

# 低雑音化を実現したプローブ・ブリッジ回路 一体型コンパクト熱線風速計

○高木 正平

稲澤 歩

浅井 雅人

合同会社Pantec

東京都立大学

東京都立大学

# 謝 辞

この度は、表題の技術に対して技術賞を頂き、受賞者一同この上なく光栄に思います。また、乱流遷移や乱流の実験研究に長年携わってきた者として、乱流計測の重要なツールであり続ける熱線風速計（以下CTAと書きます）の技術発展に光を当てていただいたことに感謝いたします。

今回、受賞内容について発表の機会を与えていただきありがとうございます。受賞者を代表して、高木が受賞技術について紹介いたします。

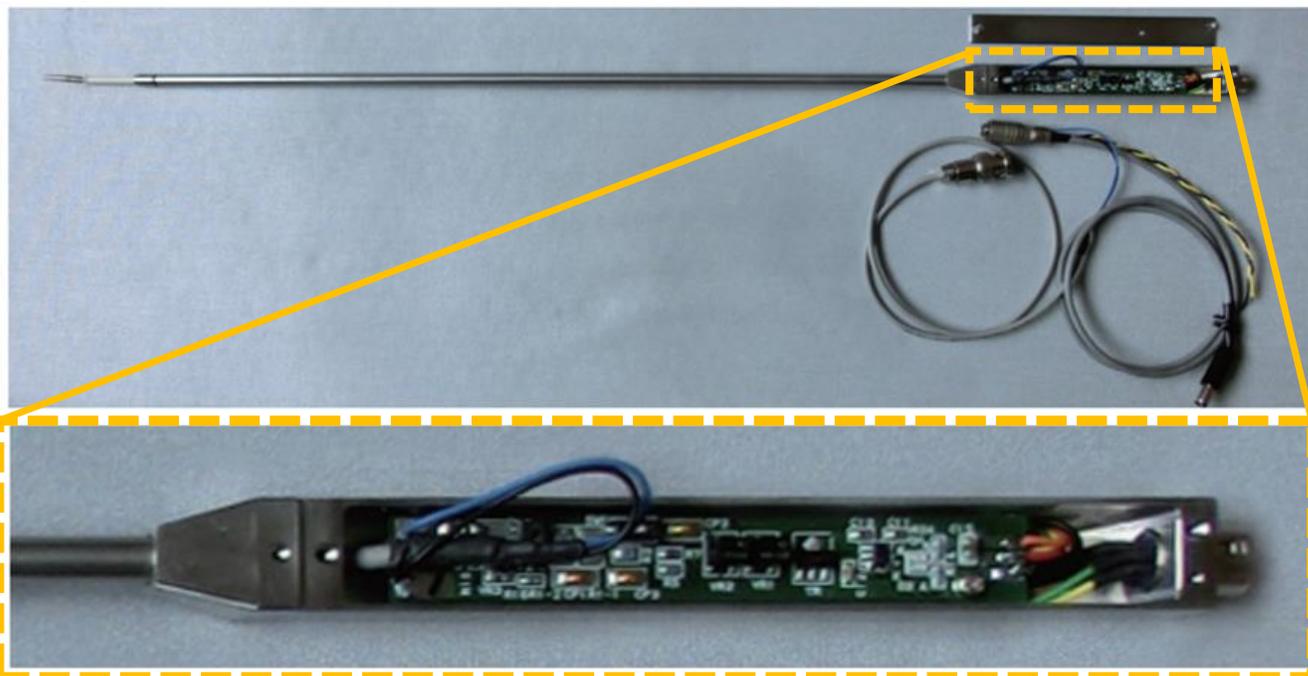
# 低雑音化を実現・商品化した熱線風速計 2種

## 1. TUBE型CTA



- ・回路は金属管(外径φ6)内に収納
- ・**実用計測を重視したロバスト設計**  
(基本的に回路調整は不要)

