

電気アナログ法による 地中埋設管の影響による土中温度分布

田 中 辰 明
林 英 明
(東京本社設備部)

Determination of Temperature Distribution in the Vicinity of Underground District Heating Pipes by an Electrical Analogy Method

Tatsuaki Tanaka
Hideaki Hayashi

Abstract

District heating has been useful for prevention of air pollution and effective utilization of energy in these few years. Piping which is one of the most important installations in district heating is generally laid in the ground. The problem arises then of the influence of the underground piping on other piping (water supply pipes, gas pipes, power cables, etc.). In order to solve this problem, the authors analyzed underground temperature influenced by the underground piping through an electrical analogy method using electrical resistance paper.

概 要

最近わが国においても、大気汚染公害防止やエネルギーの有効利用のために、地域冷暖房が急速に普及しつつあるが、その主要な設備の一つである地域配管は、地中に埋設されるのが一般的な傾向のようである。そして、この地中埋設管による他の配管等（給水管・ガス管・送電線、樹木等）への影響が問題にされるようになってきた。

著者らはこの問題を解明する一つの方法として、地中埋設管が他の配管等にどのような熱影響を与えるかを知るべく、電導抵抗紙を用いた電気アナログ法により、土中の温度分布を求める解析を行なった。なお、地域配管が他の配管に熱影響を及ぼさないようにするために設ける断熱板の効果、および配管に付設する保温材、さや管の表面温度と配管水温の関係についても同様の方法で解析を行なった。

1. はじめに

地中埋設管の熱損失や土中温度分布等を解析するには、i) 熱伝導の基礎式より求める方法¹⁾、ii) 電解槽による電気アナログ実験²⁾、iii) 熱抵抗Rを系の構成要素について求め、熱流量 $q = \Delta\theta/R$ より求める方法³⁾等があるが、本研究では、電導抵抗紙（基準抵抗2,000Ω）を用いた電気アナログ法⁴⁾により、地中埋設管がある場合の土中温度分布について解析を行なった。

定常状態における地中埋設管の温度降下はそれほど大きくなく、保温材または土壌中の熱流の管軸方向成分は、管軸と直角方向成分に比して無視しうると考え

られる。したがって非常に長い管の微小区間における損失熱量および温度の検討は、二次元定常問題として取扱うことができるという条件で解析を行なった。

埋設配管系の解析モデルについて次のように仮定する。

- 1) 一つの境界面の温度は一様である。
- 2) 一つの要素は熱的に等質等方性である。
- 3) 土壌、保温材中の埋設管の管軸方向への熱流成分は無視しうる。

これらの仮定により、温度 t_1 の境界面1から温度 t_2 の境界面2へ流れる熱流量 q_{12} は、この境界面間の熱抵抗を $R_{12}(=R_{21})$ とすると、次式で表わされる。

$q_{12} = (t_1 - t_2) / R_{12}$
 この式の形は、電気回路網において理想的な電気抵抗 R 、電位差 v 、電流 i との間に生ずる関係 $i = v / R$ と、まったく同様である。

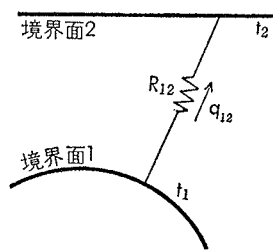


図-1

したがって、熱流量を電流に、温度差を電位差に（温度を電位に）、熱抵抗を電気抵抗に読み換えれば、熱回路網は代表的な回路網である電気回路網と同様の手法を使って解くことができる。

本研究は、ラプラスの場を電導抵抗紙の上で表現し解を得た。電導抵抗紙の幅 41cm は地下10mまでの土壌および地表面の表面熱抵抗に、長さ 2.5~4m は十分に広い土地の広がりに対応させた。地表面の表面熱抵抗は、次式により地面の材料（土壌）の相当厚 δ として近似した。

$$\delta = \lambda / \alpha_0$$

λ : 土の熱伝導率
 α_0 : 地面の表面熱伝達率

本実験では、 $\lambda = 1.4 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ 、 $\alpha_0 = 10 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ として、 $\delta = 0.14 \text{ m}$ と仮定した。なお、土中の温度に関しては、一年を通じて常に地表面下10mにおいて 15°C 一定と仮定した。

