

論文 3次元画像解析手法を用いた2軸強制練りミキサの流動解析とその定量化

籠谷 武^{*1}・中島 翼^{*2}・橋本 親典^{*3}・渡邊 健^{*4}

要旨：近年、高強度・高流動コンクリートのような高粉体量の配合が多い。これらは、従来の低スランプコンクリートに比べ、粗骨材割合が少ないため、コンクリートミキサによる練混ぜ時間は長くなる傾向にある。2軸強制練りミキサの高性能化にはミキサ内のコンクリート流動を明らかにする必要がある。本研究では、フレッシュコンクリートの可視化実験による3次元画像解析手法を用い、ミキサのブレード回転方向および、ブレード傾斜角度の違いによるミキサ内モデルコンクリートの流動挙動を解析し、定量化した。

キーワード：2軸強制練りミキサ, 可視化実験, 3次元, 画像解析

1. はじめに

近年、高強度コンクリート、高流動コンクリート、超高強度モルタル等の数多くの高性能コンクリートが出現している。これらは構造物の設計や施工の概念を大きく変化させるだけでなく、配合設計や練混ぜ等の製造技術に対しても大きな影響を与える結果となった。これらのコンクリートは、超微粒子であるシリカフュームや高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材を混合し、従来に比べ粉体量が多い。高粉体配合の高性能コンクリートは、普通コンクリートに比べ、材料本来の性能を発揮する状態まで練り混ぜるのに時間を長くとる必要がある。例えば100N/mm²を超える超高強度コンクリートの練混ぜ時間は、通常120秒以上を必要とする。このため、レディーミクストコンクリート工場では、供給能力の低下が問題となっている。この原因は、高強度コンクリート配合が、高粉体量であり、かつ単位粗骨材量が850kg/m³前後で極端に粗骨材量が少ないことにより、粗骨材粒子群の回転・衝突による練混ぜが期待できないためである。そのため、高性能コンクリートの練混ぜ時間の短縮を可能とする2軸強制練りミキサの高性能化が要求されている。

これまで橋本ら¹⁾は、2軸強制練りミキサのコンクリート練混ぜ機構の解明を目的とし、フレッシュコンクリートの可視化モデルを用いて、ミキサ内のコンクリートの挙動をビデオ画像で記録する試験方法を提案した。この手法を用いて、吉田ら²⁾は、ブレード形状の違いによる混合度を定量的に評価し、練混ぜ性能への影響を明らかにし、ミキサの性能向上へと役立てた。

本研究では、粉体量が多い高強度コンクリートに適したコンクリートミキサによる新たな練混ぜの可能性を追求すべく、可視化実験による3次元画像解析手法を用

い、ブレードの回転方向、ブレードの傾斜角度が、モデルコンクリートの流動に与える影響を解析し、定量化した。

2. 2軸強制練りミキサの流動形態

図-1に2軸強制練りミキサの練混ぜに寄与する2つの流動機構の概念を示す³⁾。1本のシャフト回りには、“らせん流動”が形成される。隣り合ったシャフトから逆位相に発生するらせん流動によりミキサ内を循環する“巨視的な練混ぜ”は「全体循環流動」と呼ばれ、投入された粒度が大きく異なる各種粉体材料を均一に混合する流れを形成する。2本のシャフト間において逆位相のらせん流動が交互に衝突し合うことにより形成する“微視的な練混ぜ”は「局部交錯流動」と呼ばれ、セメント粒子と水の接触頻度を高め、セメントの水和反応を活発にする作用を与える流れを形成する。

