# 乱流発生装置の改良と乱流場の評価

小杉 淳\* 立石 基\*\* 竹田康隆\*\*\*

# Improvement of the active turbulence generator and estimates of the turbulence field.

Atsushi KOSUGI Motoi TATEISHI Yasutaka TAKEDA

**Abstract** — Active turbulence generator (ATG) can induce turbulent flow with large-scale eddy and intensity of turbulence in that downstream by rotating at random rotation axes with many agitator wings. The computer control system that independently rotated 30 pulse motors of ATG at random was constructed. It would be possible to arbitrarily and independently change attack angle and oscillation angle of agitator wings. The results of the wind tunnel experiment showed that turbulent intensity increased and inertia sub-range in the spectrum also widened as oscillation angle large, so that realization of the turbulent flow field control was confirmed.

Key Words : turbulence generator , wind tunnel, active grid

## 1. 緒言

流体の流れが時間的・空間的にランダムに変化する 乱流の性質や作用を明らかにすることは工学的また物 理的に重要な意味を持つ。風洞や水槽内への乱流場の 形成は従来から様々な方法が用いられてきた。最も簡 単でかつ良質な乱流場を形成する方法としては丸棒や 角棒を単純に格子状に組み合わせた乱流格子⑴が知ら れている。しかし、このような静的な乱流発生機構で は、流れ場の乱れ強度や渦スケールが小さく、特にそ の速度変動スペクトル中には本質的な乱流場の形成を 表すコルモゴルフの-5/3 乗則に従う慣性小領域はほ とんど認められない。このことは流体現象に関わる乱 流の作用が限定されてしまい、流体の慣性作用が支配 的な乱流場の本質を正確に抽出できないことを意味す る。格子乱流場においてこれを解決するためには、流 速の増加あるいは格子サイズを大きくする方法がある が、設備的な面から制約を受けることが多い。このた め、動的な乱流発生装置が種々考案(2)~(5)され評価され てきたが、スペクトル中の慣性小領域が小さい、ある いは規則的な振動成分が残るなど良好な結果を得るに 至らなかった。蒔田ら(6)(7)は多数の撹拌翼が取付けられ た縦横各 15 本の回転軸をパルスモータで各々独立し てランダム反転振動させて気流を掻き乱す動的な乱流 発生機構を考案した。その結果,風路断面□700mm<sup>2</sup> の小型風洞内において明確な慣性小領域を有する規模 が大きく良質な準等方性乱流場の形成に成功した。こ の方式は小型風洞内に乱流 Re 数の大きな場を比較的 容易に実現できるため、国内外の様々な研究機関で用 いられ広くその有用性が認められている(8)(9)。また, 撹

\* 釧路高専 機械工学科

\*\*\*豊橋技術科学大学学生(H17年度卒業生)

拌翼の振幅等を制御することでせん断乱流発生装置としての使用例や(10)温度成層装置との組合せ(11)、低騒音乱流風洞(12)としての発展例もある。

小杉らは蒔田らと同型の乱流発生装置を取付けた拡 散実験用風洞を用い大気中における粒子拡散現象の解 明を行っている(13)(14)。大気拡散現象を定量的に捉えモ デル化していくためには、様々な規模の乱流場やせん 断流れの場において実験データを蓄積し知見を得るこ とが重要であるが、現在設置されている乱流発生装置 の制御システムはデジタル回路で構成されており、単 純なランダム反転振動しか出来ない。このため撹拌翼 の振幅を任意に変化させ、乱流現象に強く関係する渦 スケールや乱れ強度の制御が可能となる、さらに大気 中の接地境界層に見られる規模の大きい速度せん断流 れを形成するためのせん断乱流発生装置の機能を持た せた乱流発生装置への移行が望まれる。そこで本研究 では既存装置の改良をおこなうことで、風洞内に形成 される乱流場の規模を変化できるパルスモータの制御 システムを新たに構築し、そのシステム評価および形 成される乱流場の評価を行うことを目的とした。

