

複リンク式高膨張比エンジンを搭載した 家庭用コージェネレーションユニットの開発

Development of Micro Combined Heat and Power Generation Unit with Extended Expansion Linkage Engine

瀧 田 義 治*
Yoshiharu TAKITA
吉 津 邦 弘*
Kunihiro KITSU

河 野 昌 平*
Shohei KONO
直 井 専*
Atsumu NAOI

高 田 秀 昭*
Hideaki TAKADA
津 野 康 一*
Koichi TSUNO

要 旨

燃費の向上とコンパクト化の両立を目指して、複リンク式高膨張比エンジン (EXlink) を採用した家庭用コージェネレーションユニットを開発した。独自の複リンク機構を用いてアトキンソンサイクルを実現した小型エンジンの量産化は世界初となる。

吸気／圧縮行程長に対し膨張／排気行程長をリンク機構にて拡大し、出力を高効率で取り出すEXlinkを家庭用コージェネレーションユニットに採用することで、2006年モデルに対し3.8ポイントアップの26.3% (低位発熱量基準) の発電効率を達成するとともに、熱の流れの最適設計により総合効率も6.5ポイントアップの92% (低位発熱量基準) を達成した。

エンジンの高効率化による吸気量の減少により吸排気騒音を低減、コージェネレーションユニットの騒音値を43 dB(A)/1m (日本仕様) とした。

日本の住宅まわりの狭小スペースへの設置を想定し奥行き298 mmを達成した。あわせて部品配置を見直し、2006年モデルに対し33%のきょう体容積低減、-11 kgの軽量化を実現した。

ABSTRACT

A micro combined heat and power generation (CHP) unit that uses an extended expansion linkage engine (EXlink) has been developed with the aim of simultaneously enhancing fuel efficiency and reducing the unit size. This is the first mass production known to date of a compact engine that uses an original multiple linkage system to realize an Atkinson cycle.

EXlink increases the power output efficiency by using a linkage system to extend the expansion and exhaust stroke lengths relative to the intake and compression stroke lengths. Use of EXlink in a micro CHP unit increased the power generating efficiency by 3.8 points to 26.3% (lower heating value: LHV), and optimization of the heat flow design also increased the overall efficiency by 6.5 points to 92% (LHV), compared to the 2006 model.

The increased engine efficiency enabled reduction of the intake air amount which reduced the intake and exhaust noise and achieved a CHP unit noise value of 43 dB(A)/1m (Japanese specifications).

A depth of 298 mm was achieved in consideration of installation in the narrow spaces around a typical Japanese house. In addition to revision of the parts layout, this realized a 33% reduction in chassis volume and an 11-kg weight reduction compared to the 2006 model.

1. はじめに

地球規模での気候変動やエネルギー問題により環境意識が高まり、CO₂削減に向けて各界でさまざまな取り組みがなされているなか、全世界的に民生部門、とりわけ家庭内のエネルギー消費は増加の一途をたどっており、エネルギー消費全体が減らない大きな要因となっている。

コージェネレーションシステムは発電機で電気を作り、その際生じた熱を回収利用するシステムである。CO₂削減の有効な手段とみなされており、産業用の熱源を兼ねた自家発電設備として大規模設備などを中心に以前から広く利用されていた。

2003年Hondaは、汎用製品で培ったエンジン技術とインバータ発電機技術を応用し家庭向けに小型コージェネ

*汎用 R&D センター

レーションユニットを日本国内で発売⁽¹⁾し、2006年に第二世代(以下、2006年モデルとする)の発売を経て、2011年6月には累計11万台の出荷を達成した。

更なる環境性能の向上とコンパクト化のため、独自の複リンク機構を用いてアトキンソンサイクルを実現した高膨張比エンジン(以下、EXlinkとする)を世界で初めて採用し、Hondaとしては第三世代となる家庭用コージェネレーションユニットを開発した。

2. 開発のねらい

産業用コージェネレーションシステムの多くは、電力供給を主目的とし、常に電力を生み出しながら、その際発生した熱を利用し、余剰となった場合は熱を廃棄する運転パターン(電主熱従運転)を採用している。一方家庭では電気だけでなく、給湯や暖房といった熱の需要も一定量見込めることからHondaでは貯湯タンクに熱を温水の形で蓄え、温水が一定量、一定温度に達するまで運転する熱主電従運転を採用している。電力と熱を多用する時間帯を学習し、その予測をもとに運転制御しており、家庭用として無駄の少ないシステムを実現している。

日本向け家庭用コージェネレーションシステムの設置イメージをFig. 1に示す。

屋外に設置されたコージェネレーションユニットにて発電された電力は分電盤を経由して家庭内の電気製品で消費される。熱は貯湯タンクに温水として貯められ、必要に応じ給湯をはじめ床暖房や浴室暖房機などに利用される。貯湯タンクには補助ボイラが設けられ、湯切れを防ぐシステムとなっている。

