ひずみゲージを用いたエンジンガスシール部の面圧計測手法の検証

Verification of Area Pressure Measurement Method of Engine Gas Seal Using Strain Gauge

熊谷 拓也[*1] Takuya Kumagai
服部 靖宏[*2] Yasuhiro Hattori
加藤 保雄[*3] Yasuo Kato

エンジンの高出力化に伴い，筒内最高圧力やシリンダ周りの温度変化が増加し，運転中にシリンダヘッドガスシール部の面圧が低下するリスクが上がっており，市場での使われ方を考慮したガス漏れの評価が必要になってきている。実稼働におけるガスシール性評価を行うためには，運転中の経時的な変化など連続的なガスシール部の面圧計測が必要であるが，計測の難易度が高く，長時間の実稼働試験以外に評価ができない状況にある。そこで，シール面近傍の被締付物のひずみ計測値からシール面圧を推測する手法を立案し，実機エンジンのシリンダヘッドのガスシール部に適用した。検証の結果，本手法は有用な計測手法になり得る目途を得た。

1. はじめに

新機種開発において新規設計となったシリンダヘッドのガスシール部で，開発時のベンチ評価はクリアしたが，市場でガス漏れが発生する事例があった。この現象解明のためには，エンジン稼働中の面圧変化の把握が必要だったが，エンジン稼働中に高温高圧となるガスシール部の面圧を計測する手法がなく，また，解析ではガスシール部の局所的な面圧変化や微小な相対変位を精度良く模擬することが困難であったため，長時間の耐久試験以外に対策検証ができなかった。そこで，三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社は，シール部近傍のひずみ計測値からシール面圧を推測する手法を立案し，トラブルが発生したエンジンのガスシール部を対象として，運転中の動的面圧計測に取り組んだ。本報では，要素試験及び実機試験による計測手法の妥当性の検証結果，運転中の面圧計測結果を報告する。

2. 計測手法

2.1 ひずみ計測位置

図 1 に計測対象であるシリンダヘッドガスシール部の模式図を示す。クランクケースとシリンダヘッドの間にシリンダヘッドガスケットを挟み，ガスケット外周に配置したシリンダヘッドボルトで締結することでシール部に面圧を発生させ，シリンダ内の高温高圧の燃焼ガスをシールする構造となっている。シール面圧の計測手法としては，シール部に感圧紙を挟み計測する手法があるが，燃焼ガスのシールができないため，感圧紙計測は静的締付時に限定され，運転中の動的面圧は計測できない。また，近年，フィルム型や光ファイバ型の圧力センサが市販されているが，高額かつ使用可能な温度が低いため，高温のガスシール部の計測に用いることが難しい。そこで，計測

*1 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 エンジン･エナジー事業部 エンジン技術部 主席技師
*2 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 エンジン･エナジー事業部 エンジン技術部
*3 三菱重工エンジン＆ターボチャージャ株式会社 エンジン･エナジー事業部 エンジン技術部 主席チーム統括

部位の温度域で使用可能なひずみゲージを用いた面圧計測手法を立案した。以下に計測手法の概要を示す。

シール面圧によりシール面付近の被締付物にはひずみが生じている。そのひずみを計測し，シール面圧を推定する。ひずみの計測は，ボルト軸力方向（ひずみゲージ①）と，後述する計測部の曲げ変形による影響を補正するため水平方向（ひずみゲージ②）の 2 方向を計測する。ひずみ計測位置はシール面に極力近い位置が望ましいため，シール部に接する位置に荷重方向の穴を追加工し，穴内面のシール面側にひずみゲージ①を貼り付けた。また，計測穴径はひずみゲージの貼付けが可能な最小径とし，穴追加によるシール面圧への影響を抑えた。ひずみゲージのサイズは極力小さい方が望ましいが，小さくなるにつれて貼付け作業の難易度が上がるため，穴内面への貼付け作業が行えるゲージ長 1mm の箔ゲージを用いた。次節で示すとおり，圧縮ひずみはシール面から深くなるにつれて小さくなるため，極力上面に近い位置を計測した。

