

二周波数の合成波入力により生成された乱流の空間発展

小園茂平^{a)} · 高牟禮光太郎^{b)}

Spatial Development of the Turbulence Generated by Artificial Disturbances Composed of Two Sine Waves

Shigehira OZONO, Kotaro TAKAMURE

Abstract

The purpose of this study is to investigate characteristics of the turbulence generated by artificial disturbances composed of two sine waves. Different combinations of frequencies and phases were used to define the disturbances. Disturbances with randomly provided phases were fed to the 99 fans of a multi-fan type wind tunnel. A parameter $n_d = f_i/\Delta f$ ($i = A, B$) was introduced, where f_i was the two selected frequencies, and Δf the difference between them. When n_d was an integer, peaks appeared in the power spectra of the turbulence at frequencies associated with Δf , but when n_d was a noninteger, more peaks appeared irregularly in the downstream direction.

Keywords: Multi-fan wind tunnel, Homogeneous turbulence, Random-phase mode, Two-frequency disturbance

1. 序論

建造物に対する空力特性を知るためや、乱流統計理論の検証のためにも高レイノルズ数一様等方性乱流の生成は重要な課題である。これまでも乱流における様々な実験が行われてきた。一様等方性乱流を生成するために格子乱流がよく用いられるが、最大渦のスケールが格子サイズによって決まってしまうため、高レイノルズ数の乱流を生成することは困難である。そこで、これを克服するため低周波数側でエネルギーを注入しパワースペクトルの慣性小領域を低周波数側に拡大させる方法が考えられてきた。本実験で使用したマルチファン型風洞では、入力擾乱の周波数成分を外部から与えることが可能であり、振幅や位相差などを自由に設定することができる。池田他¹⁾は入力擾乱に40個の周波数成分を含ませ、各ファンにランダムな位相差を持たせる運転方法（ランダム位相法）を試みた。この方法により比較的短い流下距離で $Re_\lambda \sim 753$ の強乱大スケールの準一様等方性乱流を実現した（ここに $Re_\lambda = u'\lambda/\nu$ 、 u' は主流方向の変動流速 u の r.m.s. 値、 λ はテーラーのマイクロスケール、 ν は動粘性係数）。

本論文では乱流発達に至る素過程をより明確に理解するために、入力擾乱を二つの周波数成分で構成し、運転は同じくランダム位相法によった。本論文の目的

は入力擾乱の二つの周波数の位相差、周波数間隔、絶対値などの因子が乱れ特性に及ぼす影響を知ることである。学術的には乱流の発達のための必要かつ十分な因子を明らかにすることである。工学上もこれらの効果を知ること、少ない周波数成分で効果的に高乱流レイノルズ数を生成できる可能性がある。

2. 実験装置と方法

本実験では宮崎大学にあるマルチファン型風洞を使用した。この風洞は縦に11個、横に9個、合計99個のファンで構成されており、これらのファンはAC200Vサーボモーターに接続され、1台のパソコンを通してそれぞれのファンの回転数を独立に制御することができる。パソコンで命令した入力信号に従ってファンが駆動し、それによって作られた気流は隔壁によって仕切られたダクトを通り縮流（縮流比=1:1.8）され、最終的にハニカムで整流され測定部に至る²⁾。

図1に風洞の座標軸を示す。座標は下流（主流）方向に X 、水平方向に Y 、鉛直方向に Z と定義する。（ X, Y, Z ）に対応する速度の変動成分を (u, v, w) と定義する。測定部の幅は2.54m、高さは1.80mである。この風洞は可搬洞の組み合わせにより風路長を変更することができ、今回は最長の15.5mに設定した。測定部内の位置は $(X/M_D, Y/M_Y, Z/M_Z)$ のように無次元化して表記した。ここで、 M_Y, M_Z は各ファンのダクトの出口の大きさであり、水平方向に $M_Y=0.282m$ 、

^{a)} 機械設計システム工学科 教授

^{b)} 材料物理工学科 4年

垂直方向に $M_Z=0.164\text{m}$ である。 M_D は吹き出しダクト面積に基づく $M_D=(M_Y \times M_Z)^{1/2}=0.215\text{m}$ である。

