

カスケードインパクトのデータ処理

吉田 英人
Hideto Yoshida

緒 言

粉じん気流をノズルから吹出し、平板に衝突させると、おおよそある粒径より粗大な粒子は平板に衝突して付着し、細かい粒子は気流と共に衝突することなくそれてしまう。したがって、この分級粒子径 (cut size) を順次小さくしたノズルと平板よりなる幾組かのインパクトを直列に重ねて (カスケードに) 使用すれば粒径分布を求めることができる。しかもこの分級径がちょうど 0.2~10 μm の範囲に入るので大気塵や工場排ガスの粒径測定用に適しており、国内及び外国において数種類の型式が市販されている。衝突板上の粒子を顕微鏡によって計数して粒度分布を求めることもあるが、各段上の粒子重量を秤量する方法が主に用いられている。また最近では、粒子重量をピエゾ発振素子の周波数変化を利用して求め、粒度分布の情報を短時間に知ることができる型式も市販されている。しかし、多量に粒子を捕集すると、たとえ衝突板上に薄く真空グリース又はワセリン等の粘着剤をぬっていても再飛散を生じ、粒径分布が細かい方へずれて求まるので、ノズル吹出速度にもよるが各段は 5~50mg 以下の粒子捕集量とすることが望ましい。

またノズル口径と吹出し速度は分級径から制限をうけるので、大流量を処理する場合にはノズルを並列に多数配置した形式 (アンダーセンインパクト) が利用されている。

ここでは単分散に近い粒子の粒度分布をアンダーセンインパクトを用いて測定する際の理論的誤差の程度を、通常的手法を用いた場合 (50%分離径によるデータ処理) と Torny¹⁾ の変換を用いた場合とで比較検討したので解説する。インパクトで得られたデータの特性を正確に知る上からも重要であるから、ここで説明することにした。

1. 50%分離径によるデータ処理

円形インパクトの部分捕集効率 $\Delta\eta$ と慣性パラメータ ψ の関係は Ranz らの間隔比 1~3 の条件下の実験値を直線近似すると、次式で表わされる^{4,6)}。

$$\Delta\eta = 3.80\sqrt{\psi} - 0.954 \quad (1)$$

50%分離径に対応する粒子慣性パラメータ ψ は式(1)より次式となる。

$$\sqrt{\psi} \Big|_{\Delta\eta=50\%} = \sqrt{\frac{C_D \rho_p \mu_i}{18\mu D_c} \cdot D_{p50}} = 0.382 \quad (2)$$

上式で C はカニングガムの補正係数、 ρ_p は粒子密度、 μ は気体の粘性係数 ($\text{g/cm}\cdot\text{s}$)、 D_c はノズル径 (cm)、 u_i は第 i 段ノズル部での気体の速度 (cm/s) を表わす。またカニングガムの補正係数 C は次式で表わされる。

$$C = 1 + \frac{2.507\mu}{D_{p50}\sqrt{g_c\rho p_i}} \left\{ 1.23 + 0.41 \exp\left(-\frac{0.351\sqrt{g_c\rho p_i} D_{p50}}{\mu}\right) \right\} \quad (3)$$

上式で ρ は気体密度、 p_i はノズル部での圧力 (gw/cm^2) である。式(3)を式(2)に代入することにより次式を得る³⁾。

$$\frac{\rho_p \mu_i}{18\mu D_c} \left\{ D_{p50}^2 + \frac{2.507\mu D_{p50}}{\sqrt{g_c\rho p_i}} \left[1.23 + 0.41 \exp\left(-\frac{0.351\sqrt{g_c\rho p_i} D_{p50}}{\mu}\right) \right] \right\} = 0.146 \quad (4)$$

* 広島大学工学部 化学工学教室
(〒724 東広島市鏡山一丁目4-1)
Tel. (0824) 22-7111 内3615

Table 1 インパクトターの穴径及び穴数

ステージ番号	穴径 (mm)	穴数 (個)	$D_{p50}(\mu\text{m})$
0	1.2	800	12.1
1	1.2	400	8.5
2	0.9	400	5.7
3	0.7	400	3.9
4	0.5	400	2.5
5	0.35	400	1.25
6	0.25	400	0.76
7	0.25	200	0.52
L-1	0.25	110	0.33
L-2	0.25	80	0.22
L-3	0.25	80	0.13
L-4	0.25	110	0.06