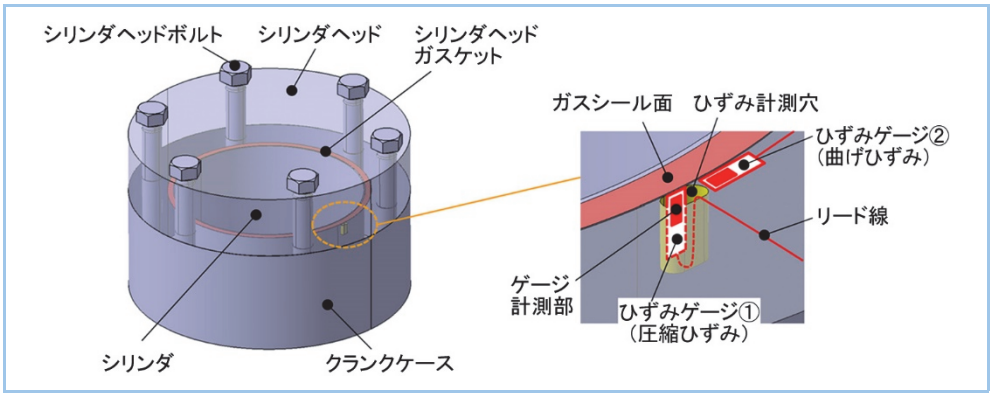

図1 シリンダヘッドガスシール部模式図

2.2 ひずみ計測値からの面圧算出方法

(1) 深さ方向のひずみ減少率を用いた換算

シール面圧による圧縮ひずみは，深くなるに従い垂直方向から 3 軸方向に分散される。その結果，垂直方向の圧縮ひずみは深さ方向に減少していくため，深さ方向のひずみ減少率を考慮し，計測位置のひずみ量（ひずみゲージ①の計測値）からシール面でのひずみ量を推定する。ひずみ減少率は，シール面のノミナル面圧と穴内面の上下方向の圧縮応力の比と定義し，FEM により算出する。ひずみ減少率の計算例として，図 2 に“4.1 曲げ変形の影響の検証”で用いたカバーのひずみ減少率を示す。ひずみ減少率 η を用いてひずみ計測値からシール面のひずみを換算する（式(1)参照）。ひずみ減少率は計測穴周囲の形状やシール幅等によって変わるため，計測部位毎に FEM で求める。（本報ではノミナル面圧を“ボルト軸力合計/シール面積”と定義する）

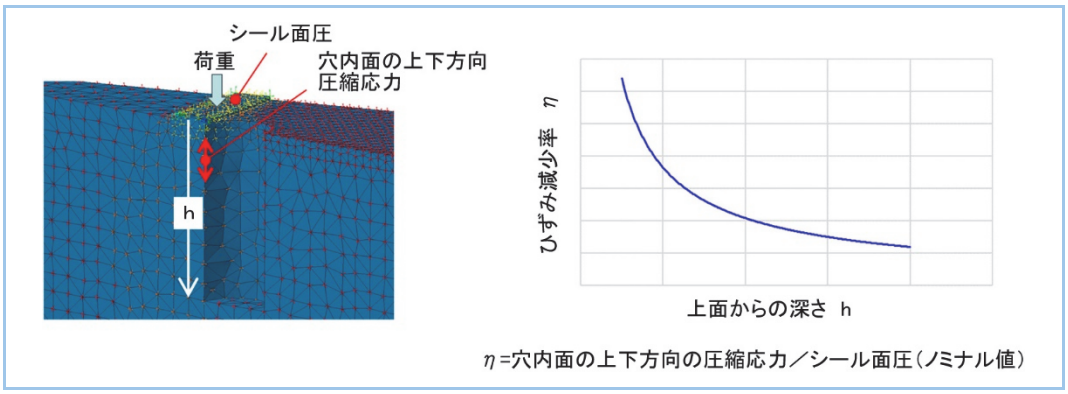

図2 ひずみ減少率計算例

(2) ひずみ計測部の曲げ変形による影響補正

シリンダヘッドガスケットのようにシール部の周りにボルトを配置し，ボルト軸力により面圧を維持する構造の場合，ボルト近傍の面圧は高く，ボルトの間の面圧は低くなり，ボルト間がシール性の評価部位になることが多い。また，このような構造の場合，図 3 に示すように被締付物（クランクケース）には曲げ変形が発生する。ボルト間の被締付物にはボルト軸力による圧縮ひずみが生じているが，同時にこの曲げ変形によって曲げひずみも生じている。そのため，ひずみゲージ①には，圧縮ひずみの他に，曲げ変形によるひずみ（曲げひずみのポアソン比分のひずみ）が付加されて計測される。ひずみゲージ②を用いて曲げひずみを計測し，シール面圧算出に用いるひずみは，圧縮ひずみから曲げひずみのポアソン比分を減じた値を用いる。

