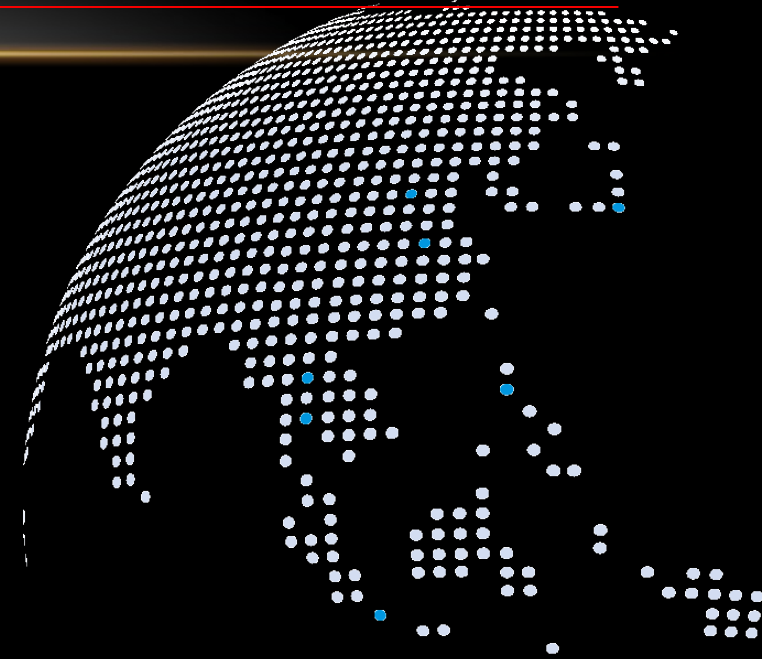
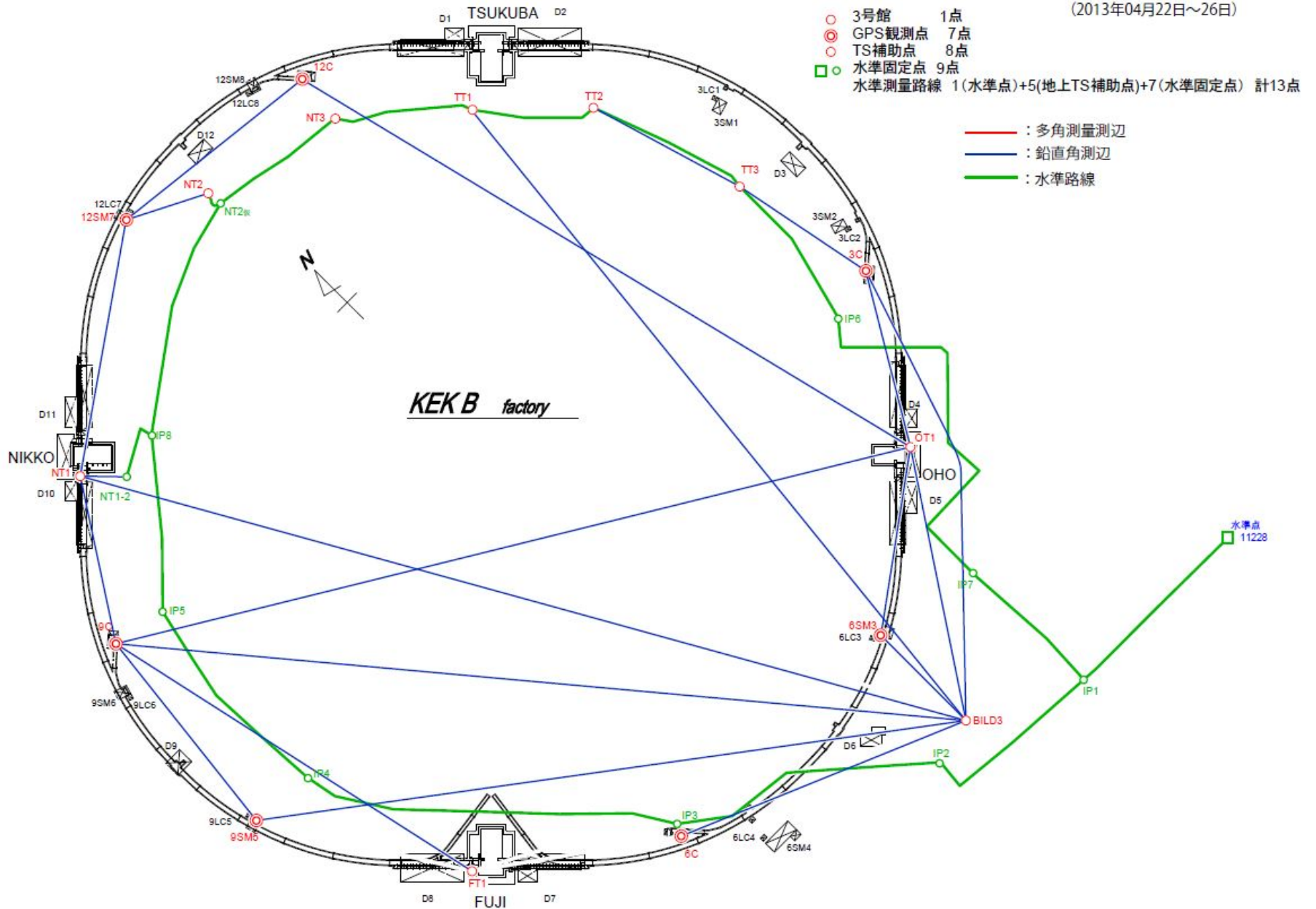


無人ヘリコプター  
による光波測距儀  
の気象補正の高精度化



# KEKB GNSS貫通孔 多角測量観測図

(2013年04月22日~26日)





# ンパス



観測計画図





地上測量





# 光波測距儀の精度

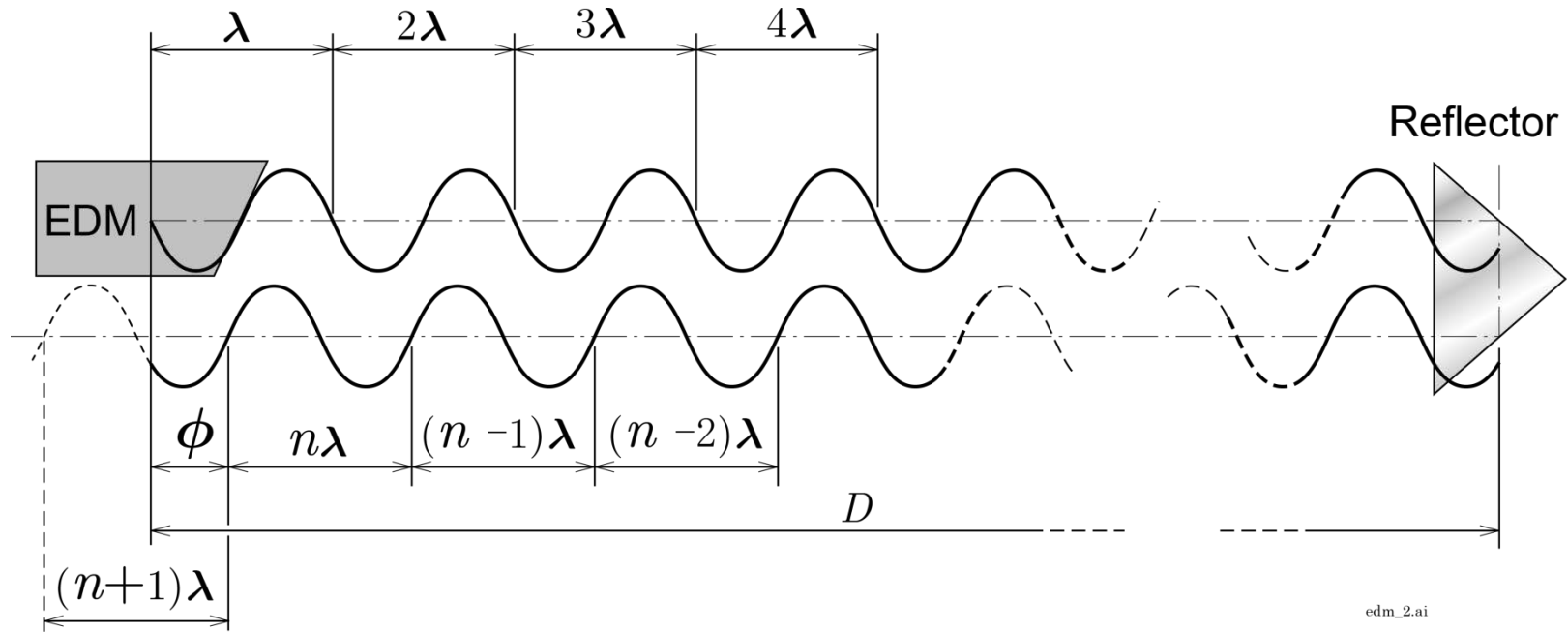
---

測距儀（Electromagnetic Distance Measure ,  
以下「EDM」）の分解能と精度の表示方法





# 光波測距儀の精度



edm\_2.ai

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

# 光波測距儀の精度

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

光の速度  $C$  , 変調周波数  $f$  とすると,  $\lambda = \frac{C}{f}$

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



# 光波測距儀の精度

1980年代の代表的なEDMの変調周波数  $f = 30$  [MHz]

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

典型的な分解能は1/1000程度, 半波長 5 [m]に対して

$$\frac{5 [m]}{1000} = 0.005 [m] = 5 [mm]$$

典型的なEDMの性能の表示方法,

$$\pm (5\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{Dist.})$$

の±5 [mm] は, 変調周波数によって決まる.

# 光波測距儀の精度

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

EDMの精度を向上させるには、変調周波数  $f$  を高くして、波長  $\lambda$  を短くする。位相  $\phi$  の分解能を向上させることである。

しかし、これらの精度向上の方法は、EDM内部の問題である。

EDMから射出されたレーザー光は、大気の屈折率の影響を受ける。

大気の屈折率は、レーザー光の波長と気温、気圧、湿度などによって決定される。



# 気象補正式

---



# 地上測量で使用した高エネ研の Wild 社 TS30



# 気象補正式

EDM **TS30** の測定距離に与える気象の影響は,

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

$t$  : 気温 [°C]

$p$  : 気圧 [hPa]

$h$  : 湿度 [%]

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

1kmの距離を測定するときに, 気温  $t = 1$  [°C] の誤差があれば, 1 [mm] の誤差となる. すなわち, 1 [ppm]

同様に 1kmの距離を測定するときに気圧  $P = 2.5$  [hPa] の誤差があれば, 1 [mm]の誤差となる. すなわち, 0.4 [ppm]



屈折率が大きい, 光の速度が遅くなり, 定規が短くなる.  
屈折率が小さい, 光の速度が速くなり, 定規が長くなる.

