

気象データから地温を推定する試み

A trial for estimating soil temperature from meteorological data

○原 道宏*

○Michihiro Hara*

*岩手大学名誉教授 (元岩手大学農学部教授)・計測自動制御学会永年会員

*Professor Emeritus, Iwate University・Half a Century Member of SICE

キーワード: 地温 (soil temperature), 気温 (air temperature), 日射量 (solar radiation)
フーリエ級数解析 (Fourier series analysis)

連絡先: 〒020-0111 盛岡市黒石野 1-32-11 原 道宏,
Tel & Fax: (019)662-8046, E-mail: mrhara2000@yahoo.co.jp

1. はじめに

気象と地象は、地表面における温度や圧力等のポテンシャルの連続および、熱流と物質流の連続という数学的物理学的要件により接続される。しかし、現代日本では、それらデータ取得は気象に極端な重きが置かれ、地中の温度や水分など地象に注意が払われることはほとんどない。例えば地温データが系統的に収集されていないことに象徴される。しかし、これも、人々の日々の生活を大切にすることを目指すあまりのことだろうと推測され、止むを得ないことだとは思ふ。

しかし翻 (ひるがえ) って、生きものは気圏、水圏、地圏の環境のもとに生きているのであり、地圏の環境だけを疎外することはできない。「根っこあつての植物」である。

本論文では、地温に焦点をあて、まず、地表付近の地温さえ解かれれば深部の温度は線

形数学によって「ほぼ」正確に解かることが示されている¹⁾ことに鑑み、地表付近の温度は気温と日射強度の線形和として「ある程度」正確に表されることを示す。これらの知見を総合すれば、気象の観測データから地温を推定することが可能になる。

前報¹⁾において周波数領域解析が地温推定に有用なことを示したが、その詳細を示すに至らなかった。本報は、毎日の気温の平均値と毎日の日射量の合計値から毎日の地温の平均値を推定する方法の詳細を示す。

2. データ

使用データは日本専売公社盛岡たばこ試験場 (第 1 測候所) で観測された **Table 1** のデータおよび、気象庁盛岡气象台 (第 2 測候所) が公表した **Table 2**⁶⁾ のデータである。

気象地象データは、**Table 1** に示される観

Table 1 日本専売公社盛岡たばこ試験場
(1980年代当時)における気象地象の
測定項目および、数値例とその意味

項番	測定項目	数値例	数値例の意味
1	年	1981	1981年
2	月日	106	1月6日
3	時分	173	17:30
4	気温[°C]×10	-38	-3.8 °C
5	地皮温度[°C]×10	8	0.8 °C
6	5cm地温[°C]×10	15	1.5 °C
7	10cm地温[°C]×10	20	2.0 °C
8	40cm地温[°C]×10	63	6.3 °C
9	100cm地温[°C]×10	95	9.5 °C
10	風向[16方位]×10	70	南南東
11	風速[m/s]×10	11	1.1 m/s
12	露点[°C]×10	-77	-7.7 °C
13	積算雨量[mm]	366	366 mm
14	相対湿度[%]×10	743	74.3 %
15	Mod[積算日照時間×10, 120]	13	1.3 h
16	過去30分間の日照時間[min]	0	0 min

Table A1 Table 1における16方位風向の意味

風向の数値	風向	風向の数値	風向
0	北	8	南
1	北北東	9	南南西
2	北東	10	南西
3	東北東	11	西南西
4	東	12	西
5	東南東	13	西北西
6	南東	14	北西
7	南南東	15	北北西

Table 2 気象庁盛岡地方気象台の公表気象
データの詳細項目および1981年1月6日
のデータ値の一例(いずれも抜粋)⁶⁾

(a) 詳細項目その1

日			6
気圧(hPa)	現地	平均	987.6
	海面	平均	1007.2
降水量(mm)	合計		0.5
	1時間最大値		0.5
	10分間最大値		0.5
気温(°C)	平均		-2.9
	最高		-0.3
	最低		-5.8
蒸気圧(hPa)	平均	3.6	
湿度(%)	平均		70
	最小		52