#### 2. 制御システム

2-1. 既存制御システム Fig1, 2 に乱流発生装置 の概要とその既存制御システムを示す<sup>(7)</sup>。本装置は縦 横各 15 個,合計 30 個のパルスモータ(2相,オリエ ンタルモータ 4CPH-002 ステップ角 1.8°)によって 多数の撹拌翼が付いている回転軸をランダムに反転運 動(振動)させ,その下流に渦スケール,乱れ強度の 大きな乱流場を形成できる。また,撹拌翼を流れに平 行に設置することにより格子間隔 M=46.7mm の乱流 格子として使用することもできる。制御系は Fig.2 に示 すようにマルチバイブレータを用いた矩形波発生回路

<sup>\*\*</sup> 長岡技術科学大学学生 (H19 年度卒業生)

で駆動パルスを発生し、反転のためのランダムパルス を方向反転パルス発生器によりそれぞれバッファを介 してドライバに入力している。そのため現状では撹拌 翼のランダム反転動作を制御することは難しく、これ を実現するためにはマイコンまたは PC を利用した制 御システムを制作する必要がある。



Fig.1 Schematic view of active turbulence generator (ATG) by Makita<sup>(6)</sup>.



Fig.2 Current control system of ATG.

#### 2-2.新制御システムの概要

新たに構築する制御システムの仕様は次の通りであ る:①撹拌翼の主流に対する迎え角と振れ角および回 転速度を各軸任意に設定できる(Fig.3 参照)。②モー タの制御およびクロック発生は全てコンピュータを利 用して行う(Fig.4 参照)。③操作容易なユーザインタ フェイスを設ける。また、機械部分の変更点としては ギア比 1:4 で増速されている回転軸はバックラッによ る回転誤差の蓄積を防ぐためモータ直結とする。これ らの仕様条件を満たすため Fig.4に示すような新制御 システムへの改造を行った。本システムは撹拌翼に対 して自由度の高い設定及び動作を与えるために 30 基 のモータ全てに対して個別にランダムパルスを生成す



Fig.3 Definition of the attack angle  $\alpha$  and the oscillation angle  $\beta$  for wing in the agitator wing.



Fig.4 Concept figure of new control system for active turbulence generator.

るための高速な演算処理が必要となる。そのため PC からソフトウェアプログラムによりパルス生成を行い I/O ボードを介してドライバユニットに送ることでモ ータ 30 基の回転速度,角度の制御を行うようにした。 2 - 2 - 1ドライバ駆動方式の改良 モータドライ バには、回転軸の高速反転運動に十分追従し脱調を起 こさない駆動が要求される。今回の改良においては従 来 4:1 のギア比で増速されていた回転軸にパルスモー タが直結されるため、この状態で同じ回転速度を得る ためにはトルク特性を改善させる回路構成にする必要 がある。従来のシステムに使用されていたドライバ回 路は定電圧回路・ユニポーラ駆動である。定電圧回路 はその特性上、モータに負荷がかかった状態において トルク不足になりやすいことから,本改良では定電流 回路への変更を行い、またトルク確保のためバイポー ラ駆動とした。バイポーラ駆動は、励磁コイルの半分 しか使用しないユニポーラ駆動と違い、フルに励磁コ イルを使うため多くの電流が必要になるものの、その 分トルクの増加が期待できる。さらに、共振領域での 脱調と、角度制御時のステップ角が大きいことを改善 するため、マイクロステップ駆動の導入を図った。こ れによりステップ角が1.8°から8分割され0.225°の 微小角度で駆動可能になり、ステップ駆動時の共振振 動を極力抑えることで低回転時の安定性を向上させ脱 調を防ぐことが可能となった。マイクロステップ駆動 のドライバ IC には、バイポーラ駆動タイプの LB-1946(SANYO)を採用した。ただし、このドライバ IC の制御はシリアル通信で行う必要がり、パラレルーシ リアル変換のために Microchip 社製マイクロコントロ ーラ PIC16F648A を搭載している。Fig.5 に制作した ドライバの回路図を示す。回路はプリント基板化し実 装した後、専用の制御ボックスに収めた。



Fig.5 Circuit diagram of pulse motor driver.

