

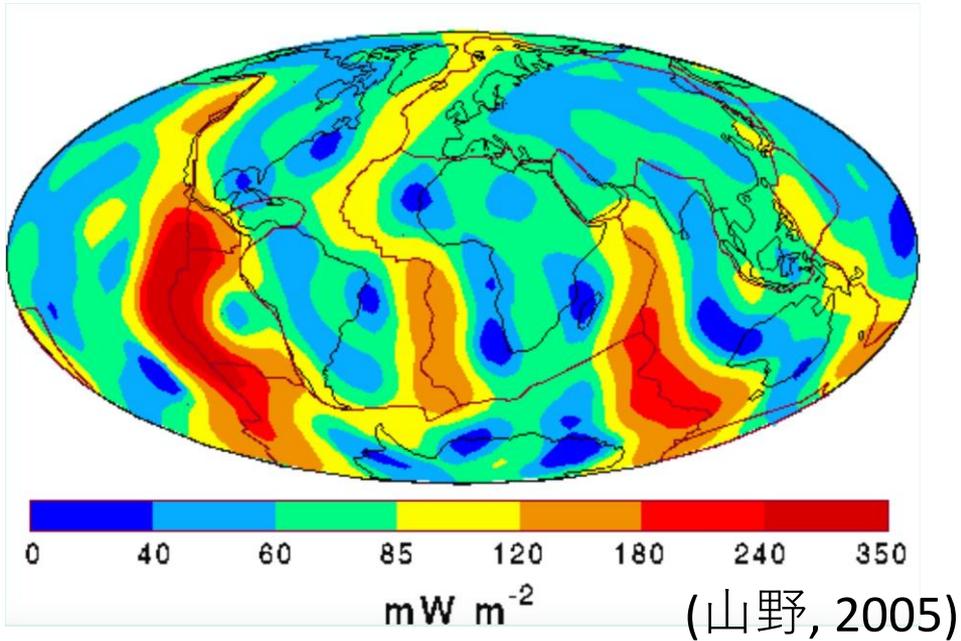
観測実習－熱学

川野 由貴 小山 健太郎 丸山 純平
水谷 雄太 南 一輝

指導教員；山野 誠 飯高 隆

2017 07 21

目的

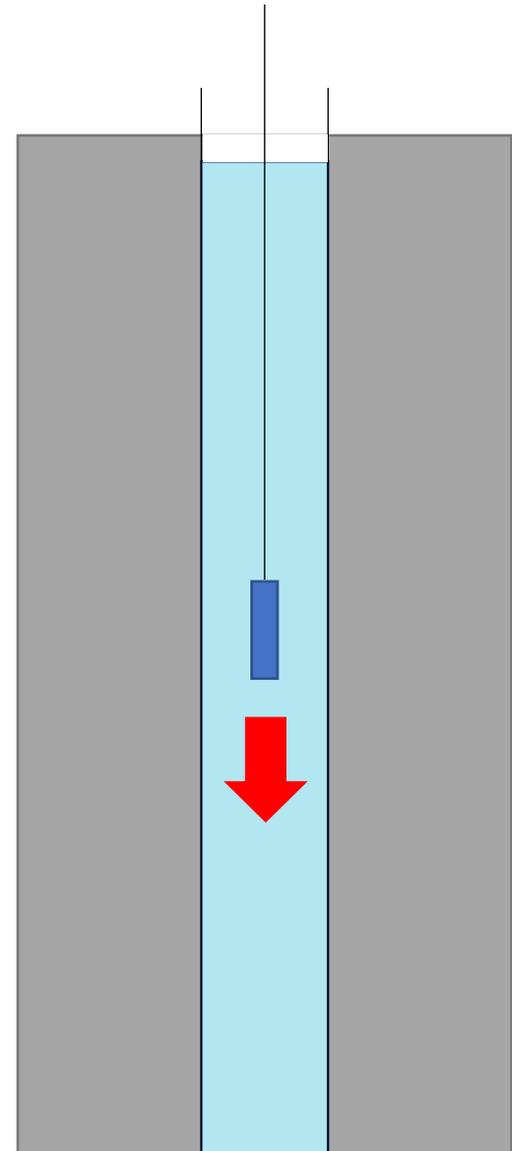


1. 孔井内の温度プロファイルから地温勾配の推定
2. 孔井内の定点で温度測定することで温度の安定性を調べる
3. 複数の深度で温度を測定することで熱拡散率 κ の推定

