

工場換気設計プログラム (その2)

—機械換気 “Design of Industrial Exhaust Mark II” の解説と計算例—

西岡利晃

Computer Programs for Industrial Ventilation Design (Part 2) —General Description of a Computer Program, “Design of Industrial Exhaust Systems Mark II” and its Applications—

Toshiaki Nishioka

Abstract

This report gives a brief description of a computer program for “Design of Industrial Exhaust Systems Mark II” published by the Committee on Industrial Ventilation of the American Conference of Governmental and Industrial Hygienists, the conversion of units into the SI Unit System for use in Japan, and calculations of examples.

This computer program performs calculations for a duct network through which contaminated air is carried from its place of origin to the outdoors. With input data consisting of information from the system layout plus the required hood air flows, the calculations give the sizes of the ducts and the exhaust fan. The sizes of the ducts are determined by the method of constant velocity. The flow balance of the system is accomplished not by using dampers, but by re-sizing the ducts or by adjusting air flows.

概 要

本報告は米国労働衛生協議会、工場換気委員会が開発した、工場の機械換気の設計プログラム “Design of Industrial Exhaust Systems Mark II” の解説、日本での使用を可能にするため SI 単位等への変換、および例題計算に関するものである。

プログラムは工場の各種作業に伴い発生する熱・塵埃等で汚染した空気を機械により排気するダクト網の計算を行う。ダクト網のレイアウトと各吸込口の風量を与えて、ダクトの寸法と送風機の容量（風量と静圧）を求める。ダクトの寸法は、定速度法により決定し、系の風量のバランスはダンパーの調整ではなく、ダクト寸法の再計算か、風量の修正により行う。プログラムの容量は、ダクト網を構成する単位ダクトを99個まで計算できるもので、ほとんどの規模の工場に適用可能である。

1. はじめに

工場に限らず換気は、自然もしくは機械のいずれか単独で行われることは少ない。自然換気は、運転費なしで大風量を処理できるが、これを規制する要因が複雑で、コントロールが困難である。機械換気は、コントロールは比較的容易だが、処理風量の二乗に比例して運転費がかさむ。このように長所・短所が相互補間的な関係にあるので、汚染濃度の高い空気を小風量で排除する局所換気は機械力で、全体換気（建家換気）は自然力という様に併用されて来た。

大気汚染が進行するに伴い、大気に放出する空気の汚染度の許容基準が厳しくなり、これまで自然換気で大気に放出していた空気も、浄化処理した上で放出しなければならなくなった。このため工場の換気も、全体換気を含めて、全面的に機械換気にたよる例が増えて

きた。

機械換気では処理風量の大小が運転費を大きく左右するので、自然換気の原理を考慮しつつ、局所・建家両換気のバランスが適切で、効率の良いシステムの設計が求められる。そのため、それら3つの方式のさまざまな組合せに対して、定量的な結果が迅速に求まり最適な選定ができるように一貫プロが必要である。

前報の自然換気のプログラムに引き続き、局所換気プログラムの検討中に、局所換気をあつかり、プログラムが既に存在することが判明した¹⁾。これを検討したところ、単位系の変換等、最小限の変換で、現在の目的に直接かなうものであることがわかった。また、排煙設備等の他のダクト網計算の参考にもなると思われるので、プログラムの内容を紹介し、変換したプログラムによる例題計算の結果を示した。

2. プログラムの概要

2.1. 入力

入力はプラントに関するデータとダクトに関するデータよりなり、それぞれの項目を表一に示す。

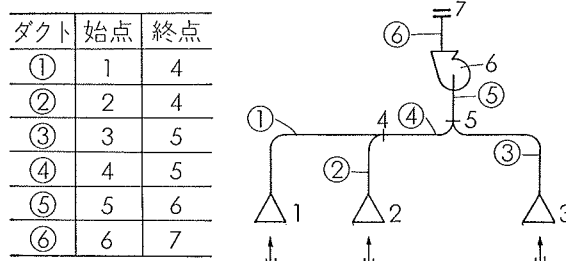
入力に先きだち、ダクトのレイアウトは、表一に示した6つのタイプのダクトで再構成されねばならない。プログラムはこの6種類のダクト要素を単位に数えて99個のダクトを含むダクト網まで計算できる。全てのダクトは、流れの上流側の端を始点、下流側のそれを終点とし、始点、終点に任意の番号を与えて、ダクトの区別を行う。番号のふり方に、特別なオーダーはないが、引き続くダクトの終点と始点の番号は同じにすること、99以上の番号を使用しないこと等を守らねばならない。

