

令和3年度
卒業研究論文

乱流生成装置の計測精度の向上
および風速応答性の評価

1810950109 竹内 颯人

近畿大学工学部機械工学科
流体エネルギー研究室

令和3年度 卒業研究論文

乱流生成装置の計測精度の向上および風速応答性の評価 竹内 颯人

目次

第1章 諸言	1
1.1 自然風再現	1
1.2 研究目的	3
第2章 実験装置および実験方法	4
2.1 乱流生成装置とテストセクション	4
2.1.1 テストセクションの設計・製作	9
2.1.2 ピトー管による風速の計測	20
2.1.3 テストセクションの天板角度の決定	22
2.2 乱流生成装置の制御システムの構築	25
2.3 熱線流速計	30
2.3.1 熱線流速計による風速の計測	30
2.3.2 熱線流速計の設定	32
2.4 風洞特性の評価	34
2.5 風洞実験概要	44
第3章 結果と考察	45
3.1 回転翼の動作による風速応答性の評価	45
第4章 結言	68
参考文献	69
謝辞	70
付録 A	71

第1章 諸言

1.1 自然風再現

一様流れ中に障害物を置くと、図 1.1 のようにその後流で交互に渦が剥離する。これをカルマン渦といい、障害物には流れ方向の抗力のほかに、流れに垂直方向の揚力が波状に作用し、障害物を揚力方向に振動させる。この振動の周波数が障害物の固有振動数と一致した場合、共振を引き起こし振幅が大きくなる。これを渦励振といいこれによりタコマナローズ橋の崩壊や高速増殖炉もんじゅでのナトリウム漏洩といった事故が引き起こされた。

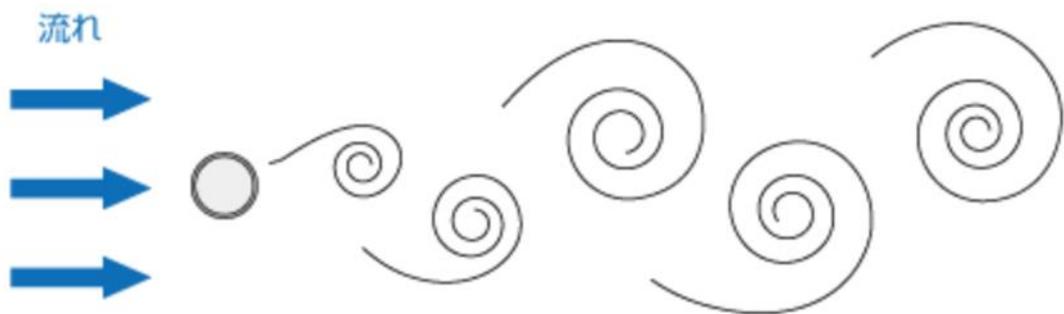


図 1.1 カルマン渦¹⁾

橋梁や高層ビルなど風の影響を受ける建築物の設計、風車の性能評価を行う際には大気中の乱流や暴風など自然風を正確に考慮する必要がある。特に風洞を用いて実験環境での自然風を高精度で再現し、これらの建築物の空力特性の評価を行うことは工学的な観点から重要な課題である。



図 1.2 瀬戸大橋²⁾

さらに風洞実験の信頼性を高めるためにはそれらを建築する場所での自然風を再現し、その下で実験を行うことが求められる。風洞装置が生成する風の流れは一様流であるため、それ自体では不規則な自然風を再現することはできない。そこで図 1.4 のような多数の回転翼により流れを攪拌する装置³⁾を取り付けることによって乱流を生成できる。



図 1.3 風洞装置

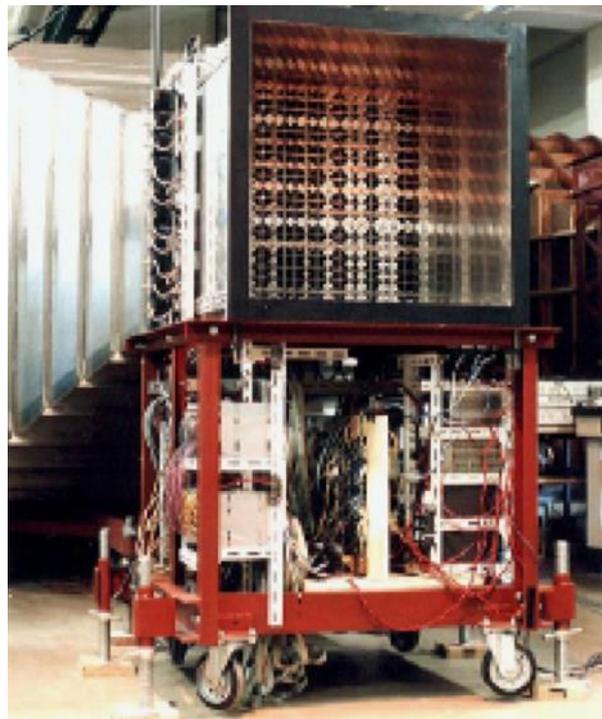


図 1.4 大気乱流風洞およびせん断乱流発生装置. (豊橋技術科学大学)⁴⁾

1.2 研究目的

本研究では，風速の計測精度を向上させるため，外部流れから独立した測定部の設計・製作を行い，多数の回転翼から構成される乱流生成装置を用い，回転翼の回転角度，回転速度による風速応答性の評価を行う．また，風速応答性の評価を行うにあたり，風洞装置がどのような風を生成するのかについても評価を行う．本研究によって，実際に計測を行った自然風を乱流風洞で再現するための制御システムの開発につながると期待される．

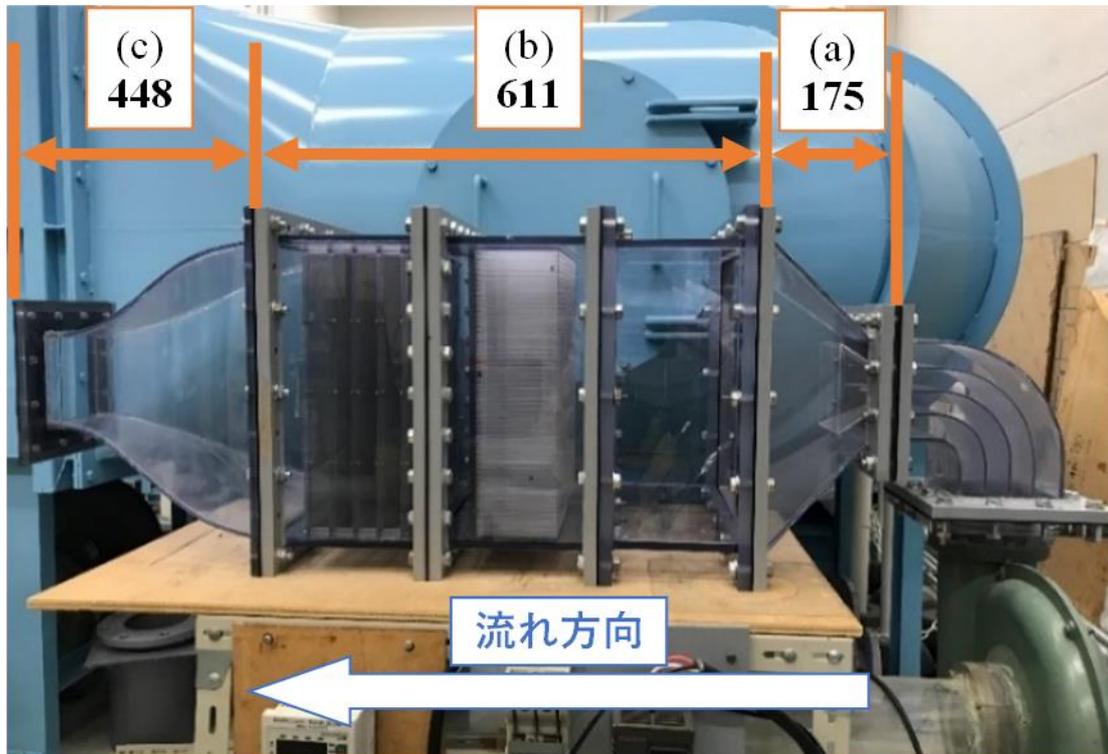
1. 測定部の設計・製作
2. 風洞装置の特性評価
3. 回転翼の位相，回転速度による風速応答性の評価

本論文は4つの章から構成されている．第2章では実験方法および実験で使用した電子部品や実験器具を示している．第3章では風速応答性の評価を行った後，考察と今後の課題についての検討を行っている．第4章では本研究の結言をまとめている．

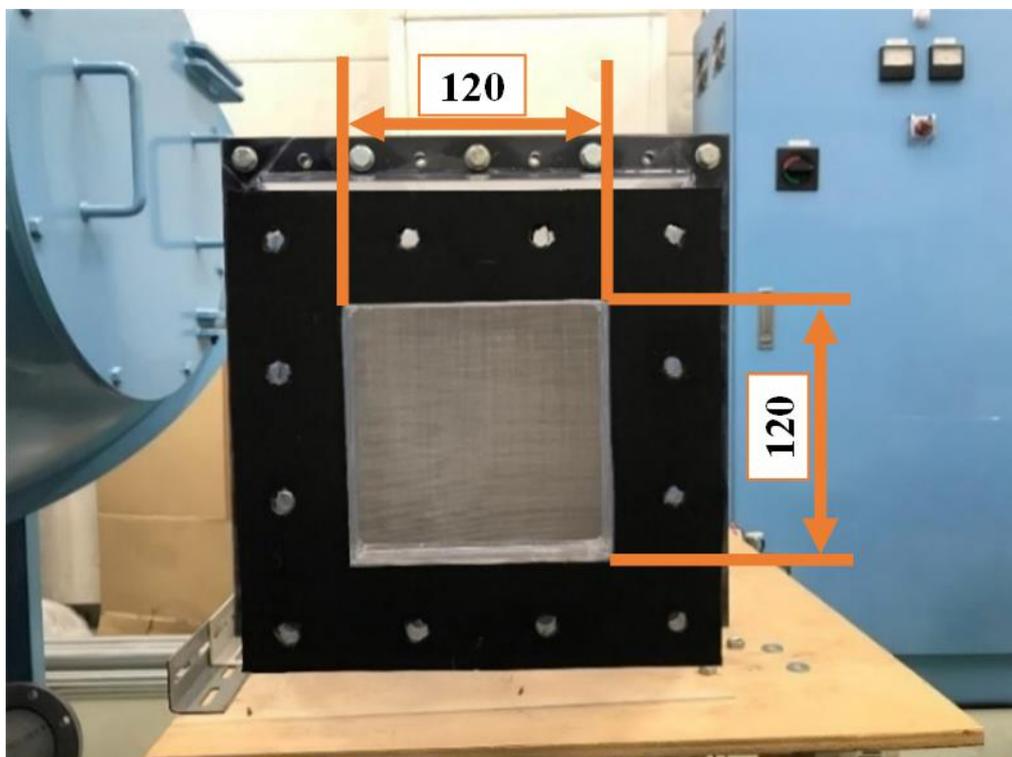
第2章 実験装置および実験方法

2.1 乱流生成装置とテストセクション

図 2.1 に本実験で使用した小型風洞装置を示す。



(a) 全体図



(b) 吹き出し口

図 2.1 小型風洞装置 (単位: mm)

小型風洞装置（以下風洞装置と呼ぶ）は(a)の拡散部，(b)の整流部，(c)の縮流部から構成される．縮流部の断面積比は約 0.12 であり，吹き出し口は120mm四方である．また，風速の調整はインバータ（富士電機社製 FVR-C11 FVRO 4C11S 3PH 0.95KVA 200-230V）と送風機（西村電機社製 汎用送風機 NK-5）を用いて行った．

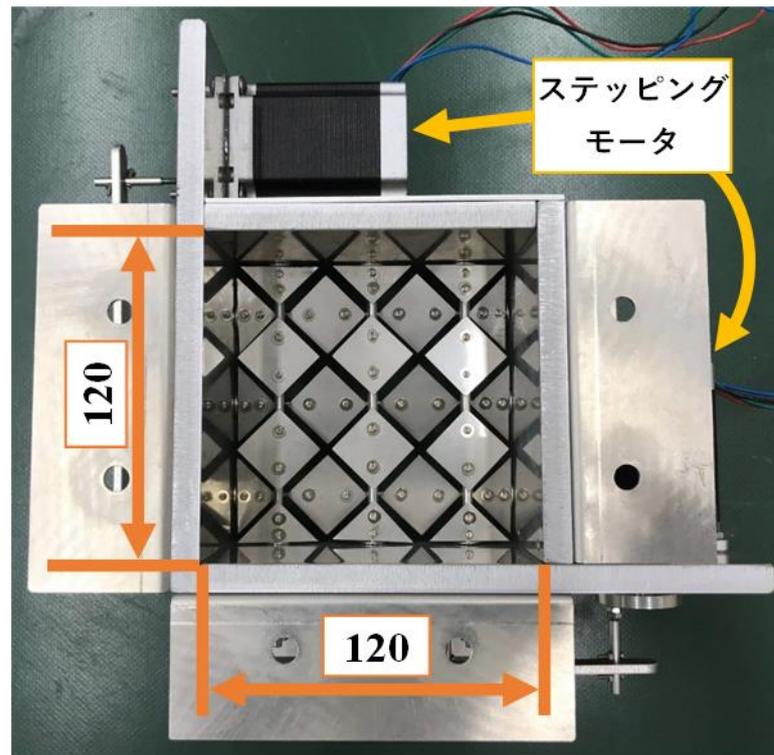
以下に風洞装置制御盤および風洞装置の操作方法を示す．



図 2.2 風洞装置制御盤

- 1) FREQ.SET を反時計回りにいっぱいに戻す．
- 2) レバーを上げ，入に設定する．
- 3) モニターの数値が 0.0 で点滅することを確認する．
- 4) RUN を押し，モニターの数値が 0.0 で点灯に変わったことを確認し，FREQ.SET を回し任意の出力に設定する．

図 2.3 に本実験で使用した乱流生成装置を示す。



(a) 全体図



(b) 駆動部

図 2.3 乱流生成装置 (単位 : mm)

乱流生成装置の流路は風洞装置の吹き出し口と同じ 120mm 四方である。また、乱流生成装置は三角翼と四角翼それぞれ 12 枚ずつにより構成される。これらは縦、横 3 本ずつの回転軸に取り付けられ、回転軸は連結棒によりステッピングモータと同位相で回転できる。また、風洞装置と測定部の間に設置するため、両側に締結面をもつ。

図 2.4 に従来の実験の様子を示す。従来の実験では、図 2.5(a)のように、乱流生成装置を風洞装置に取り付け、風速の計測をその下流の解放された空間で行っており、実験室内の空気の流れが風速の計測に影響を及ぼしていた。図 2.5(b)のように、乱流生成装置の下流に外部の流れから独立した測定部（以下テストセクションと呼ぶ）を設け、テストセクション内で風速を計測することによって、周りの環境の影響を受けず計測を行うことができると考えた。さらに、図 2.5(c)のように乱流生成装置と風洞装置の間にテストセクションを設置することも想定している。これらを踏まえ、テストセクションの設計を行った。

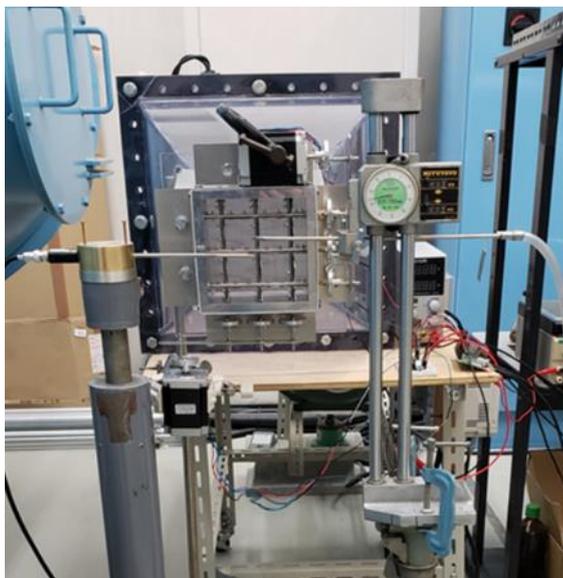


図 2.4 従来の実験の様子^{5) 6)}

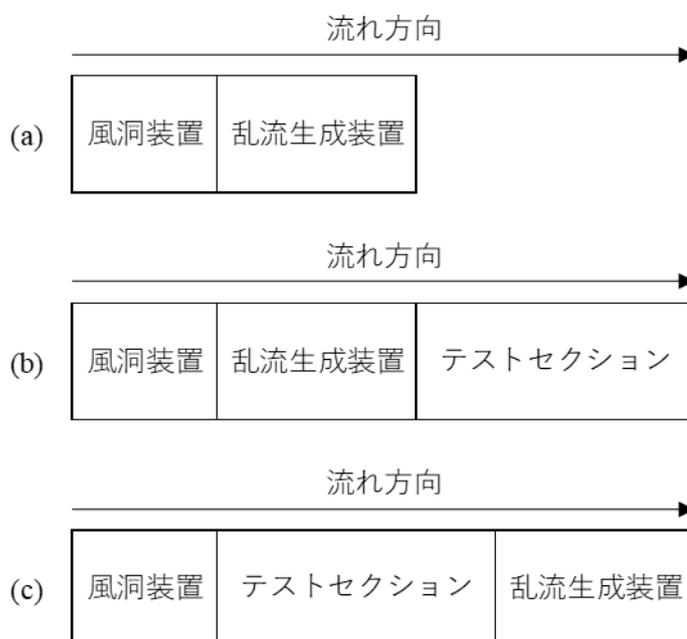


図 2.5 各装置の配置図

2.1.1 テストセクションの設計・製作

テストセクションの長さは乱流生成装置の流路の1辺120mmの10倍、1200mmとし、上流から120mm, 240mm, 480mm, 960mmの位置には高さ方向に風速を計測できるように、熱線流速計とピトー管の計測部を通すことができる幅10mmの溝を設けた。流れ方向についても同様に流路の高さ方向の中心に10mmの溝を設け、これらを通していている部分以外の溝については、風が漏れないようガムテープで塞ぐこととした。また、図 2.5(c)の条件を満たすよう、上流側、下流側ともに締結面を設けた。テストセクション内の流路中心部での風速を一定に保つため、天板は適当な傾斜を付けられるよう、上流部に支点を設け、6つの万力で固定する機構とした。