一方,

気温が低い場合,

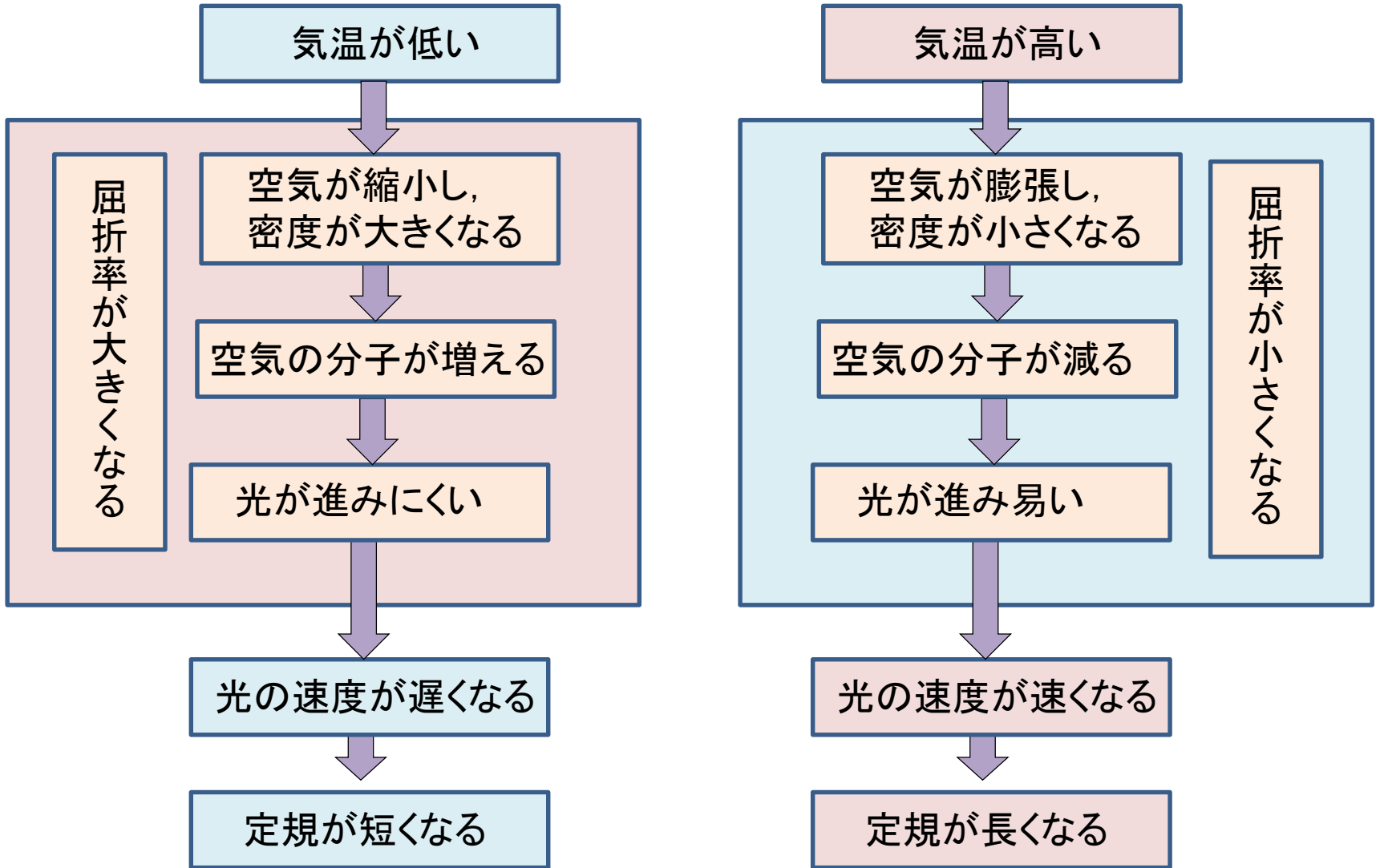
空気が縮小し, 密度が大きくなるので,

光を邪魔する空気の分子が多くなり, 屈折率が大きくなる.

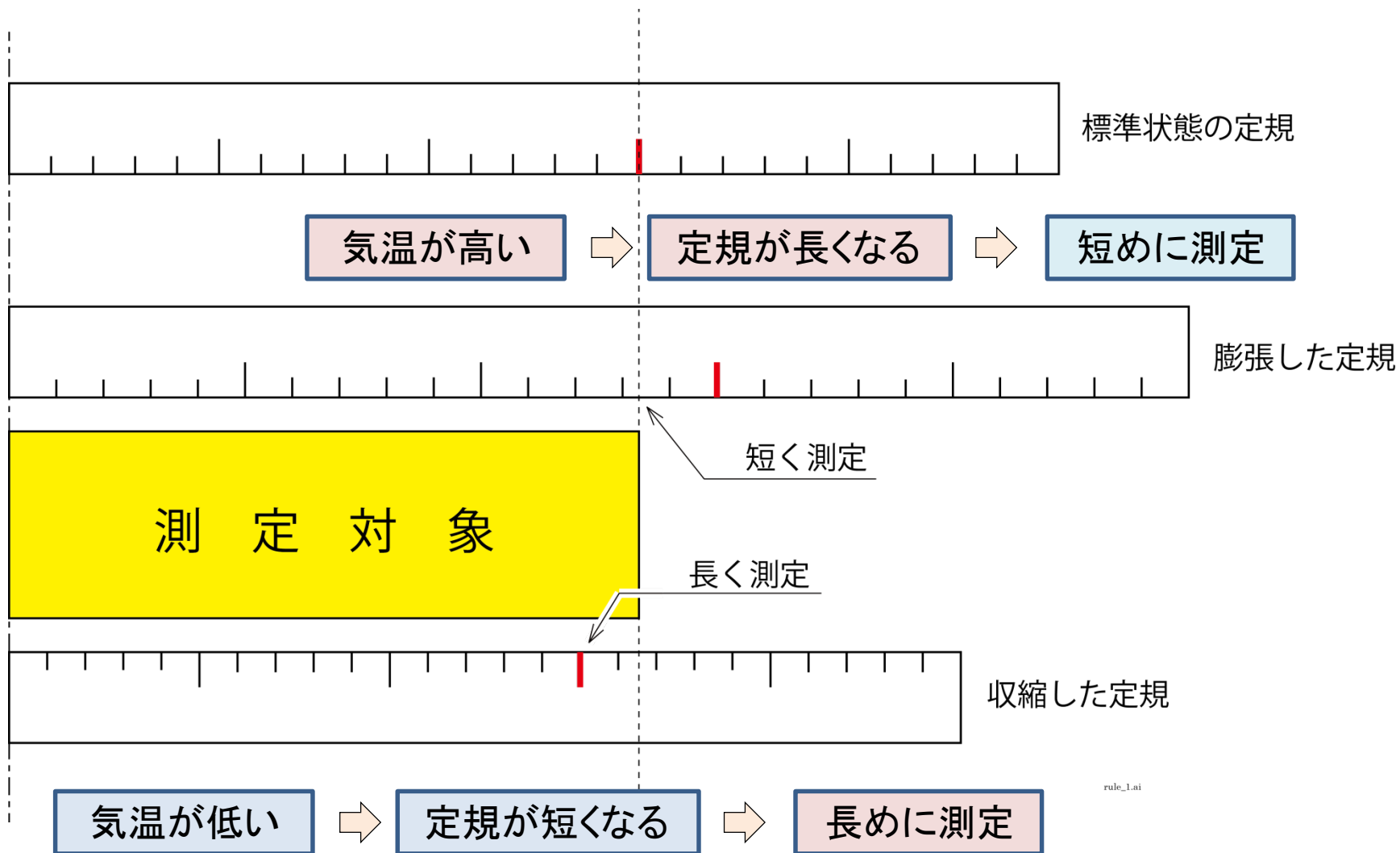
気温が高い場合, 空気が膨張し, 密度が小さくなるので,

光を邪魔する空気の分子が少くなり, 屈折率が小さくなる.

# 気象の影響の概念



# 気象補正式の意味



# 気象補正式

1980年代に主流のEDMの典型的な精度は,

$\pm (5\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{Dist.})$

- 現在では, 単体のEDMは少ない. 測角するセオドライトとEDMを1つの筐体に組み込んだTotal Station (以下「TS」)が主流である.
- 現在のTS性能は,  
 $\pm (2 \sim 3\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{Dist.})$   
タイプが主流である.

その結果, 気象測定にも高精度が要求されている

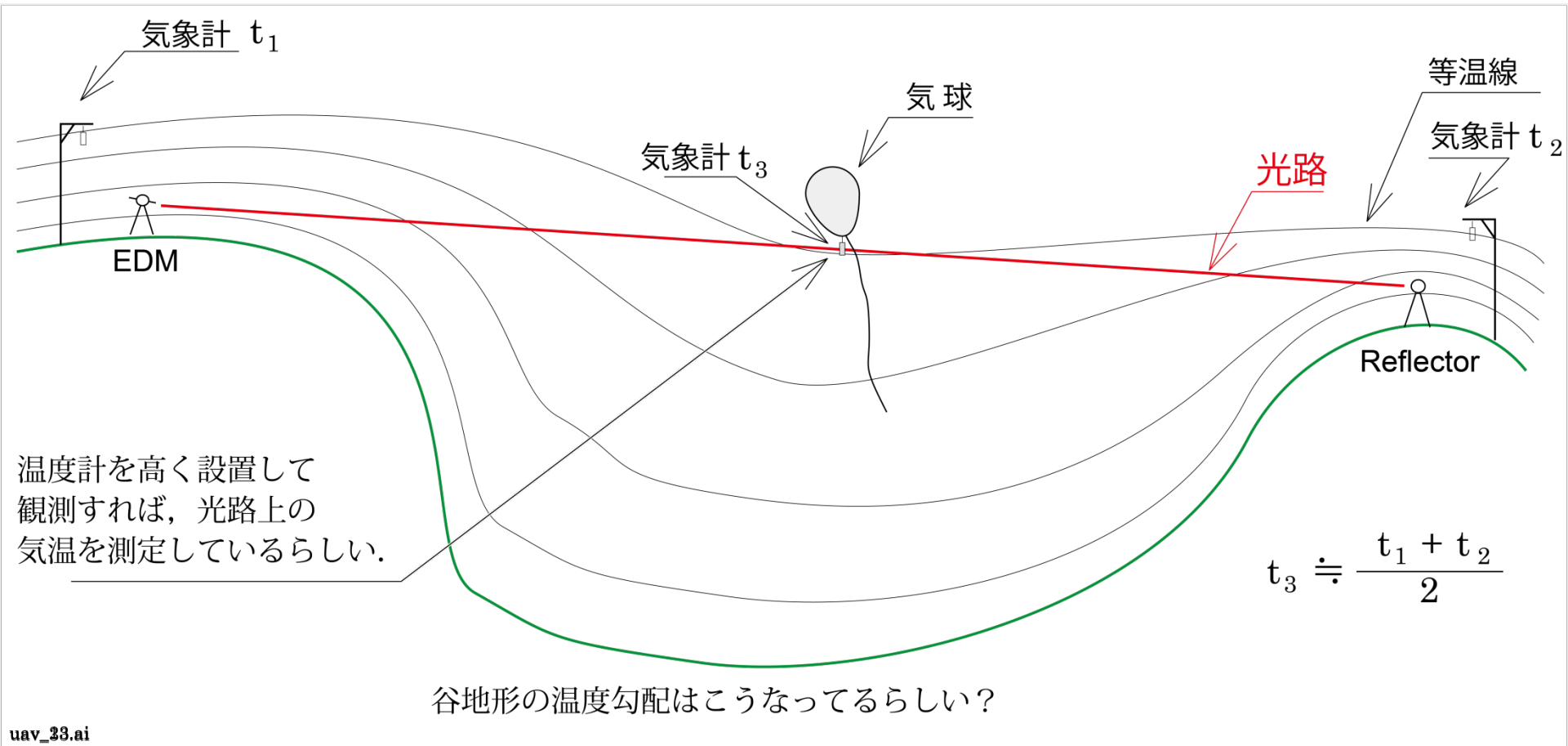


# 気象観測方法

---



# 気象観測方法



# ドローンによる気象観測

---

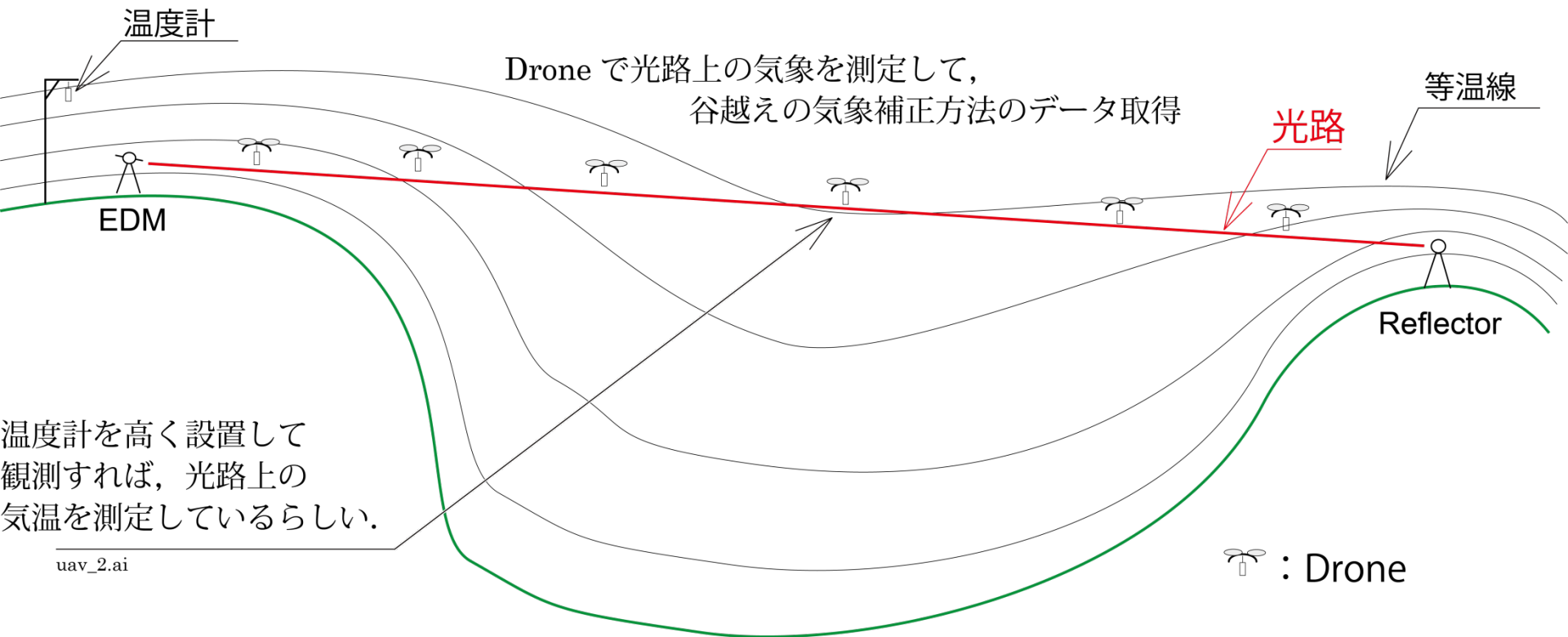
...





