

# マグネットワイヤ薄膜化による発電機損失低減の検証

## Verification of Loss Reduction on Generator by Thinning Magnet Wires

山本 良寛\*, 服部 知美\*\*

Yoshihiro YAMAMOTO and Satomi HATTORI

In recent years, countermeasures against global warming have been raised as an international issue, and efforts toward global warming countermeasures and a low-carbon society are being promoted. One of the efforts to reduce fuel consumption and carbon dioxide emissions is to reduce the loss of generators. In this research, as a NEDO subsidized project, we are participating in the development of an enameled wire material that has high surge resistance and can be made thin. The role of this research in this project is to prototype a generator using the enameled wire developed and prototyped by the joint research partner, evaluate its characteristics, and demonstrate a 7% reduction in power loss. As a result of comparing temperature characteristics and power loss, the superiority of the developed enameled wire was confirmed in terms of temperature characteristics and power loss reduction.

### 1. はじめに

近年、環境問題や少子高齢化社会が社会問題となり、これらの改善のため、電気自動車やサービスロボットは、ますます普及すると予測される。これらの用途では車載スペースの確保やロボット内部の限られたスペースにモータを搭載する必要があるため、モータの小型化が求められている。また、電気自動車では一般的なシステム電圧が400Vであるのに対し、最近では800Vやそれ以上の高電圧でモータが駆動されている。モータへの供給電圧が800Vの場合、400Vに比べて損失が1/4程度になる。そのため、巻線の直径が小さくなり、全体的な容積の減少とパッケージの効率化が実現し、モータを小型化することが可能である。同様に800Vシステムでは駆動電流を小さく抑えることができるため、モータの損失だけでなくシステム全体の配線損失も減少し、重量、スペース、コストも低減する。これらの理由から、近年では高電圧化の傾向がみられる。そのため、モータは更なる小型化や駆動電圧の高電圧化による高出力・高効率化等に対する要求が強く、過酷な使用条件への対応が必要になっている<sup>1)</sup>。

環境問題においては、地球温暖化への対策が国際的な課題として挙げられ、地球温暖化対策や低炭素社会に向けた取り組みが推進されている。Fig.1, Fig.2に示すように、日本におけるエネルギー供給は、その8割を化石燃料が占め、またそのほとんどを海外に依存している。こうした状況は、環境負荷を低減するという観点からはもちろん、エネルギーの安定供給という観点からも大きな課題となっ

ている<sup>2)</sup>。燃料使用量および二酸化炭素排出量の削減に向けた取り組みの一つとして、発電機の低損失化が挙げられる。

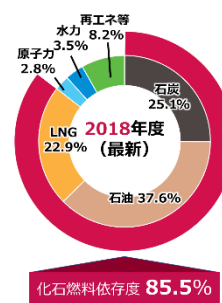


Fig.1 日本的一次エネルギー供給構成<sup>3)</sup>

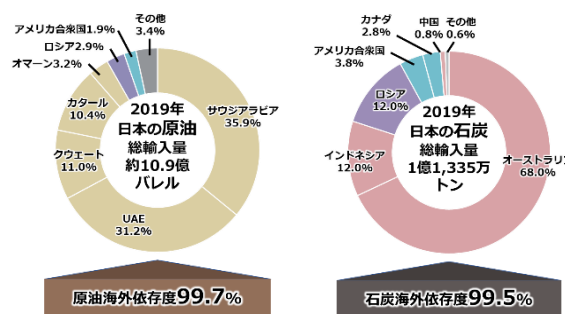


Fig.2 日本の化石燃料輸入先<sup>3)</sup>

### 2. 本研究の目的

従来のエナメル線開発は、商用周波数で用いるモータ、発電機を対象として行われてきたため、とくに耐電圧は正弦波の電圧波形を前提として考えられてきた。しかし、近年では、多くのモータがインバータで駆動されている。インバータの出力波形を Fig.3 に示す。同図は400V電源で

