

# #SATI-3SX を用いた $C_T^2$ 測定実験

沖田博文

2012/4/23

## 1 Abstract

「JARE54 で持ちこむ超音波風速計の開発レポート」(沖田博文、2012/2/3、2012/2/20 改訂) で示した方法で#SATI-3SX を用いた風速、温度、 $C_T^2$  の測定実験を行った。物理 A 棟屋上において 2012 年 2 月 20 日(月)~3 月 6 日(火)、北青葉山憩いの森公園において 3 月 16 日(金)~29 日(木)の期間測定を実施した。測定の結果雨や雪と考えられる気象条件の場合を除き、約 2 週間に渡って風速、温度、 $C_T^2$  を正しく測定し続けることができ、今回開発した超音波風速計による  $C_T^2$  の測定システムは十分に安定して動作する事がわかった。また物理 A 棟屋上では風が強いときにローカルな乱流が発生し  $C_T^2$  の値が大きくなる傾向が見られた。さらに今回の測定から測定可能な  $C_T^2$  の下限値は  $C_T^2|_{min} \sim 0.0025 \times V^{-2/3}$  程度であり、平均風速 5.8[m/s] のドームふじ基地では  $C_T^2|_{min} \sim 0.0008 [K^2 m^{-2/3}]$  程度となることがわかった。南極での接地境界層における  $C_T^2$  は 0.01~0.001 [ $K^2 m^{-2/3}$ ] 程度と予想されるため、#SATI-3SX を用いた  $C_T^2$  の測定では若干精度が不足する可能性があることがわかった。

## 2 $C_T^2$ の定義と超音波風速計での測定原理

$C_T^2$  は温度構造定数のことで以下で定義される。

$$C_T^2 \equiv \frac{\langle |T(x+r) - T(x)|^2 \rangle}{r^{2/3}} \quad (1)$$

ここで時刻  $t_i$  に観測した風速を  $V_i$ 、温度を  $T_i$  として Taylor's Hypothesis を仮定すると

$$C_T^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \frac{|T_i - T_{i-1}|^2}{\{(t_i - t_{i-1}) \times (V_i + V_{i-1})/2\}^{2/3}} \quad (2)$$

と書きなおすことができる。よって適当な頻度・回数で風速と温度を測定することで  $C_T^2$  が計算できる。Taylor's Hypothesis が良く成り立つためには頻度つまり測定周波数を大きくすればよい。なおここで測定期間中に風速が一定値  $V$  であれば  $C_T^2$  は風速  $V$  の  $-2/3$  乗に比例する。

$$C_T^2 \propto V^{-2/3} \quad (3)$$

### 3 超音波風速計 #SATI-3SX

風速、温度、 $C_T^2$  を測定するため超音波風速計を用いてサンプリング周波数 200Hz、読み出し周波数 20Hz で三次元の風速と温度を測定し RS232C を介したシリアル通信で Linux PC にデータを転送し記録・解析を行った。超音波風速計は Applied Technologies, Inc. #SATI-3SX を用いた。超音波風速計の設定・ソフトウェア・手順については「JARE54 で持ちこむ超音波風速計の開発レポート」(沖田博文、2012/2/3、2012/2/20 改訂) の通りとした。ちなみに #SATI-3SX の測定精度は上記のレポートより風速  $\Delta V \sim \pm 0.0142$ [m/s]、温度  $\Delta T \sim \pm 0.0160$ [°C] である。

### 4 測定方法

「JARE54 で持ちこむ超音波風速計の開発レポート」(沖田博文、2012/2/3、2012/2/20 改訂) と同様の設定・手順で測定を行った。#SATI-3SX は地上から約 2m となるよう三脚に固定し測定を行った。測定に使用した Linux PC は物理 A 棟屋上の時は Ubuntu 11.04 (Let's note CF-W7)、北青葉山憩いの森公園の時には Vine 4.2 (hp Compaq 6710b) である。PC は #SATI-3SX の電源と共に防水のためプラスチック製の箱に入れガムテープで目張りをした。図 1 は物理 A 棟屋上、図 2 は北青葉山憩いの森公園での実験風景である。



図 1 物理 A 棟屋上での観測風景



図 2 北青葉山憩いの森公園での観測風景

## 5 測定

### 5.1 物理 A 棟屋上

2012年2月20日(月)13:04JST から測定を開始した。測定中に  $C_T^2$  を計算するソフト ct2.c に  $V_{med}$  が正しく計算されないミスを発見したため2月22日(水)12:56JST 頃に再コンパイルを実行した。再コンパイル後も観測を続行し、測定は3月6日(火)23:13JST まで実施した。

