3D スキャナによる岩盤内 LPG 貯槽容積計測法とその貯槽気密試験への適用

大成建設（株）　正会員○一枝　俊豪　正会員　岡嶋　和義　正会員　堀田　渉
（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構　正会員　前島　俊雄
（株）計測リサーチコンサルタント　非会員　加藤　淳

１．はじめに

石油や石油ガス資源の地下備蓄を目的とした岩盤貯槽においては，発破掘削，吹付け仕上げによる壁面形状の凹凸が原因で，貯槽容積が設計値とは異なる．貯槽気密試験において，貯槽容積が気密性評価に与える影響は大きく，正確な貯槽容積の算出が課題となる．本報では，波方国家石油ガス備蓄基地プロパン貯槽（貯槽幅 26m，高さ 30m，長さ 485m×2 列）において実施した 3 次元レーザスキャナによる岩盤内 LPG 貯槽容積の計測方法について報告する．また，同手法によりタンクテーブルを作成し，岩盤内 LPG 貯槽の気密性評価における気相体積変化の算出を行った実績と，タンクテーブルの精度が気密性評価に及ぼす影響について報告する．ただし，気密性評価の詳細については，参考文献を参照されたい．

２．3D 計測方法

貯槽容積の計測には 3 次元レーザスキャナを用いた．計測原理としては，レーザパルスを照射して受光器（基準ターゲット）で受信するまでの時間から，対象までの距離を換算し，レーザ照射角度を併せることで，計測対象表面の 3 次元座標値を得るものである．使用するレーザスキャナは，現地作業効率の向上を目的とし，長距離型と短距離型の 2 機種とした（**表-1**）．前者をメイン機種として使用し，後者は風管など取得データの隠蔽要因が想定される壁面の補間計測用に使用した．両機種ともに，±5mm 程度の距離精度を有している．

表-1　使用レーザスキャナ

機種名	長距離型	短距離型
機器イメージ		
測定範囲	・長距離モード 1.5～600m （反射率90%） 1.5～280m （反射率20%） ・高速モード 1.5～350m （反射率90%） 1.5～160m （反射率20%）	0.6～120m
スキャニング角	垂直100°（+60°/-40°）×水平360°	垂直320° ×水平360°
スキャニング速度	122,000ポイント/秒（高速モード） 42,000ポイント/秒（長距離モード）	976,000ポイント/秒
レーザ波長	1550nm（近赤外）	785nm（近赤外）
レーザ強度	クラス1	クラス3R
測定精度	標準±5mm（100mの時）	標準±2mm @25m
レーザのビーム幅（スポットサイズ）	30mm（100mの時）	
備考	高速・高精度スキャニング IP64 防塵・防滴構造	全周型高精度スキャニング 360° 全周囲の計測が可能

測定のフローを**図-1**に示す．測定は，現地 3D 計測とデータ解析からなる．貯槽全体の取得点群密度の均一性を確保するため，隠蔽部を補間するために約 50m 間隔で長距離型による 3D レーザ計測を実施した．このとき，計測レーザは移動車両に搭載することにより，現地計測の効率化を図った．また，遮蔽物が多い底水排水槽壁面形状については，周辺の壁面曲率に基づくデータ補間により，その形状データを作成した．そのほか事前準備として，貯槽内に基準ターゲット（20m スパン，1 貯槽当たり 30 点程度）を設置した．このとき，ターゲットは位置・高さともに極力異なる箇所に設置し，取得データの位置精度を確保した．

