

2 kW クラス 電動パワーユニット eGX の開発

Development of 2 kW Class Electric Power Unit eGX

神 原 史 吉¹

Fumiyoshi KANBARA

山 岸 善 彦¹

Yoshihiko YAMAGISHI

澤 崎 駿 佑¹

Shunsuke SAWASAKI

松 永 直 樹¹

Naoki MATSUNAGA

要 旨

小型建設機械のランマやプレートコンパクタなど各種作業機械用動力源として、幅広い作業機に搭載されている汎用エンジン GX シリーズに対し、搭載互換性を持つ 2 kW クラスゼロエミッション（大気汚染物質 HC/NO_x および温室効果ガス CO₂ 排出ゼロ）電動パワーユニット eGX を開発した。eGX は、作業機の搭載条件や使用環境を鑑みて、一体型とセパレート型を設定した。なかでも一体型は同出力帯のエンジンとの互換性を考慮し、本体サイズや作業機への出力軸取り付け形状などに互換性を持たせた。耐久性が重要であるモータは、150 m/s² 以上の耐振性を達成するロータシャフト支持構造やステータの締結構造を構築しつつフレットング摩耗対策も実施した。さらに建設現場で想定される耐水性、耐塵埃性を達成するために密閉モータケースとしつつ、内扇ファン、外扇ファンを採用することで定格出力 1.6 kW を連続運転できる冷却性を達成した。

ABSTRACT

The general-purpose GX series engines are installed in a broad range of work machines, serving as power sources for small construction machinery such as tamping rammers and plate compactors. Now, Honda has developed the eGX, a 2-kW-class zero-emission (zero emissions of HC/NO_x air pollutants and CO₂ greenhouse gas) electric power unit that can replace these engines. The eGX comes in integrated types and separated types, configured for differing work machine mounting conditions and usage environments. Of these, the integrated type was made for replaceability with engines of the same power band. The body size, the shape of the output shaft connected to the work machine, and other aspects are designed for replaceability with the GX engines. Since durability is important for the motor, vibration resistance of 150 m/s² or more was attained through the rotor shaft support structure and stator connecting structure. Fretting abrasion countermeasures were also implemented. In addition, a sealed motor case was used to provide the water and dust protection required on construction sites, and cooling sufficient for continuous operation at the rated output of 1.6 kW was attained with the use of inside and outside fans.

1. ま え が き

汎用エンジン GX シリーズ⁽¹⁾は高い信頼性や搭載性により、小型建設機械市場など各種作業機械用動力源として、幅広い作業機に搭載されている。他方、近年は欧州において欧州ノンロードエンジン第5次排出ガス規制（通称 EU Stage V）⁽²⁾が開始され、作業機用エンジンにもより一層の低エミッション化が要求されている。また、坑道内や

住宅近接エリアでの夜間工事といった環境下において、これら小型作業機の使用を要望されており、機器の低騒音化が求められている。これら市場要望より、作業機の電動化によって低エミッション、低騒音を実現したものが存在するが、作業機側の少ない変更で既存のエンジン作業機を電動化しつつ作業性と耐久性を同等にしたいというニーズもあることがわかった。

作業性の観点で影響するのは、電動作業機の電力供給

¹ ライフクリエーションセンター

E-mail: fumiyoshi_kanbara@jp.honda

方式であり、大きくコード方式とバッテリー方式に分かれる。コード方式は、作業現場付近の定置電源からコードにて電力を導き電動作業機のモータを駆動させる。電源確保やコードの取り回しの関係から、コード式は作業環境や作業姿勢が制限されるため、自走式の作業機に不向きである。バッテリー方式は、バッテリーを作業機に内蔵したものと、着脱式バッテリーを取り付けたものがある。どちらの方式でも、バッテリーを充電しておくことで電源が無い作業現場でも作業を行うことができ、作業姿勢の制限を受けないメリットがあるため、自走式作業機に向いている。しかし、必要とされる連続運転時間に応じたバッテリー容量の確保や、電欠時の対応などに課題がある。

耐久性の観点では、道路工事などの作業機にとって舗装する前の地盤を転圧する作業は、振動と塵埃の巻き上げが発生する環境である。これに対して、モータ、バッテリー、電装機器を保護する必要がある。既存のバッテリー式電動作業機の中では、機器に対して専用に設計しバッテリーや電装機器の保護機構を持つものや、既存エンジン作業機に対して電装機器を保護するために出力等の性能を抑えることで対応をしているものがある。

