

I-75

トンネル外気温の周期変化の推定と予測

(株)地崎工業	技術開発部	正会員	須藤 敦史
北海道大学	工学部 土木工学科	正会員	三上 隆
北海道大学	工学部 大学院修士課程	学生会員	斉藤 知秀

1. はじめに

寒冷地における多くのトンネルでは、冬期間の地山の凍上によって覆工等に変状が発生する場合がある。このため、トンネルの一次覆工と二次覆工の間に断熱材を施工する例が多くなっている。この設計に当たっては、トンネル覆工・断熱材・周辺地山を一次元非定常熱伝導モデルで近似し、トンネル内気温が周期的に変動するとして解析を行っている。加えて、覆工・断熱材および周辺地山における温度分布は、それぞれの熱伝導率・熱容量等のパラメータやトンネル内・外気温に依存する。この内、トンネル周辺地山の熱パラメータ推定に関する研究は数例事例が有り^{1,2)}、また拡張カルマンフィルタと一次元非定常熱伝導解析(理論式・有限要素法)³⁾を用いた地盤の熱定数の同定に関する研究を行っている。しかし、トンネル外気温は地域・地形・気象条件によってまちまちであるために、その推定や予測を行った研究は数が少ない。

そこで本研究では、トンネル外気温の周期的な変化を実際に得られた観測値を基に推定式のパラメータを同定し、気温の推定を試みている。

2. トンネル外気温の周期的変化の推定式

トンネル内・外気温の推定式は、年周期変動および日周期変動を考慮し、式(1)、(2)の合成で与える場合が多い^{4,5)}。

$$\theta_{oy} = t_m + A_y \sin(2\pi / 365)t \quad (1)$$

θ_{oy} :年周期変動

t_m :年平均気温

A_y :年振幅

t:day

$$\theta_{od} = A_d \sin(2\pi / 24)t \quad (2)$$

θ_{od} :日周期変動

A_d :日振幅

t:hour

また、トンネル内・外の最低気温は式(1)による年振幅と式(2)の日振幅の合成で表現され、式(3)のように表している。

$$\theta_{o,\min} = t_m + A_y + A_d \quad (3)$$

したがって、この推定式を用いる場合には観測値より式(1)、(2)の t_m, A_y, A_d を同定し、式(3)によりトンネル内の最低気温を推定しなければならない。

しかし、従来の研究において年周期変動は実測値より推定した例は見られるが、日周期変動を推定した例は少ない。その理由として、以下に示す事項が考えられる。

- 1). 日周期変動は地山の温度変化に与える影響が少ない。
- 2). 日周期変動は年周期変動に比較して気象(天候・風)の影響を受ける。言い換えれば、ノイズ的な年周期変動に対してノイズ的な変動を示す。したがって、予測式(2)を用いる場合にはデータのランダム性が高いため、日振幅の推定は難しい。
- 3). 日周期変動を推定するだけの十分な観測値がない。

3. パラメータの同定と外気温の再現

本節では、予測式(1)、(2)を基本とし、式の各パラメータをメタスにより観測された気温を用いて最小二乗法により同定し、同定パラメータにより各観測地点の外気温の再現を試みている。しかし、式(1)、(2)では任意の観測

日より各パラメータを同定するための位相角が定義されていないので、推定には位相角を含めた以下の式を用いている。

$$\theta_{oy} = t_m + A_y \text{SIN}(2\pi/365 - t_d)t \quad (4)$$

t_d : 日位相角

$$\theta_{od} = A_d \text{SIN}(2\pi/24 - t_h)t \quad (5)$$

t_h : 時間位相角

本解析でパラメータ同定には、1992年1月1日から約3年間観測された上川と白滝7メダスの気温を用いている。ここで、上川7メダスの観測気温(時間)を図-1に示す。図より気温は不規則に変動しているが、傾向として季節の推移とともに正弦曲線で表される変化を示している。また、上川7メダスにおける各観測日の最高・最低・平均気温を図-2に示す。