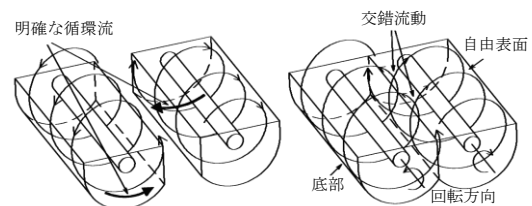


図-1 2軸強制練りミキサの流動形態³⁾

3. 2軸強制練りミキサのブレードの回転方向

2軸強制練りミキサの回転方向を図-2に示すように、外側から内側へ回転する方向を正回転、内側から外側へ回転する方向を逆回転と定義する。コンクリート分野での2軸強制練りミキサのブレード回転方向は、正回転方向である。その理由の一つにブレードとケーシング間への粗骨材の噛み込みの影響を緩和することが挙げられ

*1 日工(株) 産業機械技術センター(正会員)

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程(学生会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部理工学域 社会基盤デザイン系 教授 工博(正会員)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部理工学域 社会基盤デザイン系 准教授 博(工)(正会員)

る。一般的な練混ぜ量の場合、練混ぜ中の材料高さはミキサ軸中心より下に位置するため、ブレードがケーシングへ接近するときの粗骨材を噛み込むスペースを極力少なくできるようになっている。これを逆回転方向に回した場合、ブレードが粗骨材を運びながらケーシング中央へ進入するため、粗骨材を噛み込みやすくなるのである。

一方、化学や食品分野においては、ニーダ⁴⁾のように逆回転方向に回すミキサは存在する。ニーダとは2本の混合翼が互いに逆方向に回転し、混合物をせん断・圧縮・引き伸ばして練り混ぜる装置のことであり、主に粘性材料に使用される。しかし、噛み込みの懸念のある材料では一般的に使用されない。冒頭での説明のように近年の高強度コンクリートのように高粉体配合が増えており、これらは高粘性のモルタルをいかに早く練り混ぜられるかが重要であるため、ブレードの回転方向による練混ぜへの影響を解明することは重要であると考えられる。

4. 実験概要

4.1 使用ミキサ

本実験で用いたモデル2軸強制練りミキサの写真と諸元を写真-1、表-1に示す。実験に用いたモデル2軸強制練りミキサの容量は34.5ℓであり、公称2.25m³の実機ミキサの約1/65の縮尺モデルである。ミキサケーシング部は透明のアクリル樹脂製であり、ミキサケーシング部を固定している架台とモータ部に遮られている部分以外は、いずれの方向からも内部透視が可能である。ブレードは連続らせん形状で、複数のアームによりシャフトに固定されている。また、ミキサ軸回転速度はモデルコンクリートが実際のコンクリートの流動に近くなるように設定し、実験を行った。

4.2 使用材料

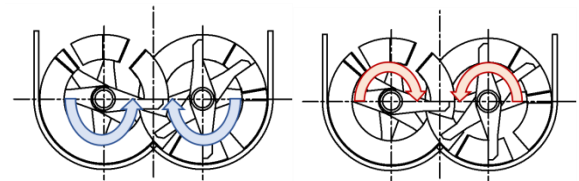
実験では、高粘性コンクリートを1相系の粘性流体と仮定し、モデルコンクリートとして無色透明である高吸水性高分子樹脂水溶液（密度1.0g/cm³）を用いた。モデルコンクリートの粘性は、高分子樹脂の添加量によって変化させることが可能である。モデルフレッシュコンクリートの粘性は、ミニスランプフローを用いて評価し、添加量4.0g/lでフロー値250mmで一定とした。また、流動の挙動を追跡する着目トレーサー粒子（以降、トレーサー粒子と称する）として、直径20mmの高弾性樹脂球を用いた。

4.3 実験パラメータ

4.3.1 ブレードの回転方向

モデルミキサブレード構成と回転方向を図-3に示す。パラメータは正回転、逆回転の2パターンとした。正回

転のブレード構成で逆回転させると、材料が逆方向に送られ、ケーシング内を循環しないため、逆回転時は、シャフトを左右入替えて、ブレードが材料を循環させるように変更した。また、本実験におけるもう一つのパラメータであるブレードの傾斜角度は0度とした。