2023年5月12日受理

\* 理工学研究科 システム工学専攻

\*\* 理工学部 電気電子工学科

用いるインバータの出力波形を示している。電源電圧が交流 400V のとき、インバータの直流リンクの電圧  $E$  は(1)式 のようになる<sup>4)</sup>。

$$E = \sqrt{2} \times 400 = 565 \text{ [V]} \quad (1)$$

この時インバータの出力端子には、スイッチング動作の度にバッテリー電圧を超えるサージ電圧が発生する。サージ電圧は、ケーブルを介しモータ内部にまで伝播するため、モータ内の巻線間には、瞬間的に高電圧が加わることになる。巻線間に加わるサージ電圧は、インバータの駆動条件やケーブル長、モータ構造等によって変わるものの、場合によっては最大で駆動電圧の 2 倍程の大きな電圧が加わることがある<sup>5)</sup>。

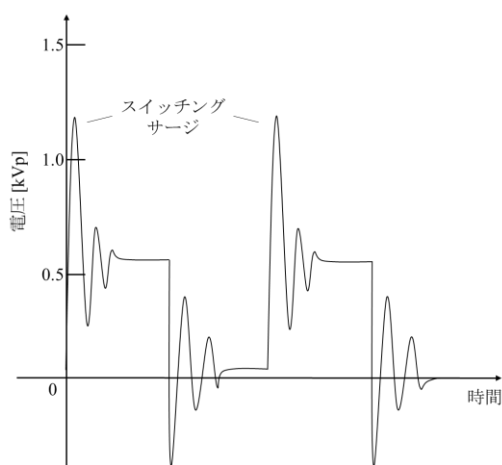


Fig.3 インバータの出力電圧波形

また、Fig.4 に示すように巻線されたコイルの線間でごく小規模な放電である部分放電が起こる可能性がある。この部分放電に火花が生じればコロナ放電となる。コロナ放電が発生すると、電子は電界で加速されて放出するため、絶縁被覆を浸食する。しかしこの現象は、サージの短い時間だけ起こる現象であるため、単発のサージによる浸食ではすぐには絶縁低下とはならない。しかしながら、長期間繰り返されることにより被覆を徐々に傷めていき、最終的には絶縁破壊が起こり、モータや発電機が故障する。そのため、その対策として絶縁被覆を厚くすることが多いが、それが原因で機器の小型化や高効率化が困難となる。

本研究では NEDO の助成事業「電力機器用革新的機能性絶縁材料の技術開発」として、高耐サージ性を持ち、薄層化が可能なエナメル線材料の開発に参画した。本研究では、発電機の巻線の絶縁被覆に開発中の材料を使用することにより、汎用の巻線を使用した発電機に比べ、損失を 7% 低減することを最終目標とする。

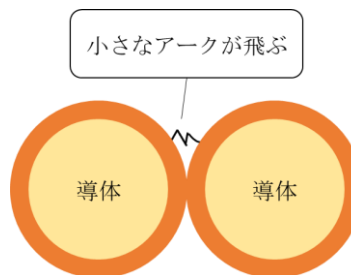


Fig.4 サージによる部分放電

### 3. 標準機および実証機

本研究では、開発エナメル線材料を用いたエナメル線を発電機に適用し、その特性を測定することにより、開発エナメル線材料の評価を行う。まず、基準となる発電機（以下標準機）の選定を行った。標準機として、コアレスモータ株式会社製の永久磁石型同期発電機 REG3K をベースとし、電機子巻線をエナメル線（汎用 0 種）仕様にて製作したものを選定した。REG3K はコアレスであるため、鉄損やコギングトルクが発生しないという利点がある。標準機をベースとし、電機子巻線のエナメル線を開発エナメル線に変更した試作機を製作した（以下実証機）。

2 種類の発電機のパラメータを Table1 に示す。なお、巻線抵抗、起電力定数の測定については、5 章で説明する。標準機のエナメル線の被覆厚が 53.0 $\mu\text{m}$  であるのに対して、実証機は 33.5 $\mu\text{m}$  と薄膜化されている。これにより、標準機を基準として、導体径が実証機で 39.0 $\mu\text{m}$  増加し、導体断面積が実証機で約 8% 増加している。それにより、巻線抵抗が小さくなっている。

Table 1 発電機パラメータ

		標準機	実証機
被覆厚	[ $\mu\text{m}$ ]	53.0	33.5
導体径	[mm]	1.000	1.039
標準仕上外径	[mm]	1.106	1.106
導体断面積	[ $\text{mm}^2$ ]	0.7850	0.8470
導体断面積増加率	[%]	—	7.950
巻線抵抗	[ $\Omega$ ]	0.8450	0.8250
起電力定数	[V $\cdot$ s/rad]	0.1361	0.1323
定格回転数	[rpm]	1000	1000
定格出力	[kW]	3.00	3.00
定格電流	[A]	12.0	12.0

