断熱材設計のための寒冷地トンネルにおける坑内延長方向の温度解析

An Estimation of Inner Temperatures at Cold Region Tunnel for Heat Insulator Design

河村 巧*, 三上 隆**, 福本皓一*** Takumi KAWAMURA, Takashi MIKAMI, Kouichi FUKUMOTO

*北海道大学大学院,工学研究科北方圈環境政策工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13 条西8丁目)
**工博,北海道大学大学院教授,工学研究科北方圏環境政策工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13 条西8丁目)
***北海道大学大学院,工学研究科北方圏環境政策工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13 条西8丁目)

In cold region, a heat insulator for icicle prevention has been developed in the new constructed and existing tunnels. In order to determine the necessary length of anti-icicle treatment from tunnel entrance area, this paper presents a theoretical equation for estimating the temperature in the tunnel. The equation is obtained using theoretical model considered heat convection/conduction between the tunnel ground and the air flow in the tunnel. Applicability and accuracy of the equation are examined by comparing the calculated results with measured results. It is found that the calculated values well agree with those measured in the field.

Key Words: heat insulator design, estimating the temperature, theoretical model キーワード: 断熱材設計,温度推定,理論モデル

1. はじめに

北海道における道路トンネルは、つららや側氷の発達, 地山凍結による覆工の変形等,凍害を受ける危険性が大 きく、そのためトンネル坑口の一定区間において、既設 のトンネルでは覆工表面に断熱材(外部断熱処理)が、新 設のトンネルでは一次覆工と二次覆工の間に断熱材(内 部断熱処理)が施工される.



図-1 坑口部・坑内延長方向温度の観測トンネル位置図

断熱材処理に対する設計は、素掘り(地山のみ)あるい はトンネル覆工と地山から成るトンネル地山方向の解 析モデルを用いて、まずトンネル坑内延長方向の温度が 0℃以下となる範囲を推定し、次に所要の断熱材厚さを 決めるのが一般的である.しかし、断熱材厚さ^{1~4}と範 囲⁹は、トンネル坑口気温および坑内延長方向の気温変 動に大きく左右される.

トンネル坑口気温は、計画地点および建設地点の冬期 気温の観測を基に決定するのが望ましいが、観測 されない場合がほとんどである.そこで著者らは、 計画されたトンネルの坑口気温(気温の未観測地 点)の合理的な推定法として、地域気象観測シス テム(アメダス)のようなサイト周辺における既 存の観測値を利用する確率・統計的な補間 / (Semi-Variogram⁶))手法を提案^{7,9}した.

一方、トンネル坑内延長方向の気温変動については、著者らは図-1に示すように7箇所のトンネルにおいて実際に得られた坑口・坑内延長方向の観測気温から、トンネル坑内の年平均気温は坑口から中心部の方向に入るにつれて上昇し、温度振幅は減少するという特性を抽出して、坑内風の状況に即した延長方向における気温変動の推定を試みている¹⁰.

岡田ら⁵は,鉄道トンネルのつららの発生領域に 着目した実態調査よりつらら発生領域を検討する とともに、理論的解析によりトンネル坑内の気温変動の 検討を行っているが、トンネル坑内の年平均気温を一定 気温として扱って温度振幅の減衰特性の考察を行った ものである.また天野ら¹¹⁰は、寒冷地トンネルとは異な るが、高熱地帯にある安房トンネルを対象に、トンネル 表面の乾湿状態や、岩盤内の非定常熱伝導等を考慮に入 れ、延長方向の気象予測を定常的な取り扱いで行ってい る.

以上のように、トンネル坑内延長方向の気温変動については、マクロな検討に有効な理論的な解析も少なく、 また気温変動特性も十分に明らかにされていないようである.

そこで本論文は、寒冷地トンネルにおいて施工される 断熱材の施工範囲の決定およびトンネル延長方向の温 度変動特性(年平均気温および温度振幅)を理解する上で 有用な温度算定式を理論的解析に基づき提示し、同時に 実測値と解析値の比較を行うことで、提案する坑内温度 算定式の有効性の確認を行ったものである.