(b) 詳細項目その2

日			6
風向・風速(m/s)	平均	風速	1.9
	最大風速	風速	4.5
		風向	西北西
	最大瞬間風速	風速	9.8
		風向	西北西
最多	風向		
日照時間(h)			5.4
全天日射量(MJ/m ²)		合計	6.5
雪(cm)	降雪	合計	4
	最深積雪	値	55
雲量	平均		7.0
天気概況	昼	06:00 - 18:00	晴時々雪
	夜	18:00 - 翌日 06:00	雪

測項目が当時（1980年代の当時）、数値文字データが1インチ（25.4mm）幅の紙テープにパリティビットを含めて8ビットのASCII（ASCII）符号として穿孔（せんこう）された。30分ごとに一組16項目のデータで、約一月に1巻の量である。それを磁気データ（5インチFD等）に複写し、解析に供した。

一方、盛岡気象台ではTable 2に示されるデータを公表している。ここには示さないが盛岡気象台は毎時のデータも公表している。

Table 1およびTable 2を見比べると、地温に関する測定項目はTable 1にのみ有り、Table 2にはないことがわかる。

本報は、地温と地上気象との関係を探求するものである。上記2か所の観測所は約10kmの距離にあり、予備検証によれば地上の気象状況は非常に類似しており、たとえば、気温について両者の観測データをプロットするとその合一性を見ることができる。

そこで、これら二つの測候所の観測データを組み合わせて地温と地上気象の関係を解析した。具体的には、1984年2月6日からの365日間の毎日の値について解析した。

2.1 積雪深と地表温、気温、日射量

まず、積雪深と地表温を図示する。Fig. 1以降の図は、いずれも、1984年2月6日からの365日の毎日についての日量（温度は日平均値、日射量は日総量）を示すものである。

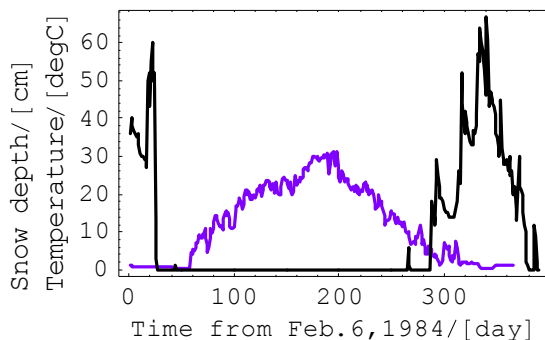


Fig. 1 積雪深（黒線）と地表面温度

2.2 気温と日射量の積雪深トリミング

Fig. 1に示されるように、地表面温度は積雪に強く影響され、積雪深が1cm以上在るときは積雪深の数値にかかわらず地表面温度が約0°Cである。その一方、気温や日射量は積雪深の数値の影響をまったく受けない。すなわち、地表面温度に対しては積雪という、いわば、強力な「非線形フィルター」があることになる。

そこで、積雪深が1cm以上の日は「気温=0°C、日射量=0 MJ/(m² day)」と解釈するトリミングを施した。それらの経過および結果をFig. 2からFig. 5に示した。Fig. 2とFig. 3は、積雪深と気温およびトリム気温、また、Fig. 4とFig. 5は、積雪深と日射量およびトリム日射量である。