開発エナメル線は、ナノコンポジット技術を応用しており、汎用のエナメル線に比べて 1 万倍以上の寿命を有している。また、エナメル線の耐熱性は 240 $^{\circ}\text{C}$  以上、絶縁破壊電圧は 100kV/mm 以上であり、一般的な特性は汎用エナメル線と同様である<sup>6)</sup>。試作されたエナメル線のイメージ図を Fig.5 に示す。

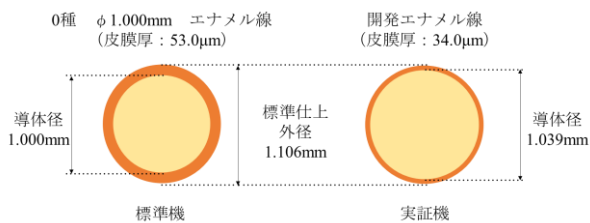


Fig.5 標準機および実証機のエンメル線

#### 4. 測定環境

標準機および実証機の実験装置を行うための試験装置について説明する。試験装置の外観を Fig.6, システムの概略図を Fig.7, 仕様を Table2 に示す。また、同期発電機の1相分等価回路を Fig.8, フェーザ図を Fig.9 に示す。ここで、 $V_{dc}$  : 整流後の直流電圧,  $I_{dc}$  : 整流後の直流電流,  $G$  : 同期発電機,  $E_0$  : 無負荷誘導起電力,  $x_s$  : 同期リアクタンス,  $R_a$  : 巻線抵抗,  $I_a$  : 電機子電流,  $V_a$  : 端子電圧,  $\theta$  : 力率角,  $\delta$  : 内部相角である。

試験装置は、ベンチ部、制御部（駆動インバータ、回生コンバータ）、回生機能付き直流電源が主な構成要素である。Fig.6 および Fig.7 の赤枠部分がベンチ部であり、供試発電機を駆動用モータにトルクメータを介して連結する。駆動用モータは三相誘導モータであり、インバータを用いて回転数制御し、供試発電機を指定した回転数で回転させる。発電機の実出力電圧（端子電圧）は、整流器を用いて全波整流し、直流電圧に変換する。整流後の直流電圧 $V_{dc}$ と直流電源電圧の差によって、整流後の直流電流および出力電力を調整する。

Fig.8 より、同期発電機の電圧方程式は次式で表される。

$$E_0 = (R_a + jx_s)I_a + V_a \quad (2)$$

なお、回転角速度（電気角）を $\omega_{re}$ [rad/s], 起電力定数 $K_E$ [V·s/rad]とすると、 $E_0$ は次式で表される。

$$E_0 = K_E \omega_{re} \quad (3)$$

Fig.9 を用いて、(2)式の左右両辺と電機子電流 $I_a$ との内積をとると、電力の釣り合いを示す式が得られる。

$$\begin{aligned} E_0 I_a \cos(\theta + \delta) &= R_a I_a^2 + V_a I_a \cos \theta \\ V_a I_a \cos \theta &= E_0 I_a \cos(\theta + \delta) - R_a I_a^2 \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式の左辺が出力電力 $P_{out}$ [W], 右辺第1項が入力電力 $P_{in}$ [W], 右辺第2項が銅損 $P_c$ [W]である。実際には、銅損以外にも損失が存在するため、それを差し引いたものが出力電力となる。また、回転角速度（機械角）を $\omega_{rm}$ [rad/s], トルクを $T$ [Nm]とすると、発電機の入力電力 $P_{in}$ [W]は次式で表すこともできる。

$$P_{in} = \omega_{rm} T \quad (5)$$

試験装置では、(5)式より入力電力 $P_{in}$ [W], (4)式の左辺より出力電力 $P_{out}$ [W], (4)式の右辺第2項より銅損 $P_c$ [W]を算出している。全損失 $P_{loss}$ [W]は次式で求められ、全損失 $P_{loss}$ [W]から銅損 $P_c$ [W]を引いたものが、その他の損失となる。

