波方基地ブタン/プロパン兼用貯槽 気密試験時の熱挙動予測と計測データの 分析方法について

諏訪 好英1*・土屋 貴史¹・田中 達也2・戸谷 成寿2・黒瀬 浩公3・前島 俊雄4

¹(株)大林組 技術研究所(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)
²(株)大林組 原子力本部(〒108-8052 東京都港区港南 二丁目15-2)
³東電設計(株) 土木本部(〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目7-12)
⁴(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油ガス備蓄部(〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目10-1)
*E-mail: suwa.yoshihide@obayashi.co.jp

地下岩盤貯槽である波方ブタン/プロパン兼用貯槽では、操業に先立ち、気密性確認試験を実施した. この試験では、シャットイン後の貯槽内に加圧空気を送気し、設計圧以上の圧力で一定時間保持したとき に圧力低下がないことを確認する.貯槽内の空気温度は昇圧過程で上昇し、圧力保持過程で低下するので、 貯槽内のゲージ圧は大きく変化する.このため、気密試験の合否判定には、貯槽内空気温度の測定および これに基づくゲージ圧から正味の圧力への補正の正確さが重要となる.本稿では、気密試験に先立ち実施 した熱挙動予測の結果およびこれに基づき実施した各種検討結果について報告する.

Key Words : *LPG mined storage cavern, leak test, theoretical prediction, CFD simulation, temperature measurement*

1. はじめに

地下岩盤貯槽である波方ブタン/プロパン兼用貯槽で は、岩盤貯槽の完成後に貯槽が設計圧力に対して十分な 気密性を持つことを確認する手段として気密試験を実施 した.この試験では圧縮空気を導入して貯槽内を設計圧 力まで加圧した後、一定期間保持したときの貯槽内の圧 力変動量から圧縮空気漏洩の有無を判定する.しかし、 圧力測定値は貯槽内の気相温度に依存して変化するので、 これを補正して正しく気密性を判定するためには、貯槽 内の気相温度を高精度に評価する必要がある.

そこで気密試験に先立ち,加圧・圧力保持プロセスに おける貯槽内の熱挙動予測を実施し,その結果に基づき 貯槽内空気温度の評価手法に関する検討を実施した.

2. 昇圧・圧力保持過程における貯槽内気相温度

貯槽を昇圧すると、ボイル・シャルルの法則¹に従っ て貯槽内部の気相温度が上昇する.ただし、この過程は 通常の断熱圧縮とは異なり、貯槽内に新たな空気を導入



図-1 貯槽内気相温度変化の理論モデル

するものであり、昇圧前後の空気質量が変化する.この 状況をモデル化し、圧縮前後のガスの状態から昇圧に伴 う気相温度変化を求めると、図-1の(3)式が求まる.一方、 気相内の熱は岩盤へ熱伝達し、岩盤内で熱伝導により周 囲に拡散する(図-1の(4)式,(5)式).昇圧過程では(3) ~(5)式が同時に進行して気相温度は上昇するが、圧力 保持過程では気相温度が岩盤より高い状態で(4)式,(5)



図-2 昇圧過程,圧力保持過程における貯槽内温度変化の予測結果

式による熱の流出のみ進むので、気相温度は岩盤表面温 度に漸近していくと予測される.

波方ブタン/プロパン兼用貯槽を想定してこの理論モデルを計算した結果,図-2 a)のような温度変化状況が得られた.ここでは昇圧速度が異なる3ケースを想定したが,気相温度の最高到達温度は昇圧速度に依存することがわかる.

昇圧過程,圧力保持過程のいずれにおいても,その状態に移行した直後の温度変化は急激であるが,時間の経過とともに次第に緩やかとなるカーブを示した.昇圧過程での温度変化のカーブは,圧縮に伴う温度上昇と熱伝達による岩盤への熱の流出とが平衡状態に漸近していくためと解釈できる.一方,圧力保持過程では熱伝達による岩盤への熱の流出のみが進行し,気相温度が岩盤表面温度に漸近していく.ただし岩盤内部では同時に熱伝導が進行するため,岩盤表面温度は厳密には一定値とならない.また気相の熱は水床にも伝達し,同様の熱流出を生じる.