こうしたニーズに応えるため、2 kW クラスゼロエミッション（大気汚染物質 HC/NO_x および温室効果ガス CO₂ 排出ゼロ）電動パワーユニット eGX を開発した。外観を Fig. 1 に示す。本稿では、搭載互換構造および eGX の中でも技術課題の多かった、モータの耐久性に適用した技術について述べる。



Fig. 1 External view of eGX

2. 開発目標

eGX 開発では、エンジン作業機への搭載互換性と、厳しい使用環境に耐える性能・信頼性の二つを商品コンセプトとした。具体的な目標を以下に示す。

- (1) 既存エンジンである GX120⁽³⁾、GX100⁽⁴⁾ 搭載の作業機に載せ替えが可能なパッケージングによる搭載互換性とエンジン作業機と同様の作業性

- (2) 建設作業機器の使用環境を想定した耐久性として耐振性、耐環境性の構築

なお、Fig. 2 に GX120、Fig. 3 に GX100 の外観を示す。

さらにモータは、エンジン同等の耐久性、作業性能、耐環境性能を実現するため、目標を以下に設定した。

- (a) 150 m/s² 以上の耐振性
- (b) 建設現場での地盤の転圧作業環境を想定した耐塵埃性 (JIS8 種 Z8901)
- (c) 高圧洗浄作業を想定した耐水性
- (d) 連続定格出力 1.6 kW/3600 rpm 以上が可能な冷却性

上記の連続定格出力は、2 kW クラスのエンジンを搭載する小型建設機械の所要出力調査に基づき、約 7 割の作業機をカバーできるよう設定した目標値である。（2021 年 10 月現在、Honda 調べ）



Fig. 2 External view of GX120



Fig. 3 External view of GX100

3. 適用技術

3.1. 搭載互換構造

eGX は、想定される搭載機の設置・運転条件を鑑みて、二つの型式を設定した。ひとつは一体型とし、モータ、バッテリー、Power Distribution Unit (PDU) をワンパッケージにした。もう一つはセパレート型とし、バッテリーと PDU からなるコントロールアッセンブリ部とモータ部を分離した。eGX の一体型とセパレート型および GX120 と GX100 の主要諸元を Table 1 に示す。Fig. 1(a) は一体型であり、(b) はセパレート型である。両型式ともに、共通の着脱式リチウムイオンバッテリーパックを採用し、エンジン作業機と同等の作業性とした。着脱式のため、予備バッテリーを準備し随時交換できるため、作業機器の長時間連続運転を可

Table 1 Specifications of eGX, GX120, and GX100

Model name	eGX		GX120	GX100
Type	Integrated type	Separated type	Integrated type	Separated type
Category	Permanent magnet DC motor		Single cylinder, OHV 4-stroke engine	Single cylinder, OHC 4-stroke engine
Cooling system	Forced air cooling		Forced air cooling	Forced air cooling
Shaft layout	Horizontal		Horizontal	Horizontal
Continuous rated power (kW/rpm)	1.6 / 3600		2.1 / 3600	1.7 / 3600
Maximum power (kW/rpm)	1.8 / 3600		2.6 / 3600	2.1 / 3600
Maximum torque (N·m/rpm)	5.6 / 3600 (3 s rating)		7.3 / 2500	5.7 / 3600
Set speed (rpm)	3600	3000, 3300, 3600	1400 - 3900	1850 - 4100
Noise level (L_{WA} (dB))	78	81	100	100
Overall mass (kg)	25.0	22.2	15.5	11.1
Battery mass (kg)	6.4		-	-
Operation temperature range (°C)	-15 to 40		-15 to 40	-15 to 40

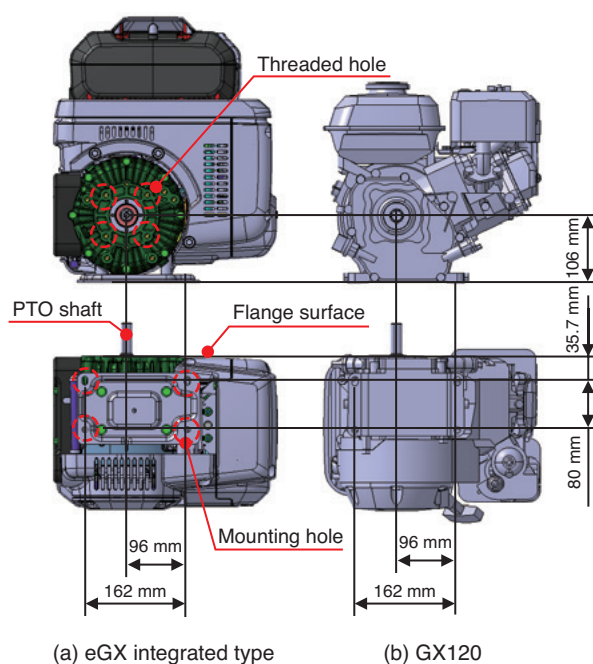
能とした。

モータは、出力軸（ロータシャフト）の位置をエンジンと搭載互換性を持たせるため、同一寸法とした。Fig. 4(a)に eGX, (b)に GX120 の取り付け位置の寸法を示す。