**2-2-2** PC によるパルスモータの制御 30 基の パルスモータの制御には、マイコンか PC の利用が前 提となる。本改良では操作性や後述するユーザインタ フェイスの観点から C 言語を利用した PC プログラミ ングで制御システムを構築した。PC からはモータを動 かすための駆動パルスと方向反転のための反転パルス を全モータに送る必要がある。方向反転パルスはその 間隔がランダムであり、またある範囲内(振れ角 $\pm \beta$ ) で撹拌翼を振らせる場合はランダム回転中に指定した 角度を超えないようにする必要がある。これらの角度 制御は、パルスモータに与えるパルスにより制御を行 うことができる。角度制御を行う場合は、必要ステッ プ分をモータに送ることで正確な角度制御が可能とな り、回転速度はパルス間隔により調整(PWM 制御) が可能である。また合わせてモータの反転時における 駆動に加減速域を設け円滑な動作をさせることで脱調 の防止を行った。なお, PC の出力には I/O ボード (コ ンテック DO-64T2-PCI) を用いた。このボードは 非絶縁型オープンコレクタ方式の高速タイプで、反応 速度は 200nsec, 出力信号数 64 であり, 信号伝送時間 等を配慮しても1枚のボードで全てのモータを制御で きる。Fig.6に設定振れ角内でランダム振動させる場合 のフローチャートを示す。

**2-2-3 ユーザインタフェース** Fig.7 に新制御 システムの PC 制御画面を示す。基本的にキーボード 入力により全てのモータの迎え角,振れ角,回転速度



Fig.6 Flowchart of the random turn drive control for pulse motors on setting oscillation angle  $\pm \beta^{\circ}$ .

などの設定を容易に行えるようにした。

**2-2-4 機械部分の変更** 従来の乱流発生装置は モータ回転数確保のためギアボックスが取付けられて いたが, 撹拌翼の迎え角および振れ角を正確に制御し ようとするとギアのバックラッシによる累積的な誤差 が問題となる。このため回転軸とモータ駆動軸はカッ プリングを介し直結にする構造に変更を行った。

#### 3. 新制御システムの評価

本研究で開発された制御システムが正確に作動する か次の項目について確認を行った。

①定常回転速度:従来のシステムでは 5~6rps 程度



Fig7. Display screen of a user interface.

であったが、モータと回転軸を直結にしたことでモー タドライバの改良などを行っても従来と同じ速度での 回転は難しく 2.5rps 程度が限界となった。ただし、本 装置に装着されているパルスモータは約 20 年以上前 の古いものであり、これをトルク特性が改善されてい る現行タイプと交換することにより、従来と同程度か それ以上の速度を確保できると考えられる。

②迎え角αの設定:迎え角の設定は回転軸を直結に したこととマイクロステップ駆動により,正確に指定 した角度に設定可能であることが確認できた。なお、 風洞内に任意のプロファイルを持つ速度成層を形成す るためには、撹拌翼の迎え角制御のみでは難しく、こ れに金網等で作られる抵抗体を水平回転軸ごとに付加 することで実現できる<sup>(10)</sup>。

③設定振れ角内でのランダム動作:Fig.8(a)~(c)に 振れ角を±45°に設定した場合のランダムパルスの発 生状況と撹拌翼の存在確率分布を示す。なお、この時 の最高巡航回転速度は脱調しない限界の速度である 1.2rps 程度とした。(a)に示されるランダムパルスにお いて矩形波にスパイク状の信号が見られるのは発生し たランダム信号の間隔が短く、加速または減速時間内 に次の反転信号が発生するためであるがモータの動作 には特に問題ない。また、縦軸は回転数(rps)であり、 正が時計回り(CW)、負が半時計回り(CCW)に対応して いる。(b)図は撹拌翼の移動角度出現確率を示したもの で、最大で±90°(最大で+45°から-45°,または



Fig.8 Random pulse and probability of occurrence of oscillation angle .