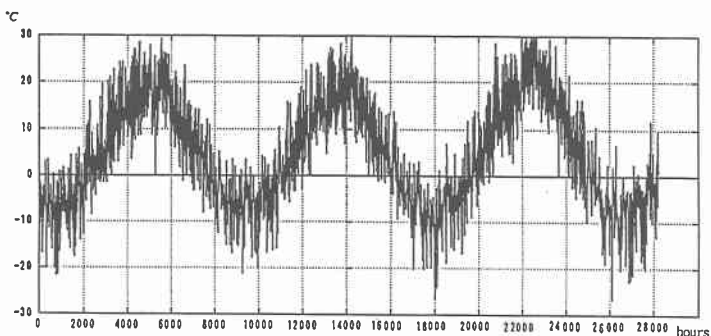


図-1 観測気温(時間)

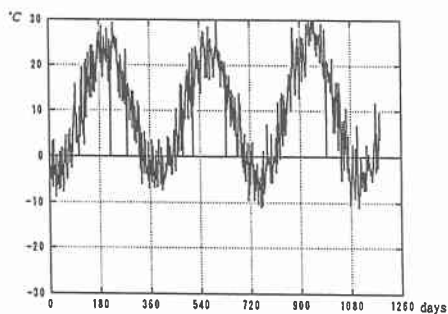


図-2(a) 最高気温

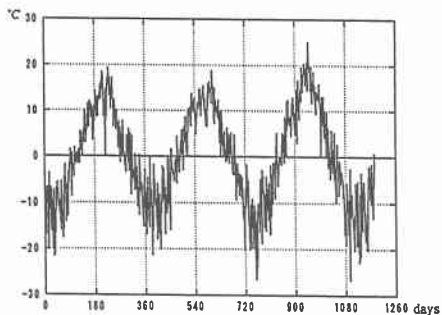


図-2(b) 最低気温

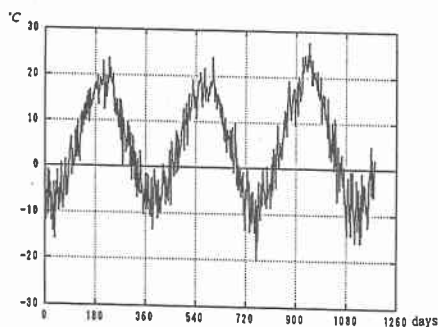


図-2(c) 平均気温

3.1 年周期変動

上川・白滝7メダスの観測記録(時間)を用いて、最小二乗法により求めた年周期変動を以下の式に示す。

(上川)

$$\theta_{oy} = 4.532 + 15.50 \text{SIN}\{2\pi(t-120)/365\} \quad (\text{a-1})$$

(白滝)

$$\theta_{oy} = 4.096 + 14.20 \text{SIN}\{2\pi(t-120)/365\} \quad (\text{a-2})$$

ただし、 t は1992年1月1日からの経過日数としている。ここで再現した年周期変動と観測値(平均気温)を図-3に示す。図より再現した年周期変動は平均的な気温の変動を示している。

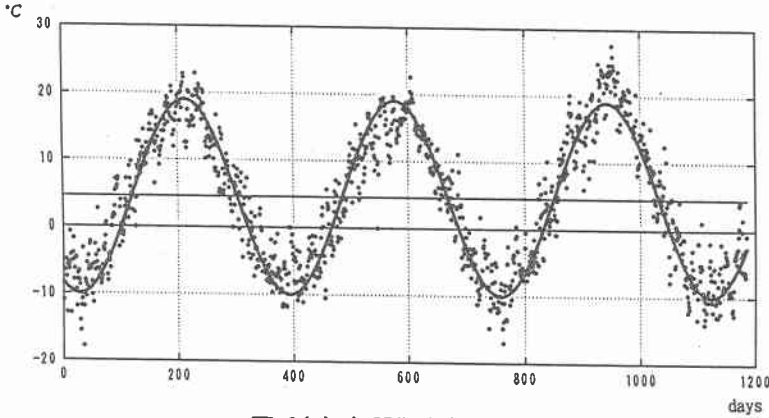


図-3(a) 年周期変動(上川)