設計を行ったテストセクションを図 2.6～2.25 に示す。

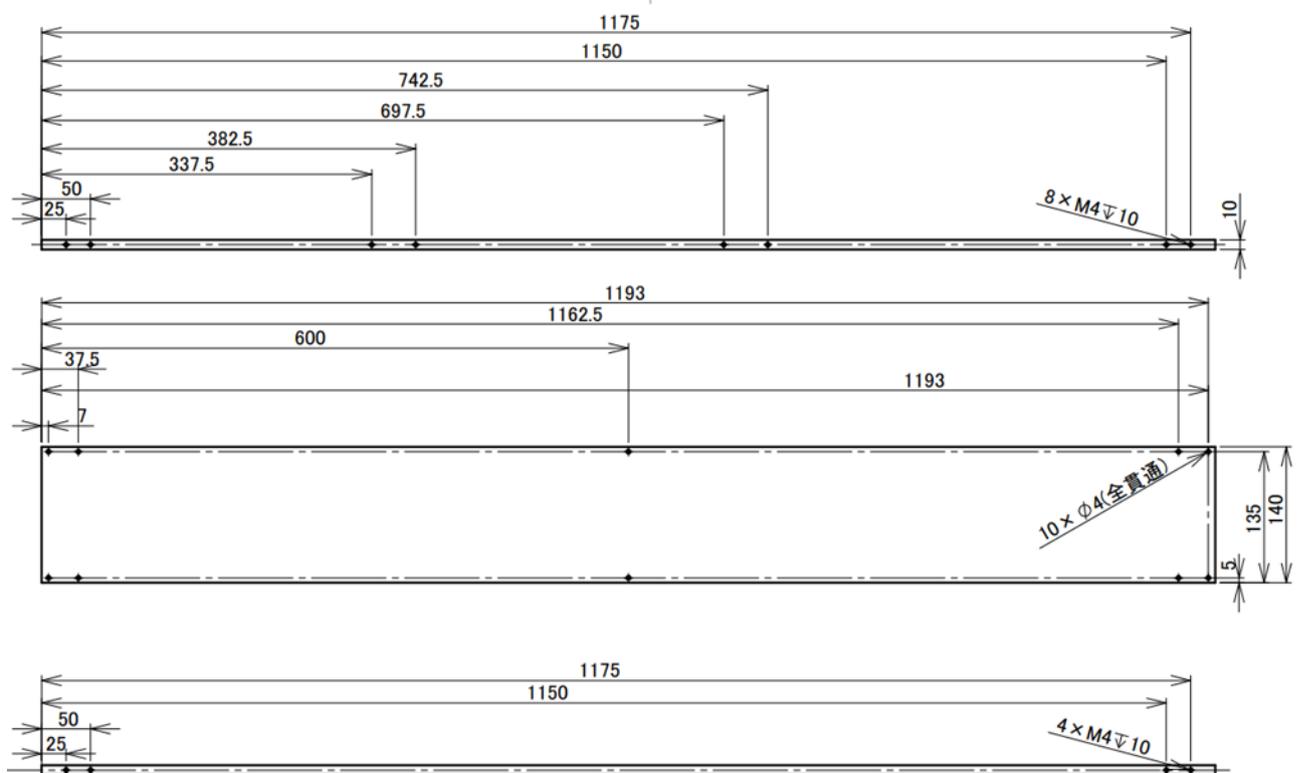


図 2.6 底板

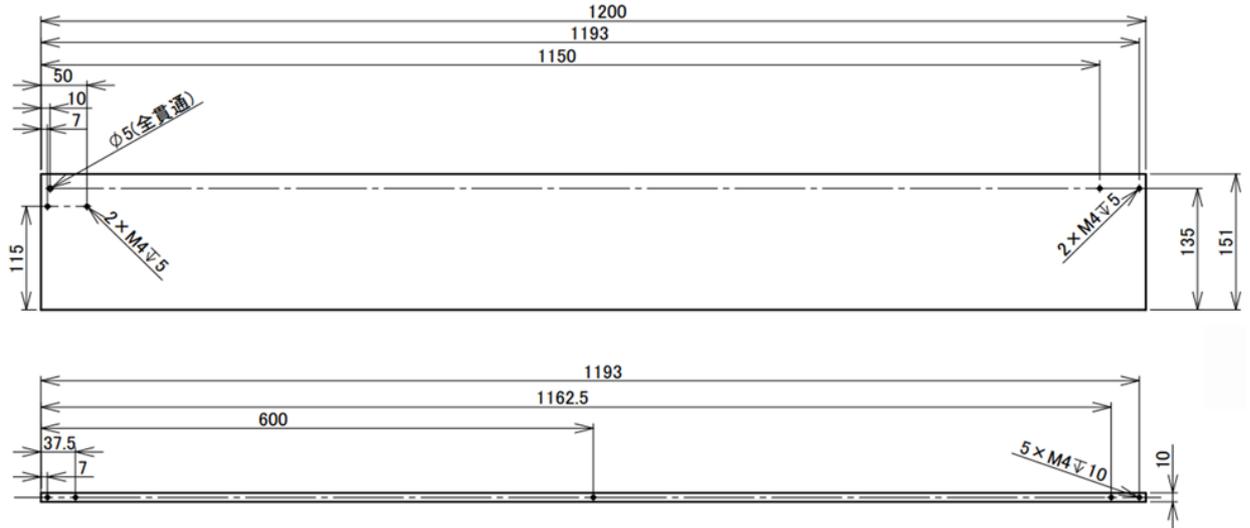


图 2.7 右侧板

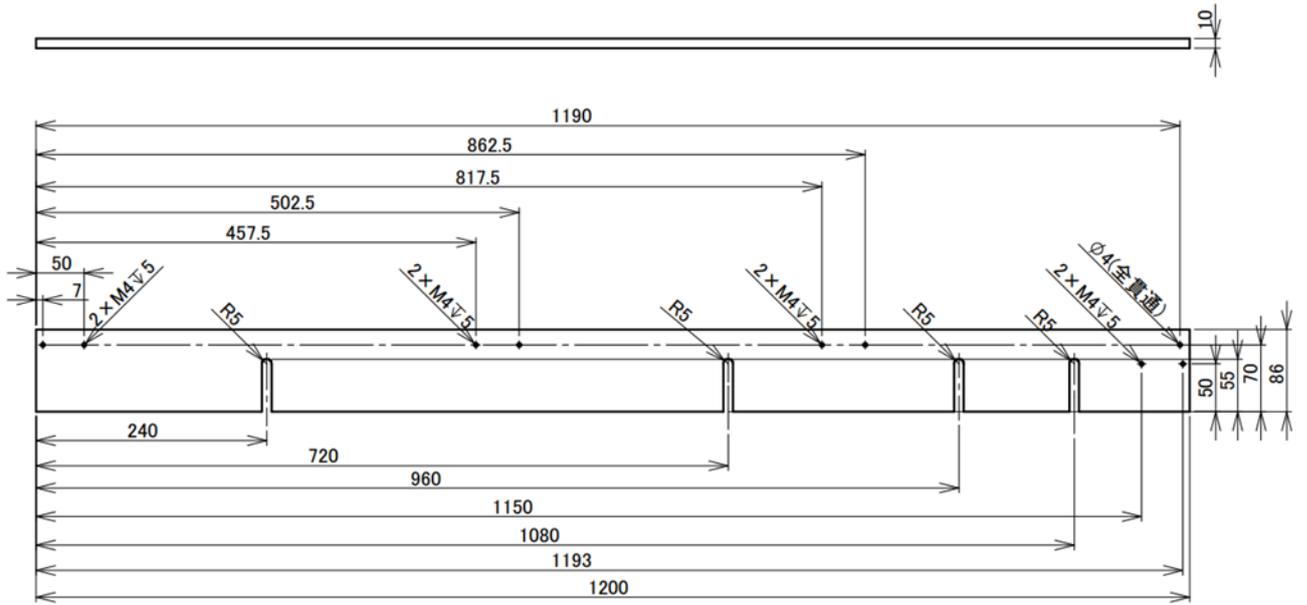


图 2.8 左上侧板

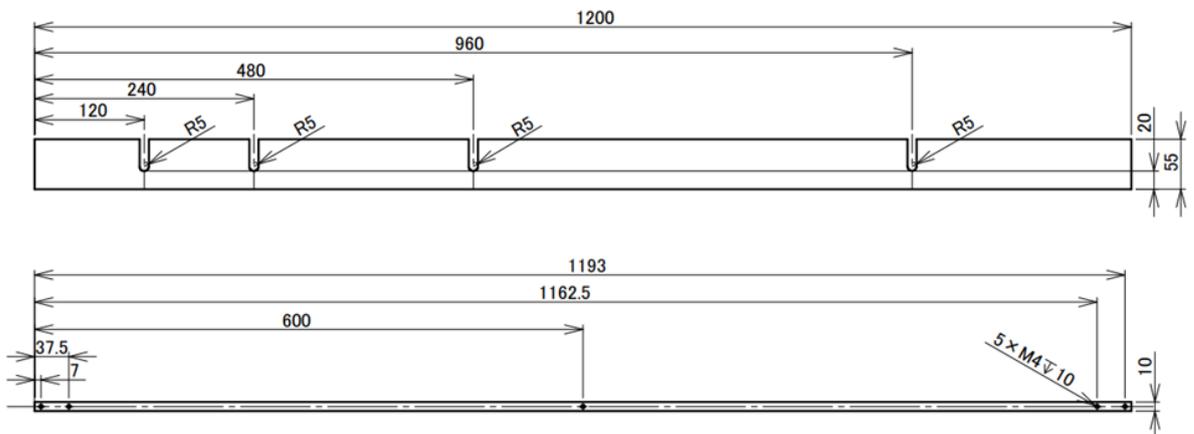


图 2.9 左下侧板

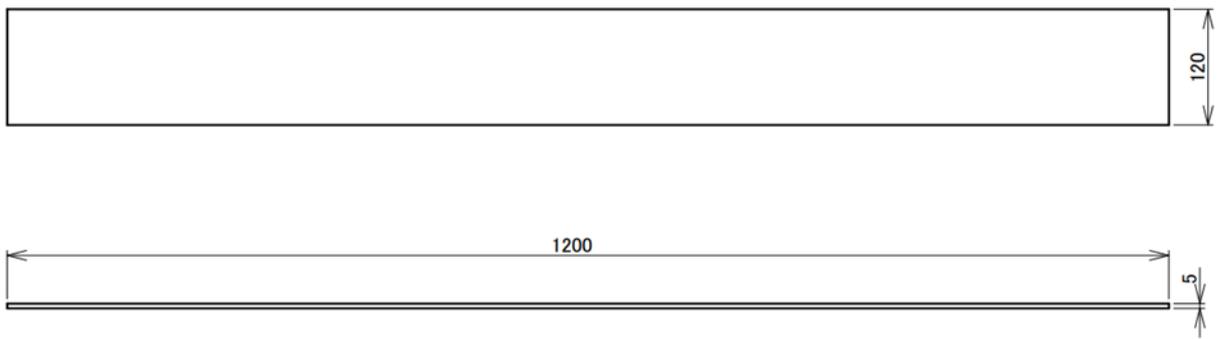


図 2.10 天板

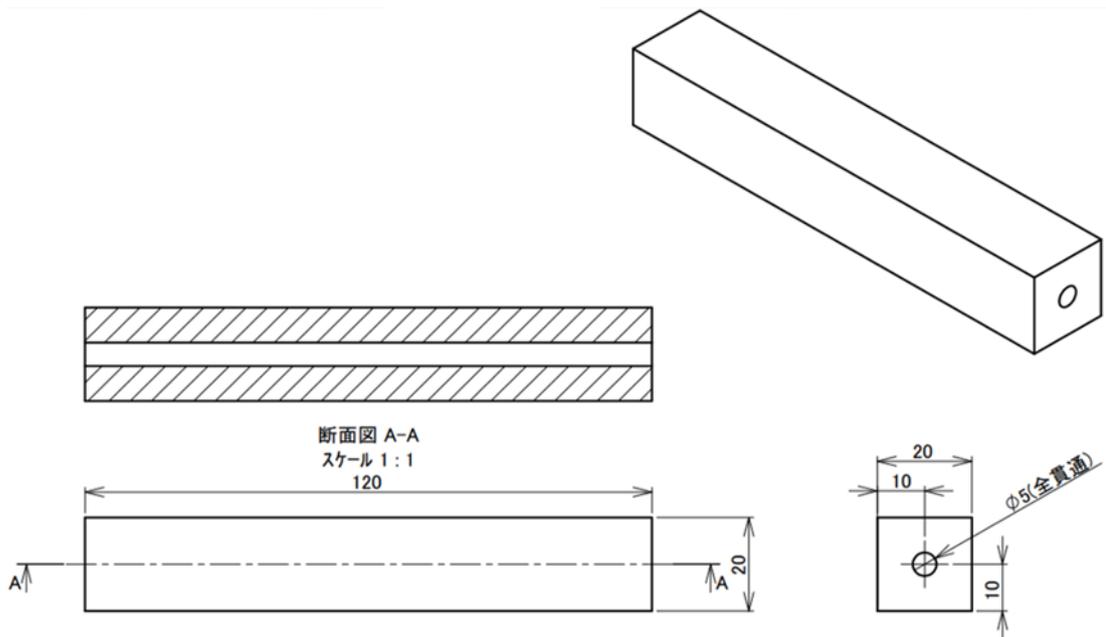


図 2.11 支点角柱

図 2.7, 2.8 の右側板, 左上側板は天板に傾斜をつけることを加味し, 高さ方向に余裕を持たせた設計とした. 図 2.11 の支点角柱は天板の最上流部に取り付けるものであり, 直径 4mm の丸棒を通すことにより天板の支点となる部分である. 材料はいずれもポリカーボネートである.

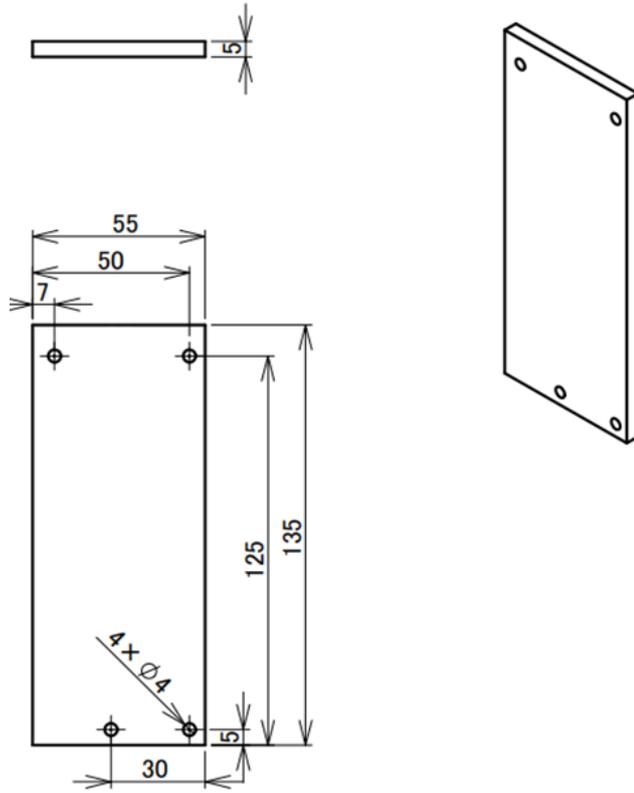


图 2.12 固定壁 1

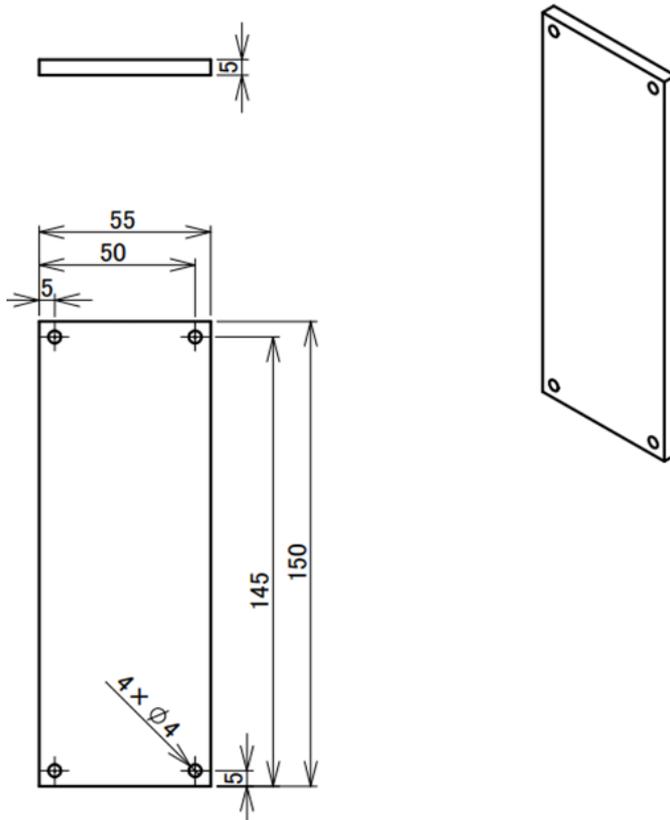


图 2.13 固定壁 2

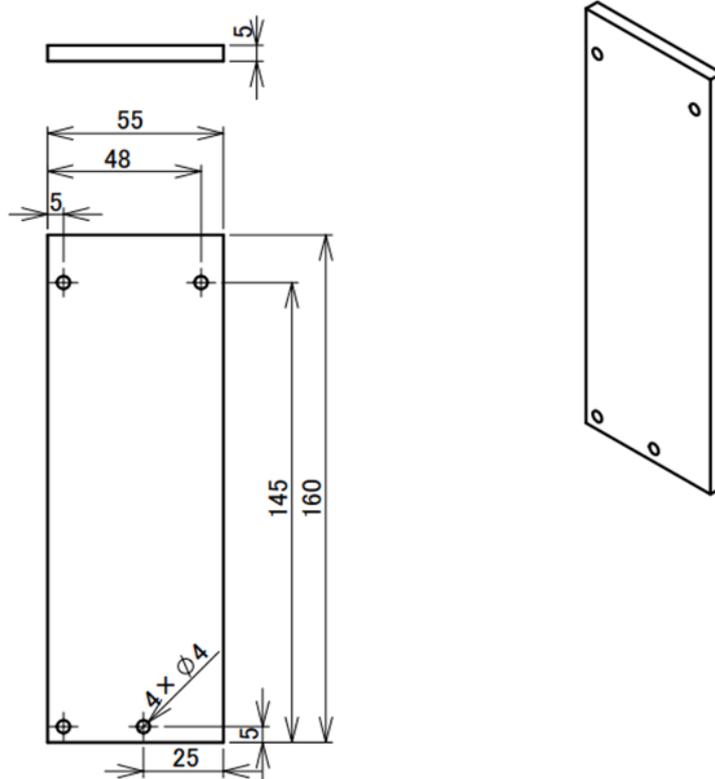


図 2.14 固定壁 3

図 2.12～2.14 の固定壁は左上側板と底板を固定するためのものであり，図 2.13 の固定壁 2 はテストセクション中に 2 つ組み込まれている．材料はいずれもポリカーボネートである．

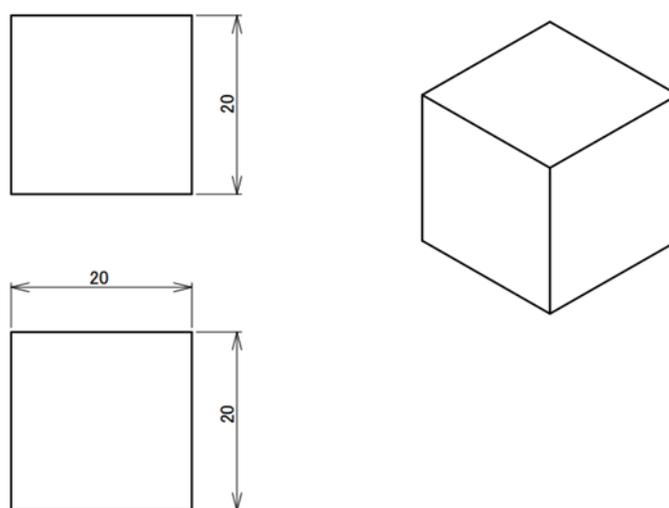


図 2.15 天板固定用立方体

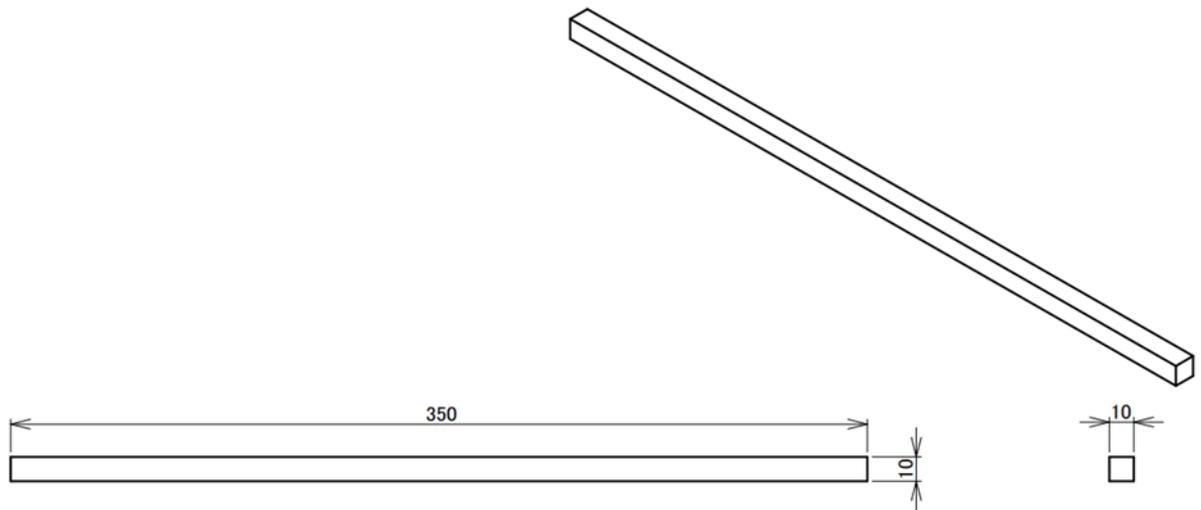


図 2.16 たわみ防止用角柱 1

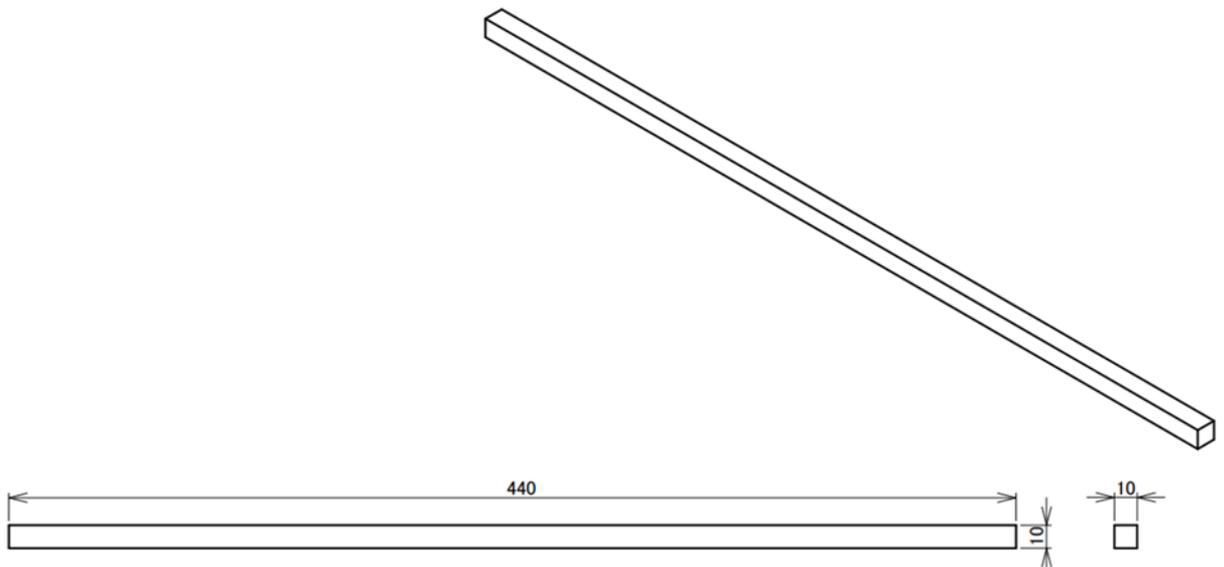


図 2.17 たわみ防止用角柱 2

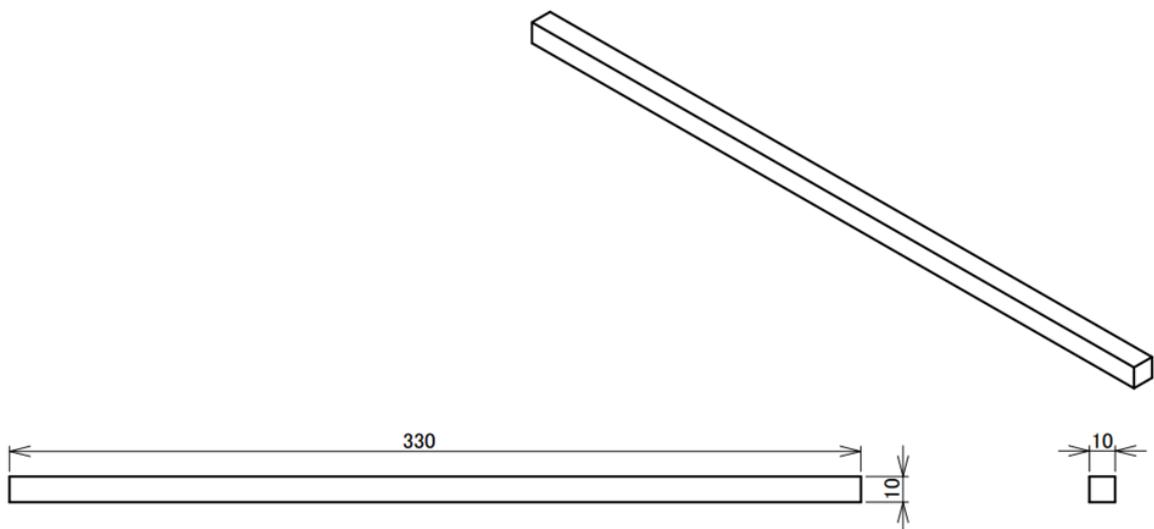


図 2.18 たわみ防止用角柱 3

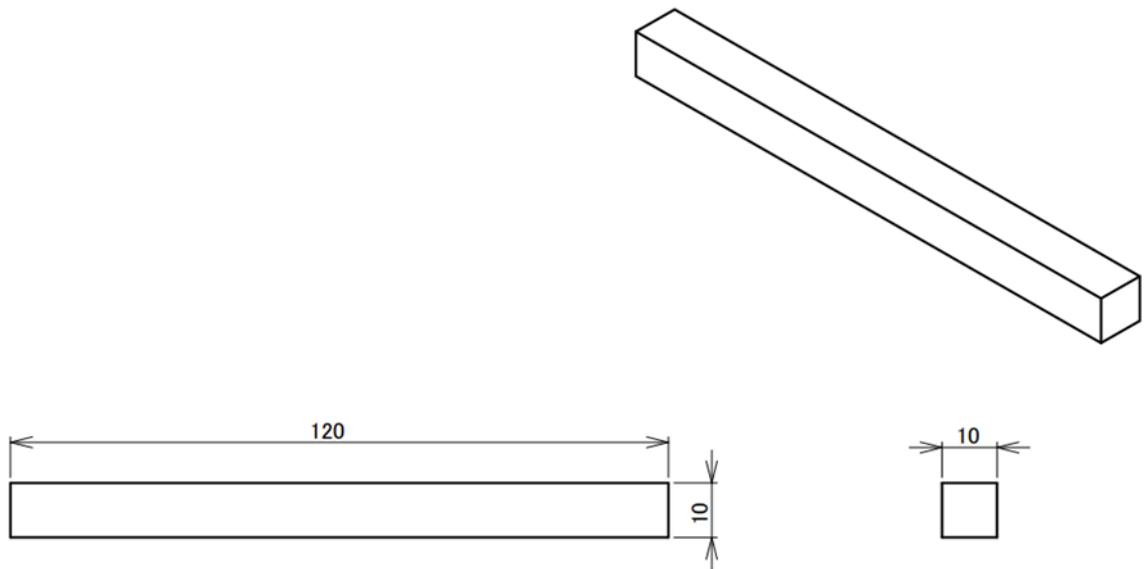


図 2.19 たわみ防止用角柱 4

図 2.15 の天板固定用立方体は、天板と側板をクランプで固定するためのものであり、テストセクション中に 6 つ組み込まれている。また、図 2.16~2.19 のたわみ防止用角柱は天板のたわみを抑制するために取り付ける角柱であり、図 2.16~2.18 はそれぞれ 2 つずつ、図 2.19 は 3 つテストセクション中に組み込まれている。材料はいずれもアクリルである。

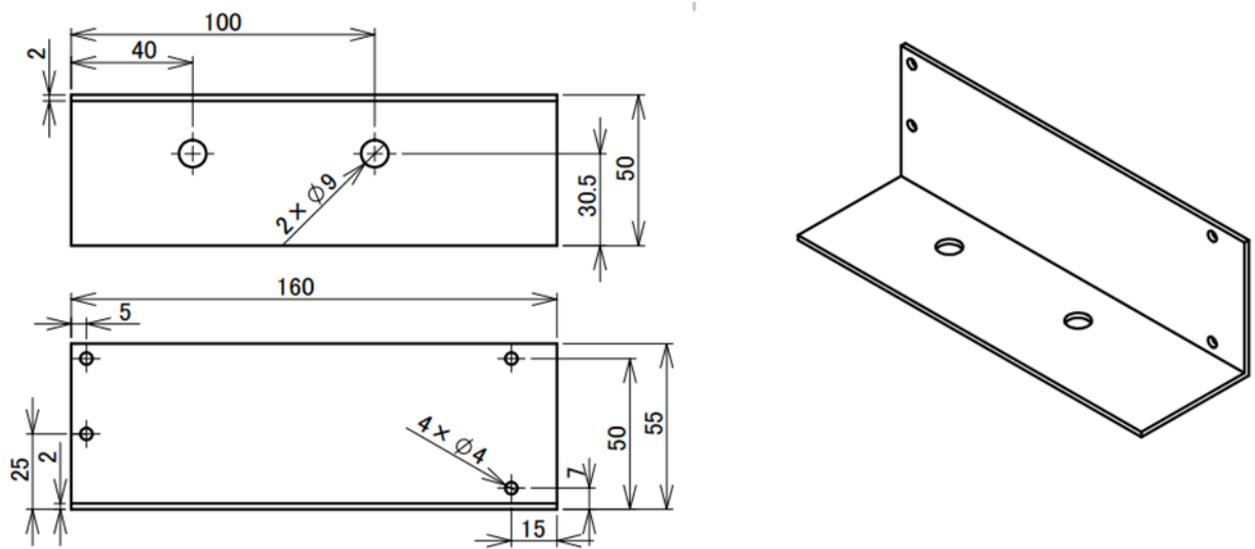


図 2.20 アンゲル 1

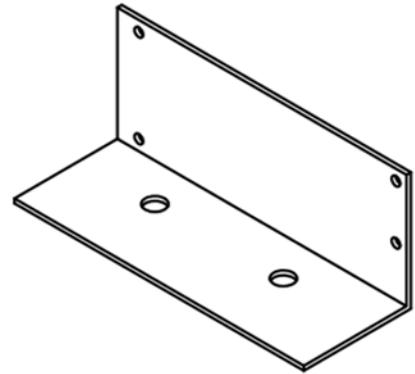
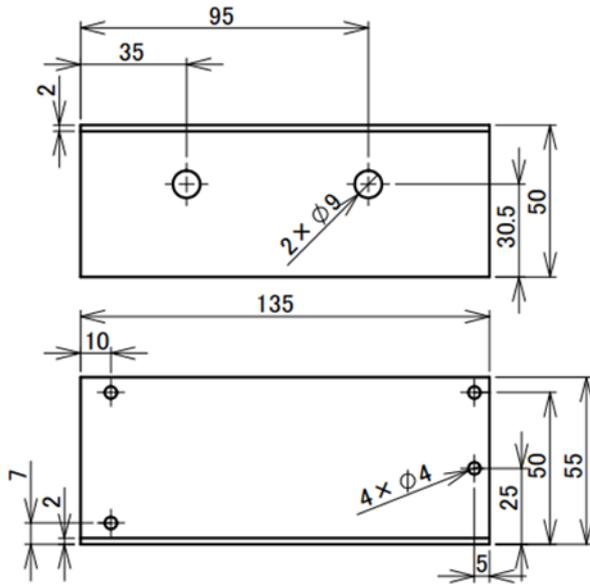