Fig. 5 に eGX の一体型パワーユニットの構造を示す。バッテリーは、使用時の着脱利便性を考慮し、モータの上側に配置した⁽⁵⁾。エンジン搭載作業機では燃料タンク位置に相当する。PDU は、最大幅を抑えるため、モータの横側に配置した。外観は、外力、塵埃、水などから内部部品を保護するため、樹脂カバーを設けた。耐振性に関しては、バッテリーと PDU はバッテリーセルや多数の電子部品から構成されているため、モータに L 字形のメインフレームを設け、

防振ゴムを介してそれぞれを取り付ける防振マウント構造を採用した⁽⁶⁾。

次に eGX のモータ構造を Fig. 6 に示す。モータは、アルミニウム製のリアケースとフロントケースでステータとロータを保護する密閉構造とした。ステータは、フロン



(a) eGX integrated type

(b) GX120

Fig. 4 Fitting dimension comparison of eGX integrated type and GX120

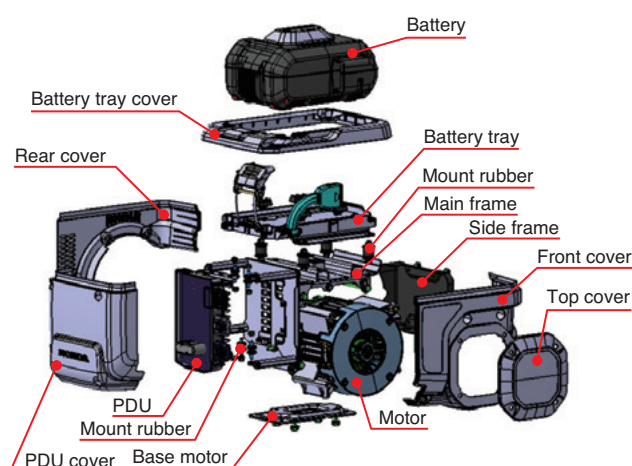


Fig. 5 Structure of eGX integrated type

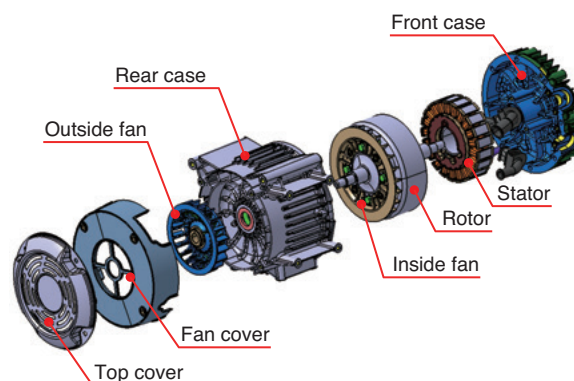


Fig. 6 Structure of eGX motor

トケースにボルトで固定した。ロータは中央部に動力伝達のシャフト、外殻内側表面にマグネットが配置されており、シャフトはリアケース・フロントケースに組み込まれたベアリングにより保持した。ロータのヨーク面に内扇ファンが、シャフトに外扇ファンが固定されており、それぞれケースの内側、外側の気流を作ることでモータの冷却を行っている。外扇ファンの周囲に冷却風の方角をガイドするためのファンカバーおよびトップカバーが配置され、リアケースに固定した。

eGXは、発電機のオルタネータとの部品共有化、製造工程の共用化を構想したことから、オルタネータの各部品のレイアウト構造は発電機で採用するアウターロータ構造で開発を開始した。さらに、建設機械で要求される過酷な環境要件である強度、振動、塵埃、耐水性に定めるべく、以下に示す改良を行った。

3.2. 耐振性

モータ部は 150 m/s^2 以上の耐振性を持つ仕様とした。これは、ランマやプレートコンパクタといった転圧機器への搭載が、振動に対し最も厳しい条件と想定したためである。転圧機器は、振動がパワーユニット部にも伝達する特徴を持ち、既存の汎用エンジンにおいても強い振動に対応するための専用設計である。転圧機器への電動パワーユニット搭載を想定すると、バッテリーやPDUはゴムマウントを介することで防振が可能である。一方、モータは動力伝達のシャフトと機器の駆動部の相対位置が規定され、ゴムマウントの使用が制限される。このことから、モータ自身に高い耐振性が必要であった。そこでモータの耐振性を成立させるため、仕様決定に関する検討結果を以下に示す。