図-2 b)は、岩盤内での熱伝導や水床への熱の流出を 考慮した場合とそうでない場合の予測結果を比較したも のである.両者の違いは圧力保持過程における温度の減 衰カーブに顕著に現れており、厳密な扱いでは一定時間 に達するまでの時間がより長時間となることがわかった. この点は、気密試験において圧力評価を開始するタイミ ングの予測に大きく関わるものと考えられる.

3. 貯槽内温度分布の三次元数値シミュレーション

理論モデルの結果は貯槽内平均温度の時間変化を示し ているが、温度変化を生じる際には気相温度の空間的な ばらつきも大きくなると予測される.そこで空間的な気 相温度分布を含めた考察を行うため、三次元数値シミュ レーションを実施した.

(1) 解析モデル

解析には汎用熱流体シミュレーションソフトSTAR-CD(シーディーアダプコ・ジャパン)を使用した.昇



圧過程を再現するため低マッハ数近似²による圧縮性流体解析を実施し、モデル上でも貯槽内に圧縮空気を導入する方法で解析を実施した.図-3は三次元シミュレーションに用いた貯槽モデルである.波方ブタン/プロパン 兼用貯槽は断面高さ30m、長さ430mの単一空洞で、内部容積約29万m³である.貯槽には配管縦坑と2箇所のトンネルがコンクリートプラグを介して連結されており、解析モデルにはこれらも再現した.また理論モデルで考察したように、気相温度には水床や岩盤が大きく影響すると考え、モデルには水床(水深02m)および貯槽周辺の 岩盤(深さ方向4m以上)も再現した. さらに空気の比 熱,熱伝導率,粘性係数等の物性値は,昇圧に伴って変 化する可能性も考えられるため,これらの温度・圧力依 存性については日本機械学会編「流体の物性値集」³の 値をテーブル化し,ユーザーサブルーチンでこれらの値 を内挿補間して使用した.

(2) 昇圧・圧力保持過程における温度分布

図-4、図-5に三次元シミュレーションの結果を示す. ここでは、昇圧速度0.01MPahで30時間連続で昇圧し、その後70時間圧力保持した場合を想定した. 圧縮空気注入 口は底水排水層から最も遠い貯槽端部の底面とした. 図-4は断面X1および長手方向中央断面における温度分 布の変化を示したものである. 昇圧過程では気相温度の 上昇に伴い温度のばらつきも大きくなり、設計圧力に到 達した時点の気相温度は複雑な分布を示した. 圧力保持 過程では気相温度のばらつきもしだいに減少し、定常温 度への到達とともに温度分布も平滑化することがわかっ た.

(3) 圧縮空気注入口の配置に関する考察

昇圧過程(昇圧開始から7h経過後),圧力保持過程 (同32.35hおよび60.06h経過後)における各断面の温度 分布を図-5に比較した.いずれの場合も全体的には上部 に行くほど高温となる成層的な温度分布を示しているが, 圧縮空気注入口に近いX1断面付近では温度のばらつき が大きくなる傾向が認められた.貯槽の長手方向に沿っ た断面内温度分布を見ると,注入された圧縮空気の流れ により最も顕著な影響を受けるのは注入口の付近約10m の範囲と考えられ,この付近に温度評価点を設定するこ とは望ましくないと判断した.

4. 貯槽内温度評価に関する考察

三次元数値シミュレーションの結果,貯槽内の気相温 度は常に空間的なばらつきを含むことがわかった.気密 試験における圧力評価の不確かさには貯槽内圧,貯槽内 温度,排水槽水位等の測定精度が影響するが,このうち 貯槽内温度の計測精度の影響が最も大きいと考えられる. 貯槽内温度は複数の測定点から平均値として評価するた め,これにより温度測定値のばらつきによる影響を低減 できると考えられるが,測定システムとしての不確かさ を低減するには,どの程度の測定点数が必要となるかを 統計的な観点から考察した.

(1) 統計手法に基づく平均温度の推定

有限数のデータからばらつきを有する母集団の平均値

の範囲を推定する方法に、スチューデントのt分布を用 いる検討法(以下t検定と呼ぶ)⁴がある.t検定では、無 作為に抽出したデータより求めた標準誤差から、想定し た優位水準の範囲で母集団の平均値が取り得る上限値, 下限値を推定する.