図 2.21 アングル 2

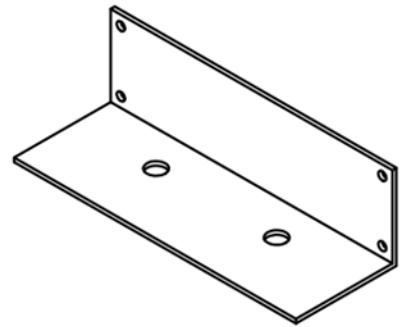
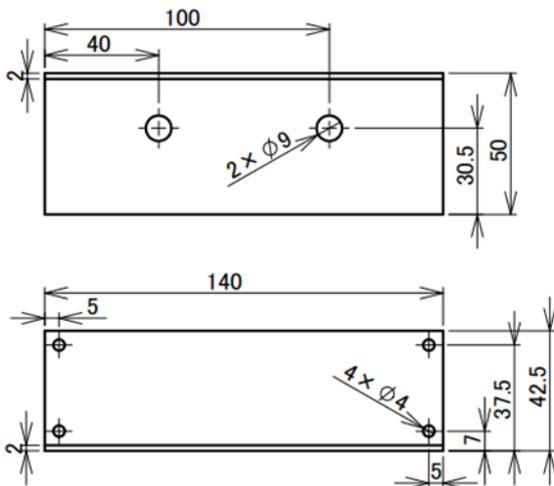


図 2.22 アングル 3

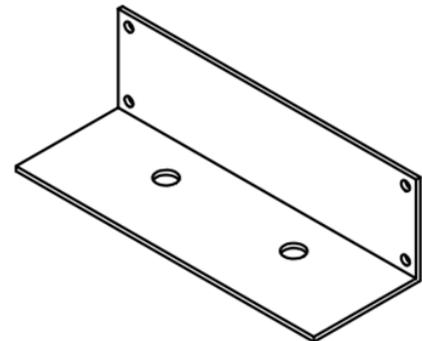
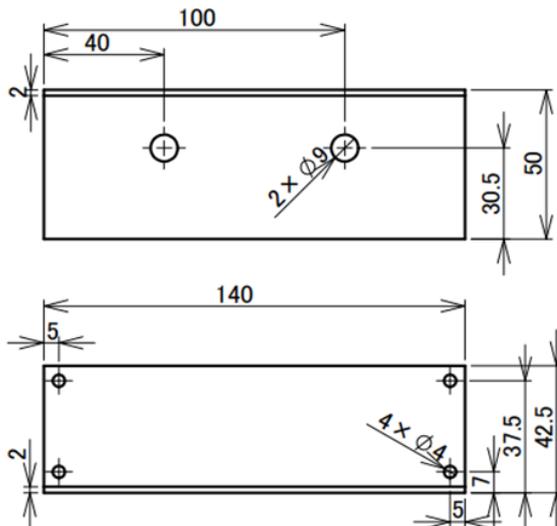


図 2.23 アングル 4

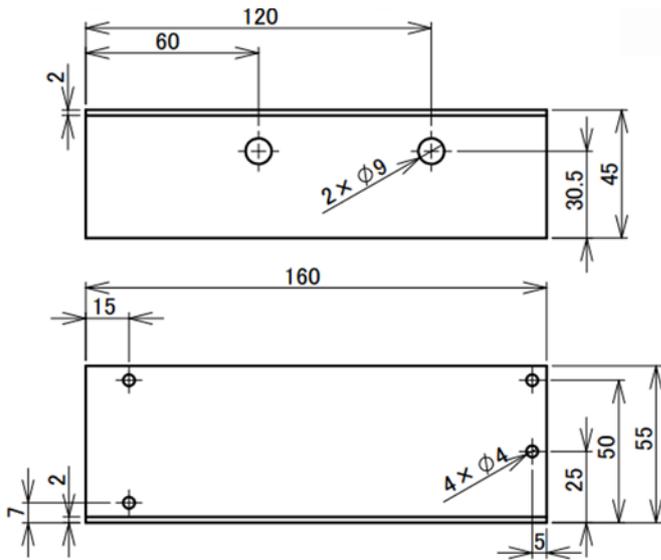


図 2.24 アンゲル 5

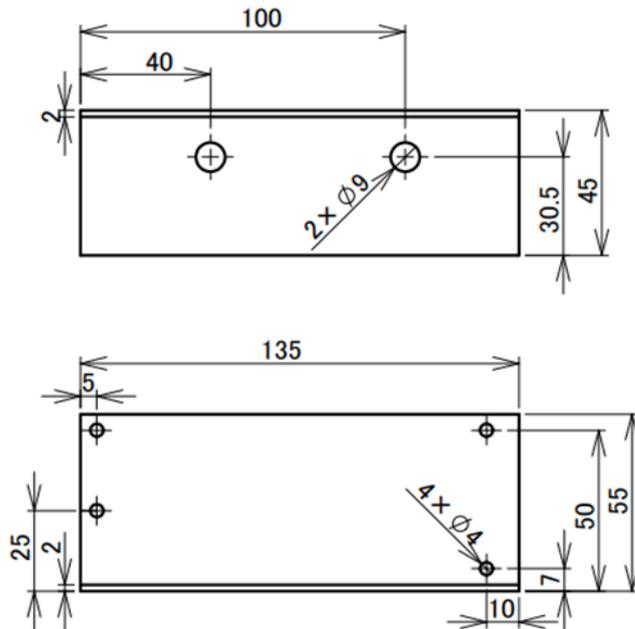
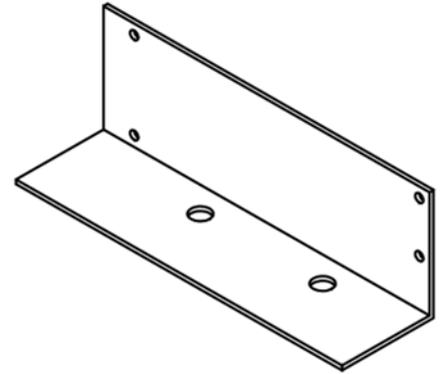


図 2.25 アンゲル 6

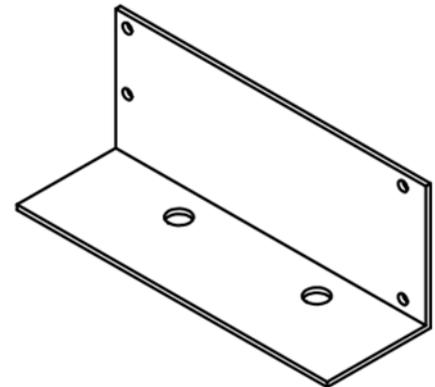
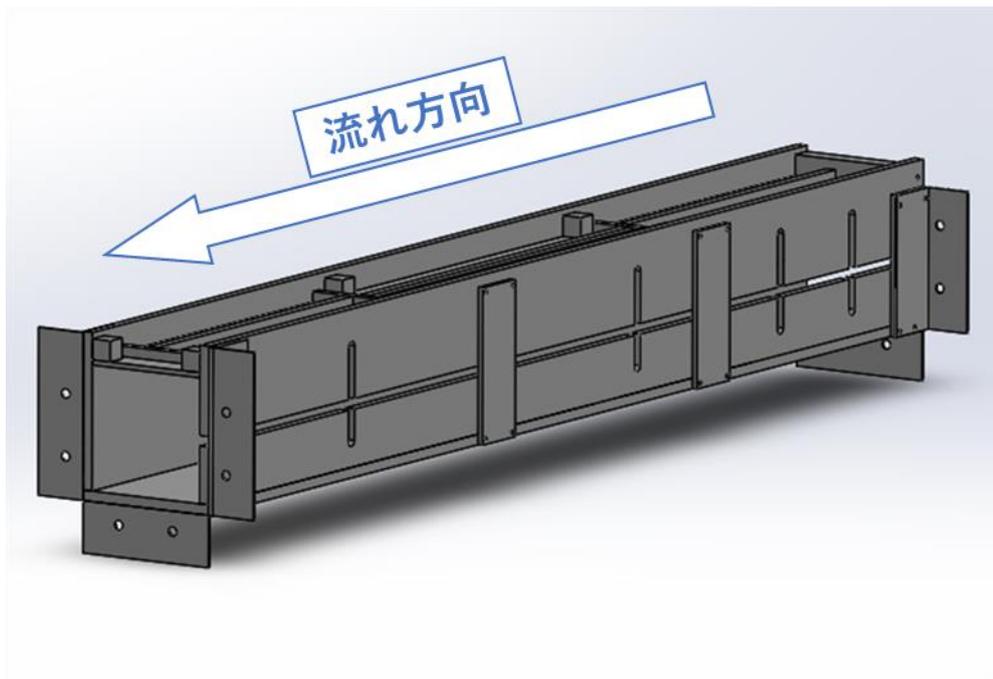


図 2.20～2.25 は風洞装置，乱流生成装置との締結面となるアンゲルである．アンゲルは，テストセクションの両側面と底面に3つずつ取り付け，ボルトで締結できるように $\phi 9$ の穴を設けた．なお，天板に傾斜をつけることができるよう，テストセクションの天面にはアンゲルを設けていない．材料はいずれもアルミニウムである．

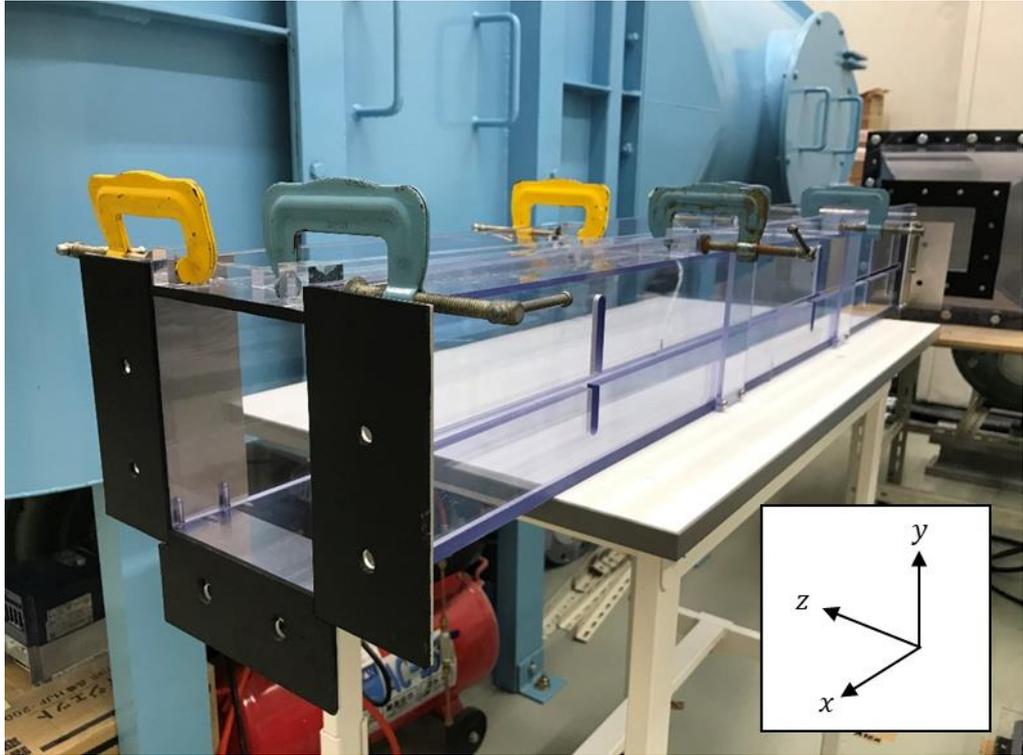
天板と支点角柱, 6つの立方体, 計12本のたわみ防止用角柱は, アクリル樹脂用接着剤を用いて接着した. また, 天板は立方体と側板を50mmクランプにより6箇所固定することで固定した.

図2.28に完成したテストセクションを示す. また, 締結面には風が漏れないよう, ゴム板を取り付けた. さらに, テストセクションの最上流部かつ下流側をみて左下を原点とし, 図2.28(b)のように流れ方向を x 軸, 高さ方向を y 軸, 幅方向を z 軸とする. 以降, 距離の表記について, 乱流生成装置の流路の1辺120mmを代表値 H とし, これを用いて表すものとする.

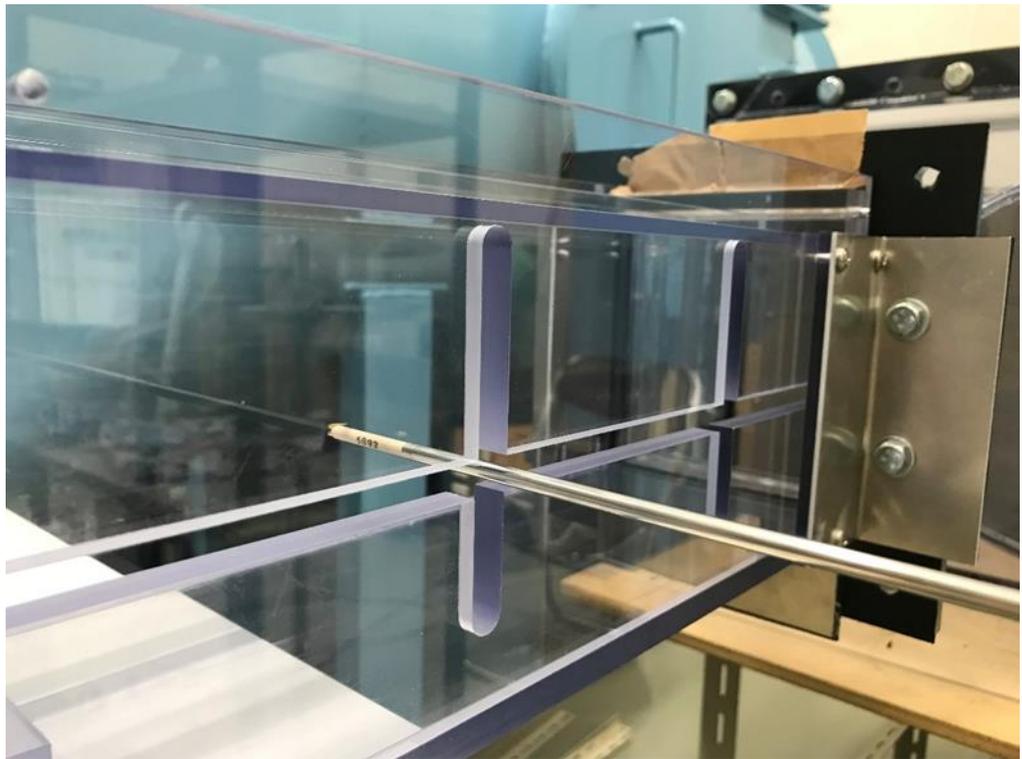


(a) 3Dモデル

(次項へ続く)



(b) 全体図



(c) 計測器を通すための溝
図 2.28 テストセクション

2.1.2 ピトー管による風速の計測

本実験では2つの方法で風速の計測を行った。以下にピトー管を用いた風速の計測について示し、2.3.1では熱線流速計を用いた風速の計測について示している。

図2.29のピトー管と図2.30のU字マンノメータを用いて風速の計測を行った。室温と大気圧の計測には図2.31のLAD WEATHER SENSOR MASTER IV（クラージュ社製）を、エタノール温度は、図2.32のように三角フラスコにエタノールを入れ、赤液棒状温度計を用いて計測した。また、U字マンノメータの液面高さの計測には図2.33の顕微鏡（カートン光学NRM-D-2XZ）を用いた。



図 2.29 ピトー管



図 2.30 U字マンノメータ



図 2.31 気温・大気圧計



図 2.32 赤液棒状温度計



図 2.33 計測用顕微鏡

以下に，風速 u の算出に至るまでの計算式を示す．

$$1[atm] = 760[Hgmm] = 1013[hPa] \quad (2.1)$$

より， $P_{Hg}[Hgmm]$ は，大気圧 $P[hPa]$ を用いると

$$P_{Hg} : P = 760 : 1013 \quad (2.2)$$

$$P_{Hg} = \frac{760}{1013} P \quad (2.3)$$

圧力 $P[Pa]$ ，空気密度 $\rho[kg/m^3]$ ，温度 $t[^\circ C]$ ，気体定数 R とすると，状態方程式より

$$P = \rho R(t + 273.15) \quad (2.4)$$

$$\rho = \frac{P}{R(t + 273.15)} \quad (2.5)$$

標準状態 $0[^\circ C]$ ， $1[atm]$ における空気密度は $1.293[kg/m^3]$ であるから

$$\rho : 1.293 = \frac{P}{R(t + 273.15)} : \frac{760}{R(0 + 273.15)} \quad (2.6)$$

$$\rho = 1.293 \times \frac{273.15}{760(t + 273.15)} P \quad (2.7)$$

エタノール温度 t_e ，体積濃度98%におけるエタノール密度 ρ_e は，国際アルコール表から決定した．

マノメータ初期水位との水位差を $h_{12}[mm]$ ，エタノール密度と空気密度の差を ρ_{12} ，重力加速度 $g = 9.81[m/s^2]$ とすると，圧力差 $P_{12}[Pa]$ は

$$P_{12} = \rho_{12} g h_{12} \quad (2.8)$$

また，ベルヌーイの定理より

$$P_{12} = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (2.9)$$

よって，風速 u は

$$u = \sqrt{\frac{2P_{12}}{\rho}} \quad (2.10)$$

2.1.3 テストセクションの天板角度の決定

まず，図 2.34 のように一様流が管路を流れる場合を考える．

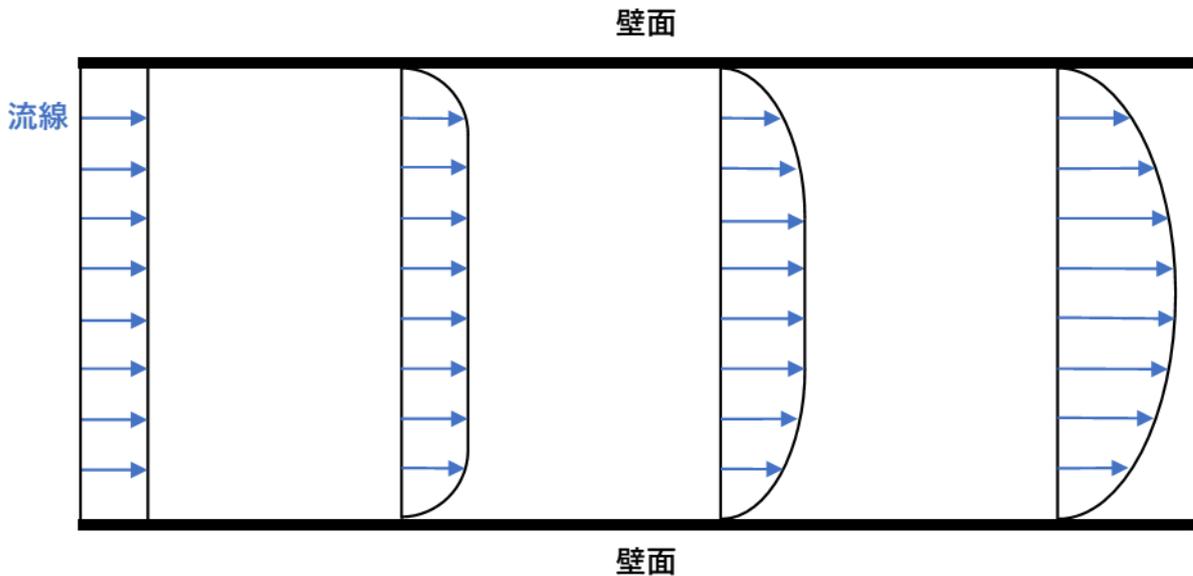


図 2.34 管路流れ

境界層（壁面から主流の速度に対し 99%までの厚さ）は下流に向かうにつれて発達し，速度分布が変化する．境界層が十分発達すると，速度分布は放物線状となりそれ以降は一定となる．このように下流に向かうにつれ，管路中心での流速はしだいに大きくなる．

風速の乱れを評価する本実験において管路中心での流速が大きくなることは望ましくない．ここで，管路内では流体の密度が変化しない非圧縮性流体の連続の式を用いる．

$$uS = \text{const} \quad (2.11)$$

u : 流速[m/s] S : 断面積[m²]

これは体積流量が一定ということを表しており，断面積が大きくなると流速は小さくなる．

これを利用してテストセクション中心での風速が一定となるよう，天板の角度（下流の高さ）を決定した．風速の計測にはピトー管を用い， $x = 1H$ の位置で6m/sとなるよう風洞装置の出力を設定したのち，天板の角度を変えながら $x = 2H, 4H, 8H$ の位置で計測を行った．

計測結果を表 2.1 に示し、それらをプロットしたものを図 2.35 に示す.

表 2.1 各位置での風速

下流高さ [mm]	計測位置 x [mm]	マンメータ水位 [mm]	圧力差 [Pa]	風速 [m/s]
120	1H	39.09	22.31	6.00
	2H	39.10	22.39	6.01
	4H	39.25	23.56	6.17
	8H	39.60	26.28	6.51
130	1H	39.09	22.31	6.00
	2H	39.10	22.39	6.01
	4H	39.14	22.70	6.05
	8H	39.38	24.57	6.30
134	1H	39.09	22.31	6.00
	2H	39.09	22.31	6.00
	4H	39.10	22.39	6.01
	8H	39.09	22.31	6.00
135	1H	39.09	22.31	6.00
	2H	39.04	21.93	5.95
	4H	38.93	21.07	5.83
	8H	38.99	21.54	5.90
140	1H	39.09	22.31	6.00
	2H	39.08	22.24	5.99
	4H	39.01	21.69	5.92
	8H	38.96	21.30	5.86

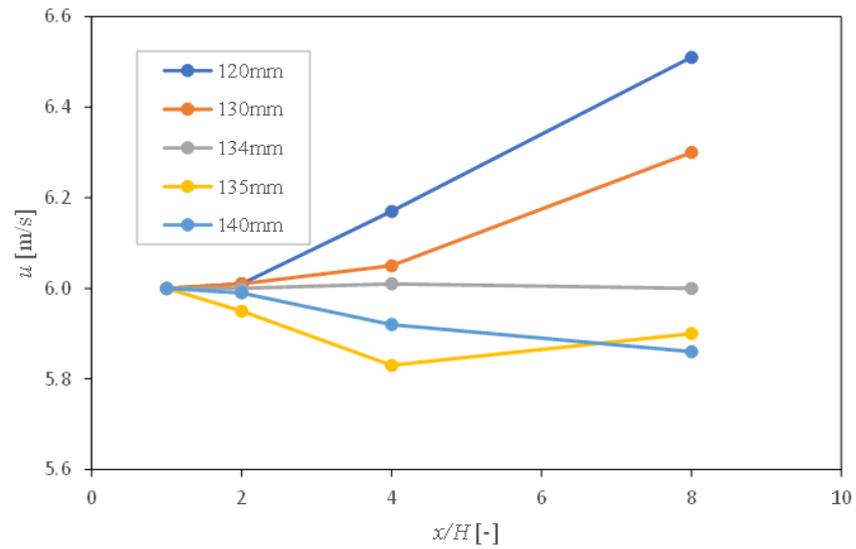


図 2.35 テストセクション下流側の高さと主流方向の風速分布

図 2.35 より，下流の天板高さは風速がおおよそ一定となっている134mmとした．また，天板の傾斜角は下式より0.668°である．

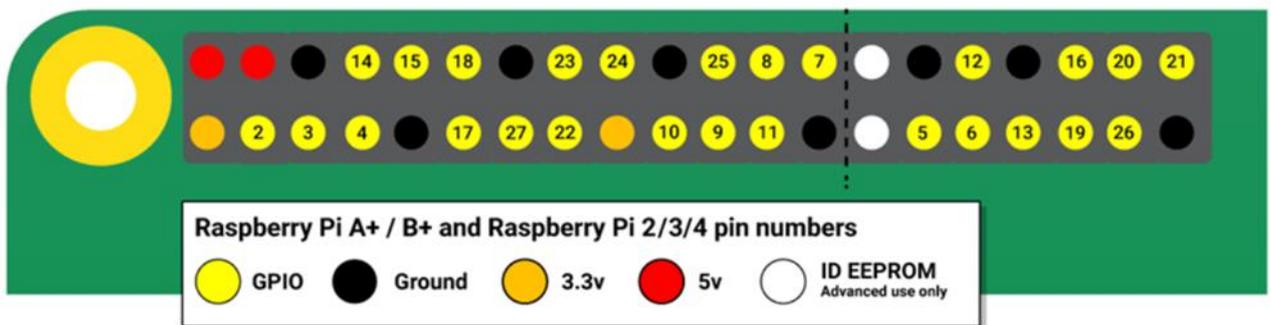
$$\arctan \frac{134 - 120}{1200} \cong 0.668^\circ \quad (2.12)$$