3.2.1. ロータ支持構造

ロータ部の耐振性を向上させるためには、ロータの支点となるベアリングの配置が重要である。また、ロータとステータとの間のエアギャップは、生枝性を考慮したうえで出力・性能を最大化するため、最小 0.5 mm と設定した。モータ部に振動が加わった場合にも、このエアギャップが保持される必要がある。これを踏まえたロータ支持構造の検討結果を示す。

3.1. 節で述べたように、設計条件として発電機オルタネータと同形状にするため、ヨーク・マグネット部を全てオルタネータと共用することを考え、ロータ軸は Fig. 7(a) のような片持ちで、転圧機器にも耐えうる支持構造を検討した。加えて、発電機オルタネータとの共用部品は少なくなるものの、耐振性には優位と考えられる、ケース両側にベアリングを配置した両端支持構造も検討した。この配置を Fig. 7(b) に示す。

上記二つの仕様に対し、モータケースに加わるラジアル方向の振動加振力を模擬した静解析を実施し、ロータの変位量を算出した。この結果を Fig. 8 に示す。初期の片持ち

支持構造は、静的な目標変位量レベルの達成したものの、実際ランマに搭載したところロータとステータの接触が発生した。他方、両端支持構造は、静解析では片持ち支持構造に対し変位量を 30% 低減する効果が得られた。そこで試作し、ランマでの耐久試験の結果、モータ部の接触は解消されたため、両持ち構造を採用した。

3.2.2. ロータシャフト潤滑

ベアリングの組付け方法は、フロントケース、リアケースに圧入した。ロータシャフト・ベアリング間のクリアランスはルーズ設定となるため微振動が発生し、ロータシャフトの摩耗の発生が懸念された。摩耗が進展した場合、クリアランスが拡大し異音やモータ効率の低下、過大な振動、破損といった事象につながる可能性があるため、摩耗量を抑制する必要がある。

摩耗量はランマに搭載して評価した。追加保護の無いロータシャフト耐久後画像を Fig. 9(a) に示す。茶褐色の部分がベアリングと接触した部分であり、ピッチングを伴う摩耗が発生した。

そこで、改善仕様の検討を行った。各仕様における耐久試験後のシャフトにおけるベアリング接触部の画像を Fig. 9(b), (c), (d) に示す。

Fig. 9(b) は、シャフトに二硫化モリブデンコーティングを施したものである。二硫化モリブデンコーティングは、初期の摩耗抑制には効果があったものの、運転時間が増すに伴い摩耗量が増加した。モリブデンコーティング自体に耐久性がないため初期の良好な潤滑状態を継続できなかったと推定した。

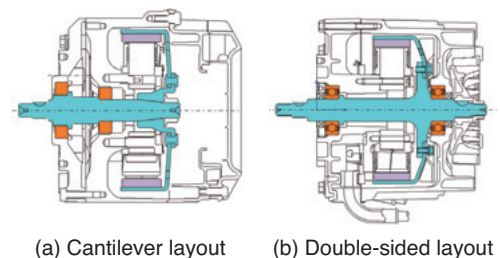


Fig. 7 Bearing layout

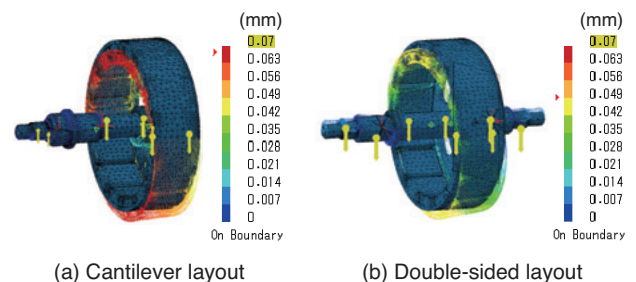


Fig. 8 Rotor displacement

Fig. 9(c) は、シャフトに硬質クロムメッキを施したものである。表面硬度を 17% 高くすることで摩耗量を抑制することを狙ったもので、狙い通りの効果が得られた。

