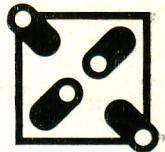


# 電気アナログ法による地中埋設管の熱損失・温度分布計算

研究論文



地中埋設の熱供給管の熱損失や土中の温度分布を、電気は通るが、平面で一様な抵抗のある“電導抵抗紙”を使用して、電気アナログ法により解を得た。熱損失計算については、配管が1本埋設された場合、多数埋設された場合、配管に保温材がある場合の取扱いについて解説する。

田中辰明\*  
林英明\*\*

## 1はじめに

最近エネルギーの有効利用、大気汚染防止などのために地域冷暖房が奨励され、工事例も多くなってきた。地域冷暖房施設の重要な設備の一つに地域配管がある。その地域配管は、地中に埋設されるのが通例である。地域冷暖房設備を設計する側からいえば、地域配管からの熱損失(または、熱取得)はぜひ知らなければならないし、地域冷暖房配管の熱が、他の地中埋設管など(ガス管・水道管・電力ケーブル・街路樹など)へ及ぼす影響を事前に調査し、他の配管に悪影響がないようにしなければならない。このためには、地域冷暖房配管が埋設された場合の地中温度分布を知ることが必要となってくる。

筆者らは、比較的簡単にかつ直感的に解を得られる方法として、電気は通るが、平面的に均一な抵抗があるという“電導抵抗紙”を使って研究を行なってきたので、成果をここに報告する。

## 2電気アナログについて

熱伝導の現象が、電気伝導の現象に置き換えられることはよく知られている。地中埋設管の熱の問題を定常状態について解こうとする場合には、熱容量は関係しない。したがって温度差を電位差に、熱抵抗を電気抵抗に、熱流量を電気流量にそれぞれ対応させて、電気の現象として問題を扱うことができる。二次元の定常熱伝導方程式は、ラプラスの式で示される。すなわち、

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} = 0 \quad (1)$$

電気伝導の場合は、

$$\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} = 0 \quad (2)$$

で示され、それぞれ相似となることを示している。

ここに熱と電気の対応を示すと、表-1 のようになる。

二次元の電気モデルは、電気は通るが一様の抵抗がある“電導抵抗紙”を使って作られた。電導抵抗紙または電導抵抗布は、内外で各種のものが出ていている。これは一般に紙または布にカーボンプラックを塗ったものである。布に塗ったものは抵抗が均一であるが、布がグラスファイバ製であるところから、使用中に布が鋭角に曲がったようなとき、カーボンが部分的にはく(剥)離してしまうことがある。紙にカーボンを塗ったものは、ローラで塗ったように想像され、縦方向と横方向で5%程度抵抗が異なるものがある。

この研究では、縦方向、横方向の抵抗の少なかった米国の紙製のものを使用し、実験のつど検査を行なった。電導抵抗紙の時間経過による抵抗変化は認められず、満足のいく実験が行なえた。使用された電導抵抗紙の基準抵抗は2 kΩである。

電導抵抗紙を使った直接アナログの研究は、カーブラス氏の著書<sup>①</sup>にもみられるほか、東欧を含む欧州でしば

表-1 热と電気の現象の対応

熱の現象		電気の現象	
$\phi$	熱流	$I$	電流
$T$	温度	$V$	電位
$\Delta T$	温度差	$\Delta V$	電位差
$\lambda$	熱伝導率	$\nu$	電導度
$r$	熱伝導抵抗	$R$	電気抵抗

\* (株)大林組技術研究所 正会員

\*\* (株)大林組設備部 正会員

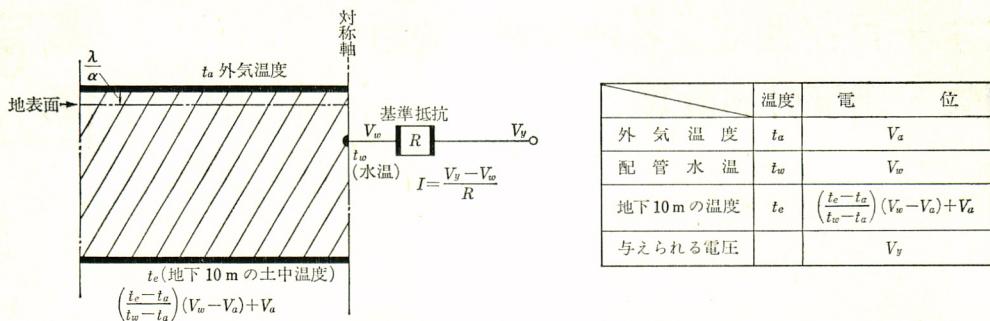


図-1 保溫材のない単管が埋設された場合の熱損失を求めるモデル

しば研究が見られる。この方法を地中埋設管の熱損失計算に応用し、保溫材の取扱い、損失熱量の計算法などを確立したのは著者らで、研究の一部を田中が、ブダペストで開かれた第2回国際地域暖房会議<sup>7)</sup>(1973年5月)に報告したところ、同種の研究をしているかたがたよりたいへん興味をもたれたものである。

### 3 地中埋設管の熱損失計算

幅50cmの電導抵抗紙を無限に広がる大地に対応させ、十分な長さ4m程度に切り、外気温度に相当するところと、地下10mに相当するところに、幅1cm程度の乾燥すると電気伝導のきわめてよい「誘電ペンキ」を塗り、そこに外気温度、地中温度に相当する電圧を与えて実験を行なった。