上式を解くには試行法を必要とする。

第 i 段でのノズル部流速 u_i 、圧力 p_i とインパクトターの入口部での圧力 p_0 、吸引流量 Q_0 との間には、定温条件を仮定すると次式の関係がある。

$$p_0 Q_0 = p_i \frac{\pi}{4} D_c^2 u_i n_i \quad (5)$$

ただし上式で n_i は第 i 段での孔数で表わす。

本報で検討したインパクトター（東京ダイレック 株式会社、LP-20型）の各段の穴径、穴数を Table 1 に示す。また表中には、インパクトター入口吸引流量 $Q_0=20(l/min)$ 、粒子密度 $\rho_p=1(g/cm^3)$ 、最下段部絶対圧力 210mmHg の条件において、各段の50%分離径を式(4)、及び(5)を用いて計算した値も記してある。

ステージ0~7までは通常のアnderセンインパクトターと同じであり、分離径は第7段で $0.52\mu\text{m}$ となる。

L-1~L-4の4段が減圧段の部分に相当し、特に最下段では50%分離径が $0.06\mu\text{m}$ と $0.1\mu\text{m}$ 以下になっている。なおL-2段とL-3段では穴径及び穴数が同一なのに、50%分離径が異なっている。これはL-2段よりL-3段の方が圧力が低くなるため、式(3)で計算されるカニンガムの補正係数が大きくなることにより生じたものである。

圧損特性の結果を Fig. 1 に示す。図中で横軸はインパクトター入口部の動圧に比例する量 ($\rho_0 Q_0^2$ で表示) を、縦軸は圧力損失 ΔP を表わす。また0~5及び0~L4等はインパクトター上段から5段まで及び上段からL4段（最下段）まで連結した状態を表わす。L-4段まで用いた場合、インパクトター入口部での吸引流量 $Q_0=25(l/min)$ の条件 ($\rho_0 Q_0^2 \approx 0.725$) で、圧損が 550mmHg 即ち絶対圧で約0.27気圧となっている。通常のインパクトターでは最下段が約0.5気圧程度であり、減圧インパク

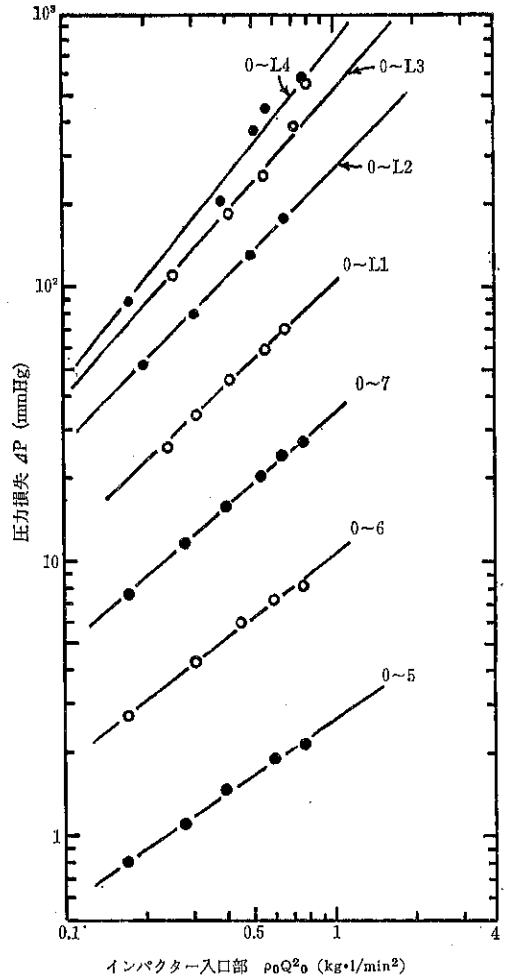


Fig. 1 減圧インパクトターの圧損特性

ターが $0.1\mu\text{m}$ 以下の粒子まで捕集できるのは、最下段部でより減圧条件にしているためである。

2. Tomy の変換によるデータ処理

50%分離径を各段で計算し、各段で捕集された粉体の重量分率からインパクトターへ入った粉塵の粒度分布を求めることができる。しかしながらこの手法では各段での部分捕集効率曲線が重なっている場合（即ちインパクトターの第 i 段において部分捕集効率 $\Delta\eta=0\%$ に対応する粒子径が、下段である第 $(i+1)$ 段において $\Delta\eta=100\%$ に対応する粒子径より小さい場合）及び測定値に誤差がかなりある場合は必ずしも正しい粒度分布を求めることができない。

