

換気シミュレーションによる トンネル内空気流性状の評価

The estimation of the air behavior in the tunnel by using ventilative simulation

北澤壮介¹⁾, 坂井直人²⁾, 城 郁夫³⁾, 河野伸征³⁾

Sosuke KITAZAWA, Naoto SAKAI, Ikuo JOH, Nobuyuki KOHNO

If booster is set not so far from the entrance of tunnel to ventilate smoke at the fire in the tunnel, there may be some influence in the booster power because of the contracted flow and the length of boosting pressure. Some of the representative way to investigate those subjects are the spot and the model experiments. But there are some problem in those way.

In recent years, the simulation tends to be adopted from these reasons. However, the technique of the condition setting isn't sometimes established, there are not so many case studies. This report shows the examination results about the air behavior in the immerset tunnel, which is set booster at the 90 m position from the portal, and modeling with setting conditions for simulation.

Key Words: immerset tunnel, ventilation, simulation, booster

1. はじめに

トンネル火災時の排煙用としてジェットファン(以下、JFと称す)を坑口から近い位置に設置する場合、坑口からの縮流や噴流拡散距離の影響からJFの昇圧力に問題があるといわれている。これらの問題に対する調査確認の方法として代表的なものは実物実験および模型実験があるが、実物実験は大規模な実験設備が必要なこと・その観測方法と観測精度・実験期間の制約・実験が建設後となり設計に反映されにくいこと、模型実験はその目的により規模が大きくなること・実物との値に差異が生じること・実験回数が数多く必要となること等の課題が残される。これらの理由から、近年では解析シミュレーションを用いた手法が採用される傾向にある。しかし、条件設定等の手法が確立されていないこともあり、その事例は少ないのが現状である。本検討は沈埋トンネルを想定し、換気シミュレーション上の設定条件について検討するとともに、JFを坑口から90m程度の位置に設置した場合のトンネル内の空気流性状について検討するものである。

2. 流体解析理論

本シミュレーションは、有限体積法を用いた空気流体乱流解析手法を適用するものであり、空気流性状の算出は以下の基本式に基づく。

-
- | | |
|-------------|-------------------|
| 1) 正会員 | 元財団法人沿岸開発技術研究センター |
| 2) | 元財団法人沿岸開発技術研究センター |
| 3) 正会員 工学博士 | 株式会社構造技術センター |

質量保存式：流体の連続した運動を取り扱う場合、流体中に任意の閉空間を取れば、その内部の流体の質量の増加は閉曲面を通じて流入した質量と流出した質量との差に等しい。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots ①$$

ここに、 ρ, t ：流体密度、時間

X, Y, Z ： x, y, z 方向の単位質量あたりの流速

運動量保存式（Navier-Stokesの方程式）：1つの質点系における単位時間内の運動量の変化はその系の外部から働く力の総和に等しく、系の内部で質点間に働く力は相互にうち消し合い、力の総和には関係しない。

$$\frac{D \rho u}{Dt} = \frac{\partial \rho u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho u}{\partial x} + v \frac{\partial \rho u}{\partial y} + w \frac{\partial \rho u}{\partial z} = X - \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \rho u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{D \rho v}{Dt} = \frac{\partial \rho v}{\partial t} + u \frac{\partial \rho v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho v}{\partial y} + w \frac{\partial \rho v}{\partial z} = Y - \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \rho v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho v}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots ②$$

$$\frac{D \rho w}{Dt} = \frac{\partial \rho w}{\partial t} + u \frac{\partial \rho w}{\partial x} + v \frac{\partial \rho w}{\partial y} + w \frac{\partial \rho w}{\partial z} = Z - \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 \rho w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho w}{\partial z^2} \right)$$

ここに、 P ：圧力成分、

X, Y, Z ： x, y, z 方向の単位質量あたりの質量力

u, v, w ： x, y, z 方向の流速成分

エネルギー方程式：単位体積中に発生したエネルギーの変化は、単位体積あたりの仕事量の変化に等しい。

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \rho c \left(\frac{\partial T u}{\partial x} + \frac{\partial T v}{\partial y} + \frac{\partial T w}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q' \dots\dots\dots ③$$