流速計測は熱線流速計 (KANOMAX、SYSTEM-7000)、X型プローブ (同モデル 1241)、I型プローブ (同モデル 1210) を使用した。熱線流速計の信号はロガー (KEYENCE、NR-600) でAD変換してパソコンに収録した。サンプリング周波数 $f_s=5\text{kHz}$ 、ローパスフィルタは $f_l=2\text{kHz}$ に設定した。

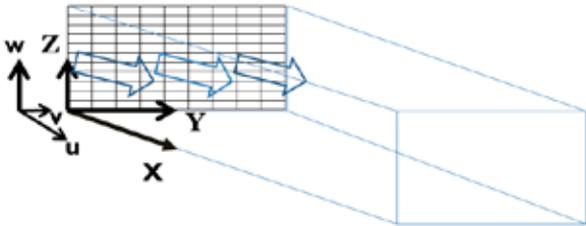


図 1. 風洞内の座標軸.

本実験では一つの非定常時系列を運転信号として全ファンに入力するが、各信号にはランダムに位相差を与えられるような運転方法である。本研究で使用した入力信号は以下のように作られた。入力信号の式を次式で示す。

$$u = u_A + u_B + U \quad (1)$$

$$u_A = \sin(2\pi f_A t) \quad (2)$$

$$u_B = \sin(2\pi f_B t + \Delta\phi) \quad (3)$$

周波数成分は f_A 、 f_B の二個をとり、両周波数成分の間隔と絶対値を変化させて計測した。高周波数では気流の応答特性が劣化すること、運転の負荷が大きいこと、低周波数成分が高周波数側に輸送されることなどを考慮し、 $f_{min}=0.024\text{Hz} \leq f_A, f_B \leq 0.96\text{Hz} = f_{max}$ とした。 Δf 、 f_{mid} はそれぞれ次式で定義した。

$$\Delta f = f_B - f_A \quad (4)$$

$$f_{mid} = \frac{f_B + f_A}{2} \quad (5)$$

$0.048\text{Hz} \leq \Delta f \leq 0.936\text{Hz}$ 、 $0.048\text{Hz} \leq f_{mid} \leq 0.936\text{Hz}$ の範囲をとった。 u_A の位相は固定し、 u_B の位相のみをシフトさせた。作成した信号の場合を表 1 に示す。各周波数成分の振幅はそれぞれ 1m/s とし、平均流速 $U=4.67\text{m/s}$ に変動時系列を足して運転信号を作成した。ランダム位相法では各ファンにランダムな位相差を与える。一様に $N=1\sim 99$ の乱数を図 2 のように各ファンに与えた。運転命令の位相を $(N-1) \times 0.4\text{s}$ だけずらして運転した。

表 1. 入力信号一覧.

入力信号	$f_A[\text{Hz}]$	$f_B[\text{Hz}]$	$f_{mid}[\text{Hz}]$	$\Delta f[\text{Hz}]$	$\Delta\phi$
mode1-1	0.024	0.072	0.048	0.048	0
mode1-1 ₋₁	0.432	0.48	0.456	0.048	0
mode1-1 ₋₂	0.912	0.96	0.936	0.048	0
mode1-2	0.024	0.072	0.048	0.048	$\pi/2$
mode1-3	0.024	0.072	0.048	0.048	π
mode1-4	0.024	0.072	0.048	0.048	$3\pi/2$
mode2-1	0.024	0.48	0.252	0.456	0
mode2-1 ₋₁	0.264	0.72	0.492	0.456	0
mode2-1 ₋₂	0.504	0.96	0.732	0.456	0
mode2-2	0.024	0.48	0.252	0.456	$\pi/2$
mode2-3	0.024	0.48	0.252	0.456	π
mode2-4	0.024	0.48	0.252	0.456	$3\pi/2$
mode3-1	0.024	0.96	0.492	0.936	0
mode3-2	0.024	0.96	0.492	0.936	$\pi/2$
mode3-3	0.024	0.96	0.492	0.936	π
mode3-4	0.024	0.96	0.492	0.936	$3\pi/2$

