

管路の温度上昇に対する気象および 環境効果の統計的一考察

A STATISTICAL CONSIDERATION FOR THE METEOROLOGICAL AND ENVIRONMENTAL EFFECTS ON TEMPERATURE DISTRIBUTION OF PIPELINES

中村 秀治*・小林 精一**

By Hideharu NAKAMURA and Seiichi KOBAYASHI

1. まえがき

管路は物量輸送，エネルギー伝達を中心として各種の目的に広く用いられている。設計基準は水門鉄管技術基準¹⁾，石油パイプライン技術基準²⁾などのように，各使用目的にあわせて定められており³⁾，設計荷重についても詳細に定められている。

通常，管路は地盤中に埋設あるいは洞道に設置されることが多く，さらに断熱材で被覆されることもあり，また，使用材料の許容応力に対して自然現象により生じる熱応力をはるかに小さいなどの理由から，日照時の気象および環境効果による温度上昇はほとんど無視されてきた。しかし，管路の使用目的，使用状態が広範多岐にわたり，使用材料も鋼材だけでなく，線膨張係数の高い，許容応力の低い材料が用いられる可能性のあることを考えるとき，気象および環境効果による管路の温度上昇は将来検討するべき一課題になり得ると思われる。

物体の伝熱現象は，それ自体，非常に複雑なメカニズムで構成されており，熱伝達に関するニュートンの公式⁴⁾，⁵⁾などを用いて解析の簡略化を図ってもなお，熱伝達率，反射率その他解析に必要な数値の決定に問題が残される。管路のように円形断面の場合，ヌセルト数，レイノルズ数を用いて整理された実験データも存在する⁶⁾が，読み取られる数値はかなりおおまかなものであり，内部の流体あるいは気体の影響も実際にはあり，工学的に必要な精度の解を計算のみで求めることはきわめて難しい。したがって，すべての管路に対して適用できる温度分布の計算法，および実験結果の提示は不可能であり温度上昇が問題になりそうな管路は，それぞれの使用条件下で実測を行的に数値を把握し，設計に取り入れ

ることが必要になる。その際，測定項目，および測定結果の解釈，設計への反映をどのように行うかは熟慮すべき問題となり，管路の伝熱特性に対する知識が有用になる。

本論文は，1つの実測データを示すと同時に，統計的手法を用いて管路の温度上昇に及ぼす気象および環境効果の定性的検討を行うのを主目的としたものである。そこで，内部の空気が密閉された状態の管路を屋外に設置し，その温度変化と同時に管路近傍の気温，日射量など影響あると思われる因子を測定し，重回帰分析により測定結果を処理し考察した。中空で両端の閉じられた管路を選んだ理由は，この状態が気象および環境の影響を最も厳しく受けると考えられたからである。きわめて限られた条件下の測定であり，実際の管路の使用状態とは異なることが多いと思われるが，重回帰分析により重回帰モデルの適合性，各因子の相関性，重要性など検討した結果は，管路の伝熱特性を知るための一助になり得ると思われる。

なお，統計的処理および考察に基づいて，管路の日照時の温度分布を推定するための理論式を検討し，それを用いて数値計算した。計算結果と実測結果の対比を通じて，熱に関連した定数の選択等をきわめて適切に行えば実測値に近い計算値の得られること，および管路内熱伝導効果の程度など明らかになったが，一方，熱定数を正確に定められない場合，計算結果のみに頼り得ないことも明らかになった。

2. 管路の温度変化と気象の測定および結果

(1) 測定の概要

実施場所は，千葉県我孫子市の電力中央研究所構内，期間は昭和53年8月1日から8月20日までの20日

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所土木技術研究所

** 正会員 (財)電力中央研究所土木技術研究所

間である。

外径 50 cm, 板厚 8 mm, 長さ 15 m で両端を閉じたアルミニウム合金製の管路 1 本を測定に用いた。管路表面は灰色に塗装されている。管路は屋外に南北の方向に設置し, 地表面から管路中心までの高さを南端で 40 cm, 北端で 70 cm となるように勾配をもたせて設置したが, 環境因子の 1 つである地表面の状態を考慮に入れるため, 20 日間を 3 週に分け, 第 1 週は管路をアスファルト上に, 第 2 週は芝の上に, 第 3 週は土の上に移動している (図-1)。

測定項目の詳細は次のとおりである。

① 管路の表面温度 (°C)

ゲージ特性 $135 \mu/\text{C}$ (恒温槽を用いて検定し, 測定温度範囲ではほぼ直線性を有することを確認した (図-2)) の温度ゲージ 24 枚を使用。A, B 2 断面 (それぞれ, 地面から管路中心まで 50 cm, 60 cm) を各 12 等分し, 頂部から 30° ごとに配置して毎時 0 分に計測した。0 調整は毎夜 0 時に大気温度にあわせて行った。

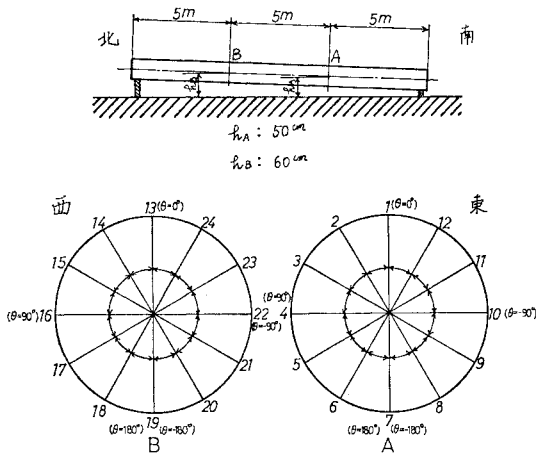


図-1 測定断面と温度ゲージ配置

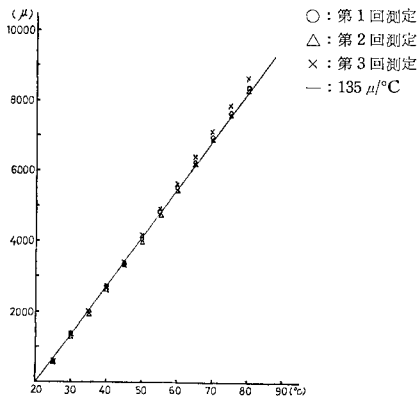


図-2 温度ゲージの検定

② 管路周辺の大気温度 (°C)

水銀柱温度計を使用し, 管路近傍の地上 70 cm で直射日光を避けて測定した。

③ 管路周辺の大気湿度 (%)

高精度乾湿球温度計を使用し, 管路近傍の地上 70 cm で直射日光を避けて測定した。

④ 風速 (m/s)