正回転 逆回転
図-2 ブレードの回転方向

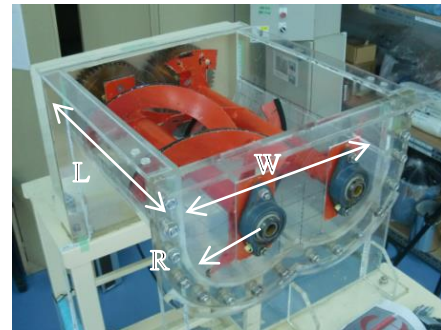
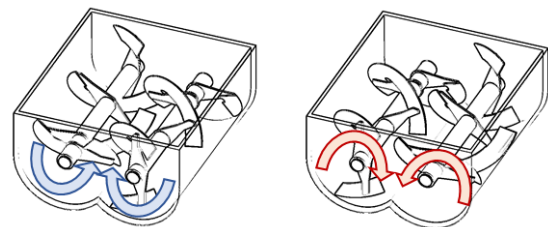


写真-1 モデルミキサの容器形状

表-1 モデルミキサに関する諸元

練混ぜ容量	(ℓ)	34.5
ケーシング長さ	L (mm)	474
ケーシング幅	W (mm)	536
ケーシング半径	R (mm)	135
モータ動力	P (kW)	0.2
軸回転速度	N (min ⁻¹)	37.5



左：正回転，右：逆回転
図-3 回転方向および形状

4.3.2 ミキサブレード傾斜角度

傾斜ブレード取付図を図-4に示す。ブレードは、アーム先端に取り付けられる。通常のブレードは図の0度の配置のものである。本実験では、このブレード前面に

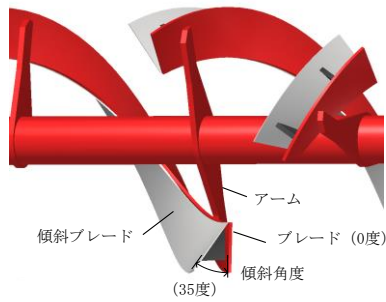


図-4 傾斜ブレード取付図

傾斜ブレードを取付け、傾斜角度を0度（傾斜ブレードなし）、15度、35度で変化させた。また、回転方向は、正回転で行った。

4.4 実験方法

実験および、解析手順を以下に示す。また、写真-2に試験風景を示す。

- (1) 図-5に示すように、トレーサー粒子の位置座標(x, y, z)の読み取りのため、ケーシングに黒線にて50mm単位でスリットを描き、10mm単位で読み取れるよう補助メモリを記した。ケーシング底面の画面中心に原点をとり、x-y平面とした。側面画面にはz軸を縦方向にとり、x-z平面とした。ケーシングは曲面のため、50mmのスリット間隔はビデオ画面では長さが異なる。y軸とz軸の位置座標はこの曲面を考慮して修正した。
- (2) 所定の粘性に調整したモデルフレッシュコンクリート34.50をモデルミキサ内にゆっくりと投入した。
- (3) 5色のトレーサー粒子をミキサ内モデルコンクリート表層の中央と四隅に計5箇所に投入した。
- (4) 撮影用ビデオカメラをモデルミキサの上面、底面、両側面の4箇所から撮影する位置に固定した。
- (5) ミキサを所定の回転速度で回転させ、数分の間、トレーサー粒子の挙動をビデオ撮影した。
- (6) 画像処理方法は、回転開始後に回転速度が一定になった後、画像に出現する5色の各トレーサー粒子を適当な時間から10秒間、0.4秒間隔で計25点の(x, y, z)座標を計測した。取得総数は25点×5色=125点となる。5色の各トレーサー粒子軌道から流動の特性を確認した。また、座標取得総数を倍の250点に増やした場合も同じ傾向になった。そのため、取得数125点は十分な点数と判断した。
- (7) 図-6に示すように、取得したトレーサー粒子の単位時間あたりの(x, y, z)座標の移動距離から3次元の速度ベクトル(Vx, Vy, Vz)発生分布を求めた。また、連続する2つの速度ベクトルのなす角度 θ を内積によって求め、その発生分布を求めた。

