

# 無人ヘリコプターによる光波測距儀の気象補正の高精度化 HIGH ACCURATE WAY OF METEOROLOGICAL CORRECTION FOR THE EDM BY DORONE

三島研二<sup>#,B)</sup>, 増澤美佳<sup>A)</sup>, 大澤康伸<sup>A)</sup>, 安達利一<sup>A)</sup>, 川本崇<sup>A)</sup>, 山岡広<sup>A)</sup>,  
海津優<sup>B)</sup>, 福島芳和<sup>B)</sup>, 阿部直宏<sup>B)</sup>, 宮坂正樹<sup>B)</sup>, 中村保彦<sup>B)</sup>  
Kenji Mishima<sup>#,B)</sup>, Mika Masuzawa<sup>A)</sup>, Yasunobu Ohsawa<sup>A)</sup>, Toshikazu Adachi<sup>A)</sup>,  
Takashi Kawamoto<sup>A)</sup>, Hiroshi Yamaoka<sup>A)</sup>, Kaitsu Yu<sup>B)</sup>, Yoshikazu Fukushima<sup>B)</sup>,  
Naohiro Abe<sup>B)</sup>, Masaki Miyasaka<sup>B)</sup>, Yasuhiko Nakamura<sup>B)</sup>

A) KEK

B) PASCO Corporation

## Abstract

Laser of EDM which used for survey and alignment undergo influence of the refractive index of the atmosphere. Therefore, the temperature, the air pressure and the humidity are measured by both EDM point and reflector point. Then the measured distance corrected by a mean in both observation points. Because the meteorological distribution is uniform at the accelerator tunnel, it is no problem that the measured distance is revised by a mean in both points as weather along a laser path. Because it is non-uniform in the open space like ground surface, it is a question that the measured distance is revised by same method. The meteorological distribution along a laser path was cleared by flying Drone which had monitor. This experiment has been flying and measuring at KEK campus. It is confirmed that there is no problem that a mean of meteorological value in both EDM point and reflector point.

## 1. はじめに

加速器の測量&アライメントに用いられる光波測距儀 (EDM, Electromagnetic Distance Measure) は, EDM 本体から送光されたレーザ光は大気の屈折率の影響を受ける. そのため, 従来は器械点と反射点の両測点で気温, 気圧, 湿度を測定し, 両測点の平均値で測定距離に補正計算をしている. 加速器トンネルのような密閉された空間では, 気象分布が均一であることが容易に推測でき, 両測点の平均値が光路沿いの気象を代表するとして補正することは問題ないと思われる. しかし, 地上部の測量のように開放された空間では両測点の平均値が必ずしも光路沿いの気象を代表しているかは疑問である.

本実証実験では, 気象観測装置を搭載した無人ヘリコプタ (Drone) を光路沿いに飛行させて気象観測することによって, 光路沿いの気象分布を明らかにすることを試みた.

高エネルギー加速器研究機構の敷地内で実証実験をおこない, 現行の両測点の気象測定の平均値で光路沿いの気象を代表しているとしても差し支えないことを確認した.

今後の大型加速器の建設時あるいは保守点検時の高精度化に資することが期待される.

## 2. 光波測距儀 (EDM) の概要

### 2.1 EDM の原理

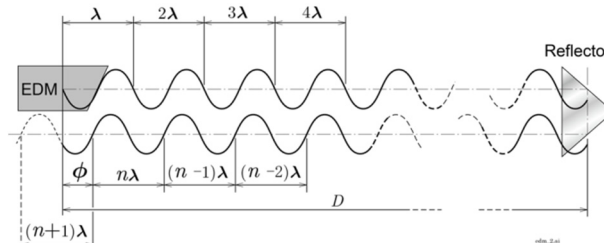


Figure 1: Measurement principle of EDM.

光波測距儀の測定原理は, Figure 1 のように光波を周波数  $f$  で変調をかけて送光し, 目標の測点上にセットした反射鏡 (Reflector) で反射して帰ってきた場合, 往復距離  $2D$  は光波の位相  $\phi$  によって, 式(1) のように表される.

$$2D = \frac{\phi}{2\pi} \lambda + n\lambda \quad (1)$$

ここに,  $\lambda$  は, 変調周波数の波長である. 求める距離  $D$  なので式(1)を整理する.