2. 水平離隔距離1~5mにおける土中温度(I)

地中埋設管が1本の場合には、管の縦方向の中

心線を対称軸として左右対称となるのでその一方について解析すればよい。外気温度、配管の表面温度、地下10mにおける土中温度をそれぞれ t_a 、 t_b 、 t_c とし、それらに対応する電位を V_a 、 V_b 、 V_c とすれば、

$$V_c = \frac{t_c - t_a}{t_b - t_a} \cdot (V_b - V_a) + V_a$$

の関係がある。

これらに相当する電位を電導抵抗紙上のそれぞれの位置に与え、配管中心よりの水平離隔距離 1~5m に相当する位置における電位 $V_1 \sim V_5$ を実測した。

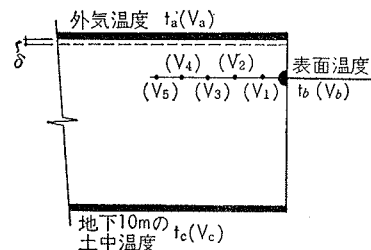


図-2

実験条件を次に示す。

●配管外径（保温材およびさや管部分を含む）

180mm	管呼び径 100A	保温材 厚 40mm
250mm	" "	さや管外径 250mm
350mm	" 250A	保温材 厚 50mm
400mm	" "	さや管外径 400mm
630mm	" 500A	保温材 厚 65mm
750mm	" "	さや管外径 750mm
910mm	" 750A	保温材 厚 80mm
1,000mm	" "	さや管外径 1,000mm

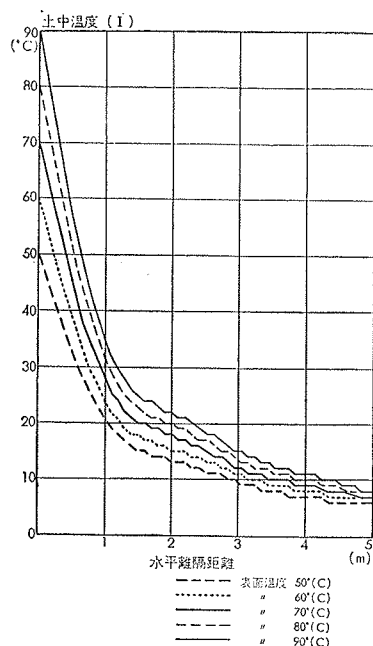


図-3 配管外径 180mm 外気温度 0°C
 埋設深さ 2m 表面温度 $50 \sim 90^\circ\text{C}$

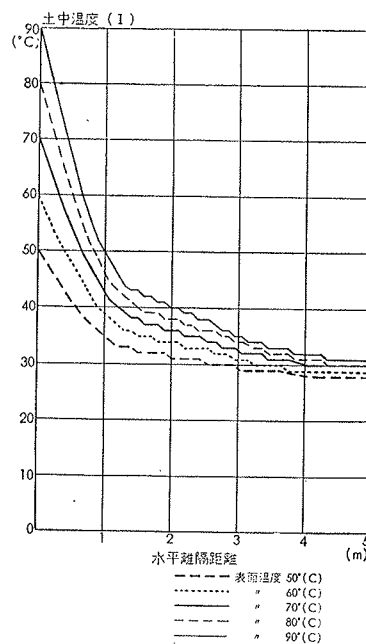
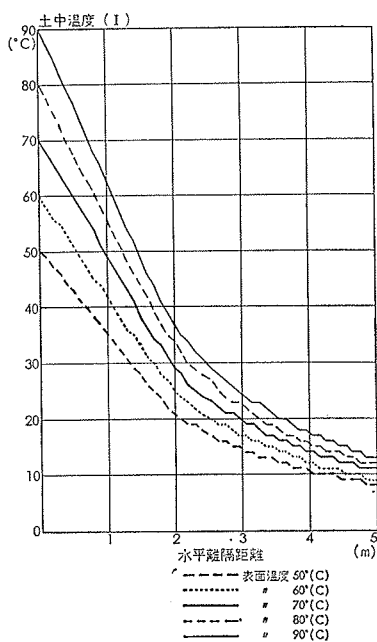
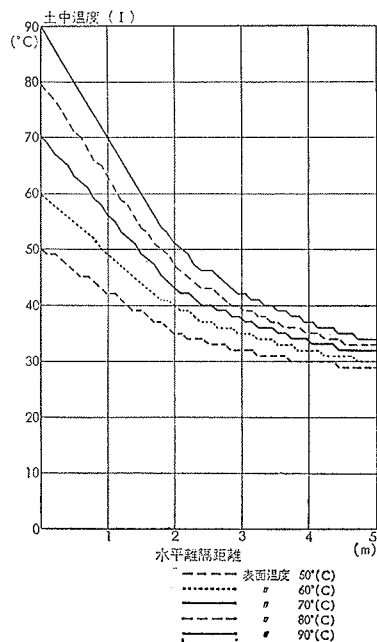