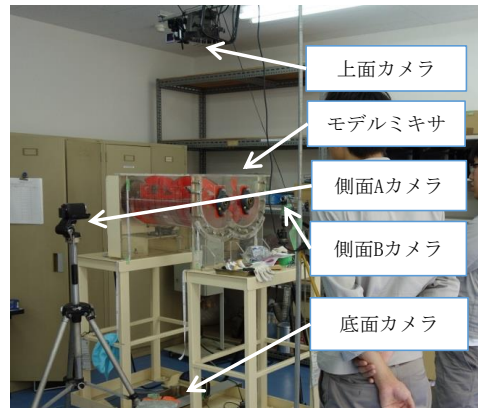


写真-2 可視化試験風景

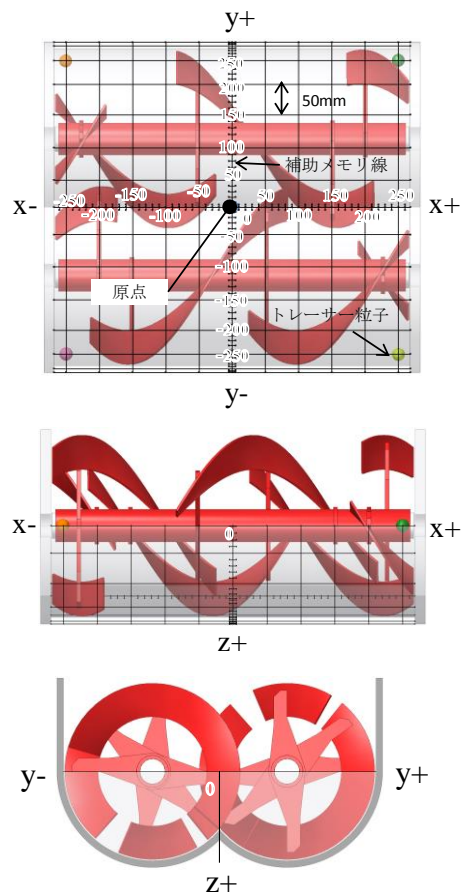


図-5 モデルミキサ位置座標

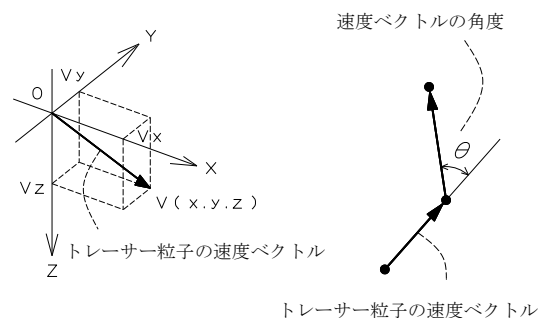


図-6 速度ベクトルの各成分方向および角度