今回開発にあたっては熱主電従運転を採用し、貯湯タンク、補助ボイラを併用しながら1kWの発電をおこなうシステムを踏襲することとし、以下の商品性の向上を目指した。

(1) 発電効率の向上

電気は同エネルギー量の温水と比較して経済価値が高く、さまざまな用途に変換することが可能なエネルギーである。燃料の持つエネルギーを温水に変換する給湯ボイラなどのシステムに比べて、コージェネレーションシステムは高価値な電気エネルギーを生み出すとともに残りのエ

ネルギーも無駄なく温水として利用できる点で経済的なシステムと言える。よって発電設備としてのコージェネレーションシステムにはより高い発電効率が求められる。

(2) 熱回収率の向上

家庭用コージェネレーションシステムは発電設備であるとともに給湯設備であるので、熱回収率は極めて重要である。家庭用コージェネレーションユニットから廃棄されるエネルギー量を従来のままとして発電効率のみを向上させると熱回収量が減ってしまうので、換気風量を最小化することで熱回収率の向上を図った。また、オイルパン一体型オイルクーラ熱交換器を採用し、エンジンオイルからの熱回収を増やした。

(3) 低振動、低騒音化

日本向け家庭用コージェネレーションユニットは住宅地での設置に加え、熱需要のある早朝、夕刻の運転が予想されるため、他のエンジン搭載商品に対してさらに高いレベルの静粛性が求められる。またコンパクト化により2006年モデルに比べ屋外のより狭いスペースへの設置の増加が想定されることから、低騒音化と騒音フィーリングの向上を目指した。

(4) コンパクト化

住宅と境界線までの狭いスペースに設置し、かつ必要なメンテナンスが可能になるように、メンテナンススペース含め650mmの隙間に設置ができる奥行き300mm以下のユニットを目標とした(Fig. 2)。また、出窓の下へ設置しやすくするため全高の見直しもおこない、最終的に2006年モデルの33%減の容積を目標とした。



Fig. 2 Example of 650 mm exterior space

3. 開発技術の紹介

3.1. 発電効率の向上

3.1.1. EXlinkの採用

発電効率を向上させるため、エンジンはEXlinkを採用した。

これは通常エンジンのコンロッド、クランクシャフトにトリゴナルリンク、スイングロッド、エキセントリックシャフトの各リンク機構を追加し、エキセントリックシャフトをクランクシャフトの1/2の回転数で同期回転させることで吸

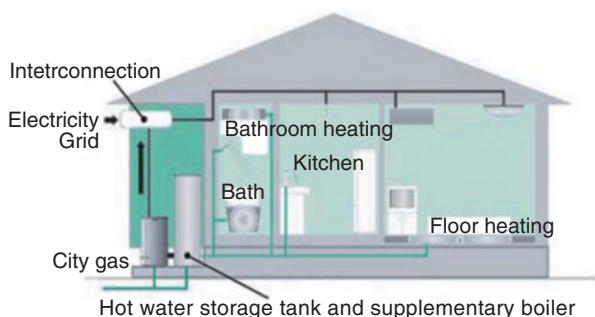


Fig. 1 Micro combined heat and power generation system

Table 1 Comparison of 2006 model and 2011 model engine specifications

	2006 model	2011 model
Engine name	GE160V	GFV110
Bore diameter (mm)	φ62	φ53
Intake/compression stroke (mm)	54.0	49.8
Expansion/exhaust stroke (mm)	54.0	74.1
Intake/compression volume (cm ³)	163	110
Expansion/exhaust volume (cm ³)	163	163
Compression ratio	12.0	12.2
Expansion ratio	12.0	17.6
Rated speed (rpm)	1,950	1,950

気/圧縮行程長と膨張/排気行程長を非等長としてアトキンソンサイクルを具現化したものである (Fig. 3)^{(2)~(9)}.

吸気/圧縮行程長を短く、膨張/排気行程長を長く設定することで、少ない吸気でより多くの仕事を取り出すことができ、通常エンジンよりも高い熱効率を得ることができる。

2006年モデル搭載エンジン (GE160V) と、開発モデル搭載エンジン (GFV110) の諸元を Table 1 に示す。圧縮比は 2006 年モデルと同等とし、膨張比は 17.6 と設定した。またスモールボア化により燃焼室をコンパクト化し、さら

