

熱影響下でのフランジ漏洩のシミュレーション・ビジュアル化処理
**Visualization for Simulation of Leakage Behavior
 in High Temperature Bolted Flanged Connections**

千代田アドバンスト・ソリューションズ(株) ○安藤 文雄
 (財) 石油産業活性化センター 井土 泰二
 千代田工商(株) 荻沼 恒雄

1. 緒言(Introduction)

高温流体で使用するフランジ継手では、フランジ、ボルト、ガスケット等の構成部品の熱膨張差や熱影響により昇温あるいは降温時に漏洩トラブルを生じていることが多くの製油所で経験されている。⁽¹⁾ 一方、漏洩トラブルの発生メカニズムの解明が不十分なため、現在採用している工事管理手法が熱影響によるフランジ継手の挙動に対し理にかなったものであり、かつ効果的なものであるか評価することは困難との認識がある。

そこで、石油産業活性化センターでは、平成 17 年度から開始された石油産業安全基盤整備事業の一部において、現在の最新手法を用いた熱流動解析及び弾塑性解析を行うことで熱影響の及ぼすフランジ継手の挙動を定量的に把握することに努めてきた。風の影響等より実際の環境に近い条件を考慮できる熱流動解析、および構造解析（弾塑性解析）を併用することで、これまで解明されていなかったボルト軸力等の挙動を定性的に、かつ定量的に明らかとする試みを行った。

ここでは、これらの解析で得られた熱影響の及ぼすフランジ継手のフランジとボルトの温度変動、ボルト締付力やガスケット面圧の挙動から漏洩の可能性を評価し、ビジュアル化により現象の理解を助けるポスト処理事例について発表する。

2. 解析の対象としたフランジ継手(Flange Assembly)

解析は、過去の事事故事例を参考に石油精製事業所等において使用される配管の内、熱影響の度合いが大きい重油直接脱硫装置、あるいはその他の脱硫装置等に使用されている JPI-7S-15⁽²⁾ に示されるクラス 2500-RJ の高温高圧用配管フランジ継手の締結管理を対象とした。また、図 1 に示すようにスペーサー付きとしている。

フランジ継手の熱影響は、フランジ、ボルト、ガスケット等の構成部品の材質により熱膨張差が一つの要素となっていることから、表 1 に示す下記 3 つの材質構成にて解析を行った。