57	31	6	37	13	30	97	93	59
99	2	98	77	84	72	22	15	79
78	44	95	63	58	69	26	16	3
56	53	24	86	41	54	40	1	52
92	75	60	64	28	25	89	47	62
50	67	66	12	55	65	81	38	70
5	61	33	87	96	42	35	51	34
19	74	83	36	45	21	11	80	27
32	82	73	8	18	71	46	29	17
14	49	85	48	10	90	23	9	43
76	88	39	4	91	20	94	68	7

図 2. 各ファンに与えた乱数.

3. 実験結果

3.1 一様性の検証のいろいろな地点

図 3 に主流方向 $X/M_D=14.0$ 、 $X/M_D=32.6$ 、 $X/M_D=51.2$ で Y 方向と Z 方向にそれぞれトラバース計測を行い一様性が得られるかを検証した。おそらくダクトの影響のため主流方向上流部 ($X/M_D=14.0$ 地点) ではプロファイルに若干のばらつきがみられる。しかし、下流地点 ($X/M_D=51.2$) で壁面付近は境界層の影響により流速が小さくなっているが、コア領域 ($1.5 \leq Z/M_Z \leq 8.5$ 、 $2.5 \leq Y/M_Y \leq 6.5$) では十分一様性を保っていることが分かる。位相差を持つ入力信号では位相差無しの場合と同様の結果が得ると予想されるので一様性の検証を行わなかった。

3.2 入力信号の位相差による乱れ特性

まず、 Δf 、 f_{mid} を固定し $\Delta\phi$ だけ変化させて乱れ特性を調べた。mode1-1~mode1-4、mode2-1~mode2-4、mode3-1~mode3-4 の各シリーズでは Δf 、 f_{mid} を固定し $\Delta\phi$ を変化させており、各シリーズ内でそれぞれ比較した。図 4、図 5 にそれぞれ乱れ強度と乱流レイノルズ数の流下方向の変化を示す。乱流

レイノルズ数は mode1-4 の $X/M_D=13.95(X=3m)$ 、 $X/M_D=23.26(X=5m)$ の位置で他の場合と離れた値を示したが、それら以外の場所で mode1-1~mode1-3 はほぼ同様の变化を示しているため、これらの値は計測誤差だと考えられる。その他の運転モードでは、位相差を与えても乱れ強度や乱流レイノルズ数に大きな違いは見られなかったことから、位相差はこれらの統計量に影響しないと思われる。等方性は u'/w' で評価されるので、乱れ強度が位相差に影響されないならば等方性も位相差に影響されないといえる。

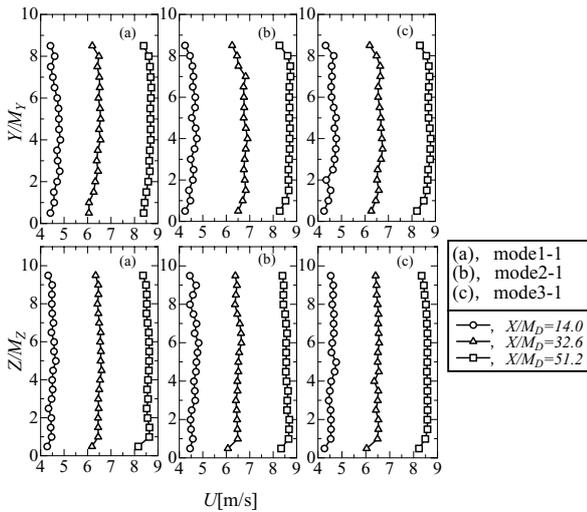


図 3. 平均流速分布の主流方向変化. 上が水平方向分布, 下が鉛直方向分布.