# ドローンによる気象測定

航空法の改正から難しくなった



谷地形の温度勾配はこうなってるらしい?

光路上の気象状況がアナログ的に把握できる.

# 高エネルギー加速器 研究機構 キャンパス



航空法の改正から  
重要建物上を飛行禁止

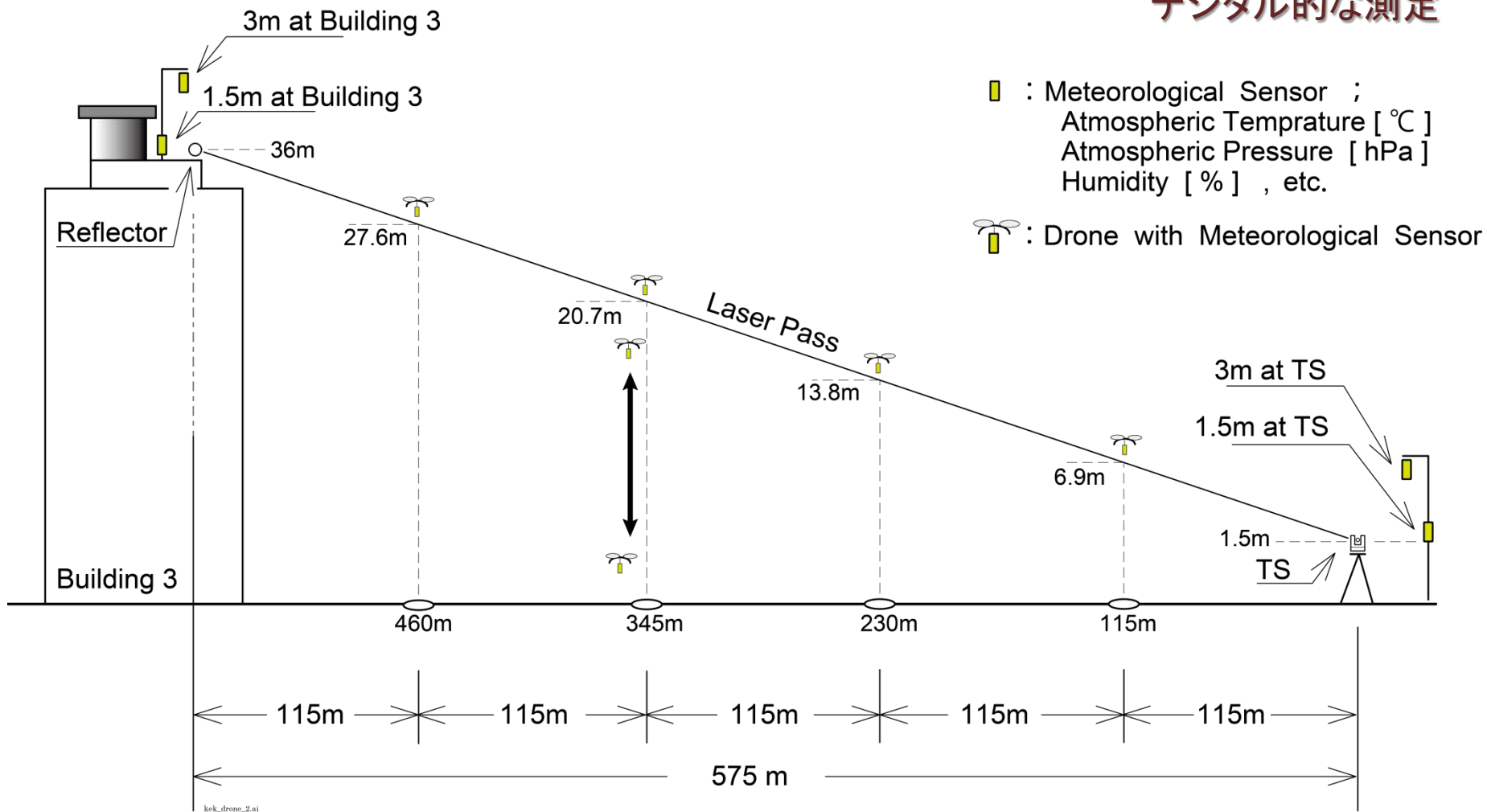


観測計画図



# ドローンによる気象測定

トータルステーションの視野で誘導して、  
デジタル的な測定



# 3号館展望デッキのReflector





# EDMの器械点から反射点を望む



# ドローン(無人ヘリコプター)

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 : 3 Kg

離陸総重量 : 6 Kg

ペイロード : 3 Kg

・飛行時間 : 15~30 分

・最大飛行速度 : 10 m/s







気象測定装置



# 気象測定装置



Kestrel 4000

## ・サイズ

(高)12.7 [cm] × (幅)4.5 [cm] × (厚)2.8 [cm]

・重量 : 102 [g]

・気温 :  $-29.0 \sim +70.0$  [°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 [%]1分ごとに計測

