

コーン型ドラフトチューブ付攪拌槽の混合性能

古川陽輝¹・加藤禎人¹・南雲亮¹・多田豊¹・佐藤誠²

¹名古屋工業大学 生命・物質工学科, 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

²佐竹化学機械工業(株), 335-0021 埼玉県戸田市新曽 66

キーワード：攪拌, 混合, ドラフトチューブ, 所要動力

風力発電において使用されている風レンズの形状に着目し, コーン型ドラフトチューブを考案した. 本報では, このコーン型ドラフトチューブを備えた攪拌槽における混合パターンと攪拌所要動力を観測・測定した. その結果, コーン型ドラフトチューブを使用することによって低動力で良好な混合が得られた.

緒 言

ドラフトチューブは対流誘導円筒としてエアリフトリアクターや通気攪拌槽あるいはヘリカルリボン翼と併用した重合反応装置に使用される場合がある. ドラフトチューブを設置することによって攪拌槽内流体の上下の対流循環が促進され, 気泡の循環および液中への取り込みも促進され, 低通気量で済む場合もある. 一方, エアリフトリアクターでは高い通気量による運転が可能となり高い $K_L a$ が得られるという利点もある. また高粘度流体の混合に対してヘリカルリボン翼との併用により非常にシャープな循環時間分布が得られるというデータもあり種々の利点がある. しかしながら, ドラフトチューブを攪拌槽に設置する場合の技術的なデータはほとんど入手できないのが実情である.

そこで, 筆者らは(Furukawa *et al.*, 2013), 種々の幾何形状のドラフトチューブを備えた攪拌槽の所要動力を測定し, その動力数がドラフトチューブの幾何形状にはほとんど影響されないことを見出した. さらにその動力数は低粘度流体を使用した乱流域では, 亀井ら(Kamei *et al.*, 1995, 1996)および平岡ら(Hiraoka *et al.*, 1997)の式を用いて, 邪魔板枚数を $n_B=1$ とし, 邪魔板幅をパドル翼では $B_W/D=0.05$, ピッチパドル翼では $B_W/D=0.08$ とすることで相関できることを示した. ただし, どのような幾何形状のドラフトチューブが混合に適しているかは検討されていない.

そこで, 筆者らは風力発電において使用される風レンズと呼ばれる集風体に着目した. 風レンズとは, これを風車周りに設置することによってレンズ後方での圧力低下が起き, これにより集風効果をもつものである. この風レンズの形状を基にコーン型ドラフトチューブ(コーン型 DT)を考案した. コーン型 DT を用いることによって

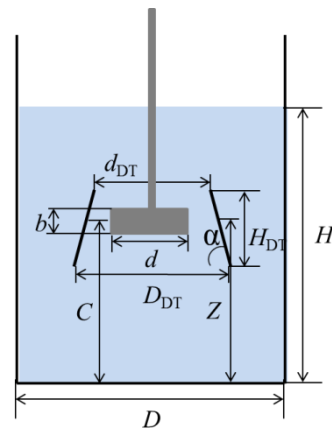


Fig.1 Geometry of mixing vessel

Table 1 Geometry of cone type draft tube

No.	D_{DT} [m]	d_{DT} [m]	α [rad]	H_{DT} [m]
1	0.120	0.0700	$5\pi/12$	0.0925
2	0.120	0.0527	$7\pi/18$	0.0925
3	0.156	0.0700	$13\pi/36$	0.0925
4	0.120	0.070	$\pi/6$	0.0144

攪拌槽内の循環が促進されると考えられる. 本報では, コーン型 DT を備えた攪拌槽において混合パターンを可視化し, 攪拌所要動力を測定し, 有用な結果が得られたので報告する.