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \quad (6)$$

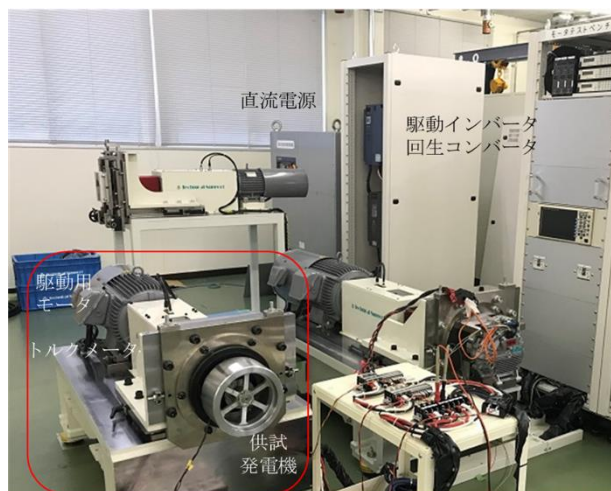


Fig.6 試験装置の外観

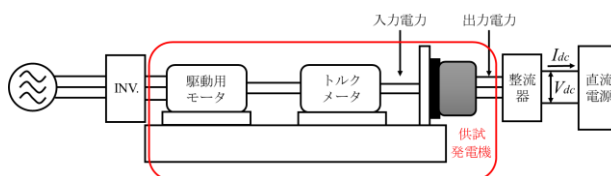


Fig.7 試験装置のシステム概略図

Table 2 試験装置の仕様

駆動用モータ（三相誘導モータ）		
定格出力	[kW]	11.0
定格トルク	[Nm]	100
定格回転数	[rpm]	2,400
駆動インバータ容量	[kW]	11.0
回生コンバータ容量	[kW]	11.0
トルクメータ		
定格容量	[Nm]	±100
最高回転数	[rpm]	10,000

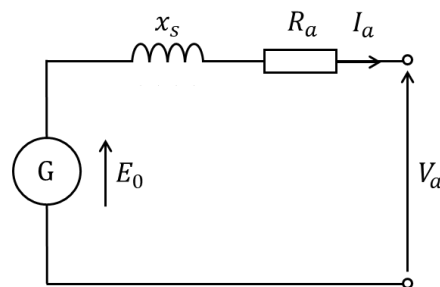


Fig.8 同期発電機の1相分等価回路

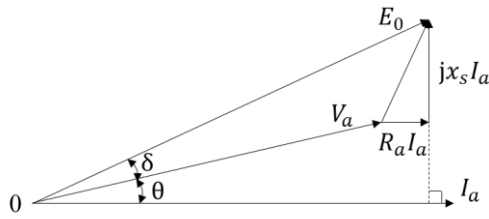


Fig.9 同期発電機のフェーザ図

5. パラメータ測定

5.1 巻線抵抗

発電機1相分の銅損 \$P\_c\$ は巻線抵抗を \$R\_a\$ [Ω]、電機子電流を \$I\_a\$ [A] とすると次式で表される。

$$P_c = R_a I_a^2 \tag{7}$$

そのため、銅損を算出するためには、巻線抵抗値を予め測定しておく必要がある。標準機および実証機は Y 結線であるため、U-V 間の抵抗値を測定し、1 相分の巻線抵抗値を(7)式より算出する。

$$\begin{aligned} \text{発電機の1相分の巻線抵抗値} \\ = U - V \text{間の抵抗値}/2 \end{aligned} \tag{8}$$

標準機および実証機の 1 相分の巻線抵抗値の測定結果を Table3 に示す。3 章で説明したように、導体断面積が増加したことにより、標準機に比べて実証機の方が巻線抵抗値が小さくなっていることがわかる。

Table 3 標準機と実証機の巻線抵抗値

	抵抗値 [Ω]	
	U-V間	U-V間/2
標準機	1.69	0.845
実証機	1.65	0.825

巻線には銅が使用されている。銅などの金属は温度が上昇すると、金属イオンの熱振動が激しくなる。その結果、金属中を移動する電子との衝突回数が多くなり、電子が流れにくくなる。このため、金属の抵抗値が上昇する。

本研究で用いる試験装置では、定数として入力した巻線抵抗値と電流の測定値を用いて銅損を算出している。しかし、この計算で求められた銅損は、温度による巻線抵抗値の変化を考慮していない。そこで、温度による巻線抵抗値の変化に対応した銅損を算出するため、巻線の温度変化に対する抵抗値の変化を測定した。横軸を巻線温度、縦軸を巻線抵抗値として巻線抵抗の温度特性をグラフ化したものを Fig.10, Fig.11 に示す。