## 2. SLIM型CTA

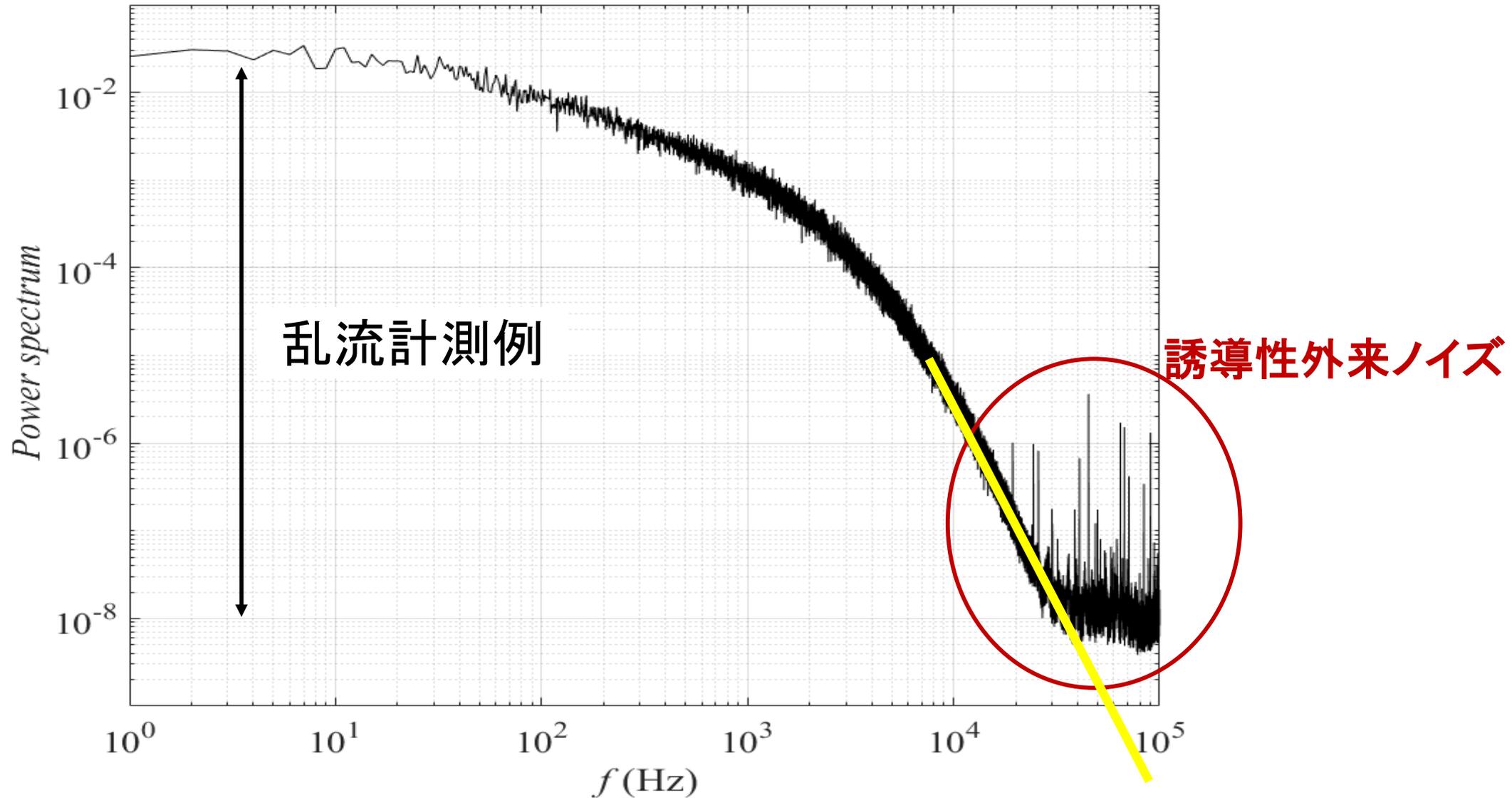


- ・回路は14mm角の金属箱に収納
- ・**流体研究用のフルスペック仕様**
- ・矩形波生成機能も搭載

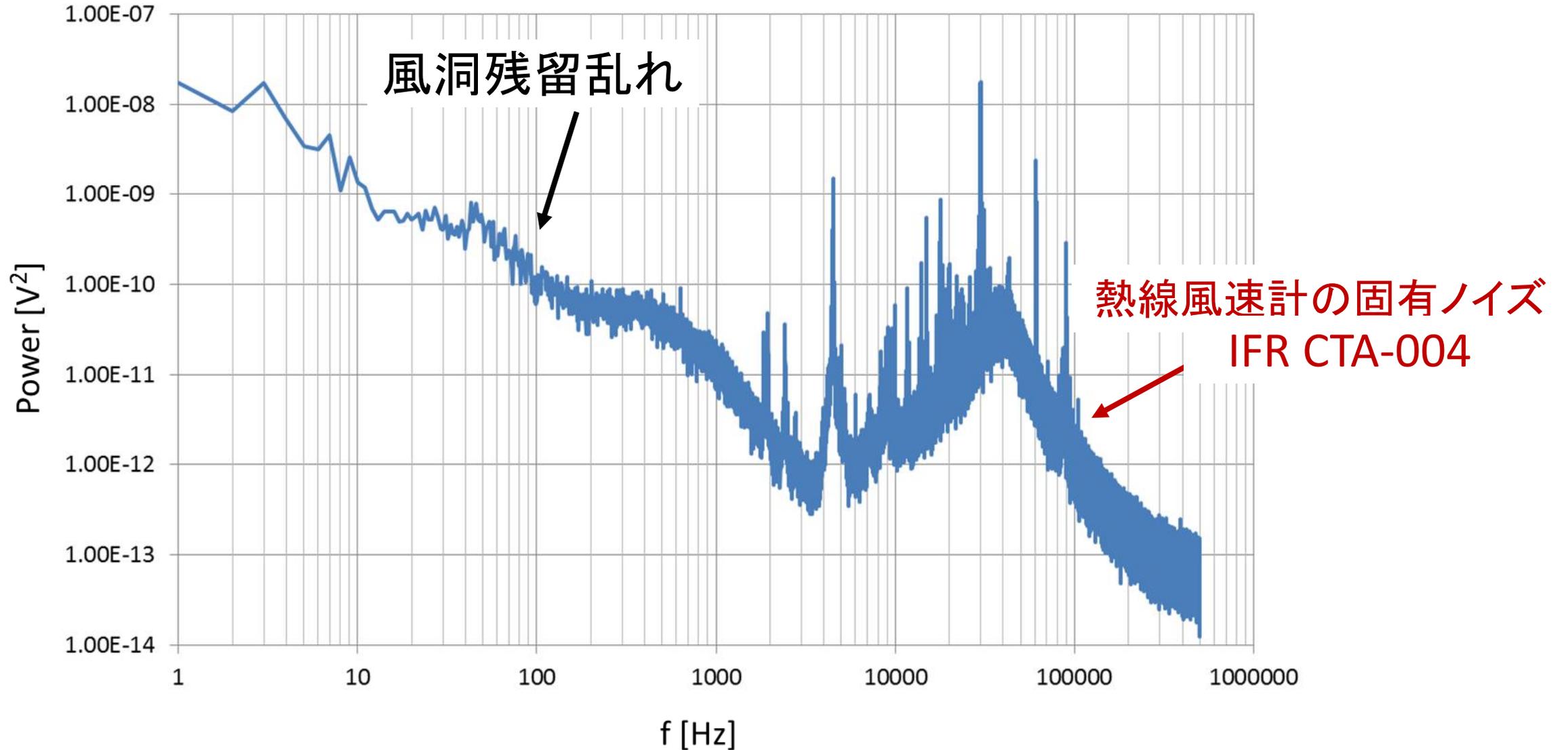
◎ いずれのCTAも単電源(5V)で動作  
→ 乾電池・充電電池を前提とした設計  
→ 商用電源のアース問題から解放

歴史ある従来型熱線風速計の問題点は何？

# 従来型CTAによる壁乱流の速度変動スペクトル ( $U_c = 22\text{m/s}$ , $Re_\tau \sim 3000$ )



# 従来型CTAによる風洞残留乱れ計測 ( $U = 30 \text{ m/s}$ )



# 本技術の背景と経緯

開発の動機:

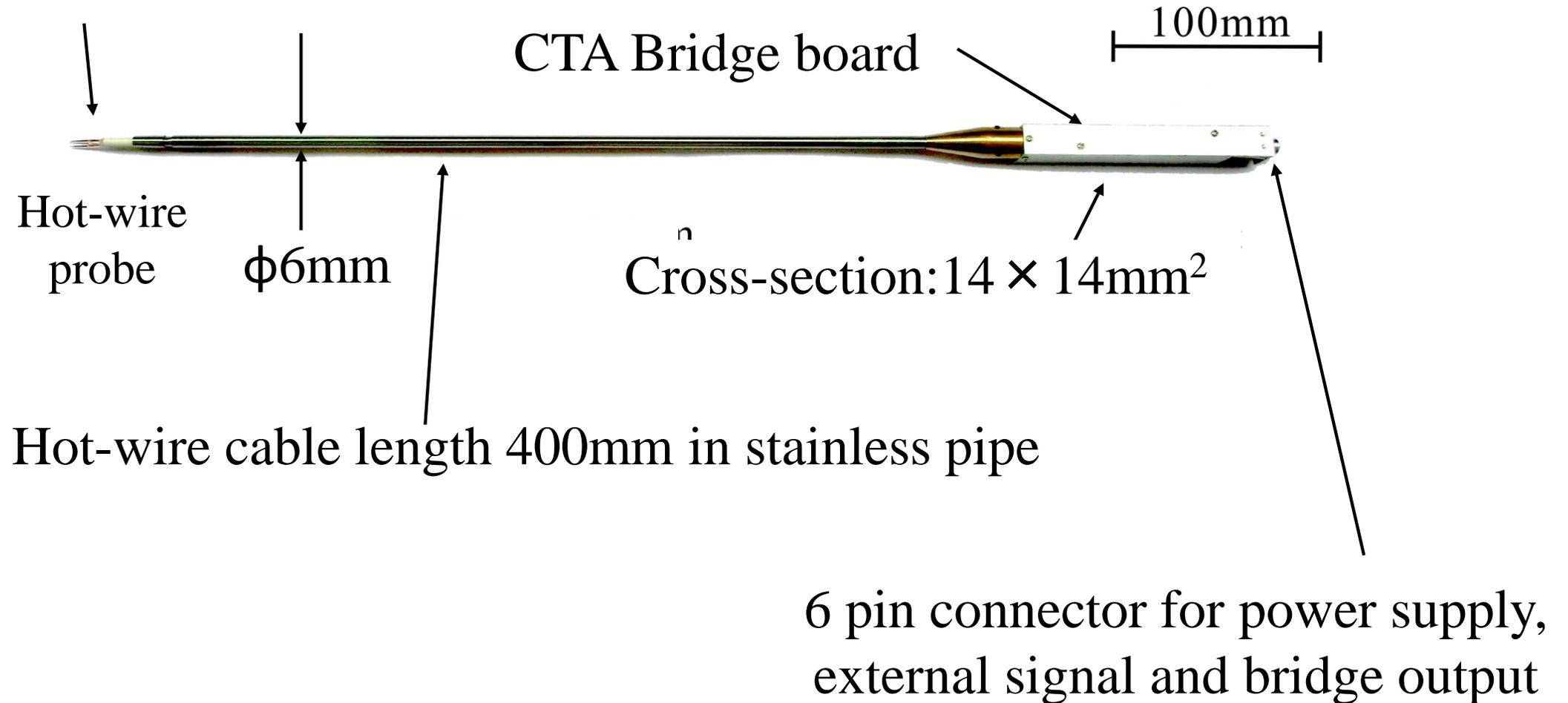
流れとは関係ない誘導性外来ノイズを排除したい  
(最高性能のS/N比が目標)

そのための対策:

電磁遮蔽  全回路を金属に収納

回路の超小型化   の小型化技術

# 新規開発した熱線プローブ・サポート・本体一体型CTA (SLIM型)



# 熱線風速計は風洞実験に欠かせない計測手段の1つ

利点： 高空間分解能＋高速応答

Joule熱と冷却の基礎を築いたのはKing(1914)

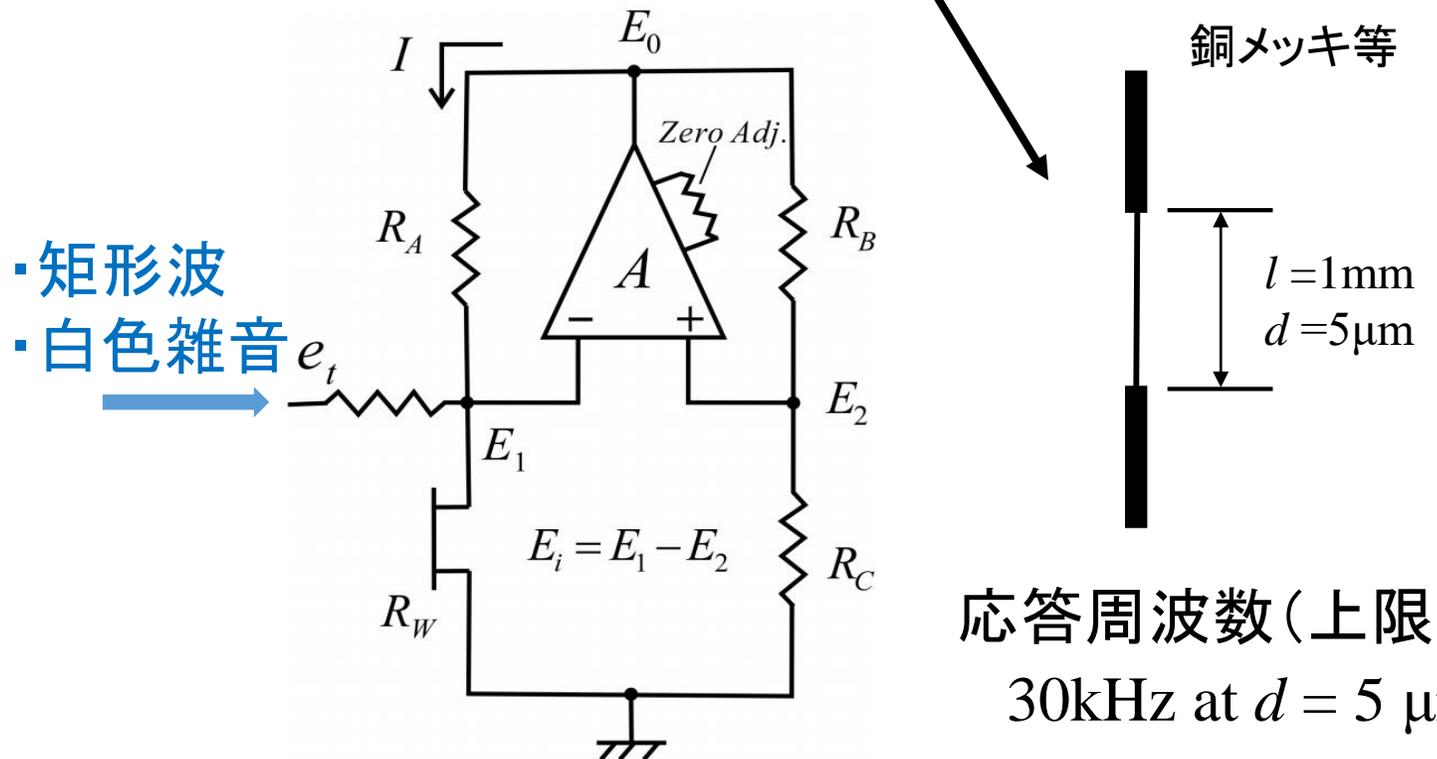
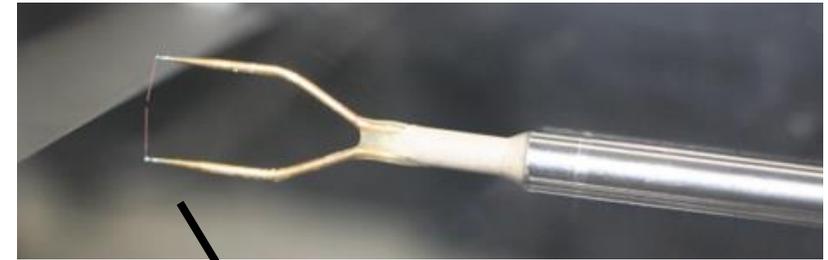
$$I^2 R_W = (A + B\sqrt{U}) \cdot (T_W - T_{air})$$