2.2 乱流生成装置の制御システムの構築

乱流生成装置の回転翼の制御には Raspberry Pi4 と python を用いた。以下に使用した電子部品について示す。



(a) 全体図

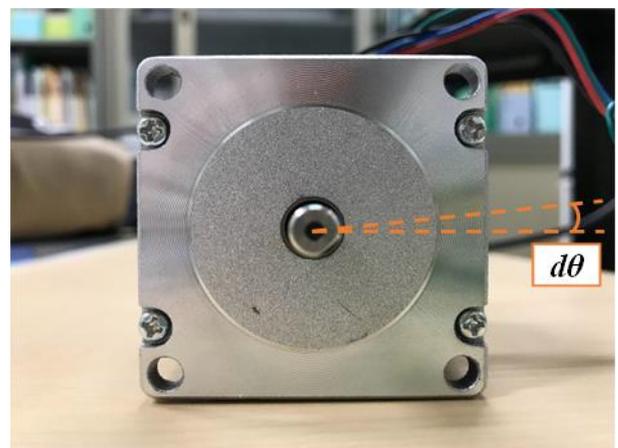


(b) GPIOpin の名称⁷⁾

図 2.36 Raspberry Pi4

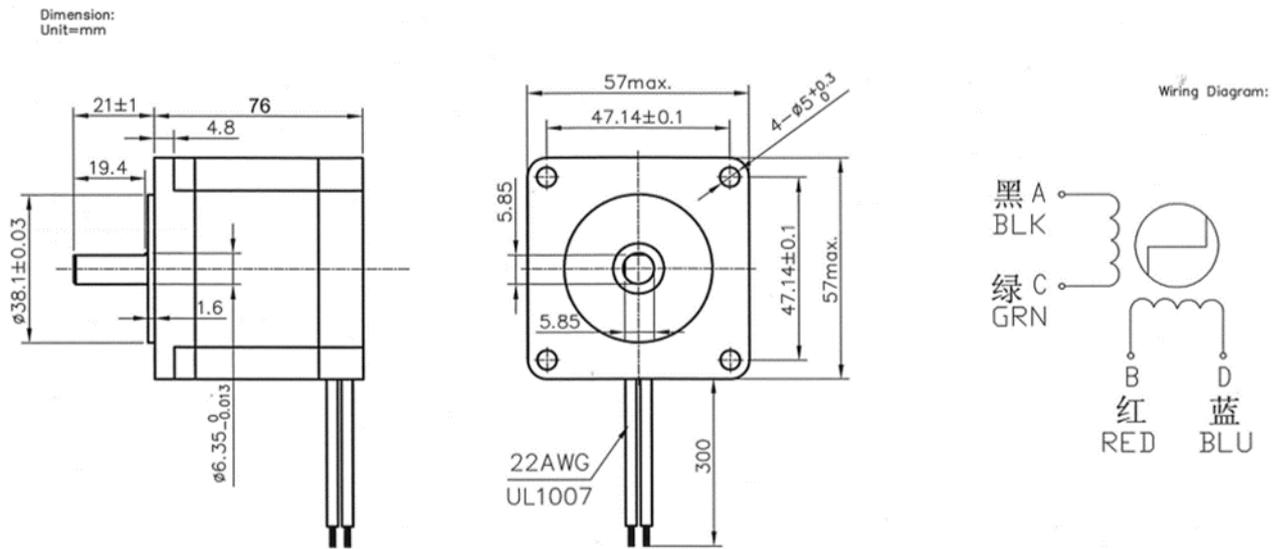


(a) 全体図



(b) 基準ステップ角 $d\theta$

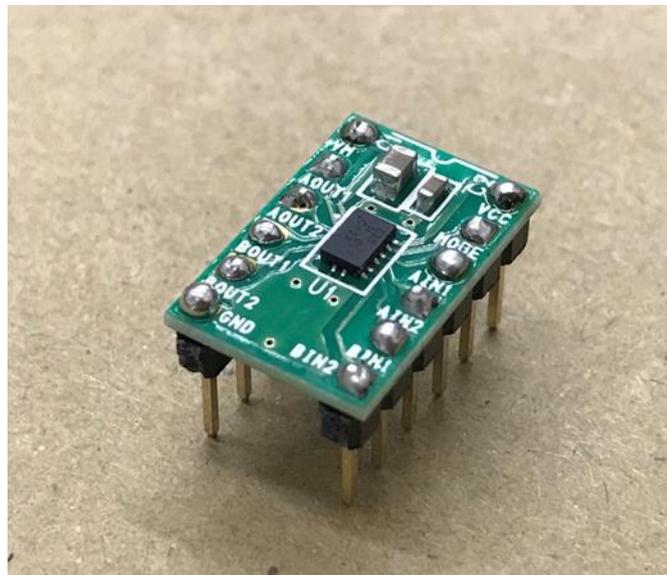
(次項へ続く)



(c) 寸法

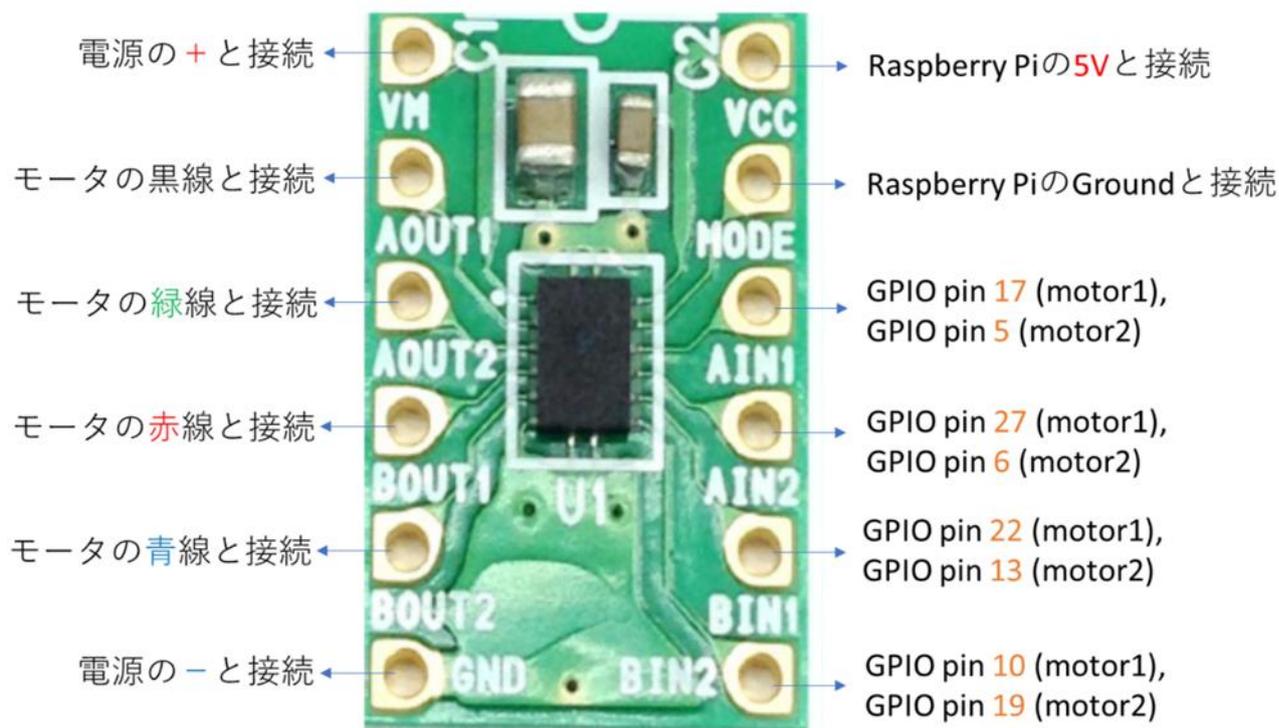
図 2.37 バイポーラ・ステッピングモータ (ST-57BYG076)

ステッピングモータとは、電流を流す相を切り替えることで一定角度ずつ回転するモータである。本実験で使用するステッピングモータの分解能は $200p/rev$ であり、1回転 (360°) を 200 分割した 1.8° (この角度を基準ステップ角度という) ほどの回転が可能である。基準ステップ角が小さいほど滑らかでより精度の高い回転を行うことができる。



(a) 全体図

(次項へ続く)



(b) ドライバ接続先

図 2.38 2回路DCモータ バイポーラ・ステッピングモーター ドライバ (DRV8835)

表 2.2 ドライバPinの名称と機能

ピン	名称	機能	ピン	名称	機能
1	VM	モータ電源	7	VCC	ロジック電源
2	AOUT1	A出力1	8	MODE	モード設定
3	AOUT2	A出力2	9	AIN1	A入力1
4	BOUT1	B出力1	10	AIN2	A入力2
5	BOUT2	B出力2	11	BIN1	B入力1
6	GND	グラウンド	12	BIN2	B入力2

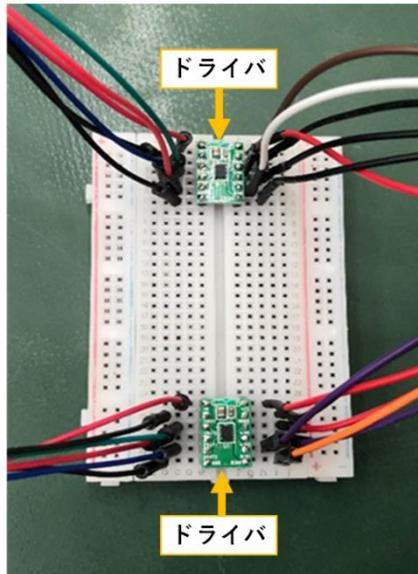


図 2.39 ブレッドボード

本実験で用いたプログラミングコードを、論文の最後に付録 A として示す。

以下に本実験で使用したコンパクト電源および操作方法を示す。



図 2.40 カスタム社製 DPS-3005



図 2.41 菊水電子工業社製 PMC35-1

カスタム社製 DPS-3005

- 1) CURRENT, VOLTAGE を反時計回りにいっぱいに回す。
- 2) POWER を押して電源を入れる。
- 3) CURRENT を赤ランプが消灯するまで時計回りに回す。
- 4) 緑ランプが点灯していることを確認し, VOLTAGE を時計回りに回して電圧を 11.0V に設定する。
- 5) POWER を押し, 電源を切る。
- 6) +出力端子, -出力端子にワニロクリップを取り付け, その終端同士を接触しショートさせる。
- 7) ショートさせたまま POWER を押し, 電源を入れる。
- 8) CURRENT を時計回りに回して電流を 0.40A に設定する。
- 9) POWER を押して電源を切り, ショートを外す。
- 10) 回路に接続し, POWER を押して出力する。出力電圧 0~30.0V, 出力電流 0~5.00A

菊水電子工業社製 PMC35-1

- 1) CURRENT, VOLTAGE を反時計回りにいっぱいに回す。
- 2) OUTPUT がオフになっていることを確認し, POWER を押して電源を入れる。
- 3) A/V を押して電圧計を選択する。
- 4) LIMIT を押しながら VOLTAGE を時計回りに回し, 電圧を 11.0V に設定する。
- 5) A/V を押して電流計を選択する。
- 6) LIMIT を押しながら CURRENT を時計回りに回し, 電流を 0.4A に設定する。
- 7) OUTPUT を押して出力する。出力電圧 0~35.0V, 出力電流 0~1.0A

2.3 熱線流速計

2.3.1 熱線流速計による風速の計測

電流を流すことによって加熱された細い金属線（熱線）を流体中に置くと、流れの冷却作用によって、熱線の温度が下がるとともに電気抵抗値も変化する。この冷却効果は速い流速ほど大きくなる。この性質を利用して流速を測定する装置が熱線流速計である。ここで用いる熱線は、タングステンや白金合金製で、直径 $2\sim 10\mu\text{m}$ 、長さ 1mm 程度の細線であるため熱容量が小さく周波数特性がよいので流れの乱れ計測に適している。また、ピトー管では測定困難な低速流の測定にも精度が出るため、流速範囲は低速から高速まで広範囲におよぶ。

熱線は、図 2.42 に示すようなホイートストン・ブリッジにおける抵抗のひとつである R を構成し、熱線を通る電流 I と熱線に対し垂直にあたる流速 u との関係は次式で表せる。

$$I^2 R / (R - R_0) = A + B u^n \quad (2.13)$$

この式は King の式と呼ばれ、一般に $n = 0.5$ をとるが低速流や高速流では n がこの値から外れる。ここで R_0 は熱線が流体温度と同温度のときの抵抗、 A, B は熱線が一定温度の流体中にあるときは定数であり、流速 u を変化させた測定により決定できる。また、この A, B は個々の熱線によっても変化するため、そのつど実験的に A, B を求めなければいけない。

本実験で使用する定温度形熱線流速計は、流速の変化に伴う熱線の温度・抵抗変化により AB 間に生じる非平衡電圧を、補償増幅器を通してブリッジの電源端子に戻し、熱線の温度・抵抗を一定にする方式である。これにより、ブリッジ電圧を測定して流速を求めることができる。

対して、定電圧形という方式があるが、定温度形に比べ回路が複雑で、周波数特性に劣るため現在使用されているのはほとんどが定温度形である。

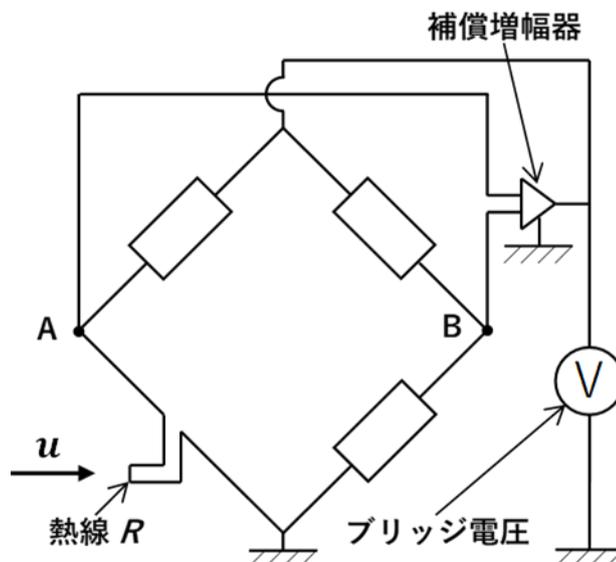


図 2.42 定温度形熱線流速計⁸⁾

以下に、風速 u の算出に至るまでの過程を示す.

- 1) 風速の校正を行うために、風速 0m/s と実験で使用する風速の前後2つの風速 u_1, u_2 (本実験で用いる風速は 6m/s なので 4m/s と 8m/s) でそれぞれ電圧を計測する.
なお、本実験では計測サンプリング周波数は 10kHz 、取り込み時間は 20s で行った.

- 2) u_1, u_2 の対数をとる

$$\ln(u_1) \quad (2.14)$$

$$\ln(u_2) \quad (2.15)$$

- 3) 風速 0m/s での平均電圧を E_0 、2つの風速での平均電圧をそれぞれ E_1, E_2 とし、2乗の差の対数をとる

$$\ln(E_1^2 - E_0^2) \quad (2.16)$$

$$\ln(E_2^2 - E_0^2) \quad (2.17)$$

- 4) 式(2.14)～(2.17)について Excel の SLOPE 関数を用いて傾き n_1 、INTERCEPT 関数を用いて切片 C を算出する
- 5) 傾き n_1 の逆数を n とする

$$n = \frac{1}{n_1} \quad (2.18)$$

- 6) 切片 C を指数関数で表し、 K_1 とする

$$K_1 = \exp(C) \quad (2.19)$$

- 7) E_u を本実験で計測した電圧と仮定すると、次式より風速を算出できる.

$$u = K_1 \times (E_u^2 - E_0^2)^{\frac{1}{n}} \quad (2.20)$$

2.3.2 熱線流速計の設定

以下に使用する機器と操作方法を示す。

- ・CTAユニット (KANOMAX社製 Model 1008)
- ・ショートプローブ (KANOMAX社製 Model 1210-60W)
- ・熱線プローブ (KANOMAX社製 Model 0248-T5)



図 2.43 CTAユニット



図 2.44 ショートプローブ(上)と熱線プローブ(下)

- 1) ショートプローブを取り付ける.
- 2) POWER を ON にする.
- 3) INPUT SELECTOR が 4, PROBE RESISTANCE が 0000 になっていることを確認する.
- 4) つまみを回し, STANDBY から R MEAS に設定する.
- 5) REF SET を回してモニターの電圧を 2.00V に設定し, 安定するまで 10 分ほど待つ.
- 6) TEMP R MEAS を下げて電圧を確認する.
- 7) マイナスドライバーで ZERO を回し, 電圧を調整する.
TEMP R MEAS を下げている時と下げている時, 共に 2.00V で変化しなくなるまで 6) と 7) を繰り返す.
なお, TEMP R MEAS を下げたまま調整してはいけません.
- 8) ショートプローブを熱線プローブに取り換える.
- 9) 電圧が 1.00V 以上になっていることを確認する.
- 10) TEMP R MEAS を下げている時と下げている時に同じ電圧なるよう PROBE RESISTANCE の歯車を左から順に回し, 調整する.
- 11) 3 分ほど待ったのち, 10) で設定した PROBE RESISTANCE の値を 1.5 倍して設定する.
- 12) R MEAS を RUN に設定する.

2.4 風洞特性の評価

本実験を行うにあたり，風洞装置がどのような風を生成しているのかを把握する必要があるため，乱流生成装置を取り付けていない状態において流れの評価を行った．さらに，乱流生成装置を取り付け，回転翼の角度 θ が 0° での流れの評価も行った．

以下はすべて風速 6m/s で行い，風速の計測には熱線流速計を用いた．また，風洞装置始動後約 5s 経過したのち計測を開始した．

ここで，平均風速 $\bar{u}[\text{m/s}]$ ，標準偏差 $\sigma[-]$ ，乱流強度 $I[\%]$ の算出式を以下に示す．

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_0^n u \quad (2.21)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_0^n (u - \bar{u})^2} \quad (2.22)$$

$$I = \frac{\sigma}{\bar{u}} \times 100 \quad (2.23)$$

u : 瞬間風速 $[\text{m/s}]$ n : データ数

まず，風洞装置にテストセクションを取り付け $x = 1H, 2H, 4H, 8H$ ， $y, z = H/2$ の位置で風速の計測を行った．計測サンプリング周波数は500Hz，取り込み時間は20sで行った．計測時，実験室に設置してある空調装置は稼働していた．

これらの計測結果を図 2.45 に示す．

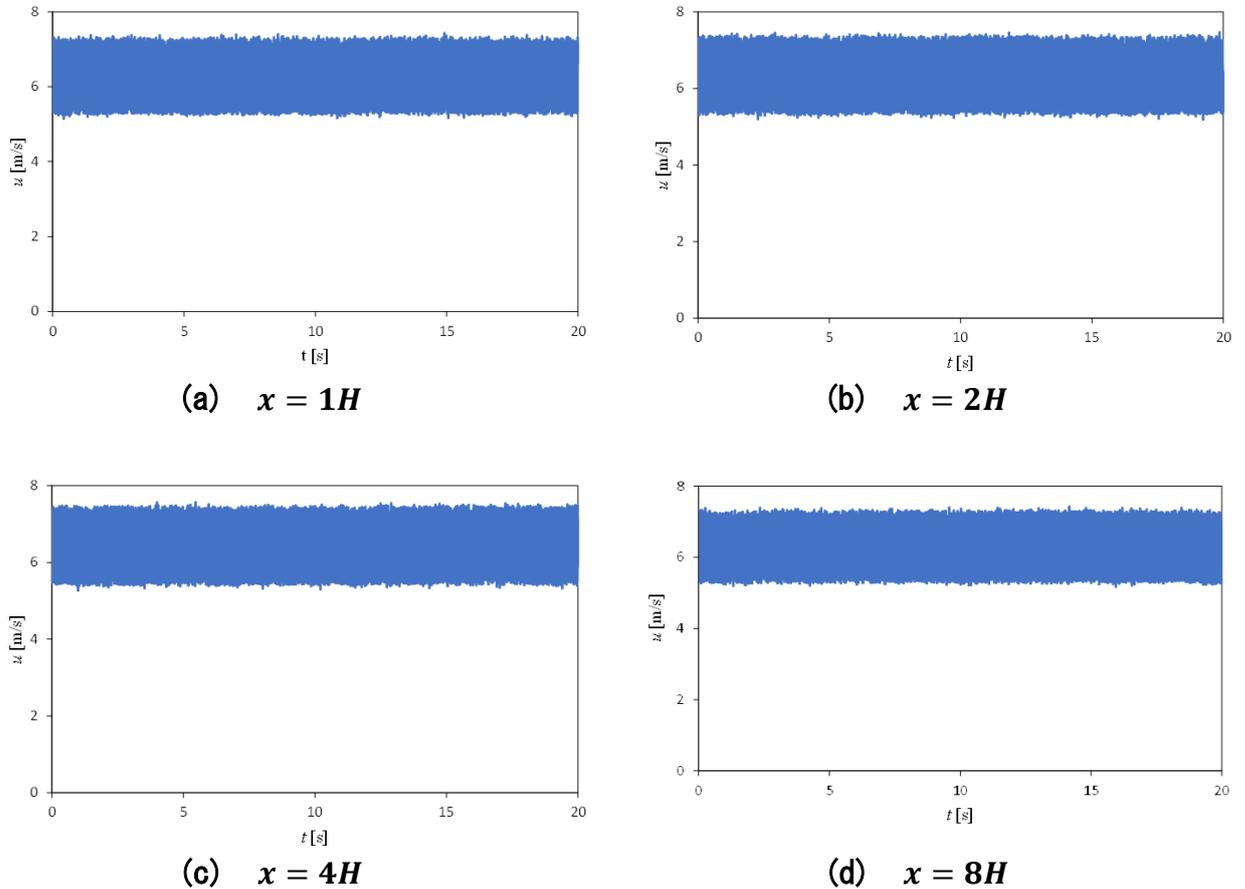


図 2.45 乱流生成装置なし（空調装置稼働）

各計測位置での平均速度，標準偏差，乱流強度を表 2.3 に示す．

表 2.3 流れ方向の平均速度と標準偏差，乱流強度

計測位置 x [mm]	平均風速 [m/s]	標準偏差 [m/s]	乱流強度 [%]
$1H$	6.27	0.684	10.9
$2H$	6.33	0.686	10.8
$4H$	6.42	0.691	10.8
$8H$	6.30	0.685	10.9

このように乱流生成装置を取り付けていない状態でも乱流強度が約11%と大きいため，回転翼の動作による風速の乱れを計測する本実験において望ましくない結果となった．

次に、この風速の乱れの原因が図 2.46 のように、実験装置の下流側に設置されている空調装置による風の影響であると考えたため、空調装置を停止し、再度同じ方法で計測を行った。

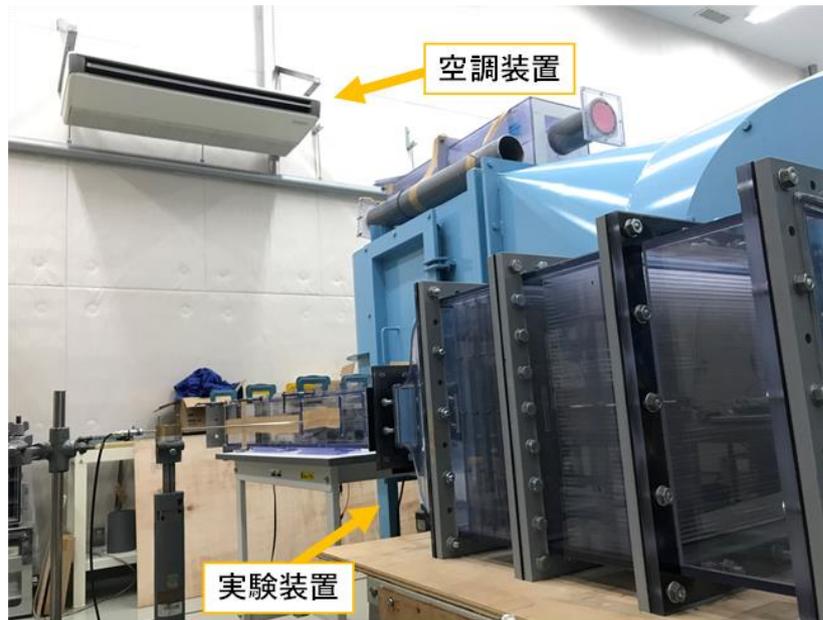


図 2.46 実験装置と空調装置

これらの計測結果を図 2.47 に示す。

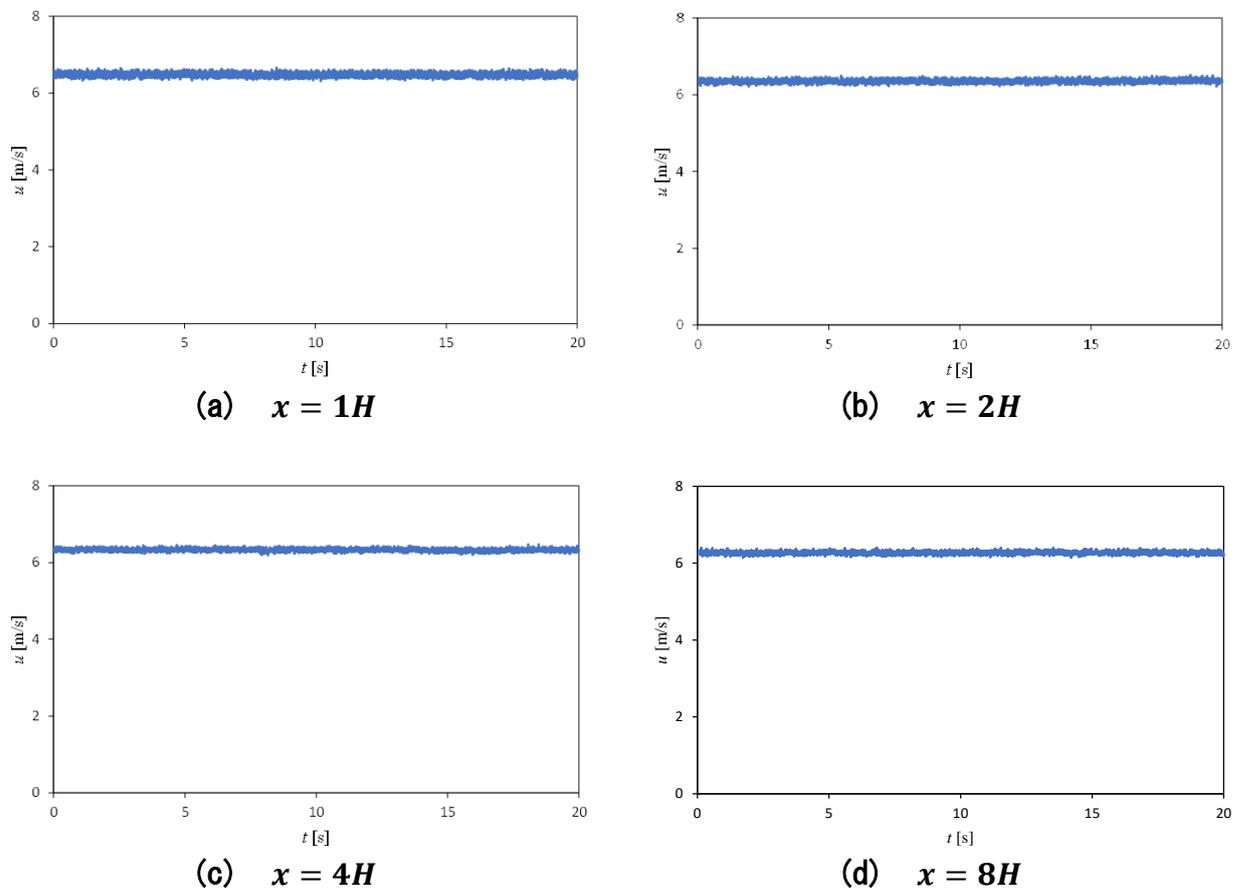


図 2.47 乱流生成装置なし (空調装置停止)

