5 1 7 アクティブに発生した風速変動の乱れについて

On the turbulent characteristics of actively generated velocity fluctuations

○正 宮城弘守 (宮崎大)、正 佐々浩司 (高知大)、正 小園茂平 (宮崎大)
Hiromori MIYAGI, Miyazaki University, 1-1 Gakuen kibanadai nishi, Miyazaki, 889-2192
Koji SASSA, Kochi University 2-5-1 Akebono-cho, Kochi 780-8520
Shigehira OZONO, Miyazaki University

1. はじめに

乱流の普遍構造を理解するためには、高レイノルズ数でかつせん断のない一様等方性の乱流場であることが望ましい。DNSでは世界最高レベルの地球シミュレータが $R_\lambda \sim 1200$ の一様等方性乱流場を実現している¹⁾が精度が不十分であり、 $1000 < R_\lambda$ の一様等方性乱流場を実現できる風洞に期待がかかる。そのような挑戦の例として動的乱流発生装置^{2),4)}や本マルチファン型風洞を用いた動的な方法による試み⁵⁾があげられる。

本研究は静的に $R_\lambda \sim 500$ を達成した定常疑似格子法⁶⁾を基本として送風機を動的制御し、局所速度勾配を時空間変動させることによって高レイノルズ数の一様等方性乱流場の生成を目指すものである。現段階では J. V. Larssen and W. J. Devenport⁴⁾が達成した $R_\lambda \sim 1250$ には及ばないが、風速変動に含まれる実際の乱れを準定量的に評価することを試みたので報告する。

2. マルチファン型風洞と動的乱流発生

図1にマルチファン型風洞を示す。長さ15.45[m]の観測部の上流側に、コンピュータで1/50[s]毎に回転数制御される99台の送風機を配置した開放押し込み式の風洞である。観測部の高さは1.8[m]、幅は2.5[m]で、流下方向に一定である。本研究では、図2に示す2種類の格子パターンを用い、白の吹き出し送風機を約 $U_{fan}=15 \pm 5$ [m/s]、グレーの吸い込み送風機を約 $U_{gri}=(5 \pm 5)$ [m/s]なる運転命令によって時間変動した。運転命令は、-5/3のパワーの勾配を持つスペクトル(Run1)と約0.2[Hz]以下の低波数側を減衰させたスペクトル(Run2)とを用い、逆フーリエ変換で生成した。運転命令の再現周期は163.84[s]で、命令に含まれた変動成分は、0.00610[Hz]きざみ

図1 マルチファン型風洞 (宮崎大学工学部)

図2 格子パターンと送風機に与えた運転命令の例

で3.998[Hz]以下の655成分である。局所速度勾配の空間分布を時間変動させるため、隣り合う送風機の位相をRun1では6[s]、Run2では3.3[s]ずらした。

計測にはKanomaxの熱線流速計と標準的なX型プローブを使用し、最高サンプル周波数24k[Hz]で1200[s]間記録した。計測位置は縮流部の吹き出し後方 $x=5 \sim 12$ [m]の断面中心である。主流方向成分 u および鉛直方向成分 w の風速変動をパソコン等で解析した。

3. 乱流場の諸特性

$x=10$ [m]における基本統計量を表1に示す。乱れ強度 u'/U は、我々の期待に反して、Run2の16.4%がRun1の7.7%に比べてはるかに大きかった。乱流レイノルズ数 R_λ は、Run1が276、Run2が353にとどまり、等価メッシュサイズ $M \sim 0.6$ [m]の疑似格子法で得た約500⁶⁾を超えられなかった。

$$E(k\eta) = [U/2\pi(\epsilon\nu^3)^{1/4}] S(f), \quad [1]$$

$$k\eta = 2\pi\eta f/U.$$

を示す。これによると、Run1、Run2の高波数側はいずれもKolmogorovスケールによる無次元表示によく乗り、明確な慣性小領域が確認された。しかし低波数側のエネルギーレベルは、Run2に比べてRun1では u, w 成分の差が大きく、異方性が裏づけられた。これはRun1では送風機は主に u 成分の低周波数を変動させただけで、 v, w 成分へのエネルギー授受が弱いと思われる。

表1 乱流場の諸特性 ($x=10$ [m])

	Run1	Run2
U [m/s]	7.0	3.3
u' / U	0.077	0.164
w' / U	0.044	0.126
λ [mm]	10.4	11.1
η [mm]	0.3	0.3
R_λ	276	353

図3 1次元エネルギースペクトル

4. 励起成分と実乱れの準定量的評価

4.1 励起成分と実乱れの分離

20分間記録したデータには動的制御の再現周期の2倍の327.68[s]の時刻暦(1.6k[Hz], 2^{19} 点)が3組含まれる。それらを算術平均して得た平均時刻暦をスペクトル解析した結果 $S_{(1)+(2)+(3)}/3$ をRun1について図4に例示した。図中には、比較のため生の時刻暦のスペクトル $S_{(1)}$, $S_{(2)}$, $S_{(3)}$ も示した。

時刻暦の平均化を行うと、再現性を示さないランダムな変動(乱れと考えられる)は幾分か除去されて、生の時刻暦から求めた $S_{(1)}$, $S_{(2)}$, $S_{(3)}$ に比べて $S_{(1)+(2)+(3)}/3$ のパワーが全体的に

