

自家発電設備レクチャー

第2回 「軸出力とトルク(回転力)及び平均有効圧力」

自家発電設備に関する設計、施工及び保全の各分野のエキスパートの方々から、実務上の要点について講義頂く「自家発電設備レクチャー」の第2回。5月も装置設計における必須事項である「軸出力とトルク(回転力)及び平均有効圧力」について、前回に引き続き内発協の沼田明が講義します。

1. はじめに

内燃機関は燃料が持っている発熱量(燃焼したときに発生することで仕事に変換できる化学的エネルギー)を燃焼という過程をへて動力(軸出力)に変換する機械です。

この動力を回転力として用い、電磁誘導の原理にて誘導起電力により電気エネルギーに変換する機械が発電機です。発電機の詳細は平成29年度自家発電設備専門技術者テキスト(以下「テキスト」)2-9及び3-78に記述されています。

5月号では燃料の持つエネルギーの電気エネルギーへの変換率、軸出力とトルク(回転力)、及び平均有効圧力について解説します。

2. 燃料の持つエネルギー

燃料の一般的な発熱量(燃焼したときに発生することで仕事に変換できる化学的エネルギー)はテキスト2-78に示されています。

例えば、低位発熱量が43MJ/kgの軽油がディーゼル機関に供給され完全燃焼すると、様々な損失がゼ

ロであれば43MJの機械的な仕事(軸出力)に変換されます。

しかしながら、テキスト2-40に示すように、ディーゼル機関に供給された熱量の40%程度しか電力に変換されません。軸出力P(kW)は1kWh=3.6MJであることから得られる電力量(kWh)は次式になります。

$$43(\text{MJ}) \times 0.4 \div 3.6(\text{MJ/kWh}) = 4.5(\text{kWh})$$

すなわち、軽油1kg(約1.2L)で発電効率40%のディーゼル発電機を運転すると4.5kWhの電力を得ることができます。

以上から、ある熱効率のディーゼル発電機の必要な出力と運転時間が定まれば、必要な燃料の量が算出できます。

3. 内燃機関の回転力(トルク)

内燃機関ではシリンダ内圧力をクランク機構によってトルクに変換しています。

テキストにはトルクに関して記載がありませんが、内燃機関の性能を述べるときに重要な数値の1つです。自動車のカタログのエンジン諸元表などには必ず出てくる数値で加速性能等に係る値になります。

自家発電設備においても、始動時に回転速度を定格回転速度まで加速するとき、トルクが重要になってきます。

内燃機関では図1に示すようにシリンダ内ガス圧力によりピストンを押し下げ、これをクランク機構によりトルクに変換し、またシリンダ内ガス圧力は

時々刻々変化しますが、クランク軸の回転に伴いピストンの上下動および接続棒の揺動角度も時々刻々変化します。これに伴いトルクも変動します。

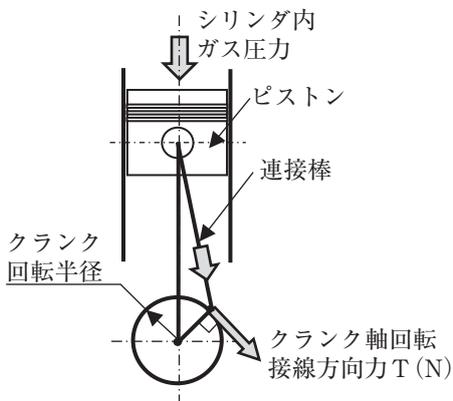


図1 シリンダ内ガス圧力により発生するクランク軸回転力

内燃機関の軸出力は動力計にて計測しますが(テキスト3-55)、一般的に使用される水動力計はトルクを計測し、この値から軸出力を求めています。

水動力計は動力計内の内燃機関の出力軸と結合された回転体と、床に固定されている本体の間に生じる水の渦流により回転力を吸収し、その制動力をロードセルで計測しています。渦電流式電気動力計の場合は渦電流により制動をかけます。

水動力計のトルク計測原理を図2に示します。

動力計の制動トルク(内燃機関出力軸のトルクに等しい)は以下の式であり動力計の腕の長さL(m)と制動力F(N)との積になります。

$$T \text{ (Nm)} = L \times F$$

計測されたトルクから内燃機関の軸出力は次のよ

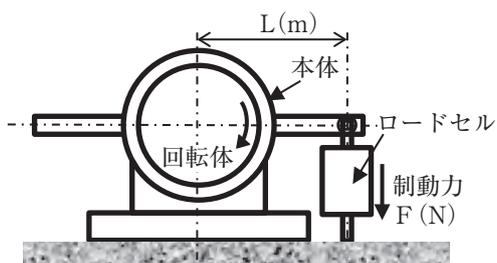


図2 動力計の原理

うに求められます。

まず図3に示すように、クランク軸出力端半径がr(m)の内燃機関がn(min⁻¹)で運転されているとき、出力軸端外周の任意の点における単位時間当たり移動距離L_D(m)は以下の式になります(1分間の値を60で除して単位時間当たりの移動距離にしています)。

$$L_D \text{ (m)} = 2\pi r \times n / 60$$

内燃機関のトルクがT(Nm)であるとき、クランク軸出力端外周の任意の点における接線方向の力はトルクを出力軸端半径で除したT/r(N)です。仕事率は単位時間当たりの力×移動距離であることから、内燃機関の軸出力Pe(kW)はこれに移動距離をかけた値なので、以下の式になります。

$$\begin{aligned} Pe \text{ (kW)} &= T / r \times (2\pi r \times n / 60) \times 10^{-3} \\ &= T \times (2\pi \times n / 60) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