三杯風速計を使用し, 10 分間平均風速を測定した。風速計の設置場所は, 管路中央部で横に 1 m 離し, 地上からの高さを 50 cm とした。風向は測定していない。

⑤ 日射量 (cal/cm²·h)

エプリー型日射計⁷⁾を使用した。管路周囲は乱反射光が多く, 重回帰分析を複雑にするため, 近くの建物の 2 階屋上に真上に向けて固定し, ほとんど直達日射量⁷⁾のみ測定するようにした。なお, 太陽高度による日射量の補正は, 後述のとおり 10 時から 15 時のデータを利用したため特に考慮していない。

(2) 測定結果

計器調整, 試験体移動などに要した日数を除外して, 地表面がアスファルト, 芝, 土の各ケースについて, それぞれ 4 日, 5 日, 5 日, 合計 14 日間の記録を取ることができた。それらのうちから, 選択して 3 日間の管路表面温度を示すと 図-3~5 のとおりである。朝, 夕および夜間の管路表面温度は周囲の大気温度に近く, 同一断面における温度差も顕著ではないので, 実際に問題となりそうな時間として, 10 時, 12 時, 14 時のみの結果を示した。図中, 横軸は度をとってあるが, 断面頂部を 0 度とし東側に負, 西側に正符号を与えてある (図-1)。

図-6 はアスファルト上で 4 日間, 芝および土の上で 5 日間, 合計 14 日間における 10 時から 15 時までの直達日射量と管路表面最高温度の関係を風速をパラメーターとして示している。なお, A, B 両断面について調べたところ, ほぼ類似の結果を得たので, 図-6 は A 断面のみに関するものとした。

図-7 は 図-6 と同様の期間および時間における直達日射量と気温の関係である。日射量および気温に対して風速はほぼ独立事象と考えられるが, 湿度は若干の相関を有すると思われるため, 湿度をパラメーターにして示している。

図-8 は 図-6, 7 と同様の期間および時間における気温と A 断面の管路表面最高温度の関係を風速をパラメーターにして示したものである。図中, 点線の位置が気温の高さである。