各計測位置での平均速度，標準偏差，乱流強度を表 2.4 に示し，乱流強度をプロットしたものを図 2.48 に示す。

表 2.4 流れ方向の平均速度と標準偏差，乱流強度

計測位置 x [mm]	平均風速 [m/s]	標準偏差 [m/s]	乱流強度 [%]
$1H$	6.48	0.0477	0.737
$2H$	6.36	0.0379	0.596
$4H$	6.33	0.0327	0.517
$8H$	6.27	0.0334	0.533

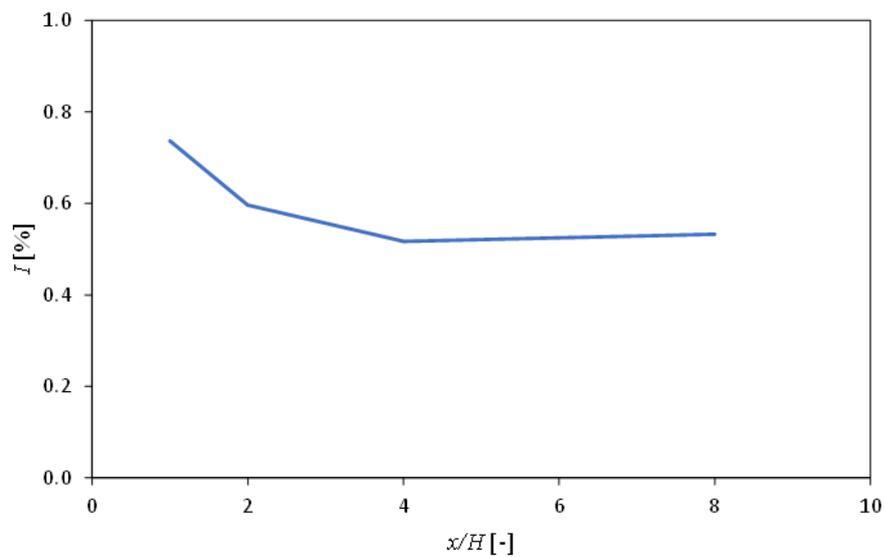


図 2.48 流れ方向の乱流強度

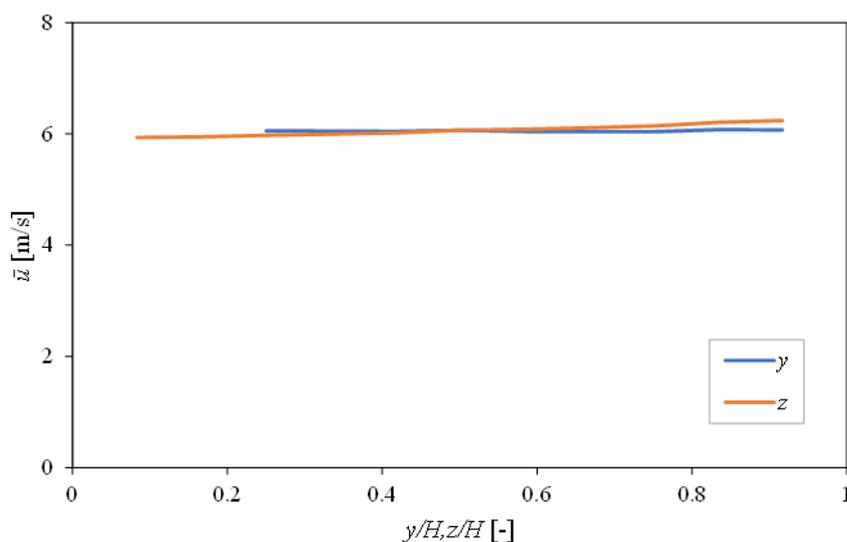
表 2.4, 図 2.48 より，乱流生成装置を取り付けていない状態での風速の乱れの原因が，実験室の空調装置によるものと分かった。また，下流ほど乱流強度が小さくなっており， $x = 4H$ 以降は乱流強度が一定になっていることが確認できた。

さらにテストセクション内の風速の乱れの推移を細かく調べるため、 $x = 1H$ の位置で y, z を $H/12$ ($= 10\text{mm}$) 刻みで変化させ、十字に計測を行った。これらの計測結果を表 2.5 に示し、これらをプロットしたものを図 2.49 に示す。なお、図 2.9 のように $y = H/12, 2H/12$ の位置には設計の都合上、計測器を通す溝を設けることができなかったため $y = 3H/12$ から計測を行った。

表 2.5 $x = 1H$ 断面の平均風速と乱流強度
(a) 平均風速 (b) 乱流強度

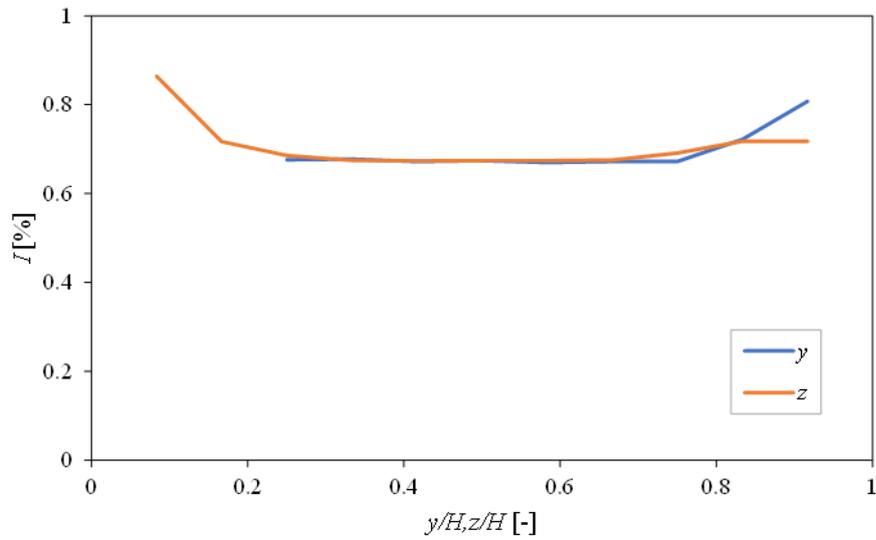
計測位置 [mm]	y [m/s]	z [m/s]
$H/12$		5.93
$2H/12$		5.95
$3H/12$	6.05	5.97
$4H/12$	6.05	5.99
$5H/12$	6.04	6.01
$6H/12$	6.06	6.06
$7H/12$	6.04	6.08
$8H/12$	6.04	6.11
$9H/12$	6.04	6.14
$10H/12$	6.08	6.20
$11H/12$	6.07	6.24

計測位置 [mm]	y [%]	z [%]
$H/12$		0.864
$2H/12$		0.717
$3H/12$	0.676	0.686
$4H/12$	0.677	0.674
$5H/12$	0.672	0.674
$6H/12$	0.674	0.674
$7H/12$	0.670	0.674
$8H/12$	0.672	0.675
$9H/12$	0.672	0.691
$10H/12$	0.722	0.718
$11H/12$	0.807	0.718



(a) 平均風速

(次項へ続く)



(b) 乱流強度

図 2.49 $x = 1H$ 断面の平均風速と乱流強度

図 2.49(b)のように乱流強度は壁面に近いほど大きく、壁面近傍での圧力勾配による影響を確認することができた。また、図 2.49(a)から平均風速は z が大きくなるほど大きくなっており、これは計測器を通すために設けた幅 10mm の溝により流路に凹凸が生じていることによるものだと考えた。

そこで、図 2.50 のように $x = 1H$ の前後、上下の溝に発泡スチロールを詰めることで流路の凹凸を減らし、再度同じ方法で計測を行うことで溝による影響の評価を行った。

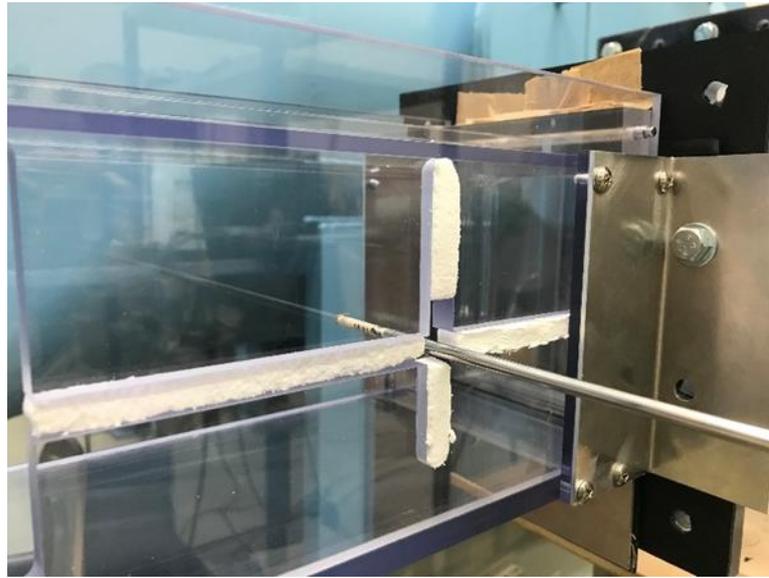


図 2.50 溝を塞いだ様子

これらの計測結果を表 2.6 に示し、これらをプロットしたものを図 2.51 に示す。

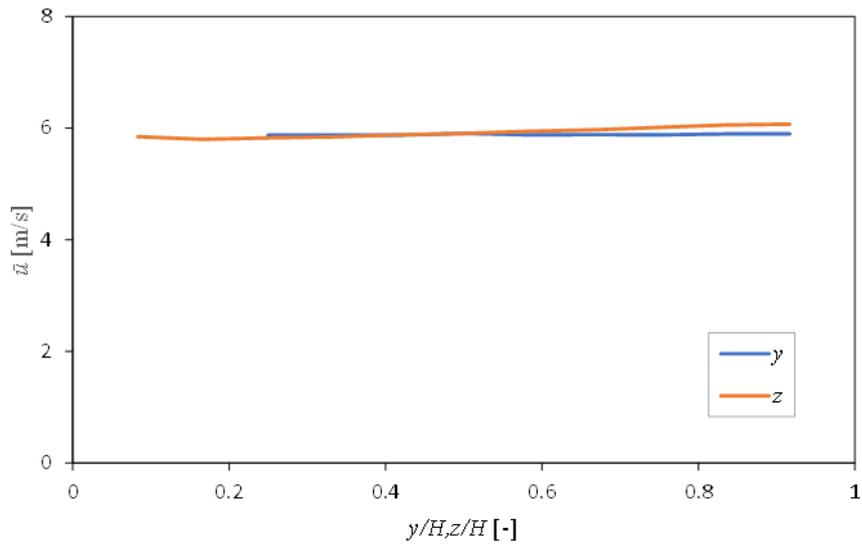
表 2.6 溝を塞いだ場合の $x = 1H$ 断面の平均風速と乱流強度

(a) 平均風速

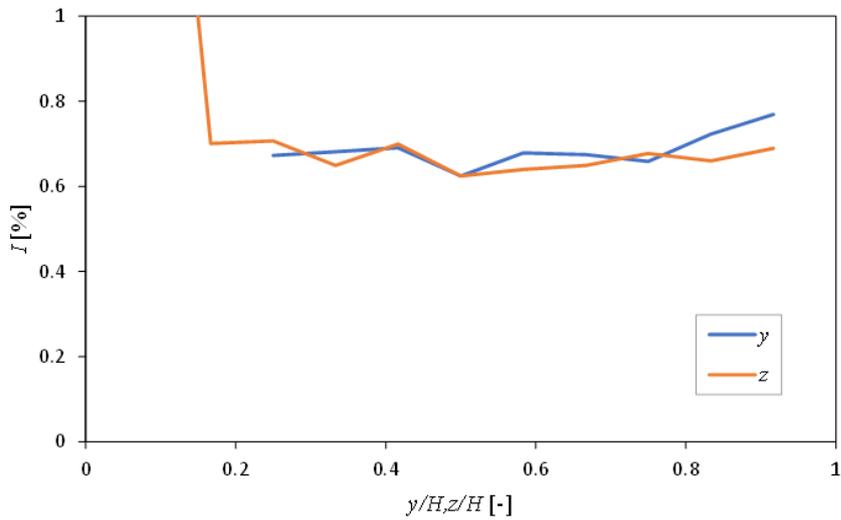
計測位置 [mm]	y [m/s]	z [m/s]
$H/12$		5.85
$2H/12$		5.80
$3H/12$	5.87	5.83
$4H/12$	5.88	5.84
$5H/12$	5.88	5.88
$6H/12$	5.91	5.91
$7H/12$	5.88	5.94
$8H/12$	5.89	5.97
$9H/12$	5.88	6.01
$10H/12$	5.89	6.06
$11H/12$	5.89	6.07

(b) 乱流強度

計測位置 [mm]	y [%]	z [%]
$H/12$		2.173
$2H/12$		0.700
$3H/12$	0.673	0.706
$4H/12$	0.681	0.649
$5H/12$	0.691	0.699
$6H/12$	0.624	0.624
$7H/12$	0.678	0.640
$8H/12$	0.674	0.649
$9H/12$	0.658	0.677
$10H/12$	0.723	0.660
$11H/12$	0.769	0.689



(a) 平均風速



(b) 乱流強度

図 2.51 溝を塞いだ場合の $x = 1H$ 断面の平均風速と乱流強度

図 2.51(a)のように側面の溝を塞いだ場合でも、 z が大きくなるにつれ、平均風速が小さくなっている。風洞装置の吹き出し口から比較的近い距離で風速の差が生じていることから、風洞装置自体の特性であると結論付けた。また、図 2.51(b)から乱流強度は流路の中心付近では0.6~0.7%と非常に小さいことから風速の乱れを評価する本実験において望ましい結果となった。なお、溝を塞いだ部分近傍で乱流強度が大きくなるのは、発泡スチロールの表面が粗いことによるものである。

次に，風洞装置とテストセクションの間に乱流生成装置を取り付け，回転翼の角度 $\theta = 0$ での風速の乱れの評価を行った． x は H （ $= 120\text{mm}$ ）刻み， $y, z = H/2$ の位置で風速の計測を行った．なお，計測サンプリング周波数は 1kHz ，取り込み時間は 10s で行った．なお，図 2.52 のように回転翼が流れに対して平行な（流れを妨げない）状態を回転翼の角度 $\theta = 0$ とした．

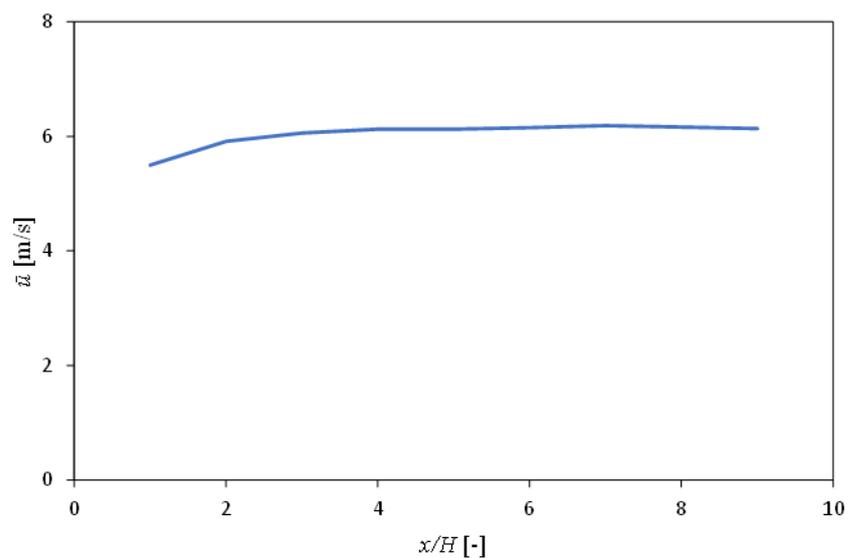


図 2.52 回転翼の角度 $\theta = 0$

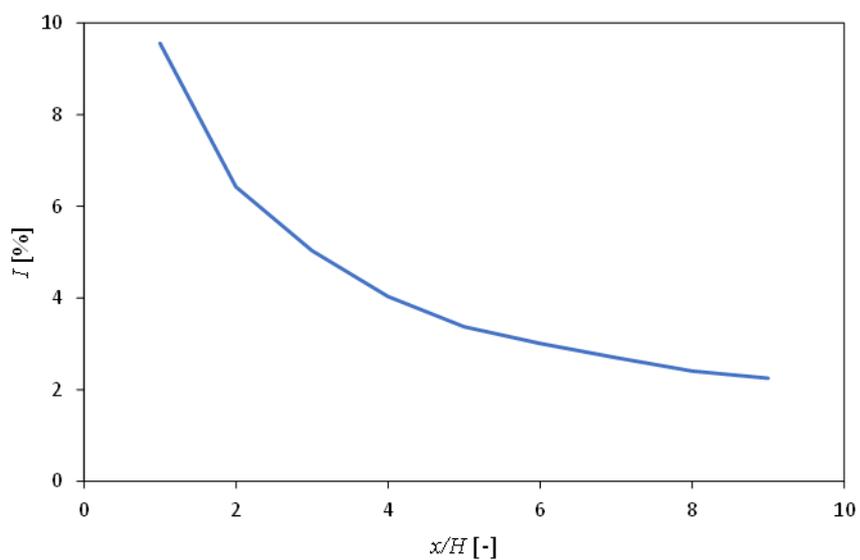
各計測位置での平均速度，標準偏差，乱流強度を表 2.7 に示し，平均風速，乱流強度をプロットしたものを図 2.53 に示す．

表 2.7 $\theta = 0$ での平均風速と標準偏差，乱流強度

計測位置 x [mm]	平均風速 [m/s]	標準偏差 [m/s]	乱流強度 [%]
$1H$	5.50	0.526	9.56
$2H$	5.91	0.380	6.43
$3H$	6.06	0.305	5.03
$4H$	6.13	0.247	4.03
$5H$	6.13	0.207	3.37
$6H$	6.15	0.185	3.01
$7H$	6.19	0.167	2.70
$8H$	6.16	0.148	2.40
$9H$	6.14	0.138	2.25



(a) 平均風速



(b) 乱流強度

図 2.53 $\theta = 0$ での平均風速と乱流強度

図 2.53 (a)のように乱流生成装置の付近では平均風速が小さく、距離が大きくなるにつれ安定した。また、図 2.53 (b)から乱流強度は2%に収束する傾向が確認できた。

2.5 風洞実験概要

本実験では、回転翼を3通りの回転角度、回転速度で動作させ、ステップ変化（ステップ運動）と周期変化（フラップ運動）における風速応答の計測を $x = 1H, 2H, 4H, 8H$, $y, z = H/2$ の位置で行った。また、風洞特性の評価を行った場合と同様に、風速の計測には熱線流速計を用い、風速 $6m/s$ で行うとともに、風洞装置始動後約 $5s$ 経過したのち計測を開始した。計測サンプリング周波数は $10kHz$ 、取り込み時間は $20s$ とした。それぞれの実験条件をまとめたものを表 2.8, 2.9 に示す。

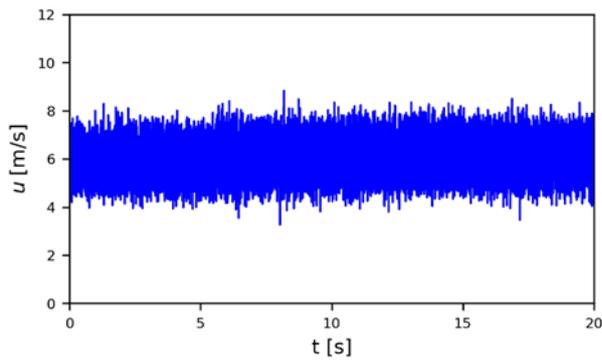
表 2.8 実験条件（ステップ運動）

Rotation angle [°]	Rotation speed [rpm]		
0 to 15	5	20	30
0 to 30	5	20	30
0 to 60	5	20	30

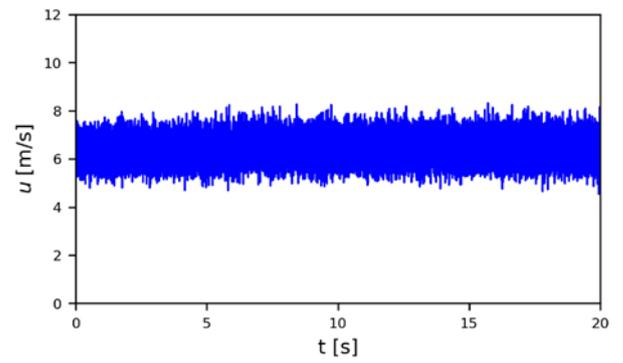
表 2.9 実験条件（フラップ運動）

Rotation angle [°]	Rotation speed [rpm]		
-15 to 15	10	20	30
-30 to 30	10	20	30
-60 to 60	10	20	30

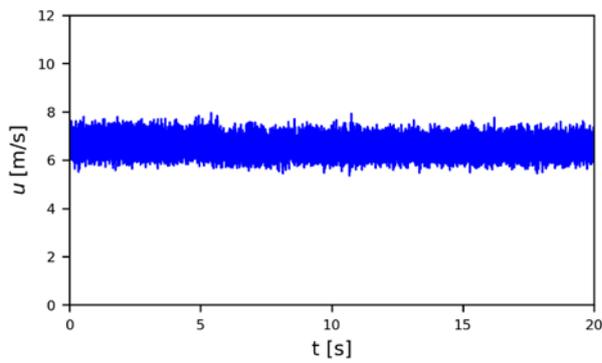
フラップ運動について、ステップ運動と同じ回転速度で実験を行う計画であったが、低回転速度ではモータの回転を回転軸に伝達することが困難であったため $10rpm, 20rpm, 30rpm$ の3通りとした。



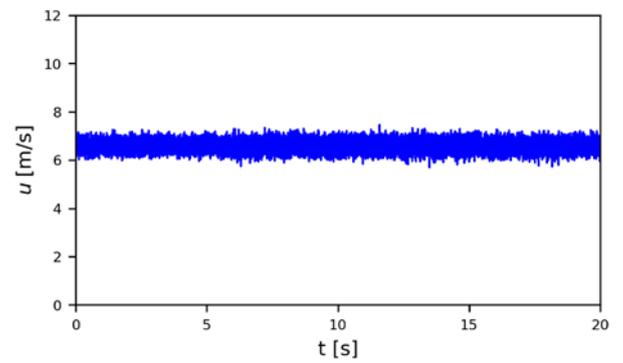
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

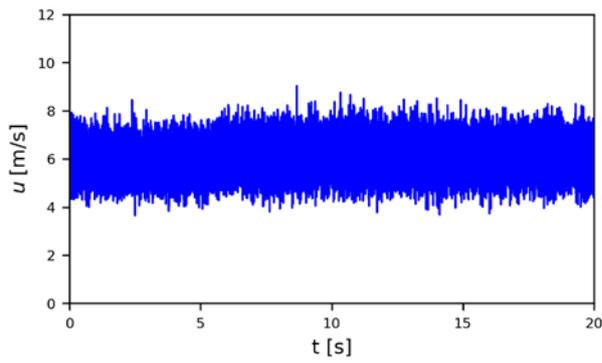


(c) $x = 4H$

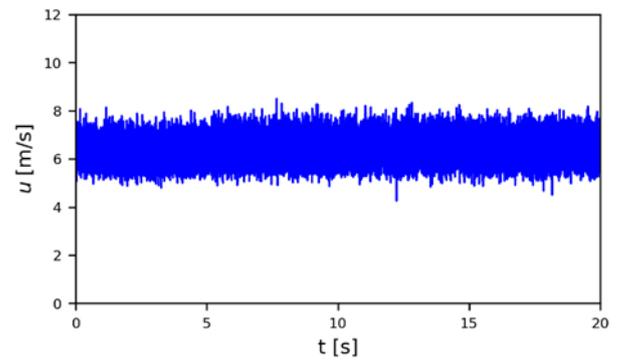


(d) $x = 8H$

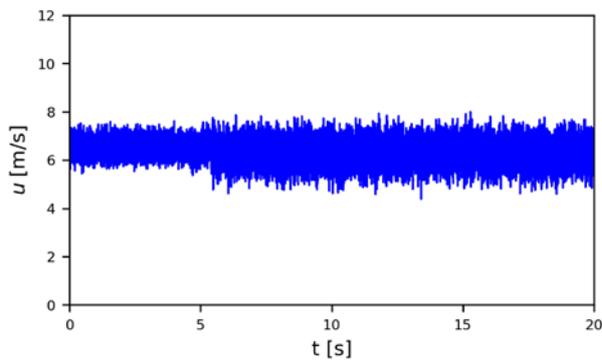
図 3.2 計測結果 (ステップ運動, 0° to 15° , 20rpm)



