

4. アラスカにおける実規模パイプライン実験

福田チーム 新日本製鐵 大橋一彦

1. はじめに

背景：永久凍土を通過するガスパイプライン計画がシベリアおよびアラスカにて計画されている。しかしながら、既存のガスパイプラインからのメタンの漏洩が散見され、搬送効率や危機管理の側面のみならず、地球温暖化を促進する温室ガスの漏洩としても問題視されている。このような背景から、これを止める方策が求められている。

研究課題と目標：永久凍土地帯に於けるパイプラインからの天然ガスの漏洩（パイプの損傷）の原因を推定し、その対策を提案することを目標とする。

2. 実験

・実験目的

ロシアの永久凍土地帯で稼働している既存のガスパイプラインに散見される不具合（ガスの漏洩）は、その設計、施工、運転のいずれかの不良によるものと推定される。西側諸国に於ては、一般的に永久凍土地帯を通過するガスパイプラインはガスを氷点下に冷やし永久凍土内に埋設し、搬送効率の向上を図るとともに永久凍土の融解を防止しパイプラインの安定を図る計画のようである。しかしながら、ロシアにおいては搬送ガスを氷点下に冷却していない模様であることが様々な聴き取り調査の結果予想された。この点を考慮するとロシアにおけるような不具合は西側諸国においては発生しないと思われる。

しかしながら、永久凍土地帯の南縁に存在する不連続永久凍土地帯においては、ガスを冷却しパイプラインを地中に埋設しても以下のような不具合が予想される。すなわち永久凍土と季節凍土が混在する不連続永久凍土地帯においては、パイプラインの冷却ガス搬送と地中埋設という選択が永久凍土区間では良好に機能するものの、季節凍土区間においては逆にパイプ周囲が凍結し凍上を起こす。この凍上により季節凍土区間ではパイプラインに上方への力が作用する。永久凍土区間ではパイプラインが永久凍土にしっかりと固定されるため、両区間の境界ではパイプラインに大きな曲げ力が働くことになる。

本研究は上記曲げ力によりパイプラインにどのような不具合を発生させるかを原位置における実大実験で確認しようとするものである。

1) 実験計画

○実験場所

実験目的から、実験場所としては永久凍土と季節凍土が隣接し、現実のパイプが搬入でき、地中埋設する重機も稼働でき、ガス冷却のための冷凍システムが調達でき、動力および計測用の電力が調達可能な場所の選定が重要であった。

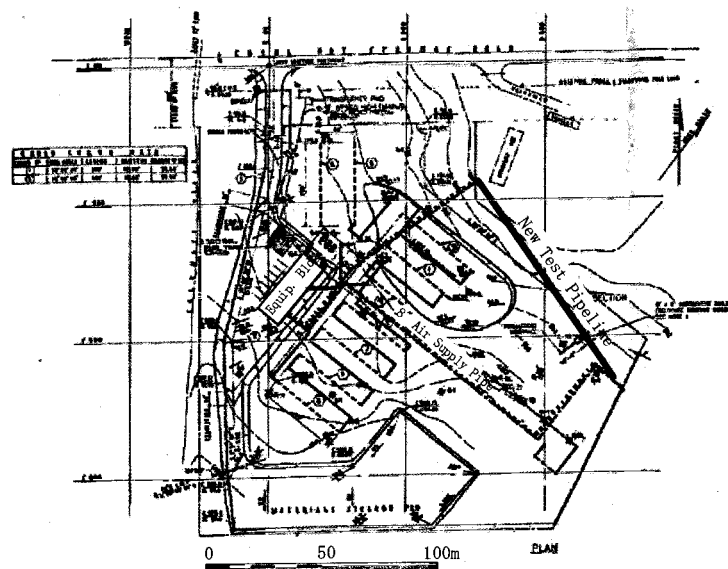


図1 実験ヤードのレイアウト

平成 11 年下半期における調査の結果、15 年程前に全く同様な目的で実大実験が実施され、社会環境

の変化で中断された実験場が候補に上がった。平成 13 年春に現地を調査し、その後のボーリング調査により、場内に永久凍土および季節凍土が共存していることが確認された。同時に、以前使用されていた冷却装置等既存の施設のかかなりの部分が修理をすれば使用可能と判断された。