本報では以下の式により算出したシール面圧（P_seal）を“ひずみ面圧”と称する。

$$P_seal = E \times \varepsilon_seal$$

$$\varepsilon_seal = \varepsilon_comp' - \varepsilon_bend \times \nu \quad = \quad \varepsilon_comp / \eta - \varepsilon_bend \times \nu \quad \cdots \quad 式(1)$$

P ： シール面圧（ひずみ面圧），E ： 被締付物のヤング率，ν ： 被締付物のポアソン比

ε_seal ： シール面圧推定に用いるひずみ

ε_comp ： 圧縮ひずみ計測値（ひずみゲージ①で計測）

ε_comp' ： シール面における圧縮ひずみ

ε_bend ： 曲げ変形によるひずみ（ひずみゲージ②で計測）

η ： ひずみ減少率

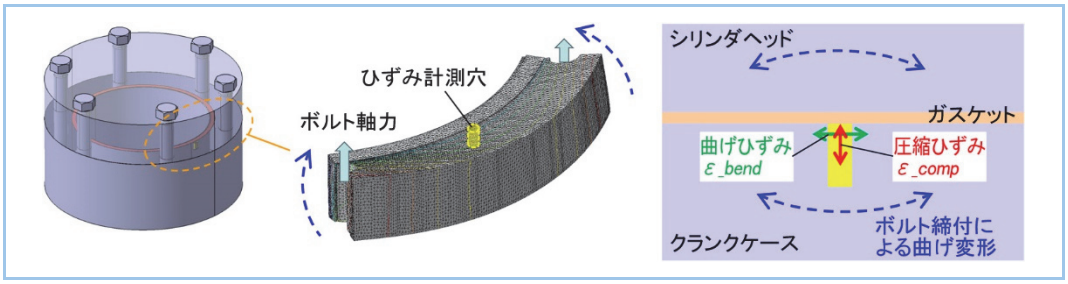

図3 ひずみ計測部の曲げ変形模式図

3. 検証手順

本計測手法を以下の手順で検証した。

(1), (2)で計測手法の妥当性を検証，(3)で運転中の動的計測への適用検証を行った。

(1) 簡易治具を用いた検証

(2) 実機エンジンを用いた静的検証

①ボルト締付時 ／ ②筒内圧模擬油圧付加 ／ ③温度ドリフト量計測

(3) 運転時の動的検証

①筒内圧増加時 ／ ②冷熱サイクル運転時

4. 簡易治具を用いた検証

4.1 曲げ変形の影響の検証

曲げ変形による圧縮ひずみへの影響を検証するため，図 4 に示すカバーを用いてひずみ計測を行った。カバーのボルト間中央に計測用の穴を追加工し，ひずみゲージ①を貼り付け，ひずみゲージ②をカバー上面側に貼り付けた（カバー上面と下面には正負逆の同等のひずみが生じていると仮定）。曲げ変形によりカバー上面側には引張，カバー下面側には圧縮ひずみが生じており，その圧縮ひずみのポアソン比分が，引張ひずみとしてひずみゲージ①に加わっている。そ