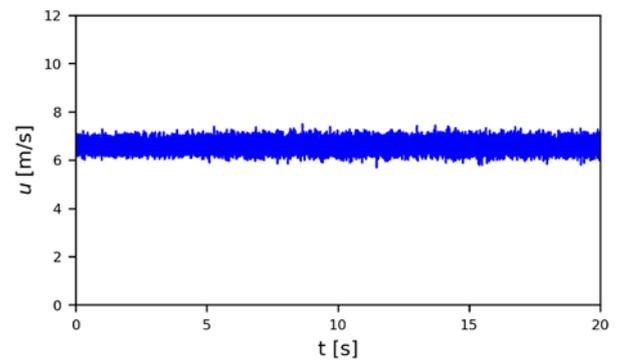
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

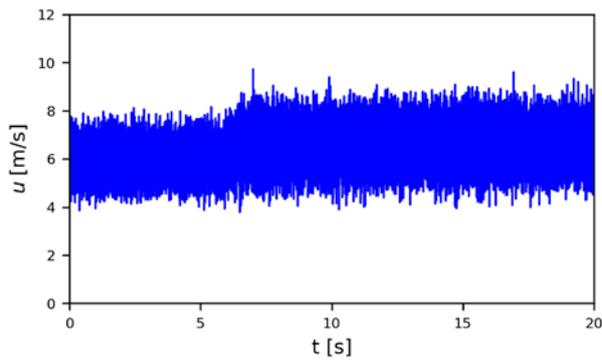


(c) $x = 4H$

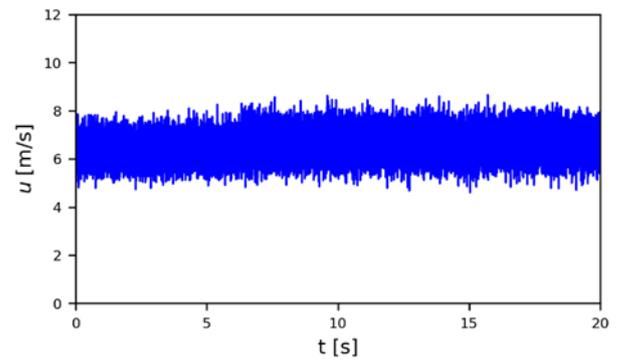


(d) $x = 8H$

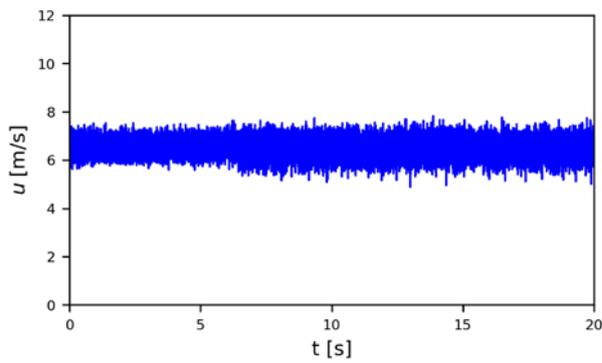
図 3.3 計測結果 (ステップ運動, 0° to 15° , 30rpm)



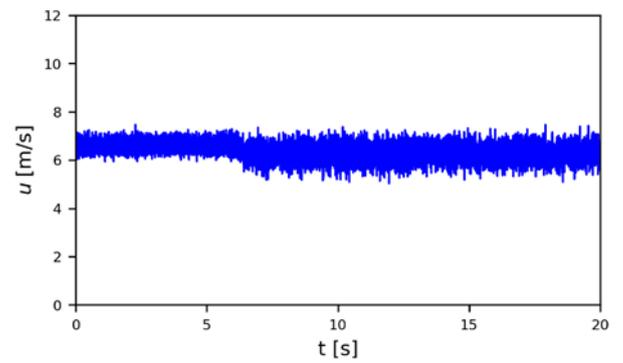
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

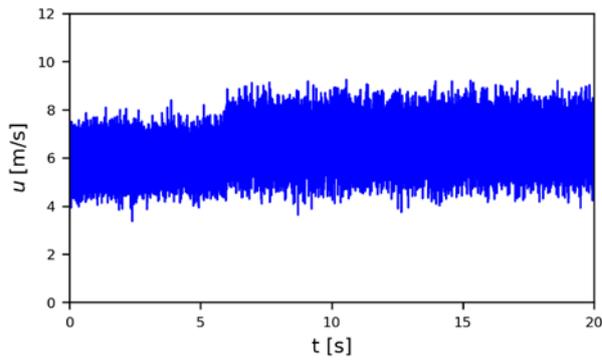


(c) $x = 4H$

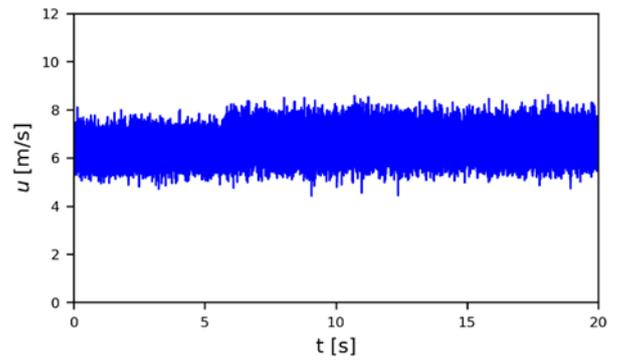


(d) $x = 8H$

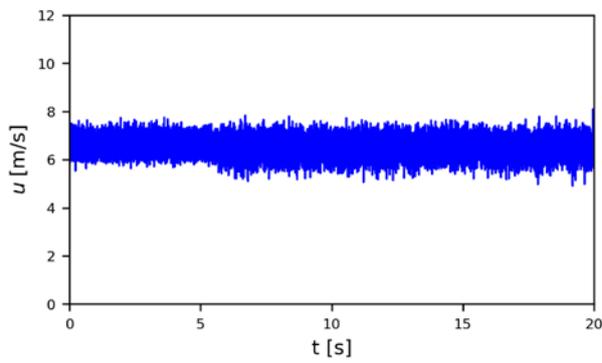
図 3.4 計測結果 (ステップ運動, 0° to 30° , $5rpm$)



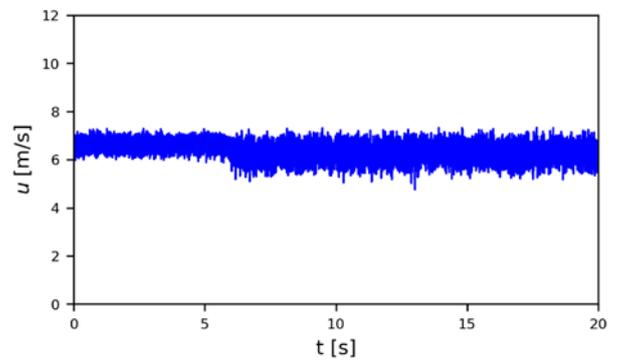
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

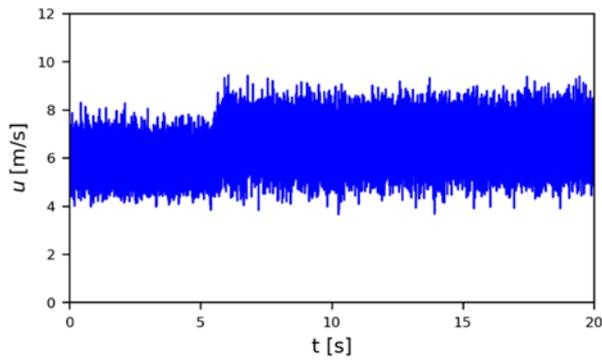


(c) $x = 4H$

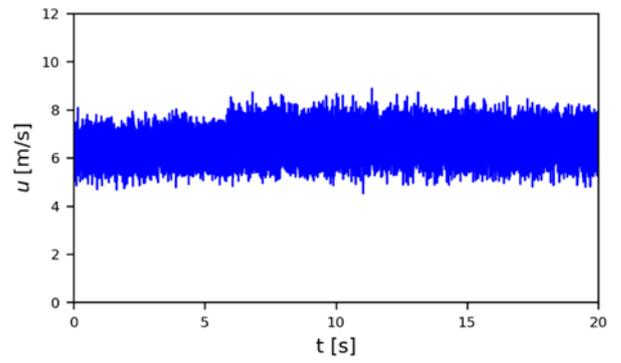


(d) $x = 8H$

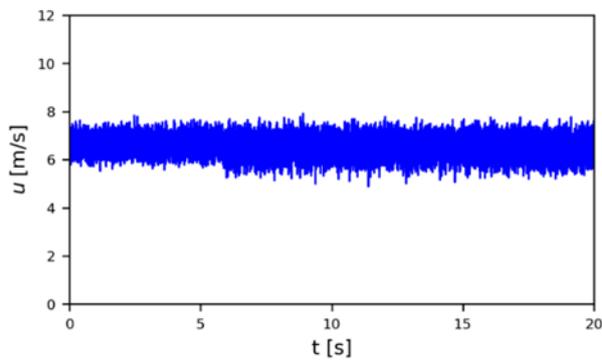
図 3.5 計測結果 (ステップ運動, 0° to 30° , 20rpm)



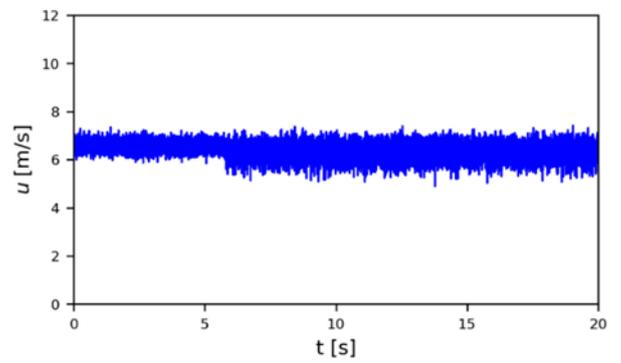
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

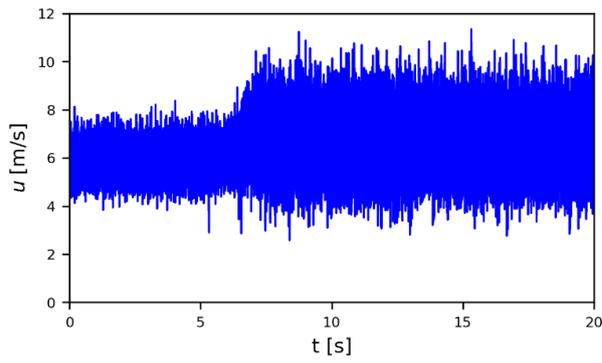


(c) $x = 4H$

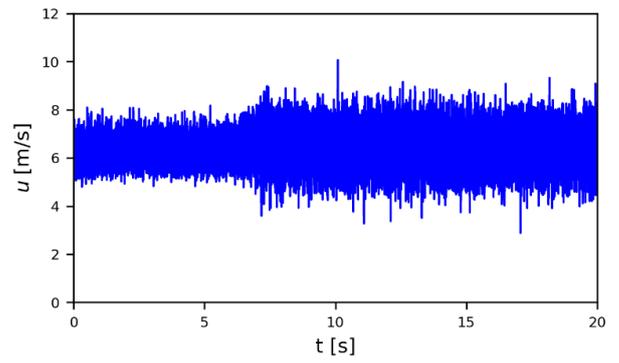


(d) $x = 8H$

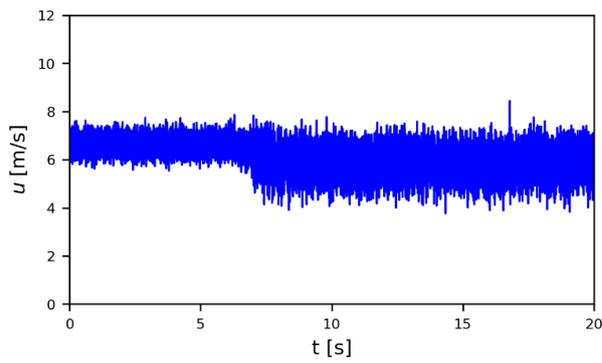
図 3.6 計測結果 (ステップ運動, 0° to 30° , 30rpm)



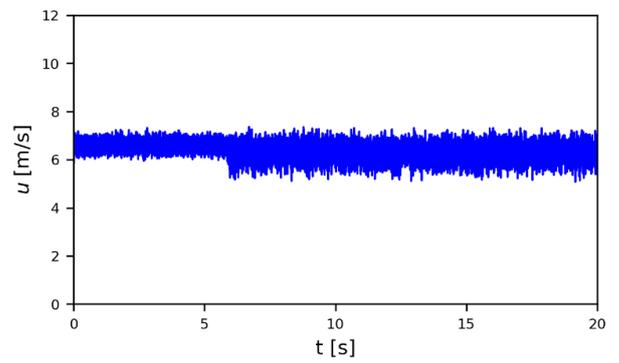
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

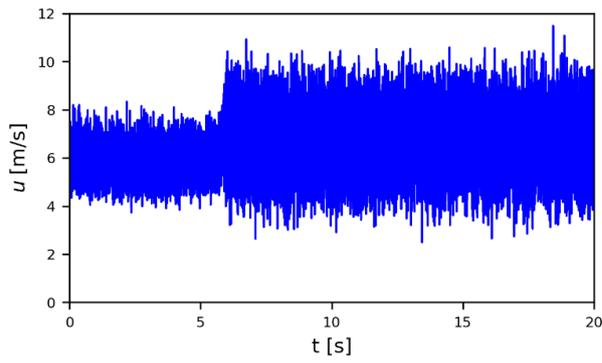


(c) $x = 4H$

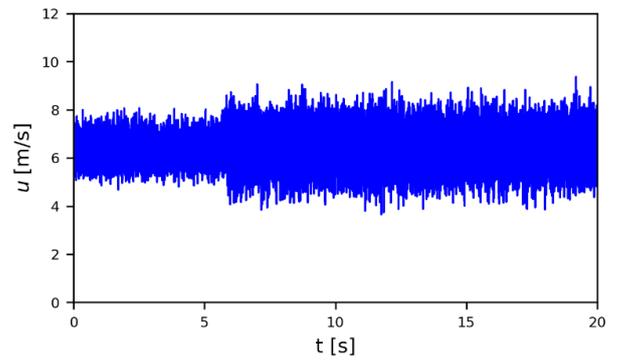


(d) $x = 8H$

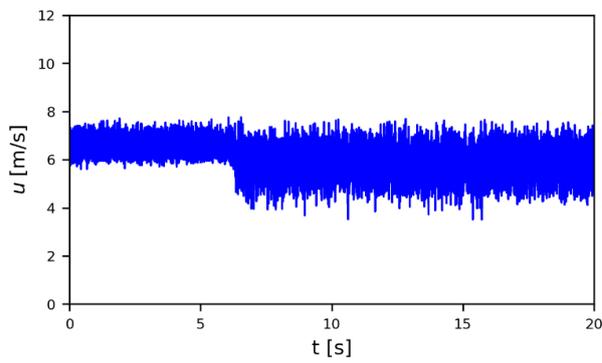
図 3.7 計測結果 (ステップ運動, 0° to 60° , $5rpm$)



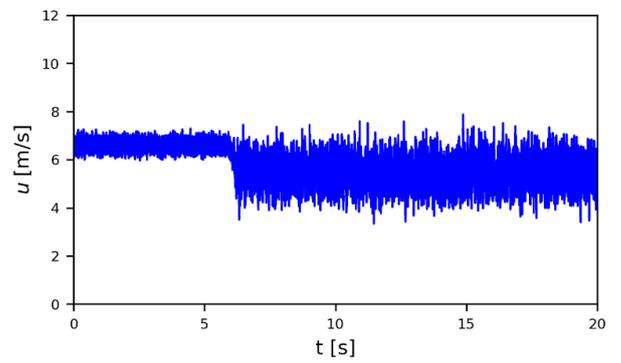
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

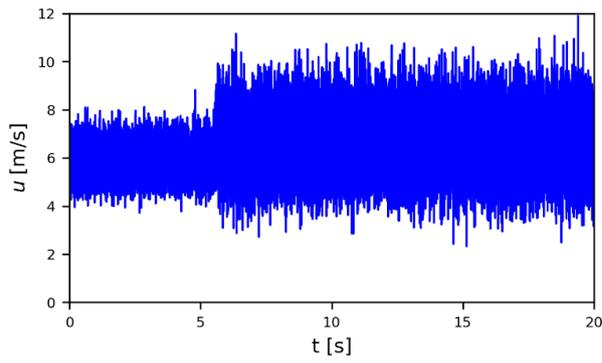


(c) $x = 4H$

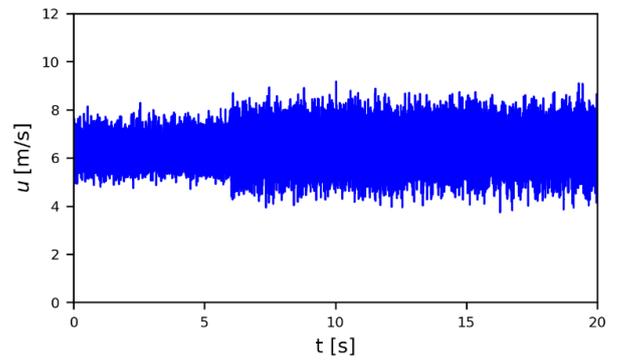


(d) $x = 8H$

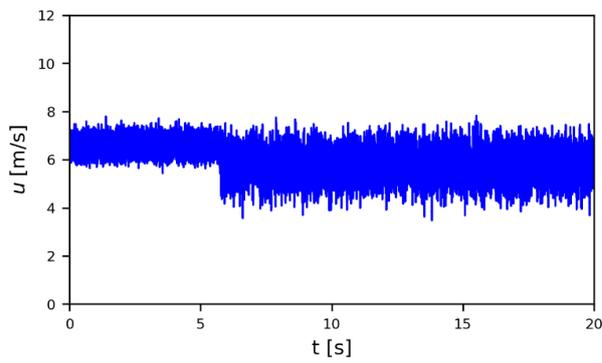
図 3.8 計測結果 (ステップ運動, 0° to 60° , 20rpm)



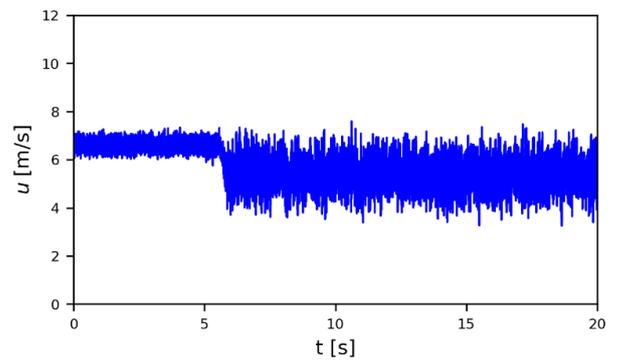
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

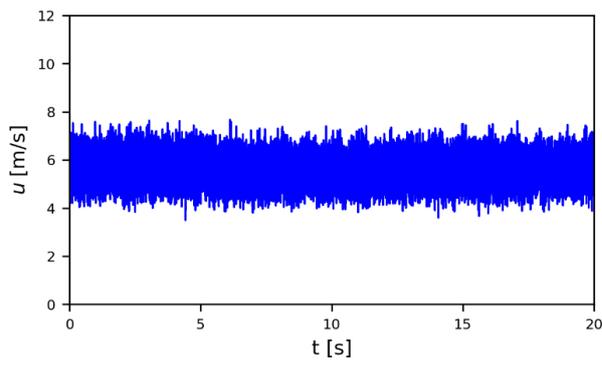


(c) $x = 4H$

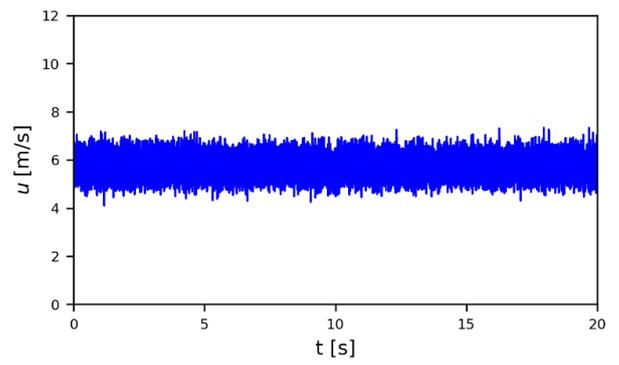


(d) $x = 8H$

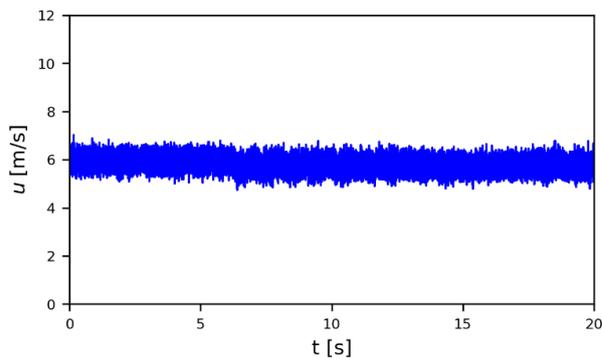
図 3.9 計測結果 (ステップ運動, 0° to 60° , 30rpm)



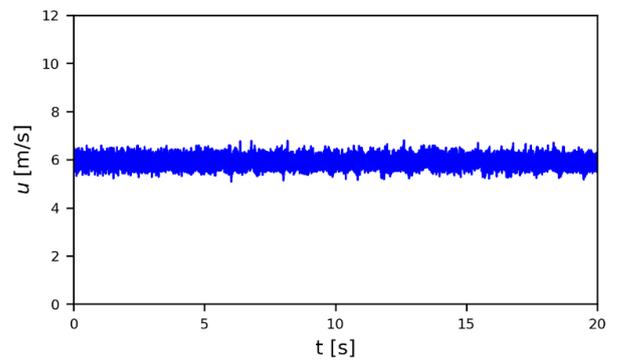
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

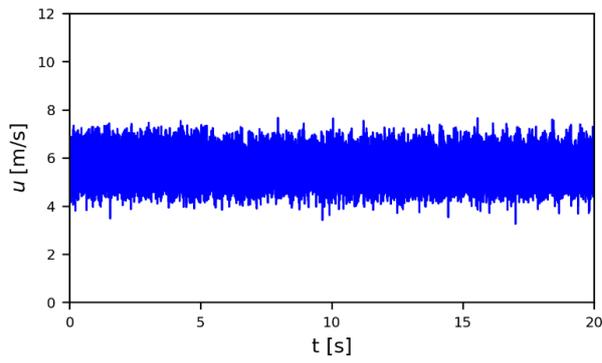


(c) $x = 4H$

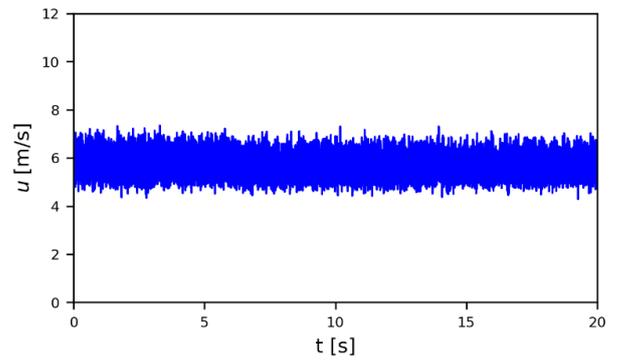


(d) $x = 8H$

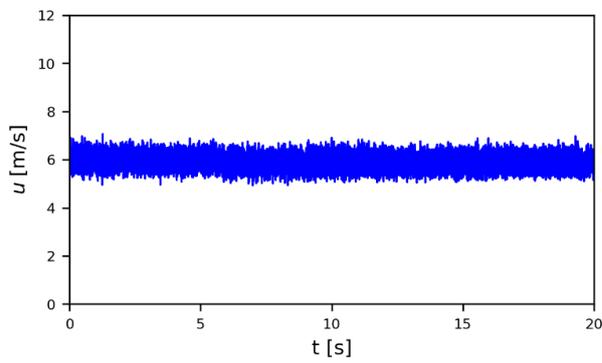
図 3.10 計測結果 (フラップ運動, -15° to 15° , $10rpm$)



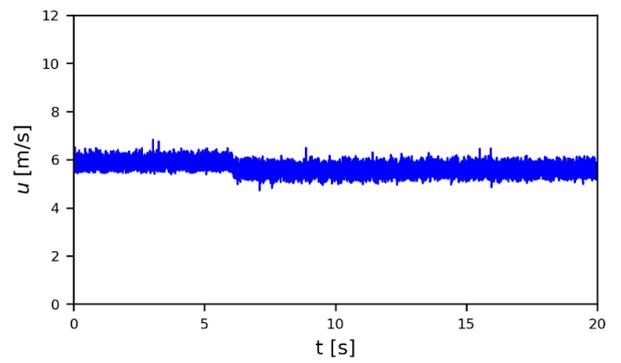
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

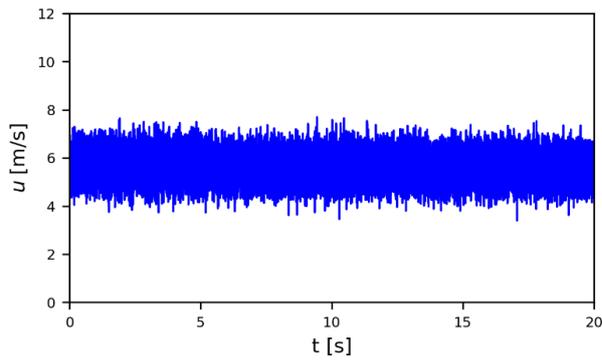


(c) $x = 4H$

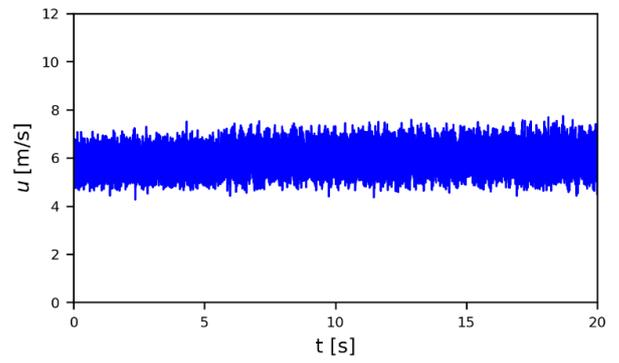


(d) $x = 8H$

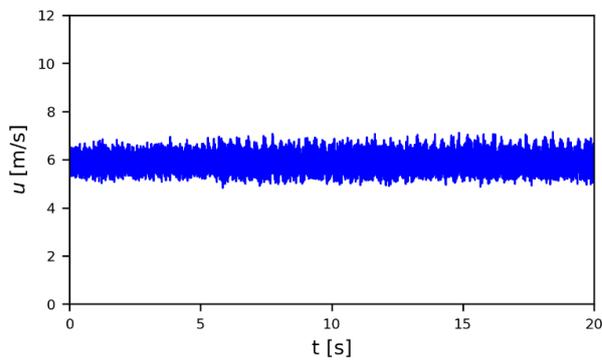
図 3.11 計測結果 (フラップ運動, -15° to 15° , 20rpm)