また, 光の速度  $c$  ( $\approx 3 \times 10^8$  [m/s]) とすると,

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

<sup>#</sup> kaemni8360@pasco.co.jp

であるから、(1)式は次のように表される。

$$D = \frac{\lambda}{2} \left( \frac{\phi}{2\pi} + n \right) \quad (3)$$

$$= \frac{c}{2f} \left( \frac{\phi}{2\pi} + n \right)$$

一等三角点の測量あるいは地殻変動調査の距離測定に使用されていた EDM は数十 km の長距離を測定するタイプの測距儀の場合、多くの場合で He-Ne の強力なガスレーザを周波数  $f = 30$  [MHz] で変調し、その波長は、

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ [m/s]}}{30 \times 10^6 \text{ [Hz]}} = 10 \text{ [m]} \quad (4)$$

となる。波長 10 [m] の光波の位相を測定する分解能は 1/2000 程度が限界であった。すなわち、

$$\frac{10 \text{ [m]}}{2000} = 0.005 \text{ [m]} = 5 \text{ [mm]}$$

である。その結果、このタイプの EDM の精度は、次のように表される。

$$\pm (5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times S) \quad (5)$$

ここに  $S$  は測定距離である。すなわち、1 [km] の距離を測定した場合、

$$\pm (5 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \times 1 \text{ km}) = \pm 6 \text{ [mm]}$$

の誤差を免れることはできない。

## 2.2 気象補正

式(5)で表される誤差は、EDM 自体の機械誤差である。大気屈折率によって光速  $c$  が影響を受けるため、伝播するレーザ光は気温、気圧、湿度によって測定距離に影響を受ける。

大気屈折率の影響は、レーザ光の波長によって決定されるが、一般的な EDM の測定距離に与える気象の影響は、補正量を  $\delta D$  [ppm] とすると、

$$t : \text{気温 } [^{\circ}\text{C}]$$

$$p : \text{大気圧 } [\text{hPa}]$$

$$h : \text{相対湿度 } [\%]$$

$$\delta D = 286.34 - \frac{0.29525}{1 + 0.00366 \cdot t} p + \frac{4.126 \times 10^{-4}}{1 + 0.00366 \cdot t} h \times 10^x \quad (6)$$

$$x = \frac{7.5 \cdot t}{237.3 + t} + 0.7857$$

式(6) は、KEKB の地上測量で用いられた EDM Leica 社の TS30 (Figure 2) の気象補正式である。



Figure 2: Ground surface surveying at KEK.

この EDM の場合、式(6) から 1 [km] の距離を測定した場合、気温に 1 [°C] の測定誤差があれば、1 [mm] の誤差が生じる。また、2.5 [hPa] の測定誤差があると、同じく 1 [mm] の誤差が生じる。湿度の場合は、10 [%] の測定誤差で、1 [mm] の誤差が生じる。

式(5)で表される測距儀の場合、測距儀自身の誤差が大きいが、6km 以上の長距離を測定する場合、高精度の気象測定が要求される。

また、角度を測定するセオドライトの電子化にともない、EDM を同じ筐体に合体させたトータルステーション (Total Station :以下「TS」という) が、現在は主流である。

TS の高精度化により、TS30 のように距離測定の分解能が  $\pm 1$  [mm] 以下の高精度 TS が出現している。その結果、気象測定にも高精度が要求されているのが現状である。

## 2.2 気象測定の方法

現状の気象測定は、EDM をセットする器械点と反射鏡をセットする反射点の両測点で気温、気圧、湿度を測定して平均値を採用している。また、これ以外の方法は現実的ではない。

1970 年代の EDM が普及していく段階で、Figure 3 のように光路上に気象計を積んだ気球を上げて温度の分布を調べる研究が盛んに行われ、気象計を高く (3m 以上) 設置して夜明け、日没の前後 2 時間を測定し、平均を取ることでほぼ同じ温度となると仮定して補正しているのが現状である。

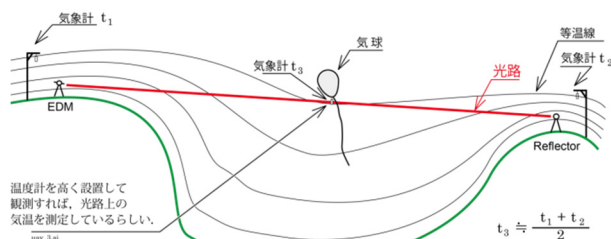


Figure 3: Schematic view of thermal gradient along laser pass.