このような事前調査の結果、実験場は米国アラスカ州フェアバンクス市に決定された。

○実験方法

実験は永久凍土と季節凍土の境界を直角によぎる方向に実大のパイプラインを力学的にその無限長が仮定し得る長さを持ち、適切な深さに埋設し、マイナス温度を循環する。永久凍土側のパイプは循環ガスに依る冷却と周囲の永久凍土による冷却で土の 100 倍程の強度を持つ永久凍土中に固定される。季節凍土側では、搬送ガスの冷却によりパイプ周囲に同心円状の凍土が成長する。この土の凍上性が高ければ、季節凍土側のパイプはパイプ下面の凍上分だけ上方に移動する。結果として、実験の目標である曲げを実際の自然状態で起こすことができる。一般に凍土はクリープし易く、その挙動が非常に温度依存性が高いため、このようなパイプと凍土の相互作用は実大実験なくして把握不可能である。

具体的には、実験結果の信憑性を高める目的から実験は可能な限り現実のガスパイプラインの諸元と合わせた。

すなわち、パイプラインの直径は調達の可能性から外径 90 cm の実際のパイプライン用パイプを使用した。パイプラインの長さは長ければ長いほど良いが、実験場の広さ、コスト、および事前の簡単な数値解析により 105 m と決定した。

循環するガスは安全のために空気とし、その温度は実験主旨から -5° とした。また、パイプラインの埋設深度は国内規格および海外の諸実績から、土被り（パイプ上方の土の厚さ）90 cm と決定した。

○調査事項

温度：全ての事象は地盤の温度環境により引き起こされるため、外気温や地盤内温度の計測は必須である。温度計測地点を図 2 に示す。温度計測点数は 150 点である。計測センサーはサーミスタ温度計である。

パイプ下部の凍上量：季節凍土側パイプ下部の凍上が実験上最も重要な外力をパイプに作用させるため、この量をパイプ直下に設置した 5 個の変位計により自動計測する。

当該変位計の設置場所状況を図 3 に示す。

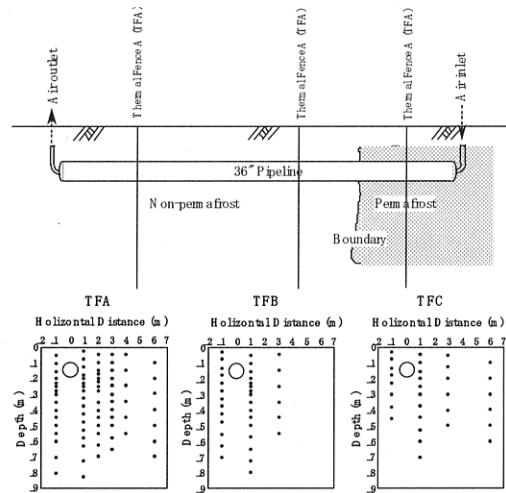


図 2 温度計測位置

(長手方向断面図および各計測位置における温度計配置)

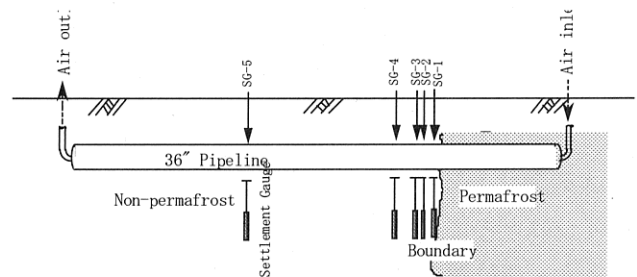


図 3 パイプ直下地盤の凍上量計測位置

(パイプ長手方向鉛直断面)