定温度(定抵抗)法の動作

$$R_W = R_r [1 + \alpha(T_W - T_r)]$$

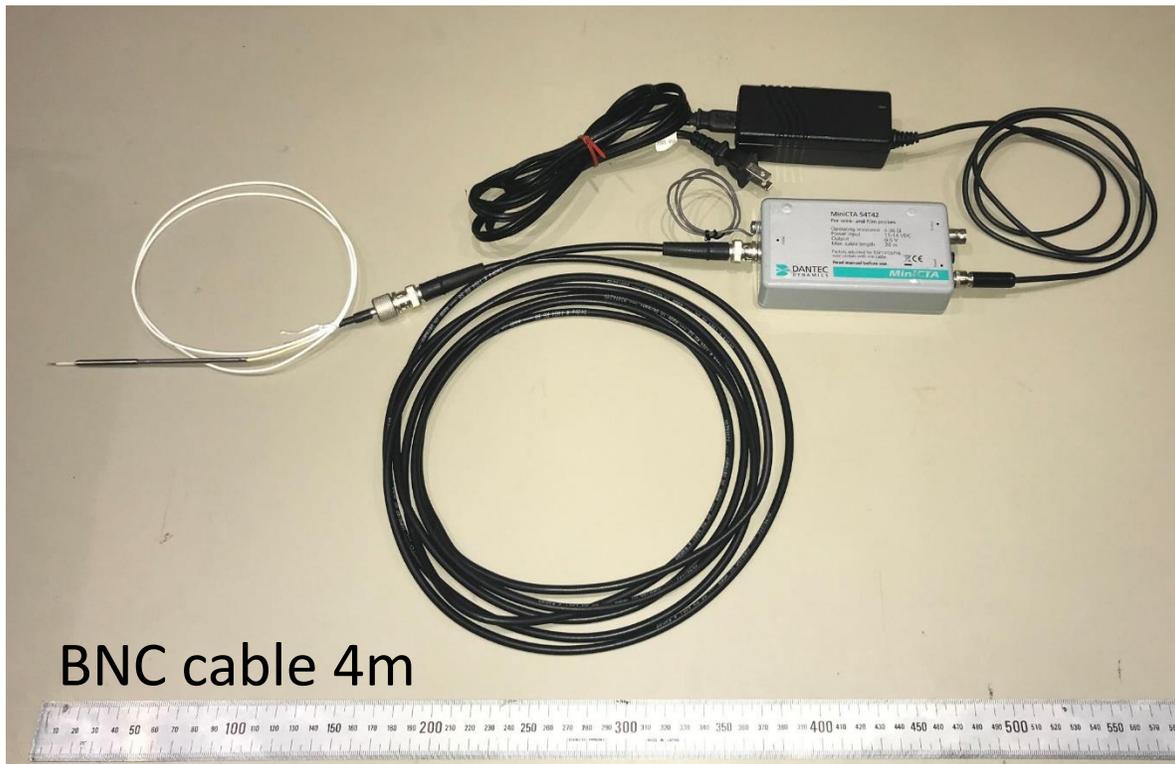
$$R_W, T_W, T_{air} = \text{constant}$$

$$\therefore E^2 = (IR_W)^2 \propto A + B\sqrt{U}$$

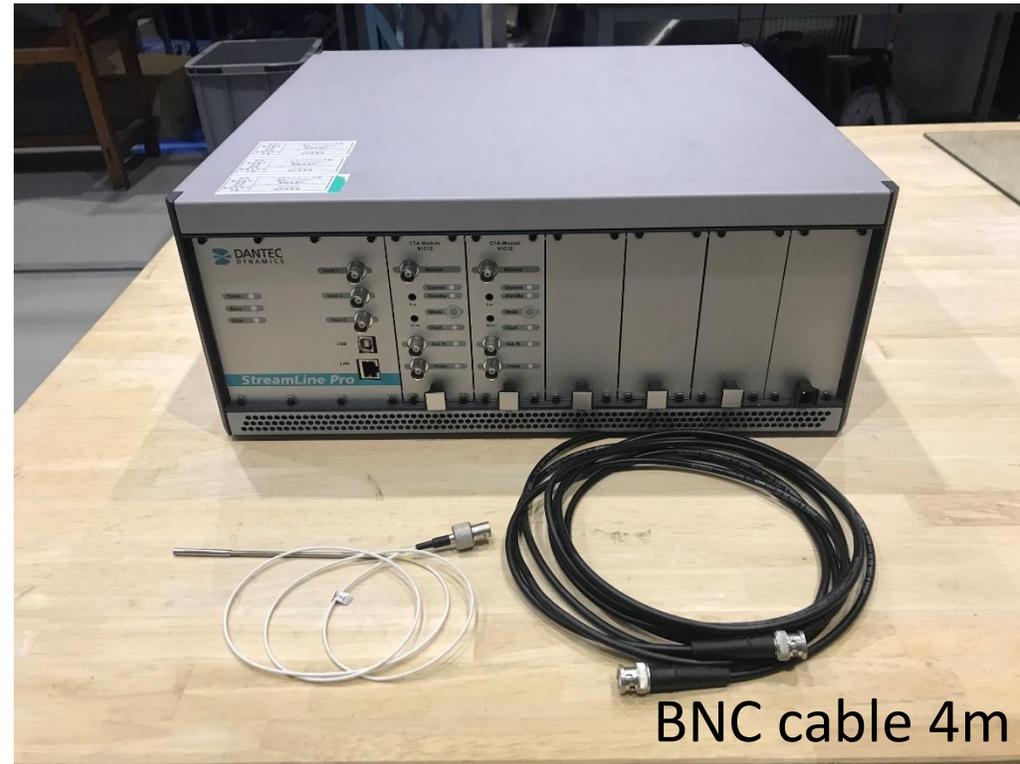


# 本技術と比較するCTA製品

## DANTEC社MiniCTA

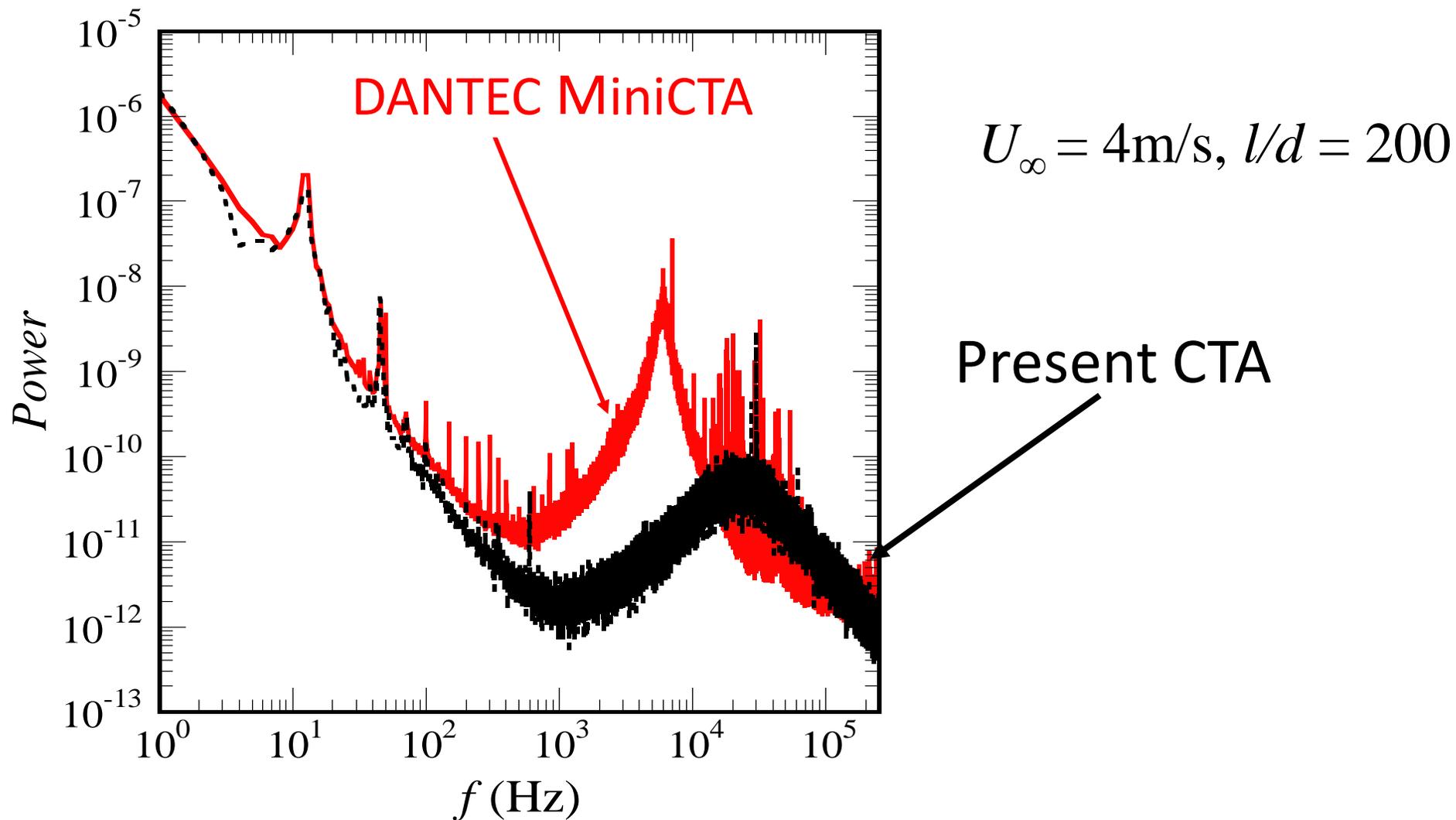


## DANTEC社 Streamline Pro



# 電気雑音の比較(1)

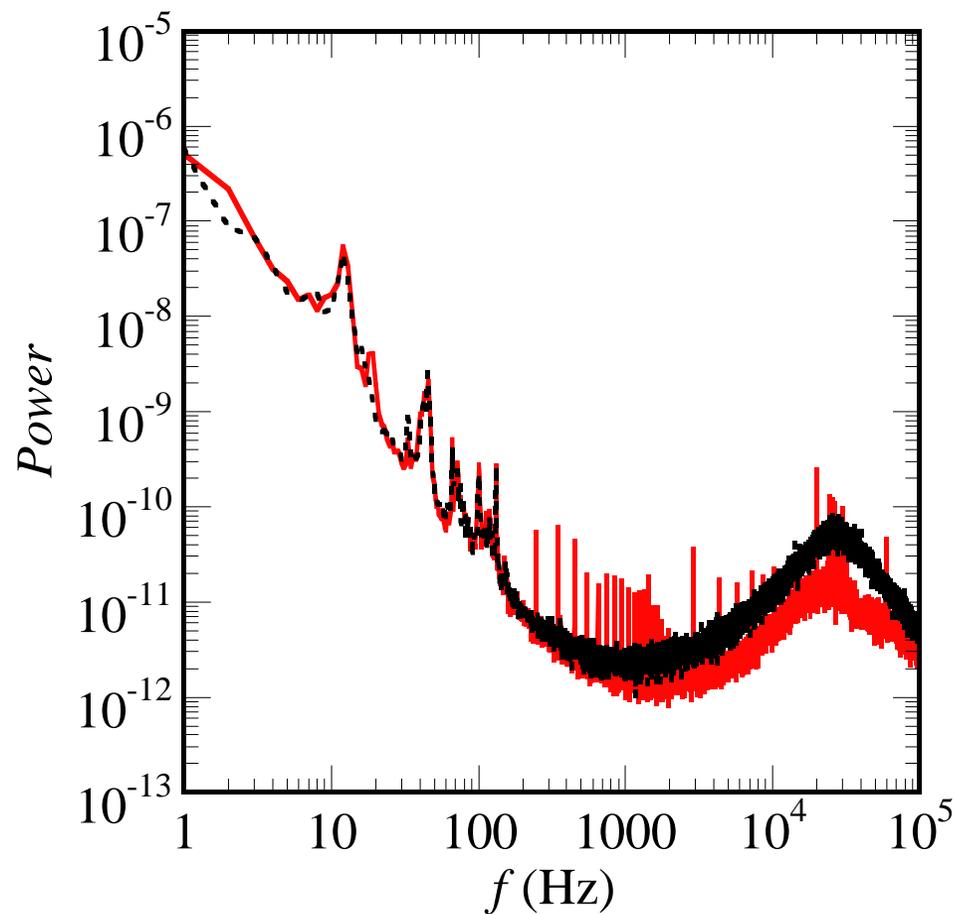
低乱風洞の残留乱れを計測



# 電気雑音の比較(2)

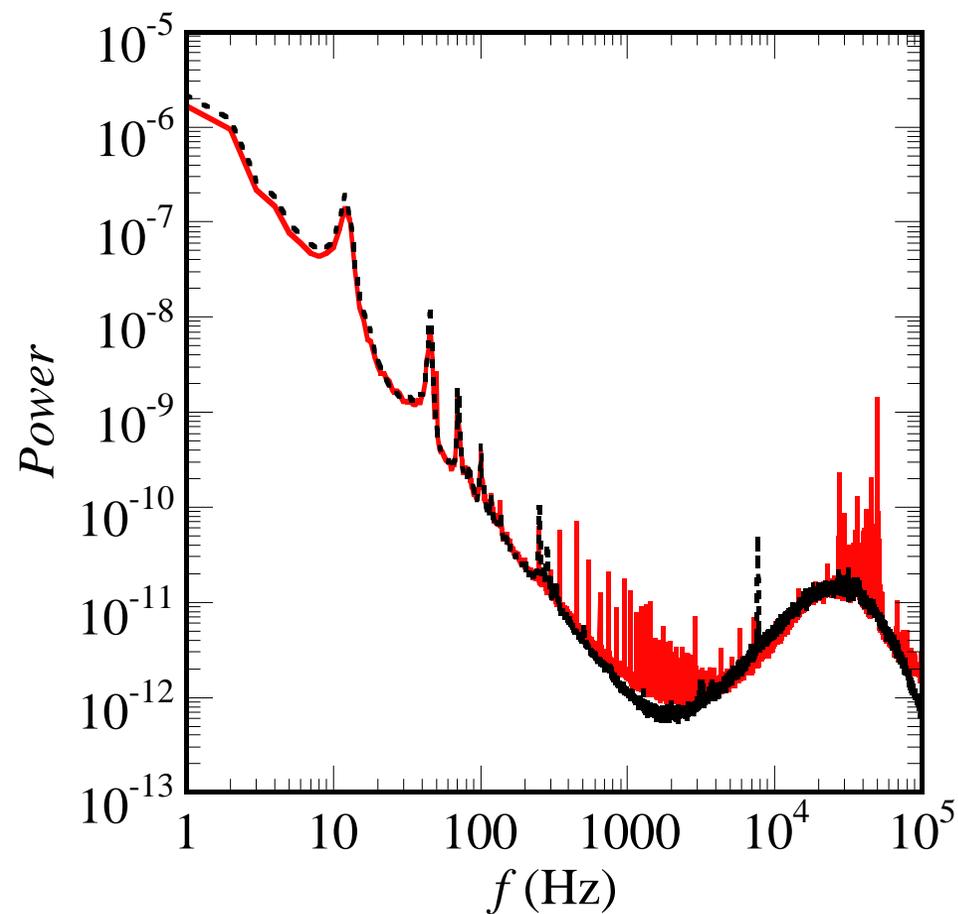
黒: Present CTA, 赤: DANTEC Streamline Pro