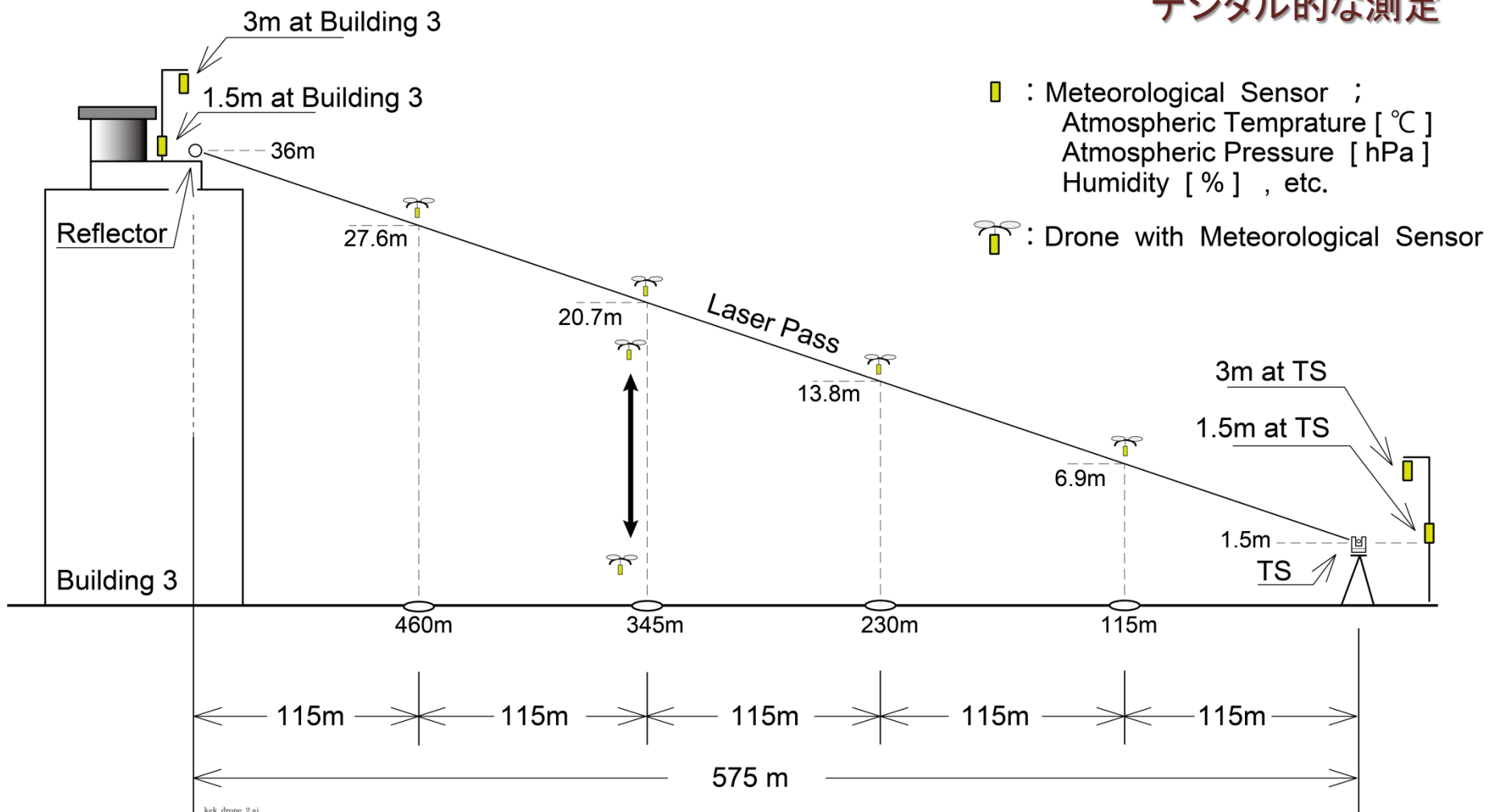
# 筑波山を背景に観測中





# ドローンによる気象測定

トータルステーションの視野で誘導して、  
デジタル的な測定

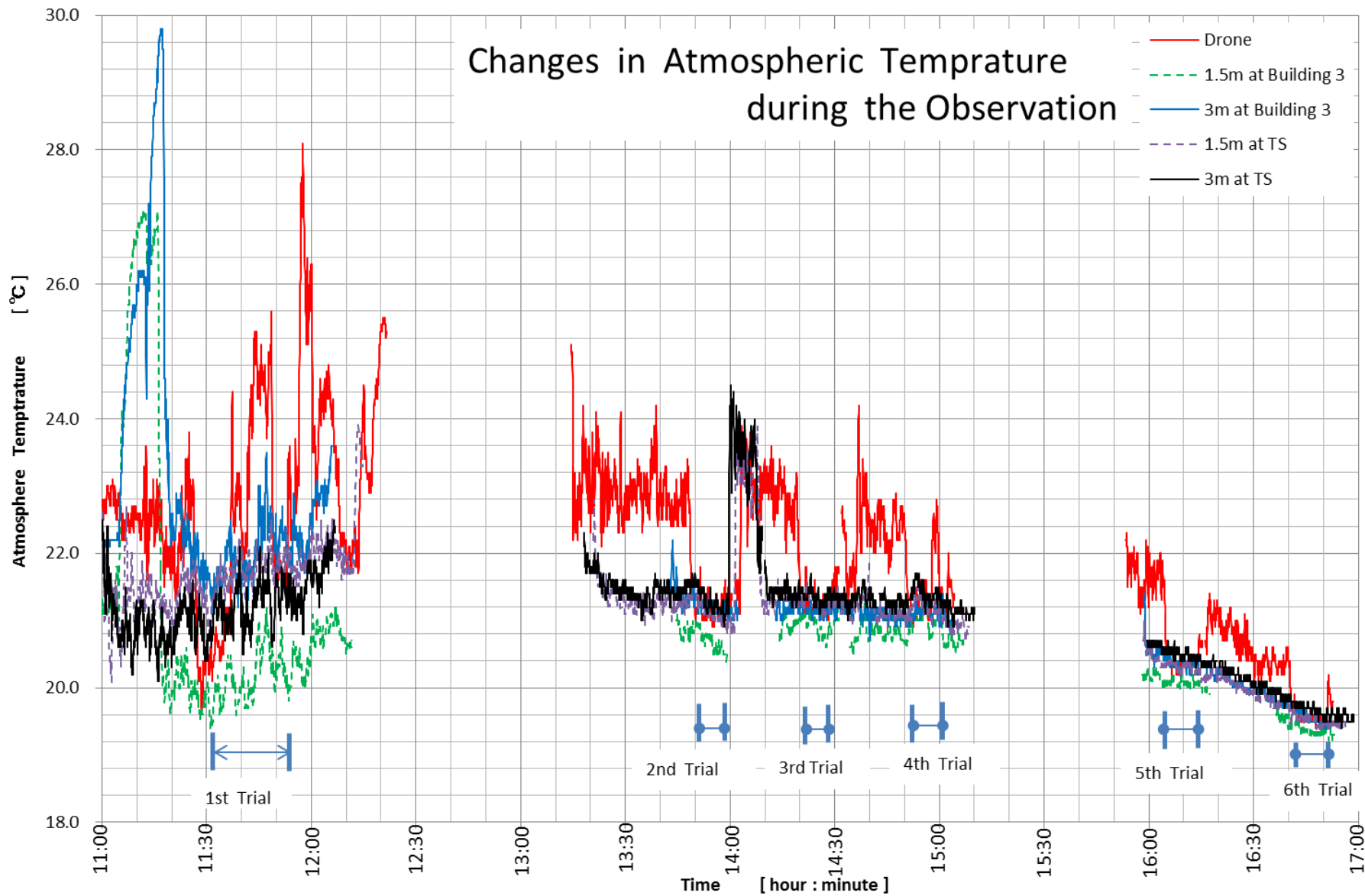


# 觀測結果

---

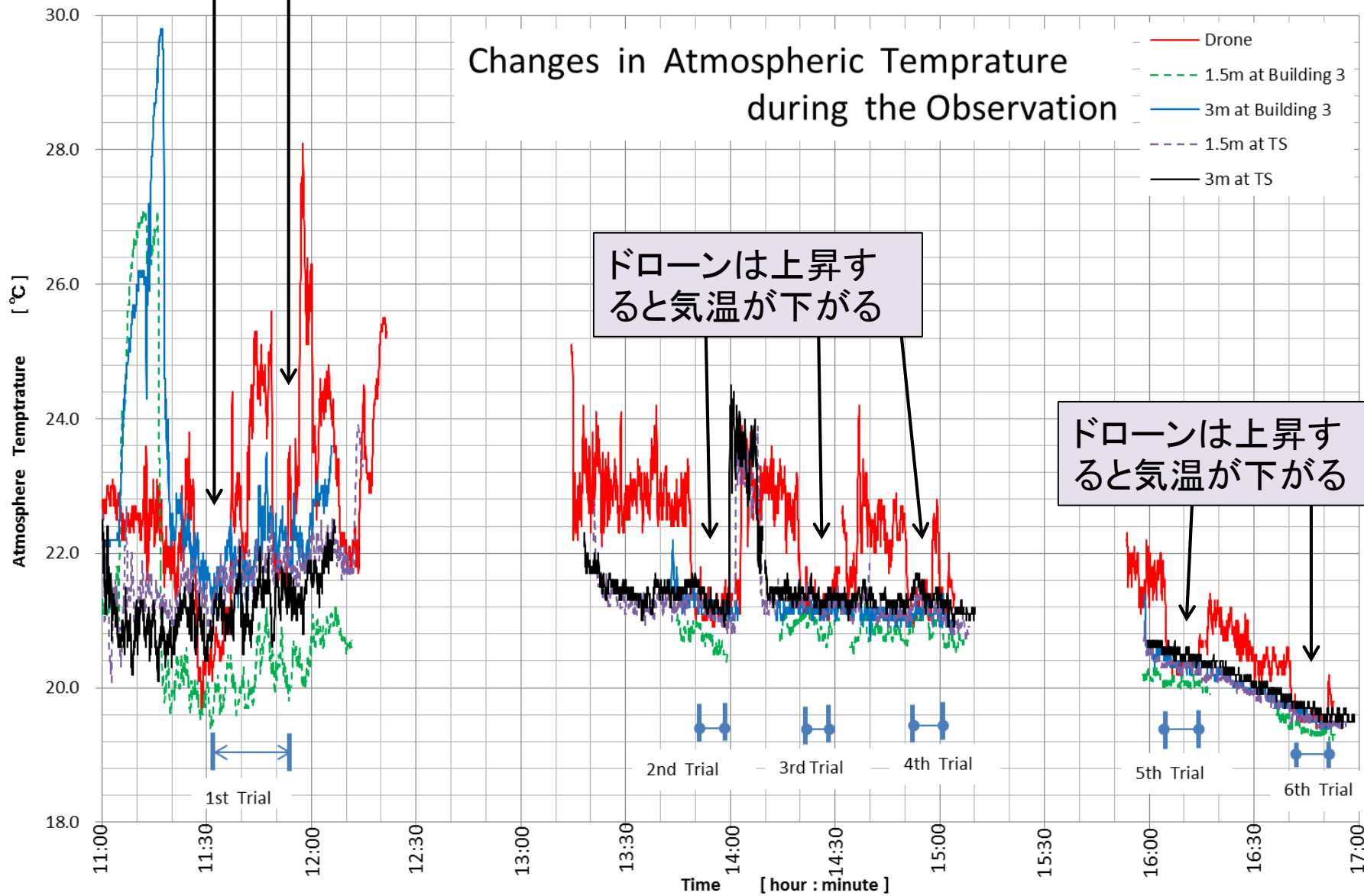


# 1日の気温

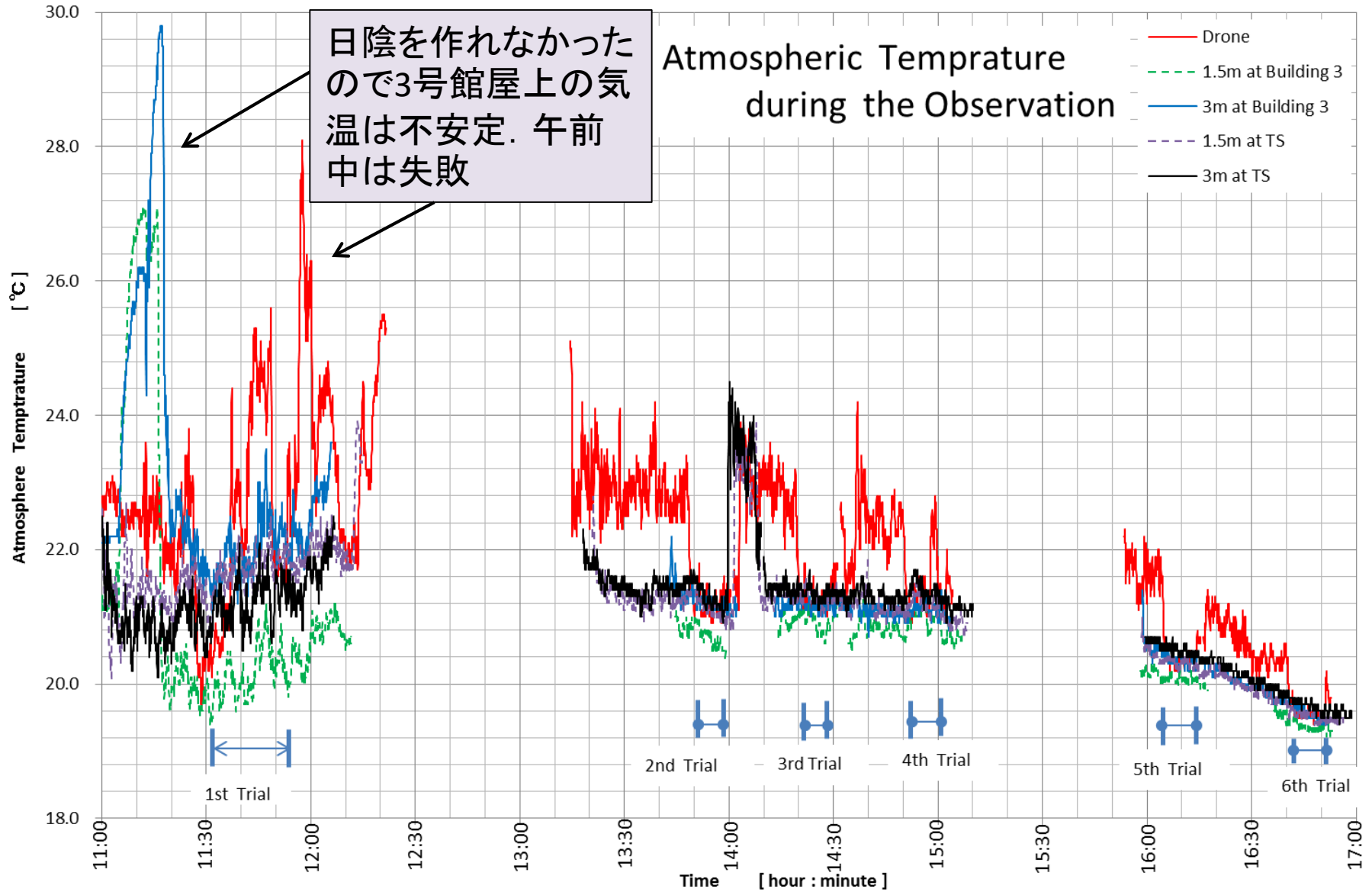


# 1日の気温

Changes in Atmospheric Temperature during the Observation

