

東北地方建設局企画部

正会員 〇 赤 津 武 男

後 藤 忠

仙台技術事務所

菊 地 新 一

シャープ株式会社

高 田 吾 治

近年の急激な交通需要の増大に伴い、積雪寒冷地における交通を安全かつ円滑に保つための対策も、道路設計上基本的に不可欠な課題となってきた。これを解決するための研究の一環として、著者等は積雪寒冷地における橋梁のロードヒーティングに関連した基礎的な研究を、主に観測を中心として行った。観測場所は、青森県と岩手県の県境沿いの馬淵川に架けられている国道4号線の青岩大橋であるが、この付近は東北地方でも有数の寒冷地である。

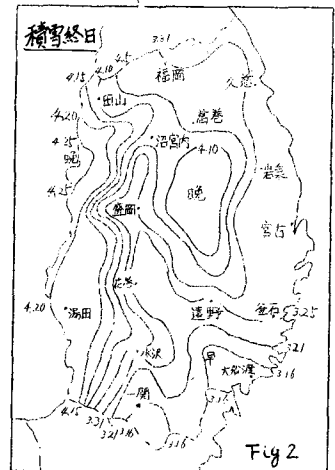
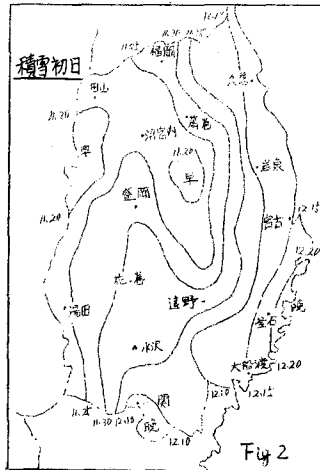
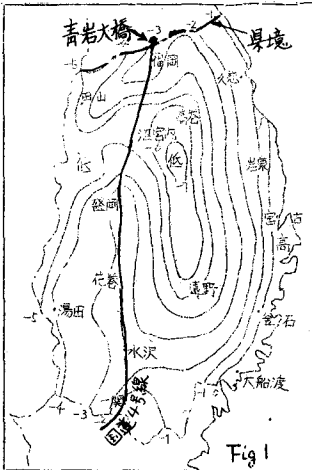


Fig. 1 岩手県1月平均気温(1931~1960)¹⁾ Fig. 2 岩手県積雪初日と積雪終日(1924~1960)¹⁾

ちなみに、過去約30年間の平均による岩手県1月平均気温をFig. 1に、積雪初日と終日をFig. 2に示した。青岩大橋付近は1月平均気温においても水の凍結温度(0°C)以下で、積雪期間も約4ヶ月あり、青岩大橋に最も近い青森県の三戸農業気象観測所における1971年1月積雪日数は31日間にも達しているが、これらの資料は今後の高速道路の設計上、路面凍結対策と路面積雪対策が不可欠な課題であることを示唆している。この課題を解決する手掛かりとなるのが地表面の熱収支であるが、これは一般に次式(1)で表わされる。(ここで Q_N は純放射量、 Q_g は地中熱輸送量、 Q_H および Q_E は各々顕熱および潜熱輸送量を示し、各記号の矢印は各々の成分が矢印の向きにあるときは正、矢印の逆向きのときは負の値となる。)

$$Q_N^{\uparrow} = Q_g^{\uparrow} + Q_H^{\uparrow} + Q_E^{\uparrow} \quad (1)$$

しかし実際にロードヒーティングが必要な時は路面上に雪氷が存在する時だから面に関する熱収支をとり扱った(1)は本当は不適当であり、体積を有する媒体の熱収支を問題にするのが理想的である。この場合には、例えばScott et al. (1961)の研究結果を紹介したMunn (1966)³⁾の熱収支法が望まし

い(次式(2), (3), (4)).