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験場所

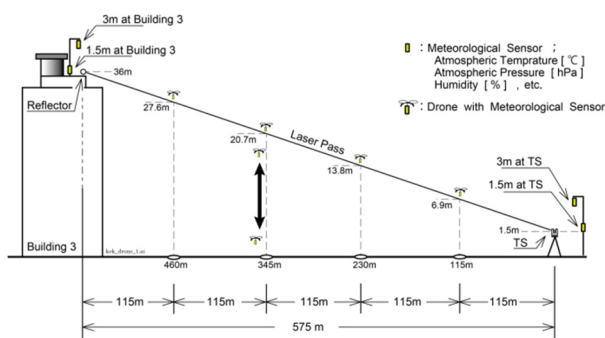


Figure 4: Schematic view of meteorological measurement at experimental site in KEK.

実験は、Figure 4 のように KEK つくばキャンパスで、3号館の展望室（高さ 30 [m]）から 500 [m] 程度の距離でドローンを TS の望遠鏡の視野で光路沿いに誘導し、1 分程度ホバリングさせて、気温、気圧、湿度を測定し、器械点と反射点の両測点の測定した気象と比較して評価した。

#### 3.2 使用機材

##### (1) Drone (ミニサーバイヤー) MS-06LA

サイズ：

軸間直径：68 cm

プロペラ先端間直径：101 cm

高さ：36 cm

重量：

正味重量：3kg

離陸総重量：6kg

ペイロード：3kg

飛行時間：15～30分

最大飛行速度：10m/s



Figure 5: Drone MS-06LA.

##### (2) 気象計測装置 Kestrel 4000

サイズ：

(高) 12.7cm × (幅) 4.5cm × (厚) 2.8cm

重量：102g

気温：-29.0 ~ +70.0°C / 1秒ごとに計測

気圧：25.0°Cの環境で、  
750 ~

1100 hPa / 1秒ごとに計測

相対湿度：0.0% ~ 100.0%



Figure 6: Meteorological Sensor Kestrel and Case.

### 4. 試験結果

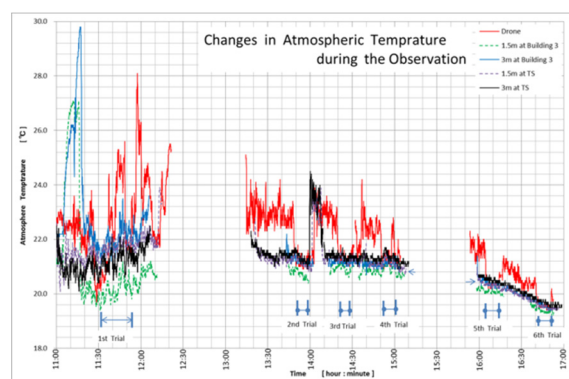


Figure 7: Changes in Atmospheric Temperature during Observation.

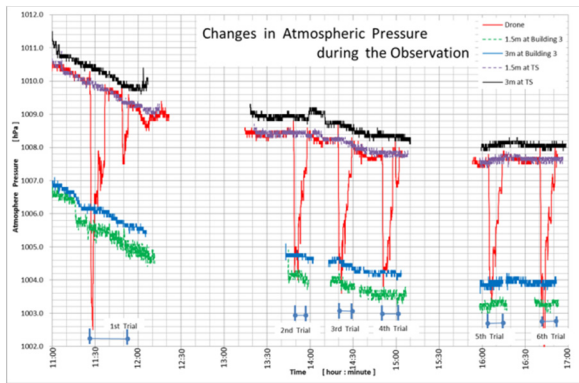


Figure 8: Changes in Atmospheric Pressure during Observation.

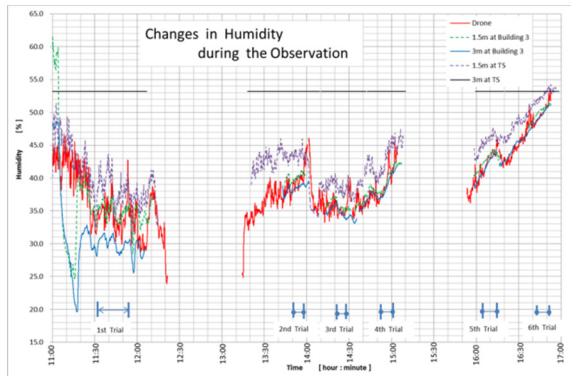


Figure 9: Changes in Humidity during Observation.