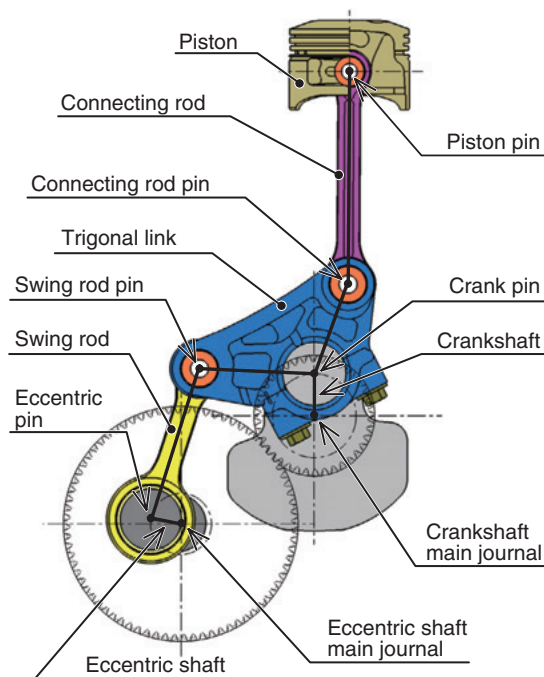


Fig. 3 Configuration of EXlink

に吸排気バルブを燃焼室に対して放射状に配置して、点火プラグをより中心に近づけることで燃焼効率の良い半球形燃焼室を形成した。Fig. 4 にエンジンの構造を示す。

高膨張比化と燃焼室形状の改良に加え、吸気行程容積を最適化することにより、定格運転時において 2006 年モデルに対してエンジン軸端効率を 16.4% 向上させた。

3.1.2. 電気変換効率の向上

発電効率向上のため、エンジンで発生した軸出力を電気出力に変換するオルタネータと、その電気出力を系統連系可能な電力に変換をおこなうインバータユニットのそれぞれの変換効率向上もおこなった。Fig. 5 に系統連系発電部のブロック図を示す。

3.1.3. オルタネータの効率向上技術

オルタネータの損失は磁性材に依存する鉄損と、巻線に依存する銅損からなる。鉄損は、鉄心に磁界が通過することで渦電流が発生し、そのジュール熱損失である「渦電流損失」と、磁性体のヒステリシス曲線 (B-H) によって発生する「ヒステリシス損」とに分類される。式 (1) に渦電流損 W_e 、式 (2) にヒステリシス損 W_h の一般式を示す。

$$W_e = af^2Bm^2 \quad (1)$$

$$W_h = bfBm^{1.6} \quad (2)$$

a : 磁性体の板厚で決まる定数

b : 磁性体の材質で決まる定数

f : オルタネータの周波数

Bm : 磁束密度

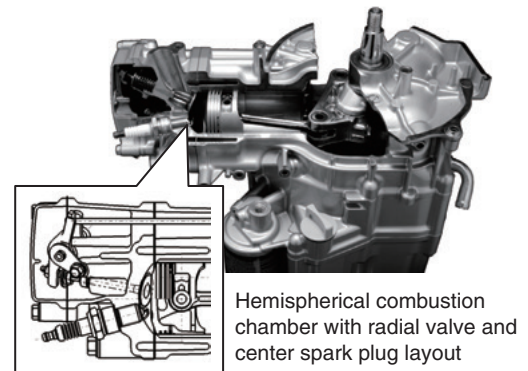


Fig. 4 External and sectional view of 2011 model engine

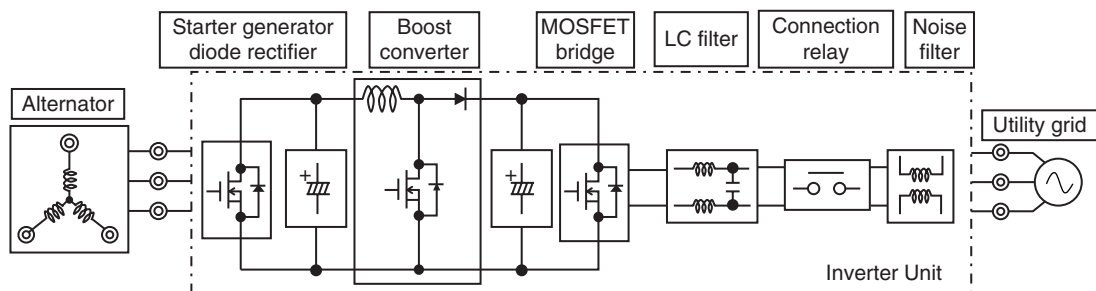


Fig. 5 Block diagram of interconnection inverter and alternator

本機では鉄損に着目し、以下の三つの技術要素により損失低減を図った。

(1) 周波数の低減による鉄損低減

式(1)、式(2)から周波数の低減は鉄損の低減に有効であることがわかる。Fig. 6に本機で採用したオルタネータを示す。ステータのスロット数とロータの極数を低減することにより、周波数の低減をおこなっている。これにより定格電圧が低下してしまうが、コアの積厚を厚くすることで2006年モデル同等の定格電圧を維持している。

(2) コア部渦電流の低減による渦電流損の低減

式(1)の定数 a は磁性体板厚の二乗に比例する。本機では、ステータコアの板厚を薄くすることで渦電流損失の低減をおこなった。

(3) 打ち抜きひずみによる磁気特性劣化率の低減

式(2)の定数 b は磁性体の磁気特性の劣化要因を取り除くことで減少させることができる。本機では、ステータコアの板厚を薄くしたことにより、打ち抜き成型時に生じるひずみを減少させ、磁気特性劣化を低減したことによりヒステリシス損の低減をおこなった。

