを走ろう!

2016年 開催地:筑波サーキット[コース2000]

# CQ EVE:



CQブラシレス・モータ& インバータ・キットやCQEV ミニカートをお持ちの方、ぜひ 実際の走りを体感してください。



CQ EVミニカートは、モータと制御技術に焦点 を当てた、いわゆる「エレクトロニクス&マイコン応用 技術」を競うことを目的としています。 そのために 「CQプラシレス・モータ&インパータ・キット」のモータ 本体と「CO EVEニカート・キット」の車体を使用し ます。キットのコントローラ(インパータ制御基板)は、 そのまま使用しても、別なモノを使用しても問題あり ません、コイルを自分で手巻きした自作モータで繋 波サーキットにチャレンジしてください。

CQ EVミニカート+CQプラシレス・モータ

15億以上 # 比比20日本書の東西日本書の日本日本日本日本

同性能の鉛電池で30分走行し、周回数を関う

気波サーキット[コース2000]

別レース参加料 IK

一般参加: 18,000円 (程込)

学生参加: 13,000円 (程込)

参加登版要付申! SPIDDERESEDUIGUES.

http://www.cqpub.co.jp/tse/



2016年 CQ EVミニカート筑波レース

2016年10月9日[日]

●35世3… 筑波サーキット【コース2000】 〒304-0824 美城県下寮市村間乙159

●日田井・・・ 無 副 <申込は必要ありません>

日本電気自動車レース協会 (JEVRA)

(株)ミッパ

CQ EVミニカート・レース研究会



MITSUBA

CQ出版杠

CQ EVミニカート 姚波レースに買するお問い合わせ先 ····· CQ EVミニカート・レース研究会 〒112-8619 東京都文京医干苔4-29-14 CQE/IV TEL.03-5395-1465 E-mail: seminar@cqpub.co.jp

難誌 06664-10 (L)2016.11.15



4910066641061