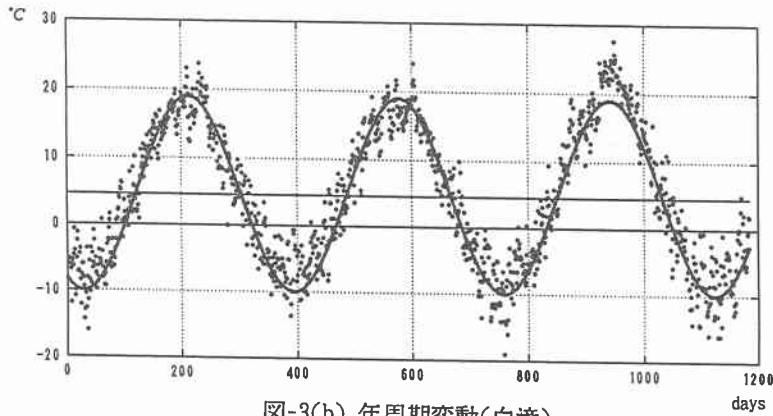


図-3(b) 年周期変動(白滝)

3.2 日周期変動

次に、気温の日周期変動の推定を行う。上川7メダスの代表的な気温の日変化を図-4(a)に示す。図より気温の日変動は前節に示した理由によりノイズ的な変動を示し、周期的変動をしているとは言い難い。そこで、図-4(b)に周期変動を示すと見られる日変化を示す。

ここで日周期変動の推定には、図-4(b)のような周期変動を示している観測記録を3~5箇所(期間2ヶ月~5ヶ月)抽出し、前節同様に最小二乗法により日周期変動の推定を行っている。求められた日周期変動を以下に示す。

(上川)

$$\theta_{od} = 6.420 \text{SIN}\{2\pi(t-8)/24\} \quad (\text{b-1})$$

(白滝)

$$\theta_{od} = 6.203 \text{SIN}\{2\pi(t-8)/24\} \quad (\text{b-2})$$

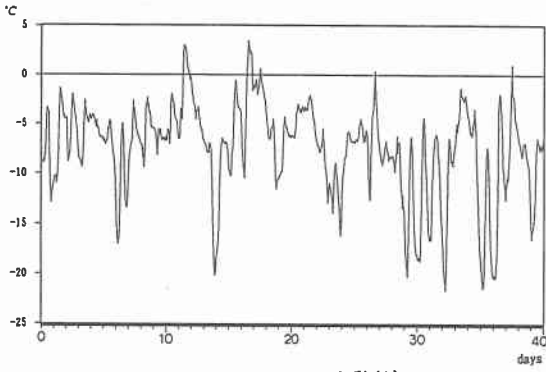


図-4(a) 気温の日変動(1)

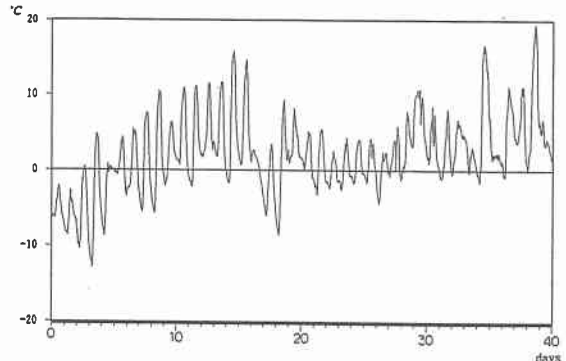


図-4(b) 気温の日変動(2)

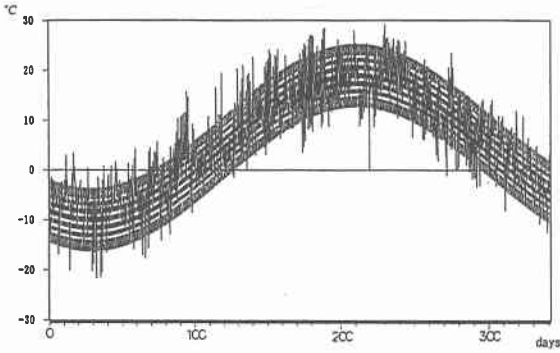


図-5(a) 周期変動の合成値(1)