図-4 配管外径 180mm 外気温度 30°C
 埋設深さ 2m 表面温度 $50 \sim 90^\circ\text{C}$



図一五 配管外径 1,000mm 外気温度 0°C
埋設深さ 2m 表面温度 50~90°C



図一六 配管外径 1,000mm 外気温度 30°C
埋設深さ 2m 表面温度 50~90°C

●外気温度

0°C (冬の場合), 30°C (夏の場合)

●埋設深さ (地表面より配管中心までの距離)

1m, 2m, 3m

●表面温度 (保温材あるいはさや管の表面の温度)

50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C

実測電位 V_i から土中温度 t_i への変換は次式による。

$$t_i = \frac{V_i - V_a}{V_b - V_a} \cdot (t_b - t_a) + t_a$$

実験結果は, t_i の間の値は補間公式により求め, ラインプリンタによるグラフで表わした。結果の一部を図一3~6に示す。図中の縦軸は土中温度 (0°C~90°C), 横軸は水平離隔距離 (0~5m) を示している。

3. 水平離隔距離 1~5m における土中温度 (II)

(断熱板を使用した場合)

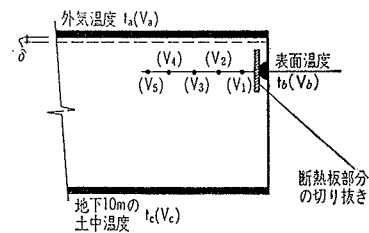
断熱板を使用した場合の土中温度を調べるために, (I) の実験と同様にして, 断熱板部分を模型上の縮尺による大きさだけ電導抵抗紙を切り抜いて, 配管中心よりの水平距離 1~5m に相当する位置における電位 $V_1 \sim V_5$ を実測した。

実験条件は, 配管外径, 外気温度, 表面温度に関しては (I) と同様であり, 埋設深さに関しては 2m の場合のみ行なった。断熱板の大きさ (断面寸法) は, 表一1に示したように決めた。

実験結果は (I) と同様の方法で求めた。その一部

を図一8~11に

示してあるが, 図中の縦軸は土中温度 (0~50°C), 横軸は水平離隔距離 (1~5m) を示している。



図一7

管 径(呼び径)	断 熱 板
1 0 0 A	750×50mm
2 5 0 A	1,000×50mm
5 0 0 A	1,500×50mm
7 5 0 A	2,000×50mm

表一1 断熱板の断面寸法

4. 配管水温と表面温度との関係

前記の実験においては, いずれも表面温度 (保温材あるいはさや管の表面の温度) をパラメータとしているが, 条件として配管水温が与えられる場合も多いと考えられる。そこで配管水温と表面温度との関係を求めるために以下に記すような実験を行なった。

地中埋設管の保温材を考慮する場合, 保温材の部分は全体の系に対して小さ過ぎ, また保温材の熱伝導率は土の熱伝導率に対して小さ過ぎるので, 保温材部分の熱伝導現象をアナログで正確に模擬するのは困難である。そこで保温材の熱抵抗に相当する電気抵抗を計算で求め, 配管の外側にその部分の抵抗 R' を入れる