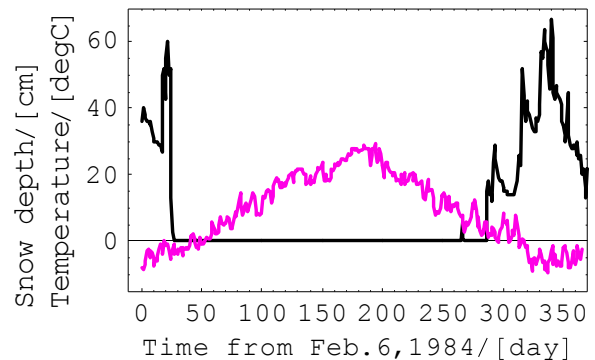


Fig. 2 積雪深（黒線）と気温

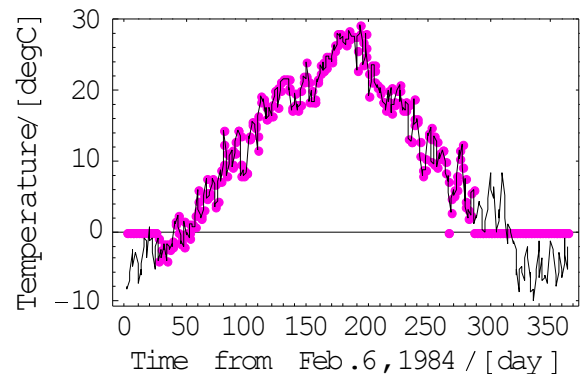


Fig. 3 気温（黒線）とトリム気温

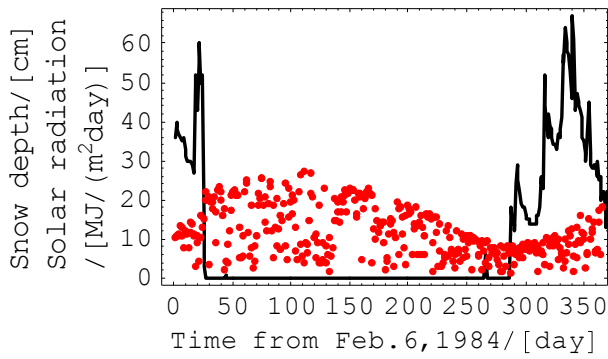


Fig. 4 積雪深（黒線）と日射量（赤色点）

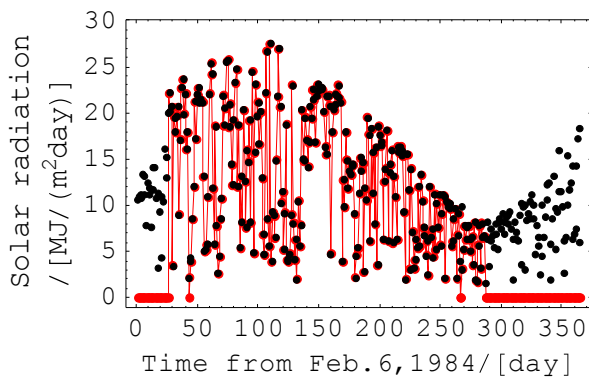


Fig. 5 日射量（黒点）とトリム日射量

3. 解析

3. 1 離散フーリエ変換・逆変換の導入

$i = \sqrt{-1}$ とし、 n 個のデータ $u[r]$ ($1 \leq r \leq n$) に対するフーリエ係数 $y[s]$ ($1 \leq s \leq n$) を離散フーリエ変換式(1)で定義するとき、

$$y[s] := \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{r=1}^n u[r] \text{Exp}\left[2\pi i (s-1) \frac{r-1}{n}\right] \quad (1)$$

$y[1]/\sqrt{n}$ はデータ u の平均値であり、また、 $y[s]$ ($s \geq 2$) はデータ u の第 $s-1$ 高調波成分（複素数）であり、 $y[s]$ と $y[n-s+2]$ は互いに共役複素数である。そして、式(1)で表される離散フーリエ変換 $y[s]$ ($1 \leq s \leq n$) から原数列 $u[r]$ ($1 \leq r \leq n$) が離散逆フーリエ変換式(2)により求められる。

$$u[r] := \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{s=1}^n y[s] \text{Exp}\left[-2\pi i (r-1) \frac{s-1}{n}\right] \quad (2)$$

3. 2 離散フーリエ変換・逆変換の例示

—— 地表温を例として ——

まず、Fig.6 の黒点で示される 1984 年 2 月 6 日からの 365 日毎日の平均地表温測定値 $u[r]$ ($1 \leq r \leq n=365$) を式(1)によりフーリエ変換し $y[s]$ ($1 \leq s \leq n$) を得た。これを式(2)右辺の計算式によりフーリエ逆変換し $v[r]$ ($1 \leq r \leq n$) を得た。 $v[r]$ の値は Fig.6 の淡青色線で示した。測定値 $u[r]$ とフーリエ変換逆変換値 $v[r]$ とは 10 進 16 桁の精度で一致した。この一致は Fig.6 から納得できる。Fig.6 は、離散値に関するフーリエ変換・逆変換を表す式(1)および式(2)の正しさを数値的に例示したものとなっている。