一方、Tomy の変換¹⁾を利用すると、データ処理は複雑になるが、より正しい粒度分布を求めることができる。Tomy の変換については種々の解説があるが²⁾、こ

ここで簡単に説明する、インパクターの全段数を n 段とした場合、各段での重量分率は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \text{第1段} \quad & \int_a^b k_1(D_p) f_1(D_p) dD_p = g_1 = \frac{m_1}{m_0} \\ \text{第2段} \quad & \int_a^b k_2(D_p) f_2(D_p) dD_p = g_2 = \frac{m_2}{m_0} \\ \text{第}i\text{段} \quad & \int_a^b k_i(D_p) f_i(D_p) dD_p = g_i = \frac{m_i}{m_0} \\ \text{第}n\text{段} \quad & \int_a^b k_n(D_p) f_n(D_p) dD_p = g_n = \frac{m_n}{m_0} \end{aligned} \right\} (6)$$

上式で m_i は第 i 段における捕集粉塵量を、 m_0 は全捕集粉塵量である。又 $k_i(D_p)$ は第 i 段における特性関数で、この段での部分捕集効率を $\Delta\eta_i$ とすると次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} k_1(D_p) &= \Delta\eta_1 \\ k_2(D_p) &= (1 - \Delta\eta_1) \Delta\eta_2 \\ k_i(D_p) &= (1 - \Delta\eta_1)(1 - \Delta\eta_2) \cdots (1 - \Delta\eta_{i-1}) \Delta\eta_i \\ k_n(D_p) &= (1 - \Delta\eta_1)(1 - \Delta\eta_2) \cdots (1 - \Delta\eta_{n-1}) \Delta\eta_n \end{aligned} \right\} (7)$$

実際には、式(6)の積分下限及び積分上限を n 分割し、第 j 分割での粒径範囲を $D_{pj} \sim D_{p,j+1}$ 、中位径を D_{pj}^* 、粒径差を $\Delta D_{pj} = (D_{p,j+1} - D_{pj})$ とした場合に積分は次式で近似できる。

$$\left. \begin{aligned} k_1(D_{p1}^*) f_1(D_{p1}^*) \Delta D_{p1} + k_1(D_{p2}^*) f_1(D_{p2}^*) \Delta D_{p2} \\ + \cdots + k_1(D_{pn}^*) f_1(D_{pn}^*) \Delta D_{pn} &= \frac{m_1}{m_0} \\ k_2(D_{p1}^*) f_2(D_{p1}^*) \Delta D_{p1} + k_2(D_{p2}^*) f_2(D_{p2}^*) \Delta D_{p2} \\ + \cdots + k_2(D_{pn}^*) f_2(D_{pn}^*) \Delta D_{pn} &= \frac{m_2}{m_0} \\ k_i(D_{p1}^*) f_i(D_{p1}^*) \Delta D_{p1} + k_i(D_{p2}^*) f_i(D_{p2}^*) \Delta D_{p2} \\ + \cdots + k_i(D_{pn}^*) f_i(D_{pn}^*) \Delta D_{pn} &= \frac{m_i}{m_0} \\ k_n(D_{p1}^*) f_n(D_{p1}^*) \Delta D_{p1} + k_n(D_{p2}^*) f_n(D_{p2}^*) \Delta D_{p2} \\ + \cdots + k_n(D_{pn}^*) f_n(D_{pn}^*) \Delta D_{pn} &= \frac{m_n}{m_0} \end{aligned} \right\} (8)$$

上式で f_i は第 i 段で評価された、粒度分布であり解が収束すると次式を満足しなければならない。

$$f_1(D_p) = f_2(D_p) = \cdots = f_n(D_p) \quad (9)$$

式(8)を式(9)の条件を満足するまで解く必要があり、実際には適当な粒度分布関数 $f_i(D_p)$ を仮定した後、緩和法によるくり返し計算が必要になる。

なお式(8)の方程式を一回の操作で解くと、式(9)が満足されないで、通常は次式を用いて解く。

$$f_i^{(k+1)}(D_p) = \{1 - k_i(D_p)\} f_{i-1}^{(k)}(D_p) + r_i^{(k)} k_i(D_p) f_{i-1}^{(k)}(D_p) \quad (10)$$