Figure 7 の気温の傾向は、午前中不安定であった。気象計測装置に日照が当たるため不安定であったが、午後の観測は修正したため非常に安定した結果が得られ、2 回目以降の観測ではドローンを上昇させると温度が下がる。待機中に温度が上昇するのは、ドローンを駐機させていたコンクリート面の温度の影響と思われる、良好な観測条件であったことがわかる。

Figure 8 の気圧の傾向は、高度にきわめて敏感であり、高度ごとに 1 分間ホバリングして観測している状況をみられるほどである。

高低差  $\Delta H$  とすると気温、気圧は次式で求める

$$t' = t - 0.005 \cdot \Delta H$$

$$P_2 = P_1 \cdot 10^{-\frac{\Delta H}{67.58T}} \quad (7)$$

ここに、

$t$  : 基準とした測点で観測した気温 [ °C ]

$t'$  : 求めようとする測点の気温 [ °C ]

$P_1$  : 基準とした測点で観測した気圧 [ hPa ]

$P_2$  : 求めようとする測点の気圧 [ hPa ]

$T = 273.15 + t$  : (絶対温度) [ K ]

式(7)から、高低差  $\Delta H=1$  [m] で気温差  $0.05[^\circ\text{C}]$  の気温差、 $0.12$  [hPa] の気圧差が計算される。実験に用いた建物 (Figure 4 の Building 3) の屋上の高さ

$36$  [m] であるから、気温差  $0.18$  [°C]、気圧差  $4.3$  [hPa] 程度となる。

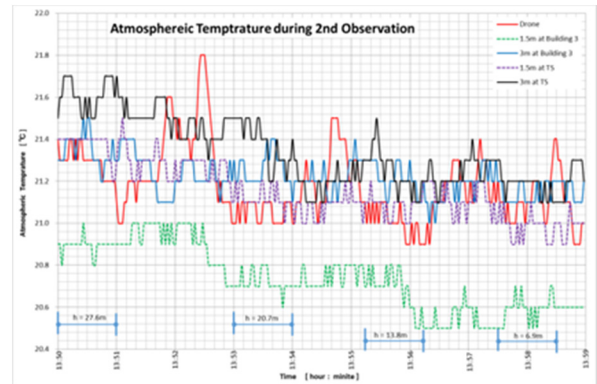


Figure 10: Atmospheric Temperature during 2nd Trial.

Figure 10 は 2 回目の試験であり、13 : 50 からのおよそ 10 分間のもっとも気温が高いと思われる時間帯の観測を Figure 7,8,9 から抜き出したものである。

また、Figure 11 は 6 回目の試験であり、16 : 40 からのおよそ 10 分間の日没前の気温が下がり始めた時間帯の観測を同じく Figure 7,8,9 から抜き出したものである。

Figure 10 と Figure 11 では、両端の測点 Building3 と TS は固定なので温度差を比較するとほぼ  $0.2$  [°C] である。

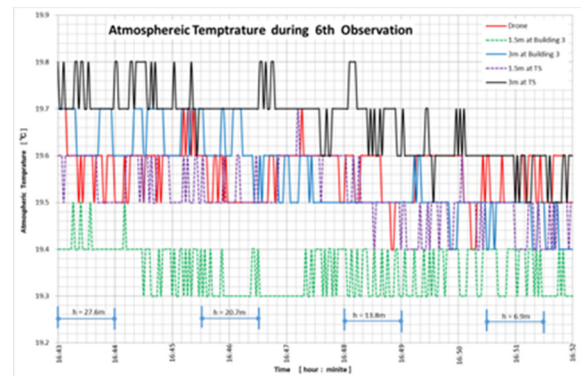


Figure 11: Atmospheric Temperature during 6th Trial.

