

永久凍土地帯における埋設型冷却ガスパイプラインとフロストバルブ の相互作用の実験的研究

Model Tests on the Interaction between Chilled Gas Pipeline and Frost Bulb Growth

北海道大学大学院 ○学生会員 日浅崇平 (Shuhei Hiasa)
アラスカ州立大学 金 高義 (Koi Kim)
北海道大学大学院 正会員 蟹江俊仁 (Syunji Kanie)
北海道大学大学院 正会員 赤川 敏 (Satoshi Akagawa)

1. はじめに

永久凍土地帯でのガスパイプライン敷設上最も技術的に課題となるのは「地盤の凍結・融解に伴う凍上・解凍沈下」に由来するパイプと永久凍土の相互作用であると考えられる。永久凍土地帯といってもその一部にはタリクと呼ばれる未凍結地盤や季節凍土地帯（これ等を非永久凍土地帯と呼ぶ）が存在する。永久凍土に埋設されたチルドガス（ガスを負の温度に冷却し搬送する）パイプラインでは、パイプラインは凍結地盤内に安定に点在するが、隣接する非永久凍土地帯ではその冷熱によりいわゆるフロストバルブ（パイプライン周囲に成長する凍土）がパイプとほぼ同心円状に成長しする。その結果、凍上性地盤の非永久凍土区間に埋設されたパイプラインは上方に移動し、隣接する永久凍土区間との境界部においてパイプには大きな曲げモーメントが発生する^{1), 2)}。の曲げモーメントを評価するために永久凍土・非永久凍土の境界から十分離れた地点における、フロストバルブの発生に伴うパイプの凍上挙動²⁾と周囲地盤内に発生する凍上力および凍結土圧の相互作用を把握する必要がある。

本研究では上記相互作用を実験的に評価するための模型土槽実験の結果を報告する。

2. 実験概要

本研究では模型土槽中に擬似パイプを埋設し、パイプ温度を低温恒温水槽により負の温度に冷却した不凍液の循環により負の温度に保ち、フロストバルブを成長させる。この際発生するパイプ内周方向ひずみ、フロストバルブ内外の半径方向および周方向の応力、パイプとフロストバルブの間に発生する凍結土圧等を模型地盤温度分布と共に計測する。

2.1 計測項目及び計測方法

2.1.1 温度計測

温度計測は模型実験であることを考慮し、計測用ケーブルの土試料内引き回しによる熱的外乱を軽減する目的と耐久性を考慮し、可能な限り細いケーブルを使用した。例えば、テフロン被服を施し

た線径0.08mmの熱電対（オメガ社製TT-T-40）を使用した。また、計測精度の向上のためにシャーベットアイスを用いた零接点計測法を採用し、測温精度として計測値 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ を確認している。

2.1.2 地盤内応力

本実験では直径9.5mm、厚さ0.208mmの小型圧力センサー（ニッタ FlexiForce）を使用した。このセンサーの受感部は感圧素子の抵抗値が外力により変化するというものである。使用に際しては、全てのセンサーを検定し、その校正值により物理量（圧力）へ変換している。また、土圧測定方向は写真1に示すように、鉛直および水平（膨張方向およびその直交方向）の2方向の計測を基本とした。



写真1 直交方向に配置した土圧計

2.1.3 パイプに加わる凍結土圧及び土槽に加わる凍上圧

パイプとその周囲に発生するフロストバルブの間や地盤と土槽との間における応力状態を把握する目的で、模型パイプ周囲と土槽の側壁に図1に示す2次元圧力分布測定センサー（カマタ I-Scan）

