

---

竜巻利用による高効率集塵技術の開発

Development of High Efficient Dust Collection Techniques by Means of Artificial Tornado

藤田 昌男(Masao Fujita) 安川 明生(Akio Yasukawa) 松尾 秀夫(Hideo Matsuo)

---

要旨：

人工竜巻を利用した高効率集塵は高炉の鎮床集塵のような高温でドラフト力の大きいところでも効果がある。解放空間となる出銑口部の集塵では、旋回流の持つ慣性力によって集塵効率の向上をはかる水平竜巻を利用して、集塵風量を従来の1/3に削減可能なことが模型および実機実験から確かめられた。また密閉空間となる溶銑の落ち口部の集塵では、旋回流によって外気の流入を遮断する効果を持つ垂直竜巻を利用して、従来より集塵風量を半減可能なことが模型実験によりわかった。

---

Synopsis：

The exhaust system with an artificial tornado system is effective even where drafting force is strong like at high temperature blast furnace casthouses. A model experiment and an application to a real blast furnace have proved that the exhaust system with a horizontal artificial tornado, which has a rotating air inertia force in an open space upside of a blast furnace taphole, reduces the exhaust gas volume to a third of the conventional system. In the close space over the iron pit where the hot metal is poured into a torpedo car, it has been proved that the exhaust system with a vertical artificial tornado, which shuts off the circumferential air, can reduce the exhaust gas volume to a half of the conventional system by the model experiment.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

|                   |
|-------------------|
| 本文は次のページから閲覧できます。 |
|-------------------|

## Development of High Efficient Dust Collection Techniques by Means of Artificial Tornado



藤田 昌男  
Masao Fujita  
千葉製鉄所 製鉄部高  
炉改修班 主査(課長)



安川 明生  
Akio Yasukawa  
水島製鉄所 プロセス  
開発部開発設計室 主  
査(課長補)



松尾 秀夫  
Hideo Matsuo  
水島製鉄所 設備技術  
部設備技術室

### 要旨

人工竜巻を利用した高効率集塵は高炉の鑄床集塵のような高温でドラフト力の大きいところでも効果がある。解放空間となる出鉄口部の集塵では、旋回流の持つ慣性力によって集塵効率の向上をはかる水平竜巻を利用して、集塵風量を従来の1/3に削減可能なことが模型および実機実験から確かめられた。また密閉空間となる溶鉄の落ち口部の集塵では、旋回流によって外気の流入を遮断する効果を持つ垂直竜巻を利用して、従来より集塵風量を半減可能なことが模型実験によりわかった。

### Synopsis:

The exhaust system with an artificial tornado system is effective even where drafting force is strong like at high temperature blast furnace casthouses. A model experiment and an application to a real blast furnace have proved that the exhaust system with a horizontal artificial tornado, which has a rotating air inertia force in an open space upside of a blast furnace taphole, reduces the exhaust gas volume to a third of the conventional system. In the close space over the iron pit where the hot metal is poured into a torpedo car, it has been proved that the exhaust system with a vertical artificial tornado, which shuts off the circumferential air, can reduce the exhaust gas volume to a half of the conventional system by the model experiment.

## 1 緒 言

製鉄所内では多数の発塵部があり、環境問題より発塵を外部に飛散させないために多量の集塵風量を必要としている。一方、省エネルギーの観点からは発塵に対し、より少ない風量で集塵することが望まれている。しかしながら、機器の移動、周囲設備との関係により、発塵発生源と吸引口とが離れたり、密閉化が難しいところもある。このような開放空間での集塵では発塵以外に周囲の空気を過大に吸引せざるをえない所も少なくない。

このような開放空間でより少ない風量で効率的に集塵する方法として竜巻原理を応用する方法がある<sup>1)</sup>。著者らは製鉄所内の集塵設備にこの竜巻原理を応用して、より少ない風量で発塵の飛散防止を可能とする集塵の高効率化を検討した。

製鉄所内の集塵設備のなかで、集塵規模の大きい高炉の鑄床集塵を対象に、効果的な人工竜巻発生方法の研究と、この発塵の飛散防止効果を調査した。模型実験によって主に既存設備の制約下における効果的な人工竜巻発生方法を検討し、実機実験によって高温雰囲気でのドラフト力による影響下での集塵風量削減効果を確認した。この結果、竜巻利用によって集塵風量は従来の30~50%に削減可

能なことが確認できたので報告する。

## 2 竜巻利用の集塵方法

人工竜巻発生の原理は、空間への空気の吹き出しにより、連続する旋回流を成形し、旋回流中心軸の両端を遮へいして、その一方、または両端から、空気を吸引することにより竜巻を発生させることである。吸い込みフードと発塵源の間の空間に、空気吹き出しノズルにより吸い込みフードを中心軸とした旋回流を与えることにより、人工竜巻を発生させる。旋回流による遠心力によって、旋回中心部には負圧コアが発生し、発塵源から吸い込みフードへの空気の流れが形成されるため、人工竜巻を適用すれば周囲の空気を吸い込むことが少なく、より少ない吸引風量での高効率な集塵が可能となる。局所排気装置にこの人工竜巻を適用した例をFig. 1に示す。これは、発塵源が竜巻中心の負圧コア内にあり、旋回軸が垂直になっている垂直竜巻の例である。