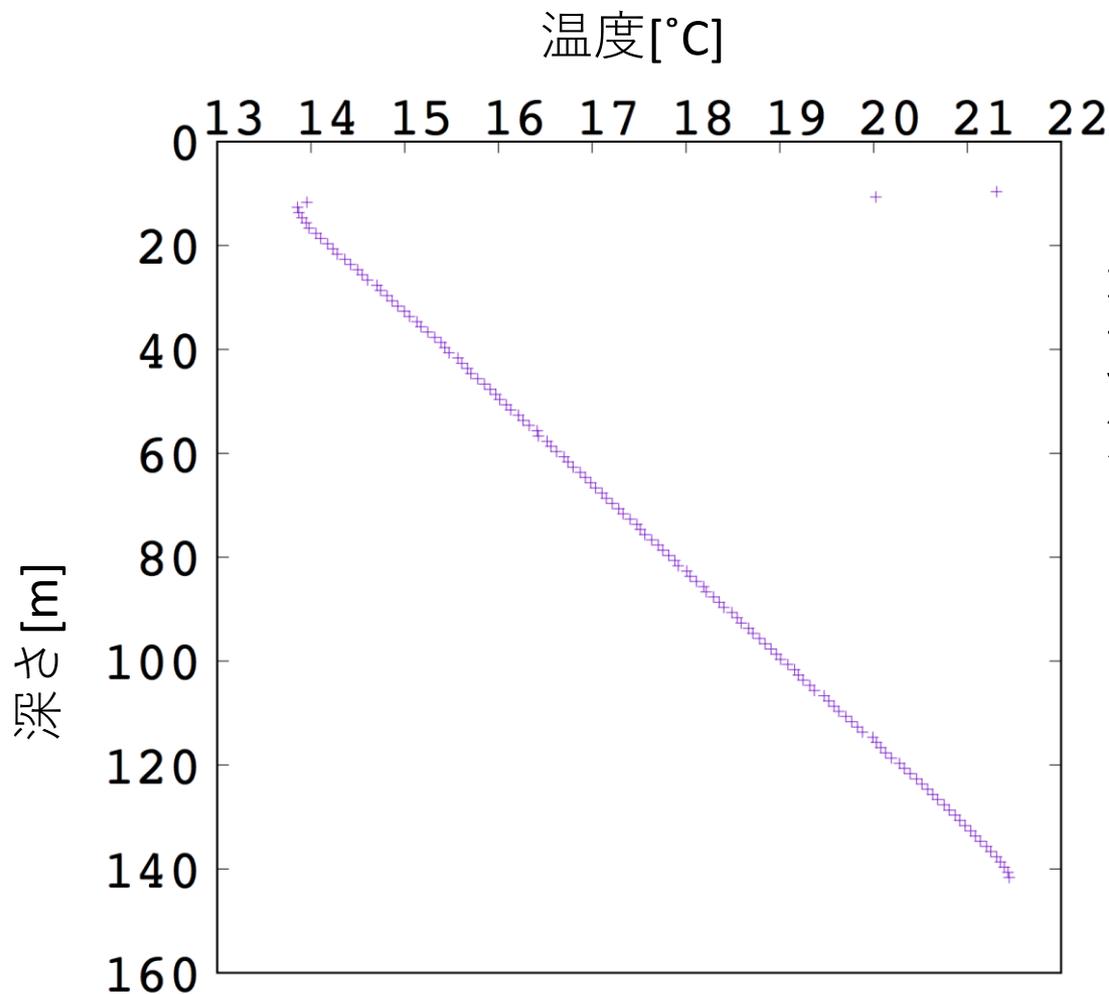
観測－ 孔井内での温度測定

1. 孔井内での温度測定

地表 9.6 mから 141.6 mまで1 mごとに
サーミスタの電気抵抗を測定



地温勾配



地表面付近での温度変化を取り除くため20 m より深部で解析した

地温勾配:

$$T(z) = 0.057 z + 13.02$$

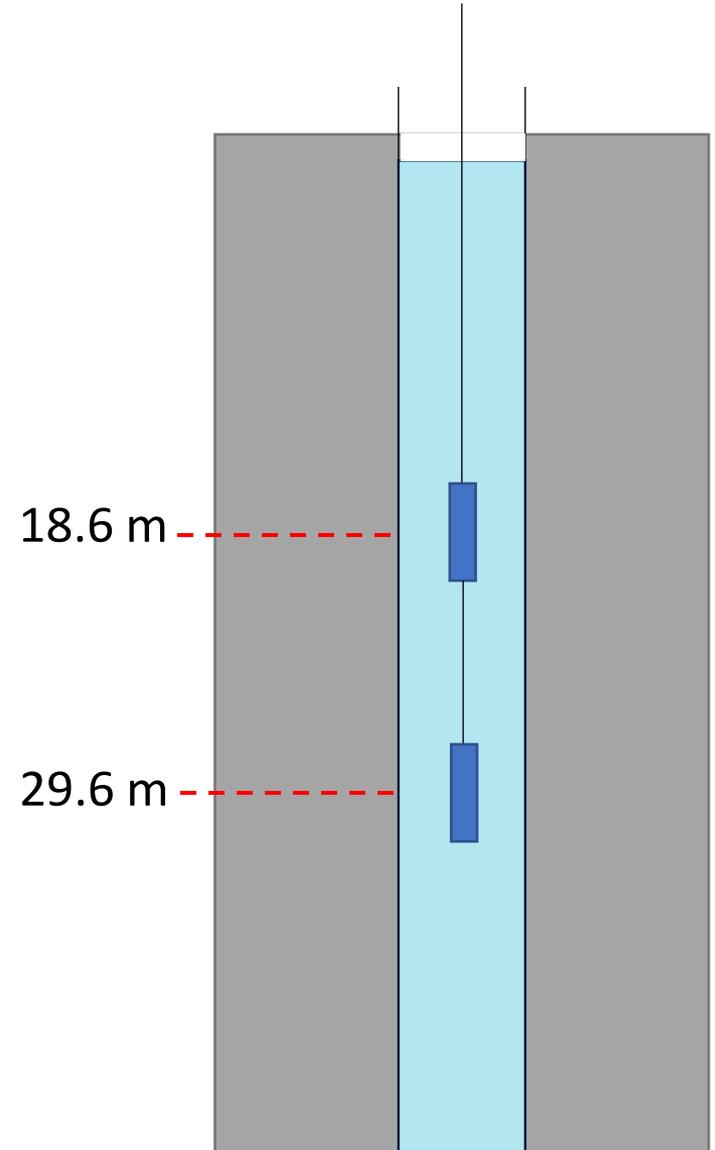
観測－ 孔井内での温度測定

2. 孔井内のある深度での連続測定

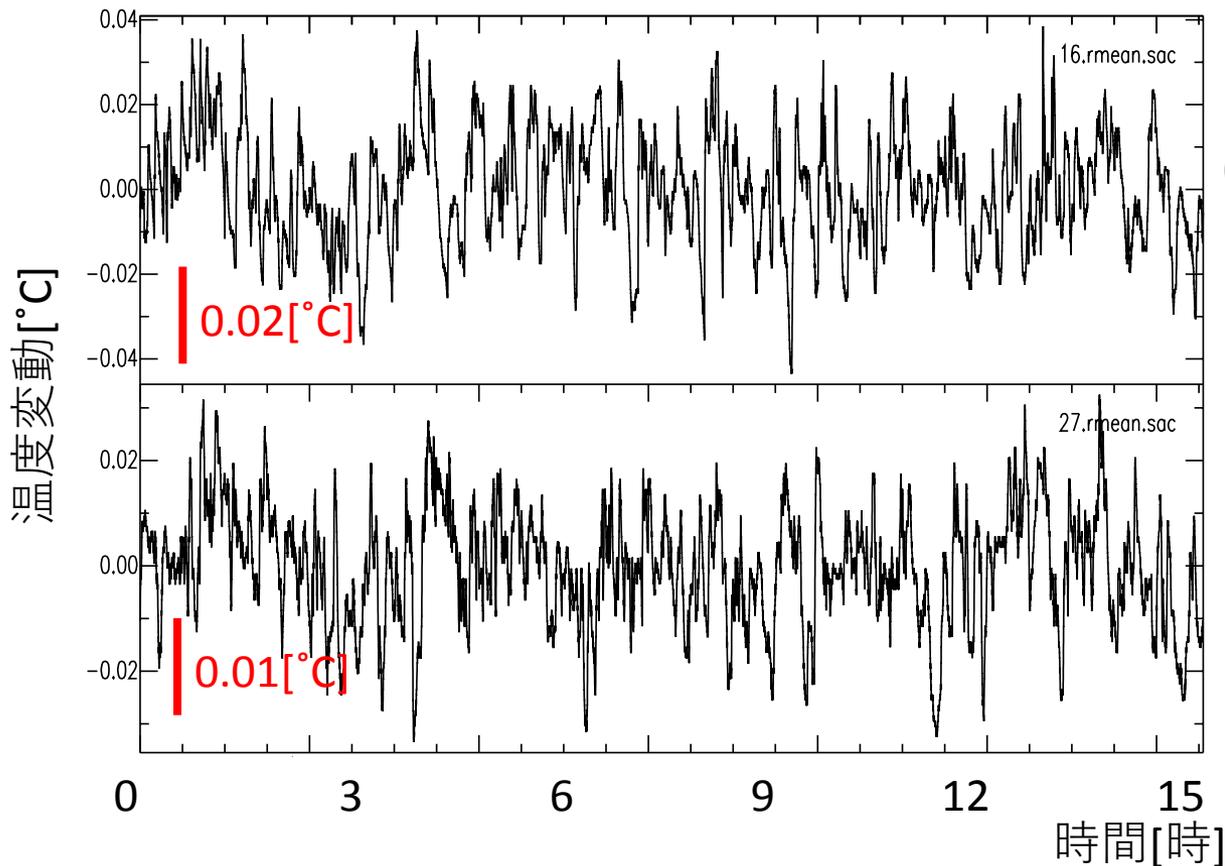
18.6 m, 29.6 mで

2017/07/22 15:02 から 2017/07/23 08:48 まで

2秒ごとに温度計で温度を測定



井戸内の温度変動



深さ: 18.6[m]
平均温度: 14.58[°C]
0.04[°C]の温度変動

深さ: 29.6[m]
平均温度: 15.20[°C]
0.02[°C]の温度変動

2017/07/22 15:20:00 から 2017/07/23 08:45:58
の定点観測のデータを使用し，平均温度からの変動を求めた。

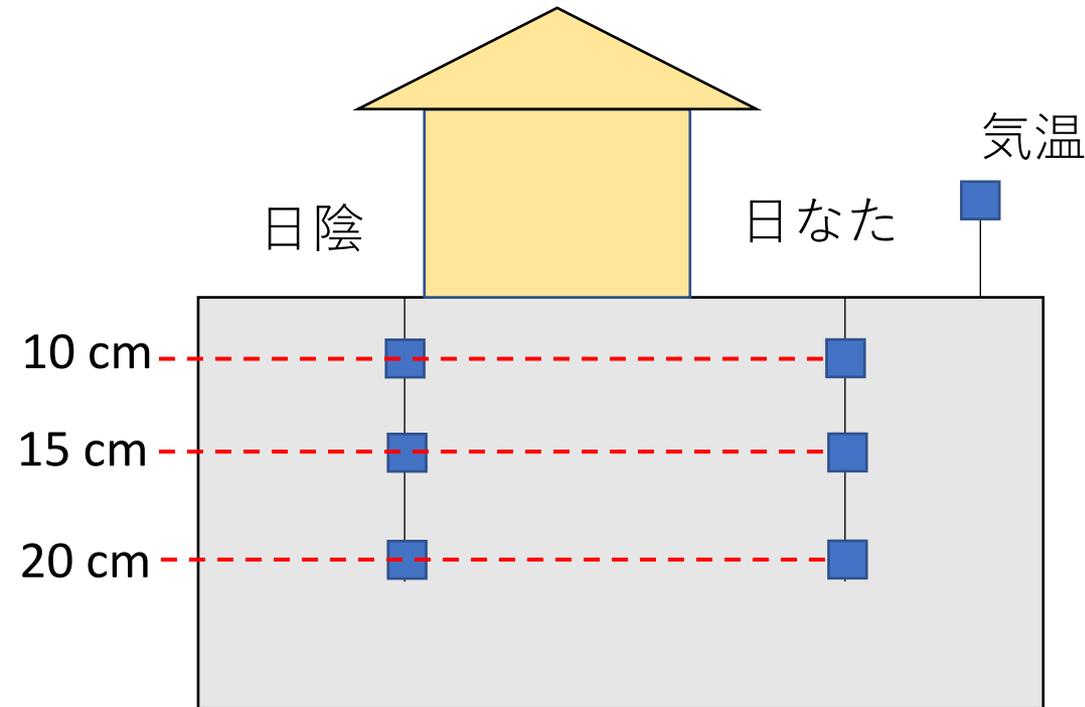
温度変動→孔井内の水の対流の影響？

観測－ 地表面付近の温度変動の測定

3. 地表面付近の温度変動の測定

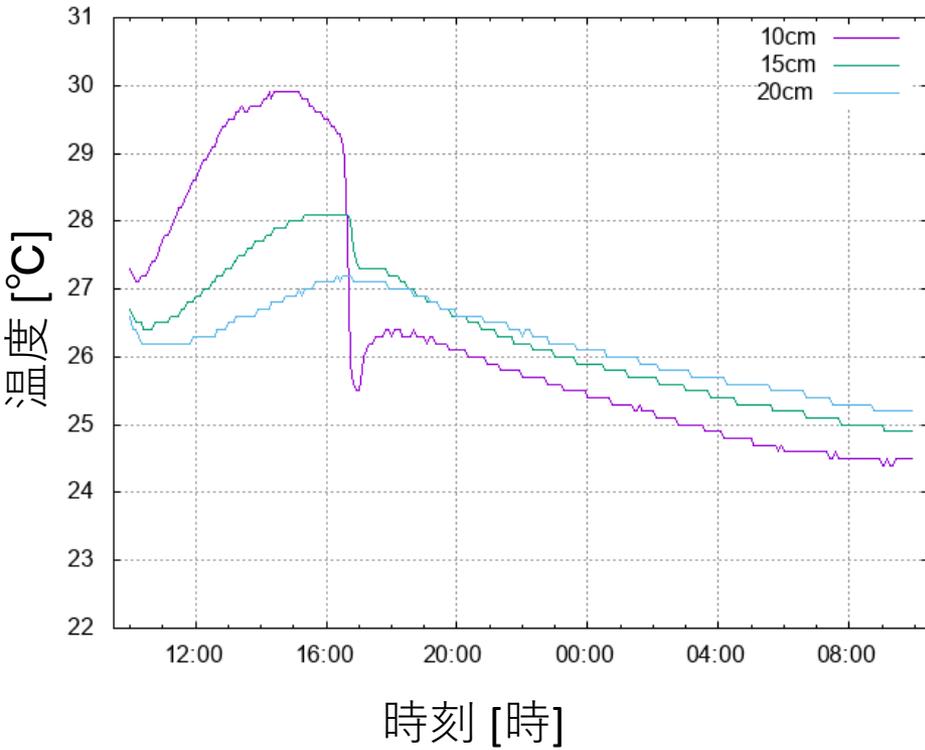
日なた, 日陰において
複数の深さ (10 cm, 15 cm, 20 cm)
での温度を測定