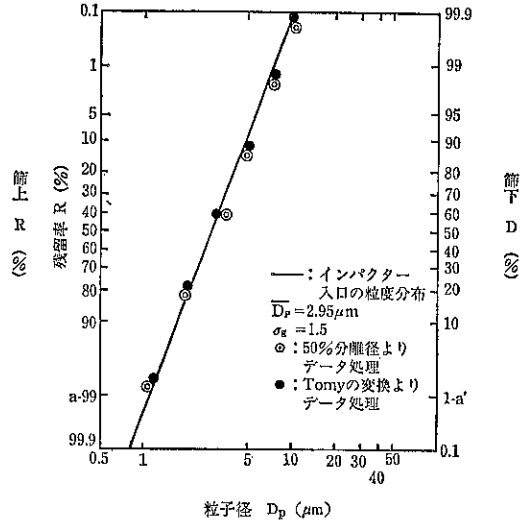


Fig. 2 インパクター入口粒径と測定される粒径の関係

ただし $r_i^{(k)}$ は次式で表わされる。

$$r_i^{(k)} = \frac{g_i}{\int_a^b k_i(D_p) f_{i-1}^{(k)}(D_p) dD_p} \quad (11)$$

式(10), (11)で i はインパクター段数を、 k はくり返し操作の回数を表わす。

Tomyの変換法の妥当性を検討するために、インパクター入口の粒度分布が既知の場合、どの程度の結果が得られるかを調べた。ただし、インパクター各段において粒子の再飛散や反発がないものと仮定して計算した。

Fig. 2 は対数正規分布に従う質量中位径 $\bar{D}_p = 2.95 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 $\sigma_g = 1.5$ 、粒子密度 $\rho_p = 1 \text{ (g/cc)}$ の粒子がインパクターに入った場合、データ処理を50%分離径により行なったものと、Tomyの変換により行なったものと対比して示してある。インパクター流量は20 (l/min) であり、実線はインパクター入口粒度分布(真の分布)を示している。なお Tomyの変換を用いた場合、初期の粒度分布を平均径 $\bar{D}_p = 4.5 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_g = 1.35$ と仮定して計算した。50%分離径による手法及び Tomyの変換法の両者とも、実線で示したインパクター入口の粒度分布と良好に一致している。また Tomyの変換法を用いた場合、初期に仮定する粒度分布を種々に変化させても、ほぼ同一の最終解に収束した。

次にインパクター入口の粒度分布が単分散に近づくにつれて、どうなるかを検討した。インパクター入口の粒度分布が単分散に近づくとき、各段の部分捕集効率曲線が粒径に対して傾きをもち、理想分離となっていないため入口粒度分布が正確に推定できにくくなる。