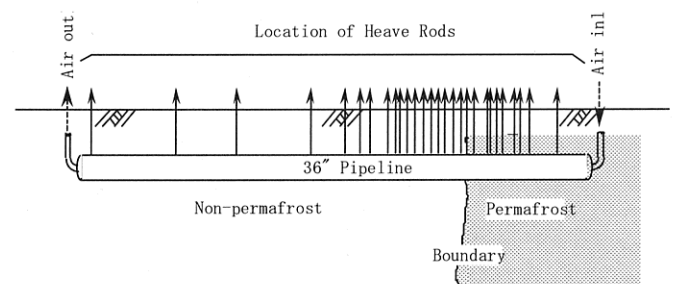


図 4 パイプ鉛直変位計測位置

(パイプ長手方向鉛直断面)

パイプの変形：季節凍土側パイプ下部の凍上力によるパイプの変形はパイプ上部に鉛直に設置された28本の金属棒の上端面を定期的にレベル計測することにより把握する。レベル計測用の金属棒の設置状況を図4に示す。

パイプに発生するひずみ：季節凍土の凍上により変形するパイプラインに発生するひずみは、相互作用を評価するうえで重要な計測量である。このため、パイプの上面及び下面のパイプライン長手方向を主に、一部周方向のひずみを40点で防水型ワイヤーひずみゲージを熔接して自動計測した。ひずみ計の設置状況を図5に示す。

現地地盤の凍上性評価：当該地盤の凍上性はデータ解析上非常に重要な諸量の一つである。このため、パイプライン直上の埋め戻し土中にいわゆる層別沈下計を2ヶ所（1ヶ所に付き異なる4深度に設置）設置した。

その他の計測：現地の気温、風向、風速および地下水位を計測している。

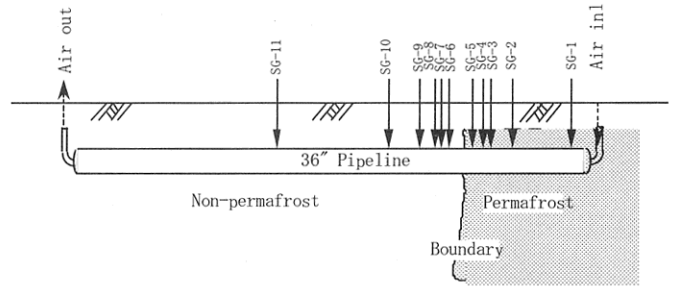


図5 ひずみ計測位置
(パイプ長手方向内鉛直断面図)

2) 現場施工

実験に使用するパイプラインは平成12年10月現地に搬入された。パイプライン埋設のための土木工事は同年11月に着工され、12月10日のパイプラインの圧力試験の完了を以て竣工した。

施工の状態を写真1に示す。



写真1 パイプライン埋設状況

3. 実験結果

1) 概要 (経過)

平成11年12月11日より実験は開始された。実験条件の一つであるパイプライン循環空気の温度は $-5 \sim -15^{\circ}\text{C}$ 程度と変動し、様々な冷凍機の調整の結果多少その振れ幅が改善された。永久凍土側では実験開始初期からパイプラインは永久凍土に包み込まれ、季節凍土側ではパイプライン周囲に凍土が同心円状に計画通り発達した。また、平成12年夏から秋にかけてパイプライン全長に渡り活動層の融解に伴う未凍土が地表から80cm程出現した。このような地盤凍結状況からパイプラインは季節凍土側で上昇し所期の目的である曲げ応力を永久凍土と季節凍土の境界面付近のパイプラインにを地盤の凍上により発生することに成功した。

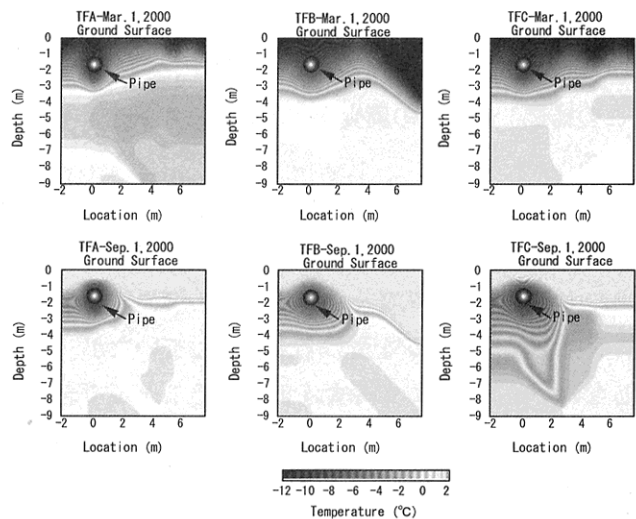


図6 サーマルフェンス A, B, C に於ける3月および9月の温度分布

2) 温度状況 (ガス温度、地盤温度、凍結状況)

