

[研究論文]

ポンプ用キャンドモータ設計上の 水封 CAN 損失推定法に関する一提案

畝山大¹・馬目慎也²・秋山勇治³

¹ 大学院工学研究科電気電子工学専攻 (une1031dai@ele.kanagawa-it.ac.jp)

² 大学院工学研究科電気電子工学専攻 (manome@ele.kanagawa-it.ac.jp)

³ 工学部電気電子情報工学科 (akiyama@ele.kanagawa-it.ac.jp)

The Proposal about Water Seal CAN Loss Estimation Method of Canned Motor Pump's Design

Dai UNEYAMA¹⁾, Shinya MANOME²⁾, Yuji AKIYAMA³⁾

Abstract

This paper describes the canned motor of the representation rank of the shieldless pump of common liquids, such as water, oil, and a medical fluid. And the new method of measurement the eddy current loss of CAN in the partition for escape prevention of liquid is proposed. This is a very important theme as global environment problems from now on. In the business world, these technical data is very important technology. And the research and know-how are desired strongly. So, the simple CANLOSS measuring device which we devised is proposed here. This paper measured the CAN loss of integral-type pump motor.

Key Words: Canned motor, CAN loss, Loss estimation, FEM electro static simulation, submerged motor pump

1. はじめに

今回、超高速モータポンプ一体型という新しいタイプのブラシレス DC モータ (BLDC モータ) 方式の水中ポンプを NEDO 大学発事業化の補助金より研究・開発した。

従来のポンプはモータ部とポンプ部が別々の構造になっている。このため、インペラーを回転させるために軸を通して外部のモータで回転させている。

一体型モータポンプはモータのロータの中にインペラーを配置した構造であり、モータとポンプが一体型になっている。そのため、小型化ポンプが可能となった。また、ステータ側に水が浸入しないように水封 CAN 構造 (図 1 写真) を用いている。図 1 に一体型モータポンプの内部構造 (水封 CAN 構造) の写真を示す。右側の写真はロータの入っていない写真、左側にロータの入っている写真となっている。また、右側の内側に配置されている円筒が水の浸入を防ぐ CAN である。

キャンドモータはモータの主磁束がこの CAN を垂直に貫通するため非常に大きな渦電流損を発生する。この結果、CAN を使用しているキャンドモータ方式のポンプは理想であるが、CAN 損失のため今一步の所で伸び悩んでいるのが実情である。これはキャンドモータ方式

のポンプにおいて永遠のテーマであり、隔壁として使用する限りポンプ効率低下の最大の問題点であり、全世界のポンプメーカーで苦勞している。

今回試作した一体型モータポンプの回転数は 8000rpm と高く、駆動周波数も 500Hz と高くなる。このため、CAN 内の渦電流損が無視できなくなる。実用機では高周波のため CAN の強度、材質、及びその厚さとギャップ長さの関係が複雑に関係してくる。いまだこれらを総合的に検討した事例はあまり見られない。

そこで CAN の厚さ、ギャップ長、材質を自由に変更でき、キャン損失をあらゆる条件で模擬的に CAN 損失の特性を測定できる簡易測定装置の研究開発を行いつつ実機を試作した。一体型モータポンプの開発時に試作した CAN を図 2 に示す。また、図 3 に CANLOSS 簡易測定装置を示す。



図 1 一体型モータポンプの構造写真

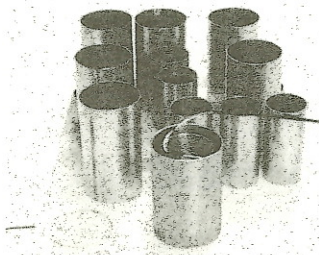


図 2 一体型モータポンプのCAN

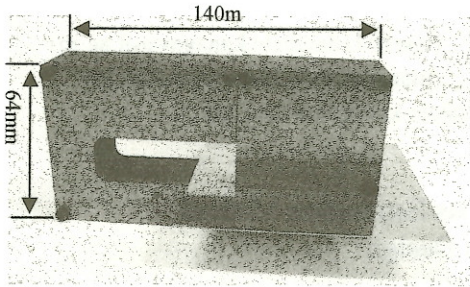


図 3 CANLOSS 簡易測定装置

2. 一体型モータポンプの運転特性

2.1 気中モータの運転特性測定

モータ単体としての特性を特定するためには、気中モータ（ボールベアリング方式）での CAN の有無によるモータの運転特性の比較が必要である。本来ならば水中モータとして、動圧軸受で組立て試験対応すべきところであるが、ここでは CAN 損失を重点に CAN の有無に対する運転特性を計測・比較することとした。今回試作した気中モータと水中モータを図 4 に示す。