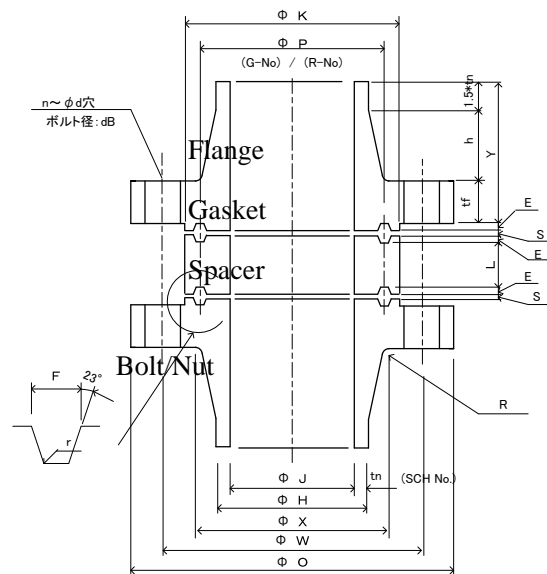


図 1 フランジ形状
Flange Assembly

表 1 フランジ継手材質の組合せ

| | | |
|---|---------------------|--|
| 継手の材質構成 ケース-1 Combination of Flange Assembly Case 1 | サイズ(Size) | 18 ^B (設計)/12 ^B /6 ^B |
| | レイティング(PT Rating) | JPI 2500 |
| | フランジ材質-1(Flange-1) | 2.25Cr-1Mo、溝部 TP347 肉盛(物性は TP321) |
| | ガスケット材質-1(Gasket-1) | TP304L-RJ |
| | スペーサー材質(Spacer) | TP321 |
| | ガスケット材質-2(Gasket-2) | TP304L-RJ |
| | フランジ材質-2(Flange-2) | TP321 |
| | ボルト材質(Bolt) | SNB16 |
| 継手の材質構成 ケース-2 Combination of Flange Assembly Case 2 | サイズ(Size) | 18 ^B (設計)/12 ^B /6 ^B |
| | レイティング(PT Rating) | JPI 2500 |
| | フランジ材質-1(Flange-1) | TP321 |
| | ガスケット材質-1(Gasket-1) | TP304L-RJ |
| | スペーサー材質(Spacer) | TP321 |
| | ガスケット材質-2(Gasket-2) | TP304L-RJ |
| | フランジ材質-2(Flange-2) | TP321 |
| | ボルト材質(Bolt) | SNB16 |
| 継手の材質構成 ケース-3 Combination of Flange Assembly Case 3 | サイズ(Size) | 18 ^B (設計)/12 ^B /6 ^B |
| | レイティング(PT Rating) | JPI 2500 |
| | フランジ材質-1(Flange-1) | 2.25Cr-1Mo |
| | ガスケット材質-1(Gasket-1) | 5Cr-RJ |
| | スペーサー材質(Spacer) | 2.25Cr-1Mo |
| | ガスケット材質-2(Gasket-2) | 5Cr-RJ |
| | フランジ材質-2(Flange-2) | 2.25Cr-1Mo |
| | ボルト材質(Bolt) | SNB16 |

3. 圧力・温度想定運転モード模式図(Pressure-Temperature Profile in Analysis)

アンケート調査により、実際の温度・圧力変動線図（トレンド）を収集し、これを基にスタートアップ時とシャット・ダウン時の温度圧力条件の特徴を逸脱することのない解析に用いる想定運転モード（図 2）を決定した。通常運転圧力として 18.5MPa、通常運転温度として 420℃を採用した。通常運転温度に達するまでに、多くは温度保持状態が 1~3 回程度あるが、その時間は 24 時間程度で時間依存の影響は小さいと考えられる。したがって、温度保持状態は無視した。温度勾配は、おおむね温度上昇初期と後期に勾配量を分けているが、製油所間に有意な傾向は見られない。そこで、通常運転温度まで 1 つの温度勾配（直線）とした。

スタートアップ時には温度が通常運転温度に到達する前に圧力が先に通常運転圧力に達する傾向が確認されたので、これを反映した。また、通常のシャット・ダウン時には温度が常温に到達すると同時に圧力が大気圧になるとした。その結果、温度が降下し始めても圧力が保持され若干遅れて降下していく傾向となった。温度降下がいきなり常温 20℃まで達することはないが、100℃前後までの降下はある。解析では 20℃まで行うこととした。

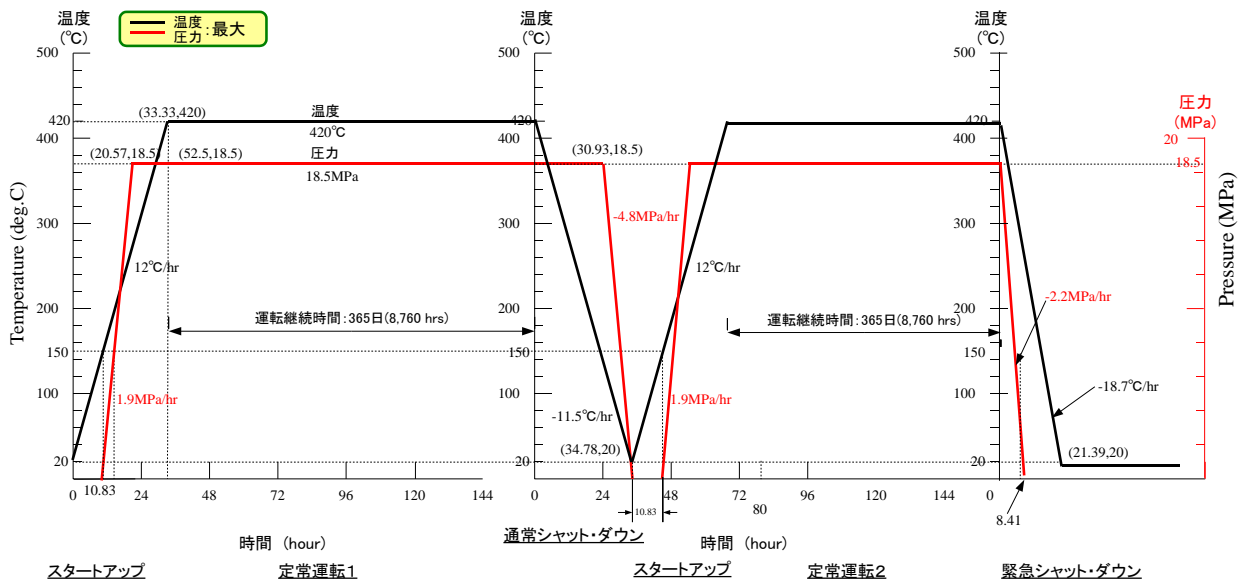


図 2 圧力・温度想定運転モード模式図

Operation Mode in Pressure Temperature Profile for Analysis

4. 解析手法(Analysis)