$$\text{氷に対応する式} \quad Q_S = Q_{AS} + Q_{iw} + Q_{is} \quad (2)$$

$$\text{雪に対応する式} \quad Q_S = Q_{AS} + Q_{is} + Q_L^{\downarrow} - Q_L^{\uparrow} + Q_H^{\uparrow} + Q_E^{\uparrow} \quad (3)$$

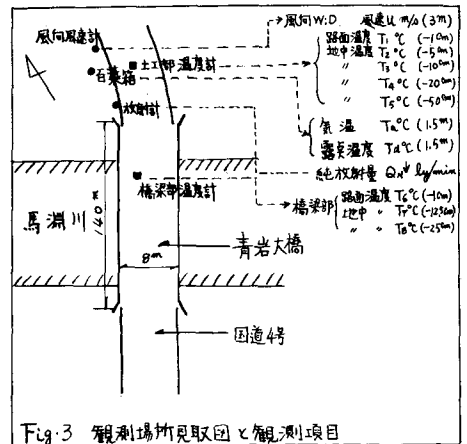
$$\text{氷上に雪がない時} \quad Q_S = Q_{AS} + Q_{iw} + Q_L^{\downarrow} - Q_L^{\uparrow} + Q_H^{\uparrow} + Q_E^{\uparrow} \quad (4)$$

ここで Q_S は氷中又は雪中の顕熱および潜熱の貯熱率であり、媒質の温度変化や雪氷の厚さ変化に伴う体積変化によって表わされる。 Q_{AS} は単位時間に媒質に吸収される short wave radiation であり、 Q_{iw} と Q_{is} は各々氷と湿った路面の間の熱交換率、氷と雪の間の熱交換率である。 Q_L は long wave radiation である。(1)と(2), (3), (4)の違いは radiation は地中には浸透しないが雪氷中には浸透していくという差に基いている。このような熱の出入によって融雪氷が左右される訳だから、ロードヒーティングの設計に際しては、この熱収支こそが基礎となる。理想的には(2), (3), (4)の左辺に発熱量 W を加えた形の立体の熱収支を検討すれば融雪氷や凍結の防止に必要な電力量が計算される訳だが現在の技術水準では困難である。従来から用いられている所要電力量推定式はいずれも半経験的なものであるが、W. P. Chapman の式がある。⁴⁾これは雪を溶かして蒸発させるために必要なエネルギーと融水からの顕熱および潜熱エネルギーの和として次式(5)のように表わされている。

$$W = (H) + M + A(Q_H^{\uparrow} + Q_E^{\uparrow}) \quad (5)$$

(H), M は各々雪温を 0°C に上昇させ、さらに融雪に必要なエネルギーであり A は雪氷に覆われている道路部分の割合として表わされている。ただしこの式は主として道路におい適用されるものであり Q_G の効果は積雪時には無視し得る場合が多いが、今回のように橋に適用する場合には橋底からの熱損失も考慮し Q_G の効果(5)右辺に加える必要がある。これらの事を考慮して以下に述べる観測を行った。

Fig. 3 に観測項目を示すものであり、使用した装置はプロペラ式風向風速計、白金抵抗線温度計、デュセル露点温度計およびネットラジオメーターである。各感部からの出力信号は橋の下(青森側)に設置した gyro-curve 中の打点式記録計に伝送(直送)し連続自動記録させた。このようにして得られた観測記録は30分の読取間隔で人間が目で読み取った。このようにしてデジタル化された各気象要素は総てミニコンピューターを用いて解析した。Fig. 4 は日界を8時とした6気象要素の日変化を昭和46年2月23日、24日、25日について示したものであり、工段から純放射量、気温、風速、路面温度の順に示してある。この3日間は天候が各々異なっていく天候による気象要素変動の典型的なパターンである。この図の純放射量 Q_N に着目すると比較的きれいな sinusoidal wave として変化しており、この変化に伴って路面温度と気温が変化していくように見え、気象学的センスを満足させるものである。また工部部路面温度と橋梁部路面温度は極めて良く一致している。これがFig. 5である。若干橋梁部路面温度が高くなっているが(0.3°C)、これは標準偏差から予測される誤差($\pm 1.0^{\circ}\text{C}$)の範囲内である。また橋梁部と工部部の地