発塵源が竜巻中心から外れた位置にある場合の例をFig. 2に示す。この例では、空気の吹き出しノズルと、旋回流を発生しやすくするためのガイド板とによって、水平の旋回流を発生させ、旋回流の中心軸の両端より吸引することにより、水平竜巻を形成する。この水平竜巻の旋回流に伴う慣性力によって、吸引部から離れた発生源の上部に竜巻側への制御流を生じさせ、発塵は竜巻の旋回中心

\* 平成7年3月16日原稿受付

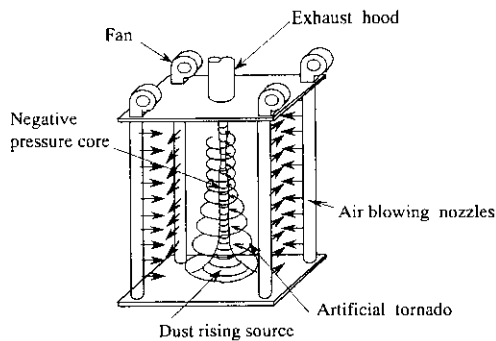


Fig. 1 Schematic diagram of vertical tornado at exhaust ventilation system

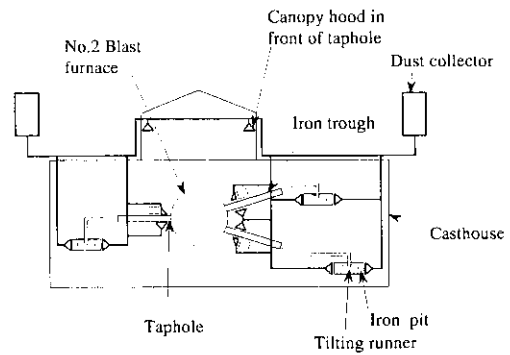


Fig. 3 Schematic diagram of dust collection in casthouse (Mizushima No. 2 BF)

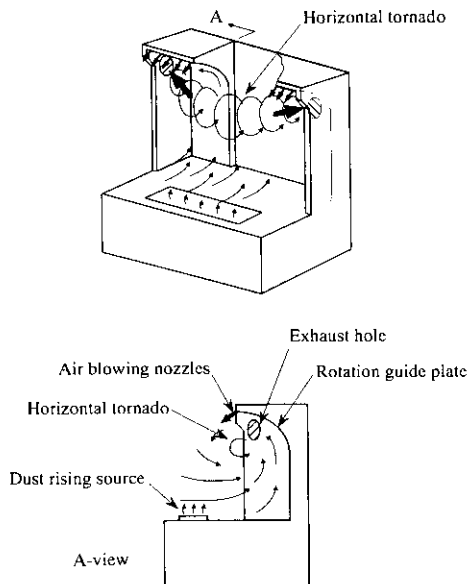


Fig. 2 Schematic diagram of horizontal tornado at exhaust system

### 3 水平竜巻の高炉出鉄口部集塵への適用

#### 3.1 従来の高炉出鉄口部集塵方法

高炉の出鉄口部集塵装置の概要を Fig. 4 に示す。出鉄口部の発塵源としては、出鉄口と出鉄口から噴出した溶鉄滓が落下する出鉄樋上とがあり、出鉄口両側の吸引口から吸引している。両側の吸引口のうち、反マッドガン側の吸引口からは  $3000 \text{ m}^3/\text{min}$  の風量を吸引しており、マッドガン側の吸引口はマッドガンと炉体との制限により、十分なダクト幅が確保できず、 $1600 \text{ m}^3/\text{min}$  の風量を吸引している。また出鉄末期には多量の発塵があり、出鉄口両側の吸引口だけでは吸引できず、出鉄口上部の大フードから  $7000 \sim 10000 \text{ m}^3/\text{min}$  の風量を吸引している。

1 回の出鉄は約 3 時間を要し、通常 1 高炉当たり 2 本の出鉄口から交互に出鉄を繰り返している。従来の出鉄作業時の集塵風量の変化を Fig. 5 に示す。

- (1) 開孔時と開孔直後の数分間は出鉄口からの発塵が多く、かつ開孔機が出鉄開始時では出鉄樋上にあり、後述の移動式樋カバーは出鉄樋上から退避しているため、出鉄口周辺は解放空間となり集塵条件は悪く出鉄口上部の大フードで補助的に集塵する必要も生じている。
- (2) 出鉄の中期には出鉄樋上に溶鉄滓飛散防止を目的とした移動

部へ吸引される。この水平竜巻では、発塵源は竜巻の旋回中心にある負圧コアより外にあり、竜巻のもつ旋回流を利用して、通常の側方フードのみによる集塵より少ない吸引風量で集塵が可能となる。

竜巻原理を応用した集塵方法としては、すでに喫煙室や汚染ガス発生を伴う実験室などで製品化された設備が市販されている<sup>2)</sup>。

製鉄所内で竜巻を応用した集塵を適用するにあたっての問題点は①製鉄所内では溶鉄・溶鋼といった高温溶融物の操作・移動を伴う所が多く、高温雰囲気によるドラフト力によって竜巻による発塵の収束性が影響を受ける、②人工竜巻を発生させる装置が周辺の設備に制約されて設置が難しいことである。

竜巻を利用した集塵技術の開発にあたっては、製鉄所内でも特に集塵風量の大きい高炉の鑄床集塵を対象にした。鑄床集塵の例として、水島製鉄所第 2 高炉鑄床集塵の概略を Fig. 3 に示す。鑄床における主たる発塵源は出鉄口部と、溶鉄を鑄床からトビードカーへ注入する落ち口部である。周囲の制限条件により、出鉄口部には水平竜巻を、落ち口部には垂直竜巻を適用した。