モータは 4 極 6 スロットの磁極集中巻方式の BLDC モータである。回転子に希土類磁石材料（ネオジウム磁石）を、磁石の飛散防止及び劣化防止のため、磁石の外周に厚さ 0.3mm の SUS304（ノンマグ）ステンレス鋼板を保護バインドとした。さらに内部に樹脂を充填モールドした。このため二重 CAN 構造に近い物となっている。そして、この一体型モータポンプの CAN は厚さ 0.8mm の SUS304 ノンマグ、ステンレス鋼板 CAN を用いている。

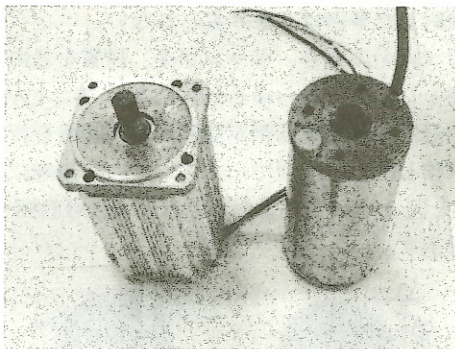


図 4 気中モータと水中モータ

2.2 無負荷運転時の CAN の有無による比較

図 5 は無負荷試験による CAN の有無に対し、インバータ周波数を可変した無負荷電流比較のグラフである。

CAN なしと CAN ありでは無負荷電流に大きな差が見られる。CAN なしでは周波数変化による電流変化はあまり見られないが、CAN ありの場合 3,000rpm（有/無）の比は 2.5 程度に対し 8,000rpm では 3 倍の無負荷電流の差が見られる。

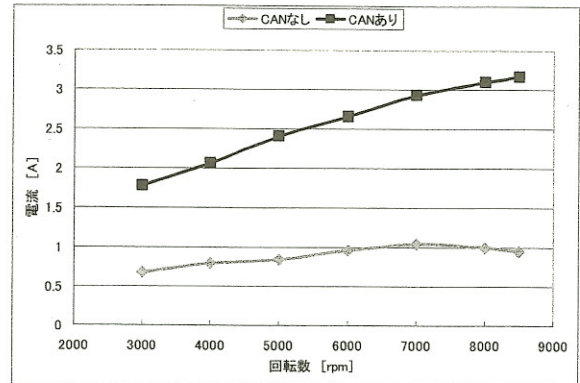


図 5 無負荷運転時による CAN の有無の電流比較

2.3 負荷運転時の CAN の有無による比較

表 1 に 7,000rpm 時のそれぞれの測定値を示した⁽¹⁾。CAN が無い場合の効率が約 80%。CAN をはめ込んだ時の効率が約 45%と、損失が倍増していることがわかる。また図 6 に負荷時に一体型モータポンプで発生している CAN での損失を示す。3,000rpm と 7,000rpm では損失が 3,000rpm の 3 倍以上に増加していることがわかる。

表 1 7000rpm 時の測定値表

(a) CAN あり試験

負荷トルク (N·m)	回転数 (rpm)	電圧 (V)	電流 (A)	位相差 (°)	力率	消費電力 (W)	機械出力 (W)	効率 (%)
0	7000	132.0	2.90					
0.26	7024	133.0	3.80	28	0.883	772.89	191.3	24.8
0.4	7024	133.0	4.30	27	0.891	882.57	294.3	33.3
0.6	6998	137.0	5.20	27	0.891	1099.39	439.8	40.0
0.8	6866	138.0	6.00	27	0.891	1277.79	575.4	45.0

(b) CAN なし試験

負荷トルク (N·m)	回転数 (rpm)	電圧 (V)	電流 (A)	位相差 (°)	力率	消費電力 (W)	機械出力 (W)	効率 (%)
0	7000	132.0	1.05					
0.2	7004	132.0	2.00	22	0.927	423.95	146.7	34.6
0.4	7002	133.0	2.40	23	0.921	508.91	293.4	57.7
0.6	7002	134.0	3.00	25	0.906	631.03	440.1	69.7
0.8	7000	135.0	3.50	27	0.891	729.17	586.6	80.4