4.1 熱伝導解析 (熱流動解析: Air Fluid Flow/Wind Analysis, CFD Analysis)

有限体積法による汎用数値流体解析プログラム『FLUENT ver.6.1.22』(米国 FLUENT Inc.製)を使用した。解析対象領域の形状、及びメッシュは流動解析ソフトウェア『FLUENT』(米国 FLUENT Inc.製)用プリプロセッサ『Gambit ver.2.01』(同社製)を用いて作成した。フランジ、ウェザー・シール表面と空気との間の伝熱は、対流熱伝達と輻射伝熱の影響を評価する。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを使用した。

また、境界条件として、外気温度は 20 °C とし、風は解析モデルの管軸直角方向に吹くものと仮定した。風が流入する境界面以外は、圧力一定条件とした。

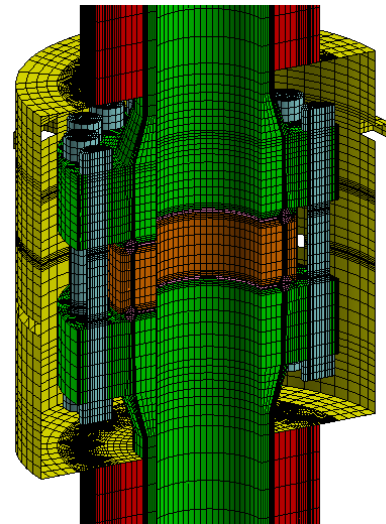


図 3 熱流動解析用モデル Model for CFD Analysis

4.2 応力解析 (弾塑性解析, Thermal Stress Analysis)

汎用有限要素法解析プログラム『ABAQUS』(米国 Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.製)を使用した。フランジ、ボルト、ナット、ガスケット、スペーサー、および接続する管は 3 次元ソリッド要素(要素タイプ: C3D8、8 節点線形ブリック要素)とし、構造解析用モデルを図 4 に示す。ガスケットとフランジ、スペーサーとの接触面は接触要素(マスター・スレーブ関係)を用いた非線形解析とした。

接触面の摩擦係数は、鋼材(軟鋼、硬鋼)の一般的な静止摩擦係数が 0.3~0.4 の範囲で

あることから拘束力の厳しい安全側の評価として0.4とした。また、荷重の対称性から周方向0～180°の1/2モデルとした。初期ボルト締付荷重の大きさによって、熱変動によりボルトの荷重変動およびガスケットの面圧挙動を確認する目的で、JPI規格のフランジ・ボルト締付管理（JPI-8R-15-2005）^③に従い最小荷重と最大荷重を算出して、この両ケースにて弾塑性解析を実施した。なお、ボルト初期締付力はボルト要素の断面に初期締付力荷重（CLOAD）を与えた。また、材料の非線形性は降伏点（降伏ひずみ）と引張り強さ（破断ひずみ）で定義されるバイリニア型の応力-ひずみ関係を用いた。一方、高温域でのクリープに関して、次に述べるように温度が400℃程度であれば、クリープを問題にする必要はないと考えられることから、クリープ特性は解析から除いた。

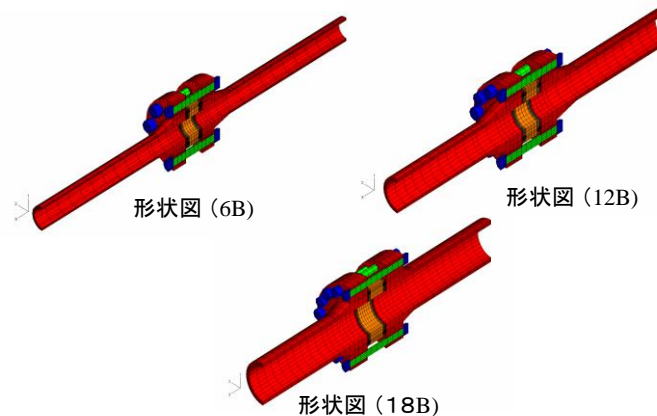


図4 構造解析用モデル
Model for Structural Analysis

5. ボルト締付力の変動と漏洩の可能性(Bolt Force Variation and Leakage Evaluation)

