

二輪車用エンジンにおけるクランクシャフト系の動的挙動シミュレーション技術の構築

Development of Simulation Technology for Dynamic Behavior of Crankshaft System
in Motorcycle Engine

新 納 忠*
Tadashi NIINO

岩 本 達 也*
Tatsuya IWAMOTO

植 田 真 悟*
Shingo UEDA

要 旨

エンジンの耐久性・商品性の向上及び開発の期間短縮を目的としたツールの一つとして、クランクシャフト系の机上予測技術を構築した。

クランクシャフトとエンジンケースを有限要素法によりモデル化したものと、軸受けの油膜反力計算とを連成させた時刻領域での数値積分を行うことにより、二輪車特有の高回転域までの運転時のクランクシャフトの挙動や応力を精度よく求めることを可能とした。

ABSTRACT

In order to improve durability and marketability of an engine and reduce the development period, a computer simulation technology of crankshaft system was developed.

A crankshaft and an engine case are modeled by using Finite Element Analysis. The models and a calculation model of a hydro-dynamic reaction force of bearings are coupled and behaviors of the crankshaft are calculated by using numerical integration within the time domain.

Therefore, this simulation technology enabled to predict accurately the motion behavior of crankshaft until the high operating speed that is unique for motorcycle engines.

1. はじめに

二輪車は、より軽量・コンパクトで高性能なエンジンの開発が必要とされており、さらに開発期間の大幅な短縮化が要求されている。中でも、エンジンの基幹部品であるクランクシャフト、コネクティングロッド、ピストンなどは、そのエンジンの耐久性や出力特性・NV(Noise, Vibration)に大きく影響するために、開発初期段階における仕様の熟成が不可欠である⁽¹⁾。

クランクシャフトは、エンジンケース軸受けに保持された状態でコネクティングロッド(以下コンロッドという)を介しピストンからの爆発・慣性力を毎サイクル受ける。

この荷重は一般に 10^4N 程度と大きく、またサイクルごとにより周期的に加わるため、特に高回転領域では共振現象を誘発しクランクシャフトに過大な曲げ荷重やねじりモーメントを発生させる。そのような厳しい条件下で、軽量でコン

パクトなエンジンを成立させるためには、ピストン、コネクティングロッド、ACGロータなどを含むクランクシャフト系の挙動を把握した上で各部品的设计が必要となる。

このような背景により、筆者らは、ファイアリング運転状態でのクランクシャフトに生ずる応力を精度良く求めるためのシミュレーション手法を開発した。

2. 高速運転時の応力

今回用いたV型2気筒4ストロークエンジンの構造図をFig.1に示す。図に示すように本エンジンは一つのピンジャーナルに二つのコンロッドを有し、シリンダは90度の位相角を持っている。