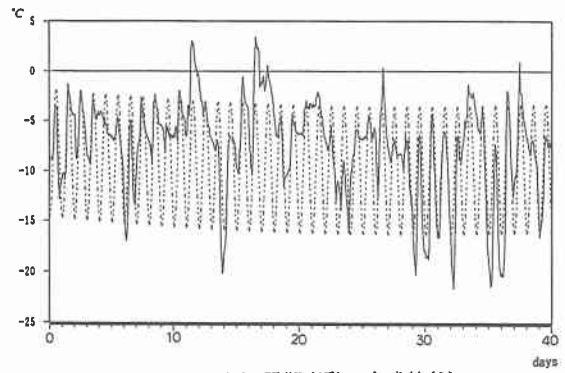


図-5(b) 周期変動の合成値(2)

ただし、 t は24時からの経過時間としている。ここで、推定した年周期変動と日周期変動を合成した再現気温と観測値の約1年間を図-5(a)に示し、また拡大図を図-5(b)に示す。

図-5(a)より、年周期変動は平均的な気温変動を示しているが、日変動は図-5(b)に見られるように、気温変動の再現性はよくない。

4. 最低気温推定式の検討

最低気温の推定は式(3)に示したように、平均気温・年振幅・日振幅の合成で表されているが、前節までの数値解析により日振幅の推定精度は良くない。そこで、日周期変動の推定を行わず簡易的に最低気温が得られる推定式の検討を行う。

そこで、最低気温の観測値を用いて3.1と同様に最低気温の年周期変動を求めると以下のようになり、最低気温の年周期変動と観測値は図-6に示すようになる。

(上川)

$$\theta_{oy} = -0.249 + 15.140 \text{SIN}\{2\pi(t-120)/365\} \quad (c-1)$$

(白滝)

$$\theta_{oy} = -0.197 + 14.387 \text{SIN}\{2\pi(t-120)/365\} \quad (c-2)$$

ここで、最低気温による年周期変動の推定値と3.2により合成した推定値を図-7に示す。図より、気温の最低は最低気温を用いた年周期変動の推定値と大差はない。

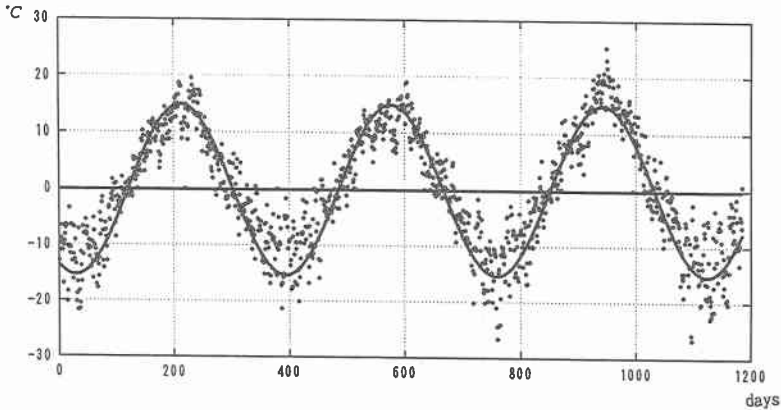


図-6(a) 最低気温の年周期変動(上川)

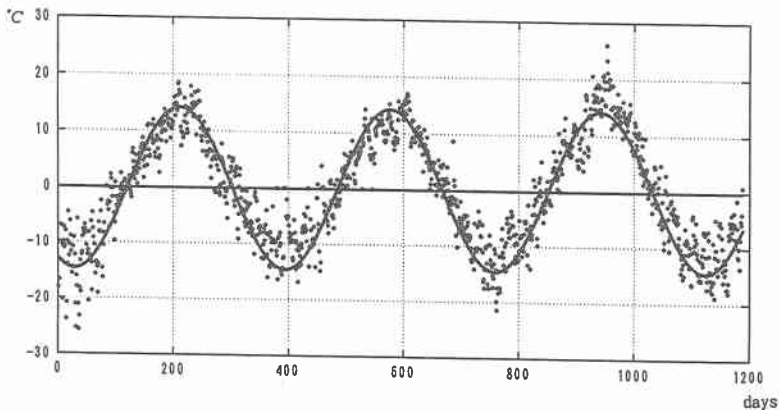


図-6(b) 最低気温の年周期変動(白滝)