図5、および図6は18インチJPI2500相当フランジの材質構成ケース-1（フランジ材質：2.25Cr-1Mo/TP321）に対し、風速が5m/秒の時にボルトの初期締付荷重を最小値、あるいは最大値とした場合のボルト荷重の変動を詳細に表したものである。

初期のボルト締付荷重を最大で締付けた方が残留するボルト締付荷重は若干上回るものの、初期のボルト締付荷重を最小あるいは最大にて締付けても、ボルト荷重から圧力によるエンドフォース分 ($H = \pi G^2 P / 4$) を除いたガスケットに残留している荷重は、シャット・ダウン後半には規格で定める気密保持のため必要な荷重 ($H_p = 2 \pi G_m P$) より下回ることが確認された。

つまり、ボルトの軸応力から漏洩の可能性を評価した場合、今回の解析に採用した温度・圧力の降下条件で1回目の熱サイクルの定常運転後の圧力がある時間保持された状態で温度が先に降下するようなプロセス運転がなされた場合、漏洩する可能性を示す。逆に、2回目の熱サイクルの定常運転後の緊急シャット時のように圧力・温度ともに同時に降下する場合は、漏洩の可能性はほとんどないことも確認できた。

Nomenclature
 H: Total Pressure Thrust Force Subjected to Flange
 G: Gasket Reaction Diameter
 m: Gasket Factor (6.5 for SUS Ring Joint)
 記号:
 H: 内圧によってフランジに加わる全荷重($\pi G^2 P/4$)
 G: ガスケット反力円の直径
 m: ガスケット係数(SUS RJの場合、6.5)

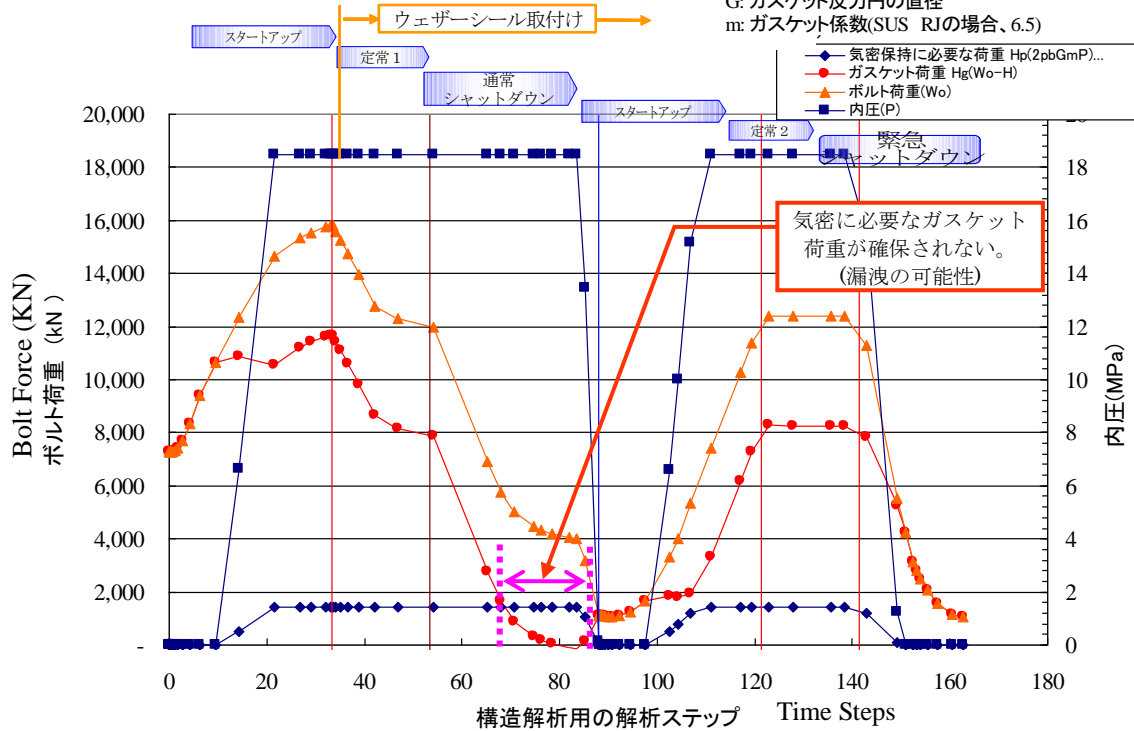


図5 ボルト締付力の変化と漏洩評価 (初期締付け：最小荷重)
 Bolting Force and Leak Evaluation (Initial Bolting: Minimum by JPI-8R-15-2002)