実験にあたっては、地下10mの地中温度は夏も冬も15°C一定、外気温度は冬の場合0°C、夏の場合30°Cと仮定した。実験の様子を写真-1に示す。

#### 3.1 保溫材のない単管からの熱損失計算

電導抵抗紙の模型上で、配管の埋設深さに相当する位置に、模型での大きさに相当させ配管の断面積を誘電ペンキで塗布する。送り湯の水温により、配管外表面まで配管中の水温と同じ温度になったという仮定で、配管断面積として塗布された誘電ペンキ部分に送水温度に相当する電位を与える。地表面の熱伝達率は11.6W/(m²K)(=10kcal/m²hdeg)と仮定し、地表面の表面熱伝達抵抗の相当厚さがとられた。土の熱伝導率は、一様に、1.63W/(mK)(=1.4kcal/mhdeg)と仮定したので、相当厚さは0.14mということになる。

さて、配管に対応する電極から流入(出)する電流量を知れば、配管の損失(取得)熱量がわかる。電流量の測定に電流計を使って行なうと、その内部抵抗のため回路の条件が変化してしまうことがある。電流計を使わないで電流量を知るには、配管に対応する電極に電位を与えるとき、既知の抵抗(後述のように基準抵抗を入れると計算しやすい)を通して与え、その抵抗による電圧降下から

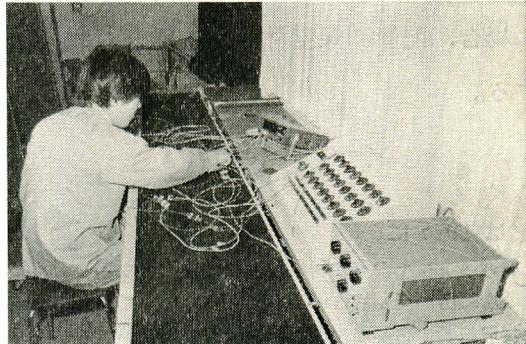


写真-1 電気アノログ法による実験の様子

電流量を知るとよい。

地中に配管が1本あるときは、管の縦方向の中心線を軸として左右対称となるから、その一方について解けばよい。いま外気温度を $t_a$ 、配管の温度を $t_w$ 、土中10mの温度を $t_e$ とし、それぞれに対応する電位を $V_a$ 、 $V_w$ 、 $V_e$ とすると、

$$V_e = \left( \frac{t_e - t_a}{t_w - t_a} \right) (V_w - V_a) + V_a \quad \dots \dots \dots (3)$$

で示される。

図-1において、配管に相当する電極に流入する電流量 $I$ が測定されたとき、それにスケールファクタ $qm$ を乗じなければ熱量として求まらない。すなわち、

$$\Phi = 2qmI \quad \dots \dots \dots (4)$$

で示される。

ここに、

$\Phi$ ：配管からの流出(入)熱量 W/m

$q$ ：土の熱抵抗と電導抵抗紙の電気抵抗の関係を示す係数で、式(5)で示される

$m$ ：温度差と電位差の関係を示すスケールファクタ K/V

$$q = \lambda_E R \quad [\Omega W/(mK)] \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、

$\lambda_E$ ：土の熱伝導率 W/(mK)

$R$ ：電導抵抗紙の基準抵抗 Ω

表-2 地中埋設配管の熱損失(単管保温材なし)(単位 W/m, 1 W/m = 0.860 kcal/m h)

埋込み深さ m		0.5			1.0			1.5			2.0			3.0		
外気温度 °C	送水温度 °C	100A	250A	500A												
0	6	16	22	35	9	16	20	8	10	14	6	8	9	2	3	5
0	12	36	48	76	27	36	47	22	29	37	20	26	31	14	20	26
0	45	145	192	301	113	151	200	104	136	171	97	127	154	88	107	137
0	100	317	423	671	261	341	495	235	301	374	220	285	359	202	260	326
0	180	579	772	1221	476	619	811	423	554	716	407	521	658	374	488	595
30	6	-83	-101	-164	-58	-78	-98	-53	-66	-86	-49	-60	-77	-40	-52	-65
30	12	-55	-56	-126	-48	-57	-78	-40	-50	-63	-35	-44	-57	-36	-47	-47
30	45	51	71	108	45	58	78	42	55	71	44	55	66	43	55	66
30	100	228	309	481	191	248	335	171	228	293	171	213	277	158	204	254
30	180	566	648	956	404	537	699	365	469	606	356	456	573	329	427	521

注 土の熱伝導率 1.63 W/(m K)。

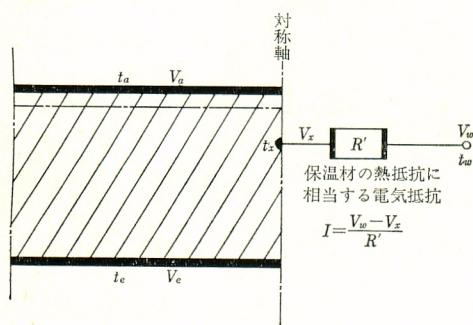


図-2 保温材のある单管が埋設された場合の熱損失を求めるモデル

電極に流入または流出する電流は、図-1で基準抵抗前後の電位を  $V_y, V_w$  とすると、オームの法則により、

$$I = \frac{V_y - V_w}{R} \quad \dots \dots \dots (6)$$

で示される。

いま模型上の任意の点の温度を  $T$ 、それに対応する電位を  $V$  とすると、

$$\frac{T - t_a}{t_w - t_a} = \frac{V - V_a}{V_w - V_a} \quad \dots \dots \dots (7)$$

で示され、さらに、

$$T - t_a = \frac{t_w - t_a}{V_w - V_a} (V - V_a) \quad \dots \dots \dots (8)$$

となる。であるから、配管からの流出(入)熱量  $\phi$  は、

$$\phi = 2qmi$$

$$= 2\lambda_E R \frac{t_w - t_a}{V_w - V_a} \cdot \frac{V_y - V_w}{R} \quad \dots \dots \dots (9)$$