1. 実験方法

使用した攪拌槽はアクリル樹脂製平底円筒槽であり, その内径 D は 0.185 m であり, 液高さ H は槽径 D と等し

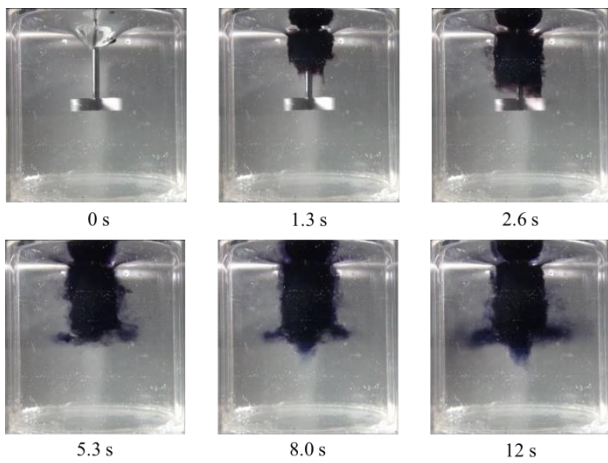


Fig. 2 Mixing pattern of turbulent vessel without baffle in turbulent region. ($Re=18,000$)

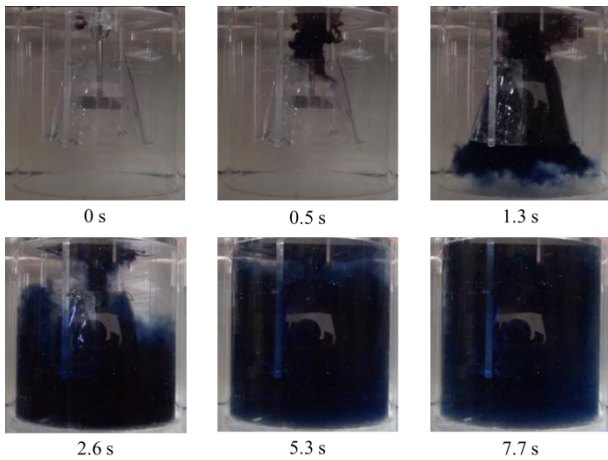


Fig. 4 Mixing pattern of turbulent vessel with cone type draft tube (No. 2) in turbulent region. ($Re=18,000$)

くした.コーン型 DT 付攪拌槽の幾何形状を **Figure 1** に示す.使用したコーン型 DT は 4 種類の幾何形状で作製した.その詳細については **Table 1** に示す.コーン型 DT は全ての実験で $Z/H=0.5$ に設置した.攪拌翼には,翼径 d が 0.070 m で,翼幅 b/d が 0.2 の 4 枚羽根パドル翼を使用した.流体には,濃度を調整した水飴水溶液,および水道水を使用した.

攪拌所要動力測定には,最も一般的な軸トルク測定法を用いた.使用したトルクメーターは **SATAKE ST-3000** である.

攪拌所要動力はその平均トルクを用いて $P = 2\pi nT$ で求めた.動力測定法は筆者らの一連の方法(Kato *et al.*,2010)と同じである.

混合過程は,ヨウ素でんぷん反応を用いた着色法で可視化し,CCD カメラ(SONY 製 HDR-CX180)で撮影した.さらに,ヨウ素-チオ硫酸イオンの酸化還元反応を利用した脱色法で混合時間を測定した.

2. 結果と考察

2.1 混合パターン

予備実験として,コーン型 DT を用いないで乱流域における邪魔板無し乱流攪拌槽の混合パターンを観測し

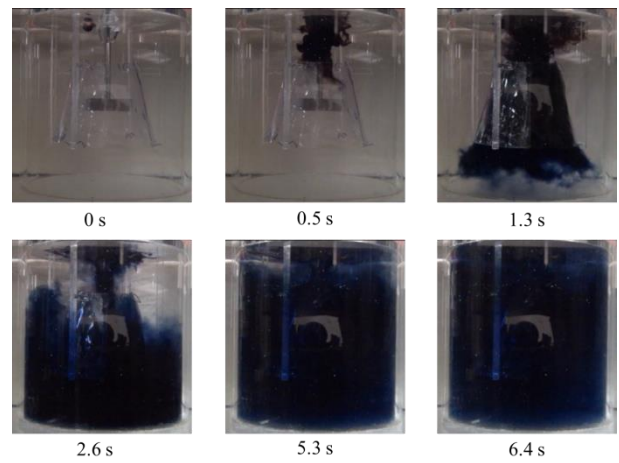


Fig. 3 Mixing pattern of turbulent vessel with cone type draft tube (No. 1) in turbulent region. ($Re=18,000$)

