

光波測量における気象補正について

——音波速度による気温の推定——

大 谷 文 夫

ON THE METEOROLOGICAL CORRECTION OF THE ELECTRO-OPTICAL DISTANCE MEASUREMENTS —ESTIMATION OF TEMPERATURE FROM SOUND VELOCITY—

By *Fumio OHYA*

Synopsis

In the distance measurements by a Geodimeter, making the proper correction for the atmospheric index of refraction, the experiments to estimate the temperature from the velocity of sound travelling between both ends of base line have been tried. The result of the experiment on the paved road (length: 500 m) is 2°C lower, whose effect on the corrected distances is comparable to the accuracy of the Geodimeter, than direct measurements with thermometer. On the propagation of sound, the effect of refraction on the travel time is practically negligible in consideration of the accuracy of the Geodimeter. But attenuation is too high to propagate over a few kilometers.

1. は じ め に

光波測量で精密測距を行なう時、測量の基準となる変調光の波長が屈折率によって変化するため、気象補正を施す必要があるが、なかでも地殻変動観測を目的とする光波測量では、時間をおいて測った距離の微小な差を検知したいので、各観測の測距精度をできるだけ高める必要があり気象補正が特に重要になる。即ち各観測毎の大気状態の差から生ずる見掛けの距離変化分は、気象補正によって消去しておかねば、真の距離変化が求まらない。そのために気象補正計算に使用する気温、気圧、湿度等の値は、測量時の大気状態を適確に表わしたものでなければならない。

現在地殻変動部門、屯鶴峰地殻変動観測所で使用している AGA 社の Geodimeter Model 6¹⁾ では周波数精度が 2×10^{-6} であり、これを考慮すると、気象条件のうちでも気温に最も問題点がある。湿度は後述のようにその影響は無視できる大きさであり、気圧は高さにより単調に減少する分布と見做して差しつかえない。しかし気温は測線全体の分布を最も把握しにくい。

気象補正に必要な気温は光の伝播経路に沿った空間的な平均気温であるが、通常行なわれている観測は (1) 地上のみの観測……測距儀設置点と反射鏡設置点、又はどちらか一方。地形により光波経路の地上高が低くなっている所等、中間点で測ることもある。(2)-1 空中での観測……地面からの輻射の影響を避けるために観測ポールをたててはかる²⁾ 程度から、気球を光波経路まで上げる³⁾ 場合もある。(2)-2 ……航空機によって光波経路に沿った空間的連続観測⁴⁾。上記各項のうちで (2)-2 を除いてはすべて空間的には点における観測であり、地形や日射等から生ずる複雑な気温分布を数点で代表させることとなる。これらに対して気温測定を直接行なわないで気象補正をする測量法として、(3) 数種の波長の単色光を使用する方法がある⁵⁾ (多色法)。これは全光路上の気温、気圧の平均値により補正したことに相当し、理想的な気象補正法といえる。この最後の方法と同様に、測線全体の平均気温を得るための方法として音波伝播速度を利用する方法を試みたのでここに報告す

る。音速を使つての温度測定は10数cmのスペンでは超音波風速温度計として行なわれているが、これは温度、風速の瞬時値を求めるのが目的であり、本稿の目的とは異なる。

光路に沿って直接気温を測ることのできる天ヶ瀬地殻変動観測所内で行なっている光波測量¹⁾では、1.7kmの測線を4年間にわたって測った11回の測定値に対して、真値が11回共同じだと仮定して(誤差がもっとも大きく評価される仮定である。)各回の平均二乗誤差を求めると相対誤差で 2.4×10^{-6} になる。もし気象補正が完全になされたならば、この程度の誤差の測量が行なわれ得る。今まで真値を推定するにあたり、気象補正の妥当性を示す方法がなかったため上記のように測線長不変あるいは一定の歪率で伸縮していると仮定²⁾して誤差の推定を試み、その大小を判断基準としてきた。これに対して測線に沿う気温の実測ができれば気象補正に対する不確定さが少なくなり、測量値の信頼度が増すことになる。

2. 原 理

気体中の音速 V 及び空気中での変調光の群速度 C は次のように表わされる。

$$V = \alpha \sqrt{T} \dots \dots \dots (1)$$

$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} - 1}{T/273.15} - \frac{p}{760} - \frac{5.5 \times 10^{-6} e}{T/273.15}} \dots \dots \dots (2)$$

C_0 : 真空中での光速

λ : 波長

n : 波長 λ の光の 0°C , 760mmHg における屈折率

p : 気圧 (mmHg)

T : 気温 ($^\circ\text{K}$)

e : 水蒸気圧 (mmHg)