ファイアリング運転状態でクランクシャフトのピンジャーナルフィレット部に生ずる応力をひずみゲージを用いて測定した。

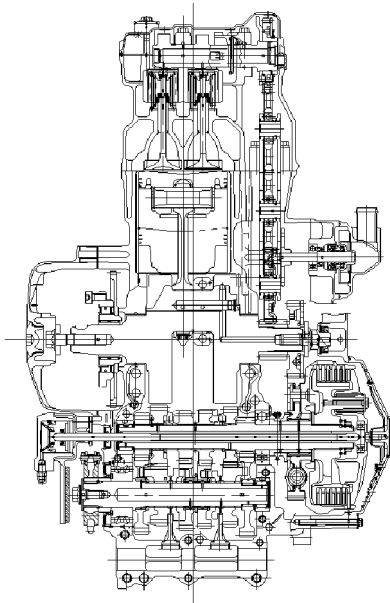


Fig.1 Structure of engine

Fig.2 にその測定箇所を示す。

得られた応力値より各回転数ごとに応力振幅を抽出したものを Fig.3 に示す。

この結果から、以下のことが言える。

- (1) 低速回転域に比べて、高速回転域では、顕著に応力振幅が増大している。
- (2) 特定の回転数において、応力振幅は極大値を持っている。

一方、当部に応力振幅を発生させる原因としては、次の

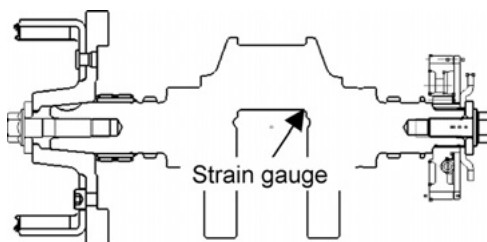


Fig.2 Measuring point of stress

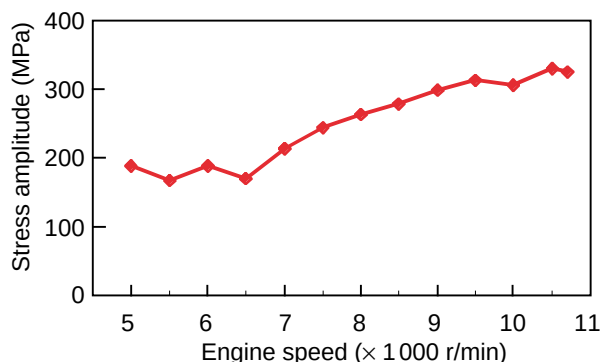


Fig.3 Stress amplitude

二つが考えられる。

- (1) サイクルごとにクランクシャフトに加わる往復運動部の慣性力がある。
- (2) サイクルごとにピストン及びコンロッドを介してクランクシャフトに加わる筒内圧力による荷重がある。

3. 静的応力解析

高速回転域の応力振幅の増大と特定回転数における応力振幅の極大値の原因を分析するために、有限要素法を用いて静的条件下での応力計算を行った。

Fig.4に静的計算で用いた有限要素モデルと、境界条件を示す。

回転数としては、低速時として 5 000r/min, 高速時として 10 800r/min を選んだ。

Fig.5 に静的計算結果と実測結果の比較を示す。

低速時は計算結果と実測結果がほぼ一致しているが、高速時は計算結果に対し実測結果が52%大きくなる。このことは、高速回転域においてクランクシャフトに動的な挙動が生じた結果、当部の応力振幅が高速回転域で増大したものだと思われる。

また、高速回転域で使用するクランクシャフトの強度設計において、このような静的な計算手法では、十分な精度が得られないことが分かる。

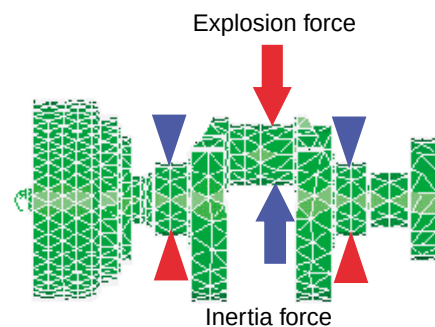


Fig.4 Static FEM model and boundary condition

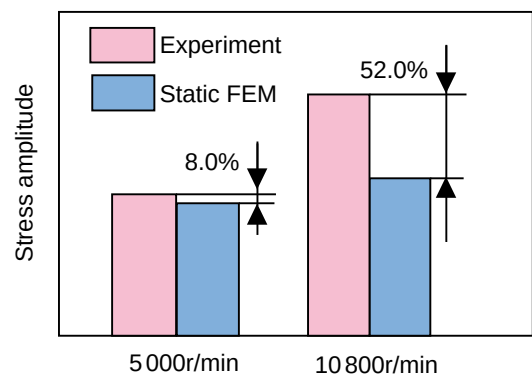


Fig.5 Comparison between measurement and static FEM

4. 動的計算手法

動的な挙動をシミュレートする方法として、一般に広く用いられる時間領域での数値積分法を用いた。Fig.6に本計算手法の全体の手順を示す。

また、本計算手法は以下に示す4つの部分から構成される。

- (1)有限要素データの作成部
- (2)挙動計算部
- (3)油膜圧力計算部
- (4)応力計算部

4.1. 有限要素データの作成部

有限要素データの作成は、利便性を考え3Dソリッドモデルを用いて市販ソフトの自動要素作成機能により行う。得られた有限要素データは膨大な自由度を持つため、モーダルリダクション法によって、解析上不要な自由度を取除き、有限要素データ全体の自由度を削減する。