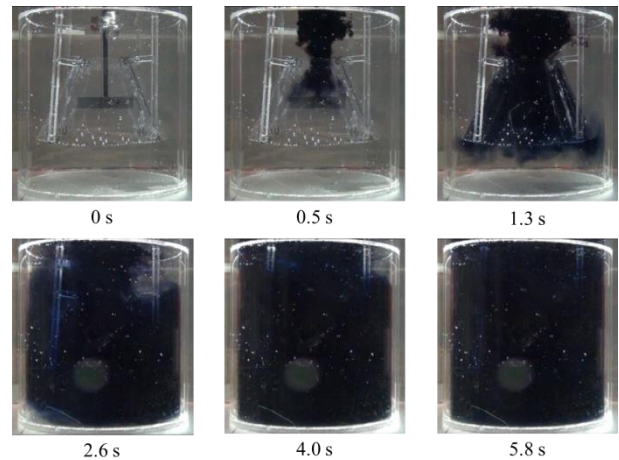


Fig. 5 Mixing pattern of turbulent vessel with cone type draft tube (No. 3) in turbulent region. ($Re=18,000$)

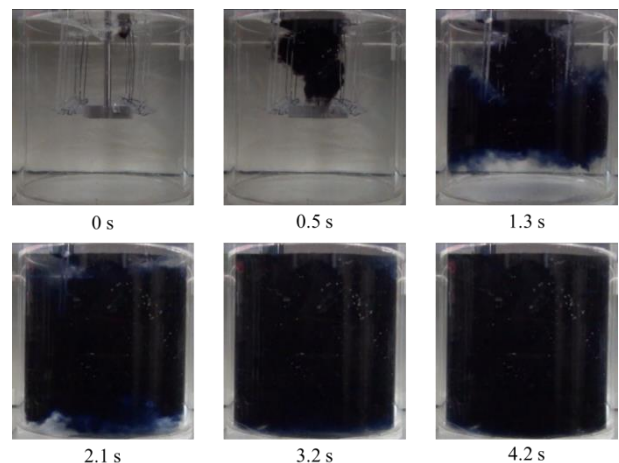


Fig. 6 Mixing pattern of turbulent vessel with cone type draft tube (No. 4) in turbulent region. ($Re=18,000$)

た.その結果を **Figure 2** に示す.一般的に知られているように,この条件では翼近傍に固体的回転部が発生する.

これに対して,**Table 1** に示した No.1 のコーン型 DT を使用したところ **Figure 3** に示すような混合パターンを得た.固体的回転部が翼近傍に発生することなく,良好な混合が得られた.

No.1 と比較して上部開口径 d_{DT} を狭くした **Table 1** に示した No.2 のコーン型 DT および下部開口径 D_{DT} を広

Table 2 Mixing time and power consumption for various condition

	Without baffle	Standard baffle	Cone type draft tube			
			No.1	No.2	No.3	No.4
t_m [s]	462	5.3	28.1	28.9	21.8	19.8
N_p [-]	0.60	4.4	1.6	1.8	1.9	1.9
P_V [W · m ⁻³]	10.7	78.4	28.8	32.4	33.8	33.8

くした No.3 のコーン型 DT を用いて得られた混合パターンを観測した。その結果を、各々 Figure 4 および 5 に示す。両図から、上部開口径と、下部開口径のいずれを変化させた場合も、混合時間にはほとんど影響は無かった。

一方、コーン型 DT の高さ H_{DT} を小さくした No.4 のコーン型 DT を使用すると、混合パターンに大きな変化がみられた。得られた挙動を Figure 6 に示す。コーン型 DT 高さを変化させた場合、混合時間が劇的に減少していることが分かる。このような結果となった理由は、 H_{DT} が高い場合には着色液がコーン型 DT 内部で循環した後に下方方向に吐出されるのに対して、 H_{DT} が低い場合にはコーン型 DT 内部で循環することなく速やかに下方方向に吐出されるためである。