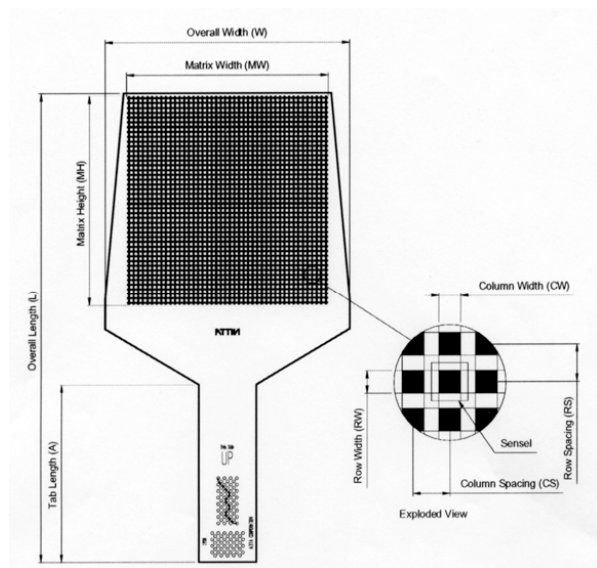


図1 2次元薄膜圧力センサー

を設置した。このセンサーは $238 \times 238 \text{ mm}$ のエリアに $5.41 \times 5.41 \text{ mm}$ の受感部が 44×44 個 (計 1836 点) 存在し、この全ての抵抗値を高速に計測することにより、2次元の圧力分布を一定時間間隔に把握することができる。このセンサーシートは厚さ 0.189 mm と薄いため模型パイプ周囲に直接巻いて設置することができる。今回使用したセンサーシートの計測容量は最大圧力 80 kPa である。

2.1.4 フロストバルブ内断面観測

本実験では模型パイプ内に低温液体を循環し、その周囲にフロストバルブを成長させる。この際フロストバルブ内のアイスレンズの成長挙動を観察することにより、フロストバルブ成長に伴う凍上挙動を検討することができる。このために、実験土槽の一面を2重アクリル板で構成しその断面を通して成長中のフロストバルブの断面をビデオカメラで5分毎に0.5秒間撮影記録する。

2.2 模型地盤

模型地盤は図2に示す土槽内で突き固め、下方から湿潤させ模型地盤とした。地盤材料としては標準砂および NSF-Clay を重量比で3:1の割合で混合したものを使用した。NSF-Clay に標準砂を混入させることにより予圧密せずに比較的高密度の弾性模型地盤を作成することができ、且つ高い凍上性を期待することもできる。また、凍上に伴う未凍結地盤の脱水圧密を軽減することができるため、実験中の各種センサーの移動を最小限にすることができる考えた。なお、土槽は 15°C の恒温室に設置されている。

2.2 実験

2.2.1 予備実験

本実験を始める前に今回行う実験の温度環境を確かめるために寒天を用いて予備実験を行った。寒天はほぼ透明であるためフロストバルブの成長の様子が観察でき、また水とは違い対流が起こらないので模型地盤とほぼ同じ条件で、簡単に熱的2次元性を確認できると考えたからである。予備実験では温度計測とビデオカメラによる観測のみをいった。熱電対の配置図は図3に示す。