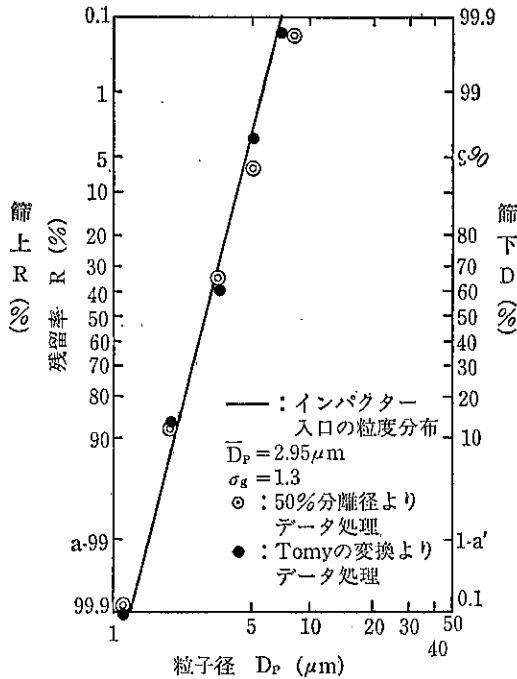


Fig. 3 インパクトター入口粒径と測定される粒径の関係

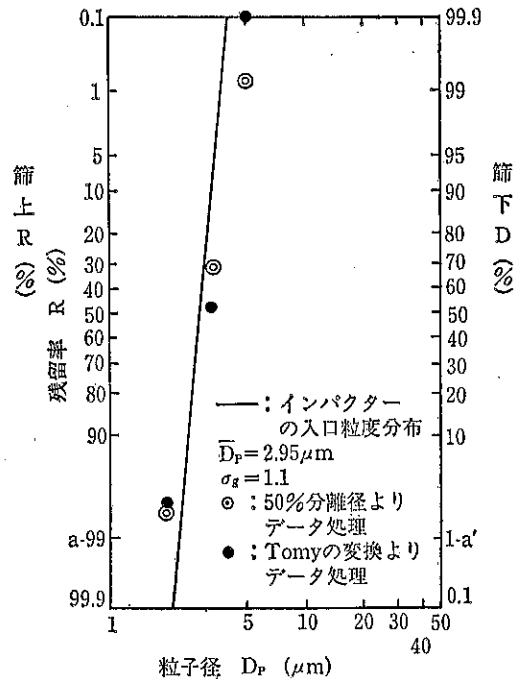


Fig. 5 インパクトター入口粒径と測定される粒径の関係

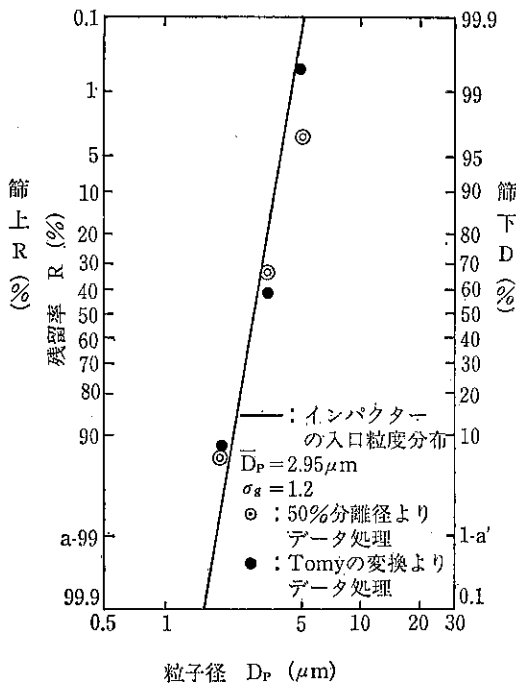


Fig. 4 インパクトター入口粒径と測定される粒径の関係

Fig. 3 は平均径は $2.95\mu\text{m}$ と同じであるが、 $\sigma_g = 1.3$ と変化した場合であり、この場合もほぼ正確に入口粒度分布が再現できることがわかる。Fig. 4 は σ_g がさら

に小さく 1.2 となった場合を、Fig. 5 は σ_g が 1.1 となった場合の結果である。 $\sigma_g = 1.1$ の場合、50%分離径によりデータ処理を行った場合の σ_g はインパクトター入口での σ_g の値より大きくなっている。しかしながら Tomy の変換を用いた方が 50%分離径による手法よりも、入口粒度分布により近い値が推定できることを示している。

結 言

インパクトターを用いた場合のデータ処理法として、50%分離径による手法と Tomy の変換による手法とを比較検討した。その結果、インパクトター入口の粒度分布が単分散に近づく、真の粒度分布を推定できにくくなるが、Tomy の変換法を用いた方がより優れている。Tomy の変換法は 50%分離径による手法よりも、データ処理操作が複雑となるが、今後利用することを検討する必要がある。

(謝辞) 本解説の執筆に対して、御助言を頂いた井伊谷 鋼一京都大学名誉教授に感謝の意を表します。

使用記号

a, b ; 式(6)の積分操作における最小粒径及び最大粒径 (μm)

C ; カニガムの補正係数 (—)