ここに、 T ：温度、 c ：比熱、 k ：熱伝導率

q ：単位体積・単位時間あたりのエネルギー

本解析は JF 運転時の基本的なトンネル内空気流性状を把握することを目的とすること、トンネル内の空気流速が JF 近傍を除いて 30m/s 以下の低流速域となることから熱による空気膨張を考慮しない、非圧縮性流体解析とする。非圧縮性流体解析では、上式の中で以下の仮定を導入する。

ρ (空気密度) = const

3. 解析方法

3.1 基本条件

換気シミュレーションにおいて想定した条件を表-1に、JF の仕様を表-2に示す。解析対象は2車線1方向交通沈埋トンネルを想定し、JF は車両入口側陸上トンネル部に JF1500 を2台設置した。自然風条件として風速 2.5m/s を JF の噴出方向と逆方向に作用させた。また、停止車両はトンネル全延長に大型車混入率 25 % で配置した。

表-1 換気シミュレーション条件

	陸上部	沈埋部	陸上部	全長
延長 (m)	120	557	100	777
断面積 (m ²)	68.3	52.7	68.3	
大型車混入率	25.0 %			
JF条件	JF1500×2 台			

表-2 JF 仕様

JF規格	断面積 (m ²)	噴出流速 (m/s)	風量 (m ³ /s)
JF1500	1.84	30.00	55.20

表-3 境界面条件

	起点	終点
縦断方向	ΔP=0.0	自然風条件
横断方向	対数則	対数則
	上限	下限
高さ方向	slip条件	対数則

JF噴出方向 →

3.2 境界条件

1) 境界面条件

境界面での条件設定は、トンネル縦断方向は解析領域の内外で圧力差が Δ P=0.0 となり空気の流入出が自由となる連続条件を適用し、JF 噴出方向と対面した境界面には風速 2.5m/s の自然風条件を設定し

た。横断方向および高さ方向底面の境界面はトンネル壁面を考慮した対数則を設定し、高さ方向上限は境界面の条件が影響しない十分な大気圏領域を設け、摩擦が作用しないスリップ条件とした。

2) トンネル内流速分布

トンネル内の空気流速は中央では大きく壁面近傍では摩擦抵抗により低減され、弓状に分布する。管路流の解析では、トンネルの壁面摩擦損失とトンネル内流速との関係である分布則¹⁾により流速分布形状を設定する必要がある。乱流の流速分布は混合距離理論を用いて局所流速の対数則が得られ、これに壁面粗さ条件を代入し、トンネル内流速分布近似式を設定する。壁面の摩擦係数はこれまでの実験実績から普通コンクリートでは $\lambda=0.015 \sim 0.025$ 程度¹⁾であり、本解析上は一般の換気計算で用いられている $\lambda=0.025$ を採用する。トンネル内流速分布は、上記の摩擦係数を用いて Moody 図表から読みとった相対粗度を対数則に代入し、壁面粗さを考慮した設定を行う。

3.3 縦断勾配の影響

沈埋トンネルは通常地上から海底部へのアクセスの際、陸上トンネル部において3～5%程度の縦断勾配を有する。沈埋部がほぼ平坦にであるのに対し陸上部に勾配がある場合、陸上部と沈埋部の境で勾配変化による損失が発生する可能性がある。勾配変化による影響が十分小さく無視できる場合、トンネルを直線に置き換えることにより解析モデルの簡略化が可能となることから、縦断勾配の有無によるトンネル内空気流性状の比較を行った。検討方法は以下の2とおりとした。

1) 実験事例に基づく計算式による検討

長方形屈折管の曲がり損失係数と断面の縦横比の関係は過去の実験事例等を踏まえ図-1に示す直線上に近似でき、式④から圧力損失が算出される。

$$\Delta P_b = \zeta_b \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \quad \cdots \text{④}$$