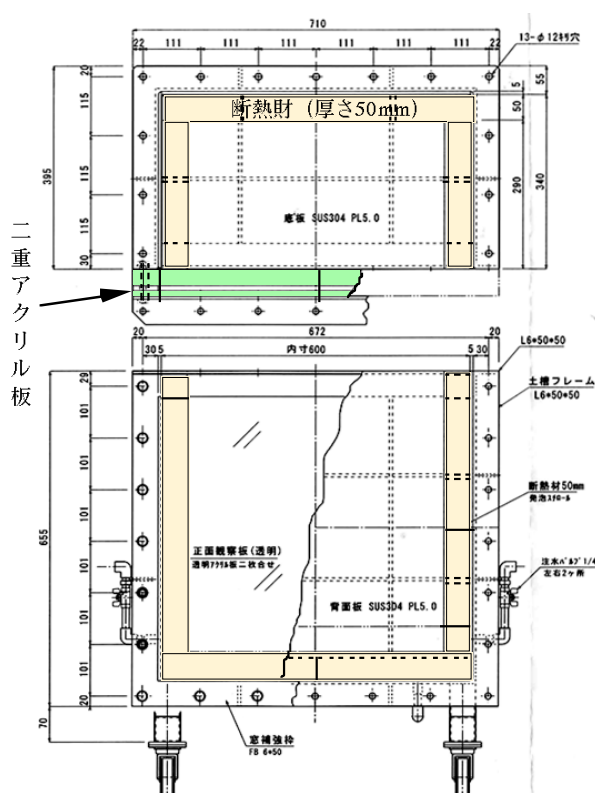


図2 土槽形状

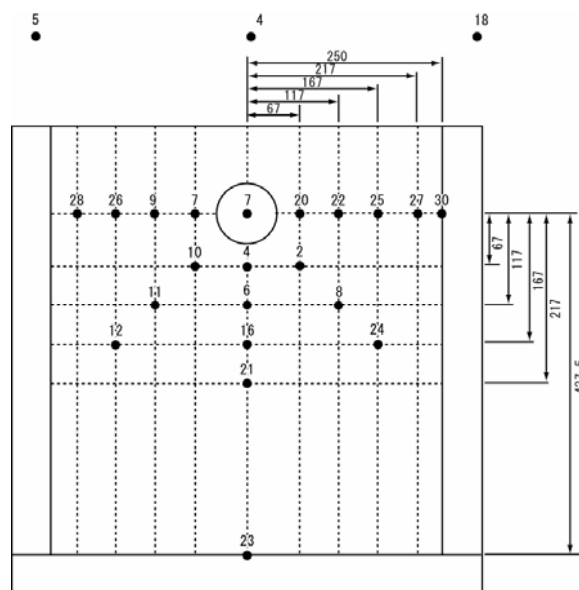


図3 熱電対の配置図

2.2.2 本実験

本実験では混合した地盤材料の下側に吸排水が可能なように、また上側に乾燥を防ぐためにそれぞれ標準砂層を 50 mm 程度設けた。本実験では小型圧力センサー、2次元圧力分布測定センサーによる地盤内応力の計測と熱電対による温度計測、ビデオカメラによる観察を行った。各種センサーの配置図は図4に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 予備実験結果

実験後の土槽内の正面からの様子を写真2に示す。また寒天なので凍結していない部分は簡単に発掘することができ、より正確なフロストバルブの形状を知ることができた。発掘したときのフ