### 5.2 北青葉山憩いの森公園

2012年3月16日(金)17:25JST から北青葉山憩いの森公園の芝生の上にて測定を開始した。測定は3月16日(金)17:25JST から3月29日(木)12:31JST まで実施した。

## 6 測定結果

### 6.1 物理 A 棟屋上

物理 A 棟屋上での測定結果を図3に示す。横軸は2月20日(月)00:00JST からの経過日数を表し縦軸は上から  $C_T^2$  [ $K^2m^{-2/3}$ ]、風速の median [m/s]、温度の median [ $^{\circ}C$ ]、 $C_T^2$  の計算で用いた測定回数を表す。測定は20Hzで30秒間(つまり600回)行い、温度の測定値と温度の median の差が  $1[^{\circ}C]$  より大きい時の測定は正しくない(ノイズがのっている)と見なして  $C_T^2$  の計算から除外した。

なお前章で述べたとおり2月22日(水)12:56JST 頃(図3では横軸で2.54付近)に再コンパイルを実行するまで風速が正しく計算されておらず、結果として  $C_T^2$  も正しく計算されていない。(温度は正しい。)2月22日(水)12:56JST 以降は風速、温度、 $C_T^2$ 、共に正しく計算されている。

### 6.2 北青葉山憩いの森公園

北青葉山憩いの森公園での測定結果を図4に示す。横軸は3月16日(金)00:00JST からの経過日数を表し縦軸は上から  $C_T^2$  [ $K^2m^{-2/3}$ ]、風速の median [m/s]、温度の median [ $^{\circ}C$ ]、 $C_T^2$  の計算で用いた測定回数を表す。測定については物理 A 棟屋上の場合と同様である。

## 7 考察

### 7.1 測定の安定性について

図3、図4から、物理 A 棟屋上、北青葉山憩いの森公園の2ヶ所でそれぞれ約2週間の連続観測を実施したが、雨や雪と考えられる気象条件の場合を除き約2週間に渡って風速、温度、 $C_T^2$  を正しく測定し続けることができた。よって今回開発した超音波風速計による  $C_T^2$  の測定システムは十分に安定して動作する事がわかった。