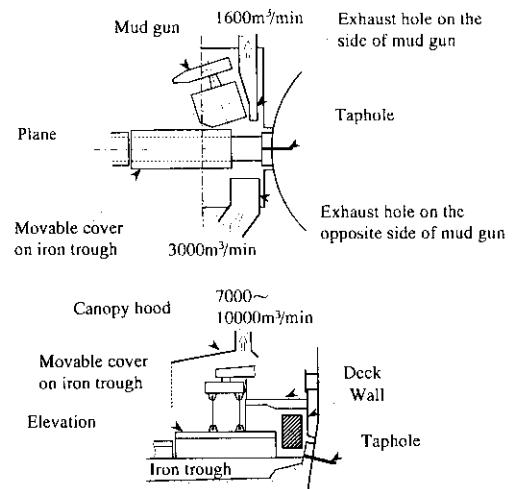


Fig. 4 Schematic diagram of exhaust system at taphole

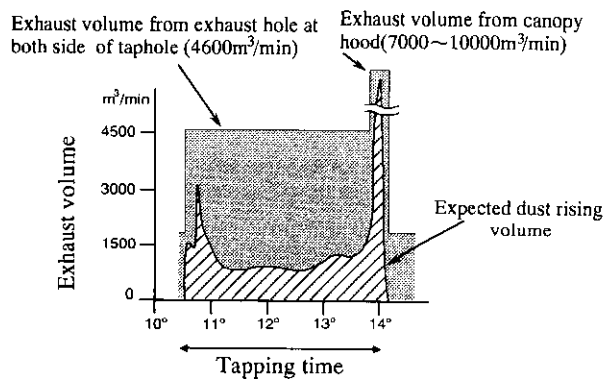


Fig. 5 Conventional exhaust volume at taphole

式種カバーを設置し、発塵源である出鉄口と出鉄樋に対してはある程度の密閉化がはかられる。発塵量は少ないが、両側の吸引口が発塵源より離れているため、十分な集塵を達成するために発塵量の数倍の集塵風量を要している。

- (3) 出鉄終了の出鉄口閉塞時には移動式種カバーは出鉄樋上から退避し、マッドガンが出鉄樋上に配置されるため、出鉄口周辺は出鉄開始時と同様に解放空間となる。その上発塵も極めて多く、出鉄口両側の吸引口だけからの集塵では対応できないので、出鉄終了時の2~5分間のみ、出鉄口上部の大フードより吸引する。

著者等はこの出鉄口部集塵に対し水平竜巻が適用可能と考えた。水平竜巻を発生させて、出鉄時間の大半を占める出鉄中期ではより少ない集塵風量で確実に集塵するとともに、出鉄終了時の大フードからの集塵風量削減の可能性も期待して、模型実験と実機実験とによる研究を行った。

## 3.2 模型実験

### 3.2.1 実験方法

実機実験は高炉操業の制約を受けるため、模型実験によって出鉄口部の固有条件下における効果的な人工竜巻発生方法及び集塵効果を調査した。模型の縮尺は1/8モデルとし、模型の相似則として浮力と慣性力を考慮した $\pi$ ナンパを用いた<sup>3)</sup>。

$$\text{浮力 } F_b = \rho g \beta \Delta \theta l^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{慣性力 } F_i = \rho l^2 v^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\pi = F_b / F_i = g \beta \Delta \theta l / v^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\rho$  : 気体密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\beta$  : 体積膨張係数 (1/K)

$\Delta \theta$  : 温度差 (K)

$l$  : 長さ (m)

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$v$  : 流速 (m/s)

相似則によれば、実機の $\pi$ と模型の $\pi'$ とを等しくすれば相似条件が成立する。(3)式のうち、 $g$ と $\beta$ は実機・模型とも等しく、 $\Delta \theta$ も実機・模型ともほぼ等しく選べば、 $\pi = \pi'$ を満足するためには、次の関係が成立しなければならない。

$$v' / v = \sqrt{l' / l} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$v'$  : 模型の流速 (m/s)

$l'$  : 模型の長さ (m)

$v$  : 実機の流速 (m/s)

$l$  : 実機の長さ (m)

(4)式より模型での流速は実機の $(1/8)^{0.5} = 1/2.8$ 、流量は実機

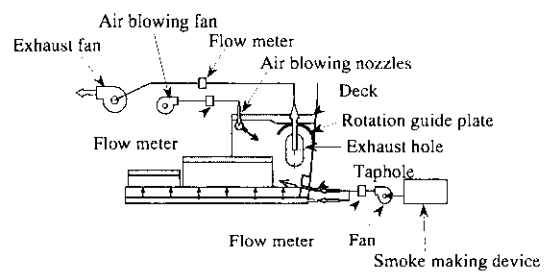


Fig. 6 Experimental equipment at taphole in model system (s=1/8)

の $(1/8)^{2.5} = 1/181$ となる。模型実験設備の概略をFig. 6に示す。発塵に相当する装置としては、oilを高温にしてミスト化する煙発生装置により、実機の発塵に見合う量を出鉄口と出鉄樋より発生させた。竜巻の発生方法としては、出鉄口両側の吸引口からの吸引力を旋回流に変換する旋回ガイド板と、旋回流の発生を補助するための空気吹き出しノズルを設けた。実験は①現状、②旋回ガイド板単独、③空気吹き出しノズル単独、④旋回ガイド板+吹き出しノズルの4ケースを選択した。吸引口からの吸引風量は、吸引口面積の大きい反マッドガン側と吸引口面積の小さいマッドガン側との吸引風量を実機と同じく7:3に配分した。実機での発塵量は不明のため、模型では煙発生装置によりじょじょに発塵量を増加していき、吸引口より発塵を吸引できない限界吸引風量を各発塵量に対して求め、実機に相当する吸引風量より発塵量を推定した。