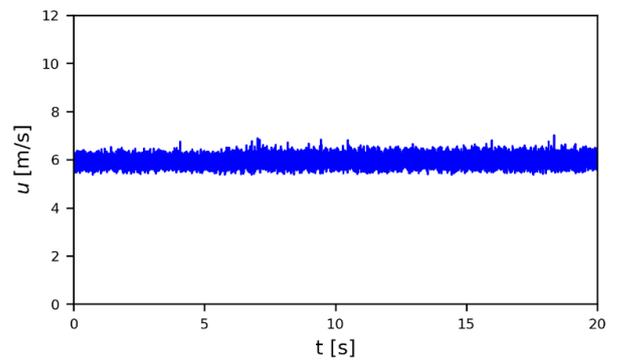
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

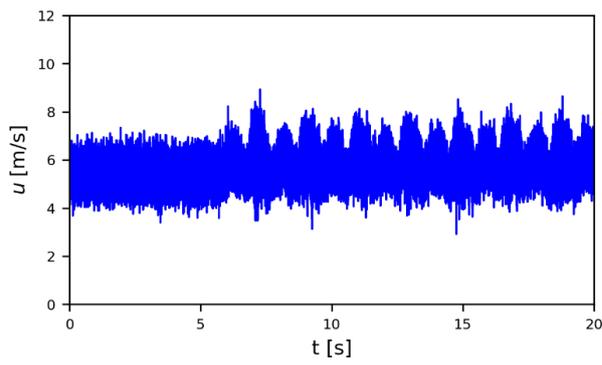


(c) $x = 4H$

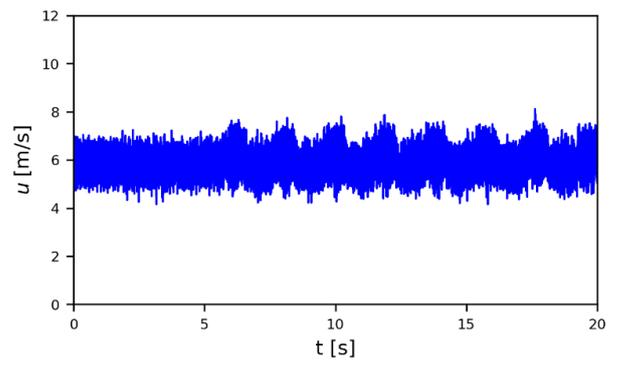


(d) $x = 8H$

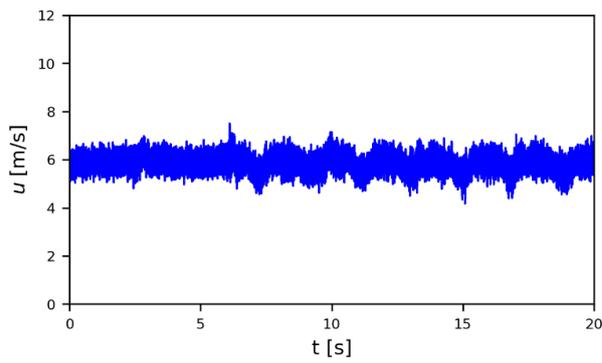
図 3.12 計測結果 (フラップ運動, -15° to 15° , 30rpm)



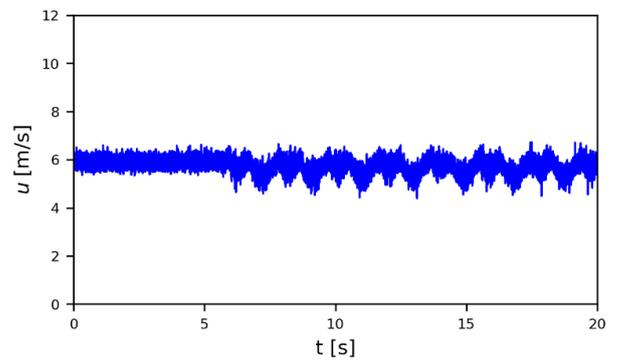
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

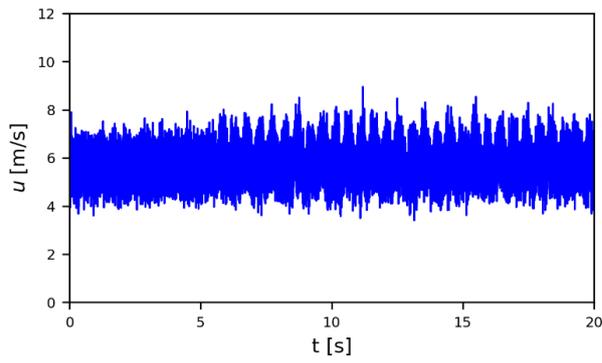


(c) $x = 4H$

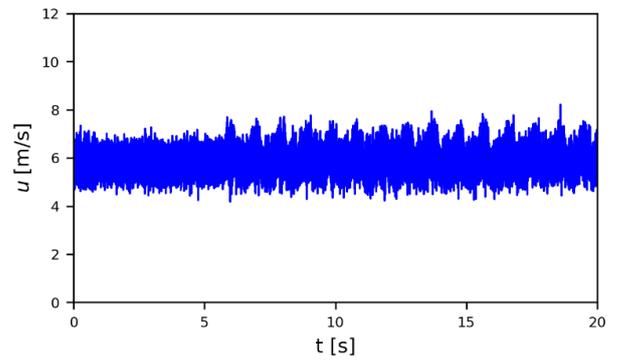


(d) $x = 8H$

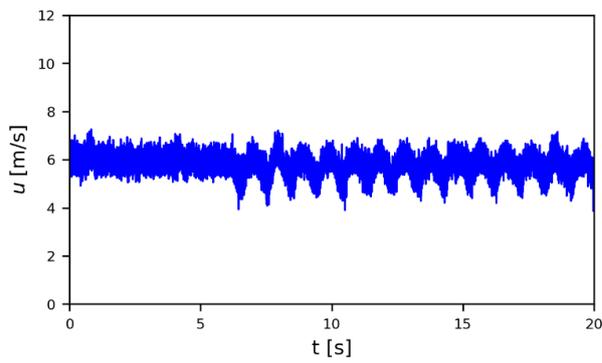
図 3.13 計測結果 (フラップ運動, -30° to 30° , $10rpm$)



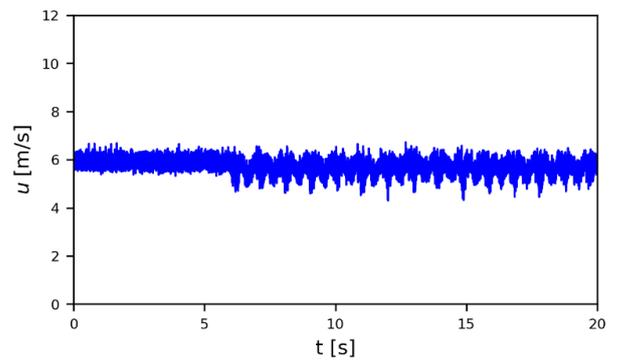
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

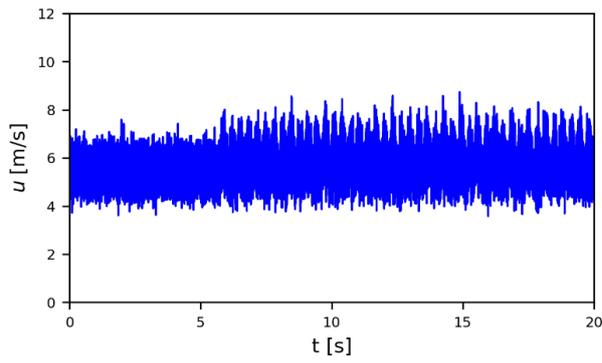


(c) $x = 4H$

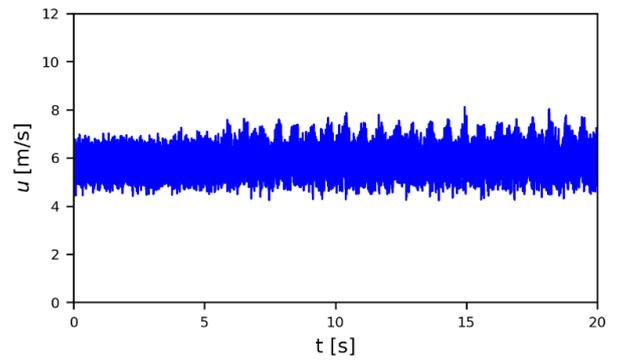


(d) $x = 8H$

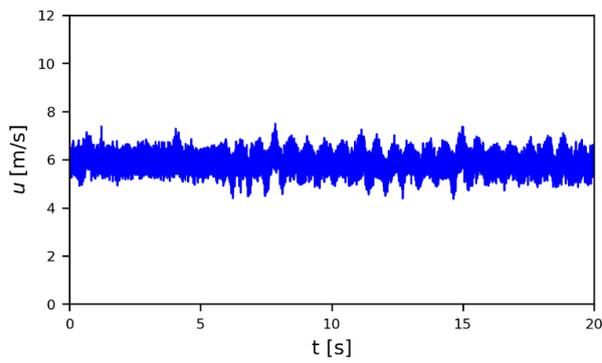
図 3.14 計測結果 (フラップ運動, -30° to 30° , 20rpm)



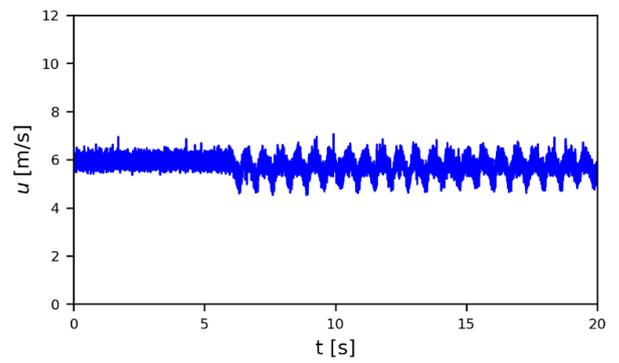
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

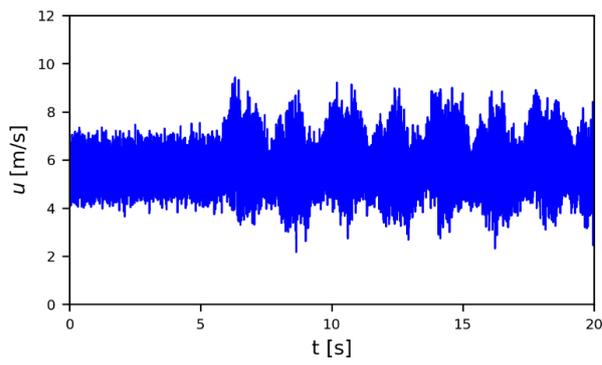


(c) $x = 4H$

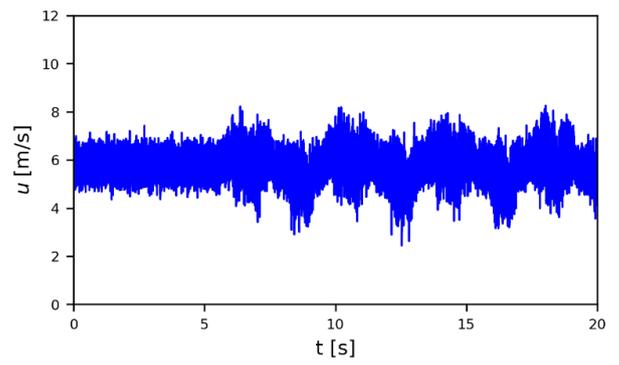


(d) $x = 8H$

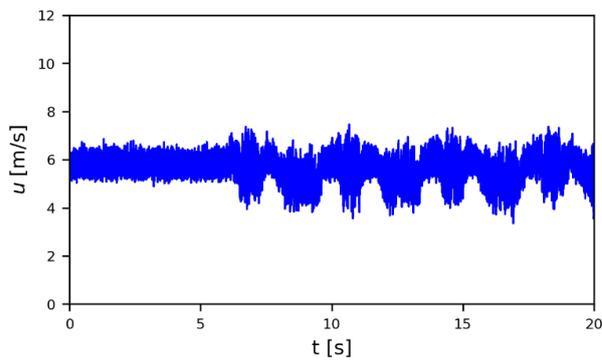
図 3.15 計測結果 (フラップ運動, -30° to 30° , $30rpm$)



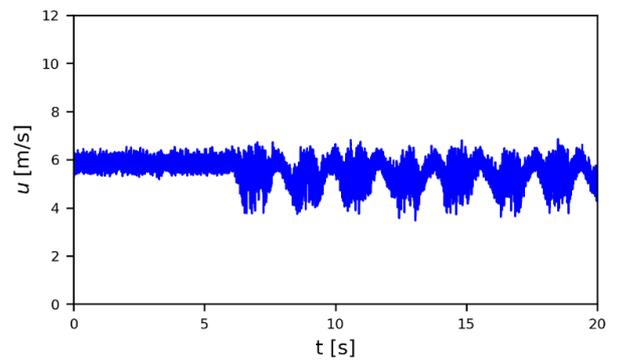
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

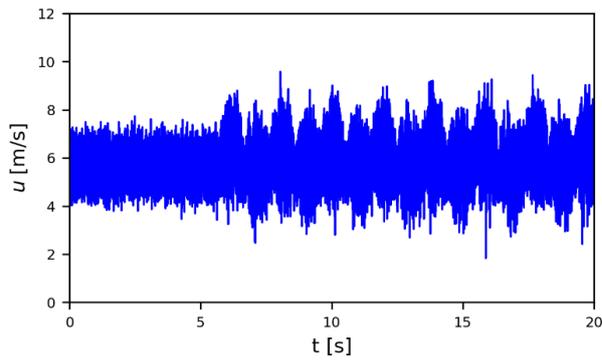


(c) $x = 4H$

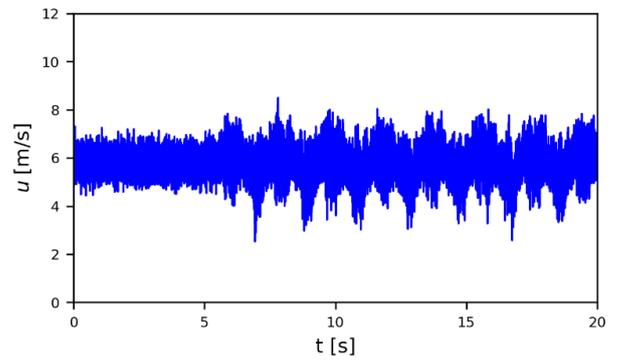


(d) $x = 8H$

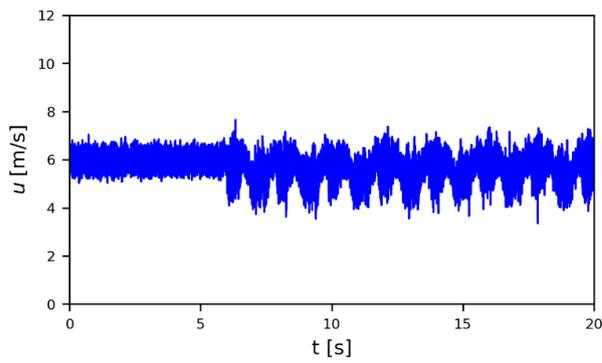
図 3.16 計測結果 (フラップ運動, -60° to 60° , 10rpm)



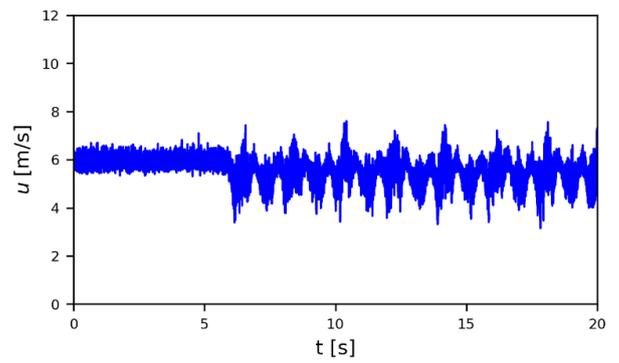
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$

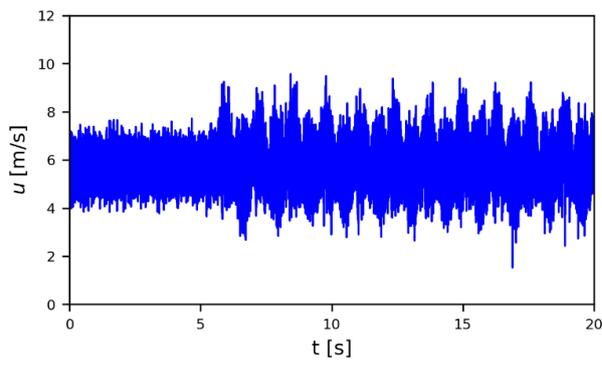


(c) $x = 4H$

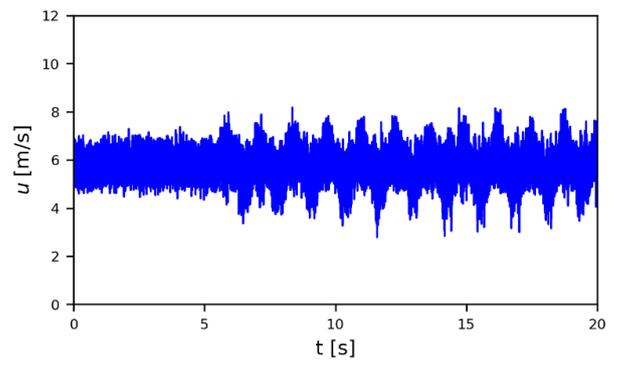


(d) $x = 8H$

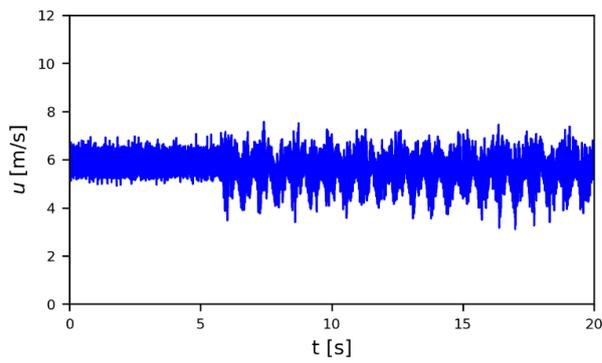
図 3.17 計測結果 (フラップ運動, -60° to 60° , 20rpm)



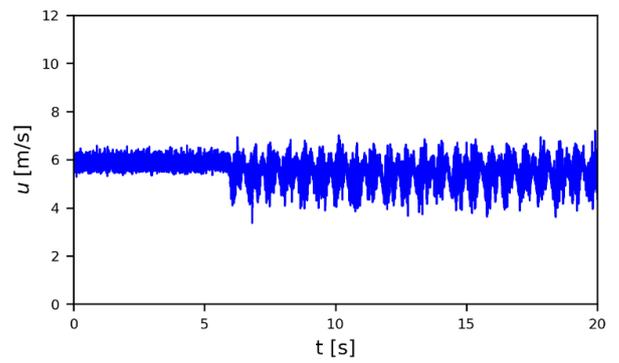
(a) $x = 1H$



(b) $x = 2H$



(c) $x = 4H$



(d) $x = 8H$

図 3.18 計測結果 (フラップ運動, -60° to 60° , 30rpm)

ステップ運動では、回転角度が「 0° to 15° 」ではいずれも、回転翼の動作による風速の変動はみられなかった。回転角度が「 0° to 30° 」から風速の変化がみられ、低回転速度においても風速の変動がみられた。また、いずれも $x = 1H, 2H$ では風速遷移後、平均風速は大きくなっているが、 $x = 4H, 8H$ では小さくなっている。式(2.11)より、回転翼が回転することにより流れが妨げられ、流路の断面積が減少する。これにより、回転翼の中心部分（流れを妨げている部分）では風速が小さくなり、回転翼の先端部分（流路となる部分）では風速は大きくなる。本実験での計測位置は $y, z = H/2$ であり、これは図 2.3 (a) より回転翼の先端部分にあたるため、回転翼に近い計測位置 ($x = 1H, 2H$) では平均風速が大きくなったと考えられる。対してそのさらに下流では、回転翼により速度差が生じた風がその速度差を打ち消すように変化するため、平均風速が小さくなったと考えられる。

フラップ運動では、回転角度が「 -15° to 15° 」ではいずれも、回転翼の動作による風速の変動はみられなかった。回転速度が「 -30° to 30° 」から風速の変化がみられ、低回転速度においても風速の変動がみられた。平均風速はステップ運動と同様、 $x = 1H, 2H$ では大きくなり、 $x = 4H, 8H$ では小さくなっている。

図 3.19 にステップ運動「 0° to 60° , $20rpm$ 」での風速遷移時間 t_m [s] と風速変動幅 u_{As} [m/s] を、図 3.20 にフラップ運動「 -60° to 60° , $20rpm$ 」での風速周期 t_c [s] と風速変動幅 u_{Af} [m/s] を $x = 1H, 8H$ について回転翼の回転角度とともに示す。

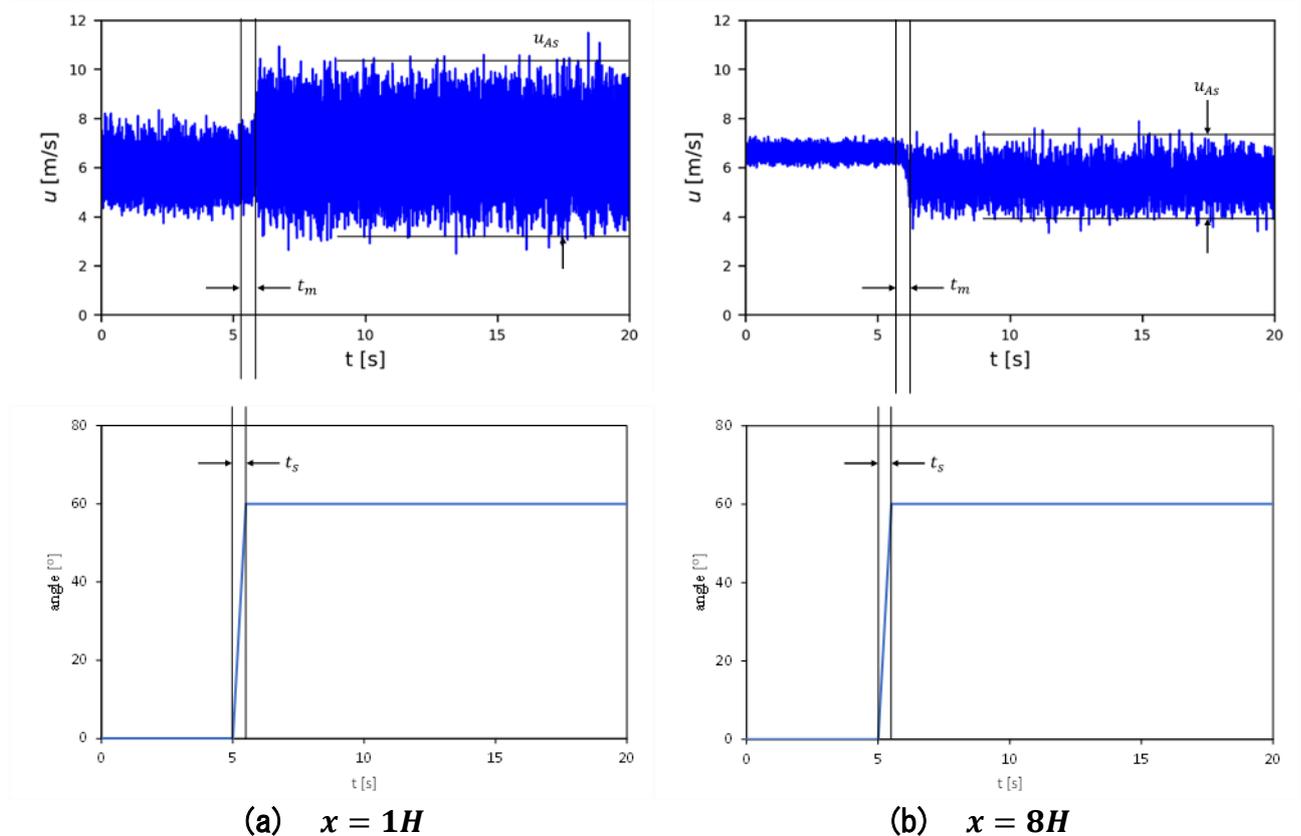
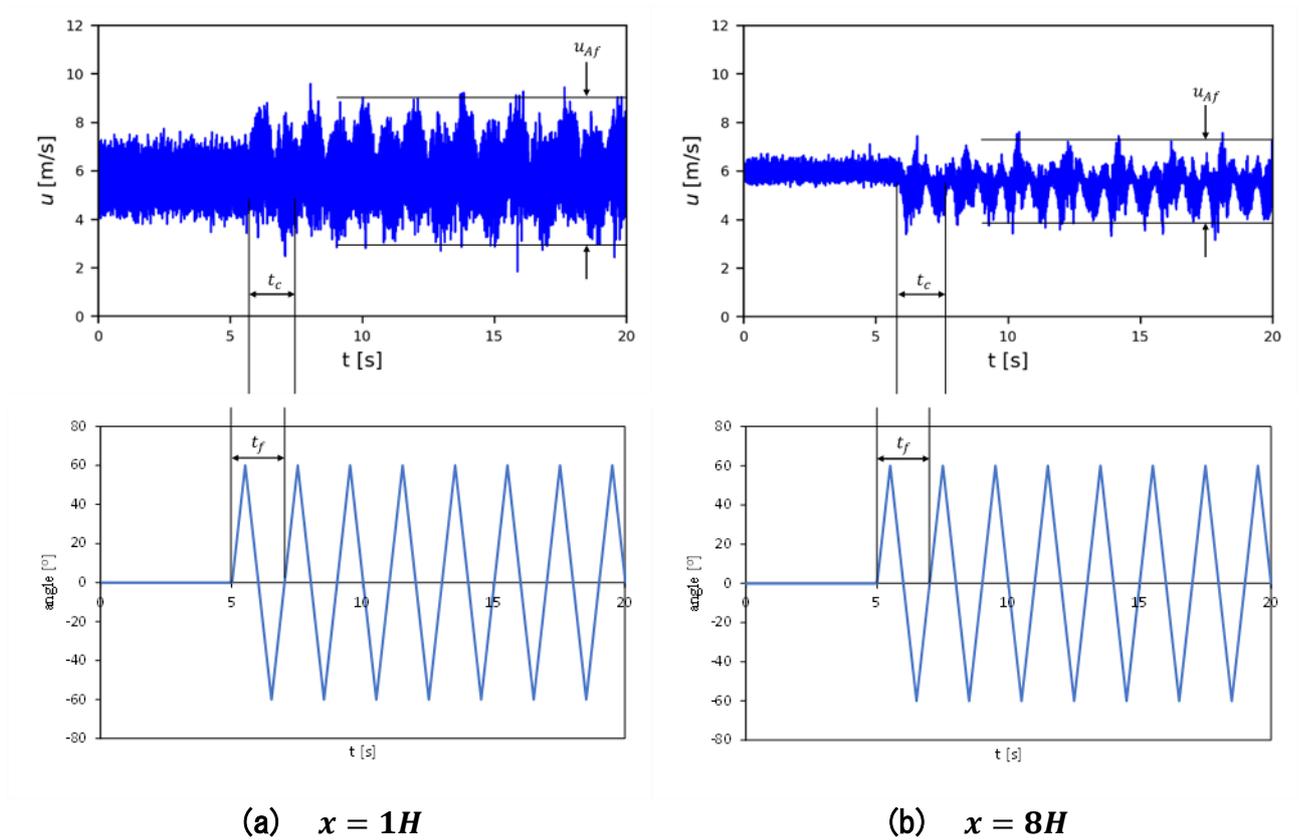