2. 寒冷地におけるトンネル坑口と坑内の実測気温

2.1 トンネル坑口の気温U

表-1 トンネル坑口の年平均気温,年振幅,位相遅れ

トンネル名	年平均気温(℃)	年振幅(℃)	位相遅れ(日)
雄信内	6. 0	13.4	26
日勝	1. 5	14.2	2 5
旧豊浜	9. 2	12.2	319

衣一2 唯信内・日勝・旧豊浜トンイルの年半均気温、	、饭帽
---------------------------	-----

雄信内トンネル	年平均気温(℃)	年振幅(℃)
2 0 m	6.5	13.4
4 0 m	6. 7	13.2
8 0 m	6.9	13.0
160m	7.1	12.6
4 0 0 m	7.2	12.2
日勝トンネル	年平均気温(℃)	年振幅(℃)
2 0 m	2. 6	13.8
4 0 m	3. 4	13.4
8 0 m	3. 8	13.2
160m	4. 0	13.1
320m	4. 1	13.0
旧豊浜トンネル	年平均気温(℃)	年振幅(℃)
2 0 m	9.4	12.0
4 0 m	9.6	11.8
8 0 m	9.8	11.4
160m	10.2	11.0
300m	10.5	10.8
540m	10.8	10.6



図-2(a) 雄信内トンネル坑口の観測温度と補間値





気温の年周期変動Uは、年平均気温を U_m 、年振幅を A_Y 、時間(経過日数)をt、および位相遅れを t_0 と記せば、次式のような正弦関数で表せられる.

 $U = U_m - A_Y \sin\{2\pi(t - t_0) / 365\}$ (1)

ここで、図-1に示した7箇所のトンネルから道北、道 央、日本海側の比較的厳しい環境下の3トンネル(雄信 内トンネル:延長750m、日勝トンネル:延長580m、旧豊 浜トンネル:延長1,086m)を選び、実際に観測された坑 口気温から求めた年平均気温、年振幅および位相遅れを 表-1に、坑口の観測気温と式(1)による補間値を図-2に 示す.図より,観測された気温変動は,大きな周期の波(年 周期)に小さな波(日変化)が乗った挙動を示しているが, 年平均気温と年振幅を変数とする式(1)を用いても,気温 の年周期変動の様子は近似的に表すことが可能であるこ とが分かる.以下では,気温変動を年平均気温と年振幅 の2変数で表すことにする.

2.2 トンネル坑内延長方向の温度

雄信内トンネル、日勝トンネルと旧豊浜トンネルにお ける坑内延長方向の観測気温より、平均気温 U_z および 年振幅 A_z を求めたものを表-2に示す.

雄信内トンネルを例にとり、坑内延長方向の平均気温 U_z 、年振幅 A_z の変動をトンネル坑口を延長方向の起点 にして示すと図-3となり、他のトンネルと同様に、ト





ンネル坑内の平均気温および振幅は、坑口からの延長距離に伴って指数もしくは対数関数的に上昇もしくは減 衰しているのが特徴である¹².

3. トンネル延長方向の気温変動算定式の誘導

ここでは、熱伝導・伝達理論を用いてトンネル延長方 向の気温算定式を導出する.なお、用いた仮定は以下で ある.

- トンネルは円形断面とし、その半径方向はトンネル 覆工と地山の2層からなり、両者の熱的性質は方向、 温度および水分によらず一定とする.
- ② トンネル覆工と地山内の温度変化のうち、トンネル 延長方向と円周方向の温度変化は、半径方向の温度 変化に比べて小さいとみなせるので無視する.
- ③ トンネル内では車両等の発熱はなく、トンネル坑口 から風が一定の風速で吹き込む.
- ④ トンネル坑口およびトンネル内の気温は、周期的に 変化するものとする.

なお、一般のトンネル形状は円形断面で表すことはで きないが、トンネル覆工厚さがその背後にある地山領域 と比較して小さいため、通常はトンネル・地山モデルに はトンネル形状を仮定しない一次元モデルあるいは円 形とするモデルを採用するのが一般的である 1~5.10. ま た円形断面と仮定すれば、円形風道まわりの覆工と地山 の熱伝導は、図-4 に示す z 軸にほぼ直角に起こり、か つ風道まわりに一様に起こるので、トンネル軸方向およ び円周方向の熱伝導は考慮しなくでもよいことが知ら れている¹³⁾. さらに、熱特性のうち熱伝導率は温度と水 分によって変わり、熱伝導特性は低下するが、本研究で はマクロな延長方向の温度変動を理解することを主目 的としていることから一定値とした.