## 第一号機(単電源動作)



## 第二号機(両電源動作)

超低雑音サーボアンプに置換

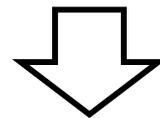


# 小型化による成果

- 熱線プローブ, サポート, CTAの一体化と電磁シールド効果により誘導性ノイズの影響をほぼ完全に回避できた
- 電気ノイズレベルも世界最小を達成できた

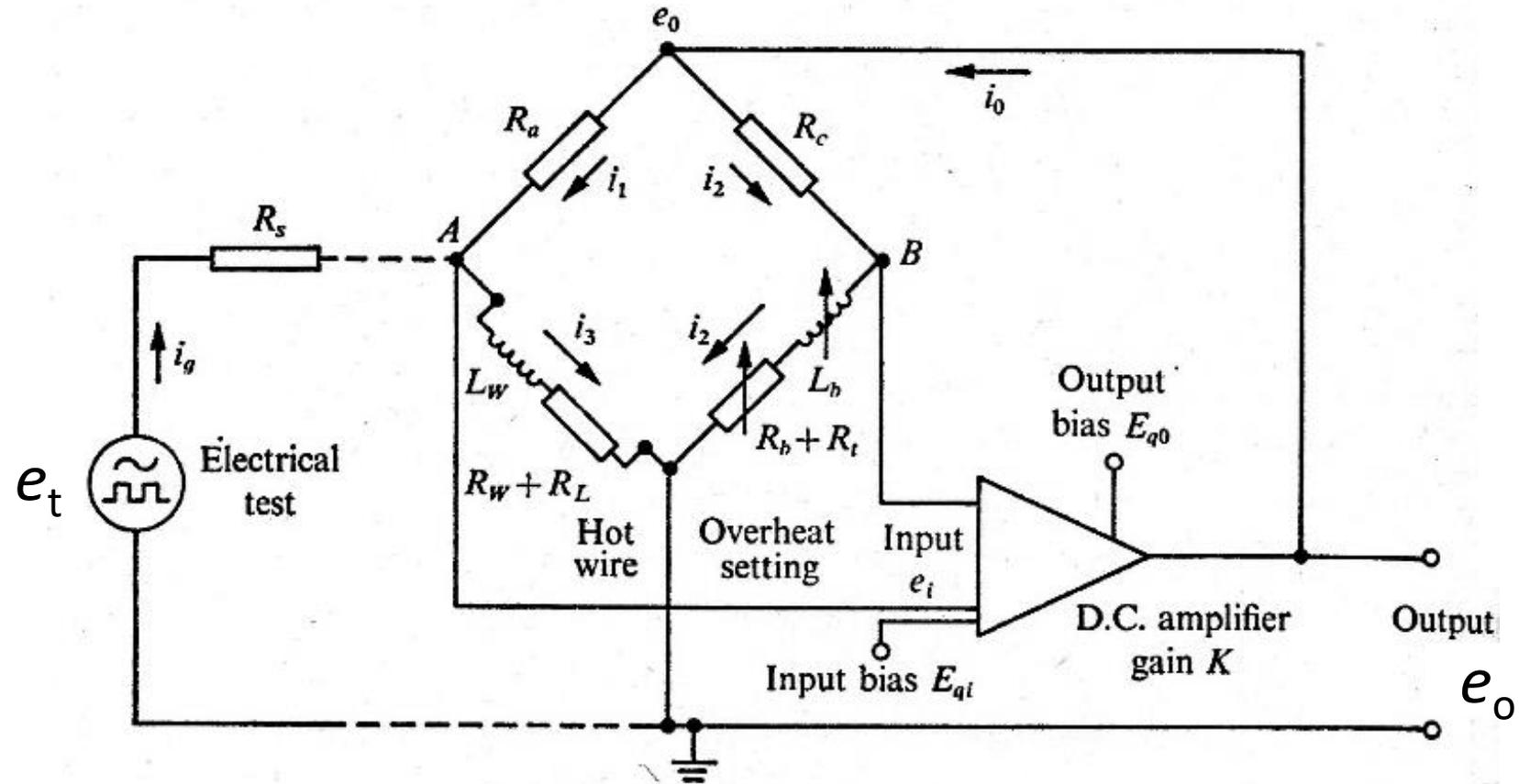


短いセンサケーブルによりReactanceが無視でき, 流速変動に対するCTAの伝達関数が5次式から2次式に簡単化できる



CTAの応答特性と電気雑音が定量評価可能に！(後述)

# 従来型CTAの数理モデル: 伝達関数



$$e_o = \frac{(E_1 D + 1) \{ K_1 u - K_2 [ (M D + 1) (R_W + R_L + L_W D) + 2 R_W (R_W - R_a) / R_a ] e_t / R_s \}}{A_5 D^5 + A_4 D^4 + A_3 D^3 + A_2 D^2 + A_1 D + 1} \quad D = j\omega$$

5次式

回路の調整も煩雑

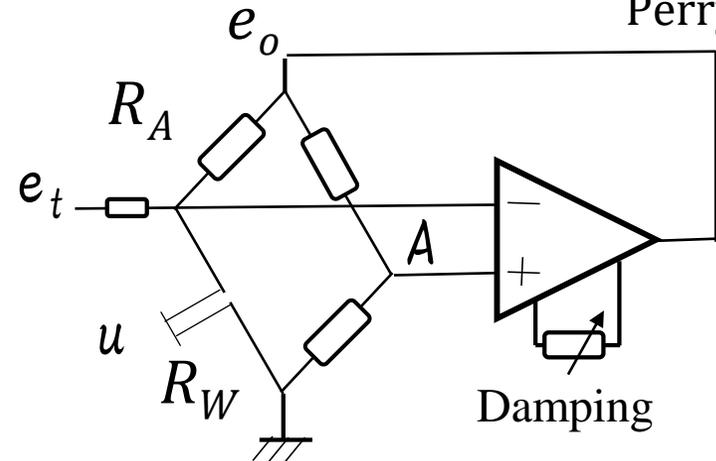
# リアクタンスが無視できる場合の伝達関数

西岡・佐藤(1970)  
Perry(1982)

$|e_t| = 1$  for all components

$$e_o = - \frac{K(\partial E_o / \partial U)_{R_w} u - A(1 + j\omega M) e_t}{1 + 2\zeta(j\omega / \omega_r) + (j\omega / \omega_r)^2}$$

2次式

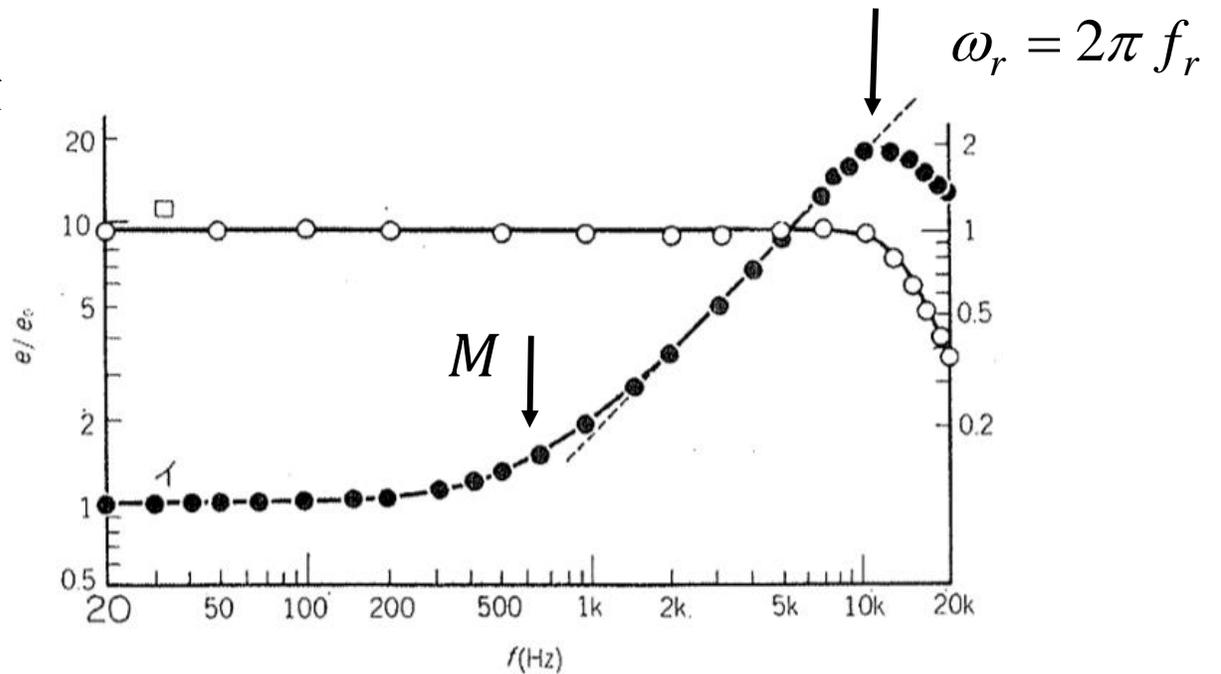


$$\omega_r^2 = (2\pi f_r)^2 = \frac{K(1 + \delta) + 1}{M\mu} \quad \text{共振周波数}$$

$$2\zeta = \frac{1 + K\delta + \mu/M}{\mu\omega_r} \quad \text{Damping 係数}$$

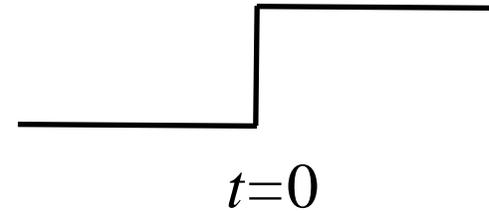
$M$ : 熱線の熱時定数

$\mu$ : サーボアンプの一次遅れ定数



# 矩形波入力に対するCTA回路の応答

$$e_o = \frac{(1 + j\omega M)e_t}{1 + 2\zeta(j\omega/\omega_r) + (j\omega/\omega_r)^2}$$



$$s = j\omega$$

$$\hat{e}_o(s) = \frac{(1 + sM)e_t}{1 + 2\zeta(s/\omega_r) + (s/\omega_r)^2} \cdot \frac{1}{s}$$