2017/07/22 10:00から2017/07/23 10:00 まで
5分ごとに測定

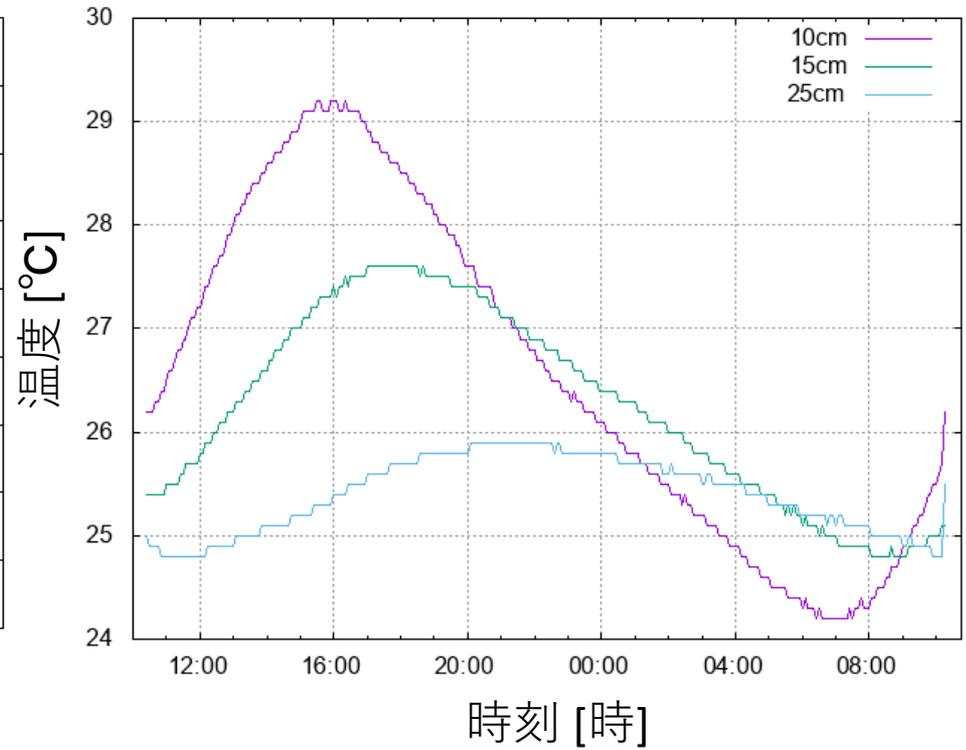


観測 - 降水による影響

2017年



2016年



解析手法

1次元熱拡散方程式

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}$$

地表面の温度変化(境界条件)を

周期として考える $T(0,t) = T_0 + A \cos\left(\frac{2\pi t}{P}\right)$

ステップとして考える $T(0,t) = \sum_i \Delta T_i H(t - t_i)$

$$H(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t \geq 0) \end{cases}$$

解析一周期的変動 ～1日周期フィッティング

地表面の温度が1日周期で変化すると考える

地表面の温度 $T(0, t) = T_0 + A \cos\left(\frac{2\pi t}{P} - \alpha\right)$ が地下へと熱拡散

深さ z , 時間 t における対応する温度変化は,

$$T(z, t) = A \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\kappa \cdot P}} z\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{P} - \sqrt{\frac{\pi}{\kappa \cdot P}} z - \alpha\right)$$

κ : 熱拡散率[m²/s]

P : 周期[s]

24時間とした

実際の解析では,

1. 深さ10 cmを基準面として温度時系列データから, 振幅 A , 初期位相のずれ α を決める.
2. 深さ15 cm, 25 cmについて, 熱拡散率 κ を変えながら擾乱項を計算する.
3. 最も実測値と近い熱拡散率 κ を求める.

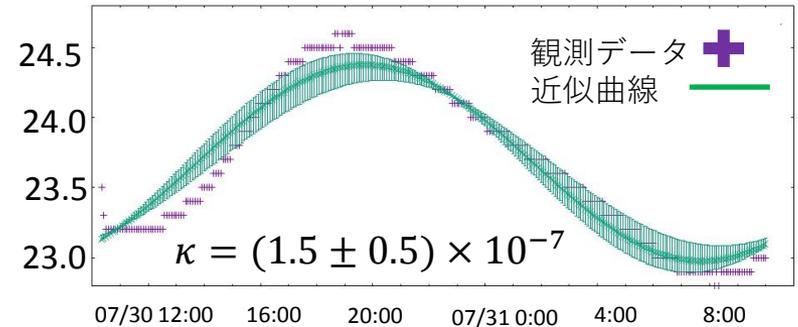
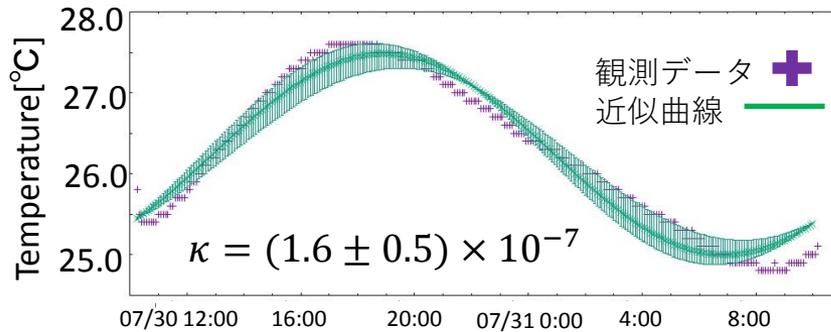
解析一周期的変動 ～1日周期フィッティング

A地点(日なた)

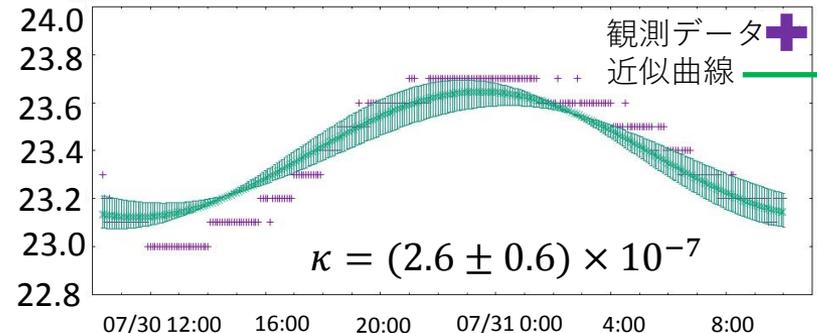
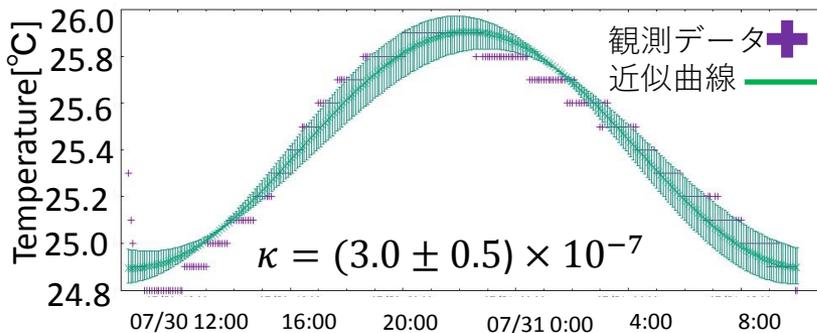
B地点(日陰)

κ の単位は[m²/s]