で示されるが、 $R$  はうまく消去され、

$$\phi = 2\lambda_E \frac{V_y - V_w}{V_w - V_a} (t_w - t_a) \quad \dots \dots \dots (10)$$

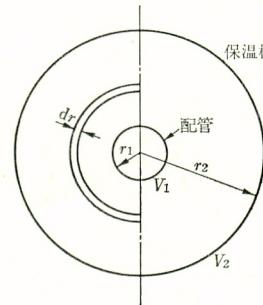


図-3  
保溫材のある  
配管の断面

となる。

この方法で求めた配管径 100 A, 250 A, 500 A で、埋設深さ 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m, 3.0 m, 送水温度 6°C, 12°C, 45°C, 100°C, 180°C の夏と冬の外気条件に対する損失熱量(取得熱量)を表-2 に示す。

### 3.2 保溫材のある单管からの熱損失

多くの地中埋設管は保溫材で被覆されている。土と保溫材では、熱伝導率が 28 倍近くも異なるとの、全体の系に対し配管の保溫材の部分が小さすぎる。このため保溫材部分の熱伝導現象を、アノログ法で正確に模擬するのは困難になってくる。特に数多くの計算を行なおうとすれば、簡易にできる方法が望ましい。

そこで保溫材の熱抵抗に相当する電気抵抗を計算で求め、図-2 に示すように、配管の外側にその部分の抵抗を入れるという方法を採用した。この場合模型上での誘電ペンキの塗布は、保溫材を含めた配管断面に行なわれる。保溫材の熱抵抗を電気抵抗に置き換える方法は、保溫材内の温度分布は半径が等しい所はすべて等しい。すなわち保溫材の外表面温度は、どこでも同じであるということになる。

これは実際の現象としては正しくないが、そもそも土の熱伝導率も仮定値を使っていることから、近似計算としては十分な仮定である。保温材の熱抵抗に対応する電気抵抗  $R'$  を求めるには、図-3 に示す配管で保温材部分の電気伝導度を  $\nu_I$  とすると、保温材を流れる電流は、

$$i = -\nu_I \frac{dV}{dr} \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

となる。

模型上の保温材外表面温度に対応する電位を  $V_2$ 、配管に接する保温材の温度に対応する電位を  $V_1$  とすると、つぎのように式が展開され  $R'$  が求められる。

$$I = \pi r i \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

$$I = -\pi r \nu_I \frac{dV}{dr} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

$$I \frac{dr}{r} = -\pi \nu_I dV \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

$$I \left( \ln \frac{r_2}{r_1} \right) = \pi \nu_I (V_1 - V_2) \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

オームの法則により、

$$R' = \frac{V_1 - V_2}{I} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

$$R' = \frac{1}{\pi \nu_I} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

$$\frac{\lambda_E}{\lambda_I} = \frac{\nu_E}{\nu_I} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

そして、

$$\nu_E = \frac{1}{R} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

$$\therefore R' = \frac{\lambda_E R}{\lambda_I \pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

ここで、

$\lambda_E$  : 土の熱伝導率 W/(m K)

$\lambda_I$  : 保温材の熱伝導率 W/(m K)

$V_2$  : 保温材外側の電位 V

$V_1$  : 保温材内側の電位 V

$\nu_E$  : 模型上の土の電気伝導度 1/Ω m

$\nu_I$  : 模型上の保温材の電気伝導度 1/Ω m

$R$  : 電導抵抗紙の基準抵抗 Ω

$r_1$  : 配管の半径 m

$r_2$  : 保温材を含めた配管の半径 m

土の熱伝導率を 1.63 W/(m K) (= 1.4 kcal/m h deg), 保温材の熱伝導率を 0.058 W/(m K) (= 0.05 kcal/m h deg) と仮定した場合の管径 100 A, 250 A, 500 A, 750 A に対する  $R'$  を表-3 に示す。表中の“対称の場合”とは、保温材のある配管が 1 本埋設されている場合，“非対称”とは、2 本以上の配管が埋設されている場合を意味している。

各種径の配管に対して使用された保温材の厚さは、表-3 に示すとおりで、日本の地域暖房配管に使われる標準的な保温厚さである。単管に保温材がある場合の熱

表-3 保温材の熱抵抗に相当する電気抵抗  $R'$  の例

配管呼び径 A	保温材 mm 厚	対称の場合	非対称の場合
100	40	5.24 R	2.62 R
250	50	3.00 R	1.50 R
500	65	2.06 R	1.03 R
750	80	1.70 R	0.85 R

損失  $\phi$  を求めるには、保温材のない単管の場合と同様に、左右対称性により半分の模型で解が得られる。すなわち式(4)により  $\phi$  が求められ、ここで  $I$  は配管の電極に流入(出)する電流で、

$$I = \frac{V_w - V_x}{R'} = \frac{V_w - V_x}{\frac{\lambda_E R}{\lambda_I \pi} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

図-1 と 図-2 を比較したとき、配管水温  $t_w$  の位置が抵抗の前後に倒置していることに気がつく。すなわち保温材のある場合は、保温材の熱抵抗に相当する電気抵抗  $R'$  を通して水温  $t_w$  に相当する電位  $V_w$  を与え、系全体のバランスで  $V_x$  が定まる。 $V_x$  は保温材表面温度に対応する電位である。

したがって、 $\phi$  はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \phi &= 2\lambda_I \pi (t_a - t_w) \frac{V_w - V_x}{(V_a - V_w) \ln \frac{r_2}{r_1}} \\ &= \frac{2\lambda_I \pi (t_a - t_w) (V_w - V_x)}{(V_a - V_w) \ln \frac{r_2}{r_1}} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