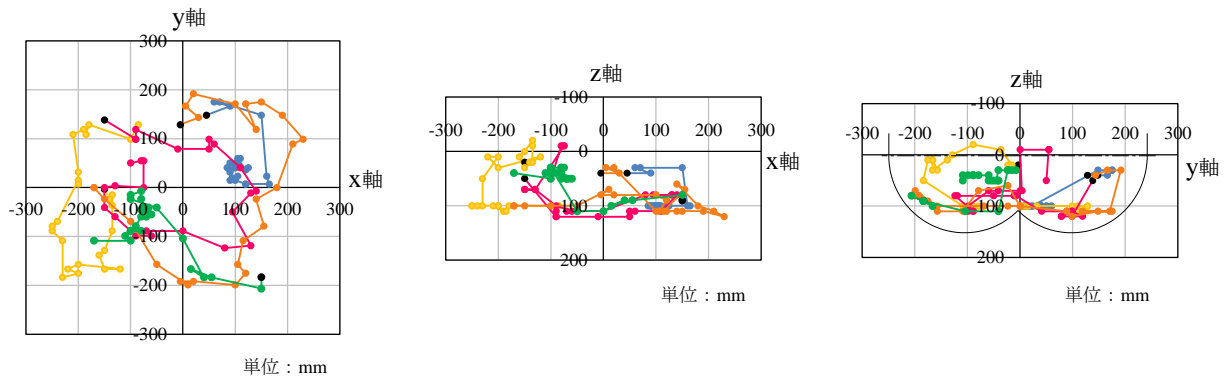


図-7 正回転のトレーサー粒子分布状況

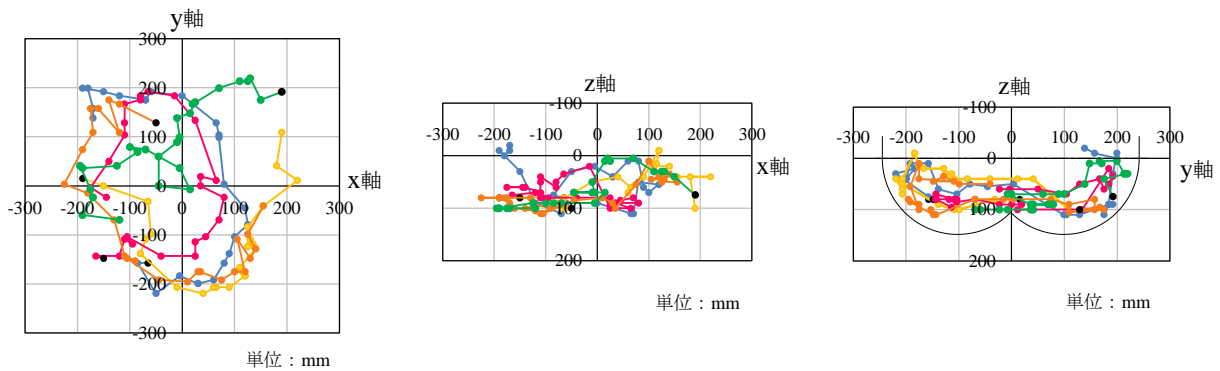


図-8 逆回転のトレーサー粒子分布状況

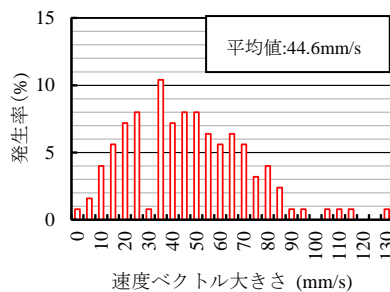
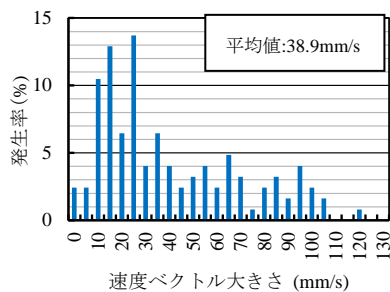