Fig.10, Fig.11 より、本来であれば、同じ銅を使用しているため、傾きは一致するはずであるが、実証機の方が傾きが若干小さいことがわかる。

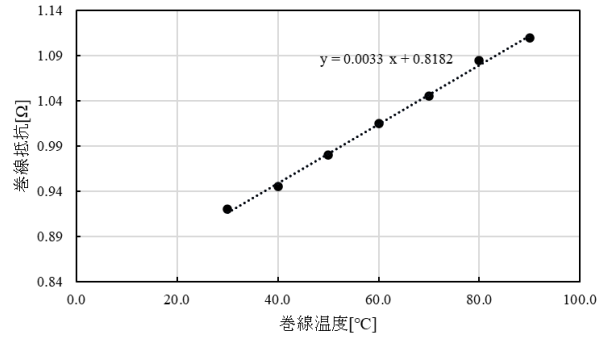


Fig.10 標準機の巻線抵抗の温度特性

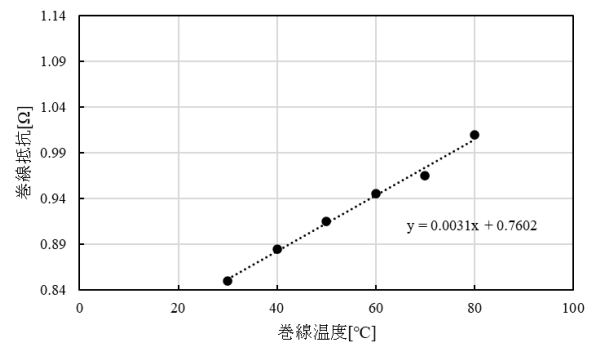


Fig.11 実証機の巻線抵抗の温度特性

5.2 起電力定数

起電力定数は発電機を外部から回転させ、その際に生じる電圧(逆起電力)を測定することにより算出できる。発電機を回転させた際に発生する発電機の線間電圧の振幅 \$V\_{p-p}\$ および周波数 \$f\$ を測定し、さらに測定値を(9)式, (10)式を用いて、角周波数 \$\omega\_{re}\$, 相電圧の振幅 \$V\_{0-p}\$ に換算する。

$$\omega_{re} = 2\pi f \text{ [rad/s]} \tag{9}$$

$$V_{0-p} = \frac{V_{p-p}}{2\sqrt{3}} \text{ [V]} \tag{10}$$

横軸を角周波数、縦軸を相電圧としてグラフを描き、このグラフの傾きが起電力定数となる。

測定結果を Table4 に示す。本来であれば、起電力定数は導体断面積に影響しないため、標準機と実証機で同じ値になるはずであるが、若干差があることがわかる。これは、個体差によるものであると考えられる。

Table 4 起電力定数測定結果

起電力定数 [V·s/rad]	
標準機	0.1361
実証機	0.1323

## 6. 特性測定

### 6.1 温度特性

発電機の発熱の主な原因は銅損と鉄損である。銅損は、巻線の巻線抵抗に起因する損失であり、鉄損はコイルの鉄心に起因する損失である。また、機械損と呼ばれる発電機の回転によって発生した摩擦による発熱もある。これらの中で、温度上昇が最も高いのは巻線で起こる銅損である。巻線を保護する絶縁被覆には、最高許容温度と呼ばれるそれ以下の温度なら連続的に使用できる温度が決められている。そのため、発電機を評価する1つの指標として、温度特性を把握する必要がある。

本研究では、発電機の内部温度は発電機コイル表面に貼りつけた熱電対により測定した。また、駆動条件によって温度特性が異なるため、Table5 に示す測定条件で測定を行った。

Table 5 測定条件

	電圧 $V_{dc}$ [V]	電流 $I_{dc}$ [A]	回転数 $n$ [rpm]	電力リミッタ [kW]
条件1	100	6	500	2.8
条件2	100	8	500	2.8
条件3	100	10	500	2.8
条件4	100	12	500	2.8
条件5	100	6	750	2.8
条件6	100	8	750	2.8
条件7	100	10	750	2.8
条件8	100	12	750	2.8
条件9	100	6	1000	2.8
条件10	100	8	1000	2.8
条件11	100	10	1000	2.8
条件12	100	12	1000	3.0