中温度プロファイルをFig.6に、このプロファイルの日変化をFig.7に示す。Fig.6を見ると、土工部では雨の日を除き地中深くなればなるほど温度は上昇し、変化は小さくなっていくが、橋梁部では中央部で最大値が見られるが橋の底は低温であり、橋底からの熱損失量が多くなり多量に推察される。Fig.7では地中温度プロファイルの変動がかなり大きく、熱量 Q_g は日中は上から下へ、夜間は下から上へ向っているが、夜間、橋梁部では上と下へ熱が流れ、divergenceが起っているらしいことが推察される。ところで先に、路面温度が純放射と同様に sinusoidal wave として変動することを述べたが、その場合地中温度がどのように変動するかを調べてみた。地中の温度変化は路面温度の変化に伴うものであるから地中の温度変化も sinusoidal wave となるはずであり、深さ z の地中温度の形を

$$T(z,t) = \bar{T}(z) + T'(z) \sin \sigma t \quad (5)$$

としてさしつかえなし。境界条件を

$$z=0 \text{ で } T = \bar{T} + T' \sin \sigma t \quad (6)$$

$$z \rightarrow \infty \text{ で } \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = 0$$

とすれば、熱伝導方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_g \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

(なおここで $\sigma = \frac{2\pi}{24}$, K_g は工の熱伝導率である。) に(5)を代入して解が得られる。この解の変動成分は

$$T' e^{-\sqrt{\frac{\sigma}{2K_g}} z} \cos(\sigma t - \sqrt{\frac{\sigma}{2K_g}} z) \quad (8)$$

となる。したがって地中温度は深さと共にあまり変化せず(振幅減少)、その位相は遅れることが推察される。全気象要素を sinusoidal wave の合成関数として表わしFig.3の全気象要素を1日(24時間)基調波とする12階の調和解析を行ない、Fig.3の記号をそのまま用い、2月25日の各気象要素を(平均値)+(第一項)で表わす。