図6に、パイプライン延長方向3断面における代表的な冬期と夏期の温度分布を示す。

この図から、冬期および下記の典型的な地中温度分布と、低温ガスパイプ周囲の温度場の状況が良好に把握できる。

3) パイプの変位

図7にパイプ上端面の鉛直変位分布を示す。

図中横軸の0～30m程が永久凍土に埋設してある部分である。その右側は季節凍土中に埋設されている部分の鉛直変位である。

4) パイプのひずみ

図8に平成12年5月1日におけるパイプ上面と下面におけるひずみの分布を示す。同図に示すように、32m付近に曲げの中心が認められる。これは当所の予定どおりである。

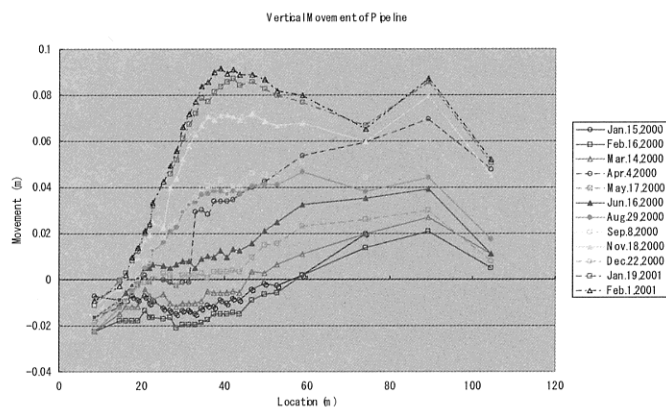


図7 パイプ上端面の鉛直変位

4. 得られた知見

図6に示したサーマルフェンスA、B、Cに於ける温度分布、図7に示したパイプ上端面の鉛直変位の状況および図8に示したパイプの応力分布の変化から以下の知見が得られた：

- 1) 季節凍土側パイプに成長したフローゼンバルブによりパイプに上向きの力が働き
- 2) 夏季に活動層が融け永久凍土側はパイプの上方の押さえが弱くなり上方へ跳ね上がる
- 2) 毎夏これが繰り返されパイプは地上に顔を出す
- 3) この結果、パイプの腐食が促進され、不具合が発生する

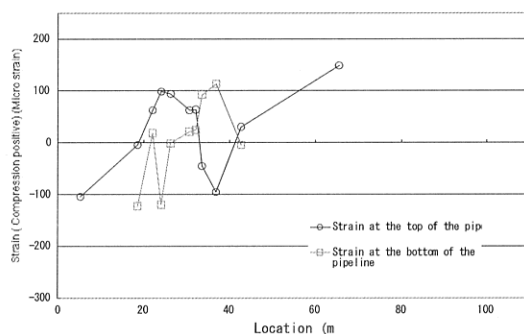


図8 平成12年5月1日に於けるパイプの応力分布

5. 今後の課題

以上のように当初永久凍土と季節凍土の境界に発生する季節凍土側の凍上変位による曲げ応力により、パイプラインはダメージを受けると予想していたが、実験開始後1年半経過した時点で上記のような予想だにしないパイプラインの挙動を計測することができた。これは実物大の実験を実際の不連続永久凍土地帯で実験することにより初めて修得可能な知見である。今後はこの挙動の更なる確認をするとともに、下記の項目に関して検討することとする：

○検討課題活動層融解に伴うパイプの上方への移動の阻止法

- ・埋設深度の増加
- ・永久凍土側パイプ上部の断熱
- ・季節凍土側の断熱による曲げ応力低下