(1)から(3)の効率向上技術を適用することにより、オルタネータの単体変換効率向上を達成した。

3.1.4. インバータの効率向上技術

2006年モデルではスイッチング素子の選定、チョークコイルのコア材選定等で効率向上を図り高効率系統連系インバータ⁽¹⁰⁾を実現していた。本機では、Fig. 5のオルタネータとダイオード整流器で生成したDC電圧を系統連系可能なDC電圧に昇圧するBoost converter部と、昇圧したDC電圧を系統電圧と系統周波数にあわせたAC電圧にするMOSFET bridge部のスイッチング周波数に着目し損失低減を図った。スイッチング素子の回路構成とLC Filter定数の見直しをおこない、スイッチング周波数を低減することにより、Boost converter部とMOSFET bridge部のスイッチング損失およびLC Filter部チョークコイルの鉄損が低減され、インバータ部の単体変換効率向上を達成した。

3.1.5. 発電効率の向上

エンジンの熱効率向上とオルタネータ、インバータの変換効率の向上により、ユニットの発電効率は2006年モデル

22.5% (低位発熱量基準、以下LHVとする) から26.3% (LHV)の3.8ポイントアップを達成した。

3.2. 熱回収率の向上

コージェネレーションユニットは燃料の持つエネルギーをエンジン、オルタネータ、インバータを介して電力として取り出し、その過程で発生する熱を排気熱交換器やエンジン冷却システムで冷却水を介して回収する。低温の熱は換気風や排気に取り込まれ廃熱としてユニット外に排出される。

換気はエンジンや電装部品などの各パーツ表面の熱を奪う形で冷却し、すべての構成部品が適正温度以下になるようにその風量が設定されている。熱回収率向上のために換気を効果的に行い、その風量を減らすことを目指した。

変換効率の向上により素子からの発熱量が下がり、電装部品の冷却に必要な風量を減らすことが可能となった。この風量でユニット全体の冷却が成立するよう、換気の流れとエンジン冷却システムの改善を図った。

3.2.1. 換気流れの最適化

ユニット内で換気による積極的な冷却が必要な箇所は

- ・インバータ (電装室)
- ・ECU (電装室)
- ・オルタネータ (エンジンに直結)
- ・エンジンマウント (エンジン室)

である。エンジン、ホース類は冷却水によって冷却される。

2006年モデルではエンジンと直結したオルタネータに取り付けられたファンで、電装室とエンジン室を換気して温度上昇した換気風でオルタネータを冷やしていたため風量が必要であった。新しいユニットでは電装室を冷却した換気でオルタネータを冷やしてからエンジン室を換気する (Fig. 7)。

エンジン室のエンジンマウントとオルタネータを冷やす順序が入れ替わるためエンジンルームの平均温度は上昇したが、エンジン室に流れ込む換気風の速度と向きを改善することでマウント周辺部の温度上昇を防いでいる。

Fig. 8にシミュレーション結果の一例を示す。

騒音をユニット外に漏らさない機構を備えた換気出口のダクトより換気をユニット外に排出する。

これにより効率的な庫内換気を実現でき、最終的に冷却風量を従来の35 m³/hから13 m³/hまで減らすことが可能となった。

3.2.2. エンジンオイル冷却システム

本機の熱回収システムでは冷却水は排気熱交換器の前にまずエンジンオイルと熱交換をしている。

2006年モデルではオイルタンク内にコイル状のオイルクーラ (タンクコイル式熱交換器)を設置していたが、本機ではオイルパンに一体構成 (タンクジャケット式熱交換器)とした (Fig. 9)。これによりエンジン内部を潤滑した直後の高温のエンジンオイルから効率よく熱を回収することを実現した。