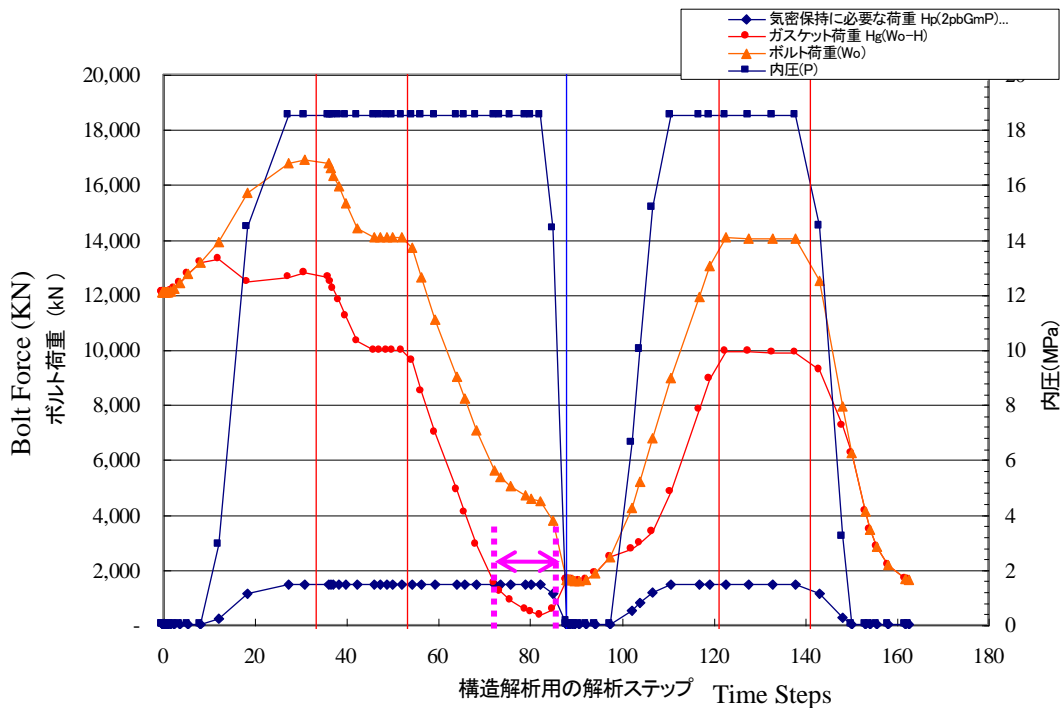


図6 ボルト締付力の変化と漏洩評価 (初期締付け：最大荷重)
 Bolting Force and Leak Evaluation (Initial Bolting: Maximum by JPI-8R-15-2002)

6. ガasketの平均面圧の変化と漏洩の可能性(Gasket Seating Stress Variation and Leakage Evaluation)

解析の結果、対象とするスペーサー付きフランジの場合上下2個の計8面のガスケット面圧は、図7に示すようなフランジの倒れの影響により、図8に示すように初期締付時点から面圧レベルが大きく2つに分かれ挙動していることが判明した。