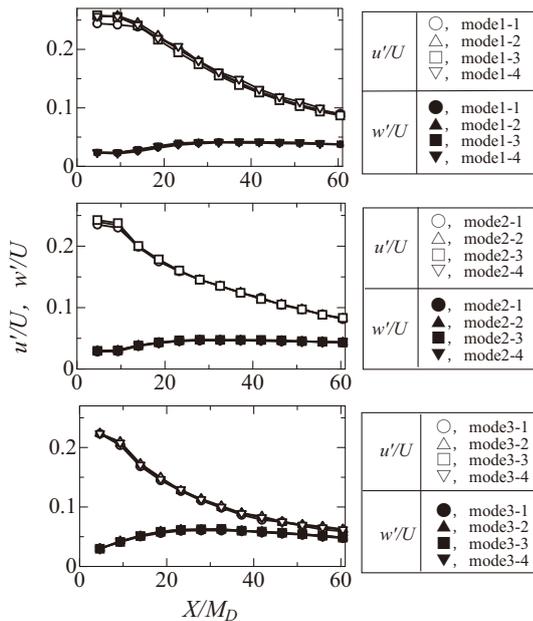


図 4. 運転モードに対する乱れ強度の主流方向変化.

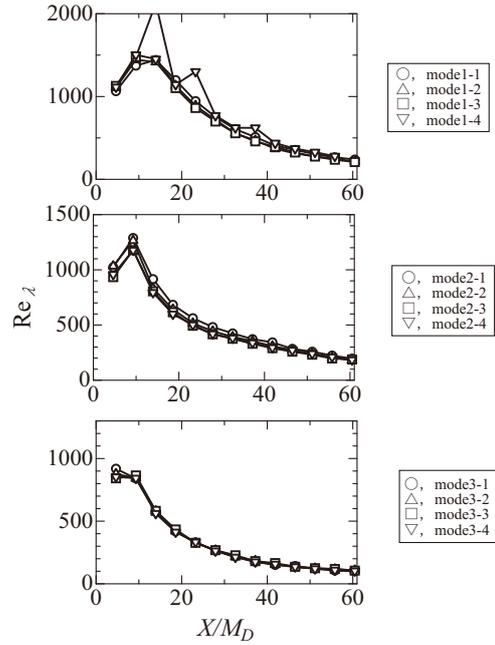


図 5. 運転モードに対する乱流レイノルズ数の主流方向変化.

3.3 f_{mid} と Δf の乱流特性に及ぼす影響

本節では Δf を固定し f_{mid} を変化させた場合と、 $f_{mid} = 0.456 \sim 0.492\text{Hz}$ で Δf を変化させた場合を調べた。 Δf を固定して f_{mid} を変化させた場合には、 $\Delta f = 0.048\text{Hz}$ と $\Delta f = 0.456\text{Hz}$ の二通りを調べた。

3.3.1 乱れ強度

図 6 に乱れ強度の主流方向変化を示す。 Δf 固定で f_{mid} を変化させたとき、 f_{mid} が小さいモード (mode1-1、mode2-1) は他のモードに比べ下流側まで u'/U が大きな値をとった。その他のモードは Δf に関わらず、最下流で $u'/U = 0.05 \sim 0.07$ に漸近した。主流方向では脈動流の影響が考えられるため、鉛直方向の乱れ強度も示した。 f_{mid} が大きいほど w'/U の最大値は大きな値を示したが、その後の減衰率も大きくなった。 f_{mid} が小さいと w'/U の最大値は小さいがその後持続するため、最下流では f_{mid} の大小による差はあまり見られなかった。

$f_{mid} = 0.456 \sim 0.492\text{Hz}$ で Δf を変化させた場合は、全てのモードでほぼ同様の値をとった。このことから、 Δf は乱れ強度に影響しないと思われる。

3.3.2 等方性

図 7 に等方性の主流方向変化を示す。 Δf 固定で f_{mid} を変化させたとき、 f_{mid} の小さな mode1-1 と mode2-1 では下流側まで異方性が強い。 f_{mid} が大きいほど短い流下距離で等方的な状態にはやく近づいた。

$\Delta f=0.048\text{Hz}$ と $\Delta f=0.456\text{Hz}$ の u'/w' の変化は同様であり、流下につれて $u'/w' \sim 1.3$ に漸近した。