の分，ひずみゲージ①の圧縮ひずみが小さく計測されているが，ひずみゲージ②の曲げひずみを考慮することで，感圧紙面圧と同等の値となることを確認した。

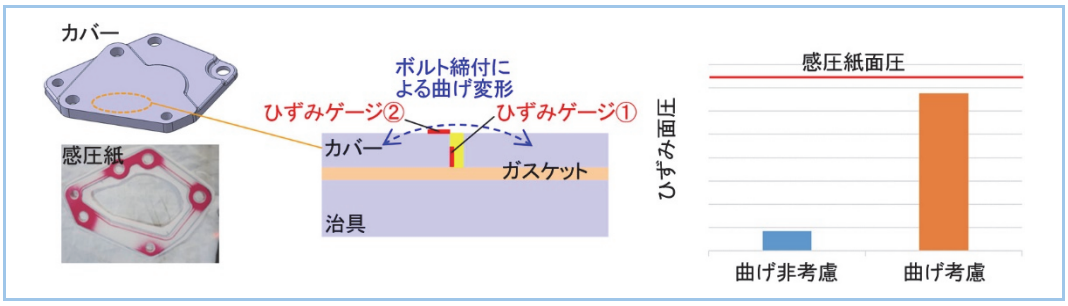

図4　曲げ変形の影響の検証

4.2　ひずみ計測位置とシール面との隙間の影響

ひずみはシール面に近い位置で計測することが望ましいが，ガスケットと被締付物のずれによって，シール面とひずみ計測位置に隙間が生じることが考えられる。シール面とひずみ計測位置との隙間の影響把握のため，図 5 に示す治具を用い，ガスケットの配置を変えることでシール面とひずみ計測位置との隙間を調整し，検証を行った。荷重はボルト締付ではなく，油圧プレスで与え，曲げ変形は生じない条件で計測を行った。隙間がない場合は，ほぼノミナル面圧となるが，隙間が増加するに従い，ひずみ面圧は大きく低下する傾向を示した。この結果より，ひずみ計測穴はシール面に接する位置にあけ，計測時にガスケットがずれないようにガスケット位置の固定や調整ができるようにすることが重要となる。

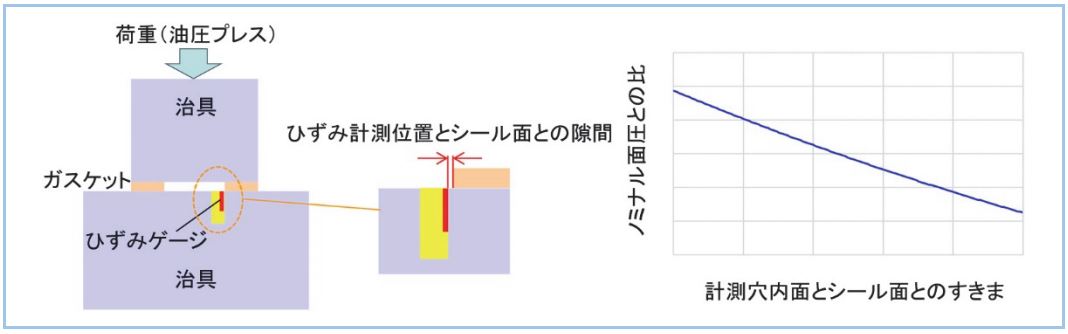

図5　ひずみ計測位置とシール面との隙間の影響

5. 実機エンジンを用いた静的検証

5.1　ボルト締付時の静的面圧の計測

次に実機シリンダヘッドのガスケットシール部で検証を行った。図 6 に示すようにクランクケース上面のガスシール部外周に 30° 間隔でひずみゲージ計測用穴をあけ，ひずみゲージ①，②を貼り付け，シリンダヘッドボルト締付時のひずみ面圧と感圧紙面圧との比較を行った。ひずみゲージ②は貼付け後にガスケットと干渉しないよう，貼付け面を掘り込み貼付けを行った。図 6 にひずみ面圧と感圧紙面圧との比較を示す。感圧紙面圧は，ボルト位置は超高圧紙の結果（高圧紙の計測範囲を超えたため），それ以外は高圧紙の結果を示す。周方向のひずみ面圧分布は感圧紙面圧と概ね一致する傾向が得られた。

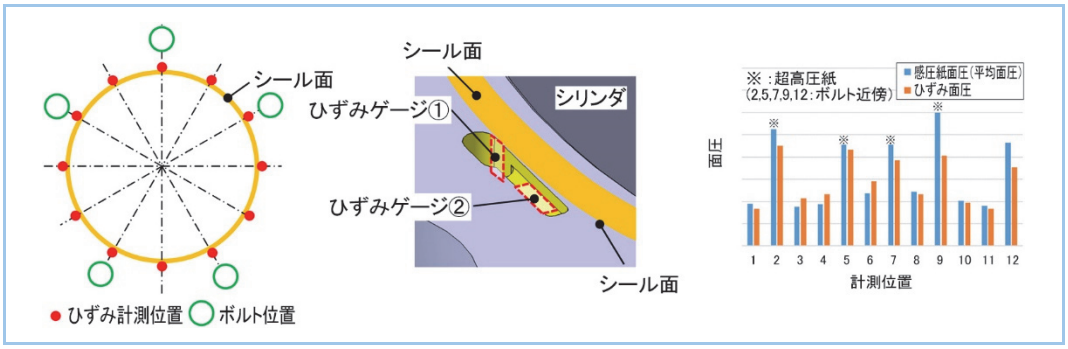

図6 ボルト締付時の静的面圧の計測

5.2 筒内圧模擬油圧負荷時の静的面圧の計測

エンジン運転時の動的な面圧計測の事前検証として，燃焼室内を密閉し，筒内圧相当の油圧を静的に負荷し，ひずみ計測を行った。油圧増加に伴ってひずみ面圧は低下する傾向が得られた。シリンダヘッドボルト締付時の面圧をゼロとし，油圧負荷時のひずみ面圧の低下量を図 7 に示す。各油圧におけるひずみ面圧低下量を確認した。