10-15cm



10-25cm



時刻

時刻

1次元熱拡散方程式の周期的解

1次元熱拡散方程式

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}$$

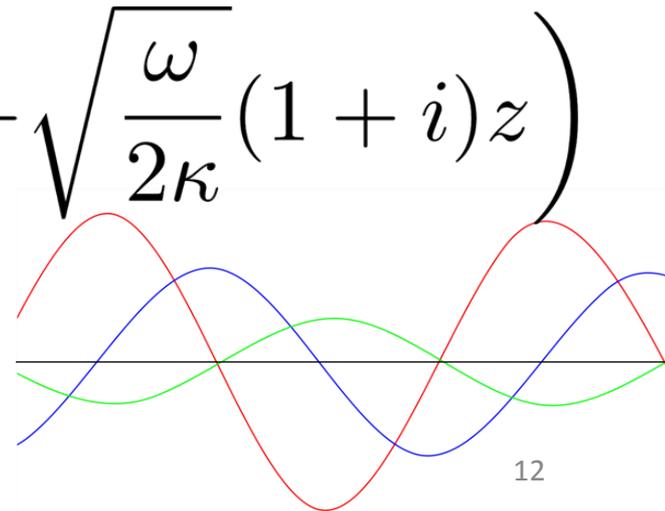
Fourier変換

$$i\omega T(z, \omega) = \kappa \frac{\partial^2 T(z, \omega)}{\partial z^2}$$

⇒境界条件下での一般解

$$T(z, \omega) = T(z=0, \omega) \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}(1+i)z\right)$$

振幅の指数関数的減衰, 位相のズレ



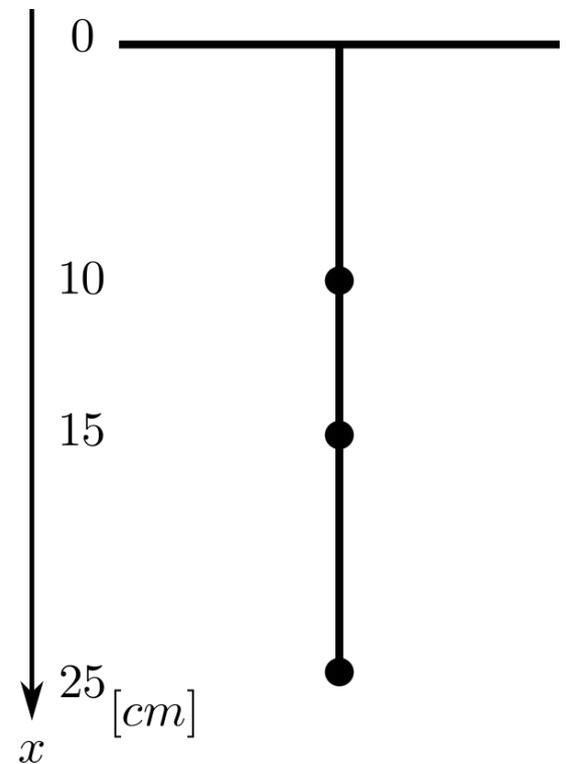
Fourier変換による解析 (1)

$$T(z, \omega) = T(z = 0, \omega) \exp \left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} (1 + i) z \right)$$

観測された温度データ ($\Delta t = 300[s]$,
 $N_T = 287$) をFFT
スペクトルの割り算, 対数を取る.

実部は振幅比, 虚部は位相のズレを示す.

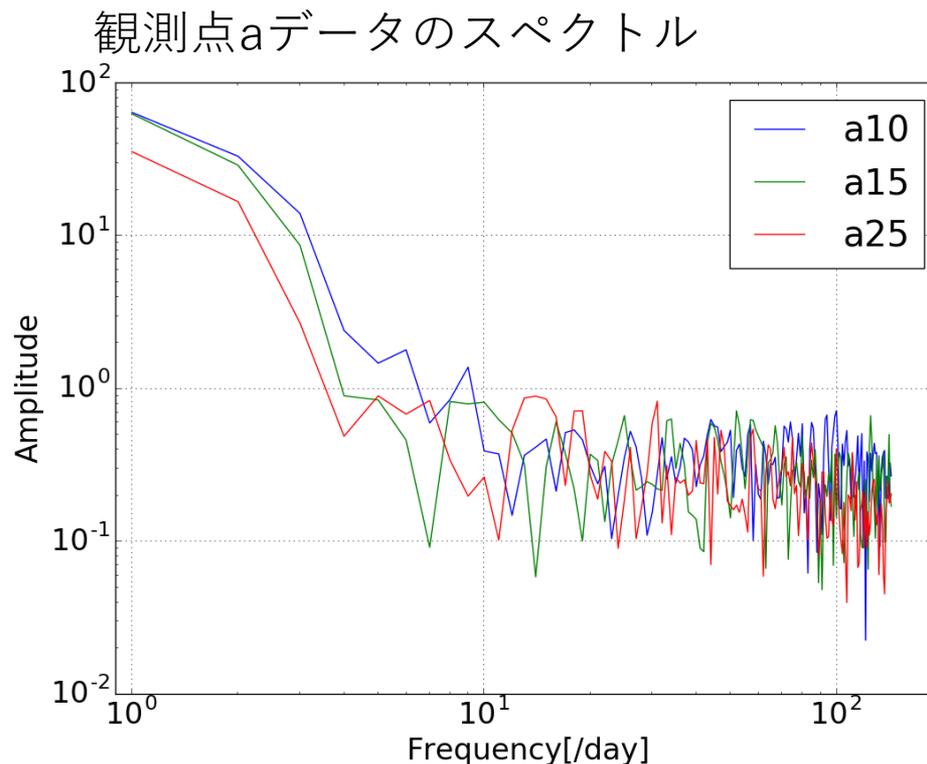
周波数 ω , 深さ z が既知なので熱拡散率
 κ が求められる



$$\ln \left(\frac{T(z_1, \omega)}{T(z_0, \omega)} \right) = -\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} (1 + i) (z_1 - z_0)$$

Fourier変換による解析 (2)

周期 $T \sim 1$ [day]以外の成分はノイズレベル
周波数 $f < 3$ [/day]のときだけを見る.

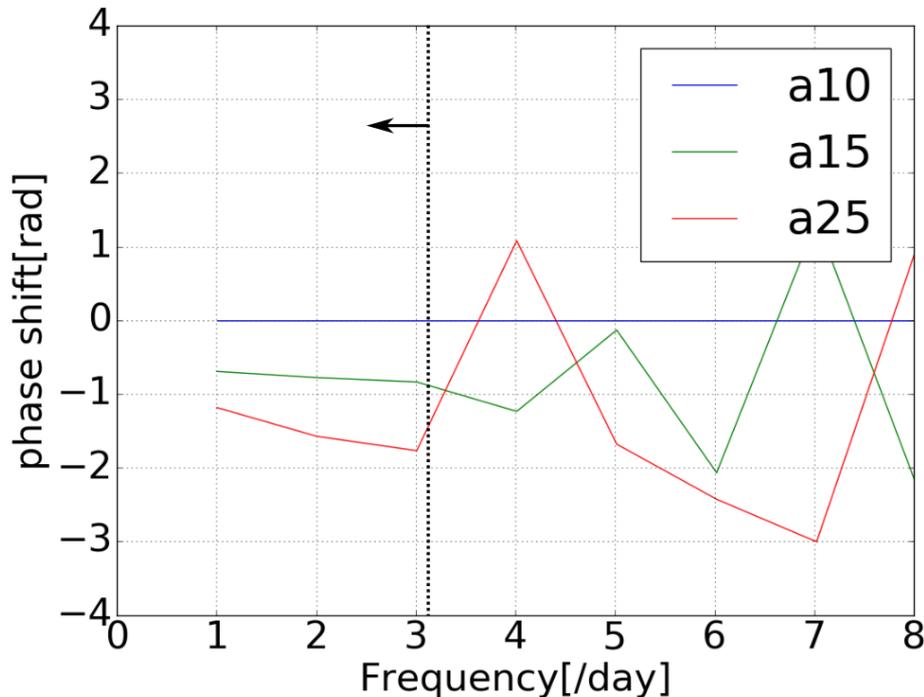


Fourier変換による解析 (3)