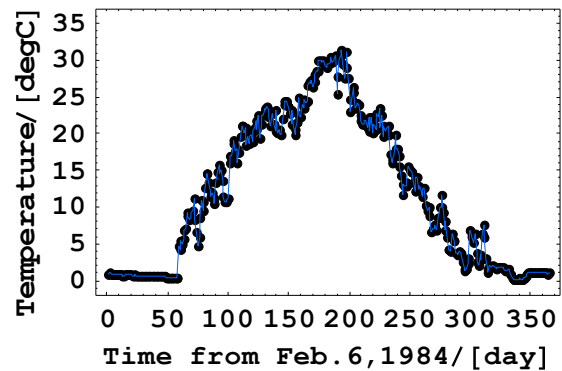


Fig. 6 日平均地表温の時間推移

黒点＝測定値。淡青色線＝測定値をいったんフーリエ変換し再び逆変換して得られた値を折れ線（直線）で結んだもの。

3. 3 離散フーリエ変換の意味について

前節において、フーリエ変換式(1)により得られた係数 $y[s]$ ($1 \leq s \leq n$) から、フーリエ逆変換式(2)により、元の数列 $u[r]$ ($1 \leq r \leq n$) が復元されることが例示された。例示によるまでもなく、もちろん、この復元プロセスは、数式演算により証明されるであろう。

しからば、フーリエ変換式(1)により得られる係数 $y[s]$ ($1 \leq s \leq n$)の持つ意味は何であろうか? $y[1]$ については、3.1節に記されているように、 $y[1]/\sqrt{n}$ はデータ $u(r)$ ($1 \leq r \leq n$)の平均値であり、このことは式(1)に $s=1$ を代入することにより確認される。

それでは、 $y[s]$ ($2 \leq s \leq n$)の意味はなんであろうか? それを示すのが Fig. 7-11 である。Fig. 7 (A) は式(3)を複素平面に、また、Fig. 8 (C) は式(3)の実部を 温度-t 座標面に、いずれも、 $1 \leq t \leq 365$ (t は実数)についてプロットしたものである。Fig. 7 (B) および Fig. 8 (D) は、同様に、式(4)をプロットしたものである。

$$y[2] \text{Exp}[-i(2-1) \frac{2\pi}{365}(t-1)] \quad (3)$$

$$y[3] \text{Exp}[-i(3-1) \frac{2\pi}{365}(t-1)] \quad (4)$$

式(3) および式(4) は、それぞれ、第1および第2高調波と解することができる。

そして、式(5)の実部を $1 \leq t \leq 365$ についてプロットしたのが Fig. 9-11 であり、黒点は整数 t についてのもの、また、曲線は実数 t についてのものである。

$$\frac{1}{\sqrt{365}} \left(y[1] + 2 \sum_{s=2}^{182} \text{Re} \left[y[s] \text{Exp} \left[-i(s-1) \frac{2\pi}{365}(t-1) \right] \right] \right) \quad (5)$$

ここでの関心事は、まず、「式(5)が測定値を正確に復元しているか?」である。このことについて前述同様に検証した結果、365点のデータ点において式(5)による計算値は測定値と10進16桁の精度で一致していることが確かめられた。

さて、Fig.9 は Fig.6 と一見、酷似しているが、両者には大きな違いがある。それは、Fig.6 においては、点(黒点=時刻整数点)

と点は直線で結ばれているのに対し、Fig.9 では、それが曲線(三角関数の合成曲線)で結ばれていることである。それは、Fig.9 を拡大した Fig.10 および Fig.11 に示されるとおりである。この曲線は、あたかも、黒点と黒点、すなわち測定点と測定点の間を意味ありげに結んでいるように見えるようである。しかし、それら曲線が黒点以外の箇所が測定値を正確になぞっているのか否かは不明であり、検証が必要である。その理由は、本来、本報の対象が数学現象ではなく物理現象だからである。

以上のことが示していることを考えると、離散データに関するフーリエ変換およびその逆変換と周波数領域におけるフーリエ変換およびその逆変換との相関が見えてくる。

すなわち、式(1)および式(2) は離散数列に関するフーリエ変換およびフーリエ逆変換に関する公式であるのに対して、式(3)から式(5)は式(1)のフーリエ変換を周波数領域においてフーリエ逆変換するものである。

4. 地表面温度を周波数領域における気温および日射量の合成と見る試み

前章において、地表面温度を例にして離散フーリエ変換・逆変換およびそれと周波数領域との関連を示したが、数値こそ違い、気温も日射量も同様に扱えることはあきらかである。筆者は、周波数領域において地表面温度は気温と日射量に周波数応答関数を乗じた積和であると考え、それらの周波数応答関数を具体的に求め、その妥当性を確かめてみようとした。もとより、気象地象現象は多数の要素が関係しており、雨風水蒸気圧雲量などの影響が避けられないわけであるが、最初の一步として、最大の入力候補として、気温と日射量を選んだ。