三次元数値シミュレーションの結果から任意の測定 点を選定し、そこから抽出した温度データを用いて測定 の不確実さを評価した.結果を表-1に示す.測定点数を 増やすことで圧力の評価値が取り得る範囲を表す総合不 確かさを低減できるが、測定点数増加による効果が顕著 なのは10点程度までであり、それ以上多くの測定点を設 定しても測定精度に大きな違いは認められなかった.本 考察より、貯槽内温度の評価に用いる測定点は、統計的 には貯槽全体で10点以上あればよいと考えられる.

(2) 温度測定箇所の選定に関する考察

三次元シミュレーションの結果, 圧縮空気注入口近傍 では温度のばらつきが大きくなる傾向が認められた.ま た空洞内の岩盤や水床に接する部分には境界層により局 所的な温度分布が形成されると予測される.限られた測 定点のデータに基づき貯槽内平均温度を評価することを 考えると,これらの領域に測定点を置くことは好ましく ない.三次元シミュレーションの結果から,注入口近傍 約10mの範囲および空洞内の岩盤や水床に接する境界面 から1~2m の範囲は温度測定箇所から除外すべきである.

一方,貯槽内の気相温度は全体的に成層的となり, 鉛直方向に温度差のある分布を示すことが予測される. このため,各断面の鉛直方向には,複数点の温度測定点 を配置することが望ましいと考えられる.

(3) 気密試験における温度測定点の提案

先述の考察から,温度測定点は10点以上あれば十分と 考え,これに従って温度測定点の配置方法を提案した. 気密試験で使用した最終的な測定点の配置を図-6に示す. 実際の試験では圧縮空気の注入口を配管縦坑側に配置し たので,測定断面はその近傍10mの範囲を避けた6断面 とし,各断面の鉛直方向に3点ずつの合計18点に測定点 を配置した.なお各断面では,各センサが分担する面積 が等しくなるよう測定点の高さを決定した.

5. 温度センサの精度向上に関する考察

圧力評価の不確実性を低く抑えるには、各項目の測定精 度を向上する必要がある.先述したように、気相温度の 測定精度は圧力評価の総合不確かさに最も大きく影響す ると予測されるので、温度センサの測定精度を向上する 方法について考察した.

温度計測において、地上観測点から貯槽内の最も遠い



b) 長手方向中央断面における温度分布の変化(昇圧過程)

図-4 昇圧過程,圧力保持過程における貯槽内温度分布の時間変化(三次元シミュレーション結果)





表-1 測定点数を増やしたときの不確かさ低減効果(t検定による試算結果)

箇所までの距離は700~800mに達すると考えられ,計装 ケーブルは往復1.5km程度に達すると予測される. 白金 測温抵抗体素子による計測を想定した場合,測定値は全 経路の抵抗値,すなわち白金抵抗体,測定器の内部抵抗 および計装ケーブルの抵抗の合計に対する電圧として得 られる. 計装ケーブルの抵抗は27Ω/km程度あるため, 単純に白金抵抗体,測定器を直列接続した2線式測定回 路では計装ケーブルの抵抗による不確実性が無視できな くなる. そこで,図-7のような4線式測定システム⁵を検 討した. 図には,白金抵抗体100Ωに1mAの測定電流を 供給し,抵抗の両端で電位差を測定した場合の例を併記 した. ここでは一般的な電圧計の内部抵抗10MΩを想定 したが,図-7に併記した計算例より,4線式測定システ ムの採用によって計装ケーブルの抵抗に起因する測定誤 差は±0.01℃以内に抑えられることがわかる.

6. 気密試験時の測定データの扱いに関する考察

実際の測定では予期せぬ各種ノイズや異常値が発生す る可能性が考えられる.そこで、測定時に予測されるノ イズや異常値に対応するための測定データの扱いに関し て考察した.