図-9 は直達日射量と管路の同一断面における温度差

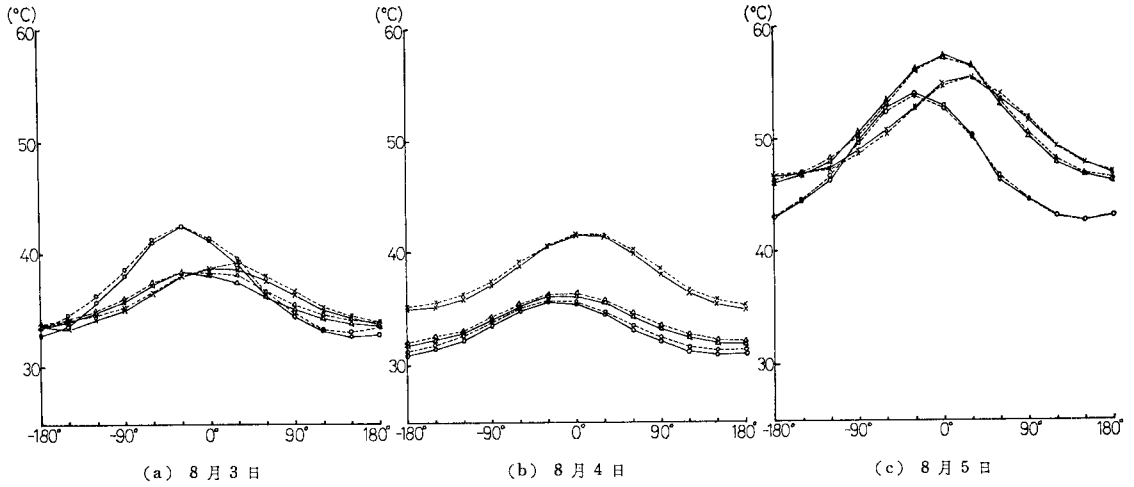


図-3 管路表面の温度分布 (地表面がアスファルトの場合)*

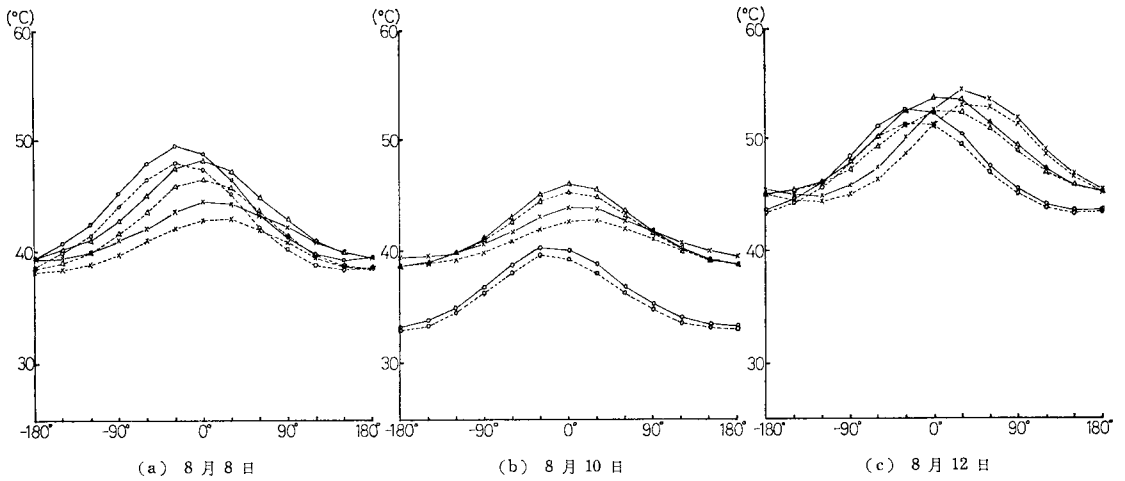


図-4 管路表面の温度分布 (地表面が芝の場合)*

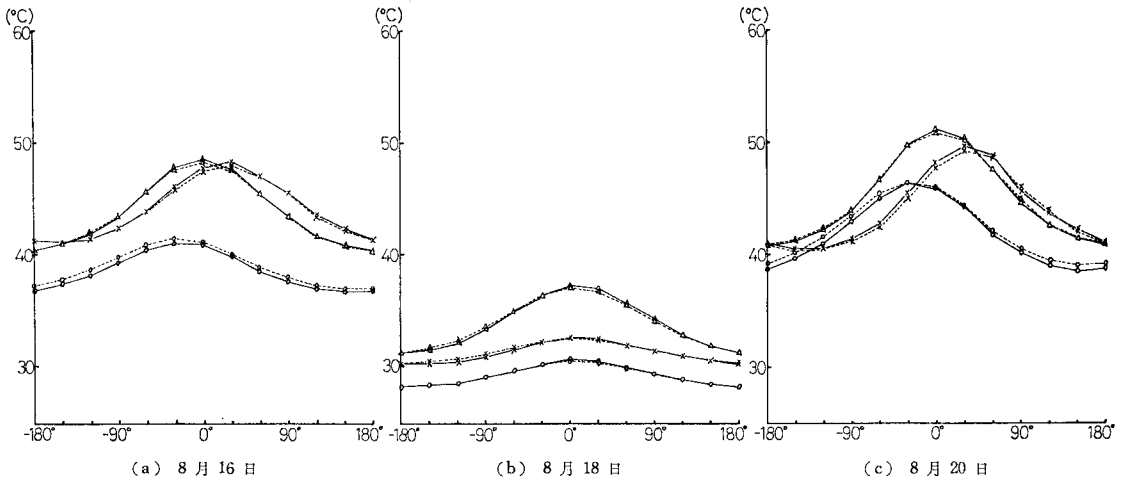


図-5 管路表面の温度分布 (地表面が土の場合)*

* 図-3~5 の凡例を示す. (—○—: 10時 A断面, …○…: 10時 B断面, —△—: 12時 A断面)
 (…△…: 12時 B断面, —×—: 14時 A断面, …×…: 14時 B断面)

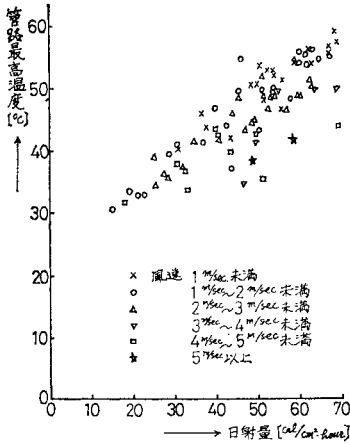


図-6 日射量と管路最高温度の関係 (A断面)

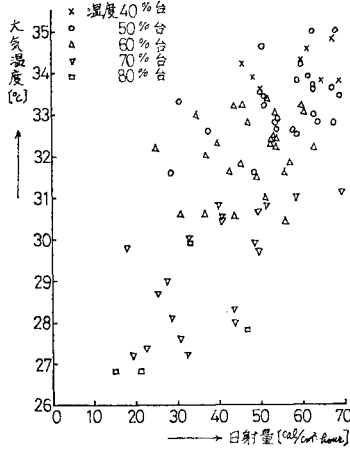


図-7 日射量と大気温度の関係 (A断面)

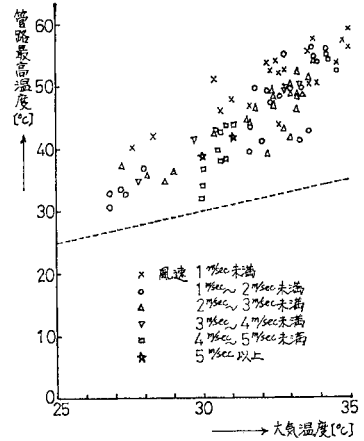
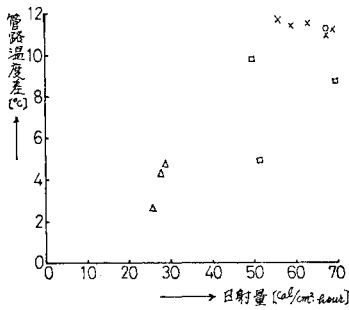
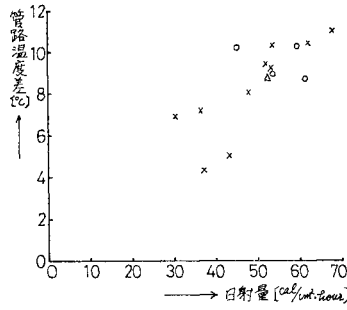


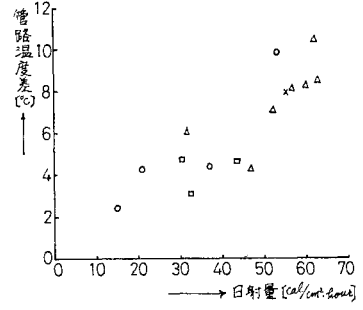
図-8 大気温度と管路最高温度の関係 (A断面)



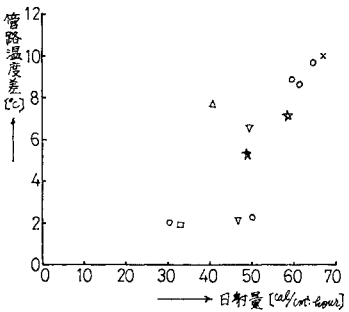
(a) 地表面がアスファルト, 午前の場合



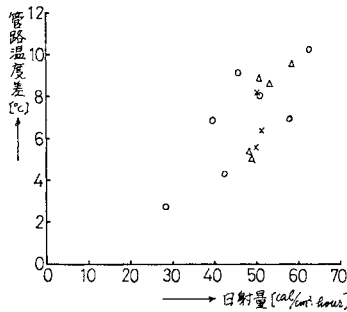
(c) 地表面が芝, 午前の場合



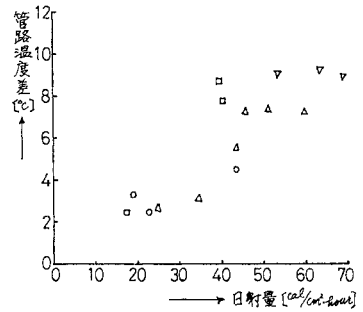
(e) 地表面が土, 午前の場合



(b) 地表面がアスファルト, 午後の場合



(d) 地表面が芝, 午後の場合



(f) 地表面が土, 午後の場合

(ただし, x: 風速 1 m/s 未満, O: 風速 1 m/s~2 m/s 未満, Δ: 風速 2 m/s~3 m/s 未満)
 ▽: 風速 3 m/s~4 m/s 未満, □: 風速 4 m/s~5 m/s 未満, ☆: 風速 5 m/s 以上)

図-9 日射量と管路温度差の関係 (A断面)

の関係である。図-6, 8と同様, A, B 両断面の結果には顕著な相違が見出されなかったため, A断面の結果のみを図示している。図-9(a), (b)は, アスファルト上の4日間, (c), (d)は芝の上の5日間, (e), (f)は土の上の5日間の記録である。1日のうち10時から15時までを取り上げ, 午前(10時, 11時, 12時), 午後(13時, 14時, 15時)に分けて図示したが, そのおもな理由は, 一部(特にアスファルト上の場合), 午前と午後