(2)式によると 10^{-6} の精度を考える時、水蒸気圧の影響は無視しうるので、気圧、気温のみを考えれば充分である。(1), (2)式を 0°C , 1気圧で展開して一次形に近似して、各係数の数値を代入すると次式が得られる。なお、 n としては Barrel と Sears の式で、 $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ (Geodimeter Model 6 における水銀灯及びタンゲステンランプの実効波長) に対する値を使い、 e は気温 18°C で相対湿度70%に相当する 11mmHg を代入している。

$$V = 331.45(1 + 1.83 \times 10^{-3} T_c) \text{ (m/sec)} \dots \dots \dots (3)$$

$$C = 2.99792 \times 10^8 (1.00000465 + 1.11 \times 10^{-6} T_c) \text{ (m/sec)} \dots \dots \dots (4)$$

$$(T_c = T - 273.15)$$

(3)式の左辺を伝播距離 l と伝播時間 Δt との実測で求め

$$V = l / \Delta t \dots \dots \dots (5)$$

T_c を得る。

(3), (4)両式から明らかなように、音速の温度依存性は $2 \times 10^{-3} / \text{deg.}$ であるのに対して、光速では $10^{-6} / \text{deg.}$ と前者に比べ非常に小さい。このため(5)式の l は Geodimeter で測ってもその温度補正は充分粗い近似値で良い。

風がある場合、速度にも見掛け上の変化を与えるので、これを補正するのに、測線両方向に同時に伝播させることが望ましい。

3. 実 験

Fig. 1 に観測システムを示す。音源はスピーカーで、正弦波発振器の出力を増巾して駆動する。受音は単一指向性マイクロフォンに集音ホーンをつけたもので行った。レコーダーは市販のステレオテープレコーダーを用い1チャンネルにマイクロフォン出力を入れ、他のチャンネルに JJY の 1000Hz 変調音を入れ時刻読取

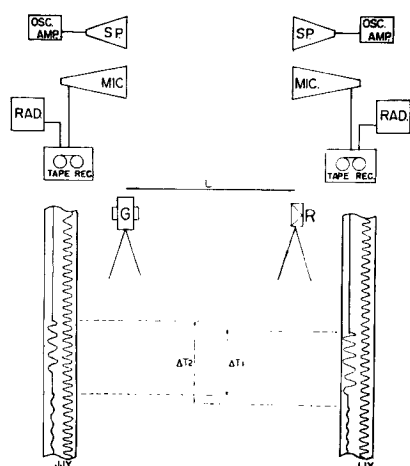


Fig. 1. System diagram.

の基準とする。音を出すと、すぐ隣に置かれた発音側のマイクロフォンに入ると共に、測線他端まで伝播、その受音マイクロフォンに入る。各々の側での録音テープを電磁オシログラフで再生して、両地点にて対応する各 phase の時刻を読み取り、その差を出す。

実験例及びその結果を次に示す。

日時 1974年1月29日 天候曇

測線 京都大学宇治構内南側道路上 (アスファルト舗装) 東側基点(G), 西側基点(R), GR間510.8m

発射音 570Hz (G→R) 及び 450Hz (R→G) 6回/sec で断続

受音部 ダイナミックマイクロフォン (ナショナル WM 360) 及びコンデンサマイクロフォン (SONY-ECM23)

受音ホーン 口径 40cm, 開口角20度

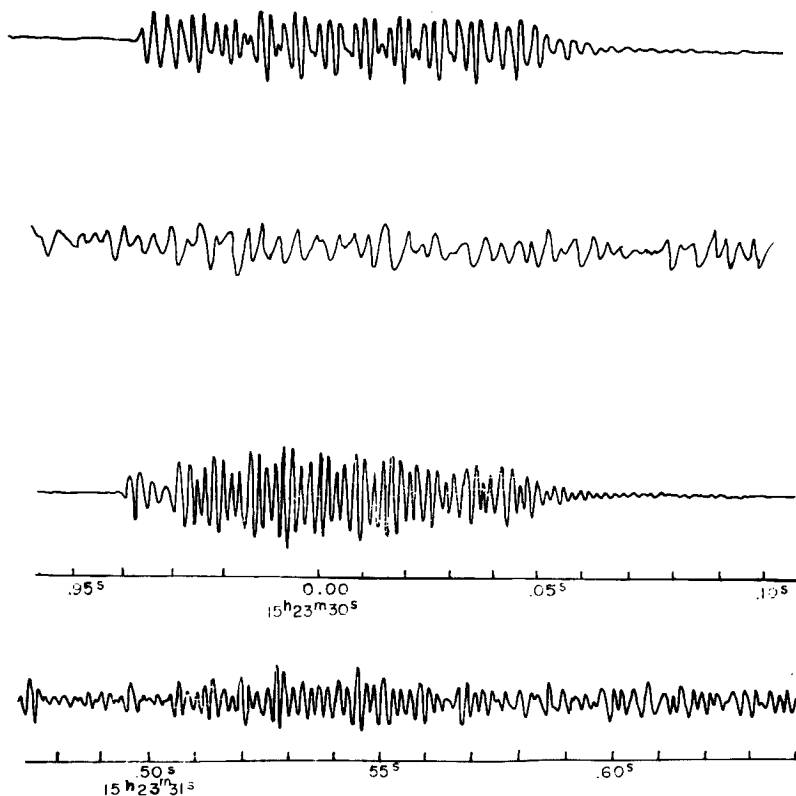


Fig. 2. Examples of records on an electromagnetic oscillograph.