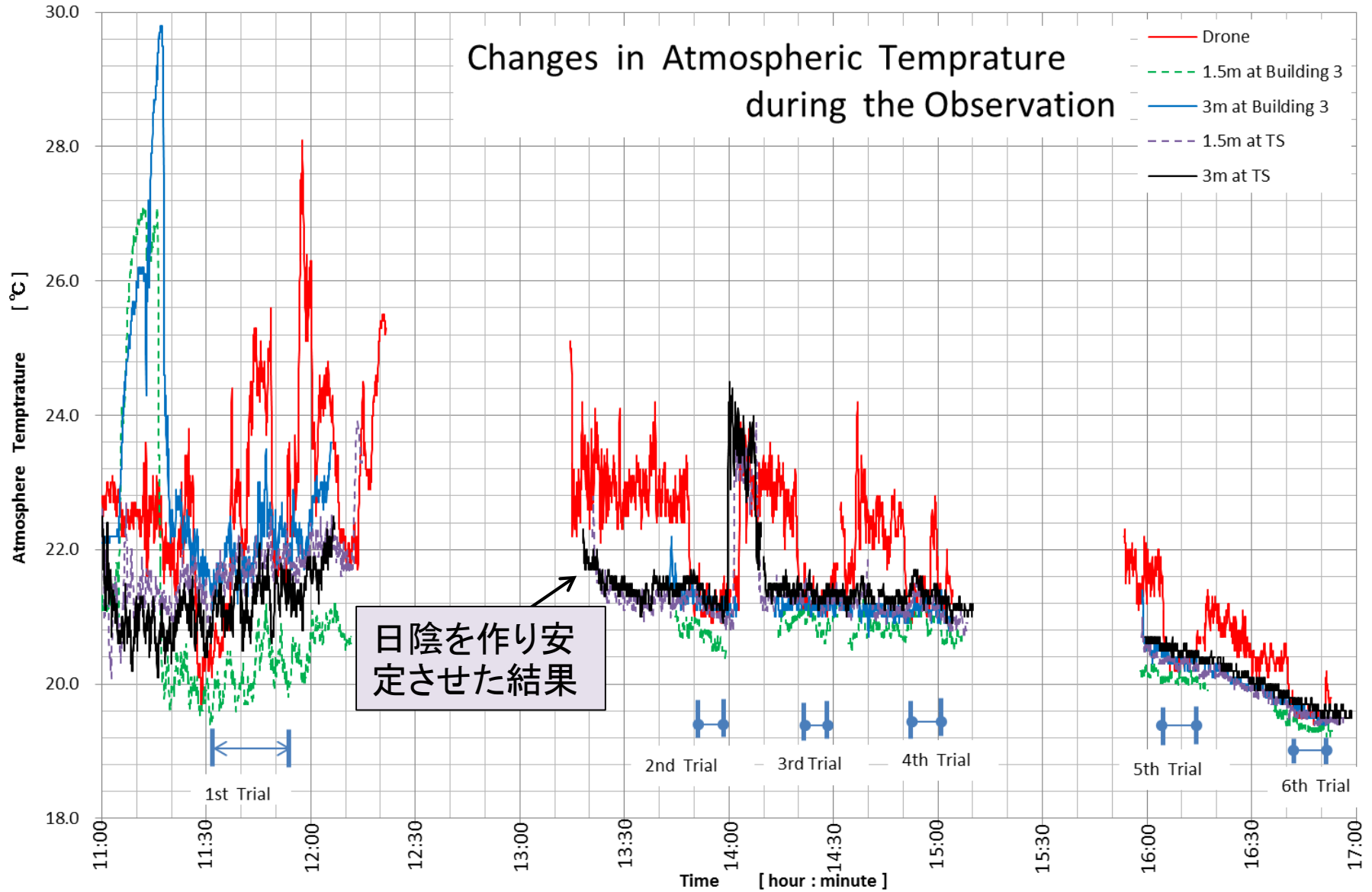


# 1日の気温

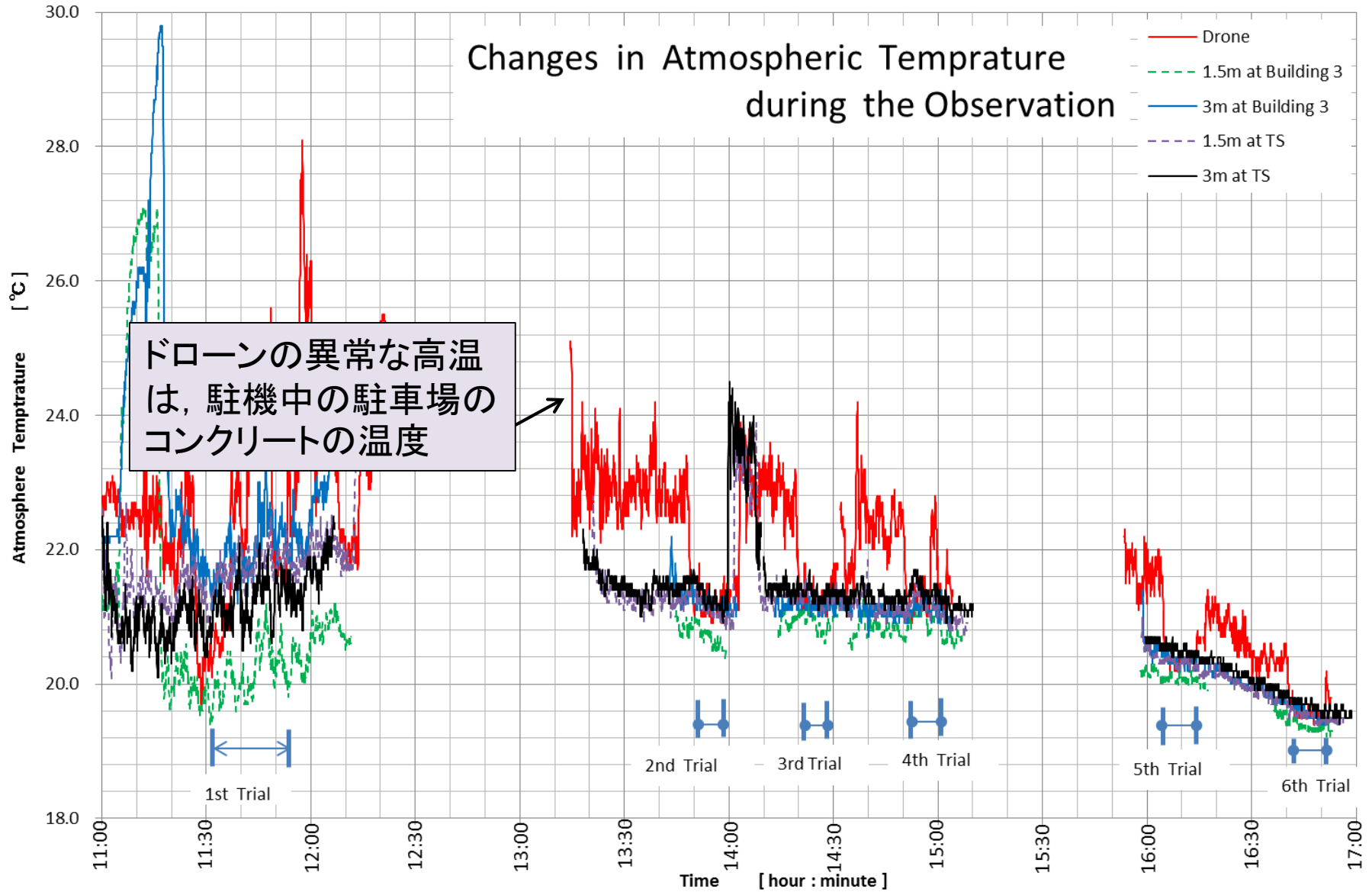




# 1日の気温

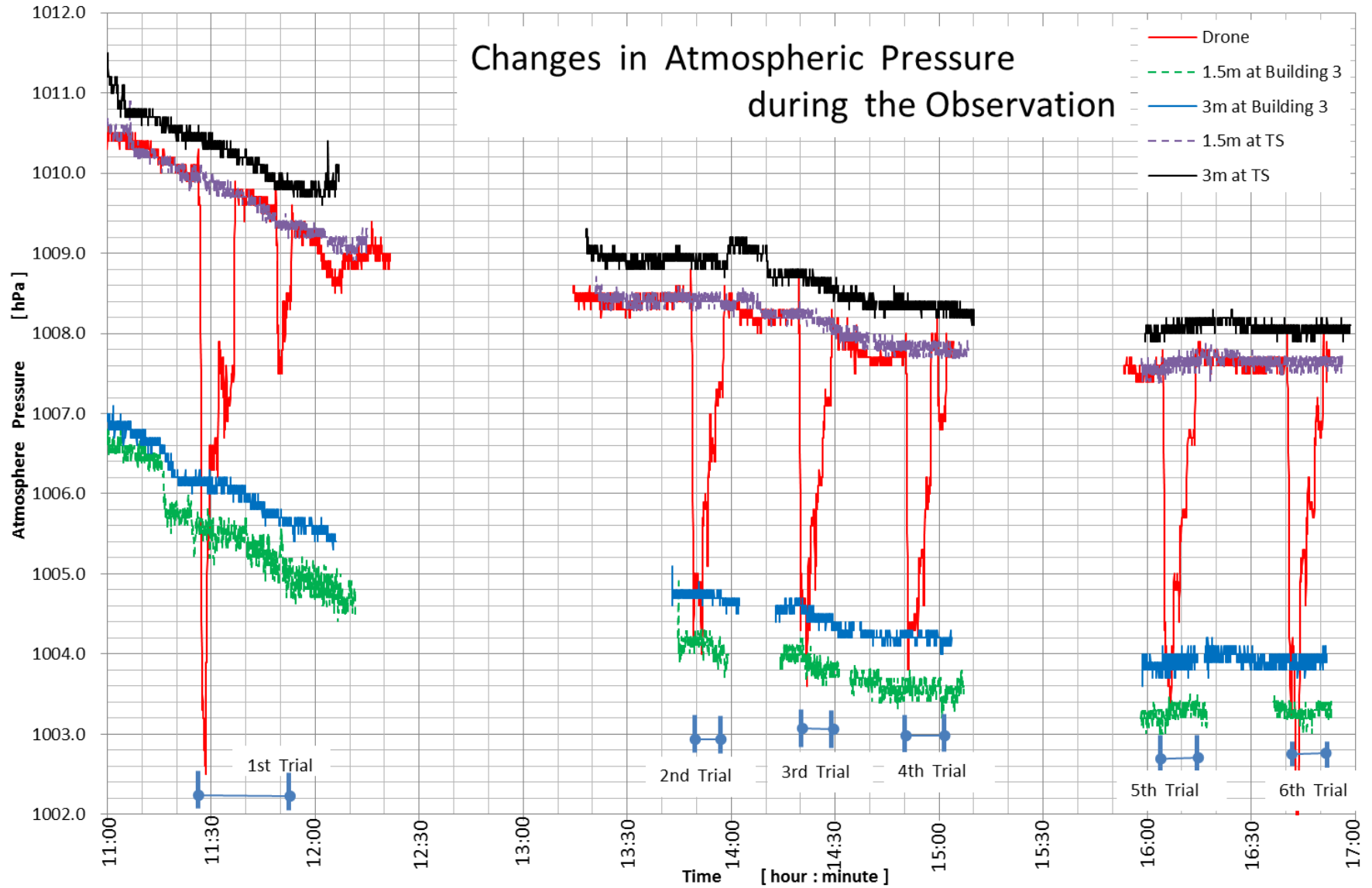


# 1日の気温

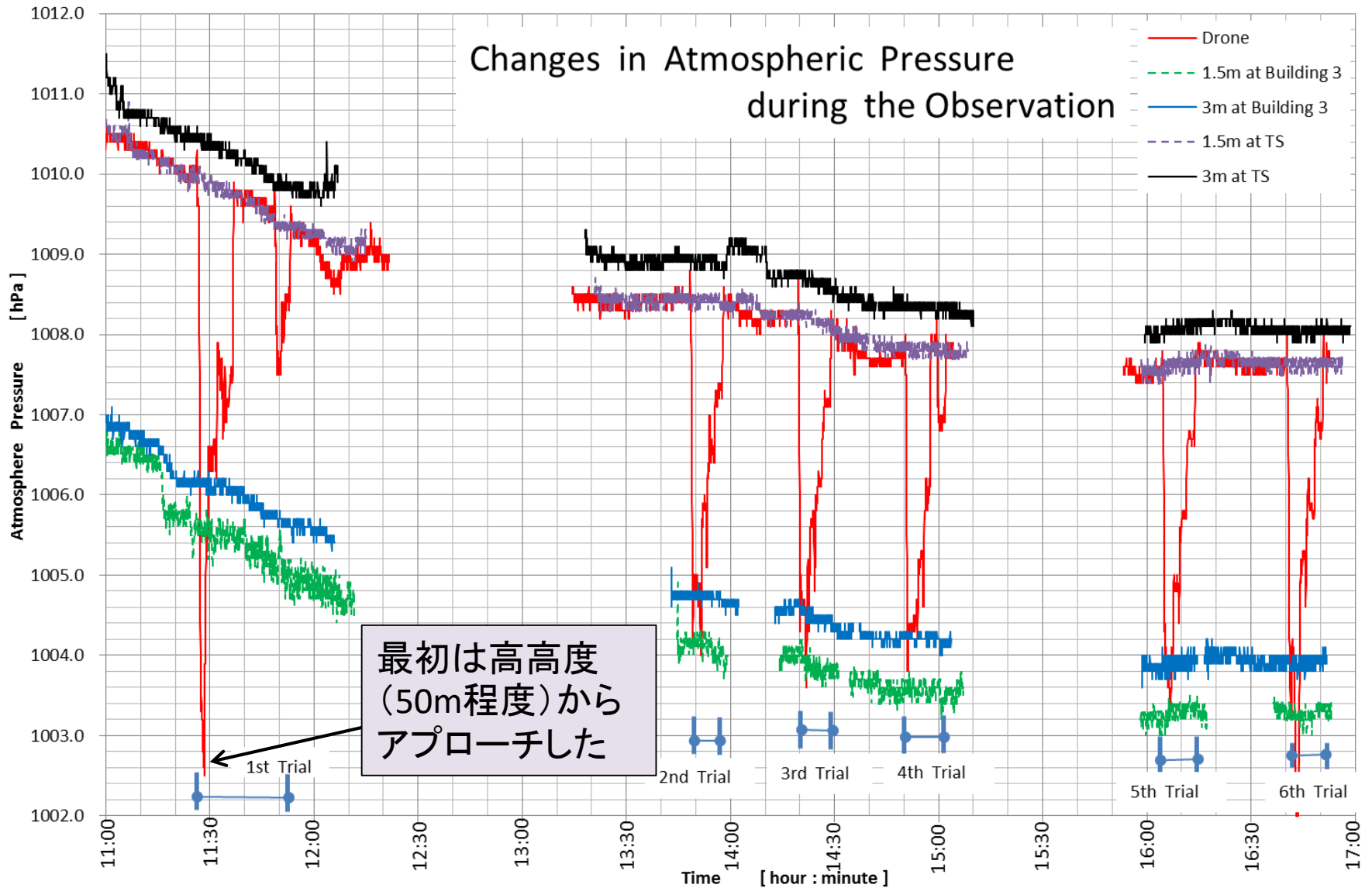


# 1日の気圧

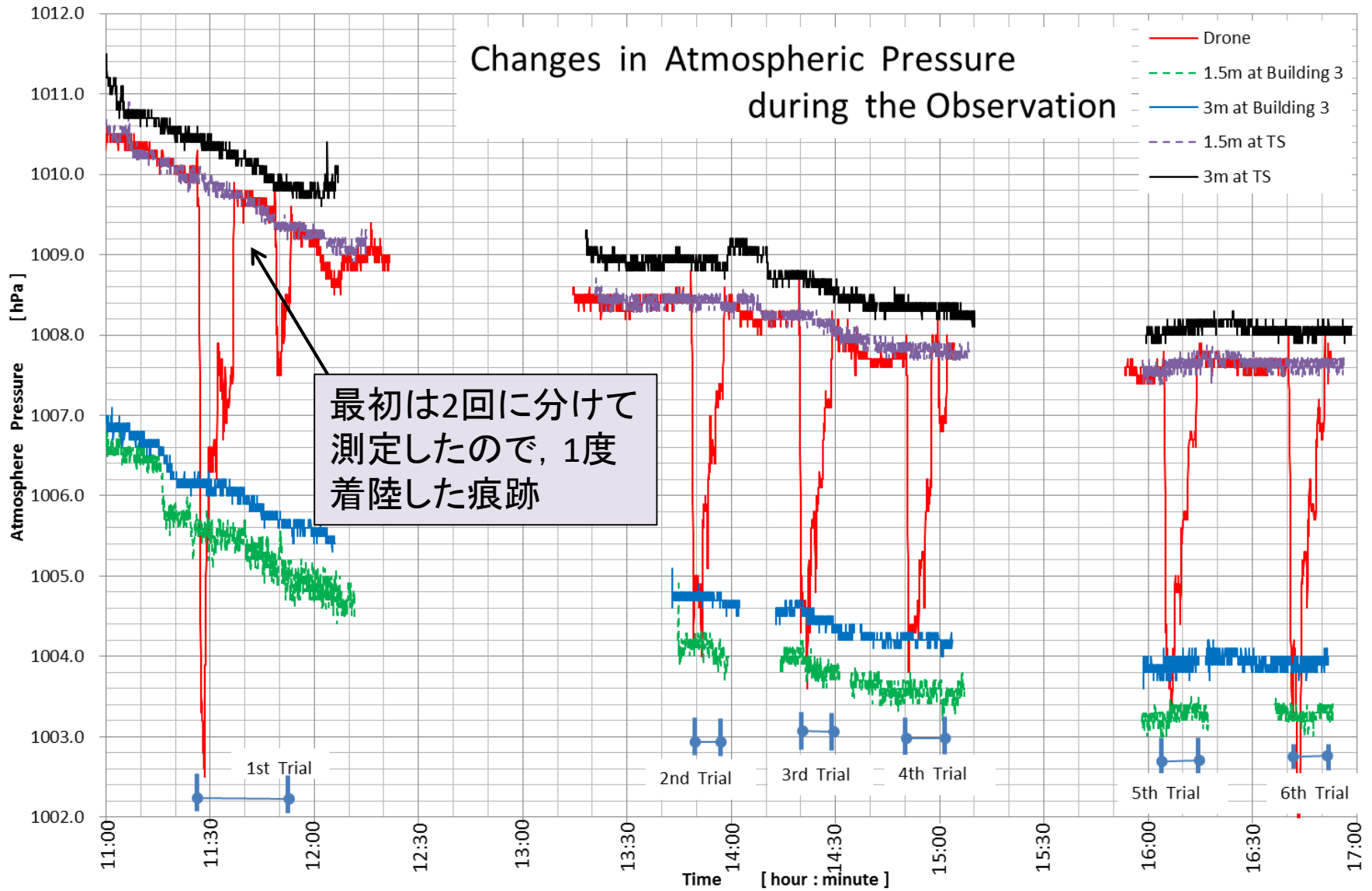
Changes in Atmospheric Pressure during the Observation