このようにして求めた配管径 100 A, 250 A, 500 A で、埋設深さ 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m, 3.0 m, 配管水温 6°C, 12°C, 45°C, 100°C, 180°C の夏と冬の外気条件に対する熱損失量(熱取扱量)を表-4 に示す。

この場合土の熱伝導率  $\lambda_E$  は、1.63 W/(m K) (= 1.4 kcal/m h deg), 保温材の熱伝導率  $\lambda_I$  は、0.058 W/(m K) (= 0.05 kcal/m h deg) と仮定され、100 A の配管には 40 mm, 250 A には 50 mm, 500 A には 65 mm の保温材が使われたとしている。

### 3.3 多数の配管が地中に埋設された場合の配管からの熱損失

多数の配管が地中に埋設されている場合のアノログ解法は、配管の中心縦軸に関し左右対称にはならないので、解法が若干異なってくる。すなわち配管に保温材がある場合、アノログ模型の外側につける保温材の熱抵抗に相当する電気抵抗  $R'$  は、つぎのようになる。模型上での保温材の電気伝導度を  $\nu_I$ , 土の部分の電気伝導度を  $\nu_E$  とすると式(11)が適用され、

$$\begin{aligned} I &= 2\pi r i \\ &= -2\pi r \nu_I \frac{dV}{dr} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

表-4 地中埋設管の熱損失(単管保材あり)(単位 W/m, 1 W/m = 0.860 kcal/m h)

埋込み深さ m		0.5			1.0			1.5			2.0			3.0		
外気温度 °C	配管水温 °C	100A	250A	500A												
0	6	2	5	7	2	3	6	2	3	5	1	2	3	1	1	1
0	12	6	10	15	6	9	13	5	8	12	5	8	10	3	6	8
0	45	24	41	59	23	38	55	22	37	51	22	36	49	21	34	47
0	100	55	92	133	52	88	123	51	85	117	50	83	114	49	80	109
0	180	98	166	238	95	159	223	93	155	216	92	151	208	91	148	199
30	6	-13	-21	-30	-12	-20	-28	-12	-19	-26	-10	-17	-24	-9	-16	-22
30	12	-9	-16	-23	-8	-15	-21	-8	-14	-19	-8	-13	-17	-7	-12	-15
30	45	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	16	22	10	16	22
30	100	38	66	95	38	65	91	38	64	87	38	63	86	38	63	85
30	180	83	140	202	81	136	186	80	133	184	79	131	180	79	130	177

注 土の熱伝導率  $1.63 \text{ W}/(\text{m K})$ 。保温材の熱伝導率  $0.058 \text{ W}/(\text{m K})$ 。

保溫材厚さ

$$I\left(\ln \frac{r_2}{r_1}\right) = 2\pi\nu_I(V_1 - V_2) \dots \quad (25)$$

オームの法則により再び式(16)が使え,

$$R' = \frac{1}{2\pi\nu_r} \ln \frac{r_2}{r_1} \dots \quad (26)$$

いま土の熱伝導率を  $\lambda_E$ 、保温材の熱伝導率を  $\lambda_I$  とすると、式(18)と式(19)により、

$$R' = \frac{\lambda_E R}{2\lambda_I \pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \dots \quad (27)$$

となる。

土の熱伝導率  $\lambda_E$  を  $1.63 \text{ W}/(\text{m K}) (=1.4 \text{ kcal}/\text{m h deg})$  と仮定し、管径  $100 \text{ A}$  には  $40 \text{ mm}$ ,  $250 \text{ A}$  には  $50 \text{ mm}$ ,  $500 \text{ A}$  には  $65 \text{ mm}$ ,  $750 \text{ A}$  には  $80 \text{ mm}$  厚の保温材が使われ、その熱伝導率が  $0.058 \text{ W}/(\text{m K}) (=0.05 \text{ kcal}/\text{m h deg})$  である場合、複数管が埋設されたときの  $R'$  は表-3に非対称の場合として示されている。

配管の熱損失 $\phi$ を求める式は、配管に保温材がない場合つぎのように示される。すなわち、

$$\begin{aligned}\Phi &= qmI \\ &= R\lambda_E \frac{t_w - t_a}{V_w - V_a} \cdot \frac{V_y - V_w}{R} \\ &= \lambda_E \frac{V_y - V_w}{V_w - V_a} (t_w - t_a) \quad \dots \dots \dots \quad (28)\end{aligned}$$

配管に保溫材がある場合はつぎのようになる。

$$\phi = gmI$$

$$= \lambda_I \pi (t_a - t_w) \frac{V_w - V_x}{(V_a - V_w) \ln \frac{r_2}{r_1}} \\ = \frac{\lambda_I \pi (t_a - t_w) (V_w - V_x)}{(V_a - V_w) \ln \frac{r_2}{r_1}} \dots \dots \dots (29)$$

65 mm 厚の保溫材のある 500 A の配管 2 本と、保溫材のない 800 A の配管 2 本の合計 4 本が、埋設された場合の各配管からの熱損失計算例を表-5-6 に示す。

#### 4 地由埋設管による地由温度分布について

熱供給管が地中に埋設された場合、その発熱により電力ケーブル、水道管、電話線など他の地中埋設管や街路樹などに悪影響を及ぼすのではないかという懸念もある。そこで熱供給管が埋設された場合の地中温度分布を求めるのもたいせつなことになる。電導抵抗紙上の模型で外気温度、地下 10 m の温度、地中配管の温度に、それぞれ相当する電位を与えたとき得られる等電位線は、そのまま地中の等温線になる。いま模型上で任意の点の電位が  $V$  であったとすると、その点の温度  $T$  を知るには再び図-1 にもどって式(7)より、