1 & 3 received at radiation side.

2 & 4 received after propagation.

1 & 2 original records.

3 & 4 band pass filtered records(500-630 Hz) and time axes.

Table 1 Sound velocity.

direction of transmission		→		→	
		G	R	R	G
period of analysed record	from	15h 23m 9s	15h 23m 10.5s	15s 23m 29.5s	15h 23m 31s
	to	9.5	11	31	32.5
number of data in calculation		35		30	
travel time (sec)		$1.536_1 \pm 0.000_4$		$1.533_3 \pm 0.000_3$	
travel distance (m)		509.9 ₂		509.7 ₂	
sound velocity (m/sec)		332.9 ₆		332.4 ₃	

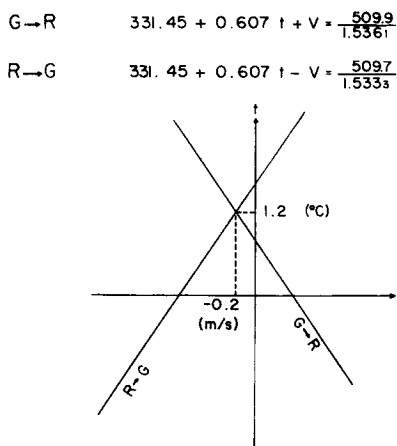


Fig. 3. Sound velocity, temperature and effect of wind.

再 生 原記録では発信音と受信音との対応が見つからないため、両者に同じフィルターをかけた後と比較する。

記録例を Fig. 2 に、結果を Table 1 に示す。

音波速度に対する風の影響量を v とすると (3) 式より、

G→R $331.45 + 0.607 T_c + v_1 = 332.0 \dots\dots\dots(6-1)$

R→G $331.45 + 0.607 T_c + v_2 = 332.4 \dots\dots\dots(6-2)$

ここで逆方向の伝播であるので $v_1 = -v_2$ とすれば (6) 式は Fig. 3 で表わされ、気温 $T_c = 1.2^\circ\text{C}$ となる。なおこの時アスマン通風温度計によって実測した温度を Table 2 に示す。

4. 実験結果に対する考察

発信音波形と受信音波形とを対応させる時、発信音の卓越周波数を通過させる帯域通過フィルターをつかうと、受信音波形で信号と雑音の区別がつかなかった。これは受信用

Table 2 Temperature measured with Assman's aspiration psychrometer.

place	temperature		measured*		mean
	time				
G	15h 35m		3.4°C	3.3°C	3.1°C
R	15 25		2.6	3.0	

*(Each thermometer in a psychrometer is used as dry-bulb.)

求まった気温は **Table 2** の値に比べて 2°C 弱低い。この差が実際の気温の空間的な変動を反映しているものとすれば、大体 $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$ の変動幅が必要になるが、実験時の天候は曇で、測線と直角方向に弱い風が吹いており、音波伝播経路全体にわたる気温のばらつきが、 2°C の差の原因をすべてそれに帰するほど大きかったとは考えにくい。 2°C の差は音速に換算すると 0.4% の差に相当し、伝播時間で 6msec 、距離で 2m の誤差があれば生ずる。誤差の一つの原因は音波の伝播を行なった時刻が、往と復とで 20sec の差があるので $v_1 = -v_2$ の条件が満たされていなかったのではないかと考えられる。伝播距離に関しては発射側の音を録音する場合に 2 つ並べたホーン間の距離をどう算定するかという問題があるが、これについてもホーンの大きさから考えてせいぜい 30cm 程度の誤差しか考えられない。従って 2°C の差には、特に主因があるというよりは、種々の要因の集積と考えられる。なお 2°C の差は補正された測線長に対しては 2×10^{-6} の差になり、周波数精度と同程度である。