### 3.2.2 実験結果と考察

模型実験での煙発生量に対する限界吸引風量をFig. 7に示す。竜巻生成に対しては旋回ガイド板の効果が大きく、空気吹き出しノズルは単独では十分な旋回流は得られず、旋回ガイド板の効果を助長するととどまる。実機での発塵量は不明であるが、現状は出鉄口両側の吸引口からは合計4600 m<sup>3</sup>/minの風量で吸引しており、相似則によれば実機の4600 m<sup>3</sup>/minは模型では25.4 m<sup>3</sup>/minに相当し、このときの吸引可能な発塵量は模型では3.3 m<sup>3</sup>/min以下であり、実機の発塵量は600 m<sup>3</sup>/min以下と推定される。この実機での4600 m<sup>3</sup>/min吸引時と同等の集塵能力に相当する各ケースでの吸引風量をTable 1に示す。Table 1によれば、旋回ガイド板単独で

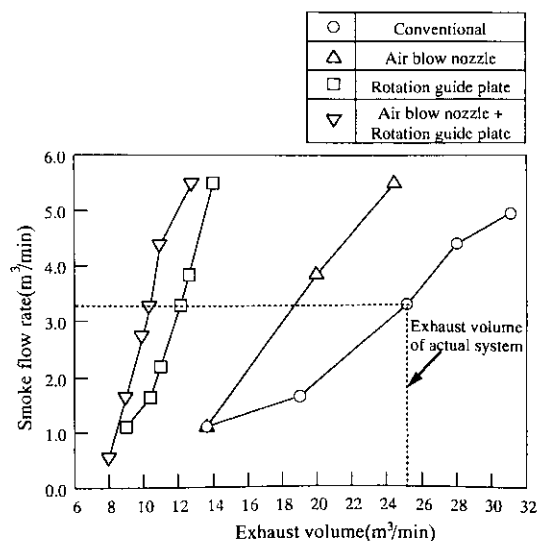


Fig. 7 Relation between exhaust volume and smoke flow rate in model experiment

Table 1 Exhaust volume of model system and existing system in artificial tornado

| Case                                   | Exhaust volume of model system (m <sup>3</sup> /min) | Exhaust volume of existing system (m <sup>3</sup> /min) | $Q/Q_0 \times 100$ (%) |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|
| Conventional                           | 25.4                                                 | 4 600 (= $Q_0$ )                                        | Base                   |
| Air blow nozzle                        | 19                                                   | 3 440                                                   | 75                     |
| Rotation guide plate                   | 12.1                                                 | 2 190                                                   | 48                     |
| Air blow nozzle + rotation guide plate | 10.4                                                 | 1 880                                                   | 41                     |

も竜巻は生成し、吸引風量は従来相当の25.4 m<sup>3</sup>/minから12.1 m<sup>3</sup>/minに削減が可能である。これは実機では従来の4 600 m<sup>3</sup>/minから2 190 m<sup>3</sup>/minに削減することに相当する。空気吹き出しノズルを加えることにより、吸引風量をさらに7%削減できる。

以上の結果より、人工竜巻の利用によって、より少ない集塵風量で効率的な集塵を達成することが可能であることがわかった。

### 3.3 実機実験

#### 3.3.1 実験方法

模型実験での結果を踏まえ、下記の目的で実機実験を実施した。

- (1) 模型実験結果をもとにした実機サイズでの人工竜巻生成の確認と集塵風量削減効果の検証。
- (2) 模型実験では確認できなかった実機での局所的熱気によるドラフト力の影響の調査。
- (3) 竜巻生成のための旋回ガイド板と空気吹き出しノズルの実作業への影響の調査。

実機実験は水島製鉄所第2高炉のNo.1出鉄口で実施した。実機設備の概略をFig. 8に示す。人工竜巻生成のために、旋回ガイド板と空気吹き出しノズルは出鉄口両側の吸引口間3 800 mmにわたって設けた。両吸引口の開口は旋回流を効率よく吸引するため、形状も矩形からコーナ部を円形に改造した。空気吹き出しノズル先端

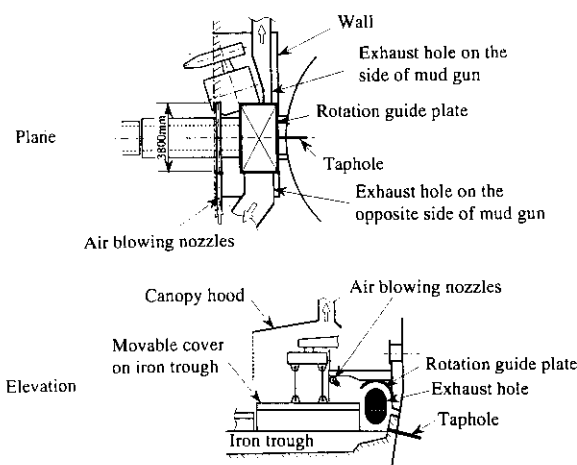


Fig. 8 Experimental equipment at taphole in existing system

からの吹き出し速度は最大50 m/sとした。

竜巻生成状況については発塵源から吸引部への空間の速度分布測定や細糸による流れの目視観察によって調査し、集塵風量削減効果の検証は出鉄口両側の吸引口からの吸引風量増減による集塵状況の評価により行った。局所的熱気によるドラフト力の影響については集塵中の目視観察、ビデオ撮影により判断した。実作業への影響については随修理作業、出鉄口回りの補修作業への影響を調査した。