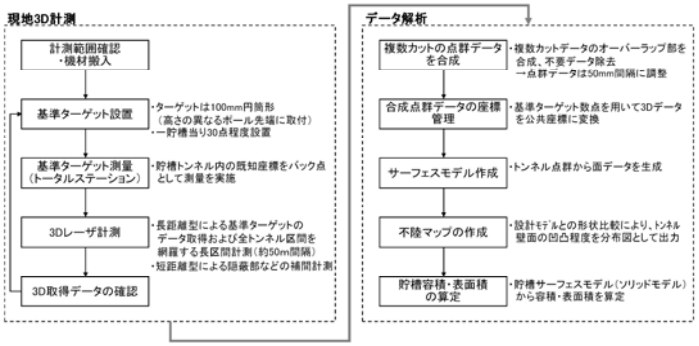

図-1　3D 計測実施フロー

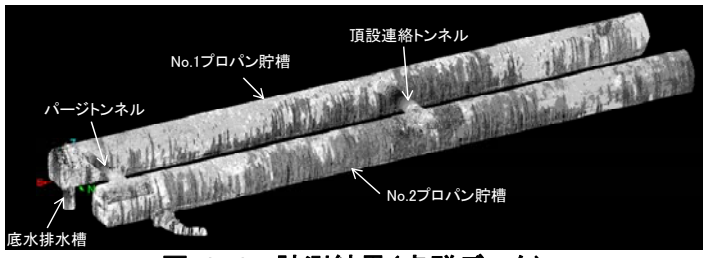

図-2　3D 計測結果（点群データ）

３．3D 計測結果

3D 計測で得られた貯槽表面の点群データの合成，不要構造物の除去，公共測量座標系への変換処理を行い，作成したサーフィスモデルを**図-2**に示す．このとき，

キーワード　岩盤貯槽，気密試験，3 次元レーザスキャナ，タンクテーブル
連絡先　〒569-1051　大阪府高槻市大字原 1196-1
大成建設（株）　関西支店新名神高速道路原工事作業所　TEL072-668-1920

現地計測結果の精度管理として，公共座標系に変換された点群データ中の座標値と，事前測量された基準ターゲットの座標値とを比較し，計測精度が±20mm 以内であることを確認した．

4．底水排水槽のタンクテーブルと水位測定方法

周辺地山からの貯槽内への湧水は，底水排水槽に集水後，排水ポンプで地上に排出される．貯槽気密性評価には，貯槽内圧力の変動量（ΔP）を用いるため，底水排水槽水位変動により生じる貯槽気相容積変動が貯槽内圧力に与える影響を補正する必要がある[1)]．そこで，3D 計測結果より，**図-3**に示す底水排水槽のタンクテーブルを作成し，貯槽気相容積変動の算出を行った．ここで，ΔP 算出時には，正確な貯槽気相容積変動を把握するため，3D 計測より得られた高さ 10cm 毎のタンクテーブルを用いた．

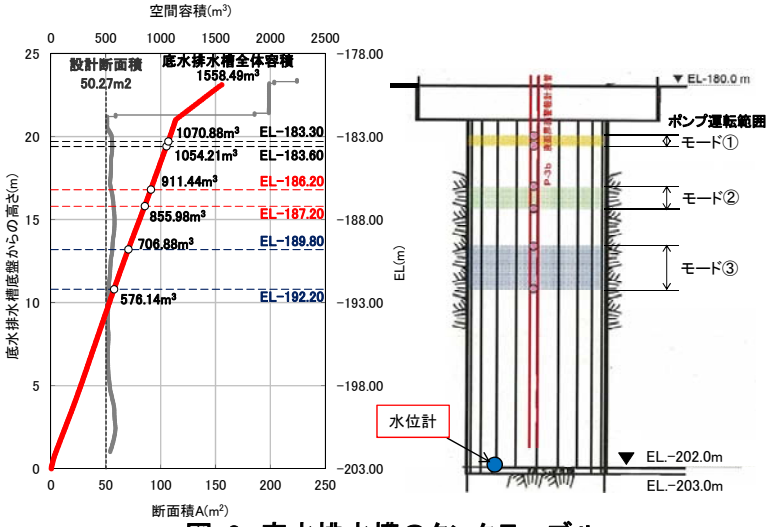

図-3 底水排水槽のタンクテーブル

また，底水排水槽水位は水位計（計測精度：±0.013m）で測定した水位計指示値をもとに，下式で算出した．

$$I_t = \frac{P_{ht} - \left(P_{st} + P_{Lt} + \rho_{gt} \cdot g \cdot \left(-150 - h^0\right)\right)}{\left(\rho_w - \rho_{gt}\right) \cdot g} + h^o$$