Fig. 9(d) はシャフト・ベアリング間に汎用工業用グリスを塗布することで金属間の直接接触を回避したものである。耐久試験の結果、摩耗量を 1/10 以下に抑制することができた。また、eGX の想定ライフを越える運転を行った場合にもメンテナンスフリーで摩耗量を抑制した結果が得られた。

eGX では、良好な結果が得られた硬質クロムメッキとグリス塗布のうち、生技性の良いグリス塗布を採用した。

3.2.3. ロータシャフト・ヨーク間締結構造

eGX では、汎用性を持つパワーユニットとして必要な、複数の形状の出力軸タイプのロータシャフトを用意した。ロータをヨーク・マグネット部とシャフト部で分割される構造とすることでシャフトのみ複数の仕様を持つものとした。分割部の締結構造に関する検討結果を示す。

Fig. 10(a) は、発電機オルタネータと同様にヨーク部とシャフトの間にハブを設け、ヨークとハブをリベットで締結した構造である。この仕様は、ランマに搭載したところ Fig. 11 のようにヨークとリベットの接触面におけるフ

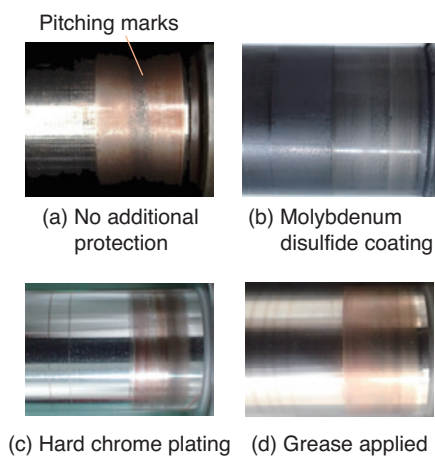


Fig. 9 Shaft condition inside of bearing after durability test

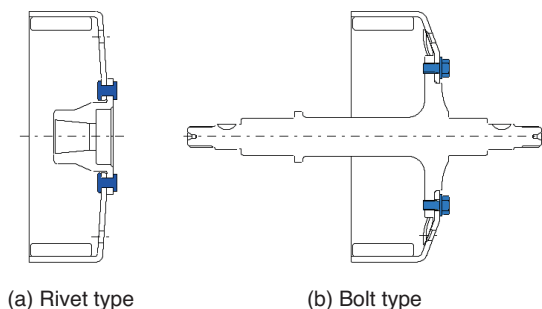


Fig. 10 Rotor shaft fastening

レッシング摩耗が発生し、進展を抑制することができなかった。

そこで、ロータシャフトとヨークをボルト締結とした⁽⁷⁾。これを Fig. 10(b) に示す。この変更により上記課題の解決が確認され、この仕様を採用した。

3.2.4. ステータ締結構造

ステータは、フロントケースにボルトを締結した。締結点は、構造上スロット部とシャフト部の間に配置が制限される一方、ステータのスロット部の振動を抑え、巻き線を保護する必要があった。

発電機では M5 サイズのボルト二点で締結していたが、ランマに搭載した際ステータが損傷した。この原因としてステータの共振が考えられた。フロントケースに各周波数の加速度を与え、ステータの加速度を確認した結果を Fig. 12 に示す。ステータを二点で締結した仕様では 360 Hz 付近に共振点があった。また、ランマの入力振動成分を分析した結果、11 Hz 付近に転圧周期による主な入力があるが、400 Hz 付近にも比較的大きな入力があった。この入力特性とステータの共振により過大な振動が発生し、ステータの強度に影響すると推定した。

これに対し、共振点を 500 Hz 以上に上げる目的で、M6 サイズのボルト三点で締結することを検討した。その結果、Fig. 12 にみられるように 360 Hz 付近の加速度が 1/10 程度まで低減し、共振点は 600 Hz 以上となる効果が確認された。この変更により上記課題の解決が確認され、この仕様を採用した。



Fig. 11 Fretting abrasion on plane of rivet

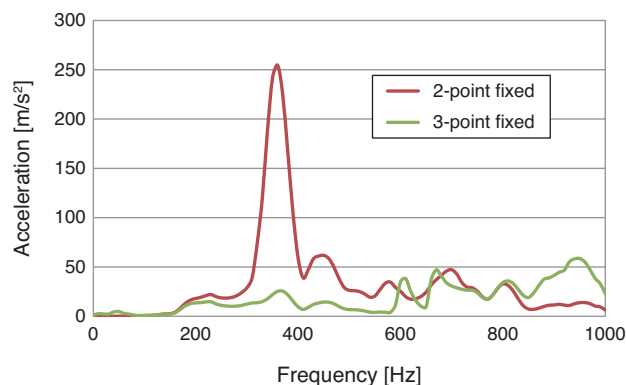


Fig. 12 Acceleration of stator

3.3. 耐環境性

3.3.1. 耐塵, 耐水性

Fig. 13 に eGX の内部構造を示す。モータ部は Fig. 14 に示す通り、ダストシールを設定することで塵埃および水の軸部からの侵入を防止した。Fig. 15 にモータケースの水抜き穴とエアイベントを示す。モータ下部に水抜き穴を設定することで、想定外の事象によりモータ内部へ水が浸入した場合でも水が排出される構造とした。モータ上部には防水仕様のエアイベントを設け、水抜き穴が閉塞しない構造にした。