低下する。ただし u 成分の低周波数領域では、偶数次成分のパワーがほとんど変化していない。これらは運転命令に含ませた 3.998[Hz]以下の 655 個の変動に周波数が一致する。このことは、運転命令の変動があまり乱されことなく繰り返し再現されていることを意味する。

ここには示していないが Run2 についても同様に検討し、 u, w の両成分で運転命令の繰り返し再現性が Run1 の w 成分と同様に低いことを確認した。Run2 でも運転命令の変動が残留していると思われるが、これらに近いパワーを持った乱れが盛んに生成された結果、再現性が低下したと推定される。

図4 時刻層の平均化による励起成分の抽出 (Run1, $x=10$ [m])

以上の検討によれば、周波数に注目して動的制御の残留成分と風洞測定部内で生成された乱れ成分とをスペクトル上で分離できると考えられる。Run1 および Run2 の u 成分のパワースペクトルについて、励起周波数成分 (0.00610[Hz]きざみで 3.998[Hz]以下の 655 成分) をグレー、それ以外を黒に色分けして図 5(a),(b)に示した。Run1 ではグレーの励起周波数成分が他の成分 (実乱れと考える) から明確に分離し、実乱れ成分へのエネルギー授受が低調であるとする推定が裏付けられた。

なお、図中に示した運転命令のスペクトルに比べ励起周波数成分のパワーが変形・低下したことは、複数の時間差をもった運転命令の加算平均でも説明されるので、乱れの効果とは考えていない。

4.2 励起成分と実乱れのエネルギー減衰特性

図5に示した分離後のスペクトルに次式を適用すると、

$$u' = \sqrt{\langle u'^2 \rangle} = \int S(f) df \quad [2]$$

励起成分のエネルギー u'_{dri}^2 と実乱れのエネルギー u'_{tur}^2 を求められる。ただし、励起周波数成分には実乱れと同程度の乱れが含まれていると考えられるから、 u'_{dri}^2 からは同じ周波数帯の乱れのエネルギー u'_{tur}^2 を差し引き、 u'_{tur}^2 は2倍に見積もった。これは、図5において黒の実乱れより上方にのぞいた励起周波数成分のパワーだけを励起成分とみなすことを

図5 励起成分と実乱れの分離 ($x=10$ [m])

表している。 w 成分についても同様に処理した。

このようにして Run1 および Run2 の励起成分と実乱れのエネルギーの減衰特性を求め図6に示した。シンボルは表1に示した通常表現の乱れを表し、実乱れ $u'_{\text{tur}}, w'_{\text{tur}}$ が黒実線、励起成分 $u'_{\text{dri}}, w'_{\text{dri}}$ がグレーの実線で示されている。細い実線は $R_\lambda \sim \infty$ の等方性乱流に対する理論的勾配 $-0.695^{7)}$ である。

まず、通常表現の u', w' の減衰は、Run1 が一般的な格子乱流に似た傾向を示しているのに対して Run2 では緩慢である。 u' と w' の差は Run2 の方が小さく、 $x=7$ [m] までにほぼ等方化して $u'/w' \sim 1.3$ 程度の値を示したのに対して、Run1 は $u'/w' \sim 1.7$ のまま等方化していない。これを成分別に検討する。Run1 の実乱れ $u'_{\text{tur}}, w'_{\text{tur}}$ は等方性乱流にほぼ一致する減衰特性を示した。これは流下中にエネルギーの補給を受けることなく元々持っていた乱れが減衰したためと考えられる。励起成分 $u'_{\text{dri}}, w'_{\text{dri}}$ の変化もこれらとほとんど差がないが、こちらは気流混合により脈動的な風速変動が平均化して見かけのエネルギーを低下したに過ぎないと考えている。これに対して Run2 の実乱れ $u'_{\text{tur}}, w'_{\text{tur}}$ のエネルギーの減衰は緩慢で、励起成分 $u'_{\text{dri}}, w'_{\text{dri}}$ からエネルギーの補給を受けながら流下したことをうかがわせる。

図6 励起成分と実乱れの減衰特性

5. おわりに

本研究では、マルチファン型風洞の送風機を動的に制御して高レイノルズ数の一様等方性乱流場の生成を試みた。乱流レイノルズ数は目標に達しなかったが、ファン運転命令の周波数成分に注目してスペクトルを分離し、脈動的な変動風に含まれる実際の乱れを準定量的に評価できる可能性を示した。またそれにより、送風機の動的制御によって乱流エネルギーを補給できることが確認された。

なお、運転命令データを変更して後日行った動的生成実験では $500 < R_\lambda$ ($x=10$ [m], $u'/w' \sim 1.3$) の乱流生成を確認したが、運転命令と生成された実乱れとをスペクトル上で分離できない結果も得られた。このことについては別報にて報告する予定である。

参考文献

- 1) Kaneda et al. Phys. Fluids, 15, L21 (2003).
- 2) Makita & Sassa, Advances in turbulence III 497 (1991).
- 3) Mydlarski & Warhaft, J. Fluid Mech., 320, 331 (1996).
- 4) Larssen & Devenport, AIAA paper 2002-2861 (2002).
- 5) 宮城・小園ほか, JAWE 年次研究発表会 (2003), JSME 鹿児島地方講演会 (2003).
- 6) 宮城・小園・佐々ほか, JSME 九州支部総会講演会, 日本流体力学会年会, JSME fed2004, 風工学シンポジウム (いずれも 2004).
- 7) Tatsumi and Kida, J. Phys. Soc. Japan 49 (1980).