また、既知の軸出力とその時の回転速度からトルクを求めるには、以下の式で求められます。

$$\begin{aligned} T &= Pe \times 1000 / (2\pi \times n / 60) \\ &= 9549.3 \times Pe / n \end{aligned}$$

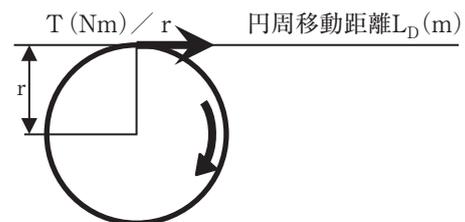


図3 クランク軸出力軸端における回転力と移動距離

4. 正味平均有効圧力

内燃機関の熱的、機械的辛さなどを表す指標として用いられるのが平均有効圧力です。テキスト3-55に「平均有効圧力とは機関のピストンにかかる

計算上の平均圧力で、出力に対応する毎サイクル当たりの仕事量を総行程容積で割った値」とであると記述されていますが、物理的な意味が理解しにくい表現になっています。

なお、平成30年度テキストからは「平均有効圧力とは、内燃機関の出力を発生させるのに必要なシリンダ内ガス圧力が、膨張行程においてピストンが上死点から下死点に至るまでの間、一定であると仮定したときの値である。」と改訂します。

4ストロークサイクル機関の吸気・圧縮・膨張・排気工程のうち、膨張行程は正の仕事、圧縮・排気行程は負の仕事になります。吸気行程は無過給機関と過給機関の低負荷域では負の仕事、過給機関の高負荷域では正の仕事です。平均有効圧力における有効仕事はすべて膨張行程で発生すると仮定し、その他の行程における仕事は全てゼロとして計算しています。

平均有効圧力を求める式は次式になります。

$$P_{me} = \frac{k \times P_e}{n \times V_{st}} = \frac{k \times P_e}{n \times \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times S \times Z} \times 10^6$$

ここで

P_{me} : 正味平均有効圧力 [MPa]

P_e : 軸出力 [kW]

n : 機関回転速度 [min^{-1}]

V_{st} : 総行程容積 [L]

k : 定数

120 (4ストロークサイクル機関)

60 (2ストロークサイクル機関)

D : シリンダ内径 [mm]

S : ストローク (行程) [mm]

Z : シリンダ数

判りやすくするため P_{me} から軸出力を求める式にして説明します。

1シリンダあたりピストンに作用する力 F (N)は以下のようにピストン面積にシリンダ内ガス圧力を乗じた値です。

$$\begin{aligned} F(N) &= P_{me}/9.8 \times \{(D/2)^2 \times \pi\} \times 9.8 \\ &= P_{me} \times (D/2)^2 \times \pi \end{aligned}$$

この式で $P_{me}/9.8$ は P_{me} の単位であるMPaを kg/mm^2 に換算しています。この値にピストン面積を乗じピストンに働く力をもとめ、 kg をNに換算するため9.8を乗じています。つまり 1mm^2 あたりの圧力にピストン面積と9.8を乗じてピストンに働く力(N)を求めています。

この力によるピストンの移動で発生する仕事量 W_1 (J)はピストンにかかる力と移動距離を乗じた値になります。ここで $\times 10^{-3}$ は移動距離(ストローク)の単位 mm を m に換算するためのものです。

$$\begin{aligned} W_1(J) &= F(N) \times S \times 10^{-3} \\ &= P_{me} \times (D/2)^2 \times \pi \times S \times 10^{-3} \end{aligned}$$

多気筒機関において全シリンダによる仕事量 W_{all} (J)は以下の式になります。

$$\begin{aligned} W_{all}(J) &= W_1 \times Z \\ &= P_{me} \times (D/2)^2 \times \pi \times S \times Z \times 10^{-3} \end{aligned}$$

1秒間当たりの仕事率を求めるためには、まず1分間当たりの仕事率を求め、全シリンダにおける仕事量に内燃機関の回転速度を乗じます。4ストロークサイクルでは2回転に1回仕事をするので2で除します。これを1秒当たりの仕事率にするため60で除し、さらに単位をkWに換算するため 10^{-3} を乗じます。

$$P_e = W_{all} \times n \times 10^{-3} / (60 \times 2)$$

$$P_e = P_{me} \times (D/2)^2 \times \pi \times S \times Z \times (n/120) \times 10^{-6}$$

この式で P_{me} を左辺に持っていけばテキストの式になります。

ここで分母の $(D/2)^2 \times \pi \times S \times Z$ が総行程容積になるので「機関のピストンにかかる計算上の平均圧力で、出力に対応する毎サイクル当たりの仕事量を総行程容積で割った値」という表現になります。