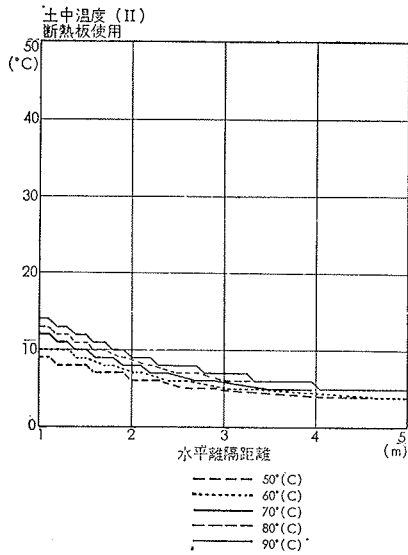


図-8 配管外径 180mm 外気温度 0°C
断熱板 750×50mm 表面温度 50~90°C

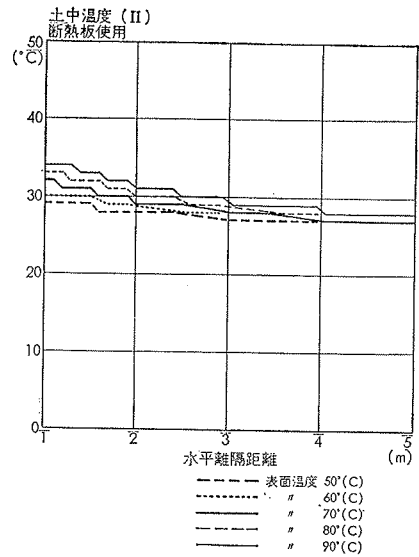


図-9 配管外径 180mm 外気温度 30°C
断熱板 750×50mm 表面温度 50~90°C

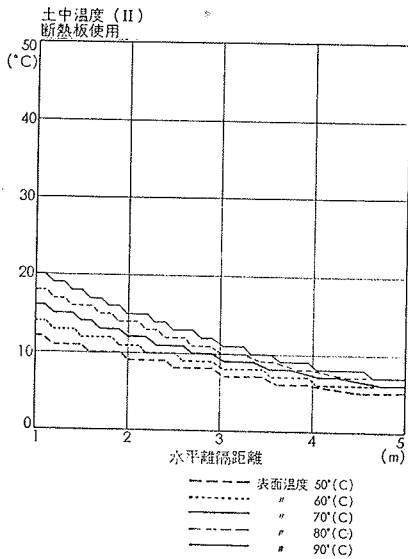


図-10 配管外径 1,000mm 外気温度 0°C
断熱板 2,000×50mm 表面温度 50~90°C

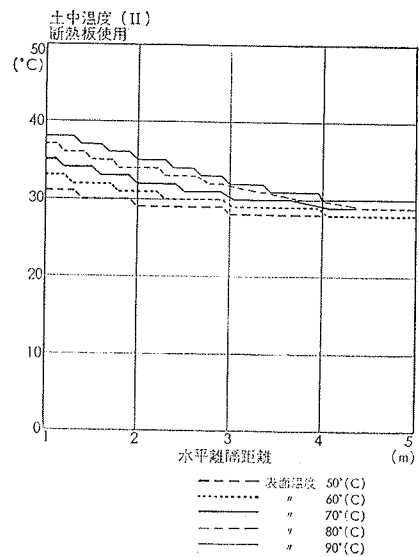


図-11 配管外径 1,000mm 外気温度 30°C
断熱板 2,000×50mm 表面温度 50~90°C

方法を採用した。保温材の熱抵抗に相当する電気抵抗 R' と電導抵抗紙の基準抵抗 R との熱抵抗比は

$$\frac{R'}{R} = \frac{\lambda}{\lambda' \pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

(λ : 土の熱伝導率
 λ' : 保温材の "