# 1日の気圧

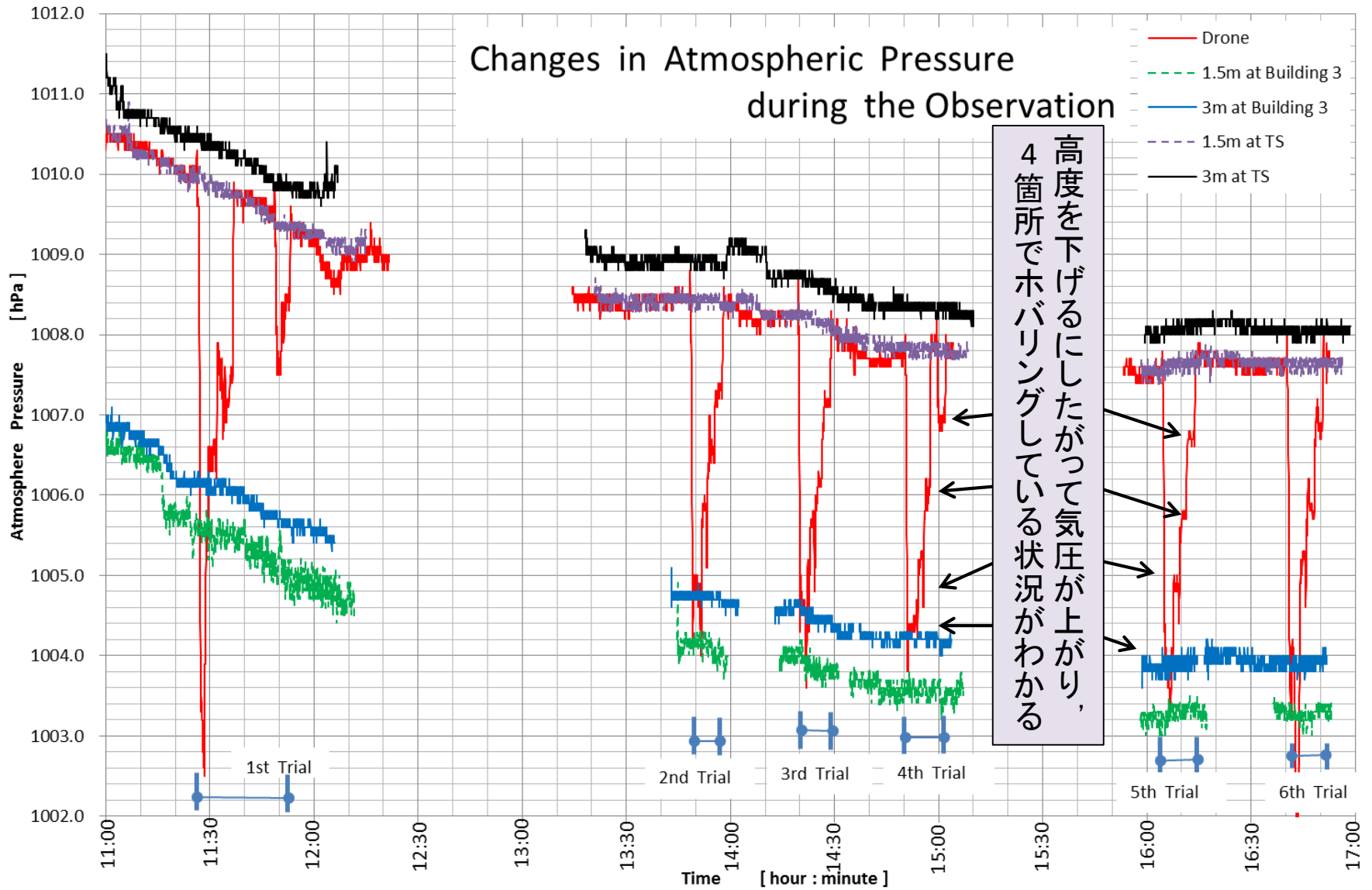


# 1日の気圧

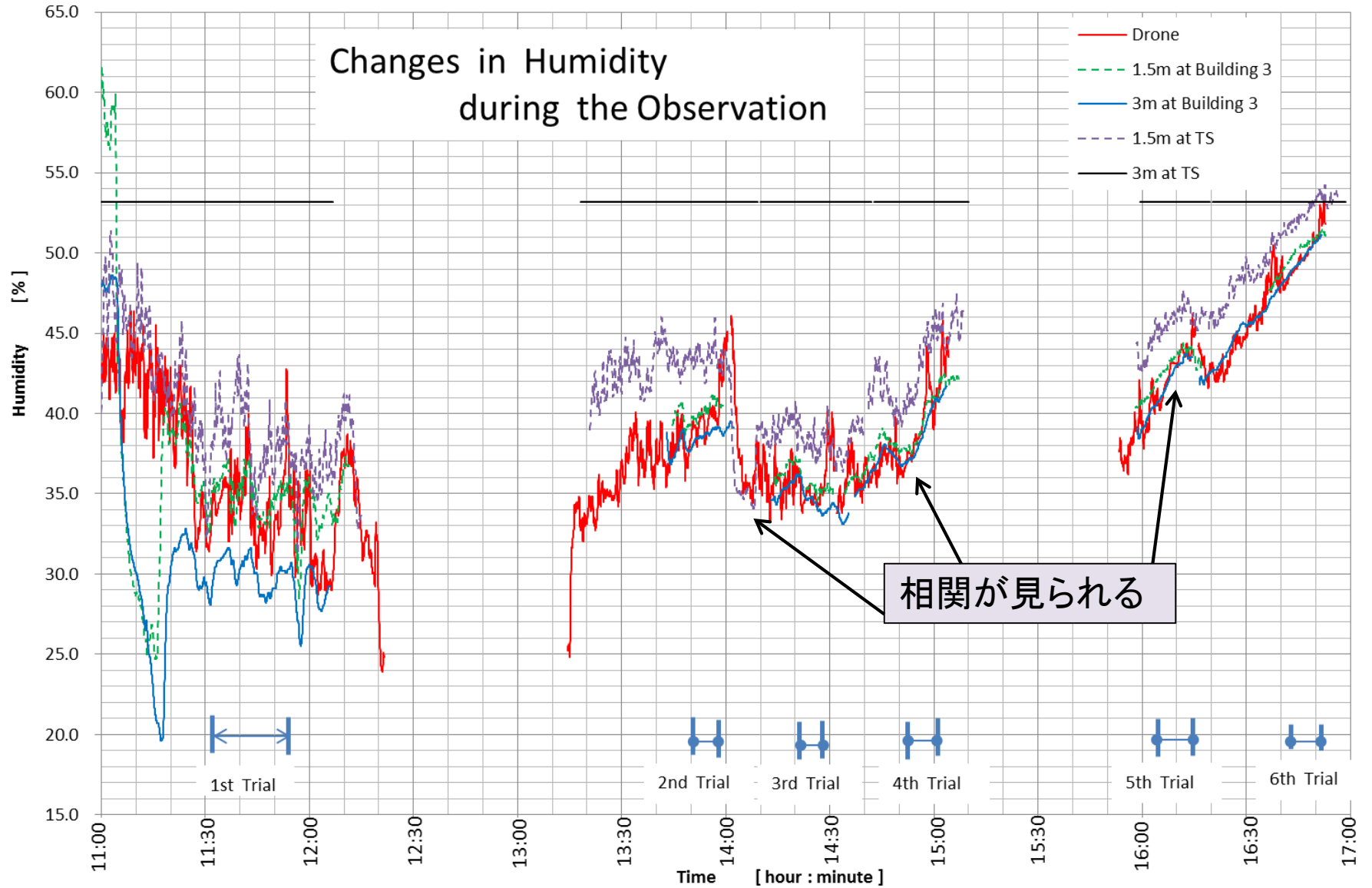




# 1日の気圧



# 1日の湿度



# 理論値との比較

高低差を  $\Delta H$  とすると、気温、気圧を次式で求めることができる

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

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

$t$  : 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]