4.2. 挙動計算部

挙動計算モデルの模式図と、実際のモデル例を Fig.7 に示す。本モデルは、構造要素と構造要素間を結ぶ荷重要素から構成されてる。

構成要素としては以下をモデル化した。

- ・クランクシャフト — 有限要素モデル
- ・エンジンケース — 有限要素モデル
- ・ピストン — 剛体モデル
- ・ピストンピン — 剛体モデル
- ・コンロッド — 剛体モデル

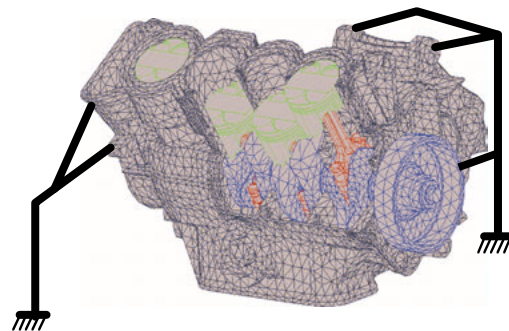
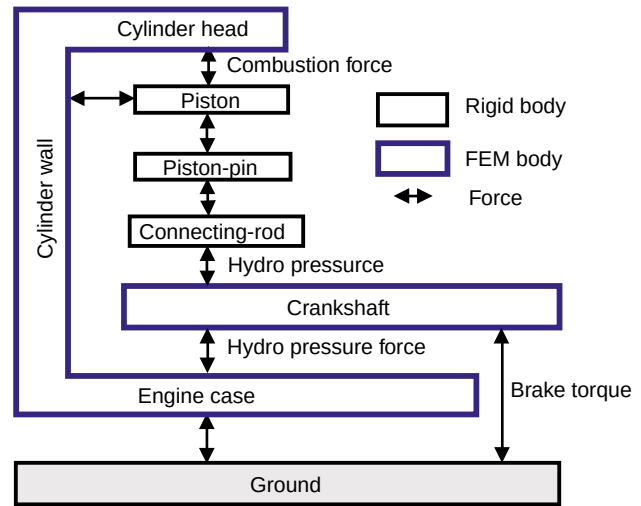