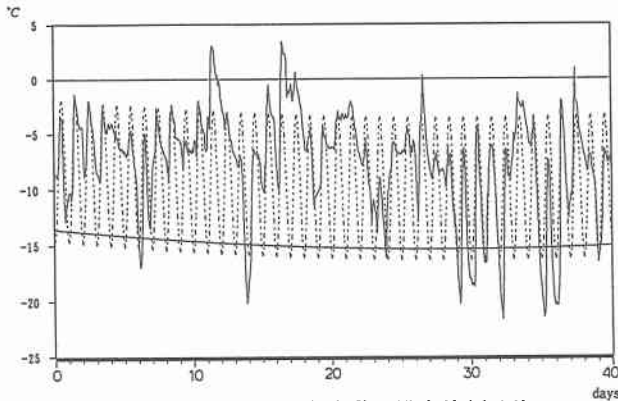


図-7(a) 最低年周期変動の推定値(上川)

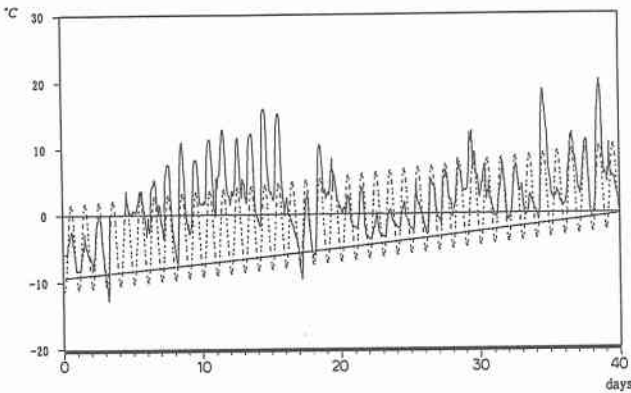


図-7(b) 最低年周期変動の推定値(白滝)

以上の数値解析結果より、簡易的に最低気温を表現する推定式は以下のように表される。

$$\theta_{o,\min} = t_{m,\min} + A_{y,\min} \quad (6)$$

$\theta_{o,\min}$: 最低気温の年周期変動

$t_{m,\min}$: 平均最低気温 $A_{y,\min}$: 最低気温の年振幅

5. 結論

トンネル外気温は地域・地形・気象条件によってまちまちであるために、その推定が難しい。そこで本研究では、トンネル外気温の周期的な変化を実際に得られた観測値を基に推定式のパラメータを同定し、気温の再現を試みた結果を以下に示す。

- (1) 年周期変動はトンネル的な変化を示し、気温の推定には正弦関数を用いることができる。
- (2) 日周期変動は年周期変動に比較して気象の影響を受けるためノイズ的な変動を示す。したがって、気温の推定に正弦関数を用いると推定誤差が大きくなる。
- (3) 最低気温の観測記録を用いて年周期変動を推定することにより、簡易的に最低気温の推定ができる。

参考文献

- 1) 岡田勝也・高木憲治・朝倉俊弘・藤林征男: 長大トンネルにおける断熱二重巻覆工の断熱材厚さ選定に関する設計法, 土木学会論文集, No. 505/Ⅲ-29, pp. 211-218, 1994.
- 2) 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. 87-93, 1994.
- 3) 斉藤知秀・三上 隆・須藤敦史: 拡張カマツノミを用いたトンネル地山の熱定数の予測, 土木学会北海道支部論文報告集, 第51号, I-23, pp. 110-115, 1995.
- 4) 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.
- 5) 岡田勝也・松本嘉司: 鉄道トンネルにおける凍結深度の実態とトンネル内気温の周期的変化に対するその解析, 土木学会論文集, No. 424/Ⅲ-14, pp. 179-186, 1990.