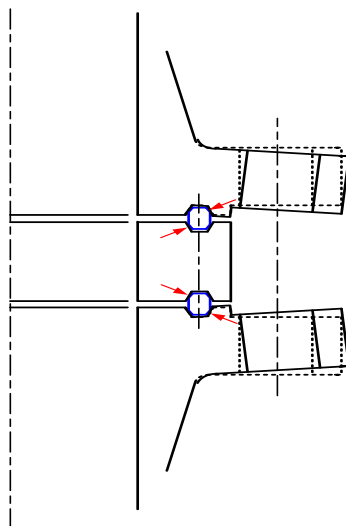


図7 フランジの倒れによるガスケット平均面圧への影響
Effect on Gasket Seating Stress by Flange Rotation

図8は18インチ JPI2500相当フランジで材質構成ケース-1(フランジ材質: 2.25Cr-1Mo/TP321)の場合の例を示す。ガスケットの面圧が高い側は初期締付け後の温度上昇期間においても上昇し、シャット・ダウン時の面圧は急激な降下となり、常温になる前に面圧が存在しない状態となっている。ガスケットの面圧が低い側は初期締付け後の温度上昇期間においても上昇することなく維持される。しかしながら、(A点)においてシャット・ダウン時以降面圧は若干下がり一部の面でシールに必要な面圧(mP)を保持していないので、ガスケット平均面圧による漏洩評価においても漏洩の可能性を示している。ただし、フランジ継手の材質の組合せがボルト材質と同じどちらも低合金鋼製の場合は、面圧が高い側も低い側も必要な面圧(mP)を保持しており、漏洩の可能性が無い結果を得ている。

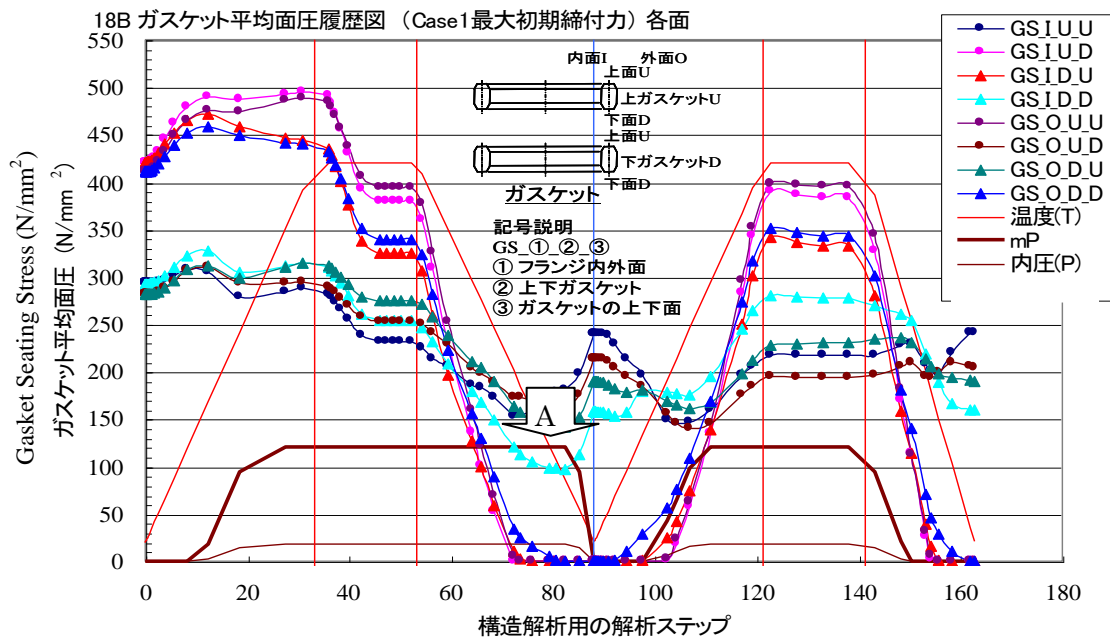


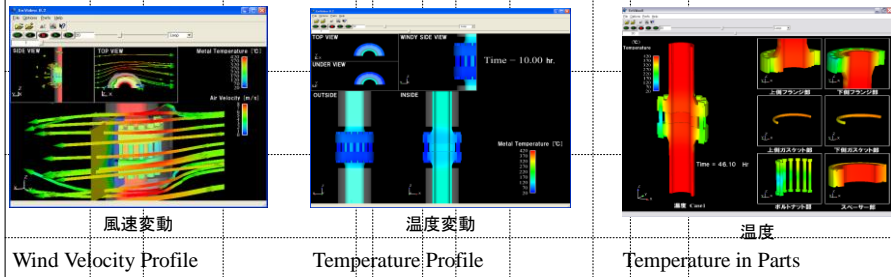
図8 ガスケット平均面圧の変動 (代表例)
Typical Gasket Seating Stress Variation

7. ビジュアル化処理(Visualization)