$$\int_0^{\infty} e_t e^{st} dt = \int_0^{\infty} e^{st} dt = \frac{1}{s}$$

Inverse Laplace transform

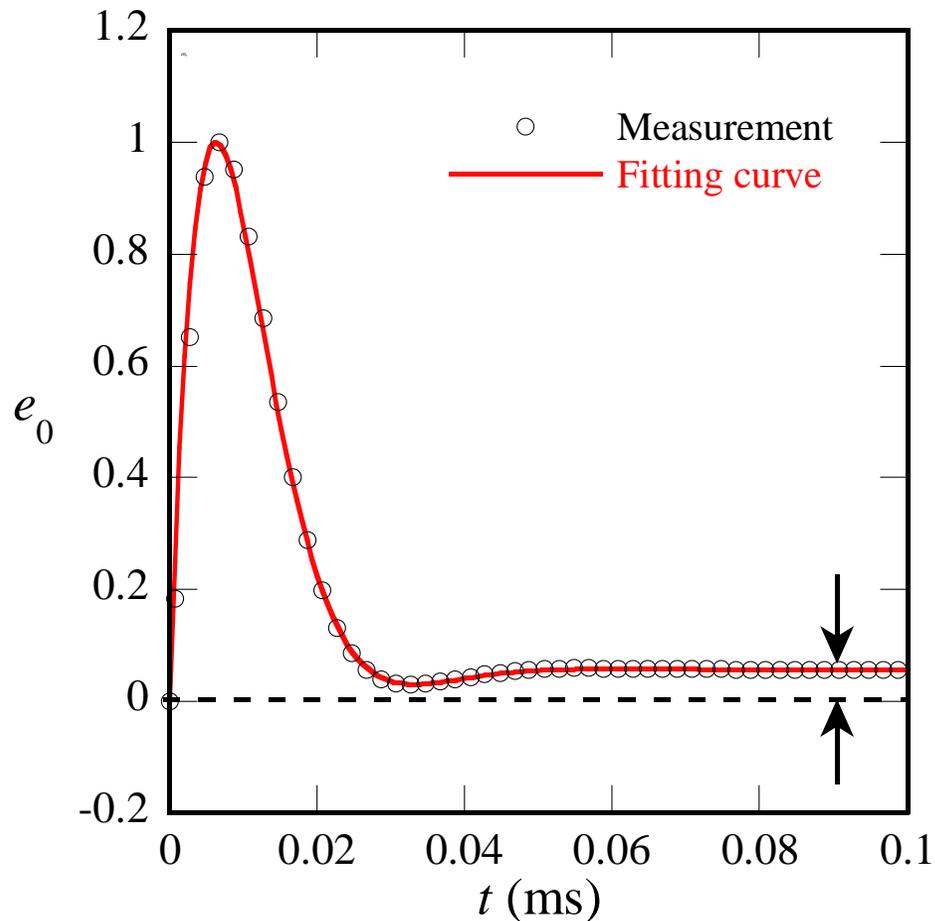
$$e_o(t) = 1 + e^{-\frac{\zeta \cdot t}{T_r}} \left( -\cos \frac{t\sqrt{1-\zeta^2}}{T_r} - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \frac{t\sqrt{1-\zeta^2}}{T_r} + \frac{M}{T_r} \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \frac{t\sqrt{1-\zeta^2}}{T_r} \right)$$

$$T_t = 1/\omega_r \quad M/T_t \approx 40-50$$

# 矩形波入力に対するCTA回路の過渡応答

$$e_0(t) = 1 + e^{-\frac{\zeta \cdot t}{T_r}} \left( -\cos \frac{t\sqrt{1-\zeta^2}}{T_r} - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \frac{t\sqrt{1-\zeta^2}}{T_r} + \frac{M}{T_r} \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \frac{t\sqrt{1-\zeta^2}}{T_r} \right)$$

$\zeta < 0$  では発散 (Dampingで調整)



$$\zeta = 0.752$$

$$M = 0.225 \text{ ms}$$

$$\omega_r = 1.77 \times 10^5 \quad M/T_t = M\omega_r = 40$$

伝達関数が2次式になったため、フィッティングによりCTA回路中の変数の値を簡単に定めることが可能になった

# 白色雑音入力に対するCTAの応答

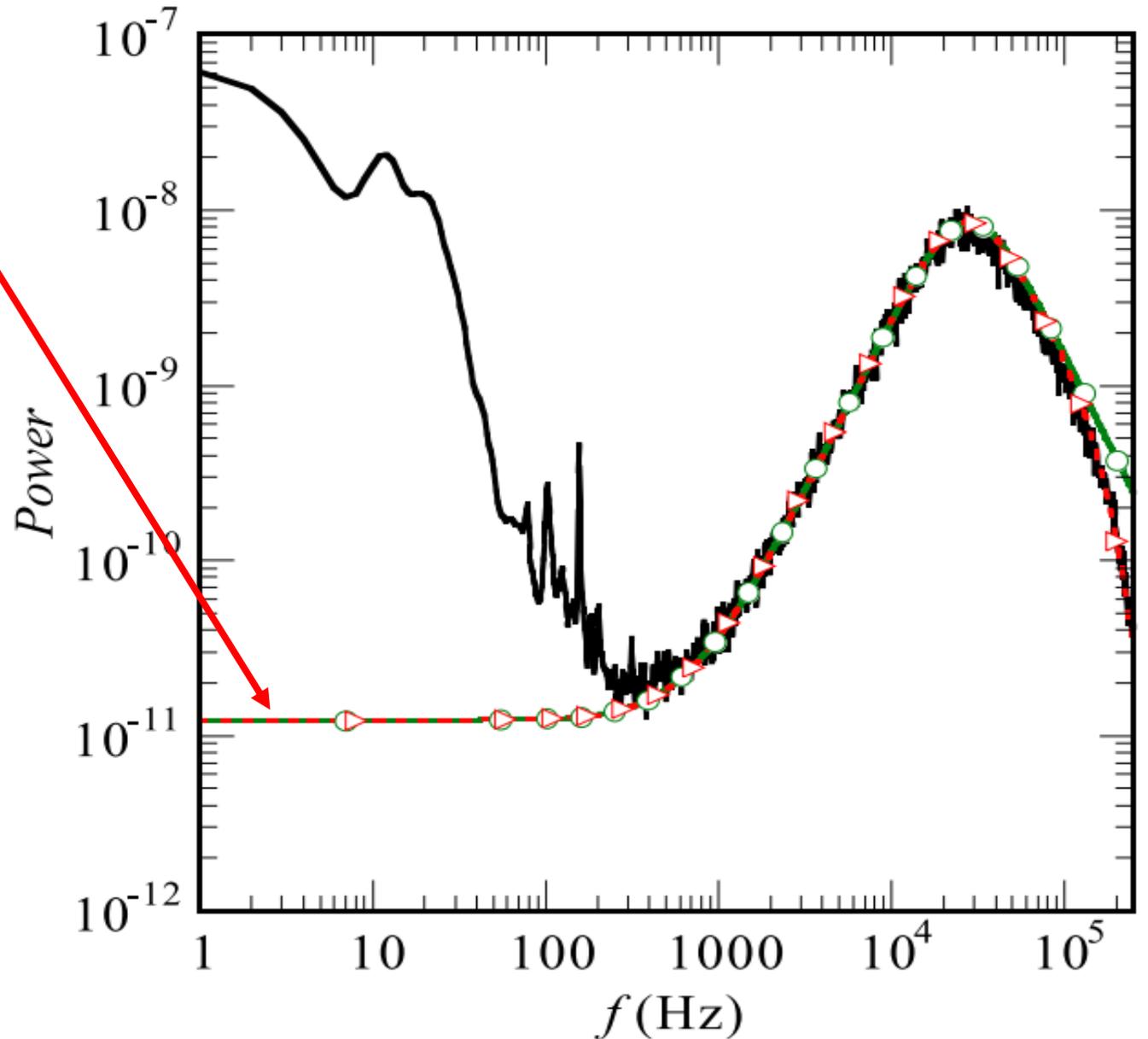
$$e_o^2 = \frac{(1 + j\omega M)^2 |e_t|^2}{1 + 2\zeta(j\omega/\omega_r) + (j\omega/\omega_r)^2}$$