2.2. プログラムのフロー

ダクト寸法は定速度法により求める。これは汚染空気の輸送を対象とするので、汚染物質の運搬に必要な風速をダクト内の速度としておいて、ダクト途中で汚

染物質が沈積するのを防ぐことを目的とするからである。

プラント及びダクトのデータを入力した後、計算の流れは、まず吸込口から始まる全てのダクトの寸法と圧力損失を計算する。次いで吸込口で始まるダクトのみが合流するダクトの流量、寸法、圧力損失を計算し、順次、上記計算が終ったダクト同士が合流するダクトへと計算を進める。合流点では、吸込口からこの点までの圧力損失が、合流する全てのダクトである誤差内におさまるように、ダクト寸法を再設計したり、流量



図一1 ダクトの番号付け

I. プラントのデータ

1. プラント名
2. 設置場所
3. 部門
4. 装置の名称
5. 計算者
6. 設計者
7. 日付
8. ダクト材料の表面絶対粗さ
9. 汚染物の種類 (ダスト or ガス)
10. ダクト内の最大速度

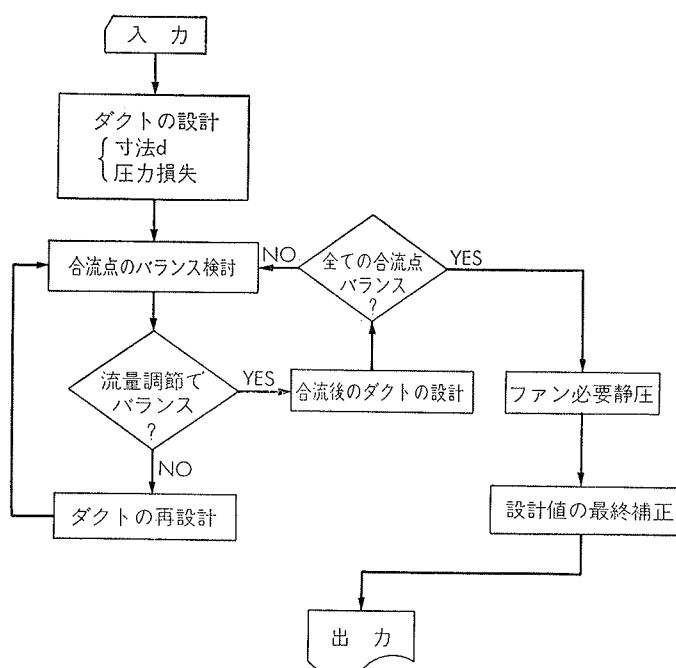
II. ダクトのデータ

1. ダクトの始点番号
2. ダクトの終点番号
3. ダクト内流速
4. ダクトのタイプを表わすコード
5. フードのスロット面速度
6. スロットの抵抗係数
7. フードの入口抵抗係数
8. 必要風量
9. ダクトの長さ
10. ダクトの曲りの曲率
11. 曲りの個数
12. 合流の角度
13. 特殊な付属物の抵抗係数

表一 入力項目

| コード | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|----|-----|------------|-----|-----|--------------|
| 始点 | 合流 | フード | フード (スロット) | 合流 | ファン | フード (可変スロット) |
| 終点 | 合流 | 合流 | 合流 | ファン | 外気 | 合流 |
| | | | | | | |

表一2 ダクトの種類



図一2 プログラムのフロー

を増加させたりして、圧力損失の一番大きいものにそろえる。このようにして送風機に到達し、最後に、送風機の容量を決定する。プログラムのフローを図-2に示す。

3. 計算式

3.1. ダクト寸法の計算

ダクトは全て丸ダクトで計算し、その径dは、ダクトの流量Q(m³/s)、流速v(m/s)として、

i. 汚染物質が熱・ガス等の場合

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{v}} \quad (\text{m}) \quad \dots\dots(1)$$

ii. 汚染物質がダストの場合、

ダストが途中で沈積するのを防ぐため割り増した流速v'=v/0.95(m/s)を用いて、

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{v'}} \quad (\text{m}) \quad \dots\dots(2)$$