#### 3.3.2 実験結果と考察

竜巻生成の効果の調査を事前にNo.1出鉄口の随修理期間中に実施した。旋回ガイド板によって出鉄口両側の吸引口間3 800 mmの範囲では、旋回流を発生できることを細糸による目視観察で確認した。竜巻発生状況をさらに調査するため、垂直上の流速分布を測定した。竜巻生成のための改造をする前と、改造後の流速分布との比較をFig. 9に示す。作業上の制約のため、実験時の吸引風量を合わせることはできなかったが、竜巻生成時の吸引風量は左右の両吸引口合計で3 000 m<sup>3</sup>/min、改造前の竜巻生成がない従来方法では4 200 m<sup>3</sup>/minの吸引風量であった。竜巻発生時では、吸引風量は従来方法時の71%と少ないにもかかわらず、旋回ガイド板だけによる竜巻でも速度分布は最大で従来の1.7倍に達しており、発塵源から竜巻中心に向かう気流が強化されていることがわかった。一方、空気吹き出しノズルは、ノズル直下の流速は50 m/sと高くても、ノズルから離れるにつれて流速の減衰が大きく、ノズル下流1 mではほとんどその効果はなく、前述の空間での速度分布を増す効果はみられなかった。以上のことより前述の模型実験結果と同様に実機での竜巻生成を確認でき、さらに竜巻生成には旋回ガイド板の効果が大きく、空気吹き出しノズルの効果は小さいことが確認できた。

以上の事前調査の後、出鉄中における実作業時の実験を実施した。

実作業時では、出鉄開始時（開孔機による開孔時）、出鉄中期、出鉄末期および出鉄終了時（マッドガンによる出鉄口閉塞時）の4段階にわけて、風量削減効果と集塵状況とを調査した。

各段階で使用した吸引口と風量、集塵状況とをTable 2に、吸引

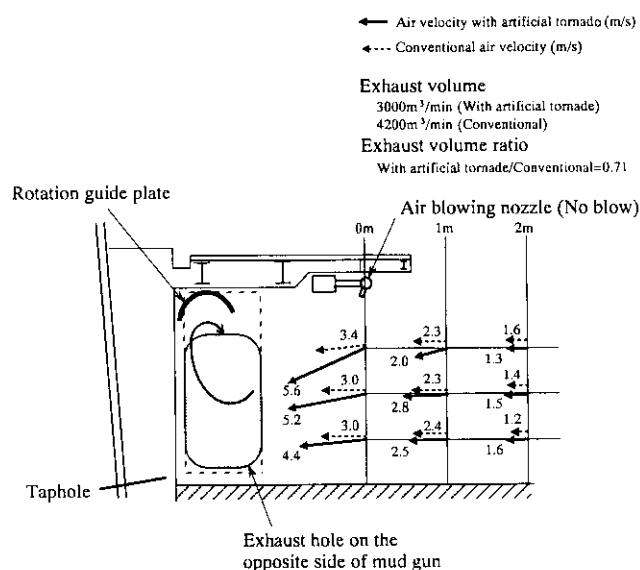


Fig. 9 Comparison of air velocity between exhaust ventilation with artificial tornado to conventional exhaust ventilation

Table 2 Comparison of the state of dust collection at taphole between artificial tornado system and conventional system

| Period of tapping | Conventional                         |           |   |   | With artificial tornado              |           |   |   |                             |
|-------------------|--------------------------------------|-----------|---|---|--------------------------------------|-----------|---|---|-----------------------------|
|                   | Exhaust volume (m <sup>3</sup> /min) | Hood type |   |   | Exhaust volume (m <sup>3</sup> /min) | Hood type |   |   | State of dust collection    |
|                   |                                      | A         | B | C |                                      | A         | B | C |                             |
| Primary           | 4 600                                | ○         | ○ |   | 4 600                                | ○         | ○ |   | Non-leak                    |
| Middle stage      | 4 600                                | ○         | ○ |   | 1 600                                |           | ○ |   | Non-leak                    |
| Later stage       | 4 600                                | ○         | ○ |   | 4 600                                | ○         | ○ |   | A little leak               |
| Final stage       | 4 600<br>+ 8 000                     | ○         | ○ | ○ | 4 600<br>+ 8 000                     | ○         | ○ | ○ | Collecting a leak by C-hood |

A : Exhaust hole on the opposite side of mud gun

B : Exhaust hole on the side of mud gun

C : Canopy hood

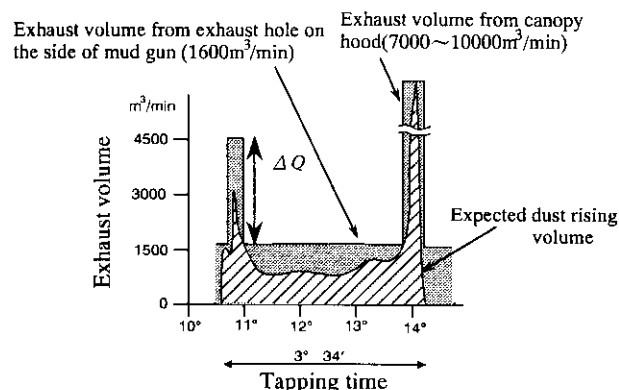
 $\Delta Q$  : Exhaust volume reduction with horizontal tornado

