

長距離空気砲の性能及び渦輪の気流特性検証実験

Performance of a Long Distance Aerial Gun and Characteristic of the Vortex Ring

○森脇 丈太郎 (立命館大学) 近本 智行 (立命館大学)
 北村 邦彦 (九電工) 松永 淳 (九電工)
 江藤 美緒 (九電工) 前川 尚輝 (立命館大学)

Jotaro MORIWAKI*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Kunihiko KITAMURA*²

Jun MATSUNAGA*² Mio ETO*² Naoki MAEKAWA*¹

*¹ Ritsumeikan University *² Kyudenko Corporation

The vortex ring has straightness and low diffusivity. Also, it is possible to keep its own velocity. We focused on the vortex ring as an air-conditioning system in a factory. It gives workers an airflow sensation. Therefore, we aim to improve comfortableness and to create a better working environment in a factory. This paper shows the results of the experiment with the long-distance aerial gun Kanon. The purpose is to verify performance of a long distance aerial gun and characteristic of the vortex ring

はじめに

高温多湿の作業環境となっている工場では、送風機によって作業員に対して清涼感を与え、作業環境の改善を図ることが一般的である。しかし、送風機から遠くに位置する作業員に対して気流感を与えることは難しい。そこで本研究では、空気砲から出される渦輪を工場内の空調として活用することを目指している。渦輪には従来の空調と比べて高い直進性と低い拡散性、そして進行速度を高い割合で維持できるという特徴がある^{文1)}。その特徴を利用することで、送風機から離れた作業員に気流感を与えることが可能になると考えている。しかし、渦輪を空調として利用し、制御するためには、まず渦輪の気流特性を把握する必要がある。

本研究では、空気砲の性能、そして空気砲から出される渦輪の気流特性を明らかにすることを目的とする。空気砲の機構の違いによる渦輪の到達率・命中率を比較することで、空気砲の性能を検証した。そして、渦輪の可視化実験・PIV解析^{注1)}により、渦輪の進行速度や渦輪の内部構造といった渦輪の気流特性を確認した。

1. 空気砲の概要

1.1 渦輪送出の仕組み

今回使用した空気砲は先端を絞った形状になっており、その絞り角度が 15°・17.5°・20°のものを用意している。空気砲の開口部の反対側にシートゴムが張られており、シートゴムの打板で叩くことで、空気砲の内部の空気が瞬間的に圧縮されて渦輪が送出される仕組みとなっ

ている (Fig.1、Fig.2)。

1.2 渦輪到達目標距離

本研究では、長さが 10m の作業域での空気砲の利用を想定している^{文2)} ため、渦輪の到達目標を 10m としている。

1.3 ライフリング

空気砲の内部には、渦輪の直進性を向上させる目的でライフリング^{注2)} が取り付けられている (Fig.3)。発射された渦輪はライフリングの効果により直進性が向上することが期待できる。



Fig.1 Aerial Gun

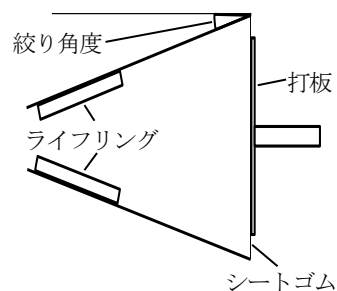


Fig.2 Sectional View



Fig.3 Rifling

2. 実験概要

全ての実験は風洞実験室で行った。この風洞実験室は外乱のない空間となっている。また、一方向に一定の風の流れを作り出すこともできる。

2.1 空気砲の性能検証実験

空気砲の性能を検証するために (1) 絞り角度の違いによる渦輪の到達距離の比較と (2) ライフリングの効果の検証実験を行った。測定点に紐で作成した的を設置し、渦輪の10回送出を2回繰り返して、紐が揺れているかどうかを目視で確認して平均到達率・平均命中率を算出した。測定点は渦輪送出地点から10m, 11m, 12mの計3ヶ所とした。