$$U = 3.1 + 2.45 \sin(x + 60.0^\circ) \quad (9)$$

$$Q_N = 0.0 + 0.58 \sin(x + 35.0^\circ) \quad (10)$$

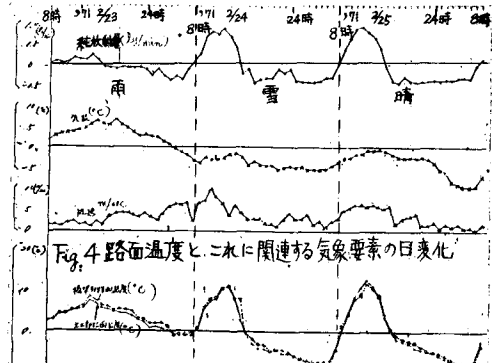


Fig.4 路面温度とこれに関連する気象要素の日変化

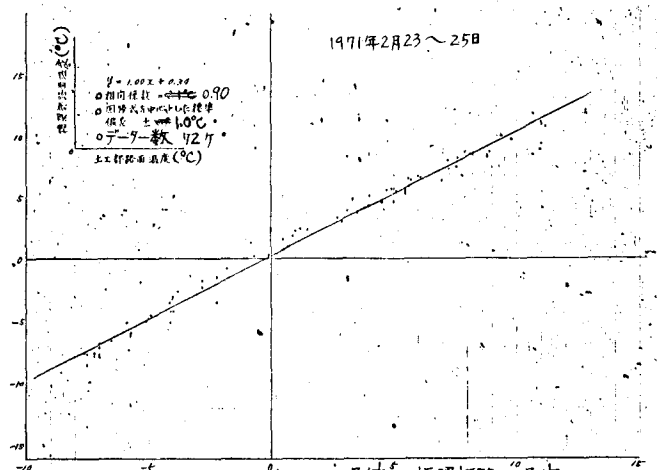


Fig.5 土工部路面温度と橋梁部路面温度

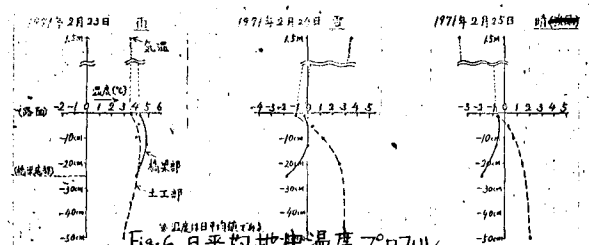


Fig.6 日平均地中温度プロファイル

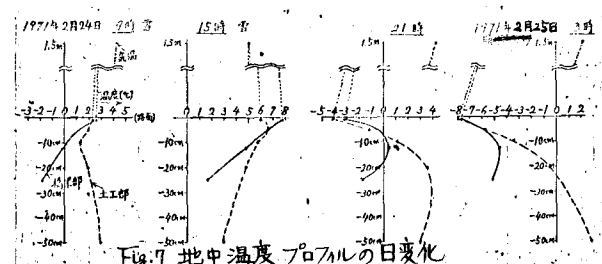


Fig.7 地中温度プロファイルの日変化

$$T_a = -3.7 + 3.40 \sin(x - 33.2^\circ) \quad (11)$$

$$T_d = -12.3 + 0.18 \sin(x - 19.5^\circ) \quad (12)$$

$$T_1 = -0.6 + 8.15 \sin(x + 6.0^\circ) \quad (13)$$

$$T_2 = 0.3 + 6.35 \sin(x - 8.0^\circ) \quad (14)$$

$$T_3 = 0.6 + 4.10 \sin(x - 15.3^\circ) \quad (15)$$

$$T_4 = 1.4 + 1.96 \sin(x - 58.1^\circ) \quad (16)$$

$$T_5 = 2.0 + 0.07 \sin(x + 63.4^\circ) \quad (17)$$

$$T_6 = -0.7 + 7.79 \sin(x + 0.0^\circ) \quad (18)$$

$$T_7 = -0.7 + 4.50 \sin(x - 54.0^\circ) \quad (19)$$

$$T_8 = -1.9 + 1.97 \sin(x + 8.2^\circ) \quad (20) \quad (10) \text{ から } (20) \text{ をみると、その平均値、振幅、位相差、に注目する}$$