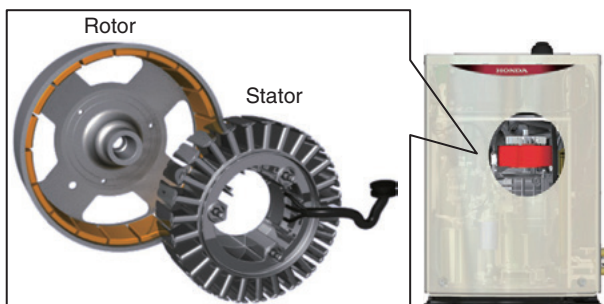


Fig. 6 External view of alternator

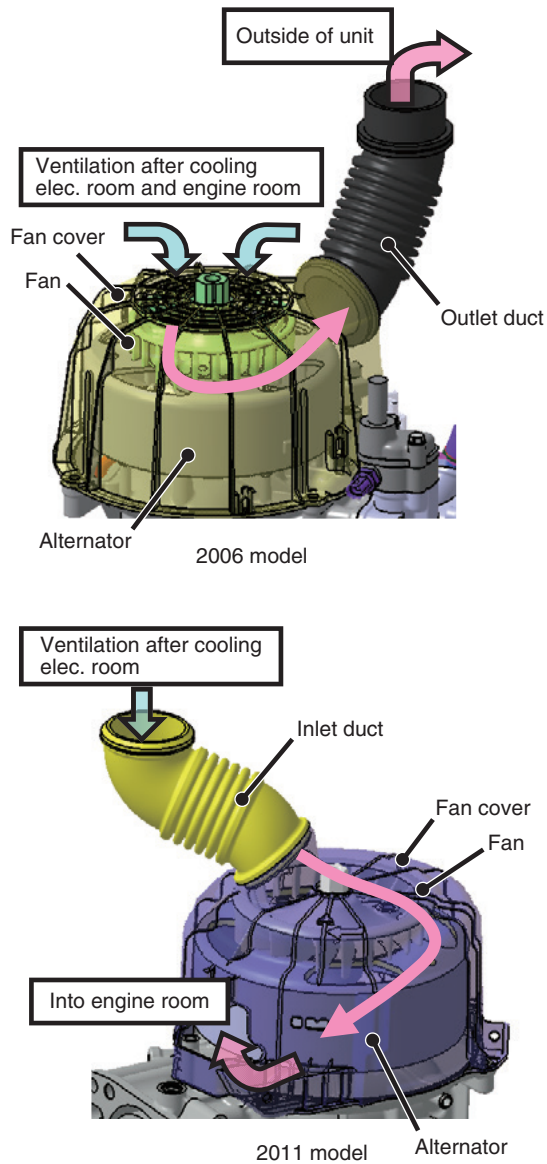


Fig. 7 Comparison of ventilation air flow in 2006 model and 2011 model

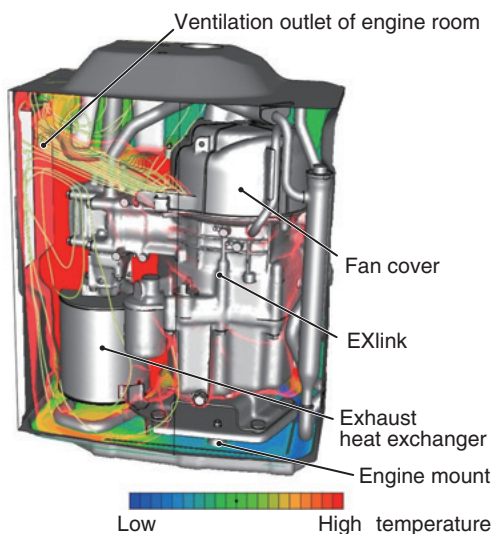


Fig. 8 Calculated flowlines and temperature distribution in engine room

3.2.3. 熱回収率の向上と総合効率の向上

ユニット外に廃棄する熱エネルギーの削減により熱回収率の向上を図り、2006年モデル 63% (LHV) から 2.7 ポイントアップの 65.5% (LHV) の熱回収率を実現した。これにより総合効率は 2006年モデル 85.5% (LHV) から 92% (LHV) への向上を実現した。

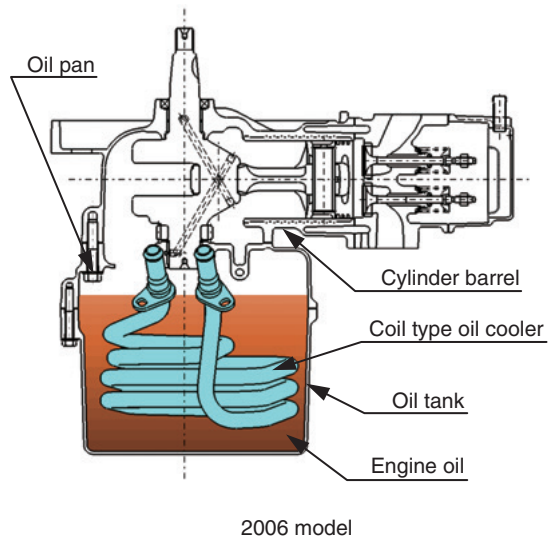
3.3. 低振動, 低騒音化技術

3.3.1. EXlink 採用による騒音低減

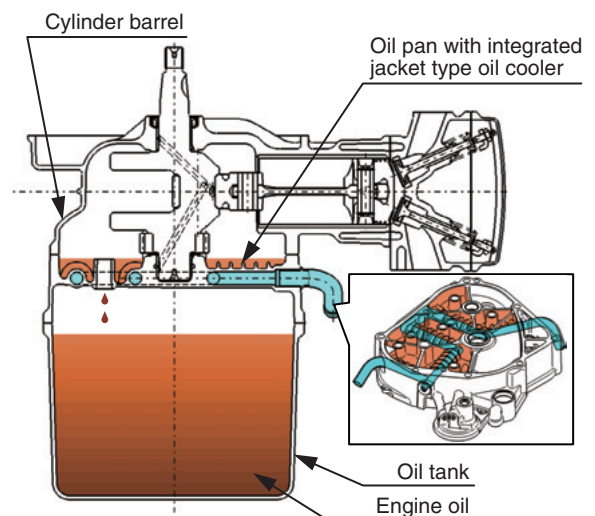
高効率な EXlink を採用したことにより吸気量が減少したことから、吸気サイレンサの容積を 2006年モデルに比べて 45% 縮小させることができた。また吸気量の減少は排気音の低減にも有利である。あわせてパッケージングを見直すことで、2006年モデルに対し 15% のマフラー容積増を達成し騒音フィーリングの向上を実現した。