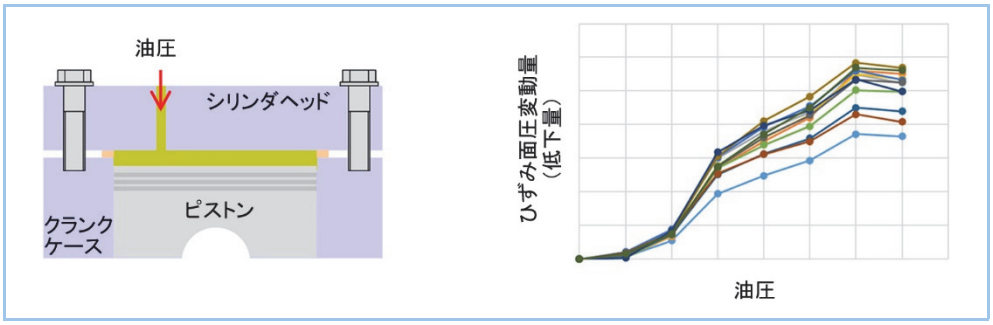

図7 筒内圧模擬圧負荷時の静的面圧の計測

5.3 ひずみゲージの温度ドリフト量の計測

エンジン運転時の温度上昇による，ひずみ計測値の温度ドリフト量の事前検証として，ひずみ計測部の周囲をヒータで加熱し，計測を行った。シリンダヘッドボルト締付後（ガスケットの馴染みのため一晩放置），室温からヒータで加熱可能な 80℃までの温度ドリフト量を計測した。ひずみゲージの温度ドリフトはあるが，十分にキュアリングを行い，また，ゲージの剥離が発生しなければ，安定した温度ドリフト曲線が得られることを確認した。但し，計測箇所の中には計測・終了時の面圧低下が大きい箇所がみられ，ひずみゲージのキュアリング不足によるドリフト，ガスケットの馴染み等によって，計測値が安定するまでにある程度の冷熱運転，放置時間を要することが分かった。

6. 運転時の動的検証

6.1 筒内圧増加時の面圧計測

次に実機エンジン運転時の計測を行った。エンジン回転数一定で，エンジン出力を増加（筒内圧増加）させた条件で計測を行った。図 8 にひずみ計測気筒のクランク角度に対する筒内圧とひずみ面圧を示す。ひずみ面圧は計測点 12 か所のうち代表点 1 か所を示す。燃焼による筒内圧上昇時にひずみ面圧は低下すること，最高筒内圧が増加するに従いひずみ面圧変動量（低下量）は増加する挙動がみられた。運転時と図 7 で示した油圧負荷時のひずみ面圧変動量の比較を示す。両者は概ね同じ傾向を示していることから，運転時の動的面圧が計測できていることが確認できた。