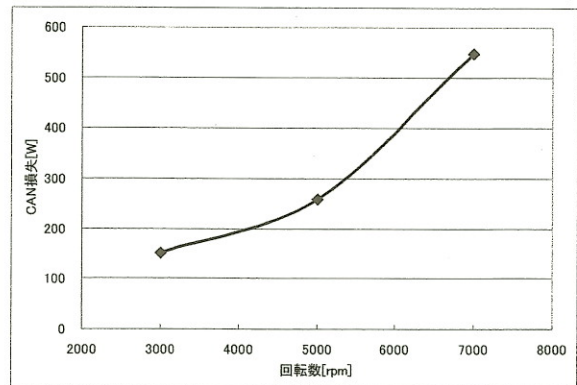


図 6 一体型モータポンプの CAN 損失

3. CANLOSS 簡易測定装置による CAN 損失試験

3.1 CANLOSS 簡易測定装置

上記の一体型モータポンプの運転特性の結果より、水封 CAN の中に過大な損失が発生することが明らかである。そこで、水封 CAN 構造のポンプの最大の問題点である CAN の損失を予測できる装置を作成した。今回の CANLOSS 簡易測定装置は 2 作目である。前回の装置では電磁鋼板の電気接合に溶接を用いていたため、装置全体が一体化してしまった。その結果、損失は大きくなる。今回の装置には絶縁皮膜を使った電磁鋼板を用いた。そして、接合には直径 3mm の穴を開け、結合部に絶縁を施した後ボルトでネジ止めたので前記溶接による短絡電流はなくなる。図 7 に改善前と改善後の結合部の写真を示す。また、CAN 損失の簡易測定装置を図 3 に示している⁽¹⁾。これはキャン材質及び設計形状による CAN の材質のみならず厚さ、ギャップ寸法 (上、下) 等、実際の設計に合わせ円筒形状加工せずに単純な平板状のテストピースを用いて模擬試験できる方法を新たに提案した。

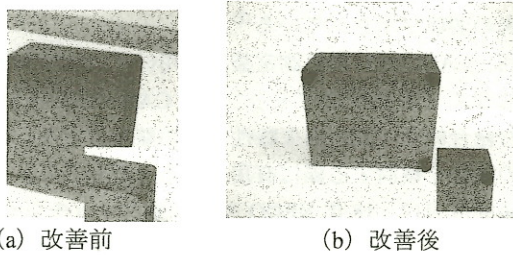


図 7 CANLOSS 簡易測定装置の改善写真

3.2 試作した CANLOSS 簡易測定装置による測定条件

測定条件としては、交流電圧を印加し、励磁電流を 400mA に固定し鉄心の磁束を一定にした。また、周波数をそれぞれ 50Hz、100Hz、200Hz、400Hz と変化して測定を行った。

3.3 CAN 材料の厚さによる CAN 損失の比較

設計条件から CAN 材料の厚さとギャップ長の和を 1.5mm 一定とした。CAN 材料の厚みを 1.0mm、0.8mm、0.5mm と 3 種類変更して測定を行った。CAN 材料として、一体型モータポンプで使用されている CAN 材の SUS304 を使用した。そのときの CAN 損失を図 8 に示す。その結果ほぼ周波数の二乗に比例して、損失が大きくなっていることがわかる。CAN 材料の厚さで比較すると 50Hz、100Hz では損失がどの厚さもあまり変わらない、が 400Hz になるとそれぞれの差が大きくなり、CAN 材料の厚さが薄い方が CAN 内での損失が少ないことがわかる。

3.4 CAN 材料による CAN 損失の比較

CAN 材料を変更して測定を行った。測定を行った材料の比透磁率、抵抗率を表 2 に示す。図 9 に各材料の損失をグラフにしたものを示す。50Hz という低い周波数

では各材料の損失がほぼ同じとなっている。しかし、周波数が高くなるにつれて差が大きくなる。抵抗率が高い SUS316L が最も CAN 損失が低く、抵抗率の低いチタンが最も損失が高いことがわかる。抵抗率の高い材料の方が CAN 損失は低い。ほぼ電磁鋼板の渦電流の理論式に近い結果が得られた。