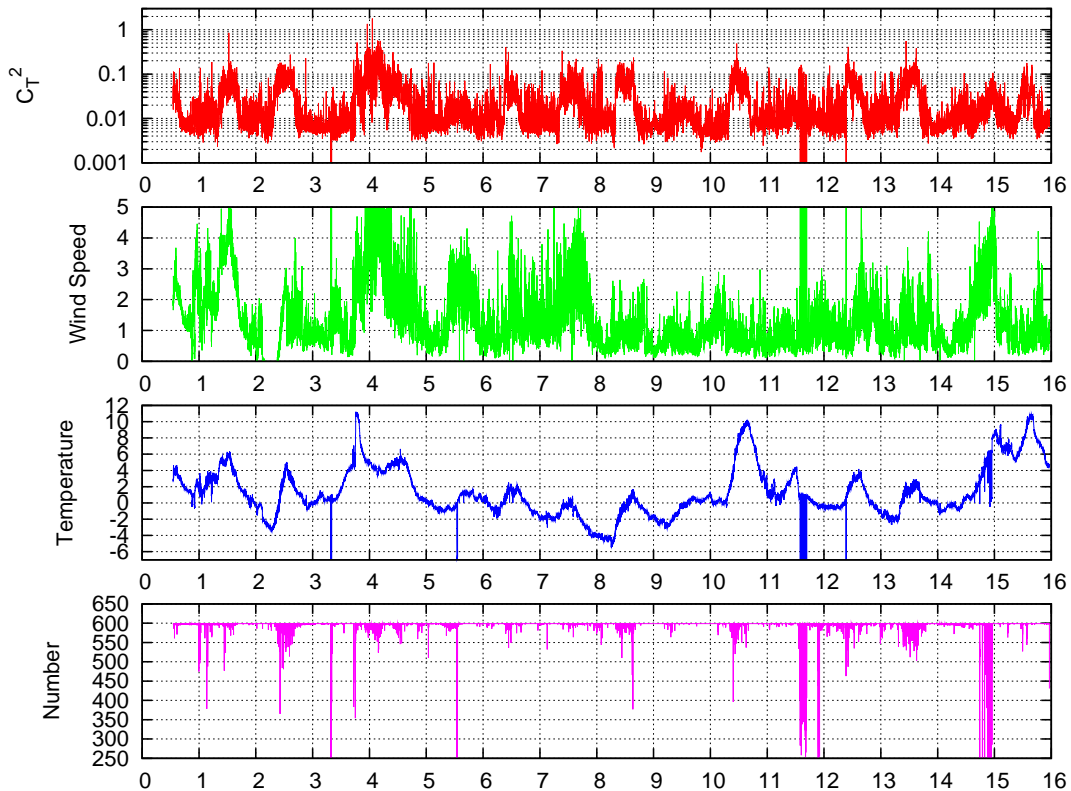


図3 物理 A 棟屋上での測定結果。横軸は2月20日(月)00:00JSTからの経過日数を表し縦軸は上から  $C_T^2$  [ $K^2 m^{-2/3}$ ]、風速の median [m/s]、温度の median [ $^{\circ}C$ ]、 $C_T^2$  の計算で用いた測定回数を表す。測定は20Hzで30秒間(つまり600回)行い、温度の測定値と温度の median の差が  $1^{\circ}C$  より大きい時の測定は正しくない(ノイズがのっている)と見なして  $C_T^2$  の計算から除外した。

## 7.2 $C_T^2$ と風速、温度、測定回数の相関について

$C_T^2$  と風速、温度、測定回数に相関があるかどうか、それぞれの測定毎に調べた。図5は縦軸を  $C_T^2$  [ $K^2 m^{-2/3}$ ]、横軸をそれぞれ左から風速の median [m/s]、温度の median [ $^{\circ}C$ ]、 $C_T^2$  の計算で用いた測定回数としてプロットしたものである。図5上段は物理 A 棟屋上での測定結果を表し、図5下段は北青葉山憩いの森公園での測定結果を表す。また  $C_T^2$  と風速の median の相関図に示した紫線、青線はそれぞれ  $C_T^2 = 0.27 \times V^{-2/3}$ 、 $C_T^2 = 0.0025 \times V^{-2/3}$  を意味する。これらの曲線については次節で考察する。

図5中図、右図より、 $C_T^2$  と温度、 $C_T^2$  と測定回数にはそれぞれの測定共に相関が無いことがわかった。 $C_T^2$  と温度や  $C_T^2$  と測定回数には式(2)から元々相関は無く、今回の測定が正しく行えたことを意味する。

図5左上図より、 $C_T^2$  と風速の median の相関について物理 A 棟屋上での測定では風速が大きいときほど  $C_T^2$  の値が大きくなる傾向が見られる。しかしこの傾向は図5左下図の北青葉山憩いの森公園での測定では見られない。ここから、物理 A 棟屋上では風が強いときにローカルな乱流が発生し、その結果  $C_T^2$  の値が大きくなると考えられる。