2車線沈埋トンネルを想定し、 $h/b \cong 0.5 \sim 0.6$ 程度、縦断勾配=5% ($\theta \cong 2.86^\circ$)とした場合、曲がり損失係数 $\zeta_b < 0.1$ となり、トンネル内流速が2～3m程度の場合、曲がりによる圧力損失は $\Delta P_b < 1.0$ (Pa)と十分小さいことから、全体的な圧力損失と比較して曲がりによる影響は計算上十分無視できる。

2) 直線-勾配モデルによる解析的検討

延長700mのトンネルを想定し、両側の陸上トンネル部(片側延長200m)に5%の縦断勾配を考慮したモデルと全長直線とした簡略モデルを作成し、トンネル内空気流性状について比較した。解析モデルを図-2に示す。JFは坑口から70mの位置にJF1500を2台設置し、車両進行方向に運転した。自然風およびトンネル内停止車両の影響は無視した。

勾配変化点および中間点の流速分布、流速ベクトル

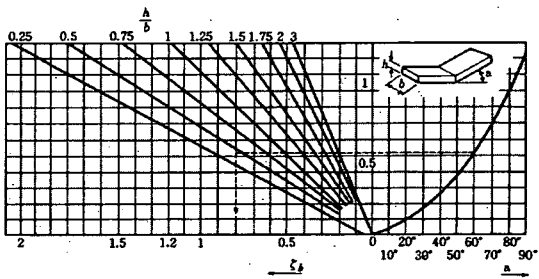


図-1 長方形屈折管の曲がり損失係数 ζ_b

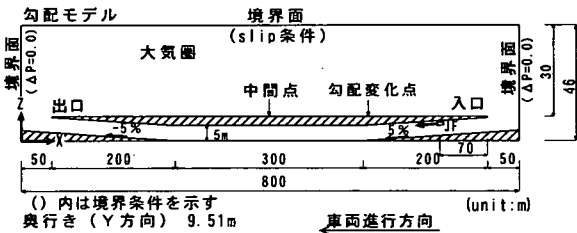


図-2 解析モデル(勾配モデル:トンネル縦断方向)

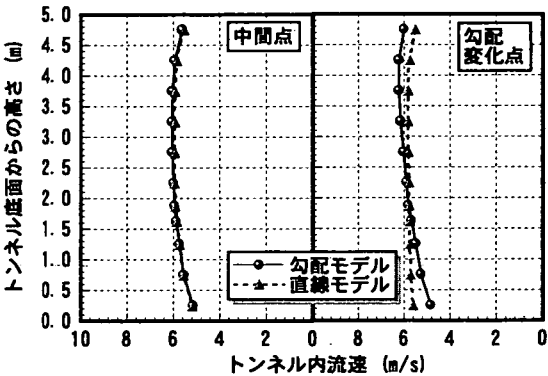


図-3 トンネル内流速分布比較

を図-3、4に示す。流速分布はトンネル内の各高さにおけるトンネル延長(X)方向成分の幅方向平均流速とした。図より、勾配変化点では流れ方向の変化により上、下端部の分布形状に若干差異が生じるものの、中間点の流速分布はほぼ一致することから、勾配の有無によるトンネル全体としての圧力損失量に明確な差異はなく、トンネルの全体的な流速性状には5%程度の縦断勾配はほとんど影響しないことが確認された。

3) 評価

過去の実験事例に基づく計算式による方法および換気シミュレーションによる比較検討により縦断勾配の影響を検討した結果、ともに5%程度の縦断勾配がトンネル全体の空気流性状に与える影響は十分小さいという結果が得られた。よって、以下縦断勾配を無視し、直線モデルを用いて解析、検討を行う。

3.4 車両配置

火災時のトンネル内停止車両は首都高速道路公団の基準を基に、車頭間隔5.7m(車間1.0m)で全延長に停止している最も厳しいケースを想定して配置した。

$$\text{車頭間隔} : S = 5.7 + 0.14v + 0.0022v^2 = 5.7 \text{ m} \cdots \textcircled{5}$$

v : 走行速度 (=0.0 km/h、停止車両)

大型車混入率25%から4台中1台を大型車として配置した。車両形状および配置は車両による定性的な形状損失の再現を目的として、メッシュ数の制約等から詳細な形状は再現せず、簡易的に箱型形状を規則的に配置してモデル化した。