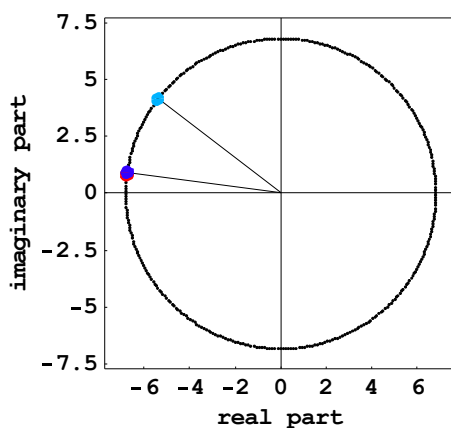
入力要素が気温と日射量の2個であるの

で、周波数応答関数も $a[1]$, $a[2]$ の 2 個を想定し、それらが満たすべき条件を考え、式(6)を立てた。具体的な数値を示す連立方程式が式(7)、また、その解が式(8)である。式(9)はその絶対値、また、式(10)は周期を 365 日とする日単位で表した偏角である。

ただし、解の絶対値は、その単位が気温は「 $^{\circ}\text{C}$ 」、日射量は「 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{ day})$ 」と異なるので数値の大小を直には評価できない。しいてその意味を求めれば、これらの単位のもとで、日射量は気温の $0.140141/0.960756 = 0.145865 [\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{ day})/^{\circ}\text{C}]$ 倍であると解することができる。

一方、解の偏角には明らかな意味を見ることが出来る。式(10.1)は気温が地表面温度に 1.14 日遅れて変化していることを、また式(10.2)は地表面温度が日射量に 72.29 日遅れて変化していることを示している。ただし、第 k 高調波の周期は第 1 高調波の $1/k$ すなわち $365 \text{ 日}/k$ であるから、合成の周波数伝達関数の、とりわけ偏角の数値は再吟味が必要と考えられるが、とりあえず、本報では、式(8.1)及び式(8.2)を第 1 ~ 364 全高調波に適用し逆変換して、地表面温度の推定値とし、それを Fig.12 の赤色折れ線で示した。

(A) 第 1 高調波の複素平面表示



(B) 第 2 高調波の複素平面表示

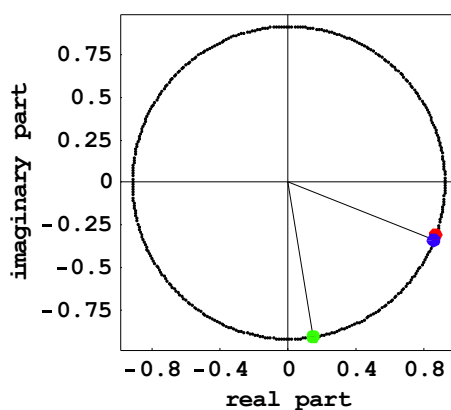
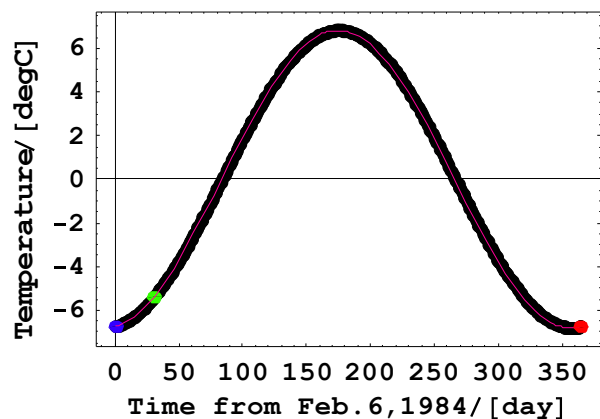