(1) 絞り角度の違いによる渦輪の到達距離の比較

測定点に1700mmの長さの紐を20mm間隔で垂らし (Fig.4)、各絞り角度における平均到達率を求める。

(2) ライフリングの効果の検証実験

測定点に紐で400mm×400mm的 (人の肩幅を想定) を設置し (Fig.5)、ライフリングの有無における平均命中率を求める。尚、空気砲の絞り角度は17.5°とした^{注3)}。

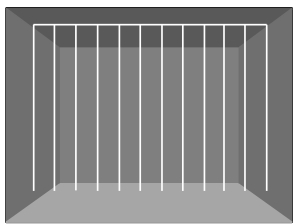


Fig.4 Target

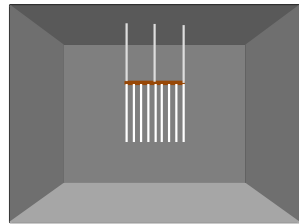
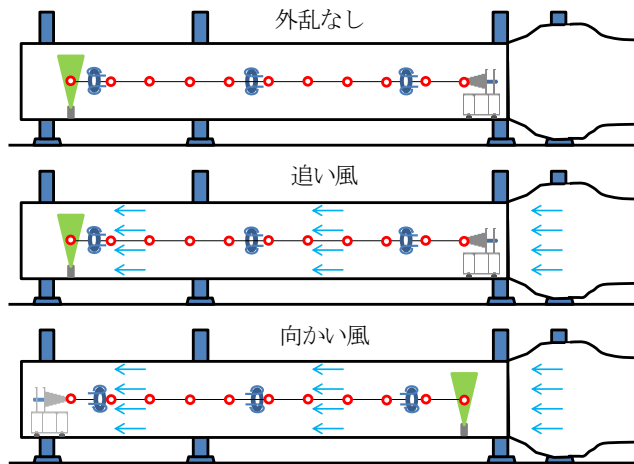


Fig.5 Target

2.2 渦輪の気流特性検証実験

空気砲にスモークを供給し、渦輪を送出する。そして、レーザーシートを照射することで渦輪の断面を可視化し、高速度カメラ (300fps) で撮影した映像から渦輪の進行速度を算出する。また、撮影した映像からPIV解析を行う。実験条件として渦輪の進行方向に対して追い風と向かい風 (0.5m/s) の外乱条件を与えた (Fig.6)。尚、空気砲の絞り角度は17.5°とした^{注3)}。



● : 撮影地点 ← : 外乱

Fig.6 Visualization Experiment

3. 実験結果

3.1 空気砲の性能検証実験

(1) 絞り角度の違いによる渦輪の到達距離の比較

絞り角度が17.5°の場合、12m地点まで到達率が100%であり、すべての渦輪が到達している。一方、絞り角度が15°、20°の場合、1mごとに到達率は減衰しており、12m地点ではどちらの場合も到達率が50%まで減少している (Table.1)。これより、3種類の絞り角度の中では、17.5°の時に渦輪の到達率が最も高くなることが分かった。

Table.1 Arrival Factor

到達距離	10m					
	15°		17.5°		20°	
絞り角度	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
連続計測						
1発目	○	○	○	○	○	○
2発目	○	○	○	○	○	○
3発目	○	○	○	○	○	○
4発目	○	○	○	○	○	○
5発目	○	○	○	○	○	○
6発目	○	○	○	○	○	○
7発目	○	○	○	○	○	○
8発目	○	○	○	○	×	○
9発目	○	○	○	○	○	○
10発目	○	○	○	○	○	○
到達率	100%	100%	100%	100%	90%	100%
平均到達率	100%		100%		95%	

到達距離	11m					
	15°		17.5°		20°	
絞り角度	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
連続計測						
1発目	×	○	○	○	×	○
2発目	○	○	○	○	○	×
3発目	○	○	○	○	○	○
4発目	×	○	○	○	○	○
5発目	○	○	○	○	○	○
6発目	×	○	○	○	○	○
7発目	○	○	○	○	○	○
8発目	○	○	○	○	×	○
9発目	○	○	○	○	○	○
10発目	○	○	○	○	○	○
到達率	70%	80%	100%	100%	90%	90%
平均到達率	95%		100%		90%	