図-9 正回転（左）、逆回転（右）の速度ベクトル V_{xyz} の分布状況

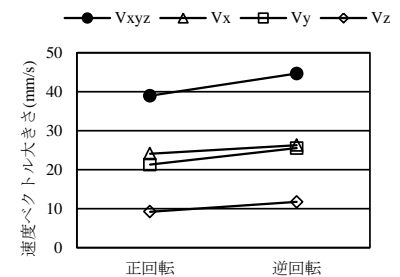


図-10 正回転、逆回転の速度ベクトル平均値

5. 実験結果および考察

5.1 回転方向の違いによる影響

正回転の画像解析から得られた各トレーサー粒子の $x-y$ 平面, $x-z$ 平面, $y-z$ 平面の分布状況を図-7に示す。また、計測開始点を黒点で示す。

$x-y$ 平面の分布状況からは、各トレーサー粒子は時計まわりに循環していることが確認された。トレーサー粒子はケーシング外周側を循環する粒子と途中でケーシング中央の軸間側へ流れていく粒子とに別れた。 $x-z$ 平面, $y-z$ 平面の分布状況からは、各トレーサー粒子が、 z 方向に上下に動きながら画面内を一周していることが確認された。 $x-y$ 平面で、ブレードのエネルギーにより発生したケーシング内を一周する流動は、全体循環流動

を表していると考えられる。また、ケーシング中央でトレーサー粒子の x 軸, y 軸, z 軸方向への移動が混在しているのは、軸間のブレードによるエネルギーがこの領域でぶつかりあっているためであり、この流動は局部交錯流動を表していると考えられる。

逆回転のトレーサー粒子の $x-y$ 平面, $x-z$ 平面, $y-z$ 平面の分布状況を図-8に示す。逆回転は、正回転と比較した場合、 $x-y$ 平面で、ケーシング中央を通過するトレーサー粒子が多く確認された。また、ケーシング外周端まで流れるトレーサー粒子は少なく、 x 軸方向の移動間隔が逆回転では狭くなっている。つまり x 軸方向への流動が減っている。また、 $x-z$ 平面, $y-z$ 平面から確認できるように、ケーシング側面へ材料を持ち上げる流