測定結果の一例として、条件12で測定を行ったときの、横軸を経過時間、縦軸を巻線温度とした温度特性グラフをFig.12、巻線抵抗の時間的変化をFig.13に示す。

Fig.12より、時間の経過とともに巻線温度が上昇していることがわかる。標準機では、約185sで巻線温度が100℃に達しているのに対し、実証機では約260sで100℃に達しているため、標準機に比べて温度上昇が小さいことがわかる。また、Fig.13より、巻線抵抗の時間的変化を比較しても、標準機よりも実証機の方が優位性があることがわかる。その他の条件においても、同様の傾向にあることを確認した。

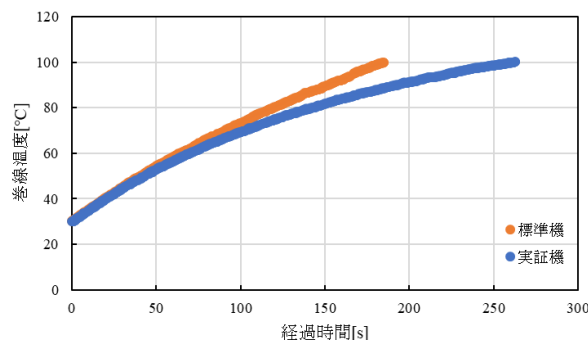


Fig.12 標準機および実証機の温度特性

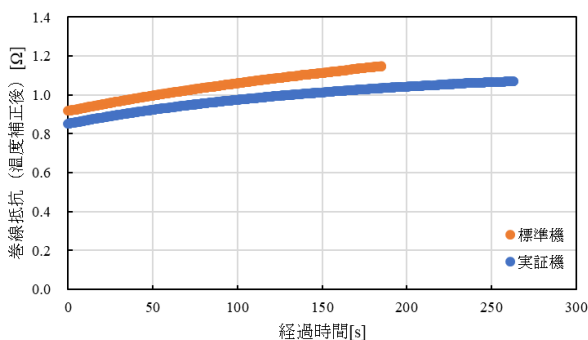


Fig.13 標準機および実証機の巻線抵抗の時間的変化

### 6.2 発電機損失

全損失とは、(6)式やFig.7に示したように発電機の入力電力から発電機の出力電力を引いた値である。また、5.1節で述べたように、巻線抵抗値には温度依存性があるため、銅損算出時にはそれを考慮する必要がある。そこで、Fig.10やFig.11に示した巻線抵抗の温度特性の測定結果を利用し、巻線温度に応じた抵抗値を求め、銅損を算出する。さらに全損失から温度特性を考慮した銅損を引いた値をその他の損失とする。

Table5に示した測定条件で、発電機損失を測定した。測定結果の一例として、条件12で測定を行ったときの、標準機および実証機的全損失の時間的変化をFig.14、銅損の時間的変化をFig.15に示す。また、測定データから標準機および実証機的全損失、銅損、その他の損失の平均値を求め、標準機に対する実証機の各損失の低減率を求めた。その結果をTable6に示す。その他の条件においても同様の測定を行い、標準機に対する実証機の損失低減率を求めた。各条件における全損失の低減率をFig.16に示す。

Fig.15より、経過時間とともに銅損が増加していることがわかる。Fig.13に示したように、経過時間とともに巻線抵抗が増加するため、これにより銅損が増加したと考えられる。その他の損失には温度依存性がないため、経過時間によって変化する損失はないと考えられる。よって、Fig.14より、銅損の増加に伴い全損失が増加していることがわかる。その他の条件においても、同様の傾向にあることを確認した。

Fig.16 より, 条件 9, 条件 10 を除く条件で, 本研究の目標である全損失 7%低減以上の効果が確認できる. エナメル線の絶縁被覆を薄くし, 導体断面積を向上させることで, 巻線抵抗が小さくなり, 銅損が低減し, 全損失も低減したと考えられる.