Fig. 7 地表面温高調波の複素平面表示
(365 日の日々の時間経過は右回り)
青=始点、緑=30 日点、赤=終点

(C) 第 1 高調波の時間推移



(D) 第 2 高調波の時間推移

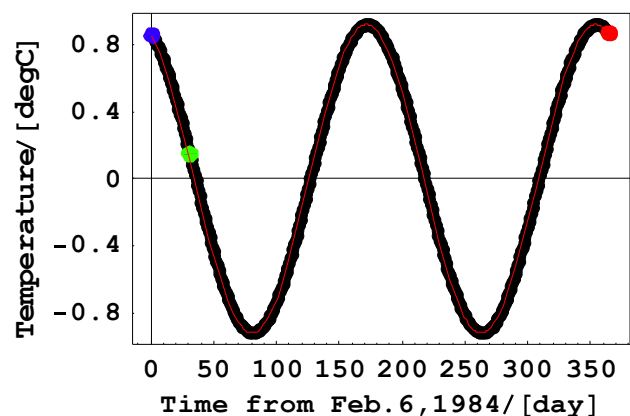


Fig. 8 地表面温高調波の時間推移

縦軸の値は Fig. 7 の実部(横軸)の値に相当
青=始点、緑=30 日点、赤=終点

$$\begin{cases} y_{\text{地表温}}[2] = a[1] y_{\text{気温}}[2] + a[2] y_{\text{日射量}}[2] \\ y_{\text{地表温}}[3] = a[1] y_{\text{気温}}[3] + a[2] y_{\text{日射量}}[3] \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} (-124.246 + 20.4948i) a[1] - (51.2138 - 58.1535i) a[2] = -128.98 + 17.8499i \\ (20.5015 - 6.03364i) a[1] - (9.547 - 21.3566i) a[2] = 16.3152 - 6.4907i \end{cases} \quad (7)$$