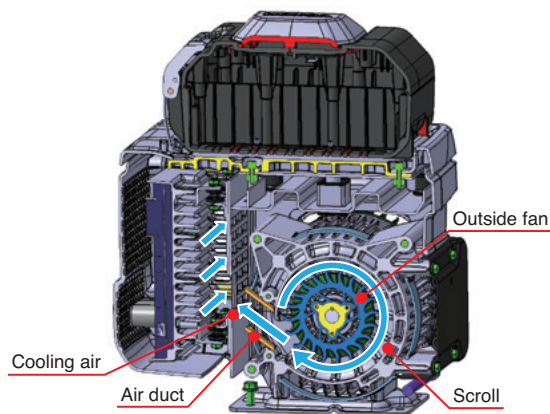


Fig. 13 Internal view of eGX

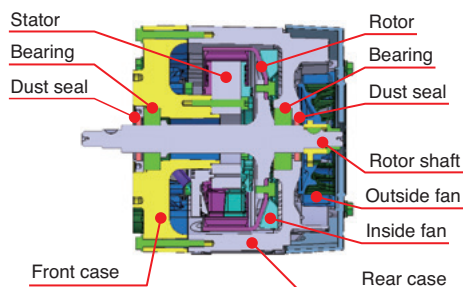


Fig. 14 Internal view of eGX motor

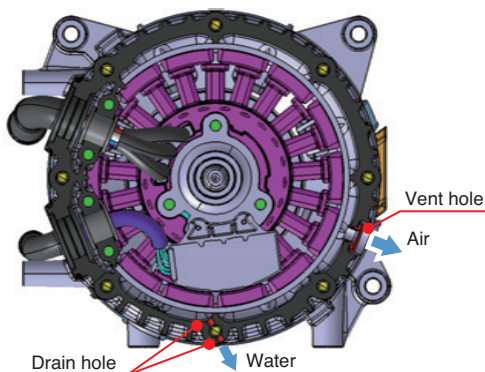


Fig. 15 Water hole layout

3.3.2. 冷却性

モータの冷却を検討する上で、発熱要因となるステータ部の損失レベルを把握することが重要である。そこで、eGX を定格運転した時の、全損失分析を Fig. 16 に示す。eGX の定格運転時の全損失の内訳は、大きくモータコンローラの損失約 20%、モータが約 80% になった。モータの損失の中で、巻き線部で発生する銅損とコア部で発生する鉄損が約 47%、ベアリング部のフリクション損が約 23%、今回採用した外扇ファンおよび内扇ファンの風損が約 12% となっている。鉄損の一部はコアからケースあるいはシャフトから直接熱伝導により外部冷却されるが、鉄損の一部、銅損は、全てモータ内部に放出されることになり、局所的な温度上昇を発生させる。それにより、パルス検出のための内部センサの温度保護により、パワーユニットの連続定格運転時間に影響を及ぼした。