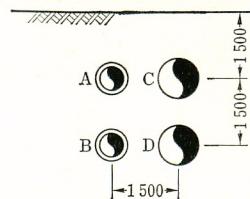
$$T = \frac{V - V_a}{V_w - V_a} (t_w - t_a) + t_a \quad \dots \dots \dots \quad (30)$$

により求められる。このようにして求めた等温線図の例を図-4.5に示す。

埋設した熱供給管が、他の埋設管に熱の悪影響を与えないように、両者の間に断熱板を設置し、熱の悪影響を緩衝させることもある。このような場合の地中温度分布を求める場合には、断熱板に相当する部分を切り取って実験

表-5 4本配管が埋設された場合の熱損失(単位 W/m, 1 W/m = 0.860 kcal/m h)

- A :  $\phi 500$  保温材あり(65 mm 厚)  
 B :  $\phi 500$  保温材あり(65 mm 厚)  
 C :  $\phi 800$  保温材なし  
 D :  $\phi 800$  保温材なし



	A	B	C	D		A	B	C	D	
外気温°C	水温°C	180	100	15	5	外気温°C	45	35	15	5
0		109.9	52.2	4.9	-118.9	0	27.3	16.6	79.8	-58.6
30		100.4	48.3	-112.3	-166.1	30	15.8	12.2	-45.6	-105.8
外気温°C	水温°C	180	100	5	15	外気温°C	45	35	5	15
0		108.3	50.6	-100.9	-22.8	0	24.9	14.7	-33.4	38.3
30		102.0	46.6	-221.4	-68.4	30	17.0	10.2	-153.9	-9.8
外気温°C	水温°C	100	180	15	5	外気温°C	35	45	15	5
0		53.7	105.1	21.2	-146.5	0	17.6	22.9	77.3	-58.6
30		45.8	101.2	-92.8	-195.4	30	9.1	19.0	-44.0	-108.3
外気温°C	水温°C	100	180	5	15	外気温°C	35	45	5	15
0		54.5	102.0	-83.03	-53.7	0	18.1	21.4	-34.2	35.8
30		47.5	99.6	-205.2	-99.3	30	10.2	17.0	-149.8	-10.6

注 土の熱伝導率 1.63 W/(m K)。保温材の熱伝導率 0.058 W/(m K)。

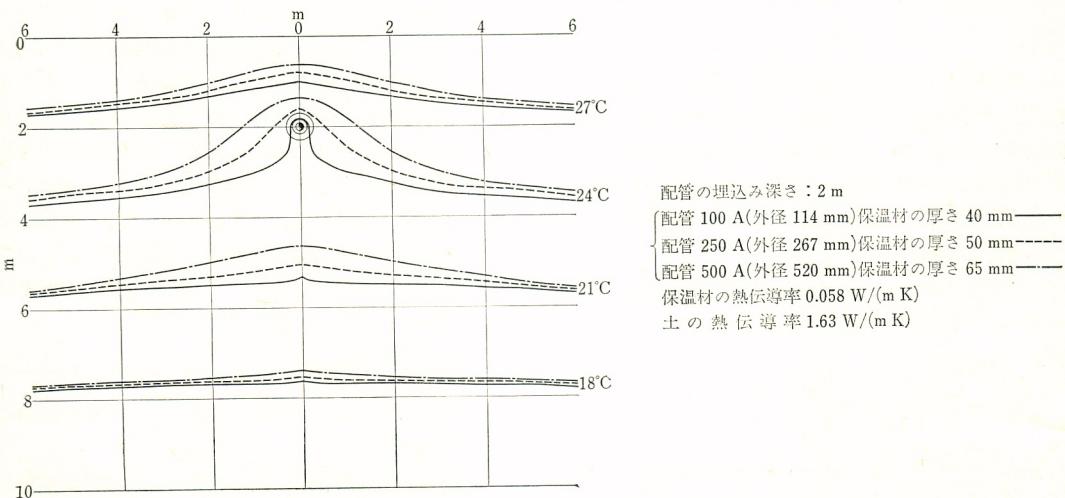
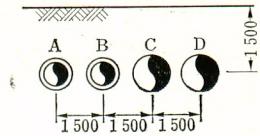


図-4 配管温度 6°C, 外気温度 30°C の地中温度分布(保温あり)

表-6 4本配管が埋設された場合の熱損失(単位 W/m, 1 W/m = 0.860 kcal/m h)

A :  $\phi$  500 保温材あり(65 mm 厚)  
 B :  $\phi$  500 保温材あり(65 mm 厚)  
 C :  $\phi$  800 保温材なし  
 D :  $\phi$  800 保温材なし



	A	B	C	D		A	B	C	D	
外気温°C	水温°C	180	100	15	5	外気温°C	45	35	15	5
0	105.1	52.5	9.8	-24.4	0	24.1	15.8	68.4	-23.6	
30	92.5	43.5	-94.4	-133.5	30	12.2	7.6	-35.8	-128.6	
	A	B	C	D		A	B	C	D	
外気温°C	水温°C	180	100	5	15	外気温°C	45	35	5	15
0	105.9	54.5	-100.9	76.5	0	24.9	18.1	-44.8	85.5	
30	94.1	45.8	-203.5	-30.9	30	17.2	9.9	-143.3	-22.8	
	A	B	C	D		A	B	C	D	
外気温°C	水温°C	100	180	15	5	外気温°C	35	45	15	5
0	52.2	106.8	-11.4	-27.7	0	17.4	22.9	65.1	-22.0	
30	40.4	98.0	-118.9	-133.5	30	5.6	14.7	-38.3	-129.4	
	A	B	C	D		A	B	C	D	
外気温°C	水温°C	100	180	5	15	外気温°C	35	45	5	15
0	52.9	109.1	-123.7	76.5	0	18.1	24.9	-44.8	85.5	
30	41.1	100.4	-226.3	-30.9	30	6.3	16.6	-147.4	-22.8	