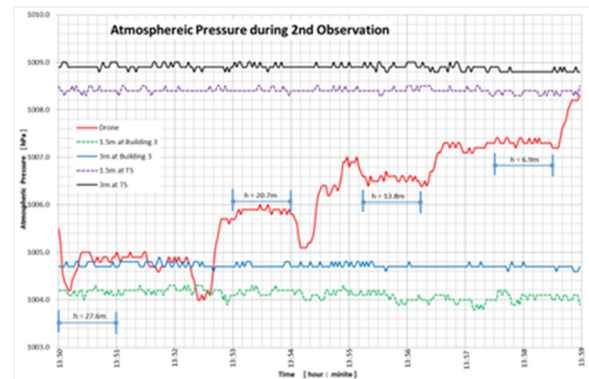


Figure 12: Atmospheric Pressure during 2nd Trial.

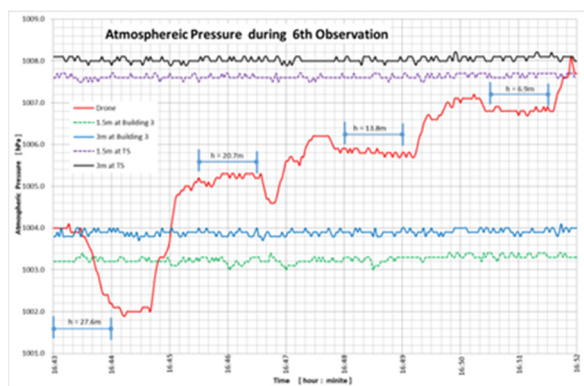


Figure 13: Atmospheric Pressure during 6th Trial.

また、Figure 12 と Figure 13 の両端の気圧差を比較すると 5.2[ hPa ] であり 1[hPa] ほど計算値と差があった。

Figure 10 の 14 : 00 付近の気温の観測結果は、両端の測点 Building 3 と TS の気温よりも 0.1[°C] 程度の気温差がみられるときがある。一方、Figure 11 の日没前の安定した気象では、両端の 1.5m 高さの気温と一致している。また同じく両端の 3m 高さの気温の平均とほぼ一致する。したがって、日没前の安定した気象条件の中では両端の気温の平均で光路沿いの気温を代表することは可能である。

Figure 12 の気圧の観測結果はもっとも気温が高い時間帯にもかかわらず安定しており、Figure 13 の観測結果も安定している。

さらに、Figure 4 の各高度でホバリング中はきわめて安定した気圧を示し、また高度に比例した気圧である。したがって、両端の気圧の平均で光路沿いの気温を代表することが可能である。

## 5. 結論

40 年ほど前の光波測距儀の出現以来、気象補正のための気象観測は観測点と反射点の両端で行い、その平均値で気象補正を行ってきた。

その補正方法の妥当性を検証するために両端点の中間で気球などに気象観測装置を積載して点検する報告などがある[1]。現在では、気象観測装置の進歩とドローンの機動性によって、光路沿いの気象を把握することが可能となった。その結果、両端の測点の平均値で気象補正することが有効であることが確認できた。

大型加速器の建設の限らず、これまで一等三角点の測量、地殻変動調査の精密距離測定などでも両端点の気象の平均値で補正してきている。したがって、これまでの補正方法を否定する結果ではなかったことに安堵するものである。

一方、今回で検証した測点間の距離は 600 [m] 弱の短距離であり、長距離の光路沿いを問題とすべきとの議論がある。しかし、現在では長距離は GNSS

で測位することが多く、EDM で測距することはほとんどない。さらに、1 級基準点の場合でも GNSS が標準的な測量器械であり、TS の真価を発揮するのは、2 級基準点からである。2 級基準点は配点密度の平均距離が 500 [m] なので今回の実証実験に該当する。

500 [m] の距離の場合、温度の測定誤差 1 [°C] のとき距離に影響する誤差は、1 [ppm] とすると、0.5 [mm] である。GNSS の普及と共に EDM の分解能も向上し、その分解能は、±1 [mm] 以下の EDM も出現しており、2 [°C] 程度の気象観測の精度が要求されるときに両測点の平均値で補正することに全く問題とならないことが確認できた。また、これ以外の方法は現実的ではなく、最も有効な方法であることが確認できた。

本研究が、今後の大規模加速器の建設の測量&アライメントの参考になれば幸甚である。

## 参考文献

- [1] 海津優 他共著、『光波測距儀による距離測定の気象補正の研究』, 国土地理院調査研究報告(54), 1979 年度。
- [2] 須田教明、『電磁波測距儀』, 森北出版, 1976 年。
- [3] 中村英夫, 清水英範、『測量学』, 技報堂出版, 2000 年。