3.2. 抵抗係数

プログラム内で計算するのは摩擦抵抗係数と曲り及び合流の抵抗係数で以下のようにして求める。

i. 摩擦抵抗係数λ

以下の Colebrock の実験式を逐次近似で解いて、λを小数点以下5位まで求める

$$\lambda = \frac{1}{\left\{ -2 \log \left(\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\epsilon/d}{3.72} \right) \right\}^2} \quad \dots\dots(3)$$

Re : レイノルド数

ε : ダクト材料の表面絶対粗さ (m)

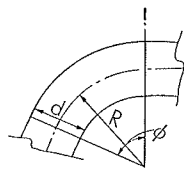
ii. 曲りの抵抗係数 ζ_E (右図)

$$\zeta_E = \zeta (R/d) \cdot n \quad \dots\dots(4)$$

ζ(R/d)はプログラムにデータとして内蔵。

R : 曲の半径(m) n

: 曲りの個数個数は角度φに応じて右表より選ぶ



iii. 合流の抵抗係数 ζ_J

主管に関しては算入

せず、枝管に関してのみ計算する。ζ_J=ζ(θ)がデータとして内蔵されており、合流の角度θに応じて選ぶ。

| 角度φ 個数 | 90° | 60° | 45° | 30° |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.3 |

3.3. ダクト系のバランス

3.3.1. 合流点での圧力のバランス ダクト内の圧力は、吸込口近傍の静止圧(室内圧)を基準にして全圧で以下の如く表わされる。

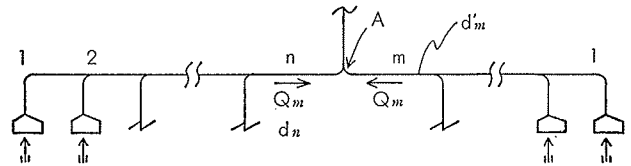
ある吸込口からn番目のダクトの終点での全圧P_nは

$$P_n = \frac{\gamma}{2g} \left[\left\{ \frac{Q_n}{\pi (d_n/2)^2} \right\}^2 + \sum_{i=1}^n \left(\zeta_i + \lambda \frac{L_i}{d_i} \right) \cdot \left\{ \frac{Q_i}{\pi (d_i/2)^2} \right\}^2 \right] \quad (5)$$

ζ_i : i番目のダクトの形状抵抗係数の和

今、別の吸込口から数えてm番のダクトが、上記ダクトと合流するとする。このダクトの終点の全圧P'_mは

$$P'_m = \frac{\gamma}{2g} \left[\left\{ \frac{Q'_m}{\pi (d'_m/2)^2} \right\}^2 + \sum_{i=1}^m \left(\zeta'_i + \lambda \frac{L'_i}{d'_i} \right) \cdot \left\{ \frac{Q'_i}{\pi (d'_i/2)^2} \right\}^2 \right] \quad \dots\dots(6)$$



R_p=P_n/P'_mとおき、R_p<0.95もしくはR_p>1.05の場合、合流点Aでの圧力のバランスを取るため以下のように流量の修正もしくはダクト寸法の再設計を行う。

i. 流量の修正

$$\left. \begin{aligned} 1.05 < R_p < 1.2 \text{ の時 } Q'_m \text{ を } Q'_m \sqrt{R_p} \\ 0.8 < R_p < 0.95 \text{ " } Q_n \text{ を } Q_n \sqrt{R_p} \end{aligned} \right\} (7) \text{ と修正する}$$

以上の新しい流量でP_nもしくはP'_mを計算しなおし0.95<R_p<1.05になるまで同じ操作を繰り返す。

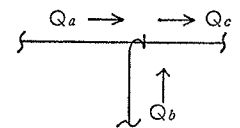
ii. ダクト寸法の再設計

R_p>1.2のとき、d'_m、R_p<0.8のときd_nをそれぞれワンサイズ減らしてP_nとP'_mのバランスを取る。

3.3.2. 流量の補正 圧力のバランス計算では、合流点を終点とするダクトの流量のみ修正し、それより上流のダクトの流量はそのままである。従って、寸法バランスの計算がファン入口まで全て終わった段階で、逆に吸込口の方向に向って、各ダクトの流量を逐次以下の如く修正する。