注 土の熱伝導率 1.63 W/(m K)。保温材の熱伝導率 0.058 W/(m K)。

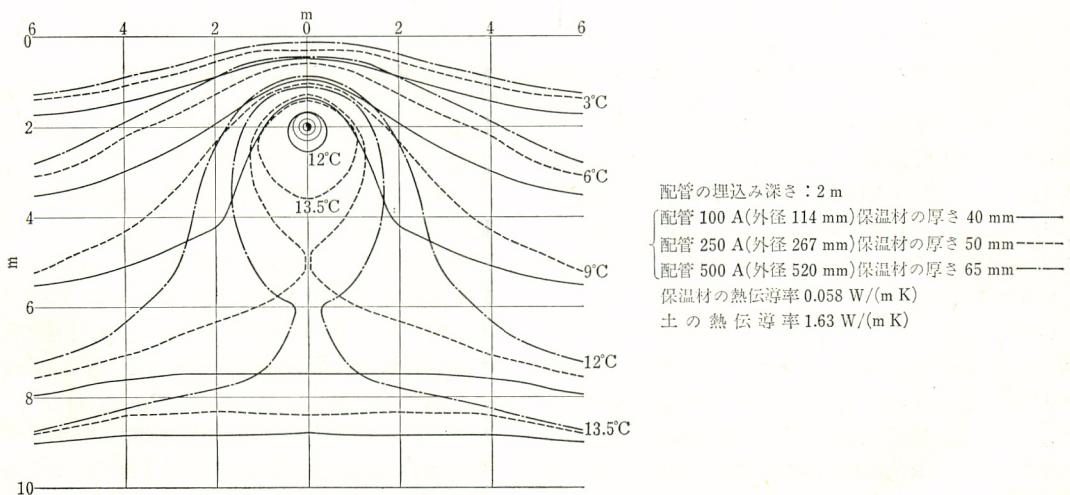


図-5 配管温度 100°C、外気温度 0°C の地中温度分布(保温あり)

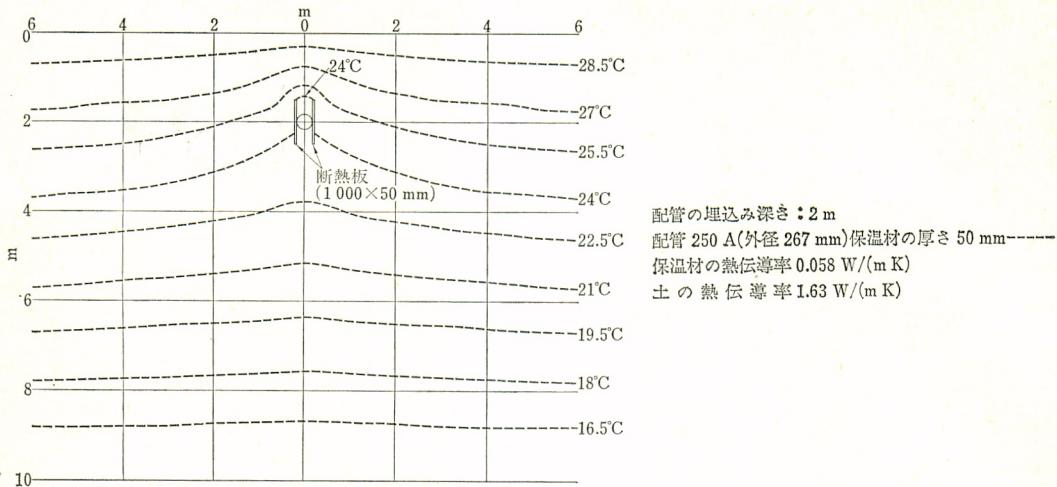


図-6 断熱板のある地域埋設管による土中温度分布(配管温度 6°C, 外気温度 30°C)

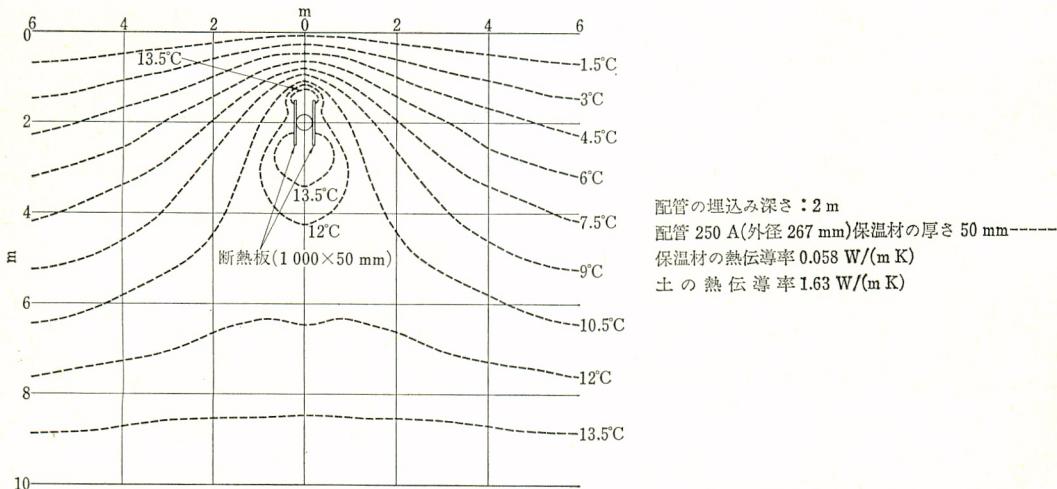


図-7 断熱板のある地域埋設管による土中温度分布(配管温度 100°C, 外気温度 0°C, 地中温度 15°C)