Fig. 10 Exhaust volume with artificial tornado (horizontal)

風量の時系列的推移を Fig. 10 に示す。竜巻生成により、集塵効果は大幅に向上しており、風量削減効果も出鉄中期で顕著であった。

- (1) 出鉄初期と出鉄末期では、出鉄口両側の吸引口から従来と同じ 4 600 m<sup>3</sup>/min の吸引風量で従来発生していた発塵の漏れをほとんど解消することができ、大フードで補助的に吸引する必要はなくなった。
- (2) 出鉄中期は、マッドガン側の吸引口から 1 600 m<sup>3</sup>/min を吸引するだけで従来の 4 600 m<sup>3</sup>/min と同等の集塵効果が得られ、約 1/3 に吸引風量を削減できた。
- (3) 出鉄終了時、作業床の上方に漏れた発塵を上部の大フードで集塵することに関しては、熱気によるドラフト力が大きく、竜巻によっても大フードの吸引風量削減の効果はなかった。
- (4) 竜巻発生設備の炉前修理作業への影響については出鉄口回りの補修作業上、旋回ガイド板の一部を切り欠いたのみで特に大きな問題はなく、この切り欠きによる竜巻発生効果への影響もなかった。

以上のように、出鉄口部では水平竜巻生成により、従来より少ない風量で集塵できることが実機で実証された。

## 4 垂直竜巻の高炉落ち口部集塵への適用

### 4.1 従来の高炉落ち口部集塵方法

溶銑を鑄床から搬送容器であるトビードカーへ注入する落ち口部の概略を Fig. 11 に示す。落ち口部の発塵源としては、左右のトビードカーに受銑を切り換えるための傾注樋による発塵と、トビードカーからの発塵とがあり、これに対して、左右の吸引口よりほぼ同量の風量を吸引している。出鉄口部での集塵は、解放空間での集塵であるのに対し、落ち口部はほぼ密閉された空間での集塵である。このような密閉空間での集塵においては内部・外部の温度差によるドラフト力によって密閉空間部への空気の流入があり、集塵風量が不十分な場合は密閉空間外への発塵が生じる。発塵は位置的に最も高い開口部から発生する。落ち口部での最も高い位置の開口部は監視用窓であり、ここから外気が流入していれば発塵が漏れることはない。落ち口部における風量バランスを次に示す。

$$2Q_0 = 2Q_{i1} + Q_{i2} + Q_{i3} + 2Q_{i4} \dots (5)$$

$Q_0$  : 吸引量 (Nm<sup>3</sup>/min)

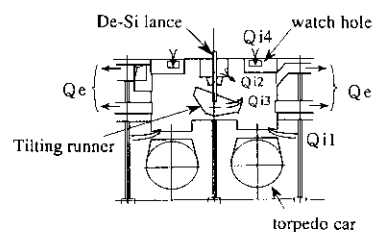
$Q_{i1}$  : トビードカー上部空気流入量 (Nm<sup>3</sup>/min)

$Q_{i2}$  : 枝樋からの空気流入量 (Nm<sup>3</sup>/min)

$Q_{i3}$  : 脱珪キャリアガスによる増量 (Nm<sup>3</sup>/min)

$Q_{i4}$  : 監視用窓空気流入量 (Nm<sup>3</sup>/min)

発塵が外部に漏れない条件としては、 $Q_0 \geq 0$  であることが必要であり、このためには排気風量  $Q_0$  は、次の (6) 式を満たさなければならない。



$Q_e$  : Exhaust volume at iron pit

$Q_{i1}$  : Inflow air volume through opening over torpedo car

$Q_{i2}$  : Inflow air volume from iron runner

$Q_{i3}$  : Inflow air volume with De-Si

$Q_{i4}$  : Inflow air volume through watch hole

Fig. 11 Schematic diagram of exhaust ventilation at iron pit

$2Q_0 \geq 2Q_{i1} + Q_{i2} + Q_{i3}$  ..... (6)  
 必要吸引風量  $2Q_0$  は  $Q_{i1}$ ,  $Q_{i2}$  の空気流入量による影響を強く受け,  $Q_{i3}$  は  $10 \text{ Nm}^3/\text{min}$  以下とその影響は無視できる。空気流入量  $Q_{i1}$ ,  $Q_{i2}$  はドラフト力によって流入してくるが実作業においては測定が困難であるので, (7) および (8) 式より推定した<sup>9)</sup>。

$$V_j = \sqrt{2gh_j \Delta t / t_1} \text{ ..... (7)}$$

$$Q_{i1} = 60 A_j \cdot V_j \text{ ..... (8)}$$

$Q_{i1}$ : j 部の空気流入量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$v_j$ : j 部の空気流入速度 ( $\text{m/s}$ )

$g$ : 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

$h_j$ : 流入部 j と覗き窓とのレベル差 (m)

$A_j$ : 流入部開口面積 ( $\text{m}^2$ )

$\Delta t$ : 外気と落ち口内部空気との温度差 (K)

$t_1$ : 落ち口内部内部空気の温度 (K)