3.3.2. リンク配置の最適化による振動低減

高膨張比化によりピストンの行程長が変わるので、ピス



2006 model



2011 model

Fig. 9 Oil cooler structure

トンの加速度による慣性力が増加し振動が大きくなる。この対策として、短い行程長を持つ吸気／圧縮行程にはそれぞれ 180° よりも短いクランク回転角を、長い行程長を持つ膨張／排気行程には 180° よりも長いクランク回転角を与えるリンク配置^{(6), (7)}とすることで、計算上のピストン往復運動による最大慣性力を 2006 年モデルに対して 23% 低減できた。さらにエンジン配置の変更等も加えて、ユニットから設置基礎への加振力を 2006 年モデルと比較して 40% 低減できた。

3.3.3. シャフト類のスラスト荷重による打音と対策

エキセントリックシャフトを 1/2 の回転数で同期回転させるための円筒歯車にはヘリカルギヤを採用し、さらに噛合い部へオイルジェットをおこなうことでギヤの噛込み音低減を図った。ここでヘリカルギヤを採用したことからトルク反力によりクランクシャフト、エキセントリックシャフトそれぞれの軸方向にスラスト力が発生する。一方、筒内圧とピストンまわりの慣性力により発生するトルクは 1 サイクル中に変動するため、各シャフトのギヤの駆動・従動関係が交替する。このためスラスト力が交互反転し、打音の発生が懸念される。このスラスト打音を解消するため、クランクシャフトには自重とヘリカルギヤによるスラスト力を打ち消す方向に、エキセントリックシャフトには両端部に油圧をかけて、ギヤの駆動関係が反転しても軸にかかる荷重方向は変化しない構造とした (Fig. 10)。エンジン単体騒音と油圧によるクランクシャフトのスラスト力の関係を Fig. 11 に示す。この結果、2006 年モデルに対してエンジン単体騒音値を同等とし、ユニット騒音は上述の吸・排気音低減とあわせて 1 dB(A) ダウンの 43 dB(A)/1m を達成した。

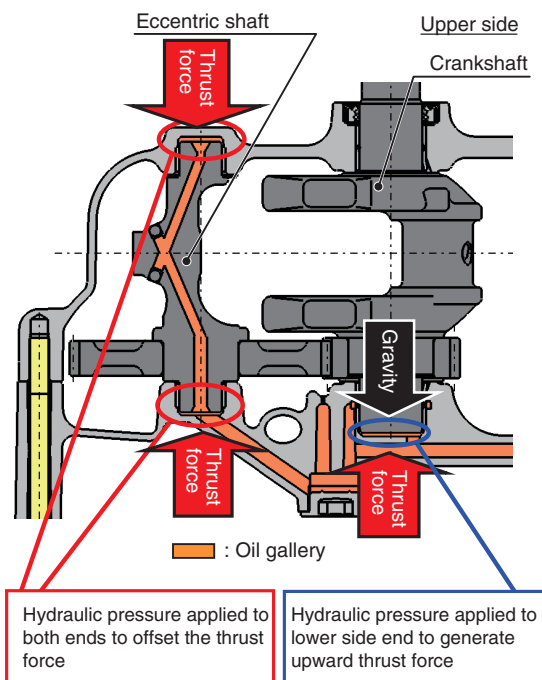


Fig. 10 Oil damping system

3.4. コンパクト化技術

3.4.1. エンジンのコンパクト化技術

EXlink は以下の点において、エンジンサイズの大形化が懸念された。

- ・複リンク、リンクの駆動ギヤの追加

- ・膨張比の延長による見かけ上の超ロングストローク化

このエンジンを、コンパクトなきょう体に収納するため、従来、シリンダバレルとオイルパン、オイルパンとオイルタンクと別々に締結していたものを、共締め構造にし、クランクケース外観寸法を従来同等とした (Fig. 12)。

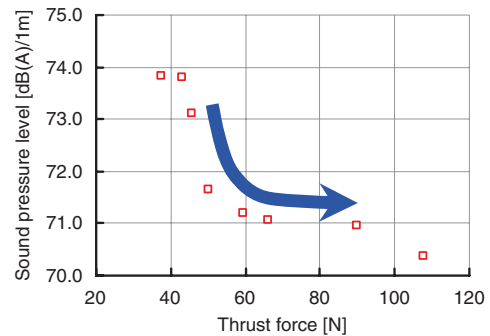


Fig. 11 Relative crankshaft thrust force (by hydraulic pressure) and engine noise