位相のずれから κ の値を推定する.

$$\arg \left(\frac{T(z_0, \omega)}{T(z_1, \omega)} \right) = -\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} (z_1 - z_0)$$

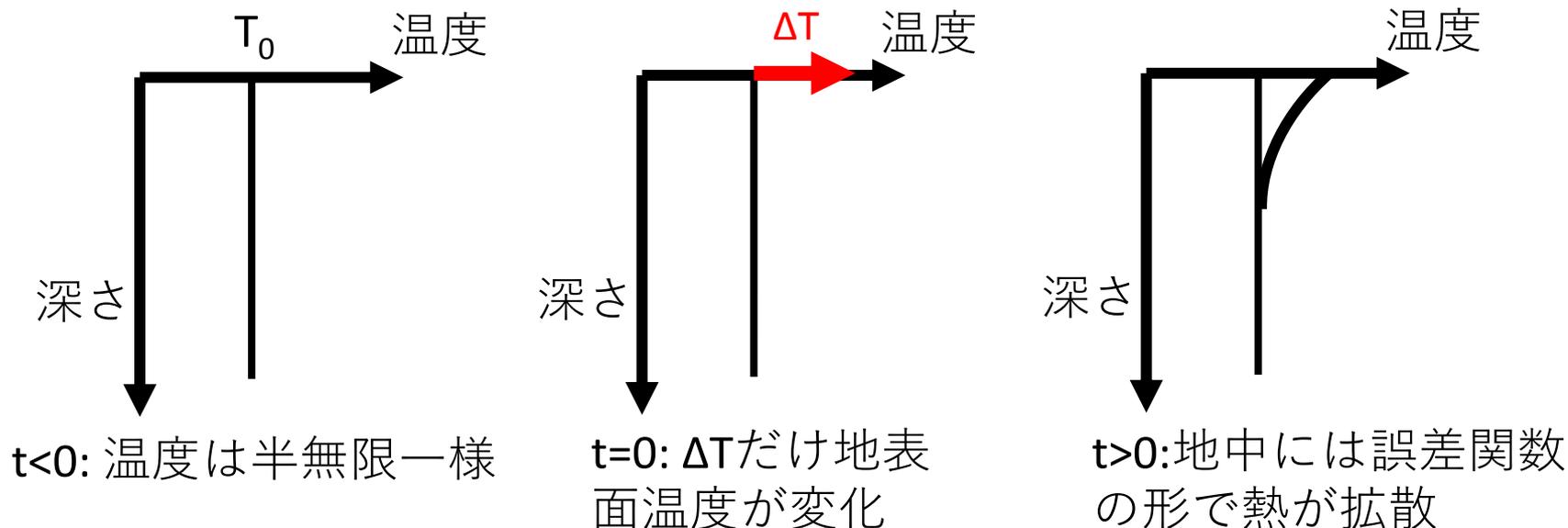
データa10からのa15,a25の位相のずれ



[$\times 10^{-7}$ m ² /s]	観測点a	観測点b
10-15[cm]	2.9 \pm 1.0	7.1 \pm 1.1
10-25[cm]	6.8 \pm 1.0	7.2 \pm 0.6

ステップ的変動の場合

- 地表面温度変動をステップ状の温度変化と捉える



κ : 熱拡散率 [m^2/s]

ΔT : 地表面温度変動 [K]

$$T(z, t) = \Delta T \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \right)$$

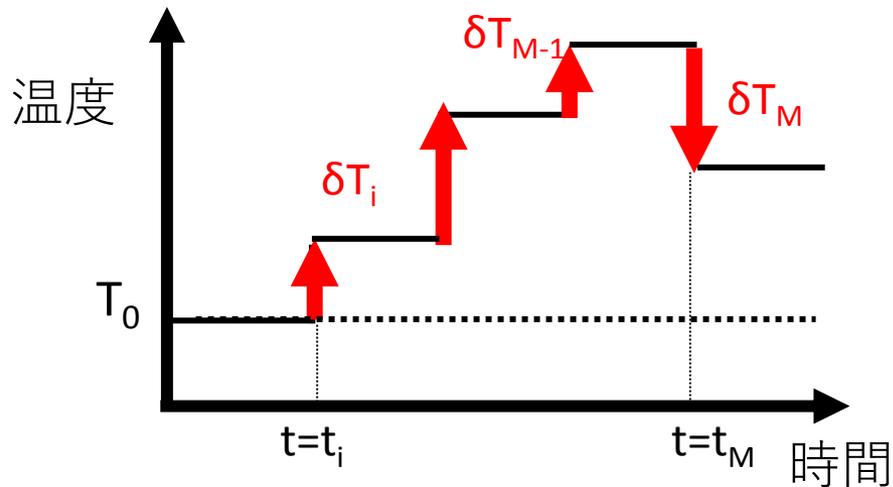
相補誤差関数:

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-\eta^2} d\eta$$

地表面での温度の擾乱は、経過時間の平方根に依存して深さ方向に伝わる

実際の解析では

- 5分ごとに地表面温度がステップ変動したと仮定



1. 深さ 10 cm の温度時系列データを用いて, ΔT を決める.
2. 深さ 15 cm, 25 cm について, 熱拡散率 κ を変えながら擾乱項を計算する.
3. 最も実測値と近い熱拡散率 κ を求める.