で与えられる。

実験は、外気温度 t_a 、表面温度 t_b 、地下10mにおける土中温度 t_c に相当する電位 V_a 、 V_b 、 V_c を電導抵抗紙上のそ

れぞれの位置に与え、配管水温 t に相当する電位 V を測定した。

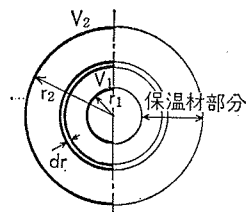


図-12

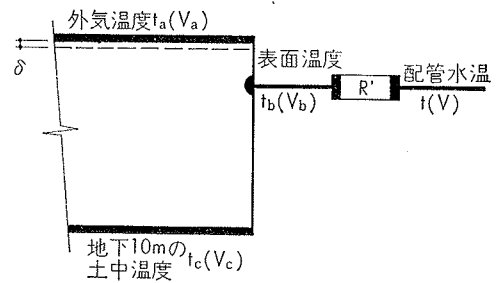
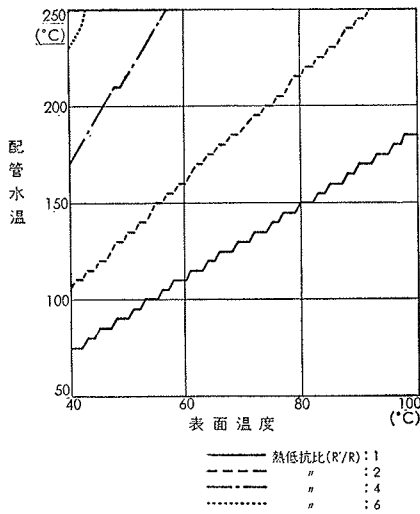


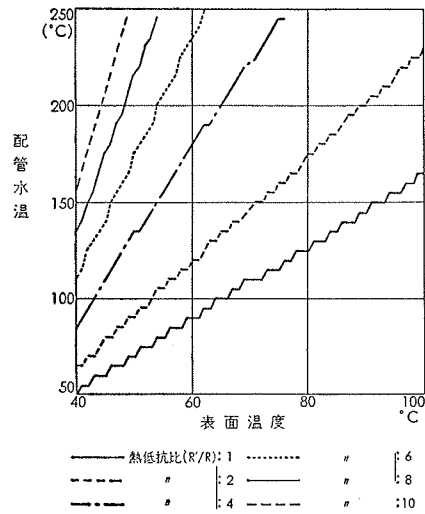
図-13

実験条件は

- 配管外径 (保温材およびさや管部分を含む)
180mm, 250mm, 350mm, 400mm,
630mm, 750mm, 910mm, 1,000mm



図一14 配管外径 180mm 外気温度 0°C
埋設深さ 2m 熱抵抗比 1~10



図一15 配管外径 180mm 外気温度 30°C
埋設深さ 2m 熱抵抗比 1~10

●外気温度

0°C (冬の場合), 30°C (夏の場合)

●埋設深さ (地表面より配管中心までの距離)

1m, 2m, 3m

●熱抵抗比

R'/R=1 (グラフで—————で示す)

” 2 (” ----- ”)

” 4 (” - - - - - ”)

” 6 (” ”)

” 8 (” _____ ”)

” 10 (” - - - - - ”)

とした。

なお、実測電位Vから配管水温tへの変換は、

$$t = \frac{V - V_x}{V_y - V_x} \cdot (t_b - t_a) + t_a$$

により、実験結果は、それぞれの熱抵抗比に対して直線近似して表わしたが、その結果の一部を図一14~15に示した。縦軸は配管水温(50~250°C)を、横軸は表面温度(40~100°C)を示している。表一2は、前記の実験に用いた管についての熱抵抗比の値の例である。

5. おわりに

この研究は日本道路協会熱供給分科会(堀 奏晴分科会長)、日本地域冷暖房協会計画基準委員会(中原 信生主査)の依頼により行なわれたものである。委

管 径	保温材厚さ	さや管外径	熱 抵 抗 比
100 A	40 mm		5.24
100 A		250 mm	8.17
250 A	50 mm		3.00
250 A		400 mm	4.19
500 A	65 mm		2.06
500 A		750 mm	3.61
750 A	80 mm		1.70
750 A		1,000 mm	2.54

表一2 熱抵抗比 (R'/R)

員会関係諸氏ならびに有益など教示を頂いた技術研究所田辺四郎次長に謝意を表します。

参考文献

- 1) 川下研介：熱伝導論 138~142
- 2) 岡田孝夫ほか：地中埋設管からの熱損失(第2報)、昭和45年度秋季学術講演会前刷集〔空気調和・衛生工学会〕
- 3) 岡田旭郎：地中埋設管の損失熱量と温度降下の概略計算法, 空気調和・衛生工学 43—6
- 4) 田中辰明：地中埋設管からの熱損失計算, 日本建築学会関東支部第41回学術研究発表会(1970年)
- 5) T. Tanaka, Ermittlung der Wärmeverluste erdverlegter Rohrleitungen mit Hilfe einer thermisch-elektrischen Analogie, HLH 24 (1973) Nr. 5 Verlag