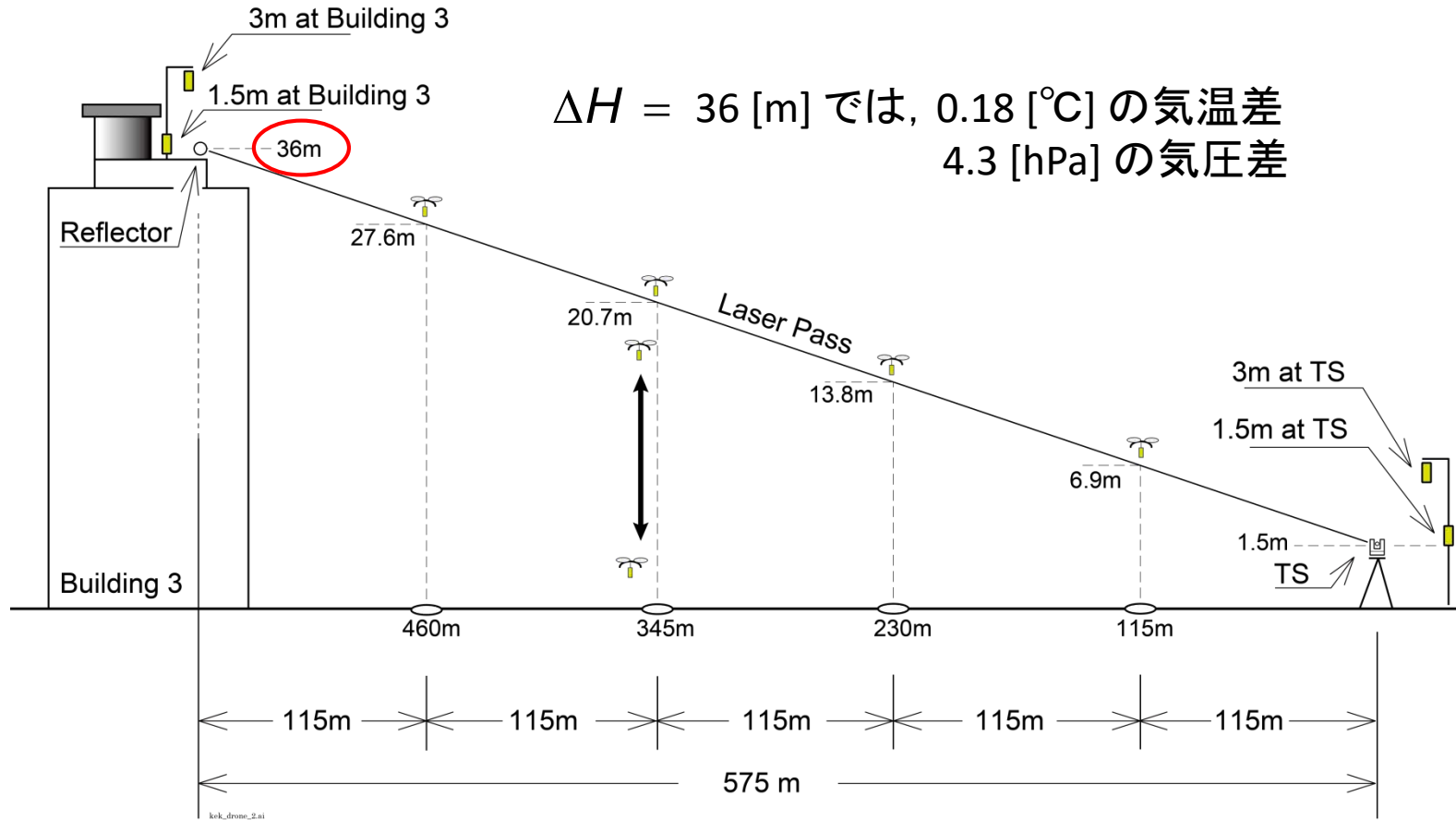
$P_1$  : 基準とした測点で観測した気圧 [hPa]

$P_2$  : 求めようとする測点の気圧 [hPa]

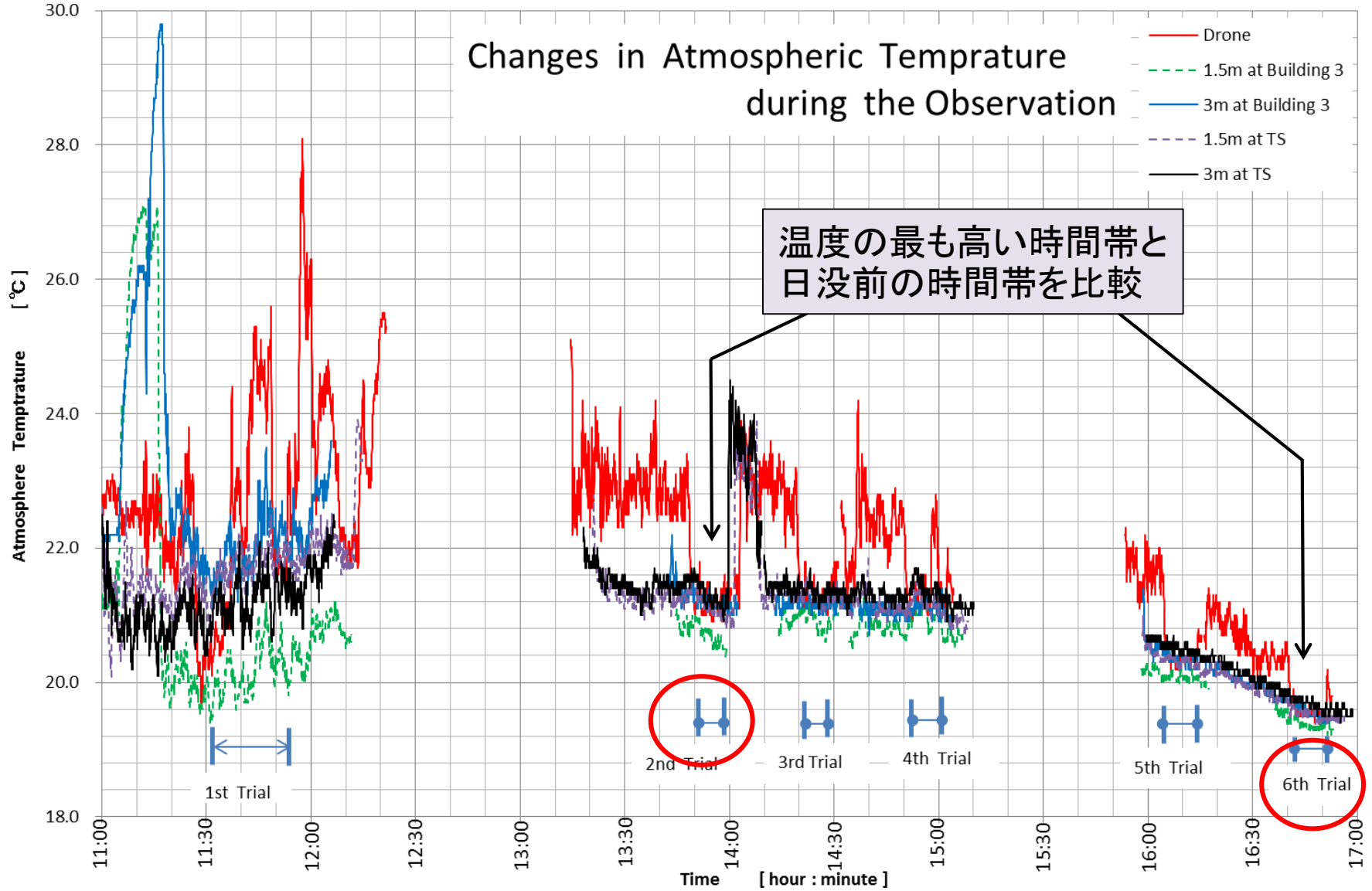
$$T = 273.15$$

高低差  $\Delta H = 1$ [m]で  $0.05$  [°C]の気温差,  $0.12$ [hPa]の気圧差が計算される.

高低差  $\Delta H = 1[m]$  で  $0.05 [^{\circ}\text{C}]$  の気温差,  
 $0.12[\text{hPa}]$  の気圧差が計算される.