Fig.7 Simulation model

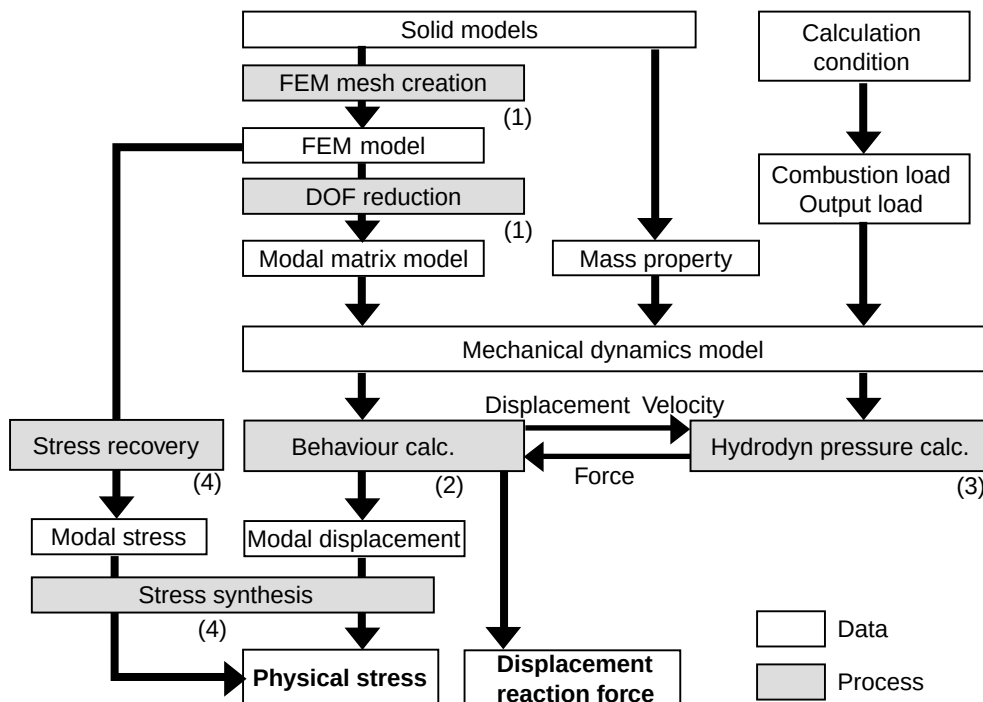


Fig.6 Analysis flow

荷重要素は、以下に示すように大きく3つに分けて定義される。

- ・構成要素間の連結部には、相対変位などに対し非線型な荷重を定義する。これにより連結部の接触を表現する。
- ・筒内圧力による荷重は、各々のピストンとエンジンケースのヘッド部に与える。ここでは実測より得られた筒内圧力を、クランク回転変位角度の関数として数式化したものを用いる。
- ・クランクシャフト上にある出力取り出しギヤに対し、回転の逆方向にトルクを与える。この大きさを調整することで計算におけるエンジンの運転回転数が決定される。

4.3. 油膜圧力計算部

各々のクランクジャーナルとエンジンケースベアリング間と、クランクピンとコンロッド大端ベアリング間には、流体潤滑理論に基づき、オイルのくさび膜作用による圧力分布、絞り膜作用による圧力分布から求めた荷重を与えた。特に、この部分はクランクシャフトの変形挙動やジャーナルの軸心挙動に直接影響を与えるため精密なモデル化が必要である⁽²⁾。

4.4. 応力計算部

挙動計算から求めた各時刻におけるモードごとの変位と、クランクシャフトの各モード単位の応力より、各時刻における応力を求める。時刻 t における i 番目のモードの変位を a_{it} とし i 番目のモードの応力を σ_i と置くと、ある時刻 t の応力 σ_t は次の式で定義される。