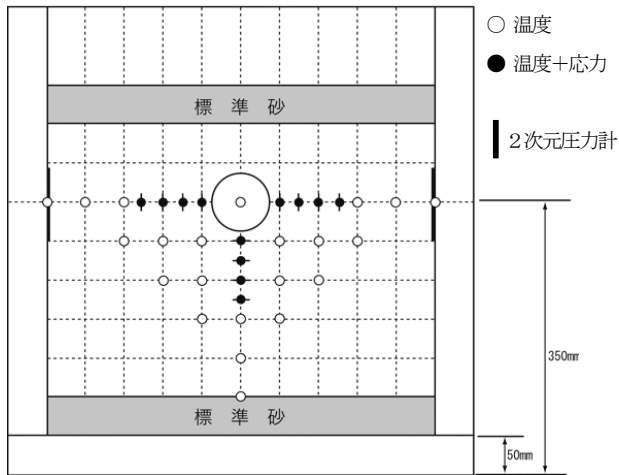


図4 各種センサーの配置図



写真2 実験後の様子

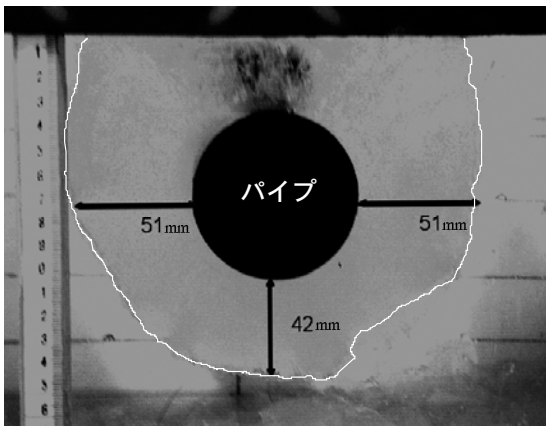


写真3 実験後のフロストバルブ（真上）

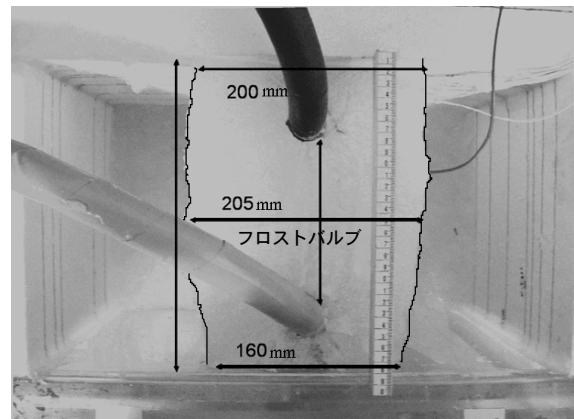


写真4 実験後のフロストバルブ（上方より撮影）

ロストバルブの正面からの形状を写真3、真上からの形状を写真4に示す。

正面からの写真からわかるようにほぼ左右均等にフロストバルブが成長していることがわかる。しかし真上から見てみると土槽の手前側、つまりアクリル側に近づくにつれフロストバルブが多少細くなっているのがわかる。これはアクリルの断熱効果が断熱材よりも悪い事が原因であると考えられる。しかし中央より奥の断熱材側ではフロストバルブはほぼ同心円状に成長していて2次元性が保たれていると言える。そこで本実験では中央より奥側に各種センサーを配置して測定することにした。

温度測定の結果として横方向のデータを図5に例示する。温度データについては概ね左右対称の温度分布となっていることがわかった。

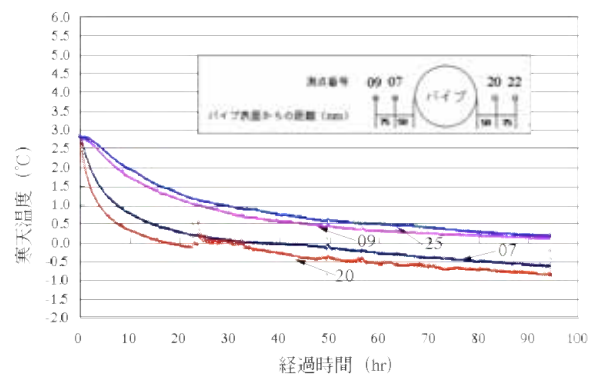


図5 横方向の温度データ（寒天試料）

3.2 本実験結果

実験後の土槽内の正面図からの様子を写真5に示す。また、温度計測、圧力計測の結果を代表してパイプの右側のデータを示す。なお、圧力範囲が広いデータを図6、小さい方を図7に示す。図6より、パイプに一番近い温度計位置の模型地盤は実験開始後数時間で凍結し、凍土に呑み込まれた時に圧力が一気に数百kPa上昇していることがわかる。同様に2番目に近い部位も凍結し凍土に呑み込まれた時に圧力が急激に上昇していることがわかる。その他のセンサーでも温度が負になっているものもあるが、実験終了