3.5 解析モデル

上記の解析条件、境界条件、線形・車両のモデル化を踏まえ、2車線1方向交通沈埋トンネルを想定した解析モデルを作成した。解析モデルを図-5、6に示す。解析結果検討位置は沈埋トンネル部中間点(検討断面①)、JF位置(検討断面②)、陸上トンネル部中間点(検討断面③)の3断面とした。

3.6 解析ケース

JFは避難時、消防活動援助時等使用目的により運転方向を逆転することが考えられる。よって、上記の解析条件、境界条件および解析モデルを踏まえ、JFの運転方向を車両進行方向、車両進行逆方向とした2ケースについて検討を行った。解析ケースを図-7に示す。

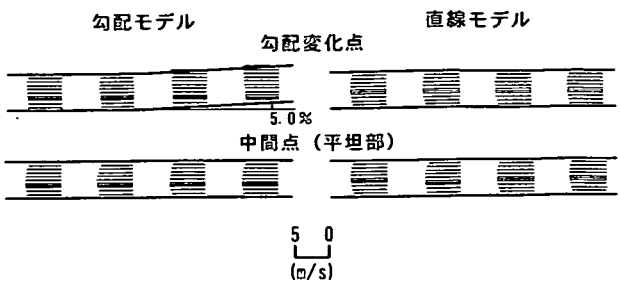


図-4 トンネル内流速ベクトル

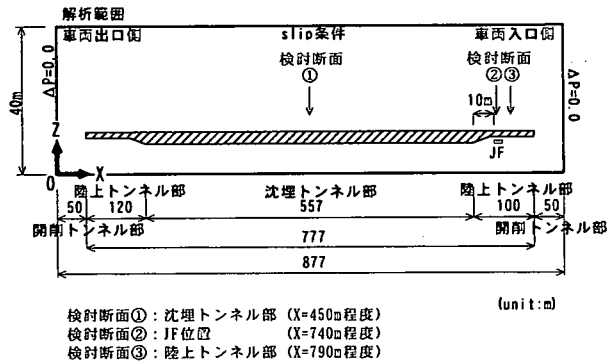


図-5 解析モデル(縦断図)

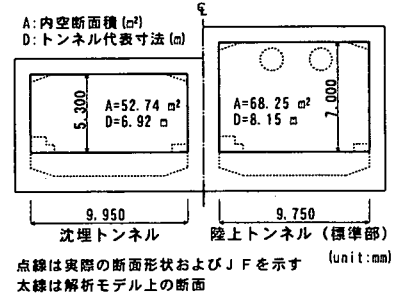


図-6 解析モデル(横断図)

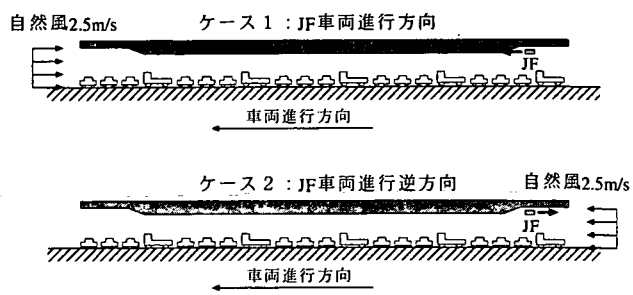


図-7 解析ケース

4. 解析結果および考察

4.1 トンネル内空気流性状

解析により得られた沈埋トンネル（検討断面①）および陸上トンネル位置（検討断面③）でのトンネル内流速分布を図-8に示す。図中の流速は各高さでの横断方向平均流速である。また、沈埋トンネル、陸上トンネルおよび JF 位置での流速コンターを図-9に示す。流速コンターは横断方向で JF を含む断面とする。両図より、トンネル下方では車両損失を伴うため低速となり、障害物のない上方では比較的流速が速くなる。JF 直下においては JF 噴流の影響から上方が突風領域となり、その結果下方で逆流域が発生する結果となった。JF を車両進行方向に運転した場合（ケース 1）、坑口からの縮流は陸上トンネルの中間点あたりで消滅しており、その影響範囲は坑口から約 40m 程度であることがわかる。流速分布において JF を車両進行逆方向に運転した場合（ケース 2）の陸上トンネル部でトンネル上方流速が大きくなるのは、検討断面が JF 噴出前面から 40m 程度に位置し、JF 噴流の影響を受けているためである。