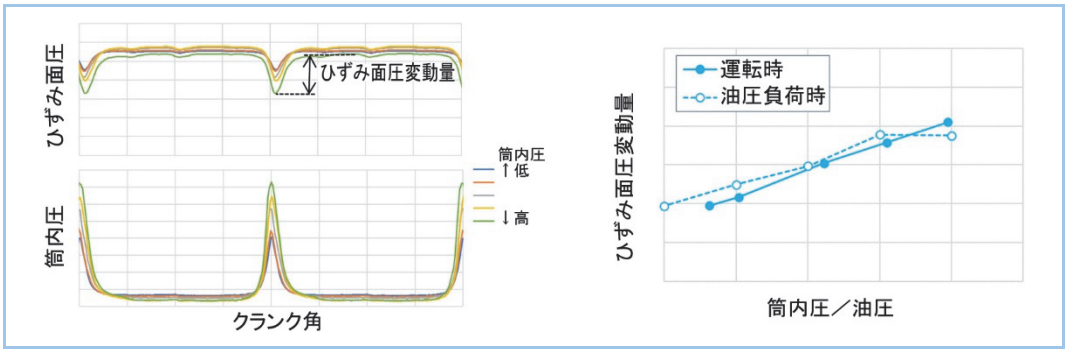

図8 筒内圧増加時の面圧計測

6.2 冷熱サイクル運転時の面圧計測

実稼働において，ガスシール性が厳しくなる急激な温度変化を伴う冷熱サイクル運転パターンで計測を行った。尚，計測開始前にキュアリングとして，冷熱サイクル運転を繰り返し行い，また，ゲージ近傍温度を計測し，5.3 節で取得した温度ドリフト曲線を用いて，ゲージ計測値の温度補正を行った。上記手法により，温度変化時であってもひずみ計測はできていると考える。図 9 に運転パターン，ひずみ面圧変動量，及びひずみ計測部の温度を示す。隣接する計測点で，ひずみ面圧挙動が大きく異なる部位があることが分かった。両計測点の間は過渡的に面圧勾配や温度差が大きくなっているため，入念なシール性検証を要する。

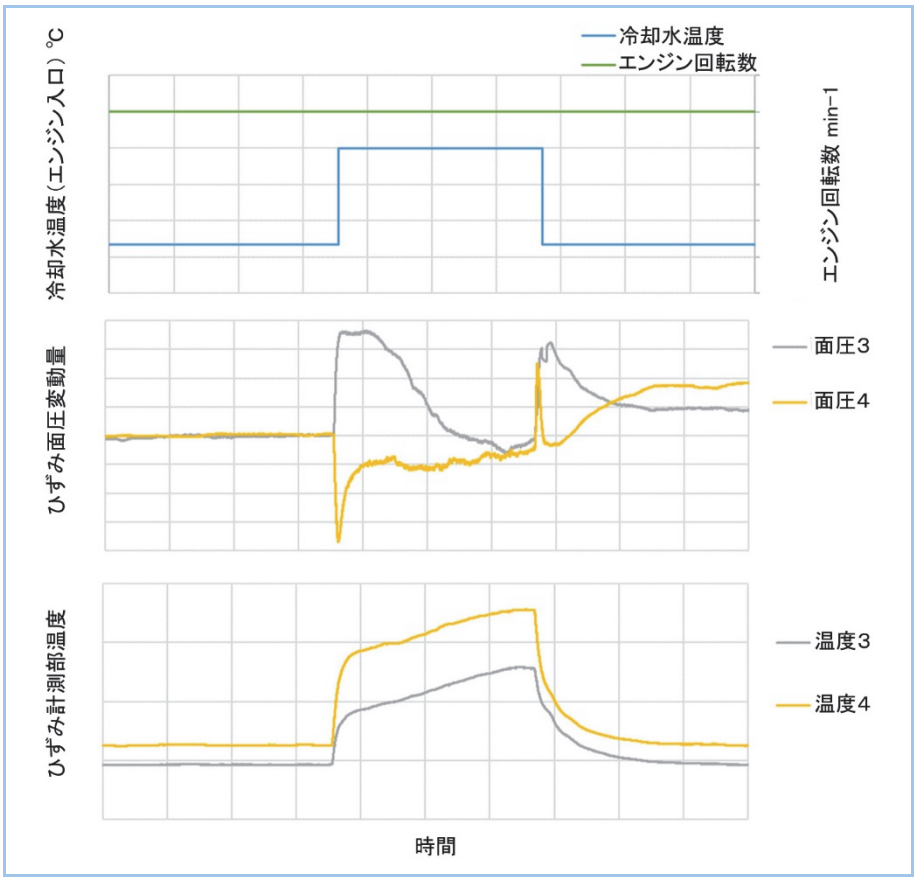

図9 冷熱サイクル運転時の面圧計測

7. まとめ

- エンジン運転中の動的面圧計測を目指し，ひずみゲージを用いた面圧計測手法を立案，計測手法の妥当性を検証した。実機試験で動的面圧が計測できていることを確認し，本手法は有用な計測手法になり得る目途を得た。
- 冷熱サイクル運転時に過渡的に面圧勾配が大きくなる部位があり，一定負荷の定常運転では

顕在化しないシール性懸念部位を明らかにすることができた。

・ 検証過程において，ひずみゲージの剥離，キュアリング不足による計測不良，温度ドリフト量のばらつきが発生した。その他，ひずみゲージの貼付け位置やガスケット位置精度などの課題もあり，今後，計測手法として作り込むための改善を行っていく。

参考文献

(1) 公開特許公報 特開平 10-68662 出願人 三菱重工業株式会社
シリンダヘッドガスケットのガスシール部面圧計測方法