到達距離	12m					
	15°		17.5°		20°	
絞り角度	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
連続計測						
1発目	×	○	○	○	×	○
2発目	×	○	○	○	○	×
3発目	×	○	○	○	○	○
4発目	○	×	○	○	○	×
5発目	×	×	○	○	×	×
6発目	○	×	○	○	○	×
7発目	○	×	○	○	○	×
8発目	×	○	○	○	○	○
9発目	×	○	○	○	×	○
10発目	○	○	○	○	×	×
到達率	40%	60%	100%	100%	60%	40%
平均到達率	50%		100%		50%	

(2) ライフリングの効果の検証実験

10m, 11m 地点では、ライフリングがない場合よりある場合の方が命中率が高い (Table.2)。これより、ライフリングの効果により渦輪の直進性が向上したと考えられる。

Table.2 Hit Probability

到達距離	10m			
	有		無	
ライフリングの有無	有	無	有	無
連続計測	1回目	2回目	1回目	2回目
1発目	×	○	○	×
2発目	○	○	○	×
3発目	○	○	×	○
4発目	○	○	○	×
5発目	○	○	×	○
6発目	×	×	○	○
7発目	○	×	×	×
8発目	○	×	○	×
9発目	○	○	×	○
10発目	○	×	×	×
命中率	80%	60%	50%	40%
平均命中率	70%		45%	

到達距離	11m			
	有		無	
ライフリングの有無	有	無	有	無
連続計測	1回目	2回目	1回目	2回目
1発目	×	×	×	×
2発目	×	○	×	×
3発目	×	×	×	×
4発目	×	○	×	×
5発目	×	×	×	×
6発目	○	○	×	×
7発目	○	×	×	×
8発目	○	×	×	×
9発目	×	×	×	×
10発目	×	×	×	×
命中率	30%	30%	0%	0%
平均命中率	30%		0%	

到達距離	12m			
	有		無	
ライフリングの有無	有	無	有	無
連続計測	1回目	2回目	1回目	2回目
1発目	×	×	×	×
2発目	×	×	×	×
3発目	×	×	×	×
4発目	×	×	×	×
5発目	×	×	×	×
6発目	×	×	×	×
7発目	×	×	×	×
8発目	×	×	×	×
9発目	×	×	×	×
10発目	×	×	×	×
命中率	0%	0%	0%	0%
平均命中率	0%		0%	

3.2 渦輪の気流特性検証実験

(1) 渦輪進行速度

向かい風の場合では進行速度が遅くなり、追い風の場合では進行速度が速くなっている (Fig.7)。そして、どの場合においても進行速度は緩やかに減衰している。また、向かい風の場合、10m 地点でも渦輪は約 2.8m/s の進行速度を維持しているため、外乱 (0.5m/s) がある場合でも 10m 離れた地点に 2m/s 以上の風速で渦輪が到達すると考えられる。

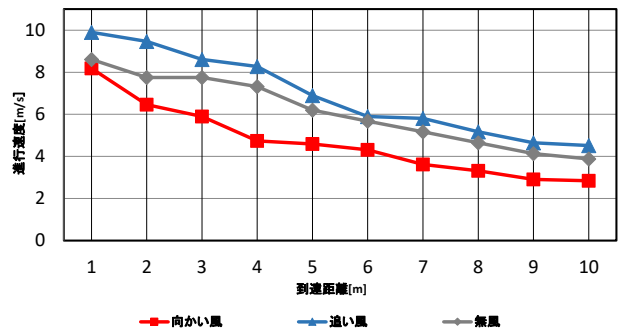


Fig.7 Speed of Advance

(2) PIV 解析

当初はPIV 解析を行っても渦輪周辺にしか速度ベクトルが現れず、渦輪自体の気流の流れを解析することができなかった (Fig.8)。これは渦輪の速度が速すぎて粒子の動きを追うことができなかったことが原因として考えられる。そこで、手動で打板をシートゴムに叩打させ、渦輪の進行速度ができるだけ遅くなるように送出し、PIV 解析を行ったところ、渦輪送出地点から 2m の位置で渦輪の進行速度が 1.5m/s となるように送出したときに、渦輪自体の気流の流れを現すような速度ベクトルを観測することができた (Fig.9)。