の測定値の間にかかりの相違がみられたためである。なお, 図中, パラメーターは風速とした。

管路表面から大気へ放射される熱量は, 熱伝達率と管路, 大気間の温度差の積に比例するといわれる^{4), 5)}。風速が熱伝達率を押し上げる効果を有することは図-6, 8の実測結果からも読み取られるので, 今後もし管路の温度上昇が問題になるならば, 風にあたる状態での熱伝達率に関するデータ蓄積は必要である^{9), 10)}。

い状態となり、検討の対象外とすることに問題はないと思われたからである。

次に、重回帰モデルは 2. の測定結果等を参照し、次式で表される単純な線形モデルを採用した。

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \varepsilon_1 \\ y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon_2 \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここで、 $y_i (i=1, 2)$, $x_i (i=1 \sim 4)$ は前述のとおりであり、 α_0, β_0 は定数、 $\alpha_i (i=1 \sim 4)$ および $\beta_i (i=1 \sim 4)$ は $x_i (i=1 \sim 4)$ に対する偏回帰係数、 $\varepsilon_i (i=1, 2)$ は残差とする。

目的変数として管路の A, B 断面における最高温度 (y_1) と温度差 (y_2) を取ったが、 y_1, y_2 はそれぞれ管軸方向の伸縮および横方向のたわみに関連し、管路の重要な挙動に直接結びつくものである。

(2) 重回帰分析結果

重回帰分析は、表-1 (a), (b), (c) に示す合計 168 データを用い、層別因子を各種組み合わせで表-2 に示す 30 ケースで行った。層別因子は温度などと異なり、地表面条件のような数量的に表し得ない質的な違いを取り扱うためのものであるが、各ケースの計算値を調べた結果、他と重複して無意味と思われるケースなどがあり、ケース 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12 のみを選択して示すと、表-3~5 のとおりである。

表-3 においては、まず、データの平均値と標準偏差を示してデータの概略を示した後、 y_1 と y_2 に関する重相関係数 R_1, R_2 とそれに対する F 値ならびに検定結果、および偏回帰係数とそれに対する t 値ならびに検定結果を示した。重相関係数 R は重回帰モデルの適合性の良否を表している。 F 値は、 F 分布表を用いてモデルの適合性を検定するために用いられ、実質的には重相関係数と同じである。

偏回帰係数はモデルの適合性が良であればただちに実験式の係数として利用できるものである。 t 値は説明変数 $x_i (i=1 \sim 4)$ の必要性を調べるのに有効であり、“ x_i 以外の説明変数を用いるという条件のもとで、なお x_i を追加する必要があるか否か”を問うことができる。表中、 t 値の下 () 内数値は t 分布表を用いて検定した結果である。

表-4 は説明変数を減らして x_1 のみ、あるいは x_3, x_4 のみとした場合に、重相関係数がどのようになるかを相関行列から計算し、整理したものである。

表-5 の相関行列は、行列成分の絶対値が 0 と 1 の間にあり、説明変数、目的変数の間の相関関係の程度、およびそれが正相関か負相関かを表している。ただし、相関ありと判定するための相関係数に関する基準はなく、評価は相対的にならざるを得ない。

表-2 ケース番号と層別因子の組み合わせ

ケース番号	層別因子の組み合わせ		データ数
1	全	体	168
2	午	前	84
3	午	後	84
4	アスファルト		48
5	芝		60
6	土		60
7	アスファルト	午 前	24
8	〃	午 後	24
9	芝	午 前	30
10	〃	午 後	30
11	土	午 前	30
12	〃	午 後	30
13	アスファルト	A断面	24
14	〃	B断面	24
15	芝	A断面	30
16	〃	B断面	30
17	土	A断面	30
18	〃	B断面	30
19	アスファルト	午 前 A断面	12
20	〃	B断面	12
21	〃	午 後 A断面	12
22	〃	B断面	12
23	芝	午 前 A断面	15
24	〃	B断面	15
25	〃	午 後 A断面	15
26	〃	B断面	15
27	土	午 前 A断面	15
28	〃	B断面	15
29	〃	午 後 A断面	15
30	〃	B断面	15

(3) 重回帰分析結果に対する考察

図-3~5 より明らかなとおり、地表面が芝では地表面からの放射熱が少ないため、A, B 断面で若干の相違がみられ、A に比べて B 断面の管路表面温度はわずかながら一様に低い、その他の点で、A, B 断面による違いはほとんどみられない。重回帰分析結果にもその傾向は明確に現れ、ケース 13~18, およびケース 19~30 において A, B を層別して計算した結果は、互いにほとんど等しい数値が得られた。したがって、A, B 断面を層別する必要はなく、ケース 13~18 はケース 4~6 で、ケース 19~30 はケース 7~12 で代表できることが明らかになった。そこで、ケース 13 以後を除き、ケース 1 から 12 までをみると、ケース 1 は重相関係数が y_1 (最高温度) で 0.95, y_2 (温度差) で 0.81 となり、 y_2 (温度差) のモデルの適合性において層別の必要性が感じられた。また、図-9 からわかるように、特に y_2 (温度差) の傾向において午前と午後で伝熱メカニズムの違いを感じさせるものがある。以上の理由で、午前と午後および地表面の条件を層別するものとし、ケース 2, 3 とケース 7~12 を表-3 に従って次に考察する。