現在時刻 t_M での深さ z における温度は,

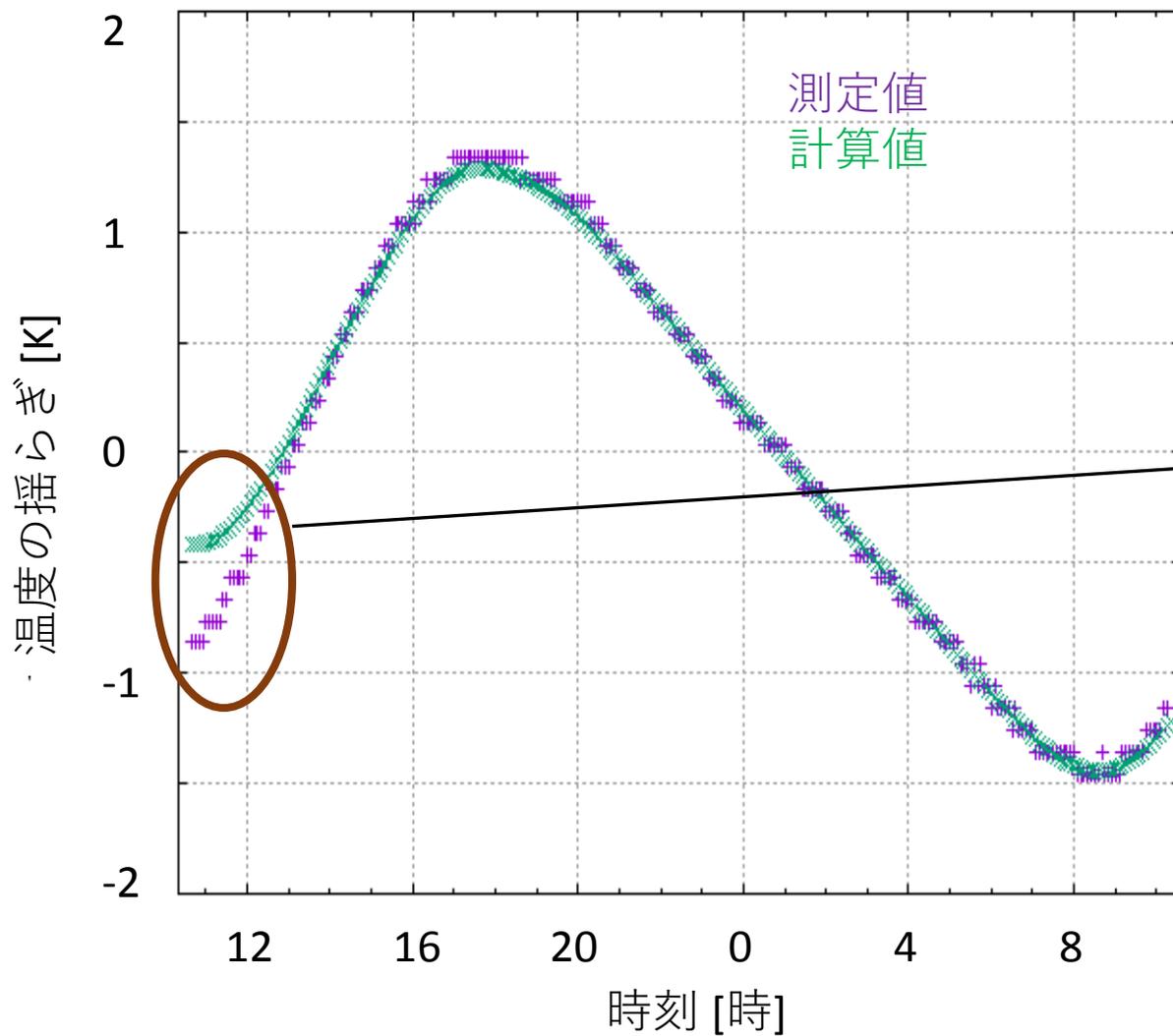
$$T(z, t = t_M) = T_0 + G \cdot z$$

$$+ \sum_{i=1}^M \Delta T_i \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_M - t_{i-1})}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa(t_M - t_i)}} \right) \right]$$

G : 温度勾配[K/m]

$$\Delta T_i = \delta T_i + \delta T_{i-1} + \dots + \delta T_1$$

ステップ関数～解析～

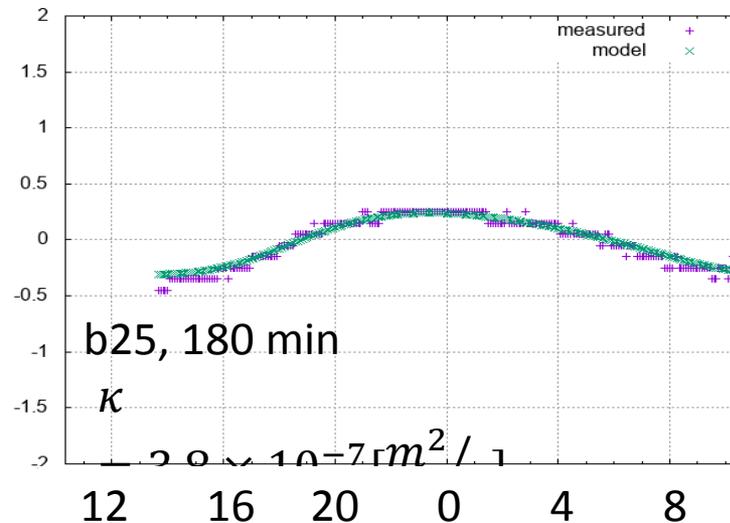
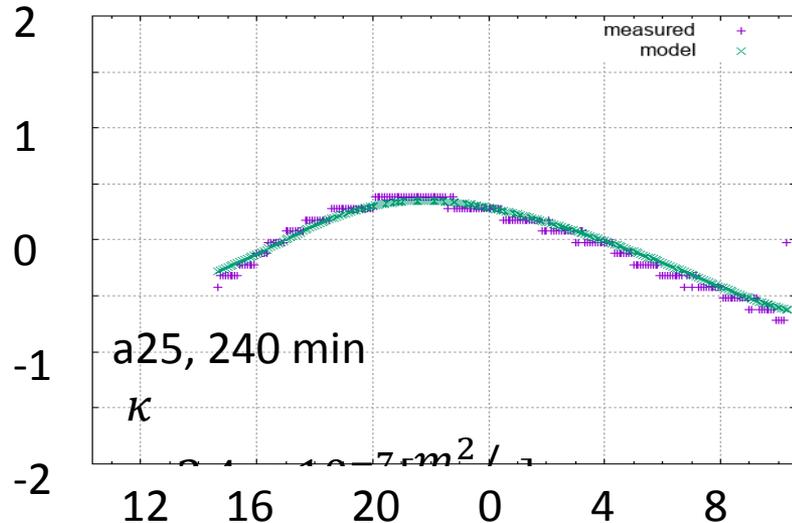
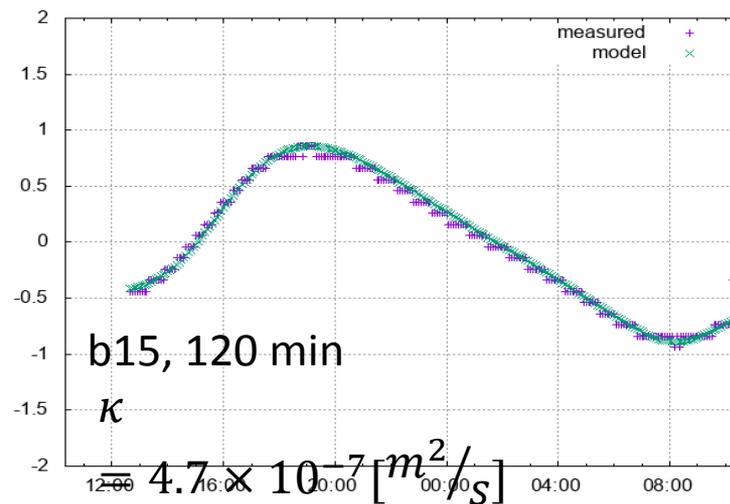
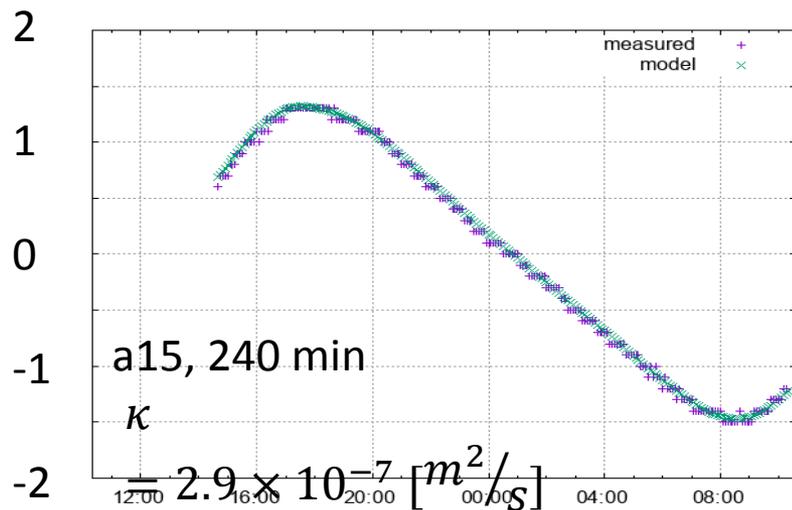