Fig.9 Time series data of random pulse and displacement angle of agitator wing.

その逆が可能であることを意味する)まで広がり,その 分布形状は必ず撹拌翼が反転し,中心部を通過する確 率が増加するため三角形状となっている。(c)図は撹拌 翼位置の出現確率を表したもので,設定角度内でフラ ットに出現している。また,Fig.9 は振れ角β=±45° 設定時のランダム反転パルスと撹拌翼の時系列角度変 化(迎え角に対する翼の瞬間静止位置)を示したもので ある。撹拌翼の静止位置が設定角度内で時間的にラン ダムに生じていることが確認できる。これらのデータ については、他の振れ角設定でも同等な結果が得られ ている。以上のことより振れ角を設定した場合のラン ダム振動の制御システムが仕様通り実現できているこ とが確認できた。

④完全ランダム動作:この場合の完全ランダムとは

撹拌翼の振れ角を±180°に設定した場合であり,一 度の反転運動で最大で 360°回転することになる。こ の場合も③の結果と同様に正常に動作することが確認 された。

#### 4. 乱流場の評価

**4-1実験装置および方法** Fig.10に実験装置を示す。 今回改良を行った乱流発生装置は測定胴( $0.7 \times 0.7 \times 5$  m<sup>3</sup>)上流に設置されている。実験は主流流速 U=5m/s の もとせん断を与えない(平均迎え角  $\alpha$  は全て 0°)一様 流中で行い,その中で撹拌翼の振れ角  $\beta$ を±15°,±30°, ±45°,±60°,±90°の5通りで変化させ,測定胴風路 断面中央における乱れ強度および変動速度の一次元エ ネルギスペクトルを求めた。また,比較実験として格 子乱流場についても行った。なお,回転軸の平均回転 速度は 1.2rps とし,計測にはI型熱線プローブ( $5\mu$ m)を定温度型熱線風速計に接続して行い,その出力を 必要に応じ RMS 回路や FFT アナライザに入力して乱 流場の諸特性を求めた。



Fig.10 Schematic view of wind tunnel experiment.

# 4-2 実験結果および考察

4-2-1 乱れ強度の流れ方向変化 Fig.11に乱れ 強度(u'/Ū, u':速度変動 rms 値, U:平均速度)の流れ 方向変化を表す。横軸は格子のメッシュサイズ M(47.6mm)で無次元化している。乱れ強度の値は撹拌 翼の振れの大きさに対応し増加しており、端的に乱流 場の制御が実現できていることがわかる。このことは Fig.12に示す速度の瞬間波形からも理解できる。また、 各乱流場とも同じ傾向で流れ方向に乱れ強度は減衰し ていくが x/M=40~50付近からはその割合は低下し乱 流場が平衡に近いことが理解できる。しかし、改良前 後のランダムモードの結果を比較すると、モータ回転 数の高い従来の方が大きな値を持つことがわかる。現



Fig.11 Streamwise variation of turbulent intensity.



Fig.12 Instantaneous wave form of turbulence fields.