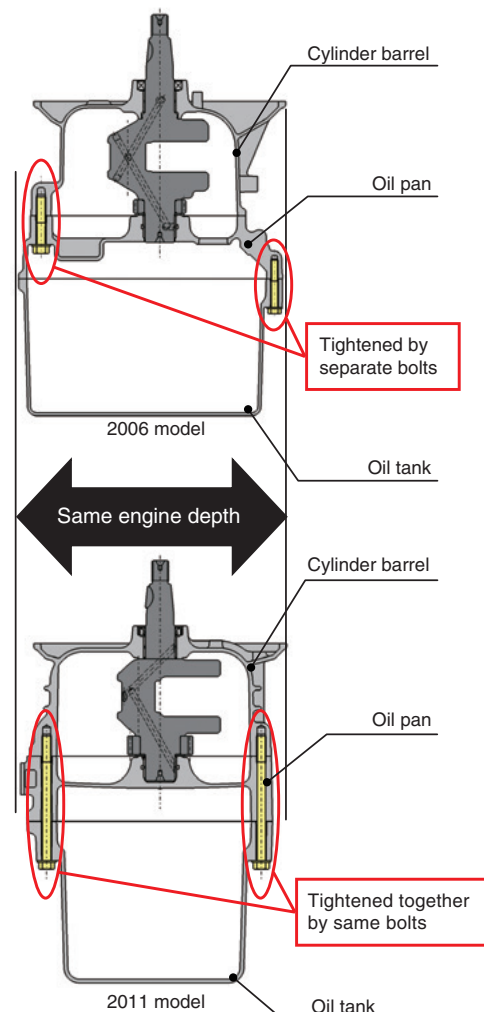


Fig. 12 Engine case tightening structure

3.4.2. ユニットのコンパクト化技術

エンジンのシリンダ配置を上からみて斜め置きから真横置きとした。これによりエンジンのクランクケースの厚みに吸音材厚みとクリアランスを足したものがユニットの奥行きとなる。ユニットの厚みを目標の 300 mm 以下とするため吸音材の見直しをおこなった。

従来のエンジン室の吸音材は一定厚さを持った軟質ウレタンフォームを裁断したものであったが、吸音材とエンジンのクリアランスを確保するために外観寸法自体大きめに設定し、それでも十分クリアランス確保できない箇所は吸音材に穴をあけていた。

そこで成形フェルト製の吸音材に変更し、その表面に圧縮成形を施した。これによりエンジンの凹凸にあわせ必要量のクリアランスを確保しながら音の逃げる穴を最小限にすることが可能となり高い静粛性とコンパクト化の両立が可能となった (Fig. 13)。

2006 年モデルでは突起部を除いたユニットの奥行きが 380 mm であったのに対し、本機では 82 mm 減の 298 mm となった。

また、吸気系部品の配置を見直したことでユニット高さは突起部を除き 880 mm から 130 mm 減の 750 mm となり、2006 年モデル比 33% の容積低減を達成した。

ユニットの表面積が減少したことでパネルなどの大型部品は部品点数の削減が可能となった。

ユニットを小型化することできょう体の剛性を高められ、レフトサイドフレームの廃止、締結部品の削減などが可能となった。最終的に大型プレス部品は 10 点から 8 点へ削減され、ユニット全体では 11 kg の質量ダウンを達成することができた (Fig. 14)。

ユニットの小型化と質量の低減により、設置性の向上だけでなく、外板からの放熱量の削減やユニット内の配線の

短縮、輸送時の積載数の増加などがもたらされた。

メンテナンス方向と設置時の配線配管方向をそれぞれ、ユニットの両サイドに集約させたことで、メンテナンススペースを含めた設置に必要な奥行きは 950 mm から 650 mm となり、大幅に設置性が向上した。

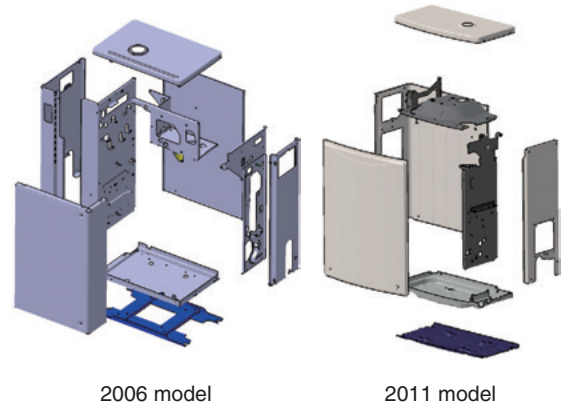


Fig. 14 Comparison of frame and panel structure

4. まとめ

EXlink を採用した家庭用コージェネレーションユニットを開発した。その外観 (Fig. 15) と商品スペック (Table 2)、および達成値を以下に示す。