$f_{mid} = 0.456 \sim 0.492$ で Δf を変化させた時は、前節で乱れ強度に影響しなかったため、等方性にも影響しないことは明らかである。

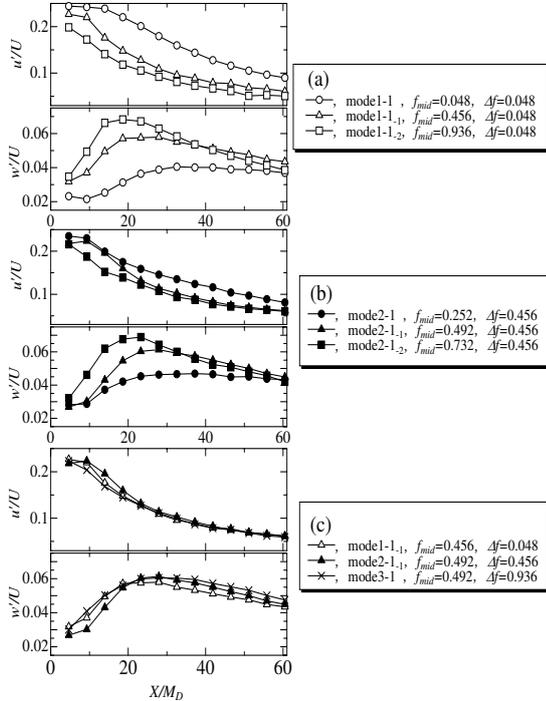


図 6. 乱れ強度の主流方向変化。
(a) $\Delta f=0.048\text{Hz}$ で固定, f_{mid} を変化。
(b) $\Delta f = 0.456\text{Hz}$ で固定, f_{mid} を変化。
(c) $f_{mid} = 0.456 \sim 0.492\text{Hz}$, Δf を変化。

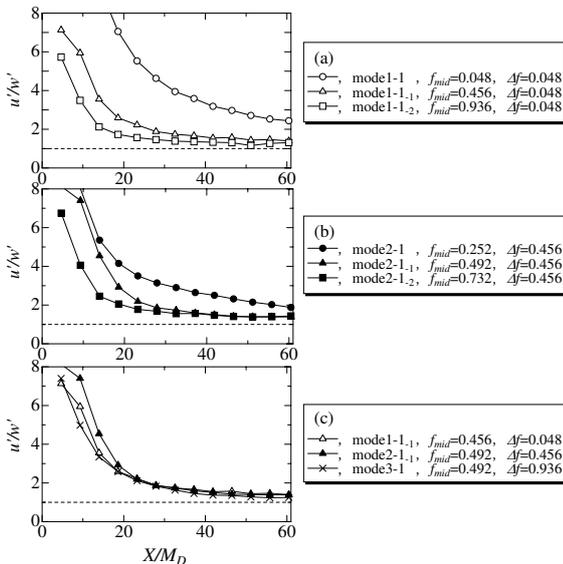


図 7. 等方性の主流方向変化。
(a) $\Delta f=0.048\text{Hz}$ で固定, f_{mid} を変化。
(b) $\Delta f = 0.456\text{Hz}$ で固定, f_{mid} を変化。
(c) $f_{mid} = 0.456 \sim 0.492\text{Hz}$, Δf を変化。

3.3.3 乱れスケール

図 8 に乱れスケールの主流方向変化を示す。乱れスケールは自己相関係数が 0 になるまでの積分値に平均風速を乗じて求めた。 L_X は mode2-1 の $4.65 \leq X/M_D \leq 18.6$ と mode3-1 の $4.67 \leq X/M_D \leq 32.6$ で自己相関係数が振動したのでグラフから除外した。 L_X は mode1-1、mode2-1 で異常に大きな値を示しており、等方性は疑わしい。その他のモードでは f_{mid} や Δf に関係なく $X/M_D \geq 41.8$ で $L_X \sim 0.3\text{m}$ に漸近した。 $\Delta f=0.456\text{Hz}$ に固定した時、 L_Z は mode2-1₂ で渦スケールが大きな値をとった。