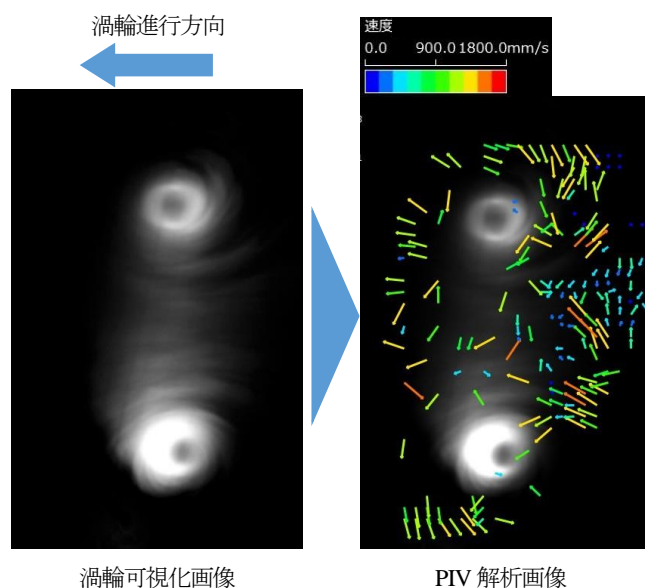


Fig.8 PIV Analysis(Failures)

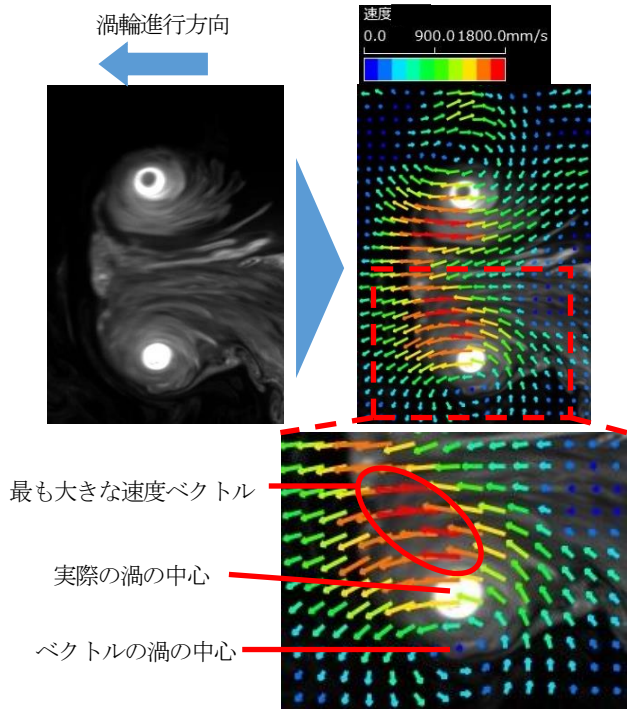


Fig.9 PIV Analysis(Success)