3.1 トンネル延長方向の基礎方程式

トンネル延長方向の解析モデルを図-4 に示す. 図で θ はトンネル坑口からzの位置でのトンネル内気温を 表す.



図-4 延長方向モデル

トンネル坑口から z の位置にある微小区間 dz におい て、空気が保有する熱の移動により微小時間(dt)内に獲 得する熱量とトンネル内空側壁面において dt の時間内 に内空側に伝達される熱量の和が、dt時間内の温度変 化($\partial \theta / \partial t$)dtを起こすのに必要な熱量に等しいものと すれば、トンネル延長方向の気温に関する支配方程式は 式(2)となる ¹⁴.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = coF(\theta_0 - \theta) - v\frac{\partial \theta}{\partial z}$$
(2)

ここで、 $coF = 2\alpha/C_p r_i \gamma$, α はトンネル壁面の熱伝 達率、 C_p はトンネル内の空気の定圧比熱、 γ は空気の比 重量、 r_i はトンネル半径、vは風速、 θ_0 はトンネル壁 面の温度である. なお、本研究と岡田らの研究 ⁵との大 きな相違点は、岡田らは覆工を無視した素掘り状態のト ンネルに対して、式(2)の左辺の時間に関する項を無視し た、いわゆる定常問題的に解析を行っていることである. トンネル内の温度 θ は次のように表される.

$$\theta = \overline{\theta}(z) + \Theta(z)e^{i\omega t} \tag{3}$$

 $\theta(z)$ は年平均気温, $\Theta(z)$ は温度振幅, $\omega = 2\pi/T$ は角速度で,Tは年周期である.

3.2 トンネル覆工・地山の基礎方程式および壁面温度 0

図-5に示すトンネル覆工・地山の2層モデルにおいて、各層の諸量には添字nを付して表し、気温をu,熱

伝導率を λ_{n} ,熱容量を $(\rho c)_n$ で示せば、各層の熱伝導方 程式は次式となる.

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} = k_n \left(\frac{\partial^2 u_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_n}{\partial r} \right) \quad (n = c, s) \tag{4}$$

ここでn = c は覆工に関する諸量, n = s は地山の それを表し, $k_n = \lambda_n / (\rho c)_n$ である.



図-5 中空円筒モデル

図-5 に示すモデルにおいて、 $r = r_1$ および $r = r_3$ における境界条件、 $r = r_2$ おける連続条件は以下となる.

境界条件
$$r = r_1; \lambda_c \frac{\partial u_c}{\partial r} = \alpha (u_c - \theta)$$
 (5)

$$r = r_3 ; u_s = u_0 \tag{6}$$

連続条件 $r = r_2$; $u_c = u_s$ (7)

$$\lambda_c \frac{\partial u_c}{\partial r} = \lambda_s \frac{\partial u_s}{\partial r} \tag{8}$$

ここで、式(6)において u_0 は不易層の温度、 r_3 は不易 層の位置を表すが、本研究では不易層の位置として、地 中温度の年較差が0.1℃以下になる深さは普通10m程度 であるとの報告¹⁵⁾を参考にして、 $r_3 = 10m$ とする.

さて式(2)を解くためには、トンネル壁面の温度 θ_0 が 必要となるので、以下にその導出過程を述べる.いま温 度 u_n を定常解 u_{n1} と準定常解 u_{n2} に分けて以下で表す.

$$u_n = u_{n1} + u_{n2}$$
 (n = c, s) (9)

 u_{n1} , u_{n2} に対する各層の熱伝導方程式,境界条件および連続条件は式(4)から式(8)で与えられるが, u_{n1} に対する境界条件は式(5)で $\theta \in \overline{\theta}(z)$ に置き換えた式になること、 u_{n2} に対する境界条件は式(5)で $\theta \in \Theta(z)$ sin *at*に置き換えた式になること、および境界条件式(6)では u_0 を零とすることに注意されたい.