右図のような合流点で

$$R_Q = \frac{Q_c}{Q_a + Q_b} \geq 1 \quad \dots\dots(7)$$



(等号は Q_cが流量の修正をされなかった場合)

$$\left. \begin{aligned} R_Q > 1 \text{ のとき } Q'_a &= Q_a \cdot R_Q \\ Q'_b &= Q_b \cdot R_Q \end{aligned} \right\} (8) \text{ と補正する}$$

3.4. 問題点とその改良

3.3.2.の流量の補正により、各ダクトでの抵抗損失の補正も必要になる。流量が増加した状態での抵抗損失の計算を行わないので、求めたファンの必要静圧が、実際には不足する危険がある。

3.3.2.の場合を参考にして、Q_c(=Q_a+Q_b)は、圧力バランスのためQ'_c(=Q_c√P_R)に修正されたとする。

この結果 $R_Q = \frac{Q'_c}{Q_a + Q_b} = \frac{Q_c \sqrt{P_R}}{Q_c} = \sqrt{P_R}$ となり

$$Q'_a = Q \quad R_Q = Q_a \cdot \sqrt{P_R} \text{ と補正される。}$$

ダクト a での抵抗損失 $\Delta P_a (=K \cdot Q_a^2)$ は、

$$\Delta P'_a = K \cdot (Q'_a)^2 = K \cdot (Q_a \cdot \sqrt{P_R})^2 = \Delta P_a \cdot P_R$$

となる。ファンの必要静圧 P_S は、任意の吸込口から大気放出口まで連続してつながるダクトの抵抗損失の和であるから

$$P_S = \sum \Delta P'_i = \sum \Delta P_i \cdot P_{Ri} \leq 1.2 \sum \Delta P_i$$

$$(\because P_{Ri} \leq 1.2)$$

よってファン必要静圧は、ダクトの抵抗損失の和を1.2倍してやれば安全であるが、過大に見積ることになる。この代りに、以下のようにファン静圧 P'_S を決める。

$$R_T = Q'_T / Q_T$$

$$P'_S = P_S \cdot (R_T)^2$$

Q_T : 全ての吸込口の風量の和

Q'_T : 本プログラムの計算で求めたファンの風量

4. 例題計算

図一3に示す、鋳造工場の砂ふるい装置に設備された排気装置を例題計算した。砂ふるい装置の機器と、その必要風量を表一3に示す。ダクトの諸元は表一4の通りである。アウトプットの一部を表一5に示す。

| | |
|--------------------------------|------------------------------|
| A. ふるい器 Q=100m ³ /m | G. 砂ビン Q=17m ³ /m |
| B. 連搬ベルト " 20 " | H. 測定用ホッパー |
| C. 同コンベヤ " 20 " | I. ミキサ " 34 " |
| D. プリー | J. 投入ピン |
| E. バケットエレベーター " 20 " | K. ダストコレクター |
| F. ふるい網 " 34 " | |

表一3 設備機器表

| 始点-終点 | 長さ(m) | 風量(m ³ /min) | 曲り | 合流角 | その他 |
|-------|-------|-------------------------|-----------|-----|--------------------|
| 1-2 | 7.3 | 100.0 | 90°×2 | | |
| 3-2 | 7.6 | 20.0 | 90°,60° | 30° | |
| 2-5 | 7.0 | | | | |
| 4-5 | 7.0 | 20.0 | 90°,60° | 30° | |
| 5-6 | 7.0 | | | | |
| 9-8 | 2.7 | 34.0 | 45°,90°×2 | 30° | |
| 7-8 | 1.8 | 20.0 | | | |
| 8-6 | 5.5 | | 90°,60° | 30° | |
| 6-10 | 2.4 | | | | |
| 11-13 | 1.5 | 20.0 | 90°,30° | 30° | |
| 12-13 | 4.8 | 34.0 | 90°×2 | | |
| 13-10 | 0.6 | | 90°,60° | 30° | |
| 10-14 | 1.2 | | | | |
| 15-14 | 0.6 | 17.0 | 90°,60° | 30° | |
| 14-16 | 2.7 | | 90°×2 | | |
| 16-17 | 1.8 | | 90° | | ダストコレクター ξ=4.73 |
| 17-18 | 0 | | | | |
| 18-19 | 7.3 | | | | ウェザーキャップ ξ=1.15 |