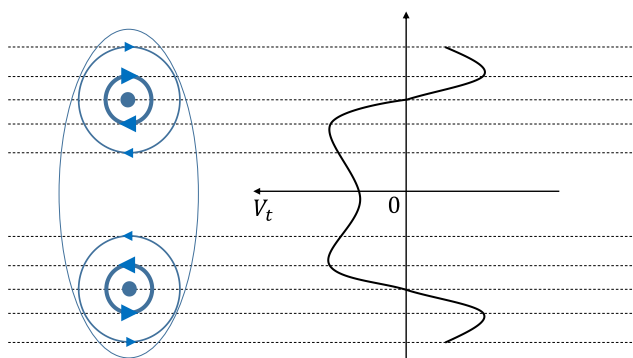


Fig.10 Rotational Speed

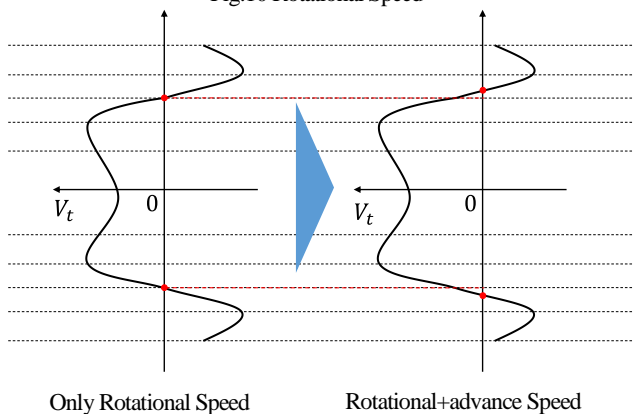


Fig.11 Synthesis of Speed

渦輪の中心付近で最も大きな速度ベクトルが現れている。また、実際の渦の中心とベクトルの渦の中心との位置が少しずれている (Fig.9)。ここで、奥出ら^{文3)、文4)}は、渦輪断面の回転速度には速度分布が存在することを示している。渦輪の回転速度には、ピークとなる部分が存在し、渦輪の中心から離れるほど速度は低下する。一方で、渦の中心部分の回転はないため速度はゼロとなる

(Fig.10)。Fig.10のような速度分布に渦輪の進行速度が合成されることで、渦の中心部分とずれた位置で速度がゼロになると考えられる (Fig.11)。ベクトルの渦の中心は、渦輪の進行方向の速度と回転方向の速度の大きさが等しく、向きが正反対になっていると考えられる。そこで、実際の渦の中心とベクトルの渦の中心との距離を渦の半径とみなし、渦輪の進行速度から渦の角速度を算出^{注4)}すると進行速度が 1.5m/s である渦輪の渦の角速度は約 43rad/s であった。

4. まとめ

本研究では、空気砲の性能と渦輪の気流特性を明らかにすることを目的として渦輪の到達率・命中率の比較、渦輪の可視化・PIV 解析を行った。

4.1 空気砲の性能

1) 3 種類の絞り角度の中では、絞り角度が 17.5°の時に渦輪の到達率が最も高くなった。

2) ライフリングの効果により渦輪の直進性が向上した。

4.2 渦輪の気流特性

1) 外乱がある場合でも 10m 離れた地点に 2m/s 以上の風速で渦輪が到達した。

2) 渦輪の中心付近の速度ベクトルが最も大きくなった。

3) 進行速度が 1.5m/s である渦輪の渦の角速度は約 43rad/s であった。

注釈

注 1) 可視化された粒子画像から、二次元断面中の流体の速度と方向を同時に計測する手法。

注 2) 元々は鉄砲の銃身に施されている螺旋状の溝のことを意味するが、本研究では空気砲内部に取り付けられた突起物のことを指す。送出力に旋回運動を与えて直進性を向上させる効果がある。

注 3) 絞り角度の違いによる渦輪の到達距離の比較実験で絞り角度が 17.5°の時に最も到達率が高くなったため、ほかの実験では絞り角度を 17.5°で統一した。

注 4) 渦の角速度の算出式

ω : 渦の角速度 [rad/s]、 V : 渦輪進行速度 [m/s]、 r : 渦の半径 [m]

参考文献

文 1) 近本智行他: ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築 (その 2) 渦輪を用いたパルス気流送出装置による吹出気流の特性検証実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、D2、2016 年 8 月

文 2) 江藤美緒 他: 空調用の長距離空気砲・カノン (Kanon) の開発・実証 (その 1) Kanon12-35: 到達距離 12m・渦輪径 35cm ϕ の概要、空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集、D2、2016 年 9 月

文 3) 奥出宗重 他: 渦輪の渦度分布と循環値、日本流体力学会誌 ながれ 19(2000) pp. 374-384

文 4) 奥出宗重他: 渦輪に現れる遠心力不安定、日本流体力学会誌 ながれ 21(2002) pp. 78-88