まず、 y_1 (最高温度) についてのモデルの適合性は、

表-3 重回帰分析結果

ケース番号		ケース 2	ケース 3	ケース 7	ケース 8	ケース 9	ケース 10	ケース 11	ケース 12						
										アスファルト		芝		土	
										午 前	午 後	午 前	午 後	午 前	午 後
平均値と 標準偏差()内	x_1	31.521 (2.182)	32.026 (2.012)	31.133 (1.855)	31.925 (2.334)	32.347 (2.117)	32.740 (1.108)	31.007 (2.306)	31.393 (2.256)						
	x_2	63.810 (8.969)	61.071 (10.825)	65.500 (10.346)	61.250 (16.687)	60.200 (8.315)	56.667 (5.195)	66.067 (7.423)	65.333 (6.975)						
	x_3	1.821 (1.315)	2.338 (1.240)	2.167 (1.663)	2.592 (1.687)	0.940 (0.575)	1.600 (0.641)	2.427 (1.068)	2.873 (0.908)						
	x_4	48.950 (14.384)	47.183 (12.764)	52.783 (16.472)	50.850 (11.741)	50.667 (10.390)	49.347 (8.145)	44.167 (15.169)	42.087 (15.740)						
	y_1	46.145 (7.323)	45.336 (6.781)	46.413 (8.583)	44.804 (7.955)	49.547 (5.346)	48.433 (4.700)	42.530 (6.397)	42.663 (6.463)						
	y_2	7.483 (2.725)	6.170 (2.566)	8.413 (3.317)	5.946 (3.059)	8.127 (1.939)	6.720 (2.059)	6.097 (2.373)	5.800 (2.586)						
	重相関係数 F 値		0.9741 367.198 (0.000)	0.9444 163.000 (0.000)	0.9943 412.064 (0.000)	0.9665 67.248 (0.000)	0.9601 73.638 (0.000)	0.9470 54.344 (0.000)	0.9851 204.875 (0.000)	0.9683 93.993 (0.000)					
管路 最高温度	偏回帰 係数	α_0	12.662	-25.018	-23.890	-78.525	-27.395	-128.711	45.539	-19.232					
		α_1	0.842	1.850	1.766	2.865	1.648	4.462	-0.017	1.471					
		α_2	-0.059	0.023	0.126	0.276	0.605	0.377	-0.226	0.072					
		α_3	-1.801	-0.961	-2.641	-1.749	-1.247	-0.111	-0.599	0.148					
		α_4	0.286	0.253	0.243	0.383	0.294	0.200	0.315	0.252					
y_1	t 値	x_1	2.977 (0.004)	6.733 (0.000)	3.021 (0.007)	2.665 (0.015)	3.543 (0.002)	6.853 (0.000)	-0.023 (0.982)	5.397 (0.000)					
		x_2	-0.937 (0.352)	0.383 (0.703)	1.359 (0.190)	1.415 (0.173)	1.751 (0.092)	2.952 (0.007)	-0.944 (0.354)	0.656 (0.518)					
		x_3	-10.844 (0.000)	-3.317 (0.001)	-11.363 (0.000)	-2.618 (0.017)	-2.360 (0.026)	-0.205 (0.839)	-2.692 (0.012)	0.373 (0.713)					
		x_4	12.669 (0.000)	9.890 (0.000)	7.178 (0.000)	7.064 (0.000)	5.611 (0.000)	4.198 (0.000)	9.942 (0.000)	6.985 (0.000)					
		重相関係数 F 値		0.8723 62.854 (0.000)	0.7914 33.108 (0.000)	0.9365 33.857 (0.000)	0.8243 10.071 (0.000)	0.7164 6.591 (0.001)	0.9125 31.113 (0.000)	0.8879 23.272 (0.000)	0.9282 38.903 (0.000)				
管路 温度差	偏回帰 係数	β_0	10.044	-3.164	-29.977	-54.993	-8.626	-83.881	36.546	-0.040					
		β_1	-0.289	0.150	0.610	1.218	0.255	2.145	-0.861	-0.134					
		β_2	-0.016	-0.037	0.203	0.194	0.043	0.267	-0.164	0.014					
		β_3	-0.560	0.335	-1.251	-0.380	0.222	0.990	-0.322	1.077					
		β_4	0.176	0.127	0.166	0.220	0.112	0.075	0.178	0.143					
y_2	t 値	x_1	-1.267 (0.209)	0.776 (0.440)	0.822 (0.421)	1.336 (0.197)	0.607 (0.550)	5.903 (0.000)	-1.133 (0.268)	-0.823 (0.418)					
		x_2	-0.316 (0.753)	-0.858 (0.393)	1.735 (0.099)	1.172 (0.256)	0.505 (0.618)	3.739 (0.001)	-0.692 (0.495)	0.221 (0.827)					
		x_3	-4.188 (0.000)	1.647 (0.104)	-4.237 (0.000)	-0.672 (0.510)	0.464 (0.647)	3.290 (0.003)	-1.456 (0.158)	4.559 (0.000)					
		x_4	9.652 (0.000)	7.061 (0.000)	3.871 (0.001)	4.785 (0.000)	2.372 (0.026)	2.824 (0.009)	5.667 (0.000)	6.631 (0.000)					
		重相関係数 F 値		0.8723 62.854 (0.000)	0.7914 33.108 (0.000)	0.9365 33.857 (0.000)	0.8243 10.071 (0.000)	0.7164 6.591 (0.001)	0.9125 31.113 (0.000)	0.8879 23.272 (0.000)	0.9282 38.903 (0.000)				

F 値, t 値の () 内は検定結果とする。

表-4 説明変数の選択による重相関係数の相連

ケース番号		2	3	7	8	9	10	11	12
y_1	x_4 のみの場合	0.8831	0.7937	0.8559	0.7991	0.9145	0.6931	0.9757	0.8992
	x_3, x_4 のみの場合	0.9573	0.8613	0.9899	0.9338	0.9301	0.7192	0.9780	0.9059
	x_1, x_2, x_3, x_4 の場合	0.9741	0.9444	0.9943	0.9665	0.9601	0.9470	0.9851	0.9683
y_2	x_4 のみの場合	0.8287	0.7715	0.8500	0.8036	0.7093	0.7231	0.8579	0.8548
	x_3, x_4 のみの場合	0.8660	0.7723	0.9206	0.8051	0.7115	0.7286	0.8712	0.9227
	x_1, x_2, x_3, x_4 の場合	0.8723	0.7914	0.9365	0.8243	0.7164	0.9125	0.8879	0.9282

重相関係数が 0.94 以上でありきわめてよいといえる。 y_2 (温度差) についてはケース 9 のように重相関係数が 0.72 という低いケースもあり、全体として y_1 (最高温度) よりモデルの適合性は劣る。しかし、他のほとんどの重相関係数は 0.8 以上あり、F 値による検定でもこのモデルにより誤る確率は 0.1% 以下である。したがっ

て、 y_2 (温度差) については他の説明変数をつけ加える必要性も認められるが、モデル自体の再検討を必要とするほど悪いとはいえない。午前と午後では大部分のケースで午前の方が適合性はよく、地表面の条件については測定日時の違いもあり明確なことはいいにくい結果をみる限り、アスファルト、土、芝の順で適合性がよい。