観測前の温度変化による影響で、観測開始直後は計算値と測定値がずれる。

ステップ関数～解析～

測定値
計算値

温度の揺らぎ [K]



時刻 [時]

熱拡散率の比較

- 1日周期
- フーリエ変換
- ステップ関数

観測点 \ 深さ	a	b
15[cm]	$(1.6 \pm 0.5) \times 10^{-7}$ $(2.9 \pm 1.0) \times 10^{-7}$ $(2.9 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	$(1.5 \pm 0.5) \times 10^{-7}$ $(7.1 \pm 1.1) \times 10^{-7}$ $(4.7 \pm 0.1) \times 10^{-7}$
25[cm]	$(3.0 \pm 0.5) \times 10^{-7}$ $(6.8 \pm 1.0) \times 10^{-7}$ $(3.4 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	$(2.6 \pm 0.6) \times 10^{-7}$ $(7.2 \pm 0.6) \times 10^{-7}$ $(3.8 \pm 0.1) \times 10^{-7}$

m²/s

- オーダーで一致, おおよそ $2-7 \times 10^{-7}$ [m²/s]

考察

1. 場所によって熱拡散率の推定量がばらつく

熱拡散率が空間的に一様ではない
空隙率, 組成, 含水量, 植生, etc...

2. 手法による熱拡散率の推定量が異なる

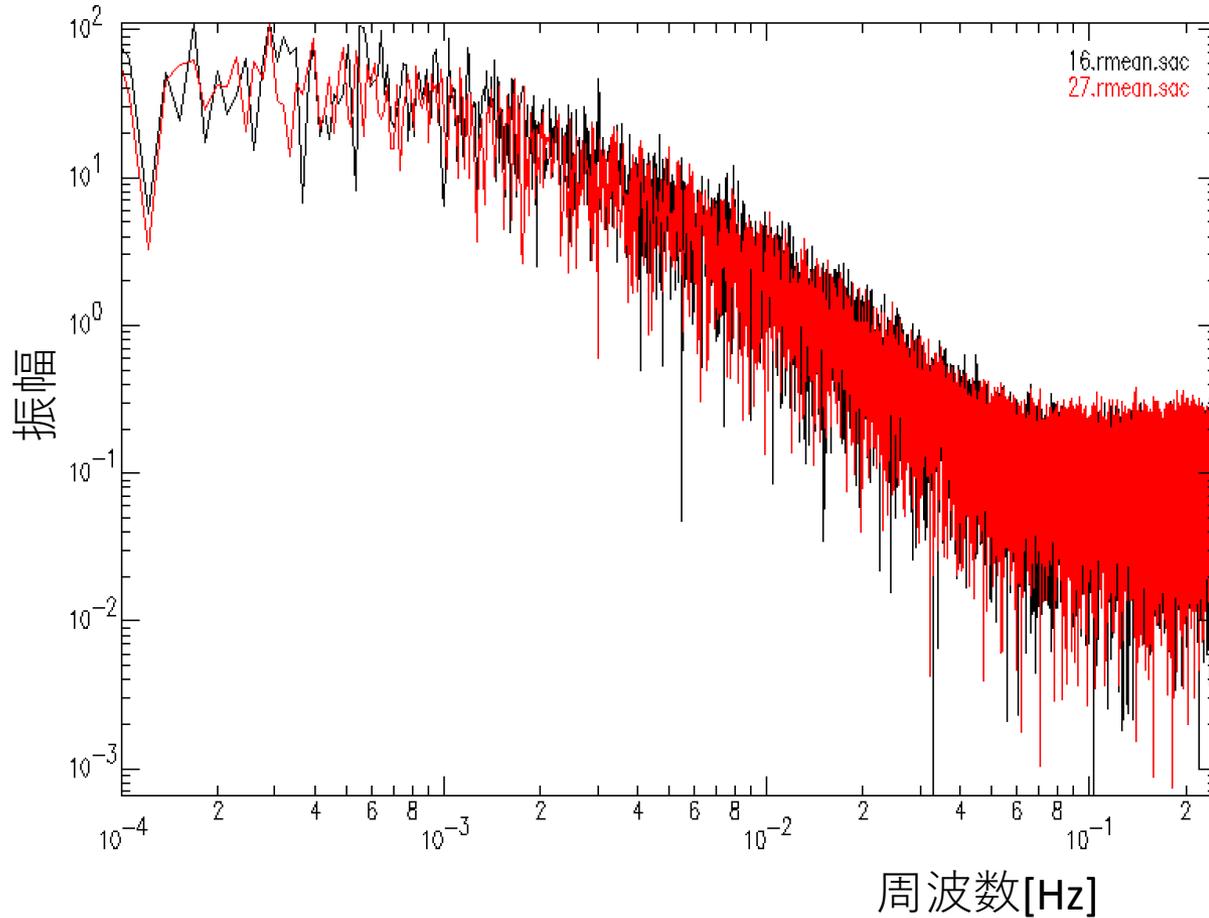
熱拡散率が一様ではないのに一様と仮定した
温度の分解能が0.1 Kしかなく, 量子化誤差が生じている
1日周期以外の周期を無視している
卓越周期に対して観測時間が短かった
窓関数の影響

実習で学んだこと

野外の観測における, 機器への配慮
機器の回収まで含めた観測の計画を立てる重要性



井戸内温度変動の振幅スペクトル



黒: 18.6[m]

赤: 29.6[m]