5. 音波伝播法に対する考察

この方法の問題点として大きなものが 2 点ある。音波の屈折と減衰である。

温度分布が均一でない時、屈折によって光波と音波の伝播経路がずれる。しかし定性的には屈折は速度の速い方に偏倚するように起るので、幾何的に経路が長くなることに対しては相殺する傾向になることが予想される。試みに単純なモデルで計算をしてみれば次のようになった。気温分布 $T_a(^{\circ}\text{C})$ を海拔高度 $h(\text{m})$ 、地上高 $h'(\text{m})$ の関数として

$$T_a(h, h') = 15 - 0.00977h + 6\exp(-0.005h') \quad \dots\dots\dots (7-1)$$

$$T_a(h, h') = 15 - 0.00977h - 10\exp(-0.005h') \quad \dots\dots\dots (7-2)$$

として音波伝播経路を求め、(**Fig. 4**)、音波伝播時間と直線距離から求まる気温と、光路上の平均気温とを比較してみると、(7-1)式の場合、平均気温 17.6°C に対して音波による温度が 18.4°C 、(7-2)式の場合平均気温 7.6°C に対して音波による温度が 7.9°C であり、差が 1°C を越える場合は少ないと思われる。

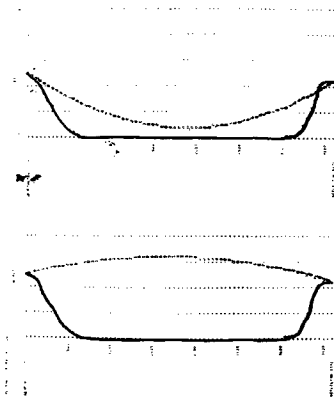


Fig. 4. Paths of sound transmission in the atmosphere with vertical temperature gradient.
upper temperature distribution (7-1)
lower temperature distribution (7-2)

減衰は主として逆二乗則による部分、分子吸収によるもの、風によるものが重なったものである。このうち分子吸収によるものは減衰量 (dB 単位) がほぼ周波数に比例するので、使用する音響機器の周波数特性を考慮した上で、できるだけ低周波の方が好ましい。ホーンによって集音する場合、ホーンの動作曲線のピーク周波数を使えば、ホーンの口及び喉面積比率から予想されるより大きな音圧がマイクロフォン面で期待できる⁷⁾と考えたが、実際には⁴⁾、述べたようにホーン自体の共鳴で同周波数のノイズが出(特に風のある時)、また横風を受けた時には指向性をもたせて発射している音の最も強い部分が流されてマイクに届かなくなることもある。従って上記の減衰量から求めた音源の大きさよりも充分に大きな音源を用意しないと実用できない。今回使用した装置では無風状態で 1500m 伝播したが、風が強い時には 300m でも聞こえないことがあった。

現在の光波測量基線の多くは $2\text{--}7\text{km}$ 程度の長さを持つ。

これらに対して確実に音を伝播させるには、ホーンも巨大なものを必要とするし、音源も含めてポータブルで実用的なものを作るのは困難であると思われる。この方法を有効に適用し得る可能性のあるのは、比較的短距離で、温度逆転や、測線勾配のきつい場合、水平方向に温度変化が大きい時(活火山の火口横断等)等が考え

られる。しかし短距離では測距儀固有の精度に定数項を含むために相対精度が低下する他、一般的には、連続観測ができないこと、観測者及び周囲に対する騒音、測温のための器材の増加、反射点での作業量の増加（光波測量では電波測距とは異なり反射点では鏡という受動器だけで観測中に操作する必要のないのが特長である）等問題点が多い。このような点から当初にあげた気象補正に関する問題点を解決するには、やはり究極的には多色法による測定に進むべきだと考える。

謝 辞

実験全般にわたり助言、御指導をいただくと共に、あるいは二上山、巨椋池等を含む寒中での測定作業に従事していただき、あるいは実験器材面等御協力をいただきました高田理夫教授他地殻変動部門の皆様を始め、田中寅夫助教授及び屯鶴峰地殻変動観測所、地震動部門の方々にも厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 大谷文夫・田中寅夫：光波による地殻変動観測の精度について、京都大学防災研究所年報，第14号A，昭46，pp. 15-31.
- 2) Hofmann, R. B.: Geodimeter fault movement investigations in California, Bulletin, California Department of Water Resources, No. 116-6, 1968.
- 3) 田島 稔・佐藤 裕・須田教明：光波距離測定気象補正(Ⅰ)—係留ゾンデによる低層気温観測—，測地学会誌，第15巻第4号，1970，pp. 121-129.
- 4) Savage, J. C. and W. H. Prescott: Precision of Geodolite distance measurements for determining fault movements, Journal of Geophysical Research, Vol. 78 No. 26, 1973, pp. 6001-6008.
- 5) Bender, P. L. and J. C. Owens: Correction of optical distance measurements for the fluctuating atmospheric index of refraction, Journal of Geophysical Research, Vol. 70 No. 10, 1965, pp. 2461-2462.
- 6) 江頭庸夫・大谷文夫：光波測量による桜島・吉松地域の地殻変動観測(Ⅰ)，火山第2集，第17巻第3号，1972，pp. 135-143.
- 7) 小林勝一郎：電気音響，共立出版，昭25，pp. 87-97.