一体型モータポンプと CANLOSS 簡易測定装置では磁束量や磁束が通過する CAN の面積などの違いにより損失に大きな差が生じた。

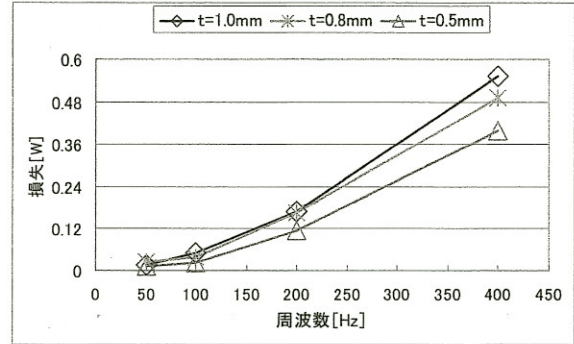


図 8 CAN 材料の厚さによる比較

表 2 試験材料の抵抗率と比透磁率

	抵抗率 $[10^{-8}\Omega\text{m}]$	比透磁率
チタン	47	1.0001
シリコンスチール	50	500~1000
SUS304	72	1.004
SUS316L	74	1.004

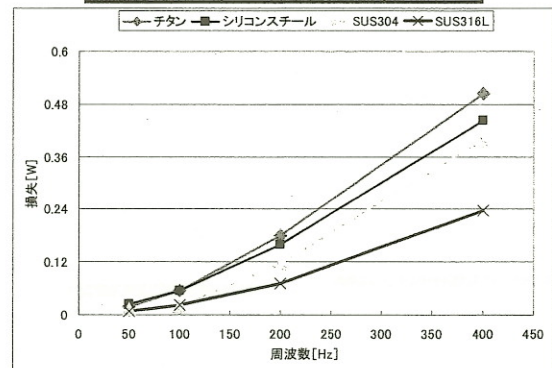


図 9 CAN 材料による比較

4. CANLOSS 簡易測定装置の FEM 解析

4.1 解析条件

ここでは CAN LOSS 簡易測定装置の FEM 電磁界解析を行った。解析条件として、CAN 材料は現在一体型モータポンプの CAN として使用されている SUS304 とした。そして設計条件から Air Gap 長と CAN の厚さの和を 1.5mm 一定とする。励磁周波数を 50Hz、100Hz、200Hz、400Hz と変更し、CAN の厚さを 0.5mm、1.0mm にして解析を行った。また、抵抗率をパラメータとしても解析を行った。

4.2 CAN による損失

CAN の厚さ 0.5mm と 1.0mm の CAN による損失を図 10 に示す。交流励磁周波数が高くなるにつれ有効電力

は周波数 f のほぼ二乗に比例して増加していることがわかる。また、周波数の高いところでは CAN の厚いものが損失は大きいことが見てとれる。図 8 と比較すると解析値の方が小さい。これは磁路長が異なるために差が生じたと考えられる。

図 11 は CAN の厚さ 0.5mm の交流励磁周波数に対する試験材料 (CAN) 内の渦電流密度分布の変化を 100Hz 時のスケールを基準に示している。密度が高い部分ほど明るく表示されている。周波数が高くなるにつれ渦電流密度が高くなっている様子がわかる。表皮効果により CAN 内の渦電流分布が偏在し結果的に渦電流を高めていることがわかる。

図 12 は、CANLOSS 簡易測定装置に対する試験材料の厚さ 0.5mm の 50Hz と 400Hz の磁束密度分布を示している。50Hz と 400Hz では、鉄心の中の磁束密度はほとんど変化がない。それに対し、CAN 内の磁束密度は、50Hz と比較すると 400Hz の方が非常に高く飽和しているのがわかる。つまり磁束がとおりにくくなっている。