落ち口内部温度は実測値  $220^\circ\text{C}$  を用い, 外気を  $20^\circ\text{C}$  として (6) ~ (8) 式より計算される吸引風量合計  $2Q_0$  は  $7700 \text{ m}^3/\text{min}$  (at  $220^\circ\text{C}$ ) となる。これらは吸引風量の実測値  $7000 \sim 8000 \text{ m}^3/\text{min}$  (at  $220^\circ\text{C}$ ) とほぼ合致しており, (7) および (8) 式の推定は正しいと考えられる。(7) と (8) 式によれば, トビードカー上部からの流入量  $Q_{i1}$  は吸引風量の約 80% を占めている。これは, レベル差  $h_1$  が  $5.6 \text{ m}$ , 開口面積  $A_1$  が  $4.5 \text{ m}^2$  と大きいためである。このトビードカー上部からの空気流入量の低減はこれまでも試みてきた。しかしながらトビードカーの口もとに溶銑やスラグが付着するためにトビードカー上部には  $300 \sim 500 \text{ mm}$  の空間が必要であり, 溶銑の輻射による高温雰囲気には耐えうるシール方法はなかった。

著者らは, この落ち口部集塵の吸引風量低減のためにはトビードカー上部の空気流入を抑制することが最も効果的と判断し, 垂直竜巻適用を検討した。

## 4.2 模型実験

### 4.2.1 実験方法

落ち口部集塵に垂直竜巻を適用するにあたり模型実験を実施した。模型の縮尺は出銑口部同様に  $1/8$  モデルとした。落ち口部の集塵では外部からの空気の流入にはドラフト力が関係し, この空気の流入を削減するための垂直竜巻としては旋回流の慣性力が関係しているため, 相似則としては出銑口部同様に浮力と慣性力を考慮した  $\pi$  ナンバを用いた<sup>9,10)</sup>。模型実験装置を Fig. 12 に示す。

模型実験の目的としては垂直竜巻の効果を検討するため, 吸引風量を変化させて集塵状況を調査した。落ち口部の模型実験ではドラ

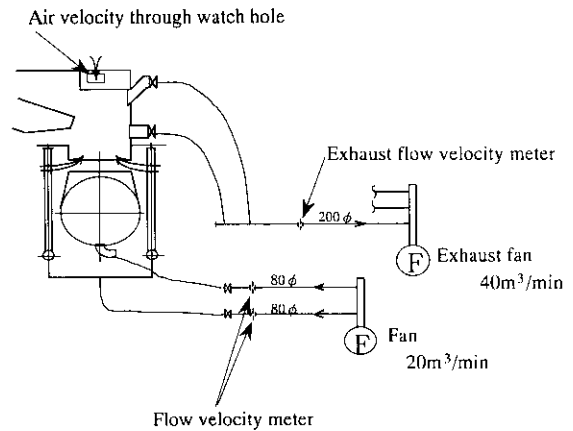


Fig. 12 Schematic diagram of model experimental equipment at iron pit

フト力については以下の考え方を導入して現状をシミュレートした。

実機ではトビードカー上部より流入した  $20^\circ\text{C}$  の空気は, 落ち口内部で周囲の高温部から加熱され, またトビードカー内部からの高温含塵ガスに希釈されて  $220^\circ\text{C}$  となって吸引されている。模型では流入した空気を  $220^\circ\text{C}$  に加熱することできないので, 流入した空気が  $20^\circ\text{C}$  から  $220^\circ\text{C}$  に体積膨張する時の体積の増分をトビードカー内部より供給した。またこの供給空気に煙を混合して, 集塵状況を観察した。

実験ケースとしては, 次の 3 ケースを実施した。(Fig. 13 参照)

Case a: 垂直竜巻発生のための旋回流用空気吹き出しヘッドを落ち口下端とトビードカー上部の間の空間に設け, かつヘッドの位置を落ち口の外側とする。

Case b: 旋回流用空気吹き出しヘッドを落ち口の内部に設ける。

Case c: 竜巻とエアーカーテンとの差を明らかにするため, 落ち口の下端の 4 辺より下方に空気を吹き出すエアーカーテンを設ける。

空気吹き出しノズルの吹き出し空気量についても, 吸引風量削減効果の大きい条件を実験により求めた。

竜巻利用の効果は, 竜巻を発生させて吸引風量を減じていき, 上部の監視用窓からの空気流入速度を測定して, 集塵の良否を判断した。

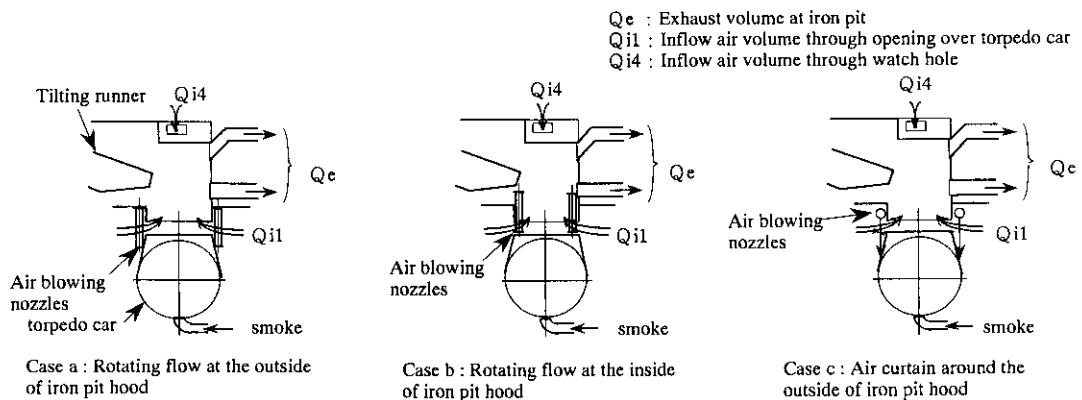


Fig. 13 Model experiments at iron pit

#### 4.2.2 実験結果と考察

落ち口部模型の実験結果を Fig. 14 に示す。縦軸には集塵効果の指標である監視窓の空気流入速度を示している。現状の実機による吸引風量は合計で  $7700 \text{ m}^3/\text{min}$  であり、模型実験では相似則より  $21.3 \text{ m}^3/\text{min}$  に相当する。このときの模型実験による監視窓からの空気の流入速度は約  $3.2 \text{ m/s}$  である。監視窓の流入速度を現状相当の  $3.2 \text{ m/s}$  にすれば、現状と集塵状況はほぼ同様に良好と考えてよい。