表-5 説明変数と目的変数の相関関係

a) ケース 2 の相関行列

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
x_1	1.0000					
x_2	-0.9294	1.0000				
x_3	-0.2796	0.4227	1.0000			
x_4	0.8175	-0.7392	-0.1920	1.0000		
y_1	0.8686	-0.8583	-0.5322	0.8831	1.0000	
y_2	0.6512	-0.6374	-0.4060	0.8287	0.8933	1.0000

b) ケース 3 の相関行列

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
x_1	1.0000					
x_2	-0.8674	1.0000				
x_3	-0.3781	0.6103	1.0000			
x_4	0.5887	-0.5448	-0.0858	1.0000		
y_1	0.8631	-0.8053	-0.4014	0.7937	1.0000	
y_2	0.5628	-0.5023	-0.0312	0.7715	0.8494	1.0000

c) ケース 7 の相関行列

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
x_1	1.0000					
x_2	-0.9273	1.0000				
x_3	-0.4996	0.7156	1.0000			
x_4	0.9013	-0.7559	-0.3121	1.0000		
y_1	0.9175	-0.9215	-0.7397	0.8559	1.0000	
y_2	0.8109	-0.7552	-0.6012	0.8500	0.9347	1.0000

d) ケース 8 の相関行列

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
x_1	1.0000					
x_2	-0.9751	1.0000				
x_3	-0.7843	0.8560	1.0000			
x_4	0.5147	-0.5557	-0.3338	1.0000		
y_1	0.8565	-0.8709	-0.7222	0.7991	1.0000	
y_2	0.4957	-0.4959	-0.3141	0.8036	0.8347	1.0000

e) ケース 9 の相関行列

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
x_1	1.0000					
x_2	-0.9180	1.0000				
x_3	-0.0044	0.0040	1.0000			
x_4	0.8161	-0.6898	0.0958	1.0000		
y_1	0.8845	-0.7378	-0.0813	0.9145	1.0000	
y_2	0.6011	-0.4870	0.1230	0.7093	0.8225	1.0000

f) ケース 10 の相関行列

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
x_1	1.0000					
x_2	-0.8515	1.0000				
x_3	-0.0291	-0.1097	1.0000			
x_4	0.4098	-0.1929	0.2692	1.0000		
y_1	0.8398	-0.5444	0.0017	0.6931	1.0000	
y_2	0.6945	-0.4017	0.2808	0.7231	0.9179	1.0000

g) ケース 11 の相関行列

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
x_1	1.0000					
x_2	-0.9913	1.0000				
x_3	0.0478	-0.0889	1.0000			
x_4	0.8825	-0.8788	-0.0443	1.0000		
y_1	0.9075	-0.9030	-0.1102	0.9757	1.0000	
y_2	0.6703	-0.6719	-0.1895	0.8579	0.9042	1.0000

h) ケース 12 の相関行列

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
x_1	1.0000					
x_2	-0.8258	1.0000				
x_3	0.3344	-0.1652	1.0000			
x_4	0.6691	-0.8118	0.2555	1.0000		
y_1	0.8666	-0.8477	0.3363	0.8992	1.0000	
y_2	0.5583	-0.6318	0.5543	0.8548	0.8628	1.0000

ケース 9 (芝・午前) で y_2 (温度差) の場合のように、午前の適合性が悪いものについては、 $x_1 \sim x_4$ の説明変数以外にたとえば夜間および朝方の気温、風向などを説明変数として取り込むことの必要性を感じさせられる。

次に、偏回帰係数とそれに対する t 値および検定結果をもとに y_1 (最高温度)、 y_2 (温度差) を個々に考察する。 y_1 (最高温度) に対して x_4 (日射量) は最も重要な影響を及ぼしており、その相関関係は正である。一方、 x_2 (湿度) は芝の場合を除いて、かなり大きな確率で追加する必要はなく、 y_1 (最高温度) の説明に役立っていない。芝の場合、 x_2 (湿度) の検定結果は 9.2% (ケース 9)、0.7% (ケース 10) であるが、気象条件によりたまたまこのようになったものと考えられ、本質的には x_2 (湿度) を除外して差支えないものと思われる。 x_3 (風速) と x_1 (気温) の検定結果はケース 2, 3, 7, 8, 9 で 2.6% 以下で、説明変数としての必要性が認められる。 x_3 (風速) は負 (管路を冷やす)、 x_1 (気温) は正 (管路を暖める) の相関をもっており、これは常識とも一致する。ケース 10, 12 (芝および土の午後) では x_1 (気温) は必要であるが x_3 (風速) は不必要、反対

にケース 11 (土の午前) では x_2 (気温) は不必要であるが x_3 (風速) は必要という結果になっている。これらは風向、地面の粗度、地面の温度、周囲からの乱反射光、気象条件の違い等、さまざまな因子が作用し合った産物と思われる。しかし、 y_1 (最高温度) を全体的にみれば層別するまでもなく、 x_1 (気温)、 x_3 (風速)、 x_4 (日射量) でかなりの説明が可能である。表-4 は x_4 (日射量) のみ、あるいは x_3 (風速)、 x_4 (日射量) のみの場合の重相関係数を示しているが、これによれば x_3 (風速)、 x_4 (日射量) のみでも多くの場合に十分なことが理解できる。

y_2 (温度差) についても x_4 (日射量) が支配的であり、 x_2 (湿度) がほぼ除外できることは y_1 (最高温度) と同様である。しかし、モデルの適合性で劣る以外に、 y_1 (最高温度) と次の 3 点において相違がみられる。まず、 y_2 (温度差) では x_1 (気温) が除外できること、次に、ケース 10, 12 (芝、土の午後) のように x_3 (風速) が必ずしも y_2 (温度差) に対し負の相関を有するものではないこと、さらに、午前と午後で現象が異なることである。1 番目は y_2 (温度差) が管路上下の温度

差であることから、気温の影響が打ち消されたものとして理解できる。2番目は風によって管路の最高温度が下がる以上に最低温度が下がることもあるという内容である。最低温度は地表面近くに生じ、地表面の影響を敏感に受けることから、風が管路を冷やすと同時に芝、土などの地表面温度をも下げ、地表面からの輻射熱を大幅に減少させるとする考えは1つの現象の説明になる。3番目は地表面からの輻射熱が午前と午後で異なることから生じたものである。アスファルトの場合、午前中は地表面が暖まらず、管路の最低温度が低いので y_2 (温度差) は大きくなりやすいが、午後は地表面からの輻射熱で最低温度が上げられ y_2 (温度差) は小さくなる (図-9)。芝、土ではこの傾向はみられない。なお、表-4 のとおり、 y_2 (温度差) の場合、 $x_1 \sim x_4$ の説明変数を用いても重相関係数は高くないが、 x_3 (風速)、 x_4 (日射量) のみでもそれほど下がるわけではない。 y_2 (温度差) の説明にあたっては、 $x_1 \sim x_4$ 以外の説明変数を取り入れることも考慮するべきであろう。

最後に相関行列についてみると、 $x_1 \sim x_4$ の間では全ケースについて x_1 (気温) と x_2 (湿度) の負相関、 x_1 (気温) と x_4 (日射量) の正相関 (図-7) の高いが目立っている。 $x_1 \sim x_4$ と y_1, y_2 の相関はすでに考察したのと同様である。 y_1 (最高温度) と y_2 (温度差) の相関はかなり高く、正である。