フランジ継手の熱流動解析、及び構造弾塑性解析から、フランジ継手の締結管理に関するガイドラインの作成に多くの有用な結果を得ることができた。しかし、図・表データから、現象・挙動を判り易く説明することが困難であるため、有用な結果を広く理解・活用してもらうことが重要である。このことから、EnSight 可視化ツール群によるビジュアル処理を実施する。可視化処理は18インチのケースを対象として、以下の解析結果項目について実施する。(図9、図10参照)

- (1) 熱流動解析結果の可視化
 - ① 風向・風速時間変動
 - ② フランジ継手各部位の温度時間変動
- (2) 構造弾塑性解析結果の可視化
 - ① 熱変形
 - ② ボルト応力変動
 - ③ ガスケット面圧変動
 - ④ 塑性ひずみ
 - ⑤ 相当応力

熱流動解析結果の可視化 Visualization for Results of CFD Analysis



構造弾塑性解析結果の可視化 Visualization for Results of Structural Analysis

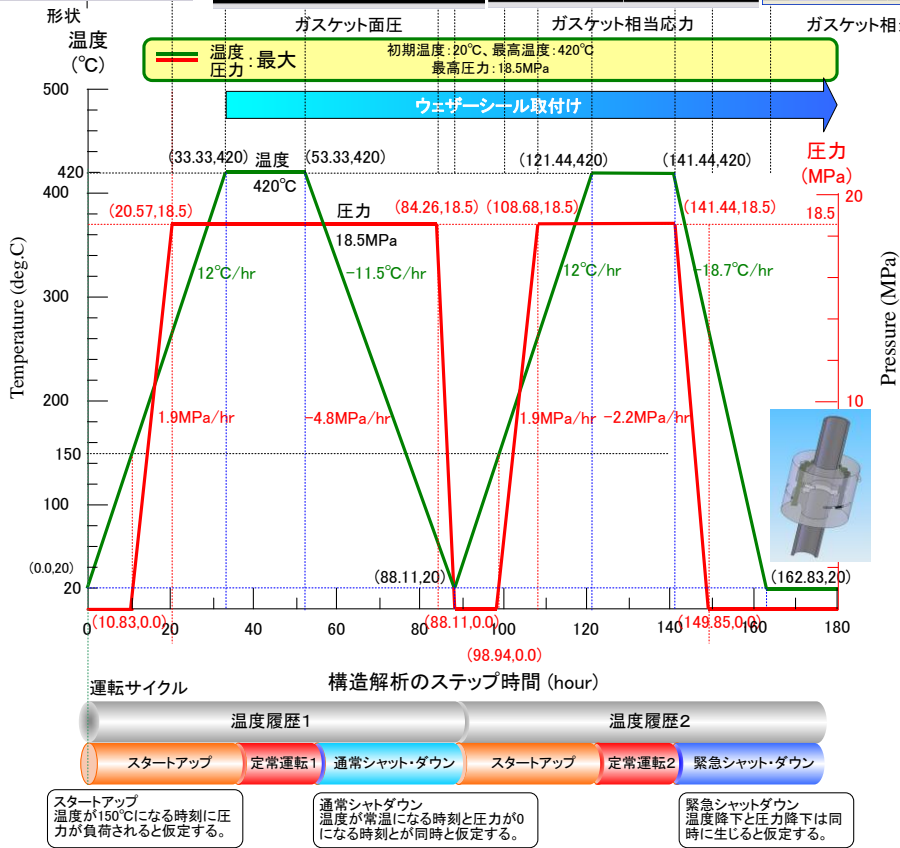
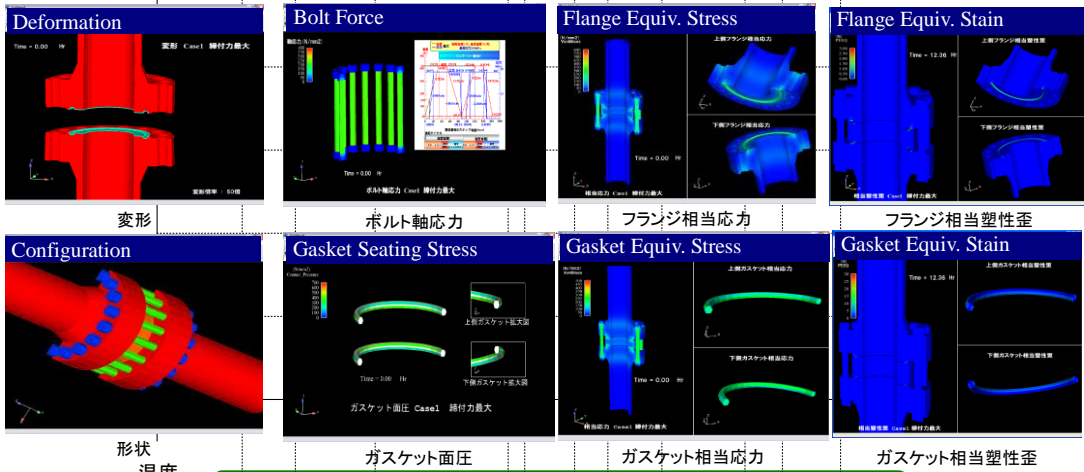