$$\zeta = 0.752$$

$$M = 0.225 \text{ ms}$$

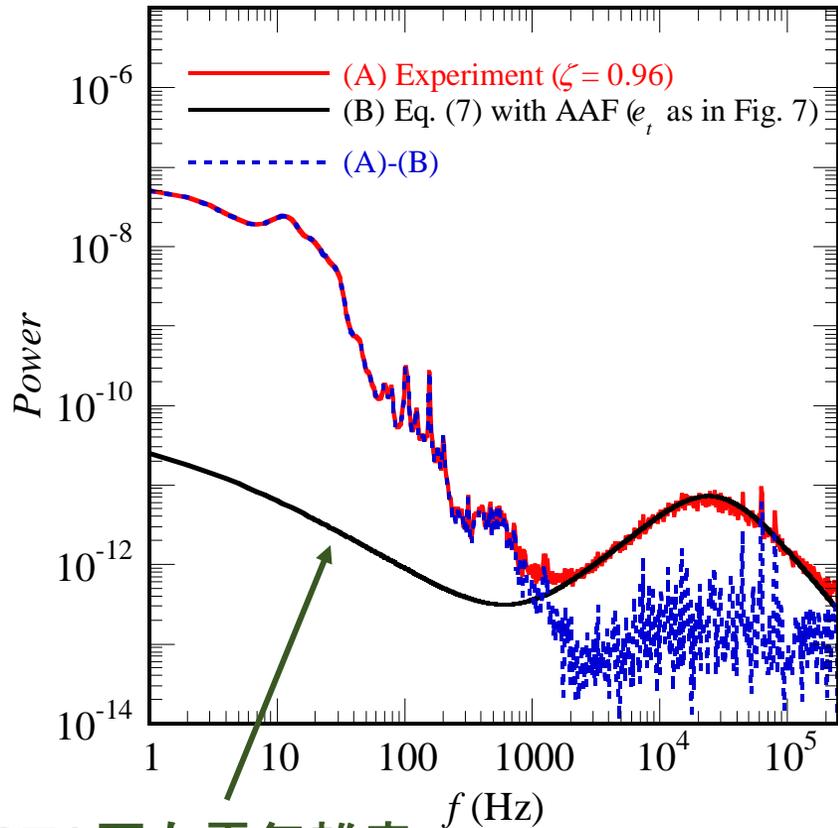
$$\omega_r = 1.77 \times 10^5$$

矩形波入力で定めた値で白色雑音  
に対する応答も良く記述されている  
→ 伝達関数の妥当性が示された



# 伝達関数を用いた電気雑音の評価と分離

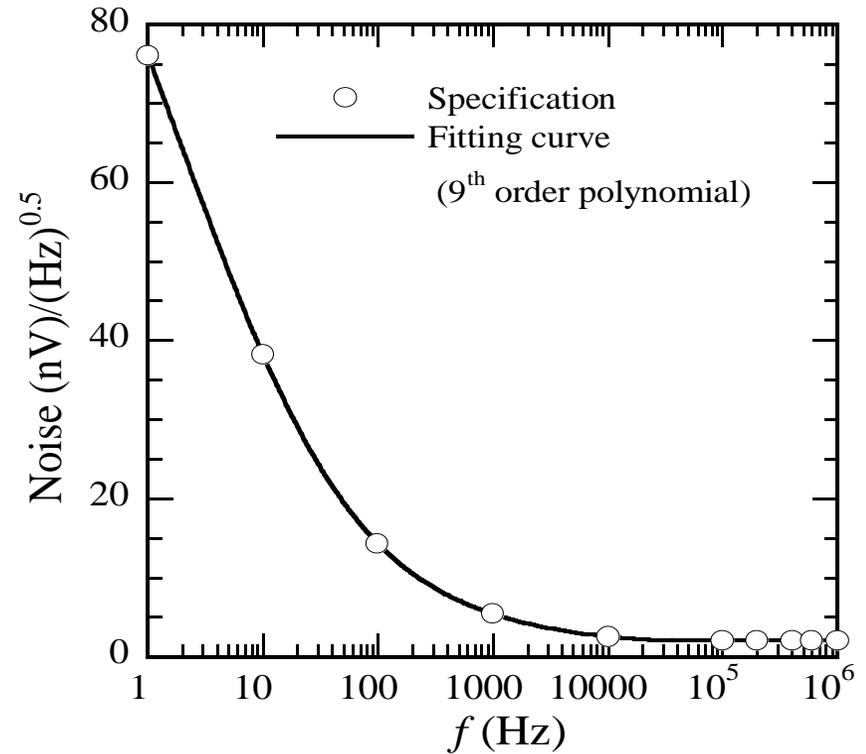
## 風洞残留乱れのスペクトル



CTA固有電気雑音  
(オペアンプ由来)

分離により, S/N比が約1桁向上  
(パワー換算で)

## オペアンプの電気雑音特性

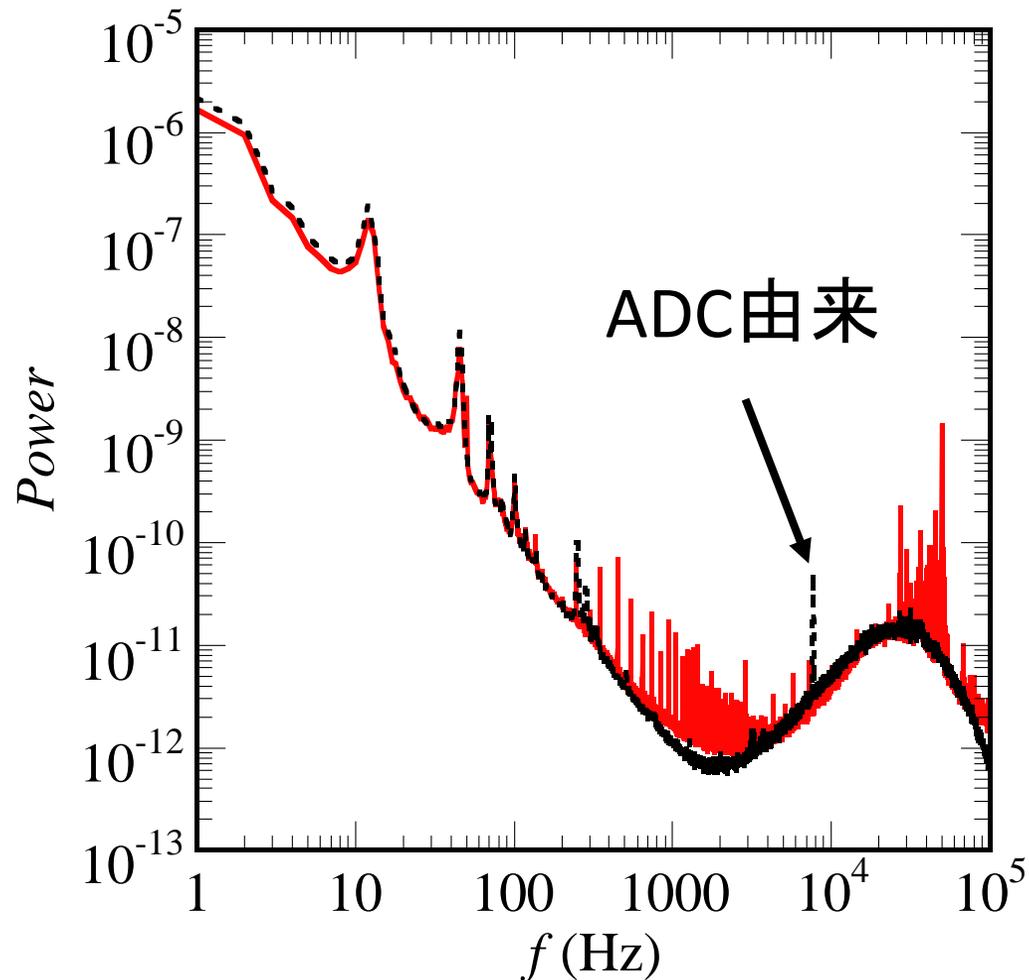


気流乱れ(1Hz-2kHz):  $Tu = 0.08\%$   
電気雑音レベル:  $e_n = 0.0033\%$

本CTAの電気雑音は十分小さい  
(実用上は分離しなくても問題ない)

# SLIM型の低雑音化を極める — 超低雑音オペアンプ(両電源)の採用 —

黒 : Present CTA, 赤 : DANTEC Streamline Pro



※両電源仕様(±5V)ですが, サイズは同じで, 乾電池で動作します(特注品).

比較品(市販の最上位製品)よりも誘導ノイズ(線スペクトル)が圧倒的に少ない.

→ 現時点で世界最高性能のCTA

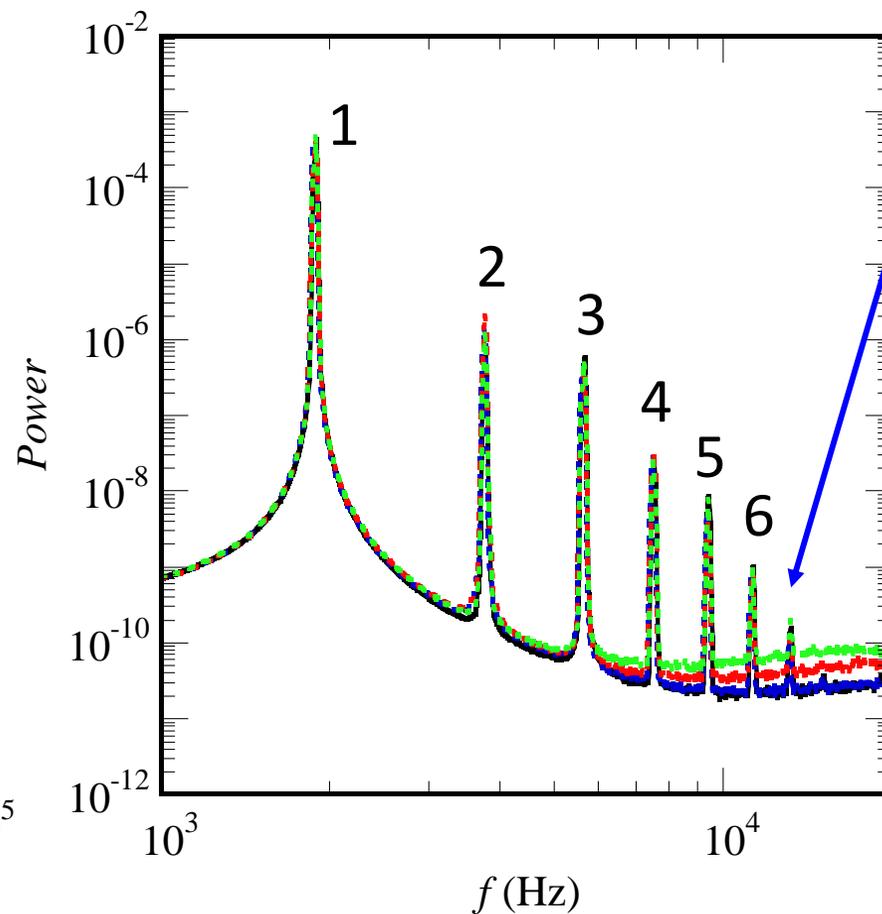
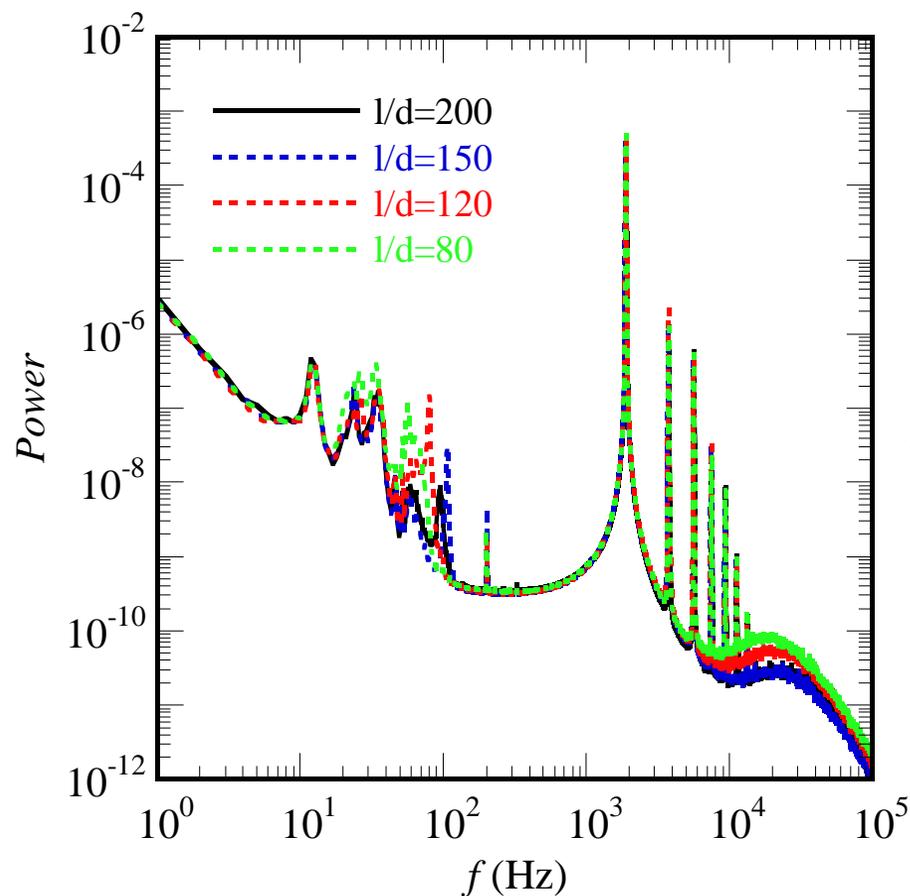
# 超低雑音CTAの適用例