4. 管路の温度上昇に関する計算式の検討

(1) 計算式の提案

形状等が非常に理想的で、熱特性に関する定数が正確に定められた場合、伝熱現象は熱伝導の偏微分方程式を与えられた境界条件のもとで解くことにより的確に解明することができる。しかし、本論文で対象とするような現象には不確定要素が多く、理論計算のみで現象を解明するのは不可能であるという考えに立ち、管路の温度上昇に対する気象および環境効果を実測結果に基づき統計的に考察した。

ここでは、統計的考察の結果を前提とし、管路の大体の温度分布を推定するための式を、次の仮定のもとに導き、その計算結果と実測結果を対比検討する。このような検討は統計的考察の裏付けとして役立つだけでなく、管路の寸法効果、管路内熱伝導効果の解明、設計式の作成などに有効と思われる。

仮 定

- ① 管路の板厚は断面径に比較して薄く、板厚方向に温度差は生じない。
- ② 管路内の気体の熱容量は小さいので、管路と内

部気体の熱収支は無視できる。

- ③ 管路表面からの熱伝達は大気温度と管路温度の差に比例する (ニュートンの公式が成立)。
- ④ 管路表面からの熱輻射は無視できるものとする。
- ⑤ 定常現象とみなし得るとする。

以上の仮定を設ければ、管路の式として次式が導かれる。

$$\frac{\lambda}{r^2} \frac{d^2 T}{d\theta^2} + kQ + \alpha(T_a - T) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

境界条件

$$\left. \begin{aligned} T(0) &= T(2\pi) \\ \left(\frac{dT}{d\theta}\right)_{\theta=0} &= \left(\frac{dT}{d\theta}\right)_{\theta=2\pi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- θ : 断面頂部を $\theta=0$ とし、円周方向に取った座標
- $T(\theta)$: 管路の温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- λ : 管路構成材の熱伝導率 \times 板厚 ($\text{cal}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)
- $Q(\theta)$: 日射量 (直達+乱反射) および輻射熱量 ($\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$)
- $k(\theta)$: 吸収率
- $\alpha(\theta)$: 熱伝達率 ($\text{cal}/\text{cm}^2\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)
- T_a : 大気温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- r : 管路断面の半径 (cm)

とする。式 (2) において、左辺第1項は管路内を伝わる熱量を表しており、第2項は、管路に入射する熱量、第3項は、周囲に放散する熱量を表している。式 (2) を式 (3) の条件のもとで解く場合、 k, Q, α が θ の関数であるため解析解を求めるのは難しい。そこで数値的に解く方法を考える。式 (2) を次のように書き直し、

$$\frac{d^2 T}{d\theta^2} - \frac{r^2 \alpha}{\lambda} T = -\frac{r^2}{\lambda} (\alpha T_a + kQ) \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) の左辺第1項は中央差分で置き換えるものとし、管路断面を等間隔に N 等分する。順次 1 から N まで分割点に番号を与えれば、式 (4) を式 (3) の条件で解くことは、次の連立一次方程式を解くことに帰着され、単なる逆行列計算で解が求められる。

$$\begin{bmatrix} \beta_1 & 1 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & \beta_2 & 1 & & 0 \\ 0 & 1 & \beta_3 & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & 1 \\ 1 & \dots & \dots & \dots & \beta_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $i=1 \sim N$ として、

$$\left. \begin{aligned} \beta_i &= -2 - \frac{r^2}{\lambda} \alpha_i \\ P_i &= -\frac{r^2}{\lambda} (\alpha_i T_a + k_i Q_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

であり、各分割点でその値が与えられる。

(2) 計算結果と実測結果の比較

図-3~5 に示した実測結果の中から、A 断面で 12 時の値を取り出し、式 (2)、(3) による計算値と比較する。

計算に用いる数値のうち、次の 3 つは容易に定まり、

$$\lambda = 1753 \times 0.8 = 1402 \text{ (cal/}^\circ\text{C}\cdot\text{h)}^{\text{8}}$$

T_a : 表-1 の大気温度

$r = 24.6 \text{ (cm)}$

であるが、 $\alpha(\theta)$ 、 $k(\theta)$ 、 $Q(\theta)$ を定めるのは難しい。適切な値を見出すためには、ある程度の試行錯誤は必要であり、それを通して管路の伝熱現象を知る手掛りが得られる。 $\alpha(\theta)$ は熱伝達率測定と文献 6) に基づき、風速を考慮に入れて表-6 のように定め、 θ には無関係で全周一様とした。吸収率 k は表-6 のとおり 0.22 (定数) としたが、本来、表面状態で大幅に異なる量であり、明確な根拠に従って定められるものではない。 $Q(\theta)$ の日射量は直達のほかに乱反射成分および地面からの輻射熱がある。直達日射量は実測値と三角関数の積を管路上半分に分布させればよいが、乱反射および輻射は明確

な根拠をもって定めにくい。一応表-6 に示すように、 μ_0 、 μ_{90} 、 μ_{180} を用いて乱反射量および輻射熱量を表すものとした。直達日射量 $\times \mu_0$ が真上、直達日射量 $\times \mu_{90}$ が水平方向、直達日射量 $\times \mu_{180}$ が真下から管路に入射し他の箇所は三角関数で滑らかに変化させた。表-6 中、 μ_0 、 μ_{90} の若干の相違は直達日射量に応じてわずかながら変化をもたせたことに起因している。

全周を 120 分割した計算結果は図-10 のとおりである。a) の 8 月 3、4、5 日の場合、実測結果とのかなりよい一致がみられるが、c) の 16、18、20 日の場合は多少開きがある。前述のとおり、不確定な α 、 k 、 μ_0 、 μ_{90} 、 μ_{180} を用いた計算であるため、むしろ、計算に用いる数値を適切に選択すれば、図-10 程度の解が出し得るといふべきであろう。不確定な数値に注意を払わなければまったく実測値とかけ離れた解が求まることはない。伝熱現象を解明するうえで、計算のみに頼り切れないのは、主として計算に用いる数値の不明確さによる。

なお、8 月 5 日 12 時について断面外径、板厚のみを変化させて同様の計算を行った結果が表-7 である。管路の円周方向温度分布は外径および板厚にほとんど無関

表-6 計算に用いたデータ

日 時	T_a	λ	直達日射量	k	α	μ_0	μ_{90}	μ_{180}
8/ 3 12:00	30.8	1402.0	51.3	0.22	1.58	0.10	0.70	0.45
8/ 4 12:00	29.0	1402.0	27.5	0.22	0.98	0.15	0.75	0.45
8/ 5 12:00	33.8	1402.0	69.0	0.22	0.64	0.00	0.70	0.45
8/ 8 12:00	32.4	1402.0	52.8	0.22	0.80	0.10	0.70	0.45
8/10 12:00	30.6	1402.0	36.5	0.22	0.63	0.15	0.75	0.45
8/12 12:00	33.9	1402.0	61.8	0.22	0.68	0.00	0.70	0.45
8/16 12:00	32.4	1402.0	60.3	0.22	0.95	0.00	0.70	0.45
8/18 12:00	30.0	1402.0	31.8	0.22	0.84	0.15	0.75	0.45
8/20 12:00	33.6	1402.0	62.5	0.22	0.90	0.00	0.70	0.45