図 3.19 風速応答の評価（ステップ運動, 0° to 60° , $20rpm$ ）



(a) $x = 1H$ (b) $x = 8H$
 図 3.20 風速応答の評価 (フラップ運動, -60° to 60° , 20rpm)

ここで、ステップ運動での回転翼の動作時間 $t_s[s]$ 、フラップ運動での回転翼の動作周期 $t_f[s]$ の算出式を以下に示す。

$$t_s = \frac{\theta}{6N} \quad (3.1)$$

$$t_f = 4t_s = \frac{2\theta}{3N} \quad (3.2)$$

θ : 回転角度[°] N : 回転速度[rpm]

図 3.19, 3.20 より、いずれも t_c は約 $0.5s$ 、 t_m は約 $2s$ であり、この条件において $t_s = 0.5$ 、 $t_f = 2$ であるため、ステップ運動での回転翼の動作時間と風速遷移時間、フラップ運動での回転翼の動作周期と風速周期がほぼ同じであることが分かる。

また、ステップ運動、フラップ運動ともに下流ほど風速の遷移開始時刻が遅くなっていることから、これが回転翼により攪拌された風の到達時刻に差があることによるものだと考えた。回転翼により攪拌された風が計測位置 $x[mm]$ に到達する時刻 $t_a[s]$ の算出式を式(3.3)に示し、各計測位置での到達時刻をまとめたものを表 3.1 に示す。

$$t_a = 5 + \frac{x}{6 \times 10^3} \quad (3.3)$$

表 3.1 回転翼により攪拌された風の到達時刻

計測位置 x [mm]	風の到達時刻 t_a [s]
1H	5.02
2H	5.04
4H	5.08
8H	5.16

攪拌された風の到達時刻は表 3.1 のように1Hあたり0.02s遅れており，この時刻を実験結果と比較すると風速の遷移開始時刻とほぼ同じであることが分かる．本実験では，回転翼の動作開始時刻である5sを目視で確認したのち手動で回転翼の動作を開始させたため，動作開始時刻にばらつきが生じてしまった．これにより正確な風速の遷移開始時刻の評価を行うことはできなかったが，攪拌された風の到達をもって風速遷移が開始されると考えられる．

フラップ運動において風の流れを最も妨げる回転角度 60° と -60° の位置では流路断面積の減少率が同じであるため，各角度での風速も同じになると考えられた．しかし，回転角度 -60° での風速は 60° での風速よりもやや小さくなっている．これは回転角度が 0° から -60° の間でモータの回転が上手く回転軸に伝達できず，回転不足により回転角度が -60° に達しなかったことによって引き起こされたと考えられる．この場合の最大風速の評価において，風速が大きい回転角度 60° での風速をその角度での最大風速と捉えるのが妥当だと考えられる．

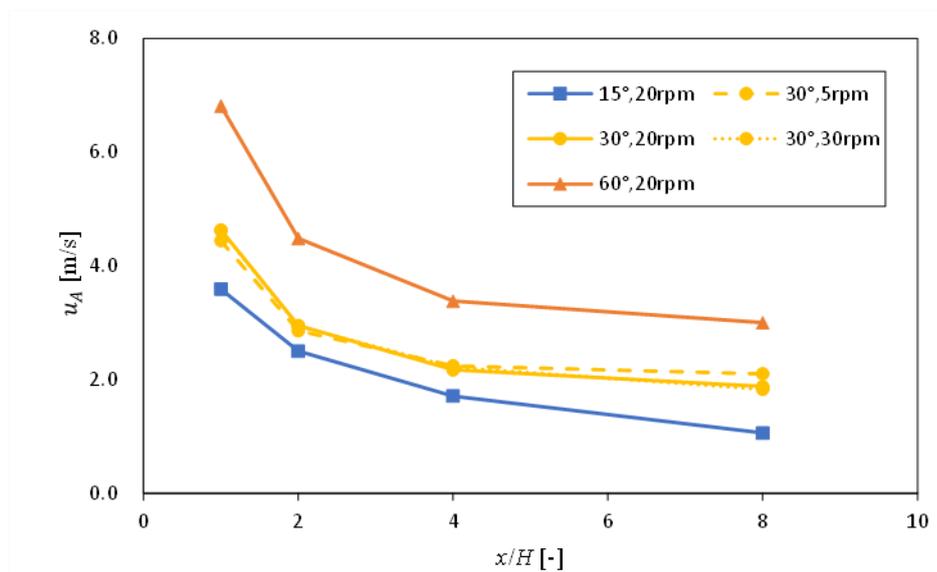
ステップ運動，フラップ運動での風速変動幅をまとめたものを表 3.2,3.3 に示し，これらの一部を抜粋してプロットしたものを図 3.21 に示す．

表 3.2 風速変動幅（ステップ運動） [m/s]

回転角度 [°]	回転速度 [rpm]	計測位置 x [mm]			
		1H	2H	4H	8H
0 to 15	5	3.62	2.54	1.51	1.17
	20	3.59	2.50	1.71	1.06
	30	3.49	2.46	1.85	1.22
0 to 30	5	4.44	2.86	2.24	2.10
	20	4.63	2.95	2.17	1.88
	30	4.62	2.94	2.22	1.83
0 to 60	5	6.81	4.49	3.10	2.25
	20	6.81	4.48	3.38	3.00
	30	6.56	4.14	3.14	3.10

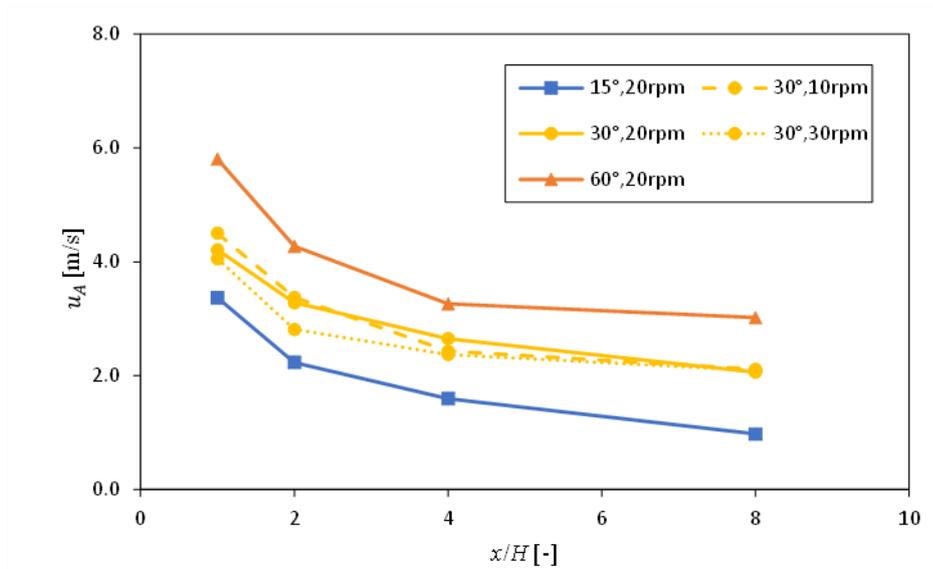
表 3.3 風速変動幅（フラップ運動） [m/s]

回転角度 [°]	回転速度 [rpm]	計測位置 x [mm]			
		1H	2H	4H	8H
-15 to 15	10	3.48	2.35	1.59	1.25
	20	3.37	2.23	1.60	0.98
	30	3.22	2.88	1.88	1.00
-30 to 30	10	4.50	3.38	2.43	2.11
	20	4.21	3.28	2.65	2.06
	30	4.06	2.81	2.37	2.09
-60 to 60	10	5.96	4.48	3.29	2.94
	20	5.80	4.27	3.26	3.02
	30	5.65	3.85	3.33	2.50



(a) ステップ運動

(次項へ続く)



(b) フラップ運動
 図 3.21 風速変動幅

いずれも同じ回転速度ではほぼ同じ値を示しているとともにステップ運動，フラップ運動を比較してもほぼ同じ値となっている．このことから，風速変動幅は回転角度にのみ依存すると考えられる．また，いずれも下流ほど小さくなり，回転翼による乱れが小さくなっていることも確認することができた．

本実験の課題として，低回転角度では回転翼による風速変動の様子を確認することができなかったことが挙げられる．これは回転翼の角度が 0° の状態での6本の回転軸と24枚の回転翼の厚さ，これらを締結しているボルトにより生成される風速の乱れが比較的大きいため，風速の変動が小さい低回転角度では確認することができなかったと考えられる．

第4章 結言

外部流れから独立したテストセクションの設計・製作を行った。乱流生成装置の回転翼の制御には Raspberry Pi4 を使い、python で行った。風洞実験を行うにあたり、風洞装置が生成する風の平均風速、乱流強度の評価を行った。

風洞実験の結果、ステップ運動での回転翼の動作時間と風速遷移時間、フラップ運動での回転翼の動作周期と風速周期がほぼ同じであることが分かった。また、下流ほど風速の遷移開始時刻が遅くなっていることから、攪拌された風の到達をもって風速遷移が開始されると考えられる。さらに、風速変動幅は同じ回転角度ではほぼ同じ値を示したことから、回転角度にのみ依存すると考えられる。

フラップ運動において、回転角度 60° と -60° の位置では流路断面積の減少率が同じであるため、風速も同じになると考えられた。しかし、回転角度 -60° での風速は 60° での風速よりもやや小さくなり、回転角度が 0° から -60° の間でモータの回転が上手く回転軸に伝達できず、回転不足により回転角度が -60° に達しなかったことによるものと考えられる。この改善点としてモータの数を増やす、ベルトを用いて駆動部を動作させるといった改善点が挙げられる。

参考文献

- 1) Hexagon Manufacturing Intelligence “カルマン渦”
https://www.cradle.co.jp/glossary/ja_K/detail0296.html , 閲覧日 : 2021/12/3
- 2) てくてく歩き “ライトアップ瀬戸大橋”
<http://ysmguts.blog88.fc2.com/blog-entry-842.html> , 閲覧日 : 2021/12/3
- 3) 蒔田秀治, “乱流風洞”, 日本流体力学会誌「ながれ」, 21巻, 5号, (2002/10/25)
pp.389-390
- 4) Hideharu Makita, “Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel”,
Fluid Dynamics Research, Vol.8, Issues1-4 (1991), pp.53-64
- 5) 鵜久森康弘, 令和2年度卒業研究論文, pp.12
- 6) 植松玲音, 令和2年度卒業研究論文, pp.13
- 7) “GPIO – Raspberry Pi Documentation”, RASPBERRY PI FOUNDATION UK
REGISTERED CHARITY 1129409
<https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/> , 閲覧日 : 2021/10/16
- 8) 中山泰喜, 改訂版 流体の力学, (1998/8/20), pp.166-167

謝辞

テストセクションの部品製作の際，近畿大学工学部の梅西浩二氏に多大なご協力を頂いた．ここに記して謝意を表す．

付録 A

関数用プログラム

```
import RPi.GPIO as GPIO #GPIO library
import time
import sys

#-----
# turn clockwise 1 motor
#-----
def
turn_clockwise_1motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,dt_step,step,spr,angle):

    iter_max = int(angle/(step*4))

    for i in range(iter_max):
        #---each loop will turn 1.8 *4 = 7.2 deg

        GPIO.output(pin_A1_m1,1) #high
        GPIO.output(pin_B2_m1,0) #low
        GPIO.output(pin_A2_m1,0) #low
        GPIO.output(pin_B1_m1,1) #high

        time.sleep(dt_step)

        GPIO.output(pin_A1_m1,0) #low
        GPIO.output(pin_B2_m1,0) #low
        GPIO.output(pin_A2_m1,1) #high
        GPIO.output(pin_B1_m1,1) #high

        time.sleep(dt_step)

        GPIO.output(pin_A1_m1,0) #low
        GPIO.output(pin_B2_m1,1) #high
        GPIO.output(pin_A2_m1,1) #high
        GPIO.output(pin_B1_m1,0) #low

        time.sleep(dt_step)
```

```

GPIO.output(pin_A1_m1,1) # high
GPIO.output(pin_B2_m1,1) # high
GPIO.output(pin_A2_m1,0) # low
GPIO.output(pin_B1_m1,0) # low

time.sleep(dt_step)

angle_out=angle
return angle_out
#-----

#-----
# turn counterclockwise 1 motor
#-----
def
turn_counterclockwise_1motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,dt_step,step,spr,a
ngle):

iter_max = int(angle/(step*4))

for i in range(iter_max):
    #---each loop will turn 1.8 *4 = 7.2 deg

    GPIO.output(pin_A1_m1,1) #high
    GPIO.output(pin_B2_m1,1) #high
    GPIO.output(pin_A2_m1,0) #low
    GPIO.output(pin_B1_m1,0) #low

    time.sleep(dt_step)

    GPIO.output(pin_A1_m1,0) #low
    GPIO.output(pin_B2_m1,1) #high
    GPIO.output(pin_A2_m1,1) #hgh
    GPIO.output(pin_B1_m1,0) #low

    time.sleep(dt_step)

    GPIO.output(pin_A1_m1,0) #low

```

```

GPIO.output(pin_B2_m1,0) #low
GPIO.output(pin_A2_m1,1) #hih
GPIO.output(pin_B1_m1,1) #high

time.sleep(dt_step)

GPIO.output(pin_A1_m1,1) # high
GPIO.output(pin_B2_m1,0) # low
GPIO.output(pin_A2_m1,0) # low
GPIO.output(pin_B1_m1,1) # high

time.sleep(dt_step)

angle_out=-angle
return angle_out
#-----

#-----
# turn clockwise 2 motors
#-----

def
turn_clockwise_2motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,pin_A1_m2,pin_A2_m2,
pin_B1_m2,pin_B2_m2,dt_step,step,spr,angle):

iter_max = int(angle/(step*4))

for i in range(iter_max):
    #---each loop will turn 1.8 *4 = 7.2 deg

    GPIO.output(pin_A1_m1,1) #high
    GPIO.output(pin_B2_m1,0) #low
    GPIO.output(pin_A2_m1,0) #low
    GPIO.output(pin_B1_m1,1) #high

    GPIO.output(pin_A1_m2,1) #high
    GPIO.output(pin_B2_m2,0) #low
    GPIO.output(pin_A2_m2,0) #low
    GPIO.output(pin_B1_m2,1) #high

```

```
time.sleep(dt_step)
```

```
GPIO.output(pin_A1_m1,0) #low  
GPIO.output(pin_B2_m1,0) #low  
GPIO.output(pin_A2_m1,1) #high  
GPIO.output(pin_B1_m1,1) #high
```

```
GPIO.output(pin_A1_m2,0) #low  
GPIO.output(pin_B2_m2,0) #low  
GPIO.output(pin_A2_m2,1) #high  
GPIO.output(pin_B1_m2,1) #high
```

```
time.sleep(dt_step)
```

```
GPIO.output(pin_A1_m1,0) #low  
GPIO.output(pin_B2_m1,1) #high  
GPIO.output(pin_A2_m1,1) #high  
GPIO.output(pin_B1_m1,0) #low
```

```
GPIO.output(pin_A1_m2,0) #low  
GPIO.output(pin_B2_m2,1) #high  
GPIO.output(pin_A2_m2,1) #high  
GPIO.output(pin_B1_m2,0) #low
```

```
time.sleep(dt_step)
```

```
GPIO.output(pin_A1_m1,1) # high  
GPIO.output(pin_B2_m1,1) # high  
GPIO.output(pin_A2_m1,0) # low  
GPIO.output(pin_B1_m1,0) # low
```

```
GPIO.output(pin_A1_m2,1) # high  
GPIO.output(pin_B2_m2,1) # high  
GPIO.output(pin_A2_m2,0) # low  
GPIO.output(pin_B1_m2,0) # low
```

```
time.sleep(dt_step)
```

```

angle_out=angle
return angle_out
#-----

#-----
# turn counterclockwise 2 motors
#-----
def
turn_counterclockwise_2motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,pin_A1_m2,pin_
A2_m2,pin_B1_m2,pin_B2_m2,dt_step,step,spr,angle):

    iter_max = int(angle/(step*4))

    for i in range(iter_max):
        #---each loop will turn 1.8 *4 = 7.2 deg

        GPIO.output(pin_A1_m1,1) #high
        GPIO.output(pin_B2_m1,1) #high
        GPIO.output(pin_A2_m1,0) #low
        GPIO.output(pin_B1_m1,0) #low

        GPIO.output(pin_A1_m2,1) #high
        GPIO.output(pin_B2_m2,1) #high
        GPIO.output(pin_A2_m2,0) #low
        GPIO.output(pin_B1_m2,0) #low

        time.sleep(dt_step)

        GPIO.output(pin_A1_m1,0) #low
        GPIO.output(pin_B2_m1,1) #high
        GPIO.output(pin_A2_m1,1) #hgh
        GPIO.output(pin_B1_m1,0) #low

        GPIO.output(pin_A1_m2,0) #low
        GPIO.output(pin_B2_m2,1) #high
        GPIO.output(pin_A2_m2,1) #hgh
        GPIO.output(pin_B1_m2,0) #low

```

```
time.sleep(dt_step)
```

```
GPIO.output(pin_A1_m1,0) #low  
GPIO.output(pin_B2_m1,0) #low  
GPIO.output(pin_A2_m1,1) #hih  
GPIO.output(pin_B1_m1,1) #high
```

```
GPIO.output(pin_A1_m2,0) #low  
GPIO.output(pin_B2_m2,0) #low  
GPIO.output(pin_A2_m2,1) #hih  
GPIO.output(pin_B1_m2,1) #high
```

```
time.sleep(dt_step)
```

```
GPIO.output(pin_A1_m1,1) # high  
GPIO.output(pin_B2_m1,0) # low  
GPIO.output(pin_A2_m1,0) # low  
GPIO.output(pin_B1_m1,1) # high
```

```
GPIO.output(pin_A1_m2,1) # high  
GPIO.output(pin_B2_m2,0) # low  
GPIO.output(pin_A2_m2,0) # low  
GPIO.output(pin_B1_m2,1) # high
```

```
time.sleep(dt_step)
```

```
angle_out=-angle
```

```
return angle_out
```

```
#-----
```

モータ駆動プログラム

```
import RPi.GPIO as GPIO #GPIO library
import time
time.sleep
import sys

# Developed functions
from function_stepper_motor import turn_clockwise_1motor
from function_stepper_motor import turn_counterclockwise_1motor
from function_stepper_motor import turn_clockwise_2motor
from function_stepper_motor import turn_counterclockwise_2motor

#---Input Starts here-----
N_cycle=15 #(-) Number of cycle.
angle=120 #(deg)...angle to rotate
sleep_time=0 #(second) Sleep time

clockwise_motion=False # Flag for clockwise motion
counterclockwise_motion=False # Flag for counter clockwise motion
flap_motion=True # Flag for flapping motion

# stepper motor properties
step=1.8 # (deg) # should be set to 1.8
spr = 200 # step per revolution...because step=360 deg/spr

# Input values
rpm =30# revolution per minute...limit value is 100 rpm
dt_step = 1.0/(spr*rpm/60.0)

# dt_step can be set manually as well depending upon the purpose
#dt_step = 0.05 # time per step
    # limiting value is 0.003

# Gpio Pins
#---motor1
pin_A1_m1 =17 # black
pin_A2_m1 =27 # green
pin_B1_m1 =22 # red
```

```

pin_B2_m1 =10 # blue

#---motor2
pin_A1_m2 =5 # black
pin_A2_m2 =6 # green
pin_B1_m2 =13 # red
pin_B2_m2 =19 # blue

#---Input ends here-----

print('dt_step= ',dt_step)

angle_out_total=0.0

GPIO.setmode(GPIO.BCM) # to use gpio numbering system for pins
GPIO.cleanup() # Return all the channels back to input
GPIO.setwarnings(False) # To turn on off warnings

GPIO.setup(pin_A1_m1, GPIO.OUT) #Set GPIO pin to output
GPIO.setup(pin_A2_m1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(pin_B1_m1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(pin_B2_m1, GPIO.OUT)

GPIO.setup(pin_A1_m2, GPIO.OUT) #Set GPIO pin to output
GPIO.setup(pin_A2_m2, GPIO.OUT)
GPIO.setup(pin_B1_m2, GPIO.OUT)
GPIO.setup(pin_B2_m2, GPIO.OUT)

#---Clockwise motion
if clockwise_motion:
    print("Turning clockwise")
    for i in range(N_cycle):
        print('cycle= ',i)
        time.sleep(sleep_time)

angle_out=turn_clockwise_2motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,pin_A1_m2,pi
n_A2_m2,pin_B1_m2,pin_B2_m2,dt_step,step,spr,angle)
    angle_out_total=angle_out_total+angle_out

```

```

#---

#---Counter clockwise motion
if counterclockwise_motion:
    print("Turning counter clockwise")
    for i in range(N_cycle):
        print('cycle= ',i)
        time.sleep(sleep_time)

angle_out=turn_counterclockwise_2motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,pin_A
1_m2,pin_A2_m2,pin_B1_m2,pin_B2_m2,dt_step,step,spr,angle)
    angle_out_total=angle_out_total+angle_out
#---

#---Flapping motion
if flap_motion:
    print("flapping motion")
    for i in range(N_cycle):
        print('cycle= ',i)
        time.sleep(sleep_time)

angle_out=turn_clockwise_2motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,pin_A1_m2,pi
n_A2_m2,pin_B1_m2,pin_B2_m2,dt_step,step,spr,angle/2)
    angle_out_total=angle_out_total+angle_out
    time.sleep(sleep_time)
angle_out=turn_counterclockwise_2motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,pin_A
1_m2,pin_A2_m2,pin_B1_m2,pin_B2_m2,dt_step,step,spr,angle)
    angle_out_total=angle_out_total+angle_out
    time.sleep(sleep_time)
angle_out=turn_clockwise_2motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,pin_A1_m2,pi
n_A2_m2,pin_B1_m2,pin_B2_m2,dt_step,step,spr,angle/2)
    angle_out_total=angle_out_total+angle_out
#---

print('before',angle_out_total)

# return the plates to zero angle
return_to_zero= input("Want to return to zero? If true type T, if false type F \n ")

```

```
if return_to_zero=='T':
    return_to_zero=True
elif return_to_zero=='F':
    return_to_zero=False
else:
    print('You can only use T or F to define this flag')

if return_to_zero:
    angle_out_total=angle_out_total%360
    print('after mod',angle_out_total)

angle_out=turn_counterclockwise_2motor(pin_A1_m1,pin_A2_m1,pin_B1_m1,pin_B2_m1,pin_A
1_m2,pin_A2_m2,pin_B1_m2,pin_B2_m2,dt_step,step,spr,angle)
    angle_out_total=angle_out_total+angle_out
    print('finally',angle_out_total)

GPIO.cleanup() # Return all the channels back to input
```