そのため、以降に述べるような冷却手法を検討した。

モータの詳細構造を Fig. 17 に示す。

ステータコアの 21 本のポールにはインシュレータを介して巻き線が施され、各巻き線はバスリングで接続されて

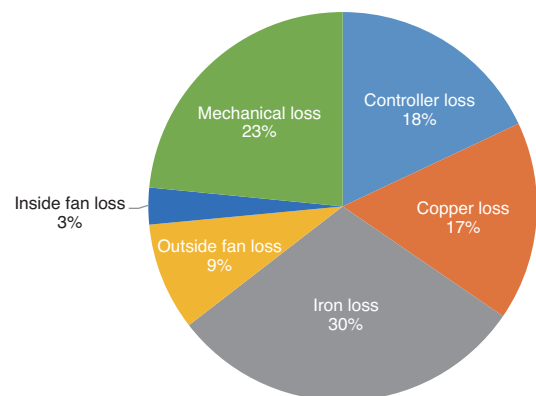


Fig. 16 Loss analysis of electric power unit

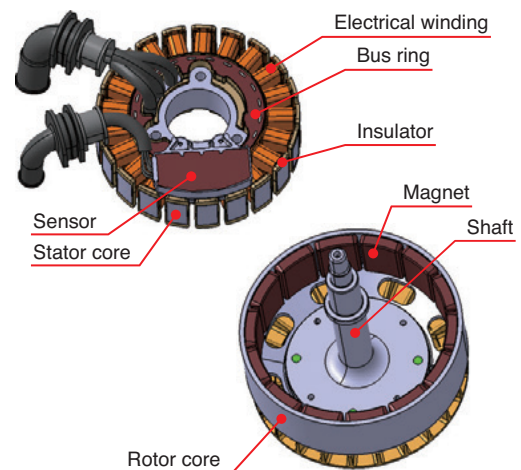


Fig. 17 Detailed structure of motor

いる。パルス検出のためのセンサはステータコアに締結されており、ステータコアはケースにボルト締結されている。ロータヨークの内周には 14 極の磁石が接着されており、ステータの外周部でエアギャップを介して回転する。モータの形式としてはアウターロータ構造を採用している。アウターロータ構造の利点は、ロータの磁石が円周外部方向に配置できるため、磁石を大型化することができる。特に、このモータの磁石は発電機の生産設備の流用の観点からフェライト磁石を採用しており、一般に使われているネオジウム系の希土類磁石と比較すると、最大エネルギー積が 1/5 以下と低い。

より多くの磁石を円周外側に配置し、磁石の等価断面積を増やすことにより、ステータとロータ間のギャップ磁束量を増加させている。

一方、アウターロータ構造の課題は、ステータの巻き線が、ロータコアとのエアギャップ、さらにケースとのエアギャップを介して、最も内側に存在するため、巻き線に流れる電流で発熱した周辺部の冷却であった。

一般の産業用モータは、シャフトの軸上に外扇ファンを配置し、その外扇ファンの風をモータケースの外周部に強制対流させる冷却方法を取っているものが多い。しかし、eGX は建設機械用の防塵、防水の観点からモータケースを密閉構造としたため、外扇ファンの冷却風だけでは、モータ内部温度の低減が十分でなかった。これらのことから、モータ内部に冷却風を流す方法として内扇ファンを搭載する検討を行った。簡易モデルを用いた内扇ファンによる冷却風の流れを流体解析した結果を Fig. 18 に示す。

本解析では 21 本の隣り合う巻き線間の空隙を再現することが難しいことから、ステータとロータのエアギャップを広げた簡易モデルで流体解析を行った。

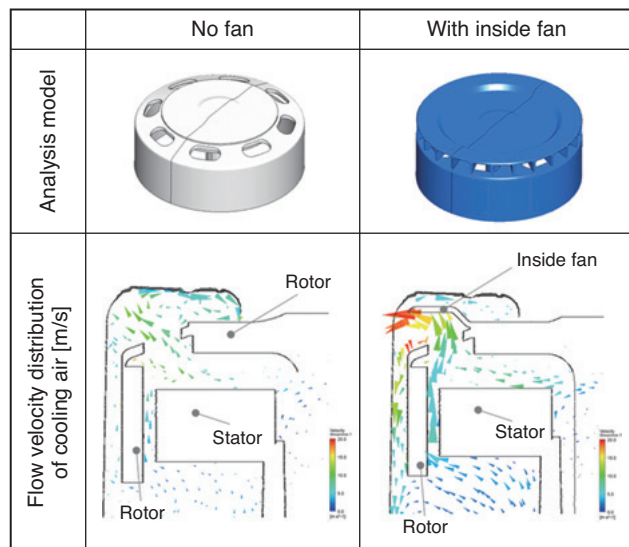


Fig. 18 Fluid analysis result inside motor

ロータの上部に取り付けられた内扇ファンが回転することにより、ステータ内部の空気がファンの外側に押し出され、その空気はロータの外面とケース内面の空隙を通り、ステータの下部側に流れる。一方、ステータ下部側の空気はステータの巻き線部を介して、リア側上面に流れる。この内部空気が銅損の発熱源である巻き線部と鉄損の発熱源であるステータコア部分を循環することにより、モータ内部温度を外部ケースに伝達することができる。

流体解析のロータの外表面とケースの内面の空隙を流れる空気の流量を解析した結果を Fig. 19 に示す。計算の結果から、内扇ファンがある場合は無い場合と比較して、約 4 倍の内部空気を循環することが期待できる。