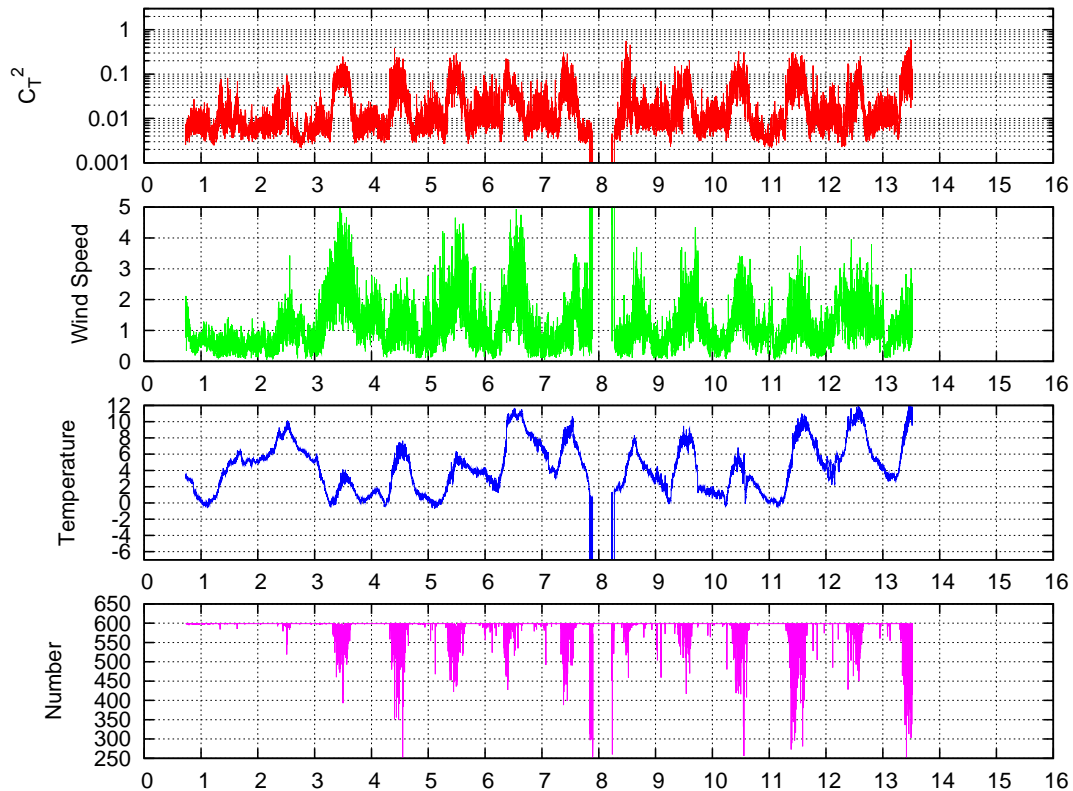


図4 北青葉山憩いの森公園での測定結果。横軸は3月16日(金)00:00JSTからの経過日数を表し縦軸は上から  $C_T^2$  [ $K^2 m^{-2/3}$ ]、風速の median [m/s]、温度の median [ $^{\circ}C$ ]、 $C_T^2$  の計算で用いた測定回数を表す。測定は20Hzで30秒間(つまり600回)行い、温度の測定値と温度の median の差が  $1^{\circ}C$  より大きい時の測定は正しくない(ノイズがのっている)と見なして  $C_T^2$  の計算から除外した。

### 7.3 ドームふじで予想される測定可能な $C_T^2$ の下限値について

式(3)より測定期間中の風速が一定値  $V$  であれば  $C_T^2$  は風速  $V$  の  $-2/3$  乗に比例する。そこで図5左図の  $C_T^2$  と風速の median について考察するため、風速を一定と仮定したときの  $C_T^2$  の代表値を考える。図5左図の  $C_T^2$  と風速の median の相関図に示した紫線、青線はこの  $C_T^2$  の代表値であり、それぞれ  $C_T^2 = 0.27 \times V^{-2/3}$ 、 $C_T^2 = 0.0025 \times V^{-2/3}$  である。。ここで係数の0.27は「温度の測定値と温度の median の差が  $1^{\circ}C$  より大きいものはノイズと見なして  $C_T^2$  の計算から除外する」という計算に由来する  $C_T^2$  の上限値であり、係数0.0016は図5左下図から目測で求めた、今回の測定での  $C_T^2$  の下限値を意味する。

まず上限値について考える。物理A棟屋上での測定では風速が  $3[m/s]$  より強いとき上限値を超える傾向がみられる。これは風速が測定期間中一定であるという仮定が成り立っていない場合だと考えられる。物理A棟屋上では風が強い時に建物の配置や構造によって風が巻いて風速が大きく変化することで結果として  $C_T^2$  の値が大きくなるのかも知れない。逆に北青葉山憩いの森公園での測定の場合、 $C_T^2$  はほとんど上限値を超えていない。これは北青葉山憩いの森公園ではローカルな乱流が生じておらず、風速はほぼ一定であったことを意味するといえるだろう。