といずれもこれまでの考察と一致し、数学的基礎を与えたことにもなる。Fig. 8 は 2 月 24 日の橋体

路面温度の実測値と調和解析結果を示すも

のであり、Fig. 9 は調和解析結果を近似計

算法として用いる可能性を探るものである

。誤差の範囲によっては気象要素を数学的

に表現できることになる。さらに路面温度

をはじめとする各気象要素を定量的に表現

することにより、ロードヒーティングの設

計に必要な熱伝導方程式等を解くための初

期条件と境界条件を決定することになった

。また Fig. 4 で 2 月 23 日の風速と路面温度

の変化に注目すると風速の増加と共に路面温度は減少して

おり他の 23 日や 25 日の例とは異なっている。ここでの現象

が行っていたかは明らかではないが夜間の橋面からの長波放

射による冷却現象だりではないようである。(Fig. 10 は横軸に

風速、縦軸に 1 時間の温度減少率をとってプロットしたもの

である。)このような例は数多くみられるが、まだ一般的な結

論として評価するには至ってから今後研究課題である。

最後に 2 月 24 日の所要電力量を計算すると次のようになる。

降雪の深さは 6 cm であるが Fig. 4 の QN の急変化時にのみ降雪があったと仮定した。また顕熱と潜熱の

算定は山元 et al. (1964) および Pasquill (1949) に従い、aerodynamic 法により求めると 170 W/m^2 とな

り、一方、融雪および凍結防止を目的とした場合は防雪工学ハンドブックの式により 300 W/m^2 となった。

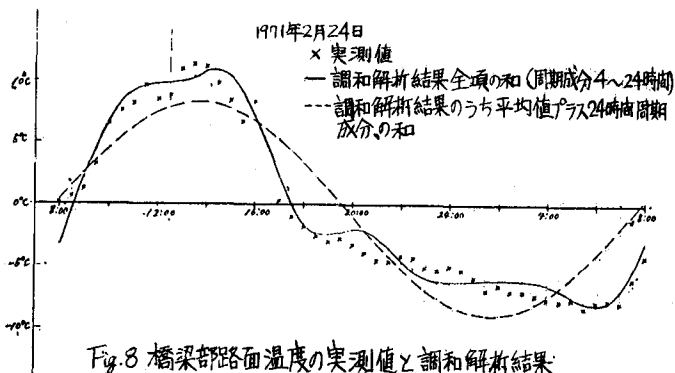


Fig. 8 橋梁部路面温度の実測値と調和解析結果

のであり、Fig. 9 は調和解析結果を近似計

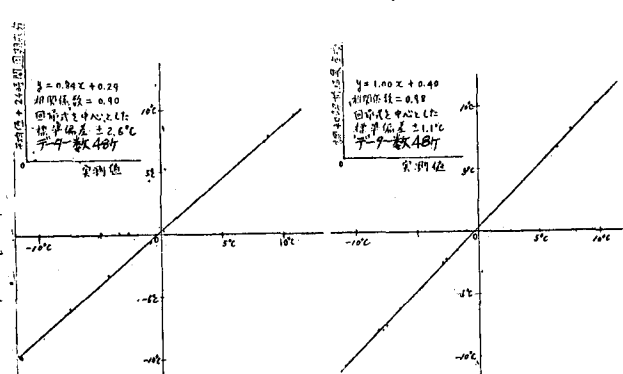


Fig. 9 調和解析の精度 (1971 年 2 月 24 日)

。また Fig. 4 で 2 月 23 日の風速と路面温度

の変化に注目すると風速の増加と共に路面温度は減少して

おり他の 23 日や 25 日の例とは異なっている。ここでの現象

が行っていたかは明らかではないが夜間の橋面からの長波放

射による冷却現象だりではないようである。(Fig. 10 は横軸に

風速、縦軸に 1 時間の温度減少率をとってプロットしたもの

である。)このような例は数多くみられるが、まだ一般的な結

論として評価するには至ってから今後研究課題である。

最後に 2 月 24 日の所要電力量を計算すると次のようになる。

降雪の深さは 6 cm であるが Fig. 4 の QN の急変化時にのみ降雪があったと仮定した。また顕熱と潜熱の

算定は山元 et al. (1964) および Pasquill (1949) に従い、aerodynamic 法により求めると 170 W/m^2 とな

り、一方、融雪および凍結防止を目的とした場合は防雪工学ハンドブックの式により 300 W/m^2 となった。

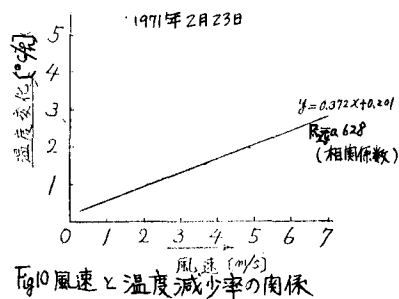


Fig. 10 風速と温度減少率の関係

引用文献

- 1) 気象庁: "日本の気候"
- 2) 日本気象協会青森支部: "青森県気象月報" 昭和 46 年 1 月
- 3) R.E. Munn: "Descriptive micrometeorology". Academic Press (1966)
- 4) 原田薫, 大橋弥太郎: "北海道における Road Heating について." 雪氷 Vol. 27, NO. 3, May (1965).