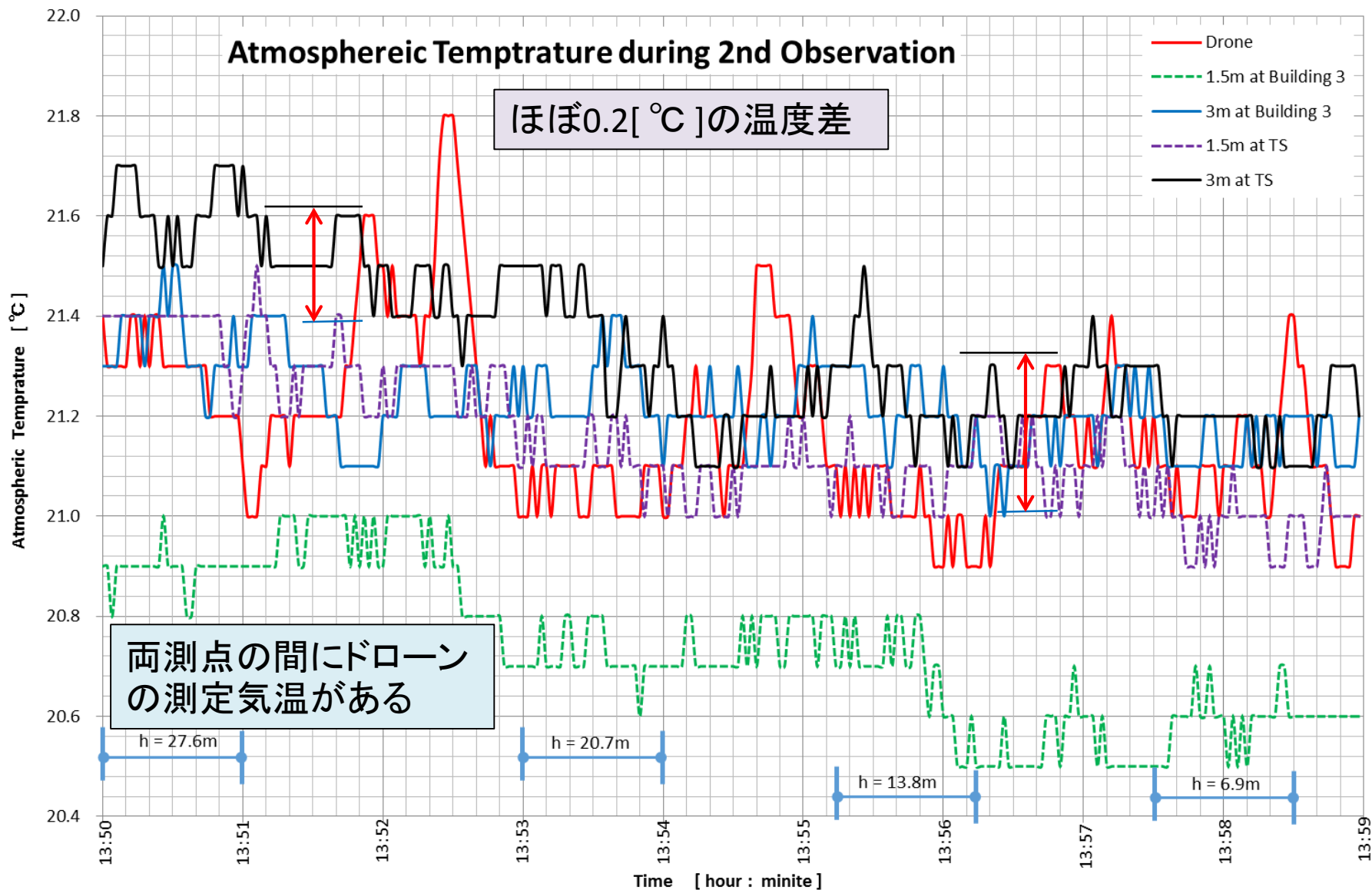
# 1日の気温 ②



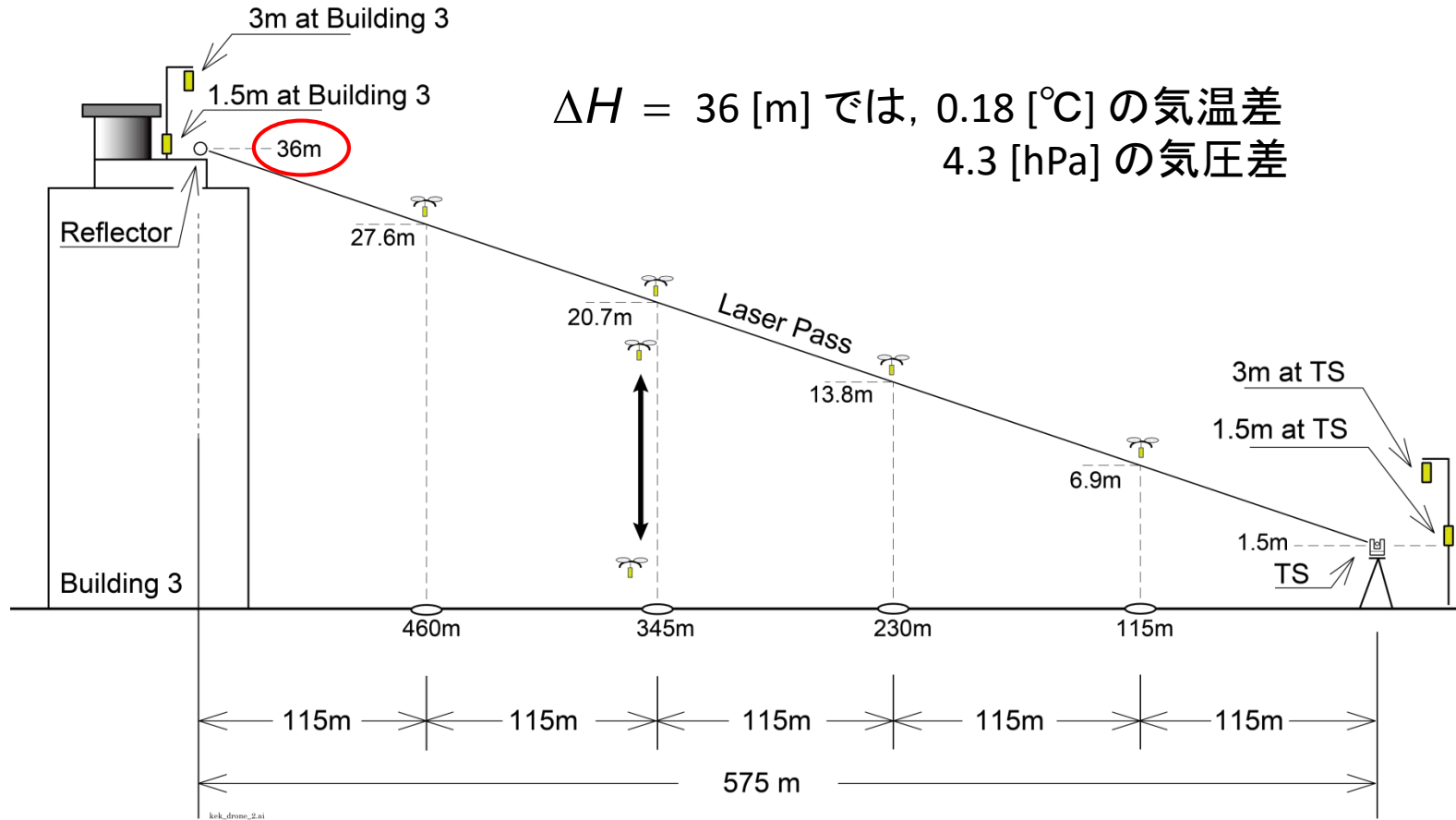


# 2回目の気温の観測結果

$\Delta H = 36$  [m] では, **0.18 [°C]** の気温差  
4.3 [hPa] の気圧差

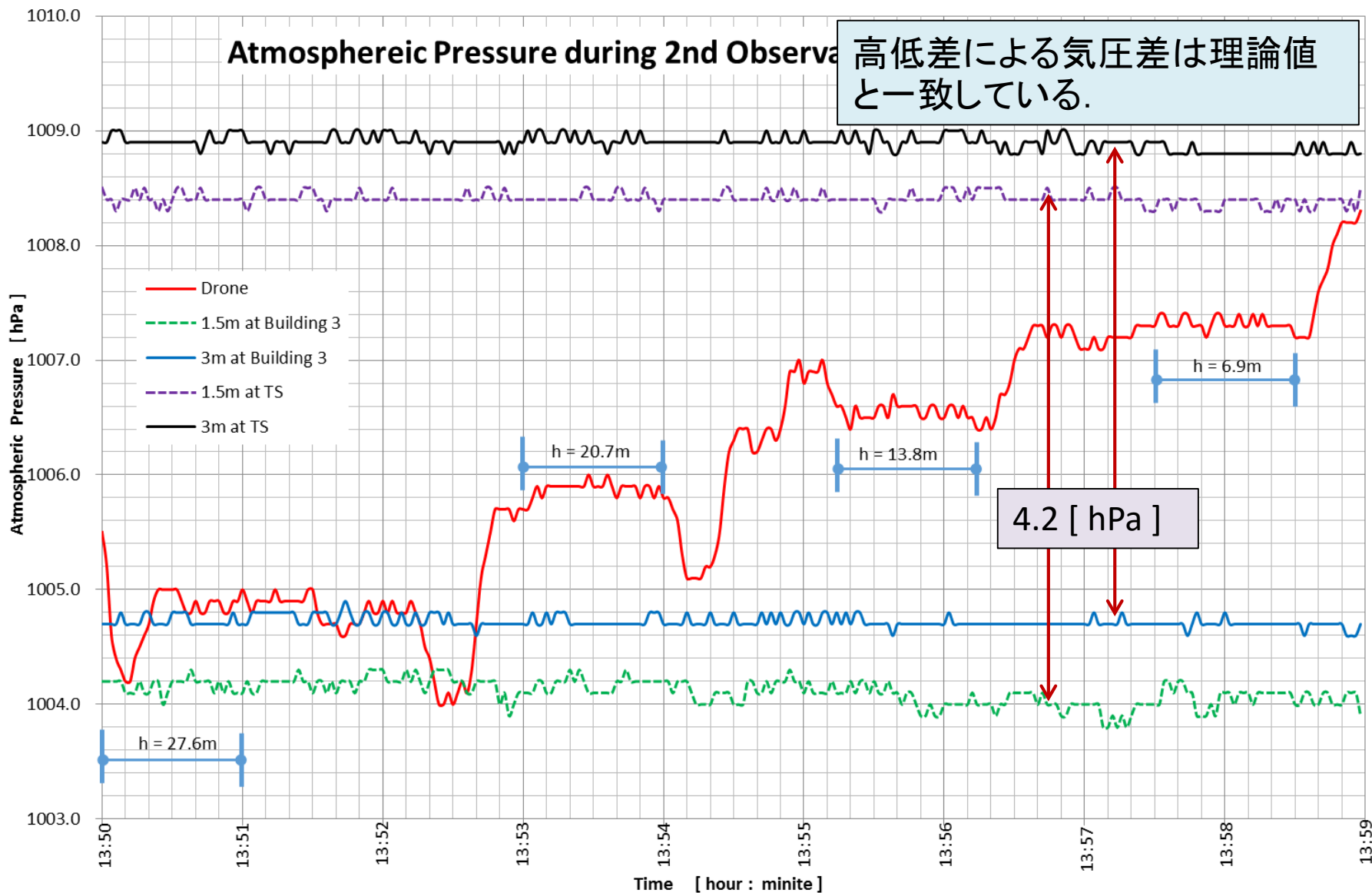


高低差  $\Delta H = 1[m]$  で  $0.05 [^{\circ}\text{C}]$  の気温差,  
 $0.12[\text{hPa}]$  の気圧差が計算される.



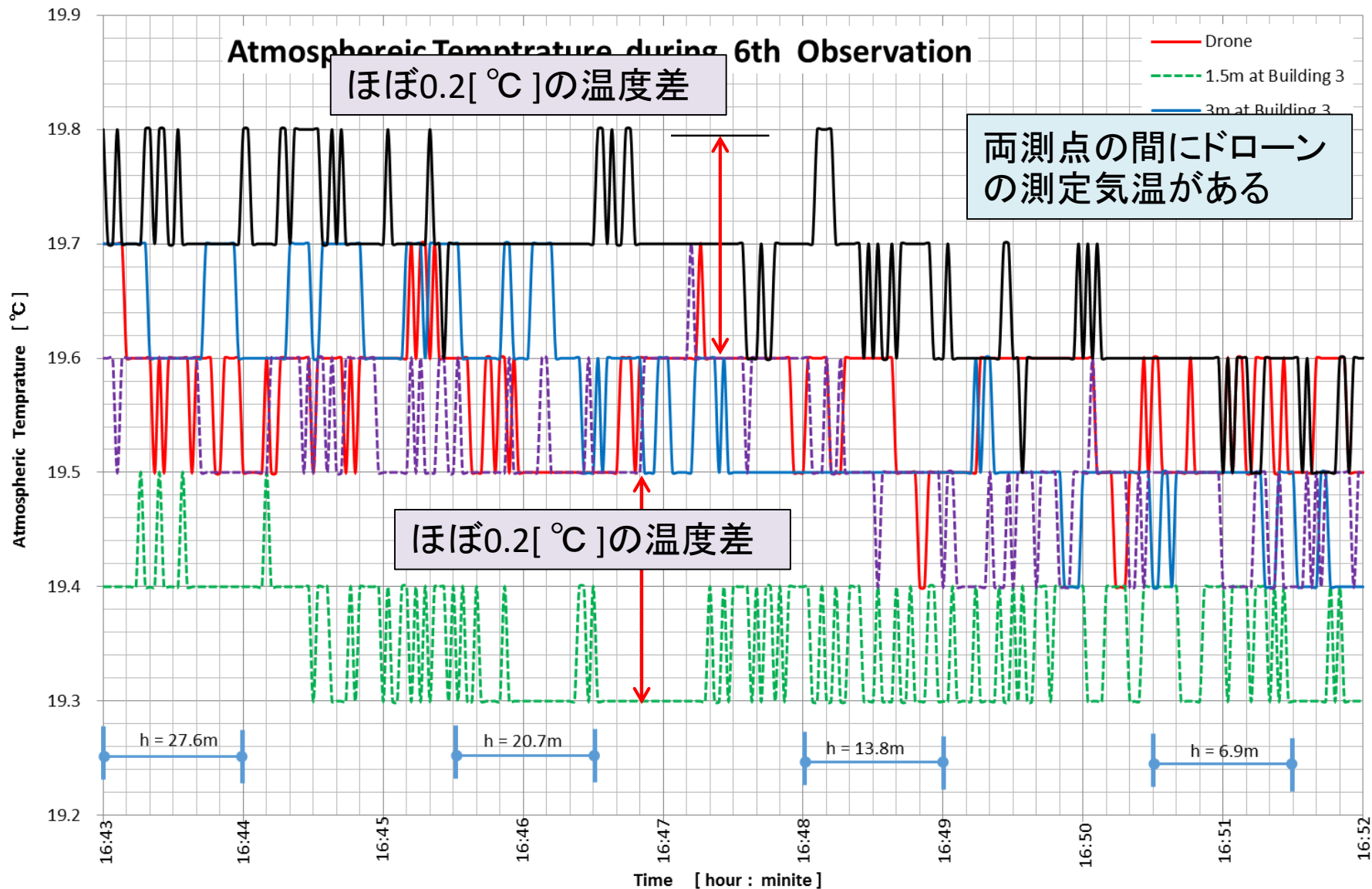
# 2回目の気圧の観測結果

$\Delta H = 36$  [m] では,  $0.18$  [°C] の気温差  
**4.3 [hPa]** の気圧差



# 6回目の気温の観測結果

$\Delta H = 36$  [m] では, **0.18 [°C]** の気温差  
4.3 [hPa] の気圧差



# 總括結論

---





# 結 論

- ドローンでEDMの光路沿いの気象観測することは可能であることを確認できた.
- 従来 of 両測点の気象の平均値で光路沿いの気象を代表することは、ほぼ正しい方法であることが確認できた.
- 一方、今回は測点間の距離は600 [ m ] 未満であるが、最近では長距離の観測はGNSSによって測量されることが多いので、現実的な範囲での検証と考えられる.