$f_{mid}=0.456\text{Hz} \sim 0.492\text{Hz}$ の時は、全てのモードが $L_X \sim 0.3\text{m}$, $L_Z \sim 0.1\text{m}$ に漸近した。このことから Δf は乱れスケールに影響しないと思われる。

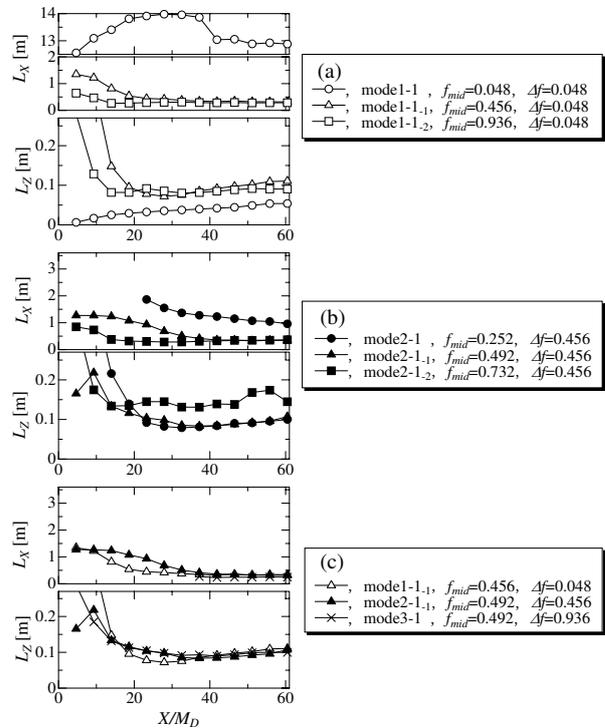


図 8. 乱れスケールの主流方向変化。
(a) $\Delta f=0.048\text{Hz}$ で固定, f_{mid} を変化。
(b) $\Delta f = 0.456\text{Hz}$ で固定, f_{mid} を変化。
(c) $f_{mid} = 0.456 \sim 0.492\text{Hz}$, Δf を変化。

3.3.4 パワースペクトル

図 9 に主流方向のパワースペクトルの変化を示す。図中には五つのパワースペクトルを載せており、各スペクトルは下のスペクトルの 80 倍だけ平行移動させて示している。図中の縦線は入力周波数を示す。図中上段のスペクトルを比較すると、mode1-1 は入力周波数より高周波数側で高調波が見られなかったが、その他の運転モードでは高調波が見られた。スペクトルの上段、中段を比べると、 Δf を固定する時、 f_{mid} が大

きいほど上流で高調波が明確に表れた。流下に伴い高調波が入力周波数のパワースペクトルよりも大きくなる場所が f_{mid} が大きいほど見られた。この高調波は自然に作られた乱れであると思われるため、 f_{mid} が大きいほど、活発に高周波数側にエネルギーが遷移していると考えられる。この高調波が次々に高周波数帯に遷移していくことにより慣性小領域が低周波数側に広がっていくと考えられる。実際に上流で高調波が表れ始めた周波数帯では流下に伴い $-5/3$ の傾きを形成していくことが分かる。しかし、上流で現れた高調波は最下流でも残っているため、まだ乱流発達途中であると考えられる。