表一4 ダクトの諸元

文献

- 1) Industrial Ventilation, Committee on Industrial Ventilation, American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

所報 No. 12 の同タイトル (その1) の論文中に印刷の誤りがあったので訂正します。

p. 151 14行目

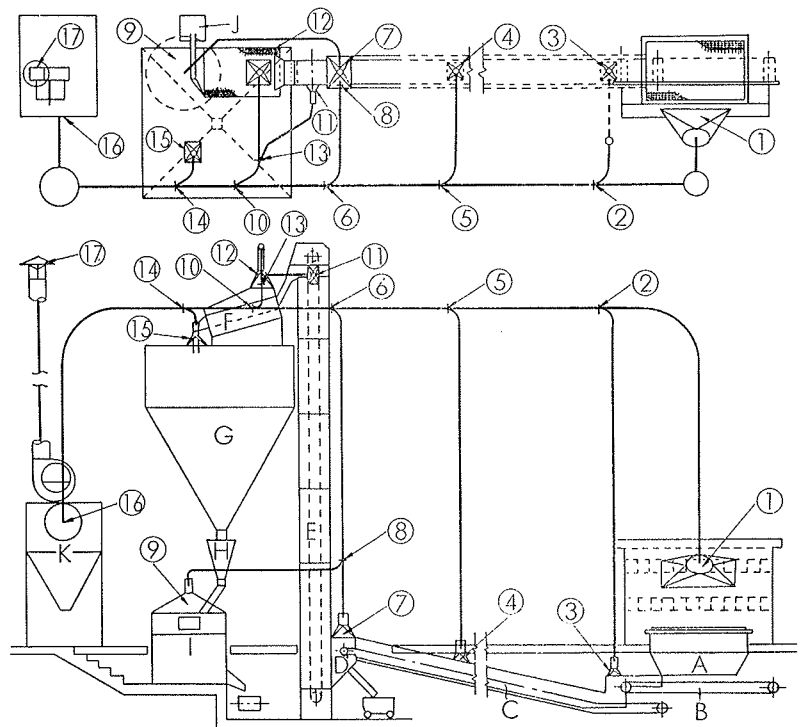
$$A_3 = \frac{Q}{3600 \sqrt{\frac{\gamma_0 \cdot \xi_i / \varepsilon + \xi_m}{2g \cdot \Delta \phi}}} \text{ (誤)} \quad A_3 = \frac{Q}{3600 \sqrt{\frac{\gamma_0 \cdot \xi_i / \varepsilon + \xi_m}{\Delta P}}} \text{ (正)}$$

p. 151 19行目

$$\xi = A_1/A_3 = A_2/A_3 \text{ (誤)} \quad \varepsilon = A_1/A_3 = A_2/A_3 \text{ (正)}$$