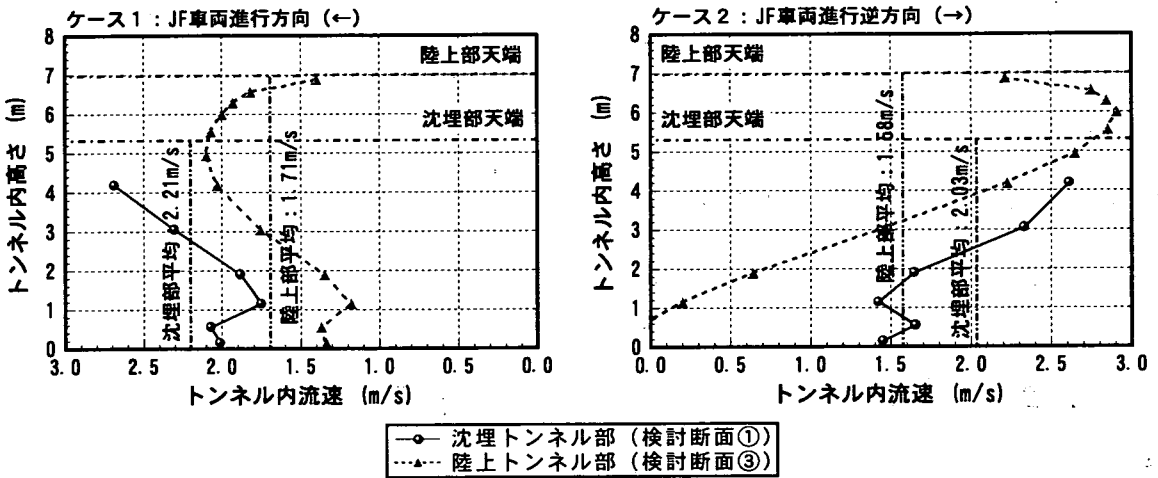


図-8 トンネル内流速分布

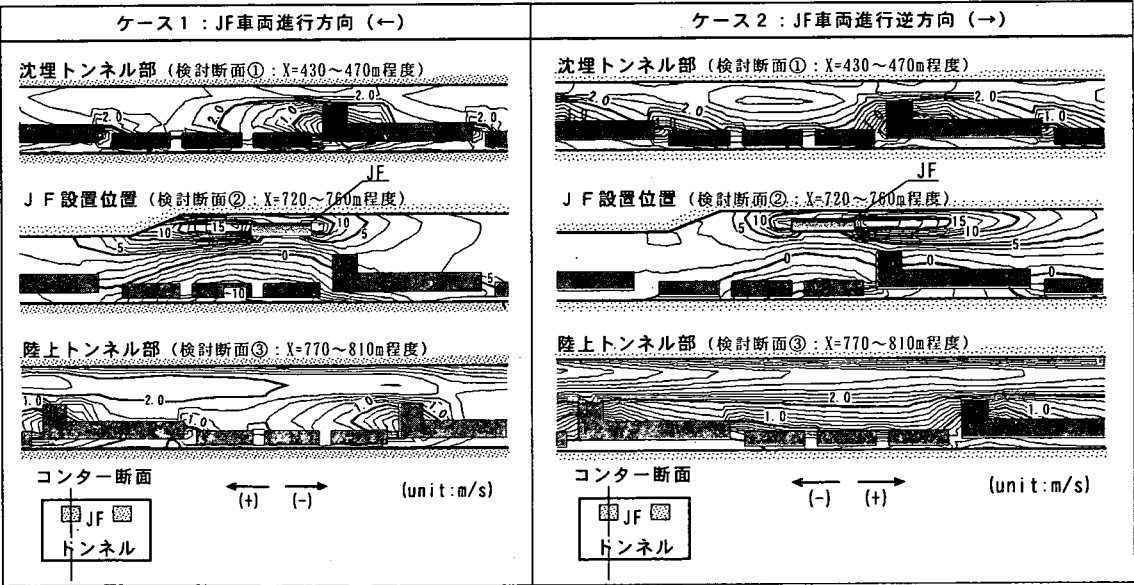


図-9 トンネル内流速コンター

4.2 トンネル縦断方向圧力勾配

トンネル縦断方向の圧力勾配を図-10に示す。JFを車両進行方向に運転した場合JFによる昇圧力が71(Pa)であったのに対し、JFを車両進行逆方向に運転した場合は62(Pa)とやや小さな値を示す。これは、JFを車両進行逆方向に運転した場合噴流拡散距離が90m程度と短くなること等の理由からJFの昇圧能力がやや低減されたためと考えられる。

4.3 シミュレーション結果の検証

換気シミュレーションはトンネル内の局所的な影響を含む全体的な空気流性状を再現するものである。解析により得られたトンネル内平均流速を換気計算式に代入してトンネル全長での圧力損失量を算出し、解析結果によるJF昇圧力と比較した結果を表-4に示す。圧力変動についてシミュレーション結果と換気計算式による計算結果を比較した場合、両者がよく一致していることから、本シミュレーションによる条件設定は概ね信頼できると考えられる。

5. まとめ