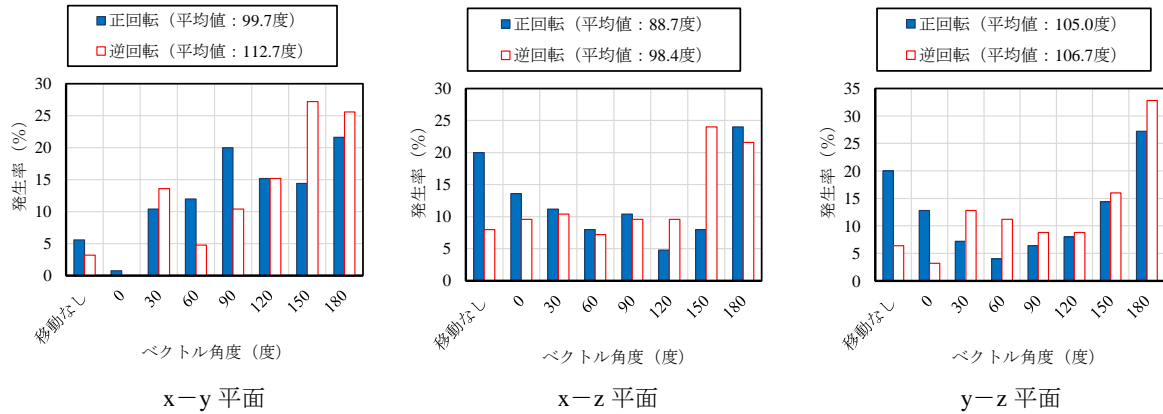


図-11 ベクトル角度θの分布状況

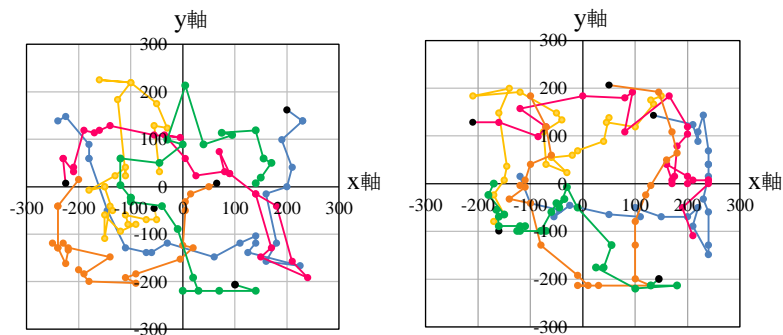


図-12 傾斜 15 度 (左), 傾斜 35 度 (右) のトレーサー粒子分布状況

動が強まるため、y 軸、z 軸方向へ流れる流動が多くなっていることが確認された。

次に、正回転と逆回転で得られた速度ベクトル V_{xyz} に関する発生率を図-9 に示す。また、得られた速度ベクトル V_{xyz} 、 V_x 、 V_y 、 V_z の平均値を図-10 に示す。正回転の速度分布のピークは、10mm/s～25mm/s と 85mm/s～100mm/s に二極化している。逆回転時は 35mm/s に集中する一極型の正規分布が確認された。また、平均速度は、正回転が 38.9mm/s に対し、逆回転は 44.6mm/s と大きかった。これは、逆回転時の V_y 、 V_z が増加したためと考えられる。速度分布がより広範囲に発生している方が、様々な速度が存在し、コンクリートを効率よく練り混ぜることができる。よって、逆回転より正回転の方が練混ぜには有効であると考えられる。

また、連続する 2 つの速度ベクトルのなす角度 θ の正回転、逆回転の x-y 平面、x-z 平面、y-z 平面での発生分布を図-11 に示す。すべての平面において、正回転より逆回転の方がベクトル角度 θ が大きい値の発生率が大きくなることが確認できた。ベクトル角度 θ が大きくなるほど、流動による位置の変化が大きいとされる。これは、正回転より逆回転の方が、2 つの軸が回転することによって発生する回転エネルギーをコンクリート

の流れにうまく伝達できていることを意味する。正回転の効率の良い練混ぜと逆回転の回転エネルギーの伝達とは、相反していることが明らかになった。

この理由は以下のように考えられる。

x-y 方向は、軸回転方向が異なっても循環方向が逆になるだけで基本的にエネルギーとしては大きな差がない。一方、上下方向のエネルギーの伝達は、回転方向により軸間側になるか外側になるかで、大きな違いになったと考えられる。

今後、正回転と逆回転との違いは、実際のコンクリートミキサーを用いた種々の配合のコンクリートの練混ぜによって検討していきたいと考えている。

5.2 ブレード傾斜角度の違いによる影響

ブレード傾斜 15 度、傾斜 35 度の画像解析から得られた各トレーサー粒子の x-y 平面の分布状況を図-12 に示す。傾斜 35 度の分布状況からは、各トレーサー粒子は、傾斜 0 度の場合と同様に、時計周りにミキサー内を循環しており、画面端に沿って進む粒子と、途中でミキサー中心方向へ進む粒子とに別れた。また、傾斜 0 度では流動に追従できず、途中その位置に留りやすかったトレーサー粒子が確認されたのに対し、傾斜 15 度、35 度では、

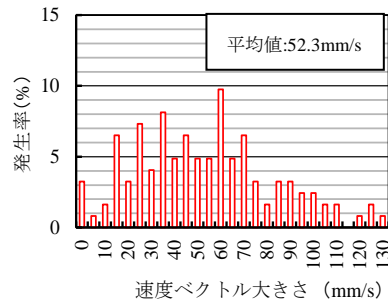
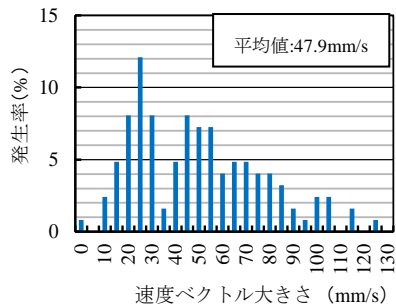