$$a[1] = 0.96057 - 0.018898i \quad (8.1)$$

$$a[2] = 0.0449385 + 0.13274i \quad (8.2)$$

$$\text{Abs}[a[1]] = 0.960756 \quad (9.1)$$

$$\text{Abs}[a[2]] = 0.140141 \quad (9.2)$$

$$\text{Arg}[a[1]] = -1.14 \text{ 日} \quad (10.1)$$

$$\text{Arg}[a[2]] = 72.29 \text{ 日} \quad (10.2)$$

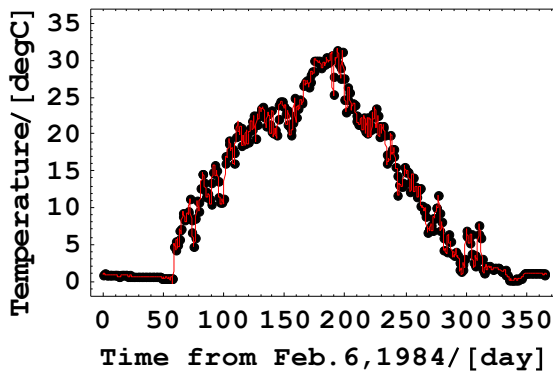


Fig. 9 測定地表温と高調波の合成全図
365日全日の毎日について

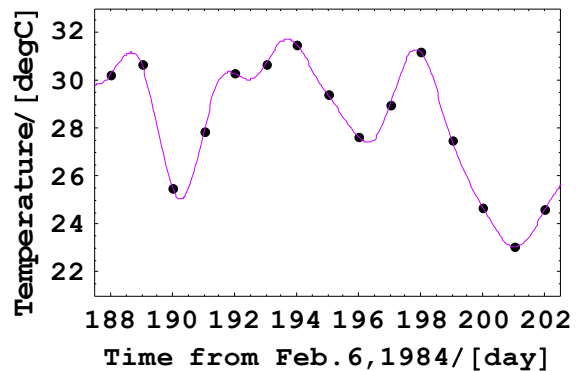


Fig. 11 測定地表温と高調波の合成全図
188日から202日までの毎日について

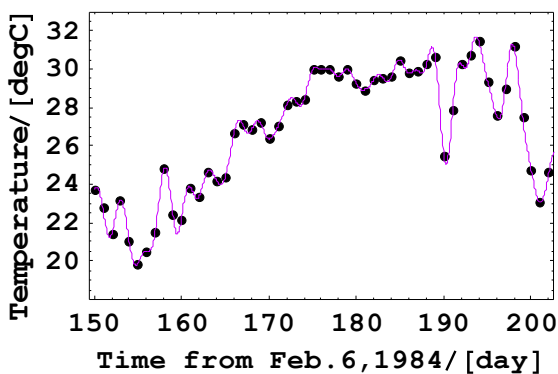


Fig. 10 測定地表温と高調波の合成全図
150日から202日までの毎日について

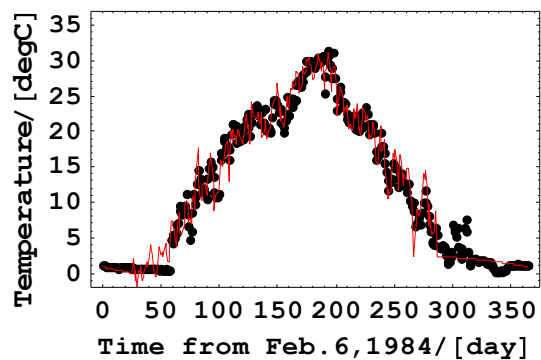


Fig. 12 地表面温度の測定値 (黒点)、及び、気温及び日射量とそれらの周波数伝達関数との積和をフーリエ逆変換して得られた推定値 (赤色折れ線)

4. 考察と提案

上述のようにして得られた地表面温度の推定値 (Fig. 12 の赤色折れ線) は測定値 (Fig. 12 の黒点) に近いものもあるが大きく異なるものが多々見られる。その理由はいくつか考えられるが、

第1に、多数ある気象要素のうち気温と日射量の2要素のみを入力としていること、

第2に、それら (気温と日射量) から地表面温度に至る周波数伝達関数を第1及び第2高調波にのみ適合するものを第3高調波以下のすべてに適用して地表面温度の高調波の推定値としたこと、

の2点があげられる。

また、「直流」成分すなわち平均値として地表面温度の平均値そのものを用いているので、完全な意味での推定値になっていない。

以上の3点が本報で述べた地表面温度推定方法の問題点である。

今後はこれら3点の問題点を克服すべく改善がなされなければならないと考えられる。

また、「1. はじめに」で述べたように、地表面温度を含め地温の測定値が極めて少ない現状を改善しなければ多種多様な気象と大地の関わりを解明するデータが非常に少ない。これは机上の作業で解決できる性質の問題ではなく、作物栽培・園芸・草地・林地・地下資源利用・環境など、農林業および広く地域社会・生活・環境の全般に関わることでありと考えられる。このことをふまえ、**気象**のみに留まらず、「**地象**」の観測体制をも充実したものにしていかねばならない。

ただし、このことは筆者の寡聞に鑑み、情報を寄せ合って気象と地象を総合して観測・解析し、今後一層、社会の役に立つ体制に整えていくべきであると提案する。

謝辞

筆者は、地温データを含む観測データを取得しその使用を許可くださった木村亨博士 (日本専売公社[現 JT]盛岡たばこ試験場第1研究室長、当時) ならびに同じく喜田村俊明博士に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 原 道宏, 気象データから地温を推定する際における風速ベクトルの扱いについて (その1), 計測自動制御学会東北支部第294回研究集会 (2015. 5. 29), 資料番号294-12, 2015
- 2) Hara, M., New Estimation Trial for the Soil Temperature of Morioka from the Meteorological Data of Morioka., Proc. ICSSE 2015, 595-608, 2015
- 3) Hara, M., An attempt to estimate soil temperature from above-ground environmental factors with the procedure on the frequency domain, SICE2015, PWeC-22, No.490, 2015
- 4) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C.: "Conduction of Heat in Solids 2nd ed.", Oxford at the Clarendon Press, p74, p81, 1959
- 5) Hara, M. and Nishiyama, Y., Mathematical expressions of moist air conditions, J. Faculty of Agriculture, Iwate University, **16**(2), p107-121, 1983 (with Japanese summary)
- 6) Japan Meteorological Agency, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 7) P. Hosseinzadeh Talaei, Daily soil temperature modeling using neuro-fuzzy approach, Theoretical and Applied Climatology, **118**(3), 481-489, 2014
- 8) Thomas R. H. Holmes, Thomas J. Jackson, Rolf H. Reichle, and Jeffrey B. Basara, An assessment of surface soil temperature products from numerical weather prediction models using ground-based measurements, Water Resources Research, **48**, W02531, 2012
- 9) Hossein Tabari, Ali-Akbar Sabziparvar, Mohammad Ahmadi, Comparison of artificial neural network and multivariate linear regression methods for estimation of daily soil temperature in an arid region, Meteorology and Atmospheric Physics, **110**, 135-142, 2011