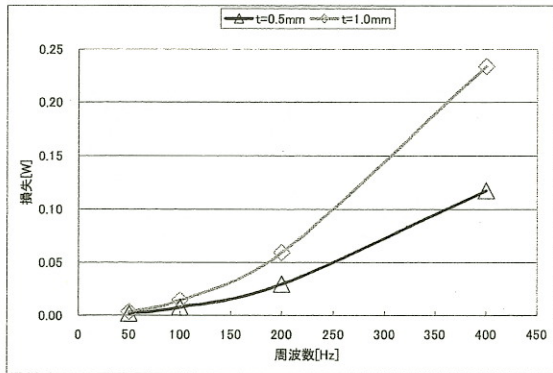


図 10 FEM 解析による CAN 損失の比較

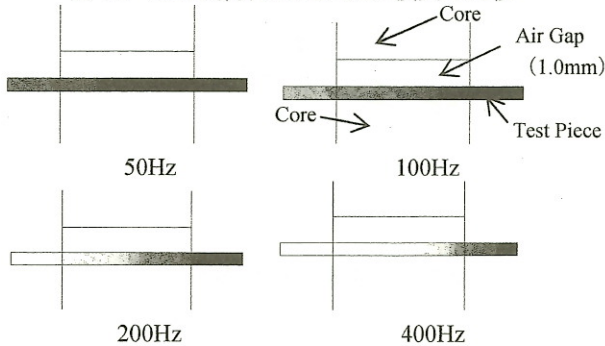


図 11 励磁周波数に対する CAN 内の渦電流密度分布

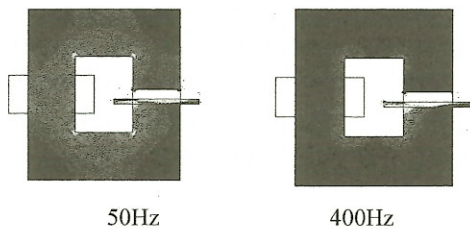


図 12 CANLOSS 簡易測定装置の磁束密度分布図

5. まとめ

我々が考案した CANLOSS 簡易測定装置を用いて CAN による損失の特性を測定した結果は下記のようなものである。

- a) ギャップを広くすることによって損失が小さくなる。
- b) CAN 損失は周波数のほぼ二乗に比例して増加する。
- c) CAN 材料が厚くなると損失が増える。
- d) 材料の抵抗率が高いものが損失は小さくなる。
- e) 我々が現在選択した鋼板材料の抵抗率は図 13⁽²⁾に示されているように発生損失の少ない値で選定されている。

以上の結果よりキャンドモータの CAN としては、CAN の厚さを極力薄くし、抵抗率の高い材料とし、ギャップ寸法に余裕をもって設計すべきである。

しかし、現在試作した SUS304 ステンレス CAN の場合図 13 示したように $10^{-6}\Omega\text{m}$ 程度の抵抗率なので更なる高抵抗材料の検討は困難といえる。図 13 は FEM シミュレーションにより表皮効果を考慮した渦電流損失グラフである。つまり資料厚さを一定とした場合の抵抗率と損失の関係が示されている⁽²⁾。

今回、CANLOSS 簡易測定装置を用いて CAN 材料を加工しなくても簡単にギャップ長、CAN の厚さ、材料を含む総合的な CAN 損失特性予測が簡単になり、CAN 損失の特性を検討する際に有用であると思われる。

本研究は H17、18 年 NEDO 大学事業化マッチングファンドの支援によるものであり、特に試作機と気中試験に関しては東友テクニカ (株) 及びモータマイスター技術研究組合の方々に感謝致します。

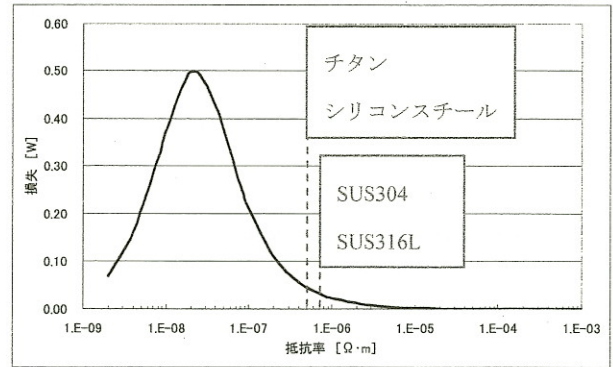


図 13 CAN 材料の抵抗率と CAN 損失

参考 文献

- (1) 畝山大・鳴田知和・秋山勇治・丹羽祐太・馬目慎也：「キャンドモータの水封ギャップ損失推定法の一提案」, 電気学会回転機研究会資料, RM : 07-66, pp97-100(2007)
- (2) 秋山勇治・畝山大：一体型モータポンプ開発研究の紹介, 電気学会回転機研究会資料, RM : 07-67, pp101-106(2007)
- (3) 畝山大・秋山勇治・馬目慎也・宮澤啓太：「一体型ポンプモータに於ける水封 CAN 損失特性の検討」, 電気学会回転機研究会資料, RM : 06-129, pp27-30(2006)
- (4) Yuji Akiyama, Yuta Niwa, Koji Kawanisi, Dai Uneyama : "The FEM Analysis of Relationship between Gap Length and CAN's Thickness and Materials and Loss", ICEMS2006, DS3F2-02