I_t：底水排水槽水位（EL.m）
T_{Lt}：配管竪坑内平均水温（K）
P_{ht}：底水排水槽水位計指示値（Pa abs）
ρ_t：標準大気圧における気体密度（kg/m^3）
ρ_w：底水排水槽内の水密度計測値（kg/m^3）
p_0：標準大気圧（=101325Pa）
h^0：水位計の設置標高（EL.m）
T_t：貯槽内の平均温度（K）
P_{st}：竪坑配管上面における圧力計測定値（Pa abs）
P_{Lt}：竪坑配管内の空気重量圧力（Pa）
ρ_{gt}：貯槽内圧での空気密度（kg/m^3）
h：竪坑配管の長さ（圧力計設置位置と貯槽天端までの高低差）（m）
g：重力加速度（=9.80665m/s^2）

$$\rho_t = \frac{28.9645}{22.41399} \cdot \frac{273.15}{T_{Lt}} (kg/m^3) \quad P_{Lt} = \frac{\rho_t \cdot g \cdot h}{p_0} \cdot \left(P_{st} + \rho_t \cdot \frac{P_{st} \cdot g \cdot h}{p_0 \cdot 2}\right) (Pa) \quad \rho_{gt} = \frac{28.9645}{22.41399} \cdot \frac{273.15}{T_t} \cdot \frac{P_{st} + P_{Lt}}{P_0} (kg/m^3)$$

5．底水排水槽のタンクテーブルが貯槽気密性評価に及ぼす影響

気密性評価時においては，**図-3**に示す底水排水槽排水ポンプの 3 つのポンプ運転モード（運転範囲）のうち，貯槽気相容積変動が小さく，ΔP に与える影響が最も小さいモード（モード①）を選択した．ここで，気密性評価時貯槽内圧：0.985MPaG，貯槽体積：642,845m^3，モード①における最大容積変動量：16.665m^3 を用いて，ボイル・シャルルの法則により貯槽気相容積変動補正量を算出すると，±0.026kPa となる．これは、気密性判定基準（±0.5kPa 以下）の約 5%を占める。

気密試験時の貯槽容積変動による貯槽内圧力の補正量は**図-4**より，試験開始から 72 時間後で 0kPa であった．しかし，気相容積変動補正前では最大変動量 0.035kPa（23→24hr）を生じていたのに対し，補正後は最大変動量 0.009Pa（11→12hr）まで変動を抑えることができている．よって，今回実施した 3D 計測精度の妥当性が示されたと考えられる．

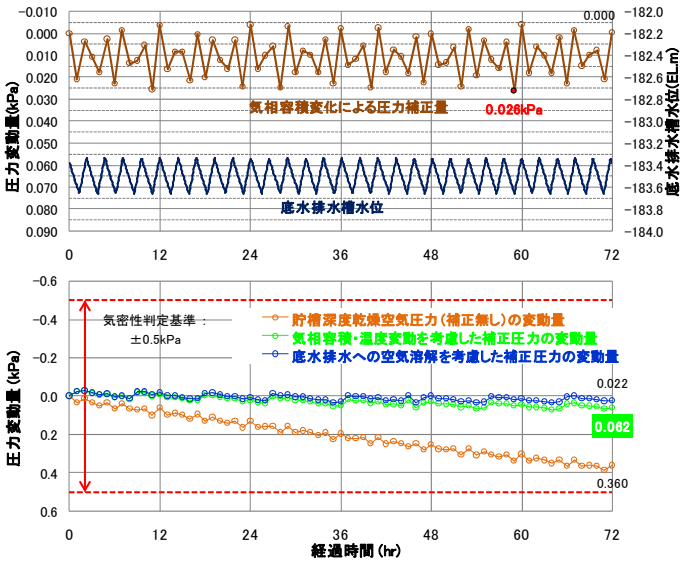

図-4 底水排水槽水位および圧力変動量

参考文献

下茂道人，島屋進，板垣賢，前島俊雄：“波方基地プロパン貯槽における気密試験”，第 69 回土木学会年次学術講演会，2014 年 9 月（投稿中）