図-13 傾斜 15 度 (左), 傾斜 35 度 (右) の速度 V_{xyz} の分布状況

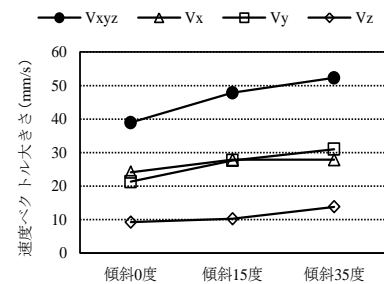


図-14 傾斜角度ごとの速度ベクトル平均値

その現象が確認されなかった。これは、ミキサ内の流動が強くなり、トレーサー粒子がその流れに追従しやすくなったためと考えられる。

ブレード傾斜 0 度, 15 度, 35 度から得られた速度ベクトルの速度 V_{xyz} に関する発生率を図-13 に示す。傾斜 0 度 (図-9 正回転 (左) 参照) に比べて、傾斜 15 度では、20~55mm/s の発生率が増加し、傾斜 35 度では、40~70mm/s の発生率が増加している。このように、0 度, 15 度, 35 度の範囲では、ブレードの傾斜角度が大きくなるほど、速度ベクトルの発生率は最も高い位置が大きい方にシフトした。

また、得られた速度ベクトル V_{xyz} , V_x , V_y , V_z の平均値を図-14 に示す。傾斜 0 度の平均速度が 38.9mm/s に対して、傾斜 15 度で 47.9mm/s, 傾斜 35 度では、52.3mm/s に増加していた。傾斜 0 度と傾斜 35 度の (V_x , V_y , V_z) それぞれの平均速度の増加率を比較すると、 V_x が 15.4% に対し、 V_y が 45.7%, V_z が 50.0% となり、 V_x 以上に V_y , V_z の上昇に影響を与えていることが確認された。

以上の結果から、ブレード傾斜 15 度, 35 度に変更することによって、軸回転方向の速度ベクトル V_y , V_z が増加し、流動全体の平均速度が増加したことを確認した。これは羽根を傾斜させることにより、羽根表面から裏側にかけて流れ込むモデルコンクリートの影響によるものと考えられるが、詳細な原因はまだ解明できていない。また、この影響により、ミキサ内全体での材料の動きが活発になり、練混ぜ性能の向上につながることも予見されるが、実際のフレッシュコンクリート練混ぜ時への影響に関しては、今後の検討課題とする。

6. まとめ

本研究は、コンクリート用 2 軸強制練りミキサにてブレード回転方向と傾斜角度の違いが、コンクリートの流

動に与える影響を、可視化実験にて 3 次元画像解析手法を用い、解析・定量化を行った。本研究の結果、以下のことが確認できた。

- 1) 1 相系流体を用い、トレーサー粒子を 3 次元 (x , y , z) 座標でとらえ、その分布状況と速度ベクトルの大きさ、角度を解析することにより、ミキサ内の流動挙動をとらえ、定量的に評価することができた。
- 2) 正回転と逆回転を比較した場合、トレーサー粒子の分布状況および、速度ベクトルの大きさ、角度の分布傾向からミキサ内全体で異なる流動特性を発生させることを確認した。
- 3) ブレード傾斜角度を 0 度, 15 度, 35 度に傾斜させることで、トレーサー粒子の平均速度は増加する傾向にあり、特に y 軸, z 軸方向の増加割合が大きくなった。

参考文献

- 1) 橋本 親典, 平井 秀幸, 辻 幸和, 田村 真; 2 軸強制練りミキサ内のコンクリートの練混ぜ機構の可視化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol15, No.1, pp.1037-1041, 1993
- 2) 吉田 元昭, 橋本 親典, 渡邊 健, 水口 裕之; 2 軸強制練りミキサのブレード形状が超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1639-1644, 2009
- 3) 橋本 親典, 辻 幸和, 杉山 隆文; 練混ぜ時間が 2 軸強制練りミキサの練混ぜ性能に与える影響, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.582-587, 1997.1
- 4) 日本粉体工業協会編 編集委員長 矢野 武夫; 混合練技術, 日刊工業新聞社発行, 6.3.3 双腕形ニーダ, p198, 1980