$$\sigma_t = \sum a_{it} \cdot \sigma_i$$

本手法は、処理中に静的な置換がないため、解の高い精度が得られることと、数多くの時刻ごとの応力を求める場合には、計算時間やデータ量を削減できる利点を持っている。

5. 計算結果と実測結果の比較

計算結果の検証として、前述のV型2気筒エンジンを用い、Fig.2 に示すクランクピンフィレット部の応力を比較した。

5.1. 運転条件

運転条件はファイアリング全負荷として、回転数は5 000r/min から 11 000r/min の間で行った。

5.2. 低速域における1サイクル中の応力

エンジン回転数5 000r/min時のクランクピンフィレット部の応力の比較結果を Fig.8 に示す。

この運転状態におけるクランクピンフィレット部の応力

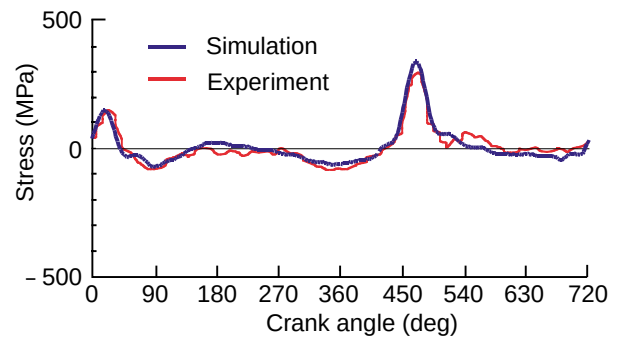


Fig.8 Comparison between simulation and experiment for stress at 5 000r/min

は、クランク角0度と450度の直後に大きく発生していることから筒内圧力による荷重に大きく支配されていることが分かる。

5.3. 高速域における1サイクル中の応力

エンジン回転数10 800r/min時のクランクピンフィレット部の応力比較の結果を Fig.9 に示す。

低速域と比較すると、明らかに応力波形に振動が発生していることが分かる。また、その振動により低速回転域に比べ、応力の絶対値が顕著に増加していることが分かる。

5.4. 相関性の比較

Fig.8 及び Fig.9 に示した1サイクル中のクランクピンフィレット部の応力波形から、計算結果と実測結果は、極めて良く一致しているといえる。また計算結果と実測結果について、エンジン回転数に対するクランクピンフィレット部の応力振幅を Fig.10 に示す。

各回転域において、クランクピンフィレット部の応力の計算結果は実測結果とほぼ一致しているといえる。

以上のことから、本手法はクランクシャフト系の挙動を精度よく数値モデル化していることが確認された。またこれまで難しいとされてきた二輪車エンジンの特徴である高速回転域においても本手法の有効性が確認された⁽³⁾。

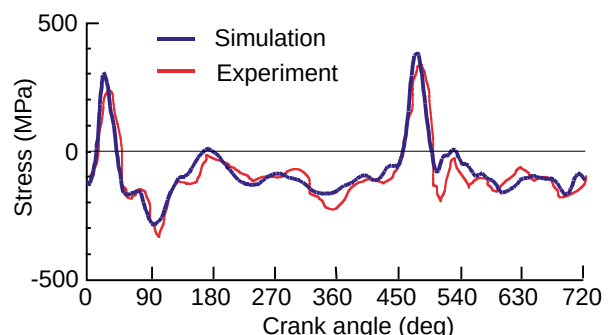


Fig.9 Comparison between simulation and experiment for stress at 10 800r/min

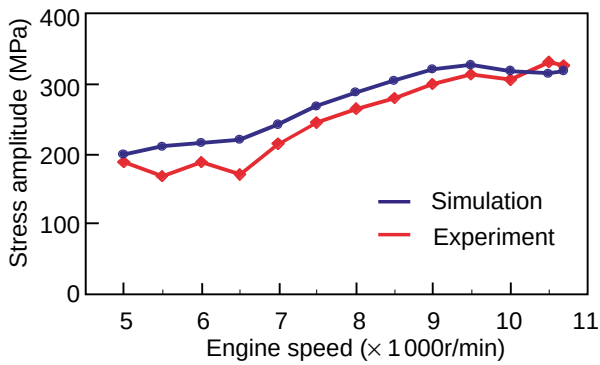


Fig.10 Comparison between simulation and experiment for stress amplitude

6. まとめ

- (1) クランクシャフトとエンジンケースを有限要素法によりモデル化したものと、軸受けの油膜反力計算とを連成させた時刻領域での数値積分法による数値解析手法を構築した。
- (2) 二輪車用エンジンに適用したところ、高速運転域でもクランクシャフトに生ずる応力を忠実にシミュレートすることから、設計諸元検討段階で充分活用できるツールであることが分かった。

謝 辞

本研究にあたりご協力を頂いたトランス・コスモス殿、iSiD 殿へ深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 岩本達也ほか：ファイアリング運転時のコネクティングロッド強度計算手法の開発，自動車技術会，学術講演会前刷集，No.221 (1998)
- (2) 染谷常雄：内燃機関の潤滑，東京，幸書房，p.1-51 (1986)
- (3) 高橋伸一ほか：実動時クランクシャフト応力予測手法の開発，自動車技術会，学術講演会前刷集，No.49 (1997)

■著 者■



新納 忠



岩本達也



植田真悟