2.2 混合時間

対照実験として、コーン型 DT を用いないで標準邪魔板条件 ($n_b=4$, $B_w/D=1$) での混合時間も測定した。邪魔板無し攪拌槽、標準邪魔板条件の攪拌槽および 4 種類のコーン型 DT 付攪拌槽で測定された混合時間 t_m を Table 2 に示す。標準邪魔板条件では一般的に知られているように速やかに混合が達成される。一方、いずれのコーン型 DT でも邪魔板無し攪拌槽と比較して、混合時間は短縮されたことが確認できる。

さらに、混合時間が最も短いコーン型 DT は、 H_{DT} が低い No.4 であった。前述したように、コーン型 DT 高さが高いものでは着色液がその内部で混合された後に吐出されて攪拌槽内全体で混合が達成されるのに対して、低いものは着色液の投入直後に攪拌槽内全体に拡散され混合が達成される。この混合過程の違いが、混合時間に反映されていると考えられる。

2.3 フローパターン

乱流攪拌槽においてコーン型 DT の使用を使用すると、混合が促進される。Figure 7 は、スリット光を用いたトレーサー法で可視化したコーン型 DT 付攪拌槽のフローパターンである。Fig.7(a) に示すようにコーン型 DT 付攪拌槽では、翼から吐出される流れがコーン型 DT に衝突し、上下の二次循環流が発生する。これに対して、Fig.7(b) に示すように邪魔板無し乱流攪拌槽では旋回流が主体的である。このことがコーン型 DT 付乱流攪拌槽において混合を促進するものと考えられる。

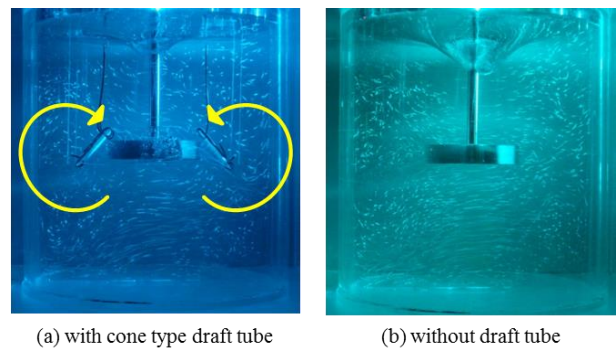


Fig. 7 Visualization of flow pattern in mixing vessel (a) with and (b) without cone type draft tube

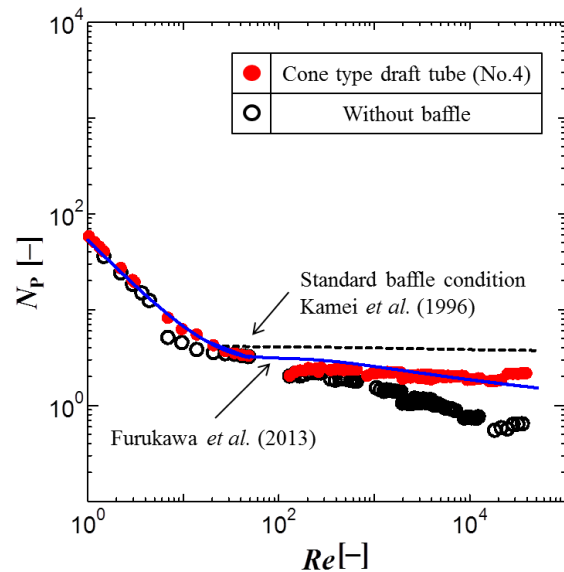


Fig. 8 Effect of cone type draft tube on power consumption

2.3 攪拌所要動力

邪魔板無し攪拌槽、標準邪魔板条件の攪拌槽およびコーン型 DT 付攪拌槽で測定された動力数を Figure 8 に示す。図中の黒の点線は亀井らの式 (Kamei et al., 1995, 1996) から計算された標準邪魔板条件 ($n_b=4$, $B_w/D=0.1$) の動力数を示しており、乱流域において一般的に知られているように高い動力数を示している。コーン型 DT 付攪拌槽の動力数は、層流域では邪魔板およびドラフトチューブの有無に関係なく同じ動力数を示すが、乱流域では標準邪魔板条件より低い動力数を示した。一方、Furukawa et al. (2013) で得られたドラフトチューブ付攪拌槽の動力相関を実線で示すが、これとはよく一致した。したがって、コーン型 DT 付攪拌槽は低動力で良好な混合を得るのに有用な攪拌装置である。