| | 1-2 | 3-2 | 2-5 | 4-5 | 5-6 | 9-8 | 7-8 | 8-6 | 6-10 | 11-13 |
|---|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 1 DUCT START AND END NO | | | | | | | | | | |
| 2 REQUIRED AIR VOLUME M ³ /M | 100.00 | 20.00 | 100.00 | 20.00 | 100.00 | 31.00 | 20.00 | 54.00 | 194.00 | 20.00 |
| 3 ACTUAL AIR VOLUME M ³ /M | 100.00 | 20.00 | 100.00 | 20.00 | 100.00 | 31.00 | 20.00 | 54.00 | 194.00 | 20.00 |
| 4 S SLOT AREA SQ H | 0.346 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5 S L SLOT VELOCITY M/S | 5.10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 6 S L SLOT VELOCITY PRESSURE MMAQ | 1.81 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7 S L SLOT ENTRY LOSS FACTOR | 1.78 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 8 S L PLENUM STATIC PRESSURE MMAQ | 3.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 9 DUCT DIAMETER CM | 33.0 | 15.2 | 33.1 | 15.2 | 47.6 | 30.3 | 15.2 | 25.4 | 48.3 | 15.2 |
| 10 SPECIFIED DUCT VELOCITY M/S | 20.00 | 18.00 | 17.50 | 18.00 | 18.00 | 17.60 | 19.00 | 18.40 | 18.10 | 18.00 |
| 11 ACTUAL DUCT VELOCITY M/S | 19.45 | 18.27 | 17.54 | 18.27 | 17.58 | 17.47 | 18.27 | 17.76 | 17.67 | 18.27 |
| 12 DUCT VELOCITY PRESSURE MMAQ | 23.2 | 23.5 | 18.9 | 23.5 | 19.8 | 18.7 | 23.5 | 19.3 | 19.2 | 23.5 |
| 13 STRAIGHT DUCT LENGTH M | 7.30 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 2.70 | 1.80 | 5.50 | 2.40 | 1.50 |
| 14 STRAIGHT DUCT FRICTION VP/METER | 0.65 | 0.14 | 0.61 | 0.14 | 0.61 | 0.19 | 0.11 | 0.67 | 0.63 | 0.14 |
| 15 STRAIGHT DUCT LOSS FACTOR | 0.19 | 1.05 | 0.31 | 0.57 | 0.19 | 0.25 | 0.25 | 0.11 | 0.08 | 0.21 |
| 16 HOOD ENTRY LOSS FACTOR | 0.25 | 0.25 | 0.0 | 0.25 | 0.0 | 0.25 | 0.25 | 0.0 | 0.0 | 1.00 |
| 17 ACCELERATION FACTOR | 1.00 | 1.00 | 0.0 | 1.00 | 0.0 | 1.00 | 1.00 | 0.0 | 0.0 | 1.00 |
| 18 ELBOW LOSS FACTOR | 0.54 | 0.45 | 0.0 | 0.45 | 0.0 | 0.67 | 0.0 | 0.45 | 0.0 | 0.35 |
| 19 JOINT LOSS FACTOR | 0.0 | 0.18 | 0.0 | 0.18 | 0.0 | 0.18 | 0.0 | 0.18 | 0.0 | 0.18 |
| 20 DAMPER OR SPECIAL LOSS FACTOR | 0.28 | 0.0 | 0.0 | 1.28 | 0.0 | 0.0 | 0.67 | 1.37 | 0.0 | 0.0 |
| 21 TOTAL DUCT LOSS FACTOR | 2.45 | 2.94 | 0.31 | 4.11 | 0.29 | 2.31 | 2.17 | 2.42 | 0.68 | 2.74 |
| 22 DUCT STATIC PRESSURE LOSS MMAQ | 57.1 | 60.2 | 5.9 | 84.8 | 5.8 | 41.3 | 41.3 | 46.7 | 1.5 | 56.1 |
| 23 JUNCTION VP CHANGE LOSS MMAQ | 0.0 | 0.0 | 18.7 | 0.0 | 19.7 | 0.0 | 0.0 | 19.2 | 19.0 | 0.0 |
| 24 TOTAL DUCT SP LOSS MMAQ | 60.7 | 60.2 | 24.6 | 84.8 | 25.4 | 41.3 | 41.3 | 65.9 | 20.5 | 56.1 |
| 25 STATIC PRESSURE AT JUNCTION MMAQ | 60.7 | 60.2 | 84.8 | 84.8 | 110.2 | 41.3 | 41.3 | 110.2 | 130.8 | 56.1 |
| 26 HOOD STATIC PRESSURE MMAQ | 32.2 | 35.6 | 0.0 | 23.6 | 0.0 | 23.1 | 25.5 | 0.0 | 0.0 | 41.0 |
| 27 DAMPER LOSS ADDED MMAQ | 6.5 | 0.0 | 0.0 | 20.3 | 0.0 | 0.0 | 13.6 | 26.5 | 0.0 | 0.0 |

表一5 アウトプットの例



図一3 砂ふるい設備とダクトレイアウト