表-7 8 月 5 日 12 時の条件で断面外径、板厚のみを変化させた計算結果

断面外径; 板厚 (cm) (cm)	計 算 値 (°C)		
	最高温度	最低温度	温度差
35.0 ; 0.5	57.43	44.55	12.88
50.0 ; 0.8	57.45	44.53	12.92
60.0 ; 0.9	57.46	44.52	12.94
70.0 ; 1.0	57.47	44.51	12.96
80.0 ; 1.1	57.48	44.50	12.98
90.0 ; 1.2	57.49	44.50	12.99
100.0 ; 1.3	57.49	44.50	12.99

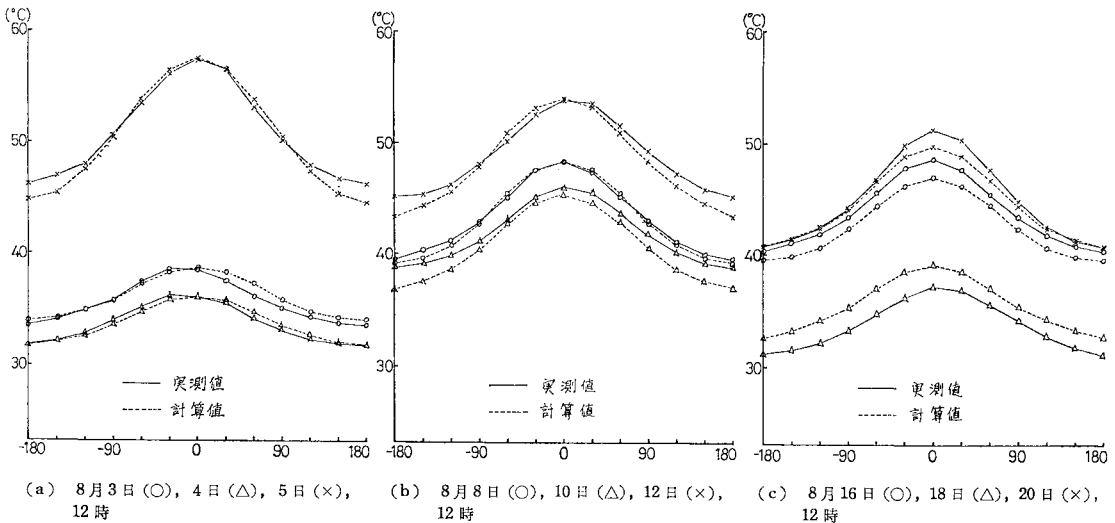


図-10 計算値と実測値の比較

係であることがわかる。これは 管路部材内の 熱伝導効果、つまり式 (2) 左辺第 1 項の影響が無視できるほど小さく、管路の各場所における入射と放散の熱収支のみで温度分布が決まっていることを意味している。表-6 に示したとおり、 μ_{90} の 0.70~0.75、 μ_{180} の 0.45 が的確な値であるとするならば、管路のある断面における最低温度および温度差が地表面の状態に大きく影響されるのはきわめて当然である。

5. 結 び

以上、中空で両端が閉じられた管路の温度上昇に対する気象および環境効果を統計的に考察し、さらに管路の温度分布の計算法について検討した。限られた条件下における実測データおよび計算値から得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 現象を説明するための重回帰モデルとしては、単純な線形モデルで十分である。管路のある断面における最高温度は直達日射量、風速、大気温度を用いて回帰式により精度よく推定でき、偏回帰係数の符号はそれぞれ正、負、正である。ある断面における最高、最低の温度差は直達日射量、風速を用いてある程度まで回帰式で推定できるが、最高温度の場合と比較して推定精度が劣り、層別と本論文で用いた 4 つ以外の説明変数の取り込みを検討することが必要である。なお、直達日射量に対する偏回帰係数の符号は正であるが、風速 に対しては正、負どちらの場合もあり得る。

(2) 管路のある断面における最低温度は地表面の影響を強く受ける。したがって、最高、最低の温度差も同様である。地表面からの輻射熱は地表面の状態の違い（たとえば、アスファルト、芝など）、時間帯（午前と午後）によって異なると思われるので、これらを層別することにより、温度差のよりよい推定が可能となる。地表面と

管路断面中心（管路外径 50 cm）との距離も説明変数あるいは層別因子の 1 つとなるが、50 cm と 60 cm 程度の違いはほとんど現象に反映されない。

(3) 本論文で検討した管路の温度分布の計算式は、熱に関する定数を適切に与えれば、実測値とよく一致する解が得られる。本式を用いて計算を数多く試みた範囲内では、管路においては管路材質の熱伝導率が高い場合でも、部材内の熱伝導効果は無視できるほど小さく、したがって、温度分布は管路の外径および板厚にほとんど無関係である。

謝 辞：本研究を行うにあたり、終始、適切な助言をいただいた東京大学工学部計数工学科 藤野和建助手、大橋靖雄氏および計算にあたって多大のご協力をいただいた日立製作所ソフトウェア工場 小国 力氏、山崎紀之氏、橋本 智氏に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準，1974.
- 2) 日本道路協会：石油パイプライン技術基準，1974.
- 3) 日本水道協会：水道施設設計指針・解説，1977.
- 4) Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger: *Conduction of Heat in Solids*, 2nd. ed., Clarendon Press, 1962.
- 5) 川下研介：熱伝導論，オーム社，1971.
- 6) 日本機械学会編：伝熱工学資料，第 3 版，1975.
- 7) 日本太陽エネルギー学会編：太陽エネルギーの基礎と応用，オーム社，pp. 1~34.
- 8) 東京天文台編：理科年表，丸善，昭和 54 年.
- 9) 長谷川緒一・原田康夫・清田錬次・押尾祐三・遠藤秀雄：吊橋ケーブルの温度測定実験，橋梁と基礎，1975.10.
- 10) 大谷 修・頭井 洋・新家 徹：吊橋主ケーブルの架設途中における温度応答特性について（第 1 報 ケーブル物性値の特性について），土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集（第 1 部），1978 年 9 月.
- 11) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉沢 正：多変量解析法，日科技連，pp. 25~158, 1978.

(1979.3.15・受付)