Inasawa, Takagi, Asai  
*Exp. Fluids*, (2021)

## $Re = 77$ の円柱後流変動の計測

速度変動スペクトル  $(x/D, y/D) = (8.5, 1.5)$ ,  $D = 0.3\text{mm}$

$l/d = 80, 120, 150, 200$



第7高調波まできちんと捉えられている

従来の推奨条件

$l/d \geq 200$

$l/d \sim 100$ でも計測値に対する影響は小さいことを実証

(CTA特性も併記)

# まとめ

- 熱線プローブ, サポート, CTAの一体化と電磁シールド効果により誘導性電気ノイズの影響はほぼ完全に回避され, 世界最高性能の低雑音コンパクトCTAが実現できた.
- コンパクト化により, 回路のリアクタンスは無視でき, CTAの電気的特性(伝達関数, 雑音)を正確に評価できた. これは, 計測信号から電氣由来成分の分離を可能とし, 速度変動の精密評価の道を拓く.

熱式流速計, 特願 2019-205548: 高木, 稲澤, 浅井

## 参考文献:

A. Inasawa, S. Takagi, M. Asai; Improvement of the signal-to-noise ratio of the constant-temperature hot-wire anemometer using the transfer function, Measurement and Science Technology, 31 (2020), 055302.



A. Inasawa, S. Takagi, M. Asai; Experimental investigation of the effects of length-to diameter ratio of hot-wire sensor on the dynamic response to velocity fluctuations, Experiments in Fluids, 62 (2021), 92.



ご清聴ありがとうございました

# 製品紹介(1)

## 熱線風速計(CTA)

a



TUBE型CTA

b



SLIM型CTA

温度補償SLIM型CTA

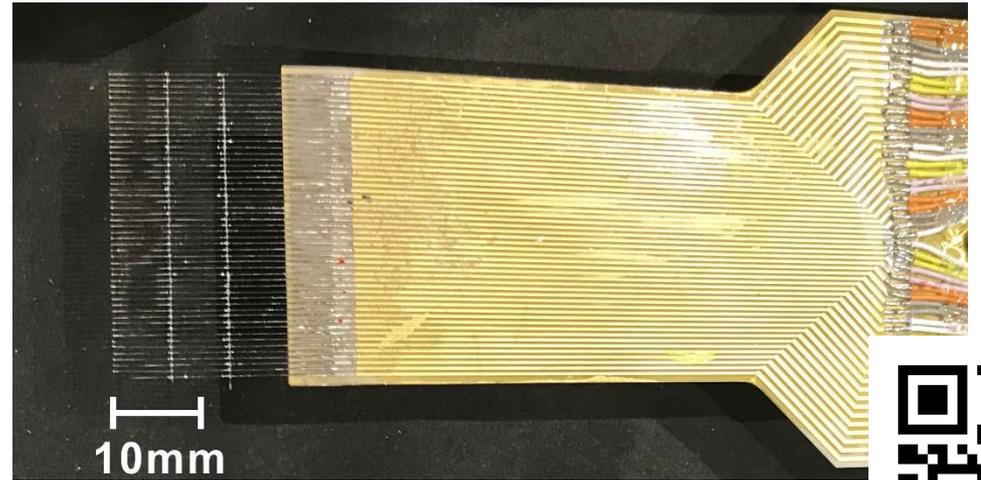
温度補償プローブ



ターミナルボックス



## 多チャンネルCTA



<https://pantec.tokyo>



## CTA教材

## 流れと電磁気アナロジー実験装置

### 構成

#### ○ テキスト

前編: 原理の解説

後編: 実践と確認法

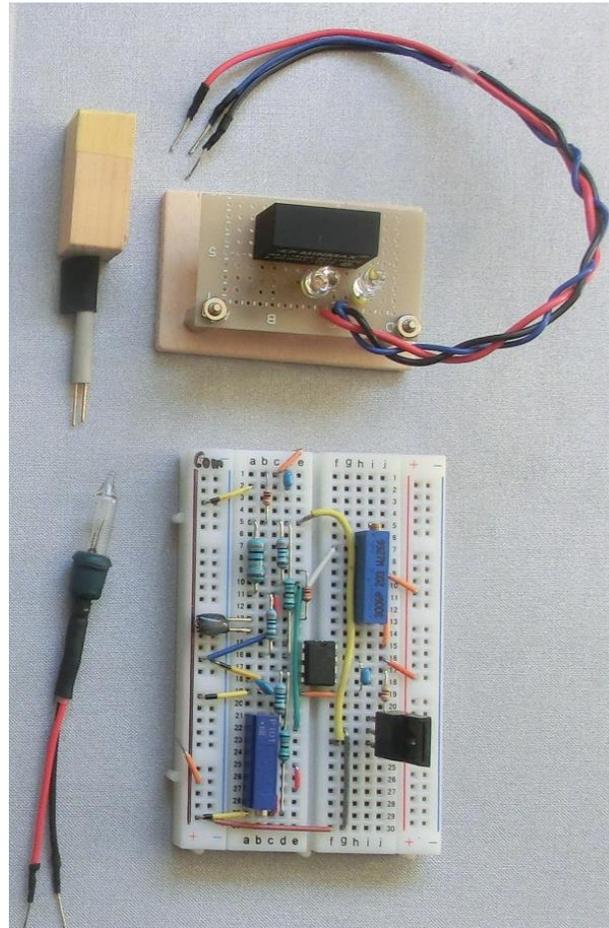
#### ○ キット本体

右図をご覧ください

#### ○ オプション

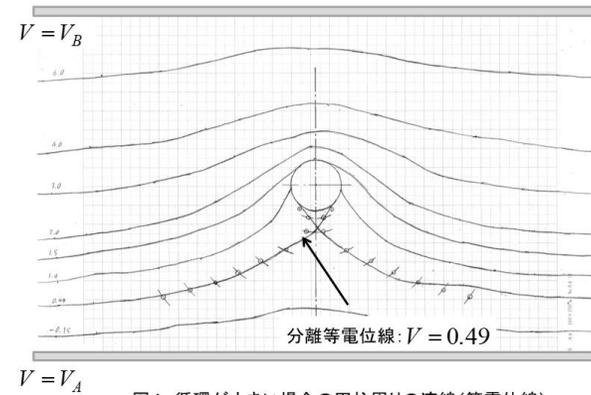
ADC収録用の直流  
アンプ, アナログフィ  
ルタ等の教材もあり  
ます

### 概観



※USB電源で動作

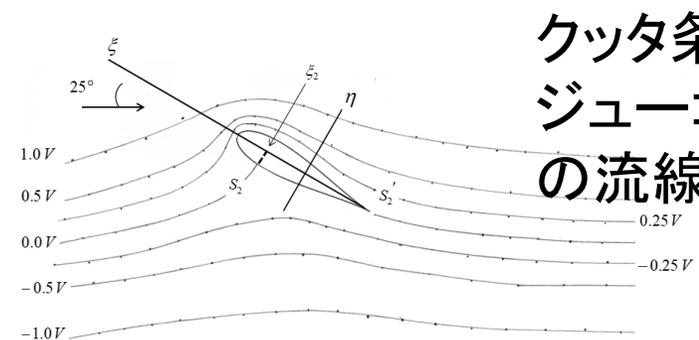
1. 流線と等電位線(任意の循環設定可)
2. 湧き出し・吸込み



円柱外に淀み点を持つ円柱周りの流線

導電紙上に描く流線  
= 等電位線

図4. 循環が大きい場合の円柱周りの流線(等電位線).  
○印は式(9)に実験条件を代入しプロット.



クッタ条件を満たした  
ジュコフスキー翼周りの  
流線