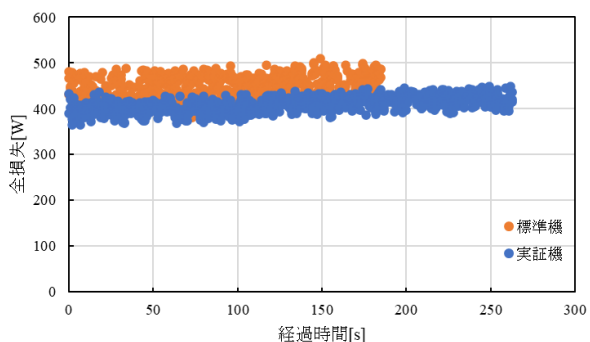


Fig.14 標準機および実証機的全損失の時間的変化

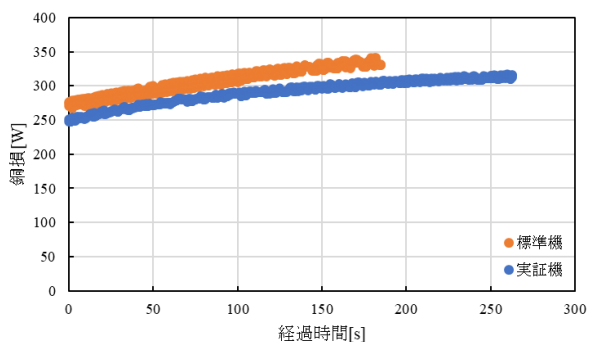


Fig.15 標準機および実証機の銅損の時間的変化

Table 6 発電機損失の平均値

	全損失 [W]	銅損 [W]	その他の損失 [W]
実証機 (1000rpm)	405.184	282.000	123.184
標準機 (1000rpm)	446.086	307.615	138.471
低減率 [%]	9.169	8.327	11.040

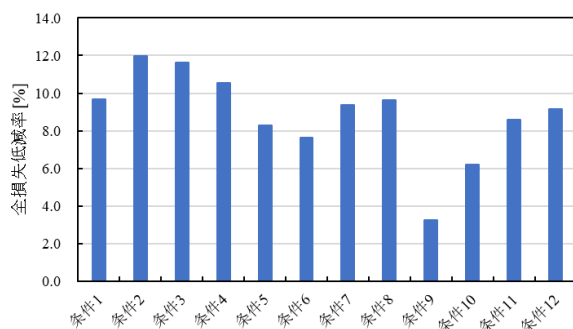


Fig.16 全損失低減率

## 7. まとめ

本研究では, 汎用 0 種のエナメル線を用いた発電機 (標準機) を比較対象とし, 開発エナメル線を用いた発電機 (実証機) の特性を評価した.

温度特性および発電機損失を比較した結果, 実証機が温度特性, 損失低減の点で標準機よりも優れていることを確認した. エナメル線の絶縁被覆を薄くし, 導体断面積を向上させることで, 巻線抵抗が小さくなり, 銅損が低減したと考えられる. また, 損失低減により発熱を抑えることができたため, 温度上昇を抑制できたと考えられる. コアレス発電機では銅損が支配的となるため, それを抑制することで全損失低減につながったと考えられる.

なお, 本研究は NEDO の助成事業「電力機器用革新的機能性絶縁材料の技術開発」のテーマとして行ったものである.

## 参考文献

- 1) 大石和城, 吉岡靖浩. “インバータ駆動電動機におけるサージ対策の基礎検討”. 明電時報, 通巻 328 号, No.3 (2010) .
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁 HP, “さまざまなエネルギーの低炭素化に向けた取り組み”, 経済産業省 2018-02-08, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/ondan/kashoene/co2sakugen.html>, (参照 2023-03-29) .
- 3) 経済産業省 資源エネルギー庁 HP, “2020-日本が抱えているエネルギー問題 (前編)”, 経済産業省 2020-11-18, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2020\\_1.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2020_1.html), (参照 2023-03-29) .
- 4) 森本雅之. “入門モーター工学”. 森北出版株式会社, (2017) .
- 5) 脇本亨, 高橋芳光, 香田請司, 滝澤敬次, 石田岳志. “EV, HEV モーターの高電圧絶縁に関する研究—車両環境を考慮した部分放電開始電圧への影響—”. デンソーテクニカルレビュー, Vol.16 (2011) .
- 6) Nobutaka Fujimoto. “Durability Test of Enamel Containing Nano-Cray under Artificial inverter Surge Condition for Medium and Small-Scale Generator”. Conference Proceedings of ISEIM 2020.
- 7) 山本良寛. “コアレス発電機の損失低減に関する研究”, 令和 3 年度静岡理科大学卒業論文.