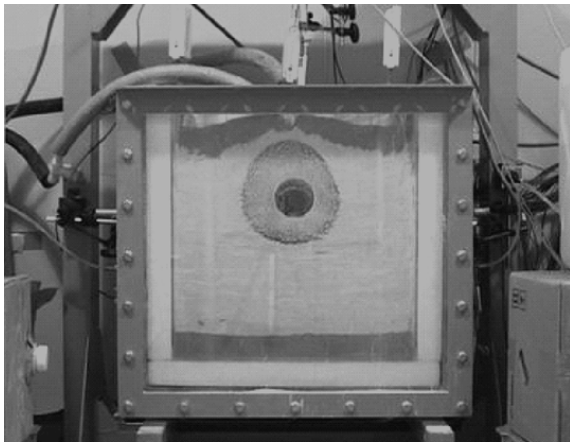


写真5 実験後のフロストバルブ（正面）

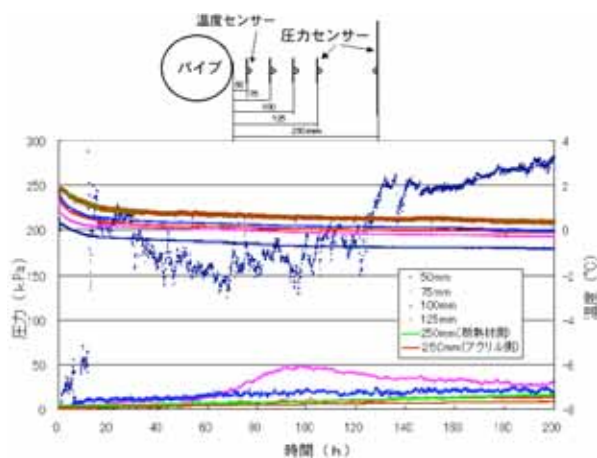


図6 パイプ右側の温度と圧力データ（1）

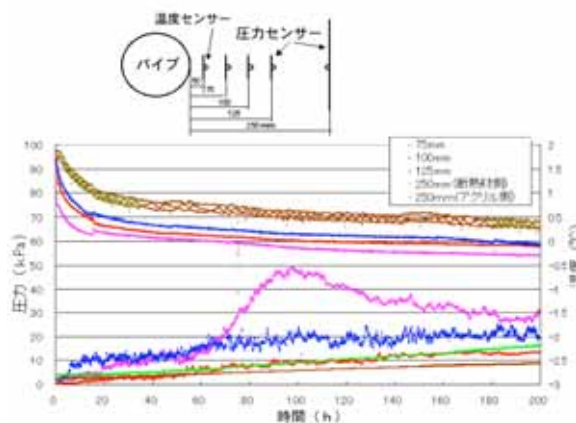


図7 パイプ右側の温度と圧力データ（2）

後に発掘してみた結果、凍土に吞み込まれていたのはこの2つだけであった。このことから、凍土に吞み込まれた時に数十～数百kPaの凍上圧が発生すると考えらる。また未凍土側では、フロストバルブの成長に伴い凍上圧が増加していることがわかる。これらの結果はフロストバルブの成長方向に対して鉛直方向の土圧で

あるが、水平方向の土圧やパイプに作用する凍結土圧に関しては、今回の実験でははっきりとした傾向は掴めなかった。

4. まとめ

1) 寒天試料による実験

- ・ 模型地盤の代わりに寒天を用いた実験により、今回用いた土槽内の熱的2次元性が比較的良好であることが確認された、

2) 模型地盤による実験

- ・ 凍結面においては、凍土の成長方向に数十～数百kPaの凍上圧が発生した
- ・ 凍土の成長に伴い未凍土側では凍結土圧が増加している

参考文献

- 1) 赤川 敏、極寒地のエネルギー開発—永久凍土地帯に挑む—、土木施工、Vol. 45, No. 8, pp. 40-47, 2004, 8.
- 2) 赤川 敏、蟹江俊仁、森 淳子、三上 隆、福田正己、永久凍土地帯の天然ガスパイプラインの現状と今後の課題、寒地技術シンポジウム、vol. 20, pp465-471, 2004. 10.
- 3) 赤川 敏、土・岩・モルタルの凍上現象とそのアイスレンズ発生巨視的メカニズム、雪氷 日本雪氷学会、Vol. 66, No. 2, pp149-161, 2004. 3.