(1) 平均値算出方法とスパイクノイズの影響排除

連続測定データ中に突発的な値を生じるスパイクノイ ズは、その影響を除外すべき擾乱のひとつである.任意 のセンサに意図的にスパイクノイズを加えた擬似データ を作成し、平均値算出方法による影響の違いを比較した. 測定点数は実際の気密試験と同じ18点とし、スパイクノ イズのピーク値を計測値の0.2%、0.4%、0.6%(計測値 20℃に対してそれぞれ0.04℃、0.08℃、0.12℃)とした場

表-2 平均値算出方法における誤差の比較

想定したノイズピーク	0.2%	0.4%	0.6%
算術平均	1.21×10 ⁶	2.24×10 ⁶	1.55×10 ⁻⁶
調和平均	2.10×10 ⁵	8.62×10 ⁻⁵	1.80×10 ⁻⁵
加重平均	4.68×10 ⁴	2.81×10 ⁻³	4.21×10 ⁻³







合について、3種類の算出方法(算術平均、調和平均お よび各センサが担当する体積で重み付けした加重平均) で擬似データの平均値を求めたときの誤差の比較を**表-2** に示す.スパイクノイズの絶対値が大きくなると、加重 平均では若干の誤差を生じてくるのに対し、算術平均、 調和平均ではほとんど誤差を生じないことがわかる.こ れは、加重の大きなセンサにノイズを生じた場合の影響 が、加重平均では必要以上に大きく評価されるためと考 えられる.気密試験では扱いも簡単な算術平均を用いる のが望ましいと考えられる.

(2) クラスター分析に基づく異常値の棄却

測定中にセンサが故障した場合にも異常値を発生する. 故障に伴い0値や異常に大きな値を記録する場合にはデ ータを容易に棄却できるが,測定レベルの一定値を出力 し続けるような故障モードの場合には,データの特徴抽 出により異常を判定する必要がある.そこでウォード法 によるクラスター分析⁶の適用を検討した.

図-8のように温度センサに不具合を生じた場合を模擬した擬似データを作成し、同様のクラスター分析を行った. 図-9は、各データの二乗距離の分布を樹系図として示したものである.温度測定データは、上部、中央、下部でそのレベル・パターンが若干異なり、同じ高さのデータは測定位置が違っても比較的よく似ている.そのため、 性状データについてクラスター分析を行うと、図-9 a)

のように全測定点のデータは3種類のグループに明確に 分類された.一方,不具合データの場合には,意図的に 不具合を発生させた3つのデータがいずれのグループと も隔絶した位置に分類されており,明確な違いを検出で きた.このように,測定データの異常値判定にクラスタ 一分析の適用が有効と考えられる.

7. まとめ

気密試験に先立ち実施した熱挙動予測の結果およびこれ に基づき実施した測定データの扱いに関する各種検討結 果について示した.これらの検討結果は,2012年9月に 実施した波方ブタン/プロパン兼用貯槽の気密試験にお いて基礎データとして活用された.

参考文献

- 1) Levine, Ira. N. : *Physical Chemistry*, University of Brooklyn, McGraw-Hill, 1978.
- Almgren, A. S., Bell, J. B., Rendleman, C. A., Zingale, M.: Low Mach Number Modeling of Type Ia Supernovae. I. Hydrodynamics, *Astrophysical Journal*, Vol.637, No.2, pp.922-936, 2006.
- 3) 日本機械学会編:技術資料 流体の熱物性値集, 1983.
- 4) Gosset, W. S. : The probable error of a mean, *Biometrika*, Vol.6, No.1, pp.1-25, 1908.
- 5) 重松宏志: 低抵抗の測定方法, 東京都立産業技術研究 センターTIRI News, Vol.23, pp.4-5, 2008.
- 6) Ward, J.H., Jr. : Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.58, pp.236-244, 1963.

THERMAL PREDICTION AND STUDIES ON MEASURED DATA ANALYSIS DURING AIR-TIGHTNESS TEST OF BUTANE/PROPANE MINED STORAGE CAVERN AT NAMIKATA

Yoshihide SUWA, Takashi TSUCHIYA, Tatsuya TANAKA, Naruhisa TOYA, Hiroki KUROSE and Toshio MAEJIMA

Gauge pressure of cavern changes by air temperature, and air temperature changes easily by pressurising. Air temperature may have distribution, and it brings uncertainty of pressure measurement. In this work, thermal behavior of cavern during the pressurising process was predicted by CFD analysis, and statistic characteristics of measured temperature data were studied. As the result, minimum necessary number of thermal sensors and their locations was proposed as to minimize uncertainty of air temperature measurement. Data analysis methods which avoid noises and measuring errors were also proposed.