$f_{mid}=0.456\sim 0.492\text{Hz}$ で Δf を変化させた時、 Δf による影響は見られなかった。

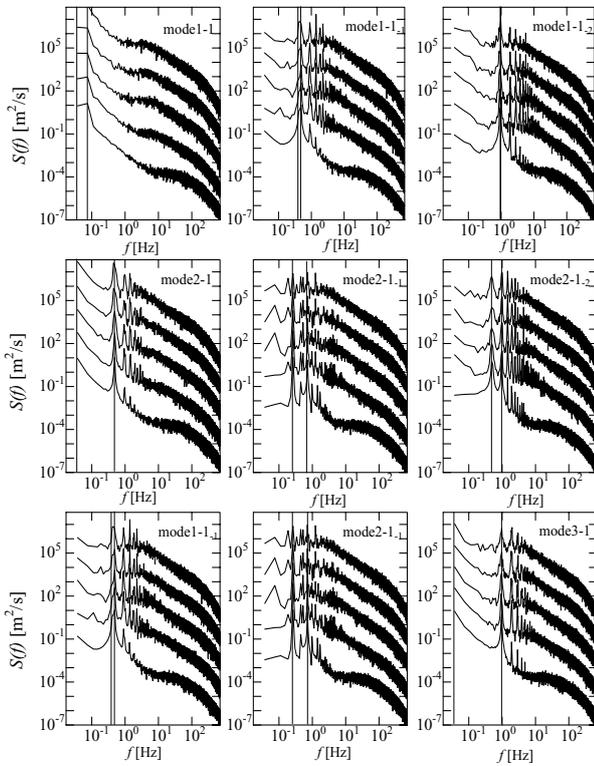


図 9. 主流方向のパワースペクトル. 図は下から $X/M_D = 4.65, 14.0, 23.3, 32.5, 41.9$ の地点を示す. 上段) $\Delta f=0.048\text{Hz}$ で固定, f_{mid} を変化. 中段) $\Delta f = 0.456\text{Hz}$ で固定, f_{mid} を変化. 下段) $f_{mid} = 0.456\sim 0.492\text{Hz}$, Δf を変化.

3.4 n_d が整数と非整数の時の比較

本節ではパラメータ $n_d = f_i/\Delta f (i = A \text{ or } B)$ が整数と非整数の時の入力擾乱を生成し、乱流発達過程を比較した。特に n_d を非整数倍にすることでスペクトルの下流方向の発展に着目した。

今回、 n_d が整数の入力信号には 0.0375Hz の倍数 ($f_A = 0.0375 \times 4 = 0.15\text{Hz}$, $f_B = 0.0375 \times 6 = 0.225\text{Hz}$) の二つの波を用い、その入力信号を mode-r

とした。 n_d が非整数では $f_A = 0.0375 \times 4 = 0.15\text{Hz}$ 、 $f_B = 0.0375 \times 4\sqrt{2} \sim 0.2121\text{Hz}$ を使用した。この時の入力信号を mode-i とした。表 2 に使用した入力信号を示す。

表 2. 入力信号一覧.

入力信号	$f_A[\text{Hz}]$	$f_B[\text{Hz}]$	$\Delta f[\text{Hz}]$	$f_{mid}[\text{Hz}]$	$\Delta\phi$
mode-r	0.15	0.225	0.075	0.1875	0
mode-i	0.15	0.212	0.062	0.181	0

図 10 にパワースペクトルの主流方向変化を示す。mode-r では高調波が $0.3\text{Hz}, 0.375\text{Hz}, 0.45\text{Hz} \dots$ と Δf の間隔で高調波が現れた。流下に伴い高調波は高周波数側に広がっていき、徐々に $-5/3$ の傾きの範囲が広がっていった。mode-i は上流側で高調波が現れているが、流下に伴いスペクトルのピーク周波数がランダムに現れた。

スペクトルの変化をより詳しく知るために、図 11 ではパワースペクトルの低周波数側を拡大して表示し、刻み幅が小さくなるように FFT 解析を行いスペクトルの変化を調べた。mode-r では上流側で現れた高調波は $X/M_D=41.9$ の地点まで持続した。mode-i では上流側で現れたスペクトルのピーク周波数は流下に伴いランダムに位置を変えて現れる。mode-i では高調波が不規則に現れることから、mode-r の時と比べて迅速に乱流化すると思われる。