トンネル壁面の温度 θ_0 の算定に必要な $u_{n1} \ge u_{n2}$ の結果は以下で与えられる.

$$u_{c1} = u_0 - \left\{ u_0 - \overline{\theta}(z) \right\} f(r)$$
(10)

$$\Xi\Xi\overline{C}, \quad f(r) = \frac{\ln\frac{r_2}{r} - \frac{\lambda_c}{\lambda_s} \ln\frac{r_2}{r_3}}{\frac{\lambda_c}{r_1\alpha} + \ln\frac{r_2}{r_1} - \frac{\lambda_c}{\lambda_s} \ln\frac{r_2}{r_3}}$$
(11)

$$u_{c2} = \Theta(z)g(r)\sin(\omega t - \eta)$$
(12)

$$g(r) = \{ (Aberx + Bbeix + Cker x + Dkeix)^{2} + (-Abeix + Bberx - Ckeix + Dker x)^{2} \}^{1/2}$$
(13)
$$\eta = \tan^{-1} \frac{Aberx + Bbeix + Cker x + Dkeix}{Abeix - Bberx + Ckeix - Dker x}$$
(14)

- - -

ただしberx, beix, kerx およびkeix はケルビン 関数,また $x = r/(\omega/k_c)^{1/2}$ である.式(13)および式 (14)に現れるA, B, CおよびDは, u_{c2} に対する熱 伝導方程式の一般解

 $u_{c2} = (Aberx + Bbeix + Ckerx + Dkeix)cos ot$ + (-Abeix + Bberx - Ckeix + Dkerx)sin ot (15) の積分定数を表すが, $\Theta(z)$ に単位の値を用いて求めた 結果である.

したがって、温度 θ_0 は次式で与えられる.

$$\theta_0 = u_{c1}(r_1) + u_{c2}(r_1)$$

= $u_0 - \left\{ u_0 - \overline{\theta}(z) \right\} f(r_1) + \Theta(z) g(r_1) \sin(\omega t - \eta)$ (16)

3.3 トンネル延長方向温度 0 について

トンネル内の温度 θ は式(3)より明らかなように、平均気温 $\overline{\theta}(z)$ および温度振幅 $\Theta(z)$ が求まれば得られる.

 $\overline{\theta}(z)$ について;式(2)に式(16)を代入し,各項につき 1周期Tの平均を取ると, $\overline{\theta}(z)$ に関する次の微分方程 式が得られる.

$$v\frac{\partial\theta}{\partial z} = coF\left\{f\left(r_{1}\right) - 1\right\}\left(\overline{\theta} - u_{0}\right)$$
(17)

上式をトンネル坑口(z=0)における $\overline{\theta}(z)$ の平均気温を $\overline{\theta}_0$ として,解を求めれば,以下で与えられる.

$$\overline{\theta}(z) = u_0 - \left(u_0 - \overline{\theta}_0\right)F(z) \tag{18}$$

ただし,
$$F(z) = \exp[coF\{f(r_1) - 1\}z/v]$$
 (19)

 $\Theta(z)$ について;式(2)に式(3)および式(16)を代入すれば、 $\Theta(z)$ に関する次の微分方程式が得られる.

$$v\frac{\partial\Theta}{\partial z} = coF[\{g(r_1)e^{-i\eta} - 1\} - i\omega]\Theta$$
 (20)

上式をトンネル坑口における振幅を Θ_0 として解を求めれば次式となる.

 $\Theta(z) = \Theta_0 G(z) \exp\left[-iz \{coF \cdot g(r_1) \sin\eta + \omega\} / \nu\right]$ (21)

ただし, $G(z) = \exp[coF\{g(r_1)\cos\eta - 1\}z/v]$ (22)

したがって、トンネルの延長方向温度は以下で与えら れる.

$$\theta(z) = u_0 - (u_0 - \overline{\theta}_0)F(z) + \Theta_0 G(z) \exp[i\omega t -iz\{coF \cdot g(r_1)\sin\eta + \omega\}/v]$$

なお上式より明らかなように、トンネル延長方向の年 平均気温および振幅の特性は、それぞれ式(19)で与えら れるF(z)および式(22)で与えられるG(z)を調べるこ とにより明らかにすることができる.ここで、F(z)は 式(1)の U_m , G(z)は同式の A_v に相当する.

(23)

4. 解析結果

ここでは、 $F(z) \geq G(z)$ の一般的特性を調べるとと もに、本研究で得られたトンネル延長方向の気温算定式 の有効性を検証するために、前述の3トンネルについて、 年平均気温と振幅の実測値と解析値の比較を行う.