次に下限値について考える。超音波風速計に装置固有の誤差がなければ測定の下限値は存在しない。しかし

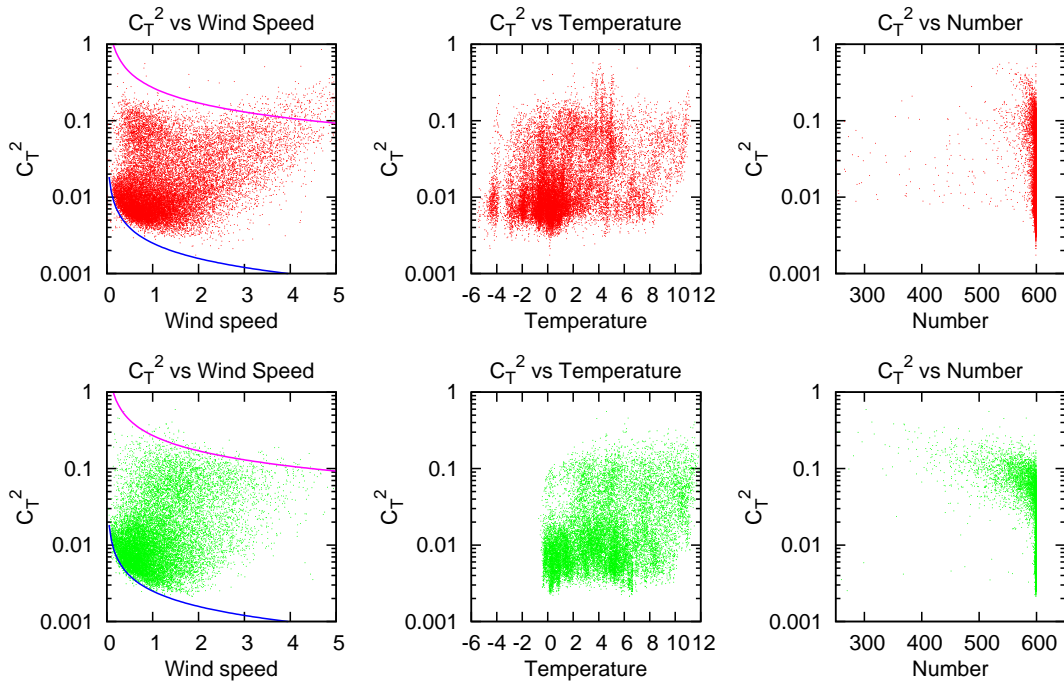


図5  $C_T^2$  と風速、温度、測定回数の相関図。縦軸を  $C_T^2$  [ $\text{K}^2\text{m}^{-2/3}$ ]、横軸をそれぞれ左から風速の median [m/s]、温度の median [ $^{\circ}\text{C}$ ]、 $C_T^2$  の計算で用いた測定回数としてプロットした。上段は物理 A 棟屋上での測定結果を表し、下段は北青葉山憩いの森公園での測定結果を示した。 $C_T^2$  と風速の median の相関図 (図左) の紫線、青線はそれぞれ  $C_T^2 = 0.27 \times V^{-2/3}$ 、 $C_T^2 = 0.0025 \times V^{-2/3}$  である。

図5左図より明らかなように  $C_T^2$  の測定値には下限値がみられる。そこで今回はこれら測定結果から目測で  $V^{-2/3}$  の係数を決め、これを超音波風速計#SATI-3SX の装置由来の測定誤差によるものとする。

ところで「JARE54 で持ちこむ超音波風速計の開発レポート」(沖田博文、2012/2/3、2012/2/20 改訂) から計算される  $C_T^2$  の下限値 (測定限界) は  $C_T^2 = 0.0016 \times V^{-2/3}$  であった。よって今回の測定で得られた  $C_T^2 = 0.0025 \times V^{-2/3}$  という値は実験室で予想されていた測定限界と同程度と言える。

最後に平均風速 5.8[m/s] のドームふじ基地での測定可能な  $C_T^2$  の下限値を見積もると、その値は  $C_T^2|_{min} \sim 0.0008[\text{K}^2\text{m}^{-2/3}]$  程度となる。南極での接地境界層における  $C_T^2$  は 0.01~0.001 [ $\text{K}^2\text{m}^{-2/3}$ ] 程度と予想されるため、#SATI-3SX を用いた  $C_T^2$  の測定では若干精度が不足する可能性があることがわかった。

## 8 まとめ

#SATI-3SX を用いた風速、温度、 $C_T^2$  の測定実験を行った。物理 A 棟屋上において 2012 年 2 月 20 日 (月) ~ 3 月 6 日 (火)、北青葉山憩いの森公園において 3 月 16 日 (金) ~ 29 日 (木) の期間に#SATI-3SX を用いた風速、温度、 $C_T^2$  の測定実験を行った。測定の結果今回開発した超音波風速計による  $C_T^2$  の測定システムは十分に安定して動作する事がわかった。また物理 A 棟屋上では風が強いときにローカルな乱流が発生し  $C_T^2$  の値が大きくなる傾向が見られた。さらに今回の測定から測定可能な  $C_T^2$  の下限値は  $C_T^2|_{min} \sim 0.0025 \times V^{-2/3}$  程度であり、平均風速 5.8[m/s] のドームふじ基地では  $C_T^2|_{min} \sim 0.0008[\text{K}^2\text{m}^{-2/3}]$  程度となり、#SATI-3SX を用いた  $C_T^2$  の測定は若干精度が不足する可能性があることが判明した。