図9 図化処理内容概要
Contents of Visualization

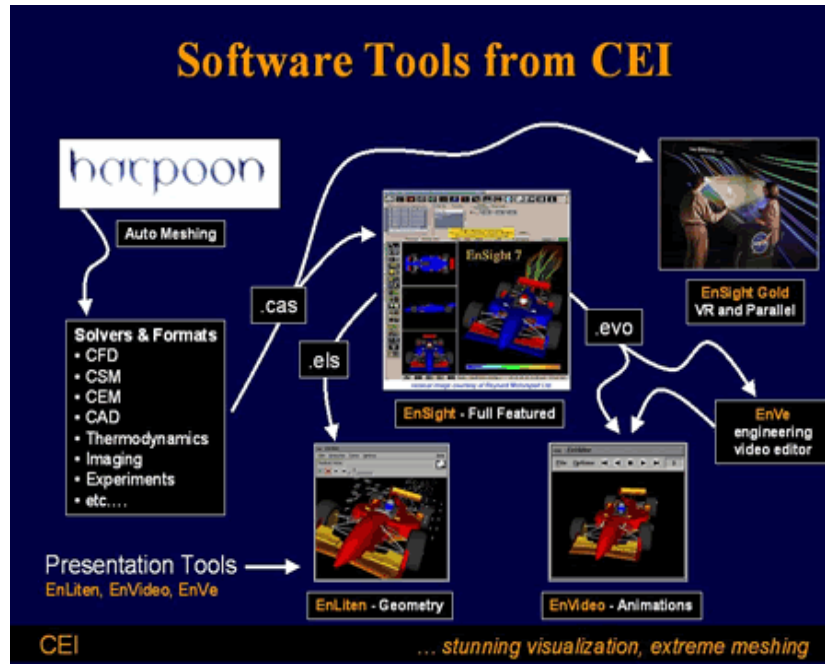


図 10 EnSight ソフトウェアツール群

8. 結 言(Conclusion)

解析で得られた漏洩評価と異なり、定常運転後の圧力がある時間保持された状態で温度が先に温度が低下するようなプロセス運転がなされた場合でも、実際にはスパーサー付き配管継手において降温時に頻繁に漏洩が発生している事実はない。

リングジョイント・ガスケットの場合のシールに必要な真のガスケット面圧は不明で(クサビ効果により規格に定める値より低い可能性がある)、従って、解析で得られたボルトの軸応力あるいはガスケット平均面圧による漏洩の評価結果は、漏洩するのではなく、漏洩する可能性がある」と記述した。

解析に示すように 2 回目の熱サイクルの定常運転後の緊急シャット時の圧力・温度ともに同時に低下する場合は、ガスケット平均面圧による漏洩評価でも漏洩の可能性はほとんど無いことから、解析に用いた温度・圧力変化条件よりは実運転が厳しくなければ漏洩の可能性は小さくなる。

フランジ継手の熱流動解析、及び構造弾塑性解析から多くの有用な結果を得ることができた。しかし、図・表データから、現象・挙動を理解することが容易ではない。可視化ツールによるビジュアル処理を実施し、有用な結果を理解・活用することが可能となる。

参考文献(References)

- (1) 石油産業における工事管理の実態と課題に関する調査、(財)石油産業活性化センターが実施した平成 16 年度の安全基盤整備事業における事前調査
- (2) JPI-7S-15-1995：石油学会規格・石油工業用フランジ
- (3) JPI-8R-15-2005：石油学会規格・フランジ・ボルト締付管理