を行なった。本来は土と保溫板の熱抵抗の比に等しい面積の割合で切除すればよいのだが、いま土の熱伝導率  $\lambda_E$  を  $1.63 \text{ W}/(\text{m K}) (= 1.4 \text{ kcal}/\text{m h deg})$ 、断熱板の熱伝導率  $\lambda_I$  を  $0.058 \text{ W}/(\text{m K}) (= 0.05 \text{ kcal}/\text{m h deg})$  と仮定すると  $\lambda_E/\lambda_I = 28$  となり、面積比で 28 切り落として 1 残すということになる。

いま行なっているアナログ模型のスケールでは、地中 10 m の深さが 50 cm に縮少されている。すなわち縮尺は 1/20 である。いま断熱板の高さが 1 m、幅が 10 cm であったとすると模型では高さ 5 cm、幅 5 mm となる。この部分を  $28 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  の大きさで切り  $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  の幅を残し、また残りを切るというのが本来であるが、相手は紙であり実際には、面積で 5 を切り取り 1 残すというのが限界である。断熱板として使われる保溫材は、土

に比べて無限に大きい熱抵抗をもつものとみなしう、保溫材に相当する部分をすべて切り落としたのである。こうして求められた断熱板のある場合の地中温度分布の例を図-6, 7 に示す。

熱供給管が、1 本地中に埋設されている場合の水平離隔距離と地中温度の関係を図-8, 9 に示す。図-8 は断熱板のない場合、図-9 は配管に被覆された保溫材に密着して高さ 1 m、幅 5 cm の断熱板を設置した場合を示す。ここで横軸は配管表面からの水平離隔距離、縦軸は地中温度を示し、図中の数字 5 は配管表面温度が 50°C の場合を意味し、以下それぞれ 6 は 60°C、7 は 70°C、8 は 80°C、9 は 90°C の場合を意味している。ここでいう配管表面温度とは、保溫材のある場合は保溫材の表面温度、さらにさや管がある場合はさや管の表面温度を意味する。

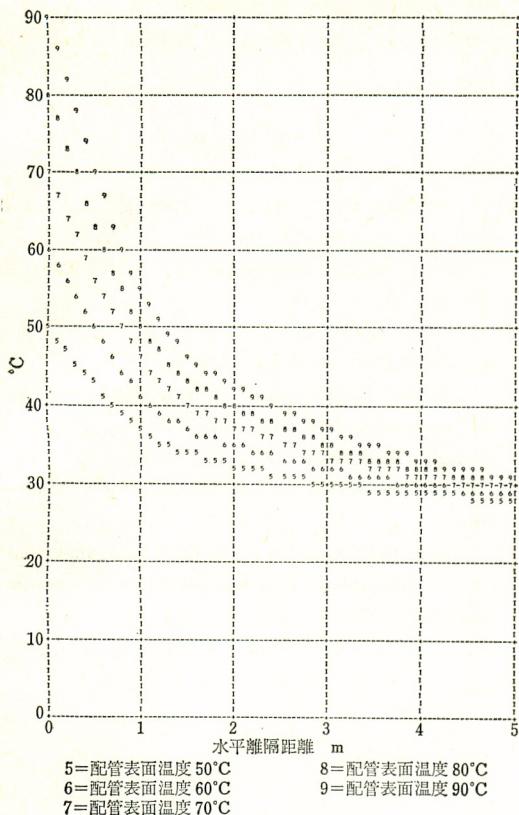


図-8 水平離隔距離による土中温度  
〔外気温度 30°C, 管径 250 A(保温材 50 mm 厚), 埋設深さ 2 m〕

ではどういう条件のとき表面温度がそうなるか、埋設深さ別に知っておく必要がある。設計者は配管内の送り湯温度は知っていても、配管表面温度がどのようにになっているかは、なかなか判断がつきにくいからである。外気温度 30°C、埋設深さ 2 m、保温材(またはさや管)を含んだ配管外径 350 mm の場合の配管水温より、配管表面温度を求めるグラフを図-10 に示す。これは単管の例で、3.2 の項で述べた保温材の熱抵抗に相当する電気抵抗が、電導抵抗紙の基準抵抗の何倍になっているかというパラメータより求められる。すなわち  $R'$  は各設計者が定めた保温仕様により、計算し求めなければならない。

計算例で説明すると、配管径 150 mm の配管に 50 mm の保温材が被覆されていて、土の熱伝導率が 1.63 W/(m K)(= 1.4 kcal/m h deg)、保温材の熱伝導率が 0.058 W/(m K)(= 0.05 kcal/m h deg) であるとすると、 $R'$  は式(20)より求められる。 $r_1 = 125, r_2 = 175$  となるから、