Case a では、現状の吸引風量の 50% でもほぼ現状と同レベルの集塵状態を維持することができる。Case b では、トビードカー上部から流入する空気を遮断する効果が Case a より劣るため吸引風量の削減効果が小さい。Case c は吸引風量削減効果はほとんどみられなかった。これはエアーカーテンでは吹き出し距離が増大するにしがって外気の流入を遮断する効果が減少するのに対し、竜巻集塵では竜巻の持つ連続した旋回流が外気流入の遮断効果をより安定的に維持するためと考えられる。

竜巻を発生するための空気吹き出しノズルからの空気吹き出し量の効果を Fig. 15 に示す。空気吹き出し量が多いほど監視窓の空気流入速度は大きく、吸引風量削減効果は大きい。実験結果からは吸引風量を従来相当の  $21.3 \text{ m}^3/\text{min}$  から  $10.5 \text{ m}^3/\text{min}$  にほぼ半減するに必要な空気吹き出し量は  $3.02 \text{ m}^3/\text{min}$  であり、実機でのノズルからの空気吹き出し量は  $550 \text{ m}^3/\text{min}$  と推定される。

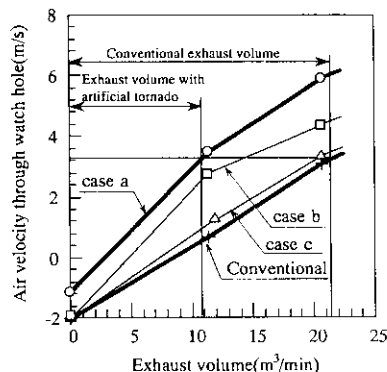


Fig. 14 Relation between exhaust volume and air velocity through watch hole in model experiment

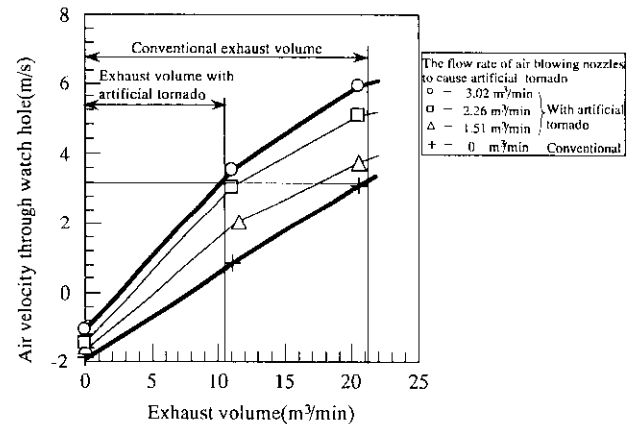


Fig. 15 The effect of flow rate of air blowing nozzle in case a

落ち口部の垂直竜巻実験は、今後実機実験によって集塵風量削減効果を確認する予定である。

## 5 結 言

高炉の鉄床集塵を対象に開発を進めている人工竜巻を利用した高効率な集塵技術について報告した。この効果は以下のとおりである。

- (1) 人工竜巻利用による高効率集塵は、高炉の鉄床集塵のように高温雰囲気下でドラフト力の影響が大きい設備でも実用可能で、排気風量を現状の  $1/3$  から  $1/2$  に削減可能である。
- (2) 出鉄口部の集塵では、水平竜巻の利用により排気風量を現状の  $1/3$  に削減可能なことが、模型および実機実験によって確かめられた。
- (3) 溶鉄落ち口部の集塵では、垂直竜巻の利用により排気風量を現状の  $1/2$  に削減可能なことが模型実験からわかった。

溶鉄落ち口部の垂直竜巻による集塵効果については、今後さらに実機実験によって確認する予定である。またこの人工竜巻による高効率集塵は高炉の鉄床集塵だけでなく製鉄所内の他の集塵設備にも今後展開をはかっていく。

最後に、本報告における模型実験実施にあたっては、日本エアーカーテン株式会社より御助言と御助力をいただいた。ここに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) S. Yamaguchi, H. Ochi, S. Matui, and Y. Ishiguro: "Contamination Control by Means of Artificial Tornado," Preprint of the 3rd International Symposium on Ventilation for Contaminant Control, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Ohio (USA), September (1991)
- 2) 井門明洋: 「人工竜巻による排気装置-ザ・たつまき」, 建築設備と配管工事, (1987) 7, 121-125
- 3) 江守一郎: 「第二版模型実験の理論と応用」, (1988), 70, [技報堂]
- 4) たとえば, 日本エネルギー技術境界編: 「熱管理技術講義」, (1974), 144-147, [丸善]
- 5) 小川 明: 「渦 学」, (1981), 3-10, [山海堂]
- 6) 文字信貴: 「竜巻渦の室内実験」, 京大防災研究所年表, 第 25 号 A, (1982) 4, 27-44