換気シミュレーションを用いてJFを沈埋トンネルの坑口から90mの位置に設置した場合の検討を行った結果、JFの昇圧性能に対して坑口からの縮流の影響はみられないが、JFを車両進行逆方向に運転した場合は昇圧力が僅かに低減されることから、噴流拡散距離が短いこと等によるJF昇圧能力の低下が生じたと予想される。但し、いずれのケースも沈埋部のトンネル内平均流速は2m/s以上確保できる結果となった。

謝辞：本検討において御指導、御助言を賜りました工学院大学水野明哲教授に多大なる感謝の意を表します。

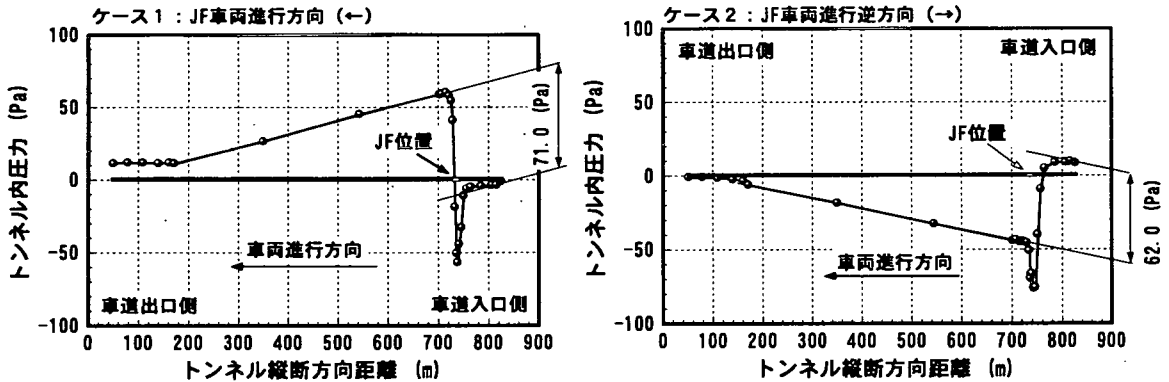


図-10 トンネル内縦断方向圧力勾配

表-4 計算値との比較

ケース	JF噴出方向	計算値			解析値	
		圧力損失 (Pa)			圧力損失 (Pa)	解析値計算値
		通気抵抗	自然風抵抗	車両抵抗		
ケース1	車両進行方向	8.72	15.90	43.20	67.82	71.00
ケース2	車両進行逆方向	7.67	15.90	36.49	60.05	62.00

参考文献

1) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説、pp.159～165、昭和60年12月
2) 日本機械学会：機械工学便覧 A5 編 流体工学、pp.73～76、1987