状の旧型モータでは回転速度が限界であり,従来と同 程度の回転数を確保するためにはモータ代替が必須で あると思われる。

4-2-2 変動速度スペクトル Fig.13 に x/M=50 における速度変動の一次元エネルギースペクトルを示 す。撹拌翼の振れ角の変化に対応して乱れ強度と同様 にエネルギースペクトルも増加し、合わせて乱流場に 含まれる変動の周期も広範囲に及んでいることがわか る。このことは Fig.12 に示した速度の瞬間波形中に低 周波の変動に対応したうねりのような成分と、小さな 高周波の成分が含まれていることと対応している。ま た、流体の粘性作用が及ばない慣性小領域は乱流場の 規模を示すことのできる一つの指標であり、スペクト ル中ではコルモゴロフの-5/3 乗則が成り立つ範囲と されている。本実験の場合、格子乱流場ではほとんど 存在しないが、振れ角の増加とともに-5/3 乗則に従う 慣性小領域の存在範囲が増しており、このことは様々 な規模の乱流場の形成が可能であることを示すもので ある。

Fig.14 は撹拌翼の回転速度がスペクトルに与える影響を調べたもので、撹拌翼はランダム振動させた場合のものである。回転速度はモータの脱調の関係から変化幅を大きくとれず0.8, 1.2, 1.5rpsの3通りとした。

その結果,低周波部分を除き大差は認められない。これは,回転数の変化幅が小さいためであると考えられるが,回転速度の大きさが乱流場に与える影響については今後モータ交換などにより回転軸の高速化を図り 詳細に調べる必要がある。



Fig.13 Comparison of the one-dimensional energy spectrum on controlled turbulence fields.



Fig.14 Comparison of the one-dimensional energy spectrum in each rotation speed.

### 5. 結論

乱流発生装置の改良を行い,制御システムの評価お よび乱流場の評価から以下の結論を得た。

(1)乱流発生装置に装着されている 30 基のパルスモー タの迎え角および振れ角を各々独立して設定できる PC 制御システムを構築できた。

(2) 撹拌翼の移動角度出現確率や撹拌翼位置の出現確

率および, 撹拌翼の時系列角度変化を求め設定され た振れ角内でランダム反転振動が行われることが確 認できた。

- (3)迎え角の設定は8分割マイクロステップ駆動を導入 したことで0.225°の精度で行うことができた。
- (4)設定した振れ角でのランダム振動,および振れ角が ±180°の完全ランダム振動は長時間にわたり正常 に動作することが確認できた。
- (5)振れ角の大きさに対応して乱れ強度は増加し、速度 変動のエネルギスペクトル中に見られるコロモゴロ フの-5/3 乗則に従う慣性小領域の範囲も大きくな る。このことは乱流場で作用する渦スケールが大小 広範囲に渡ることを意味し、振れ角の変化によって 乱流場の規模が制御可能となったことを示している。

今後、新型モータへの代替を図り、乱流特性の詳 細をX型プローブ等の計測から明らかにし、さらに 速度成層装置の制作をすすめ乱流発生用装置と組合 わせて用いることで、様々なせん断流れにおける拡 散現象や他の乱流現象の実験を行っていく予定であ る。

#### 参考文献

- (1) Simons, L. F. & Salter, C. , Proc., Roy. Soc. Ser. A 415,212 (1934)
- (2) Gad-el-Hak, M. & Corrsin, S., J. Fluid Mech. 62,115-143 (1974)
- (3) Tassa, Y. & Kamotani, Y., Phys. of Fluids 18,411 (1975)
- (4) 斉藤・佐藤, 乱流シンポジウム講演論文集, 103 (1974)
- (5) Cermak, J. E., AIAA J. 9,1746 (1971)
- (6) Makita, H, Fluid Dynamics Research, 8, 53-64(1991)
- (7) 蒔田,他3名,機論 B53-495,3173-3179(1987)
- (8) Mydlarski L and Warhaft Z , J.F.M., 358, 135-175 (1998)
- (9) Kang H S, Chester S and Meneveau C, J.F.M., 480, 129-160 (2002)
- (10) 関下,他2名,機論B68-665,55(2002)
- (11) Sassa, K., et.al., Advances in Turbulence VIII, (2000), p.291
- (12) Iida, A., et.al., Review of Automotive Engineering, 27, 4 (2006).
- (13)小杉・蒔田, 機講論, No.05-32,251 (2005)
- (14)小杉・蒔田, 機構論, No.07-16, (2007)