3. 結言

種々のコーン型 DT を用いて混合パターンを観測した。その結果、コーン型 DT を用いることによって混合が促進されることがわかった。さらに、混合をより促進するためには、DT 高さを小さくした方が良い。また、乱流域において、4 枚羽根パドル翼の標準邪魔板条件における動力数は 4 前後を示すのに対して、コーン型 DT 付攪拌槽

における動力数は 2 前後の低い動力数を示す.以上のことからコーン型 DT を使用した攪拌槽は低動力で良好な混合を達成できると考えられる.

Nomenclature

b	= height of impeller blade	[m]
B_W	= baffle width	[m]
C	= clearance between impeller and bottom	[m]
d	= impeller diameter	[m]
d_{DT}	= upper diameter of cone type draft tube	[m]
D	= vessel diameter	[m]
D_{DT}	= lower diameter of cone type draft tube	[m]
H	= liquid depth	[m]
H_{DT}	= height of cone type draft tube	[m]
$K_L a$	= volumetric mass transfer coefficient	[s ⁻¹]
n	= impeller rotation speed	[s ⁻¹]
N_P	= power number (= $P/\rho n^3 d^5$)	[-]
P	= power consumption	[W]
P_v	= power consumption per unit volume	[W · m ⁻³]
Re	= impeller Reynolds number (= $d^2 n \rho / \mu$)	[-]
t_m	= mixing time	[s]
T	= shaft torque	[N · m]
Z	= clearance between draft tube and bottom	[m]
μ	= liquid viscosity	[Pa · s]
ρ	= liquid density	[kg · m ⁻³]
α	= angle of cone type draft tube	[rad]

Literature Cited

- Furukawa, H., Y. Kato, Y. Tada, S. T. Koh and Y. S. Lee; "Power Consumption of Mixing Vessel with Draft Tube," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **39**, 9-12 (2013)
- Hiraoka, S., N. Kamei, Y. Kato, Y. Tada, H. G. Cheon and T. Yamaguchi; "Power Correlation for Pitched Blade Paddle Impeller in Agitated Vessels With and Without Baffles," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **23**, 969-975 (1997)
- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, H. Shida, Y. S. Lee, T. Yamaguchi and S. T. Koh; "Power Correlation for Paddle Impellers in Spherical and Cylindrical Agitated Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 41-48 (1995)
- Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, K. Iwata, K. Murai, Y. S. Lee, T. Yamaguchi and S. T. Koh; "Effect of Impeller and Baffle Dimensions on Power Consumption under Turbulent Flow in an Agitated Vessel with Paddle Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22**, 249-256 (1996)
- Kato, Y., Y. Tada, K. Urano, A. Nakaoka and Y. Nagatsu; "Differences of Mixing Power Consumption between Dished Bottom Vessel and Flat Bottom Vessel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **36**, 25-29 (2010)

Mixing Performance of a Cone-Type Draft Tube

Haruki FURUKAWA₁, Yoshihito KATO₁, Ryo NAGUMO₁, Yutaka TADA₁, Makoto SATO₂

₁Department of Life and Materials Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555, Japan

₂Tokyo Office, Satake Chemical Equipment Mfg., Ltd., 66 Niizo, Toda-shi, Saitama, 335-0021, Japan

Keyword : Mixing, Agitation, Draft tube, Power consumption

To improve mixing performance, a cone-type draft tube based on the wind lens used in a wind power plant was proposed. Observation and measurement of the mixing pattern and power consumption with the cone-type draft tube revealed that it provided better mixing with lower power consumption.