4.1 F(z)およびG(z)の一般的特性

F(z)およびG(z)に影響を与えるパラメータには, 風速,地山の熱伝導率と熱容量,覆工の熱伝導率と熱容 量、トンネル半径,覆工厚等がある.

本研究では、表-3 に記した各種パラメータについて 検討を行った.解析は、特定のパラメータの影響を調べ るときには、表-3 に記した範囲内で変化させ、他のパ ラメータにはこの表で与えた基準パラメータを用いた.

なお,トンネル壁面の熱伝達率αは,次のユンゲルスの実験式を用いて評価した.

$$\alpha(W/m^2K) = 6.2 + 4.2v \tag{24}$$

表3	解析に用い	いた各種パラ	メータ	とその値
- · ·	/1/////////////////////////////////////		/ /	

解析パラメータ	パラメータの範囲	基準・ラメータ
風速 $\mathcal{V}(m/s)$	0.1~3.0	0.1
覆工の熱伝導率 λ_c (W/mK)	1.4~1.6	1.5
地山の熱伝導率 λ_s (W/mK)	0.34~6.1	1.4
覆工の熱容量 $(\rho c)_c (J/m^3 K)$	$(1.3 \sim 1.9) \times 10^{6}$	1.7×10^{6}
地山の熱容量 $(\rho c)_s (J/m^3 K)$	$(4.2 \sim 33.5) \times 10^5$	2.0×10^{6}
トンネル半径 $r_1(m)$	2.5~4.0	3.5
覆工厚 $h(m)$	0.5~1.0	1.0

空気の定圧比熱 $C_p = 1000 (J/kgK)$

空気の比重量 $\gamma = 1.3 (kg/m^3)$

解析の結果、トンネル半径、覆工厚、覆工の熱伝導率と熱容量は、 $F(z) \ge G(z)$ に与える影響が小さく、風速、地山の熱伝導率と熱容量が影響の大きいことが分かった。一例として、以下に影響の大きな風速に対する結果を示す。

図ー6および図ー7にそれぞれ、F(z)およびG(z)の 解析結果を示す. 各図で横軸は坑口からの距離zである. これらの図から以下のことが分かる.

- ① 風速の値が、 $v \ge 0.2$ (m/s)の場合の $F(z) \ge G(z)$ の値は、zの増加とともに直線的な関係で減少し、 その傾きの値の絶対値は風速が速いほど小さい.
- ② 風速の値が小さいv=0.1(m/s)の場合には、F(z)
 とG(z)はともにzの増加に対して反比例的に減少するが、zに対する変化率の絶対値は、坑口に近いほどG(z)の方が大きい.
- ③ 風速vと坑口からの距離zを固定すれば、F(z)の 値がG(z)のそれより大きい.





4.2 実測値と理論値の比較

ここでは、雄信内トンネル、日勝トンネルおよび旧豊 浜トンネルについて、トンネル延長方向の年平均気温、 年振幅の理論値と実測値の比較を行うとともに、解析値 に基づきトンネル内気温の最大値、最小値の分布特性を 調べた.特に最小値は後述するように断熱材の施工範囲 の算定に有用なものである.なお、表-4に3トンネル の計算に用いた諸元を示す.

トンネル名 諸元	旧豊浜	雄信内	日勝
内空断面積(m²)	70.8	44.2	32.2
トンネル半径(m)	4.8	3.8	3.3
覆工厚 (m)	0.45~0.8	0.5~1.2	0.7
延長距離 (m)	1086.0	750.0	580.0
風速 (m/s)	0.3	0.9	0.5
不易層の温度(℃)	11.1	8.0	3.5

表-4 3トンネルの計算に用いた諸元

図-8~図-10 に各トンネルの平均気温と温度振幅の 結果を示す。各トンネルとも、平均気温および温度振幅 の理論値は、それぞれ z の増加とともに増加および減少 傾向を示しており、実測値の傾向と一致している。

さらに雄信内トンネルの理論値は、実測値に近い結果 を与え、日勝トンネルでは、坑口から 50~150m 付近で 平均気温に差が見られ、また旧豊浜トンネルでは 550m 付近において、温度振幅に差が認められるのの、総じて 実現象を捉えており、本算定式の有効性が分かる.