$$R' = \frac{1.4R}{0.05\pi} \ln \frac{175}{125}$$

$$\approx 3 R$$

いま配管水温が 150°C で、配管埋設深さが 2 m、外気

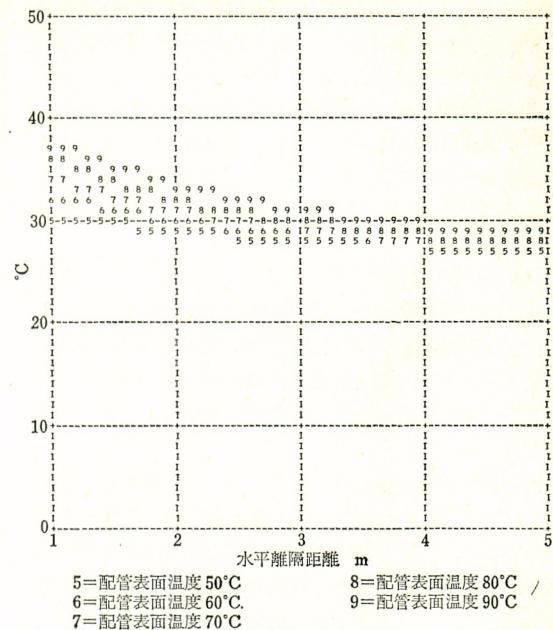


図-9 水平離隔距離による土中温度〔断熱板(1000 mm × 50 mm)使用、外気温度 30°C、管径 250 A(保温材 50mm 厚), 埋設深さ 2 m〕

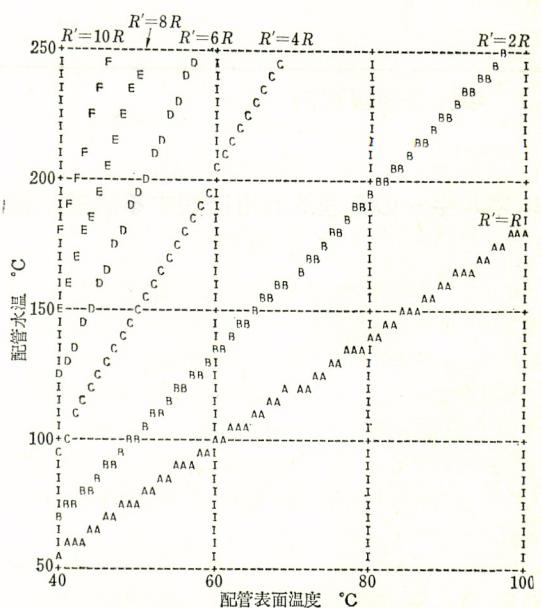


図-10  $R'$  による配管水温と配管表面温度(外気温度 30°C、埋設深さ 2 m、保温材を含んだ配管外径 350 mm)

温度が $30^{\circ}\text{C}$ あるとすると、図-10において $R'=3R$ はB線とC線の中間にはいり、配管水温 $150^{\circ}\text{C}$ との交点より配管表面温度を求めるとき約 $55^{\circ}\text{C}$ となる。

図-8~10は実験結果を多量に正確に処理するため、アナログ実験で求められた電位を電算機に与え計算し、結果をラインプリンタでグラフとして直接描かせたものである。

### 5 おわりに

地中埋設管の熱損失や地中温度分布を求める方法として、等角写像を使って解く方法<sup>1)</sup>や、電解そう(槽)を使って立体アナログで解く方法<sup>2)</sup>は報告されている。これらは計算が煩雑であったり、取扱いが困難であるなどの欠点もある。

電導抵抗紙を使用した“紙アナログ法”は取扱いが簡単で、直感的にかつ精度の高い解が得られるなどの長所があるので、実験方法と結果の一部を紹介したしたいである。この解法はまったく同様の取扱いで、パイプを埋設したパネルヒーティングの解法に使えることは、すぐおわかりになると思うし、少しくふうを加えることによ

り、種々な計算に使う方法が展開されてくる。

この論文では量記号、単位記号はJIS Z 8202-1974によった。

### 参考文献

- 1) 川下研介：熱伝導論、共立出版
- 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、46-5
- 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, 24-5, 1973, VDI-Verlag
- 6) Karplus & Soroka : Analog Methods, 1959, McGraw Hill
- 7) 2. Internationale Konferenz für Fernheizung im Rahmen der 7. ungarischen Heizungs- und Lüftungstechnischen Konferenz, 1973

(昭和49. 9. 25 原稿受理)

### ●受贈図書案内

#### 科学技術庁資源調査会編 エネルギーの合理的利用に関する調査報告 —民生部門—

本書は、東海大学教授黒沢俊一氏を委員長とする、科学技術庁資源調査会エネルギー部会総合小委員会が、十数回の討議を重ねてまとめあげた調査報告である。

事務所ビル・住宅用の民生部門向けエネルギー利用について、①消費動向をマクロ的な観点からとらえ、②エネルギーの効率的利用方法を調整し、③その方法を適用した場合のエネルギー節約可能量を定量的に推計している。

一昨年の石油ショックを機に、わが国は高エネルギー時代を迎えていた。そのため、われわれの関係する空気調和の部門でも、省エネルギー化がさしまった問題になっている。その意味から、本書に盛られた各種のデータは日常業務にも欠かせない資料となろう。

科学技術広報財団 164ページ 価格1200円

#### 実用空調技術便覧編纂委員会編 実用空調技術便覧

本書は、建築空調を主体として、その計画・設計・施行・管理に至るまで、生きたデータを中心に解説したものである。

特に、従来の空調関係書はともすれば理論の紹介が多く、それに伴い、施工・管理のウエイトが小さくなるため、本書では、設計する立場より使う立場に重点を置き、経験式を豊富に使用し、機器の選択が自在にできるようくふうをこらしている。

また、随所にモデル設計を中心とした例題を要領よく(挿入し、例題をたどっていけば、本文との関係が容易に理解できるよう、全体を例題主体の構成とし、応用編では、テーマごとに最新の技術を紹介して、関係技術者の座右書として役だつよう意を用いた。

(株)オーム社 912ページ 価格11000円