- (1) EXlink を搭載したコージェネレーションユニットを開発し、発電効率は 2006 年モデルに対して 3.8 ポイントアップの 26.3% (LHV)、熱回収効率は 2.7 ポイントアップの 65.7% (LHV) を達成した。総合効率は 6.5 ポイントアップの 92% (LHV) となり、EXlink が家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステムの環境性能向上に有用であることが示された。
- (2) エンジン搭載パッケージ手法の改良により、きょう体サイズを 2006 年モデルに対し奥行き 82 mm 減の 298 mm、高さは 130 mm 減の 750 mm とし、容積は 33% ダウンを達成し、これにより設置性の向上を実現した。

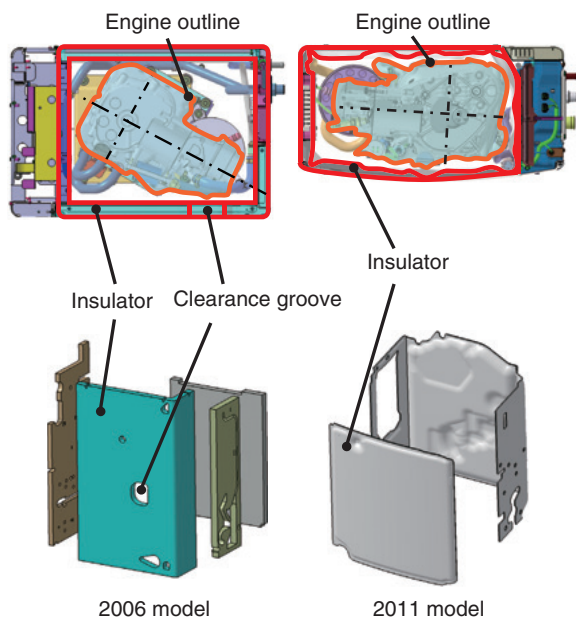


Fig. 13 Comparison of insulator structure



Fig. 15 External view of 2011 model

Table 2 2011 model specifications

Output	Electricity	1 ϕ 3W 202V/101V 50/60Hz 1.0 kW
	Heat	2.5 kW
Power supply		Grid connection by inverter
Heat recovery		75°C hot water
Efficiencies (LHV)	Electricity	26.3%
	Heat	65.7%
Dimensions (LxWxH)		580 mm x 298 mm x 750 mm
Mass		74 kg
Noise		43 dB(A)/1m (JIS B 8627-1)
Starting system		Starter generator

- (3) EXlink 搭載による吸排気系の見直しとギヤ音低減により, 43 dB(A)/1m の騒音値を達成した。
- (4) 小型化により大型フレーム部品の統合などをおこない, 2006 年モデル比 11 kg ダウンの軽量化を達成した。

参考文献

- (1) 高石敏充, 荒真人, 戸川一宏: 家庭用小型コージェネレーションユニットの紹介, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.53-58
- (2) 渡辺生, 河野昌平, 倉田真秀, 古賀響: 汎用高膨張比エンジンの研究 - 複リンク機構の理論と熱効率の向上 -, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.81-87
- (3) 古賀響, 渡辺生: 汎用高膨張比エンジンの研究 第二報 - 熱発生と正味性能 -, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.52-58
- (4) Watanabe, S., Koga, H., Kono, S.: Research on Extended Expansion General-Purpose Engine Theoretical Analysis of Multiple Linkage System and Improvement of Thermal Efficiency, SAE paper, 2006-32-0101(2006)
- (5) Koga, H., Watanabe, S.: Research on Extended Expansion General-Purpose Engine - Heat Release and Friction -, SAE paper, 2007-32-0003(2007)
- (6) Naoe, G., Watanabe, S.: Research on Extended Expansion General-Purpose Engine - Characteristic of Vibration -, SAE paper, 2008-32-0012(2008)
- (7) Watanabe, S., Naoe, G., Sato, Y.: Research on Extended Expansion General-Purpose Engine - A Numerical Approach to Reduce Vibration -, SAE paper, 2009-01-1006(2009)
- (8) Naoe, G., Watanabe, S.: Research on Extended Expansion General-Purpose Engine - Noise Characteristics Caused by Multiple Linkage System and Reduction of the Noise -, SAE paper, 2009-32-0042(2009)

- (9) Kono, S., Koga, H., Watanabe, S.: Research on Extended Expansion General-Purpose Engine - Efficiency Enhancement by Natural Gas Operation -, SAE paper, 2010-32-0007(2010)
- (10) Ueno, M., Eguchi, H., Enomoto, T., Ogawa, M.: Study of Power Generation Loss Decrease in Small Gas Engine Cogeneration, SAE Paper, 2008-32-0044(2008)

■ 著 者 ■



瀧田 義治



河野 昌平



高田 秀昭



吉津 邦弘



直井 専



津野 康一