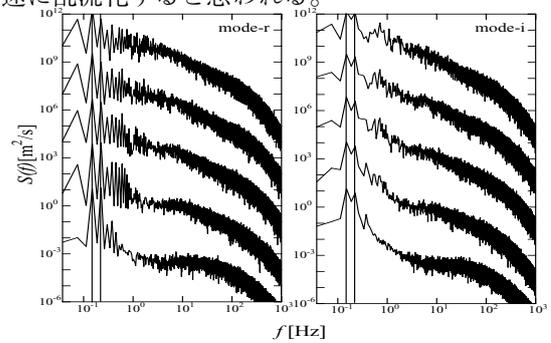


図 10. 主流方向のパワースペクトル. 上の方向に下のスペクトルを 10^3 倍ずつ平行移動して表示してある. 下から $X/M_D = 4.65, 14.0, 23.3, 32.6, 41.9$ の位置での測定データである. FFT に使用したデータ数は 2^{17} 個, 周波数の刻み幅は $3.75 \times 10^{-2}\text{Hz}$ である.

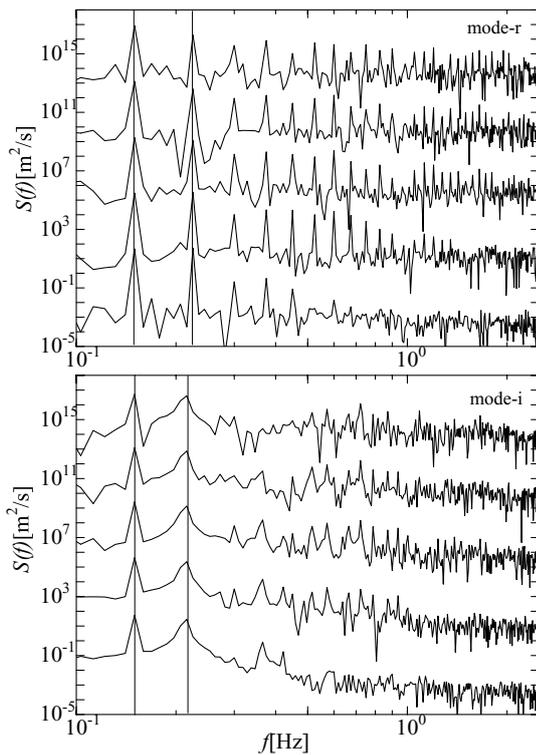


図 11. 低周波数のパワースペクトルの拡大図. 上側は mode-r, 下側は mode-i である. 上の方向に下のスペクトルを 10^4 倍ずつ平行移動して表示してある. 下から $X/M_D = 4.65, 14.0, 23.3, 32.6, 41.9$ の位置での測定データである. FFT に使用したデータ数は 2^{19} 個, 周波数の刻み幅は 9.38×10^{-3} Hz である.

4. 結論

まず Δf , f_{mid} を固定し位相差 $\Delta\phi$ だけ変化させて乱れ特性を調べた. 次に Δf を固定し f_{mid} を変化させた場合と, f_{mid} を固定し Δf を変化させた場合を調べた. 最後にパラメータ $n_d = f_i/\Delta f$ が整数, 非整数の時のスペクトルの空間発展を比較した. 得られた結果は以下のとおりである.

- 1) $\Delta\phi$ が乱れ強度や乱流レイノルズ数に及ぼす影響は小さい.
- 2) Δf が乱れ強度や乱れスケール, パワースペクトルに及ぼす影響は小さい.
- 3) f_{mid} が小さいとき, 乱れ強度や乱れスケールは異常に大きな値をとる. f_{mid} がある程度大きい時, 同様な曲線に収束している.
- 4) $n_d =$ 整数では上流側で現れた高調波が下流まで持続した. $n_d =$ 非整数では上流側で現れたスペクトルのピーク周波数は流下に伴いランダムに位置を変えて現れた. $n_d =$ 整数と非整数の時に使用した

周波数の差は 0.013Hz とわずかであるにもかかわらずスペクトルの空間発展に有意な差が現れた。

謝辞

宮城弘守助教のご協力に対し感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 池田寛, 小園茂平: 低波数帯域に入力された擾乱の非線形干渉による一様乱流の生成, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.800, pp.555-566.
- 2) 小園茂平, 松尾忠輝, 宮城弘守: マルチファンの非定常せん断を利用した乱流生成, 日本機械学会年次大会講演論文集, pp.299-300, 2005.