D_c ; ノズル口径 (cm)
 D_{p50} ; 50%分離限界粒子径 (cm)
 \bar{D}_p ; 質量基準の中位径 (μm)
 f_i ; 第 i 段における質量基準の粒度分布関数 ($\%/\mu\text{m}$)
 $g_c (=980)$; 重力換算係数 ($\text{g}\cdot\text{cm}/\text{gw}\cdot\text{s}^2$)
 $g_i (=m_i/m_0)$; 第 i 段における粉塵重量分率 (-)
 k_i ; 式(7)で定義される関数 (-)
 n_i ; 第 i 段におけるノズル穴数 (-)
 m_i, m_0 ; 第 i 段における捕集粉塵量及び全捕集粉塵量 (g)
 p_i, p_0 ; 第 i 段目ノズル出口及びカスケード入口の圧力 ($\text{g}\cdot\text{cm}/\text{gw}\cdot\text{s}^2$)
 Δp ; 圧力損失 (mmHg)
 Q_0 ; カスケード入口の気体流量 (cm^3/s)
 u_i ; 第 i 段目のノズル断面平均速度 (cm/s)
 ρ_p, ρ ; 粒子密度及び気体密度 (g/cm^3)

μ ; 気体粘性係数 ($\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$)
 $\Delta\eta_i, \Delta\eta$; 第 i 段における部分捕集効率及び部分捕集効率 (-)
 $\psi = \left(\frac{C_{\rho p} D_p^2 u_i}{18\mu D_c} \right)$; 粒子慣性パラメータ (-)
 σ_g ; 対数正規分布における幾何標準偏差 (-)

引用文献

- 1) Tomy, S.; J. of Computational Physics, **18**, 188 (1975)
- 2) 東野, 高橋; 粉体工学会誌, **17**, **10**, 565 (1980)
- 3) 吉田, 増田, 井伊谷; 粉体工学会誌, **13**, **12**, 655 (1976)
- 4) 湯, 井伊谷; 化学工学, **33**, 1265 (1969)
- 5) 井伊谷, 湯, 牧野, 中野; 化学工学, **33**, 689 (1969)

特許一言メモ No. 128

——「ホイールインモーター」——

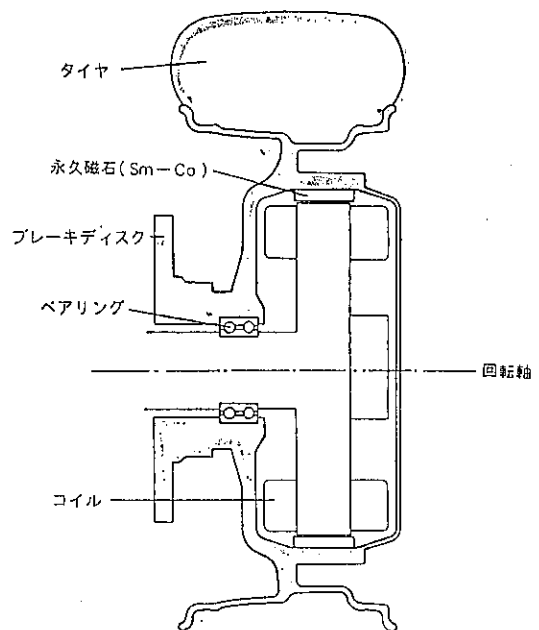
1回の充電で548 km 走れる4人乗りの電気自動車
が東京電力で開発された。

「IZA」と名付けられたこの試作車は、最高時速でも米国ゼネラルモーター社の160 kmを上回る176 kmを達成し、実用化へ一歩前進した。鉛電池よりエネルギー密度が30%も高いニッケル・カドミウム電池をのせ、それぞれの車輪に最大出力25 kWのモーターを内蔵するホイールインモーターによる直接駆動方式を採用、エネルギー消費は、同クラスのガソリン車の3分の1程度だという。これは東京電力が3年前につくったEV研究会のもとで開発され、車体は東京アールアンドデー社、駆動系は明電舎、電池系は日本電池が担当した。

(「発明」誌92年1月号70ページより)

このように、三社が各々の得意な分野を分担しあって一つの技術を完成させていく、こうした共同研究、共同開発の動きが活発になってきている。

ホンカワミクロン側でも近ごろは共同出願をすることも多くなった。いわゆるフェュージョンさせることでより良い技術が創造される。ちなみに昭和47年(1972年)以降の特許・実用新案で他社と共同出願したのは全体の1割におよんでいる。(特許室)



ホイールインモーターの断面図