これらの検証結果から、eGX のモータでは、冷却用に外扇ファンと内扇ファンの両方を搭載した。Fig. 20 に冷却方式の断面図を示す。冷却風の流れをまとめると内扇ファンはロータコアの穴から巻き線周囲の内部雰囲気気を吸いだしモータ内部の空気を循環させることで、巻き線からモータ内部空気への熱伝達率および内部空気からハウジングへの熱伝達率を高める。外扇ファンはハウジング外表面に冷却風を流すことでハウジングから外気に熱を放散させる⁽⁸⁾。

つぎに、モータを定格運転の条件下で、50 分後の温度上昇を比較した試験結果を Table 2 に示す。三つの条件、全てのファンが無かった場合、外扇ファンのみ装備、内外扇ファン装備での冷却性能を比較した。全てのファンが無い構成では、巻き線の温度が急速に上昇し、それに伴う

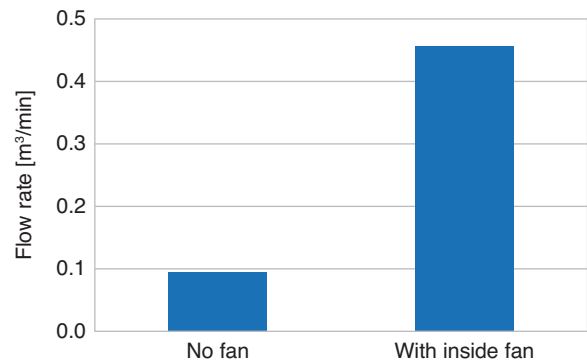


Fig. 19 Flow rate passing through gap between rotor and case

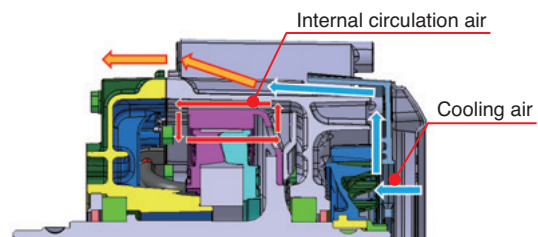


Fig. 20 Image of motor cooling system

Table 2 Temperature rising test result at rated point after 50 min

Measurement place	40°C conversion		
	No fan (°C)	With outside fan (°C)	With inside and outside fans (°C)
Motor internal atmosphere near sensor	91	74	67
Internal sensor	96	78	69
Electrical winding (Rear side)	150	130	96
Electrical winding (Front side)	141	122	91

モータの内部温度も上昇するため、温度飽和せず、連続定格運転することができなかった。

外扇ファンだけを搭載した場合、ファンが無い場合と比較するとモータの内部温度は約 20°C 下がるものの、巻き線周辺部分の局所的な温度上昇が発生し、温度飽和することがなかった。

内外扇ファンの両方を構成した場合、温度飽和をし、連続運転が可能となった。

4. まとめ

過酷な使用環境である小型建設機械市場の要望に応える、2 kW クラスゼロエミッション電動パワーユニット eGX を開発した。搭載互換構造およびモータの耐久性に関して、以下の技術を適用した。

- (1) 作業機の搭載条件や使用環境を鑑みて、一体型とセパレート型を設定した。一体型は同出力帯のエンジンとの互換性を考慮し、外形寸法や電装機器の配置、出力軸の位置と取り付け面を同一寸法とするパッケージングを構築した。
- (2) モータの耐振性は、ロータシャフトの支持構造適正化とベアリング保持部のフレットング摩耗対策、ロータシャフト・ヨーク間のボルト締結構造採用、ステータ締結の適正化により、150 m/s² 以上の振動に耐える構造とした。
- (3) モータの耐環境性は、主にモータケースを密閉構造とすることで、耐水、耐塵埃性を達成しつつ、モータ内部に内扇ファン、外部に外扇ファンを設定することで連続定格出力 1.6 kW/3600 rpm を達成する冷却性を構築した。

今後さらに高まる環境規制に対し、既存のエンジン作業機を電動化するというニーズに応えることが可能となった。

参考文献

- (1) 一般社団法人 日本陸用内燃機関協会：ホンダ GX エンジンの進化を振り返る，LEMA, No. 530, p. 19-33, (2018)

- (2) Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council, Chapter I, Article 4. Engine categories, (2016)

- (3) <https://www.honda.co.jp/engines/GX/GX120/>

- (4) <https://www.honda.co.jp/engines/GX/GX100rammer/>

- (5) 特許公開番号：WO2020/049617, (2020)

- (6) 特許公開番号：WO2020/194728, (2020)

- (7) 特許公開番号：WO2020/202390, (2020)

- (8) 特許公開番号：WO2020/202391, (2020)

■ 著 者 ■



神原 史吉



澤崎 駿佑



山岸 善彦



松永 直樹