なお平均気温,温度振幅に認められた差は,F(z)とG(z)に与える影響から判断すれば,風速を坑内で一定としたこと,地山の熱特性を一定と扱ったことなどによるものと判断される.







図-10 旧豊浜トンネルの平均気温と温度振幅

図-11 から図-13 は、理論式を用いて算定した3トンネルのトンネル内の最高気温と最低気温を示している. 図から3トンネルとも、最高気温はトンネル坑口からの距離 z によらずほぼ一定値を示し、また最低気温は z の増加とともに増加していることが理解できる.

さらに、断熱材の施工範囲を例えば 0℃以下の範囲と すれば、雄信内および日勝トンネルではほぼ全延長で必 要であり、旧豊浜トンネルの場合は、坑口から約 350m の範囲となることが分かる.







5. まとめ

本研究では、文献 14)で与えられた支配方程式(2)を用 いて、これまでに報告例のなかったトンネル延長方向の 温度算定式として、年平均気温と温度振幅の項からなる 理論解(式(23))を導いた。

提示した解による年平均気温および温度振幅は、それ ぞれトンネル坑口から中心部に入るにつれ上昇および 減少すること、また実測値とも比較的よく一致すること から、妥当なものであると判断された. さらに、式(19) で与えられたF(z)および式(22)で与えられたG(z)は、 それぞれ年平均気温および温度振幅の変動特性を理解 する上にも、また断熱材の施工範囲を算定する上にも有 効であることが分かった.

今後は、結果に大きな影響を及ぼすと考えられる風速 について、その乱れの影響などを考慮した支配方程式を 用いて検討を行う予定である.

参考文献

- 三上隆,林憲造,権田静也:寒冷地道路トンネルの 断熱材設計のための実用的な温度算定式の提案,土木 学会論文集,No.498/VI-24, pp.872-93, 1994.
- 2) 三上隆,岡田正之,芳村仁:既設トンネルの外部断熱 材の厚さの算定について,構造工学論文集,Vol.42A,

pp.43-48, 1996.

- 3) 岡田勝也・松本嘉司:断熱二重巻覆工によるトンネルのつらら防止工法の断熱材の最適化に関する研究,土 木学会論文集, No.388/III-8, pp.71~76, 1987.
- 4) 岡田勝也,松本嘉司:既設トンネルにおける気象条件の確率量を考慮した断熱つらら防止工の断熱材の最適化,土木学会論文集,第400/III-10, pp.171~177, 1988.
- 5) 岡田勝也・松本嘉司: 寒冷地トンネルにおけるつらら 発生領域に関する統計的・理論的解析, 土木学会論文 集, No.388/III-8, pp.77~84, 1987.
- 6) Delhomme, J.P.: Kriging in the Hydoroscience: *Advance in Water Resources*, Vol.1, No.5, pp.251-266, 1978.
- 7) 須藤敦史,三上隆,岡原貴司,岡田正之:寒冷地トン ネル内の気温変動について,トンネル工学研究論文・ 報告集第10巻,報告-28, pp.251-256, 2000.
- 3) 須藤敦史,三上隆,岡原貴司,岡田雅之,韮澤憲吉: 寒冷地道路トンネルの断熱材設計における気温変動の 推定,土木学会論文集,No.616/VI-42, pp.103~110, 1 999.
- 9) 須藤敦史,三上隆,岡田正之,角谷俊二:トンネル断 熱材における設計気温の設定,寒地技術論文・報告集, Vol.17, pp.262-267, 2002.
- 10)須藤敦史,三上隆,岡田雅之,河村巧,飯塚哲善:寒 冷地トンネル坑内における延長方向の気温変動,土木 学会トンネル工学研究論文集,第11巻,論文2, pp.9~1 4, 2001.
- 11)天野勲三,水田義明:トンネル内気象の予測計算,土 木学会論文集,No.387/II-8, pp. 219~228, 1987.
- 12)須藤敦史,三上隆,河村巧,岡田正之:トンネル内(延長方向)の気温変動について,寒地技術論文・報告集, Vol.17, pp.66-73, 2001.
- 13)平松良雄:通気学, p.188, 内田老鶴圃新社, 1974. 14)同上, pp.186~191.
- 15)山田雅士:建築の断熱, p.98, 井上書院, 1984.

(2007年9月18日受付)