研　究　速　報
UDC 532.517：519.677：303.725

円錐ディフューザにおける抵抗体の効果の数値予測
——第3報　数値シミュレーションによるパラメタの最適化——
Numerical Prediction of Effect of Perforated Plates in Conical Diffusers
——3rd Report, Optimization of Parameters by Numerical Simulation——

小　林　敏　雄*
Toshio KOBAYASHI

1. まえがき

化学プラントや各種流体の輸送管路において空間の制約から高拡がり角のディフューザがしばしば使用されるが，ディフューザ効率の向上のため，あるいはディフューザ出口部における流速分布の一様性保持のために多くの対策が考えられている．その中で最も簡便で使用頻度の高いものはディフューザ部に金網などの抵抗体を挿入する方法である．この方法では抵抗体の抵抗係数とその挿入位置が圧力回復と流速分布の一様性に影響を与えるが，それらは従来，実験によって検証されていた．このような乱流場について k-ε 型乱流モデルと簡単な抵抗体モデルを用いての数値予測が有効であることを前報までに示した．[1)2)] 本報では抵抗体の抵抗係数と挿入位置をパラメタとする数値実験によって，それらのパラメタがディフューザ効率およびディフューザ出口部における流速分布の一様性に及ぼす影響を明らかにし，パラメタの最適組合せを検討する．さらに複数の抵抗体を挿入することの効果を考察する．

2. 評価関数

抵抗体の効果を評価する手段として本報では流速分布の一様性と全圧損失を採り上げる．流速分布の一様性を表す評価関数として運動エネルギ係数 α を導入する．[3)] ある断面を通過する流れがもつ運動エネルギと一様流がもつ運動エネルギの比として α を定義する．すなわち，

$$\alpha=\frac{\int_A \bar{u}(\bar{u}^2+\bar{v}^2)dA}{\int_A \bar{u}\langle\bar{u}\rangle^2 dA}=\frac{\int_A \bar{u}(\bar{u}^2+\bar{v}^2)dA}{A\langle\bar{u}\rangle^3} \qquad (1)$$

ここに，u,v は流速の x,y 方向成分(ディフューザ入口速度 U_1 を用いて無次元化，図1参照)，A は流路断面積，$\langle\ \rangle$ は断面平均，$-$は時間平均を表す．

次に，任意の断面における流量平均全圧を

$$\langle\bar{p}_t\rangle=\langle\bar{p}\rangle+\frac{\int_A \bar{u}(\bar{u}^2+\bar{v}^2)dA}{2\langle\bar{u}\rangle A} \qquad (2)$$

で定義する．p_t は全圧，p は静圧で ρU_1^2(ρ：流体の密度)で無次元化されている．式(1)を用いると

$$\langle\bar{p}_t\rangle=\langle\bar{p}\rangle+\alpha\langle\bar{u}\rangle^2/2 \qquad (3)$$

ディフューザ入口と出口における $\langle\bar{p}_t\rangle$ の差を $\Delta\langle\bar{p}_t\rangle$ で表し全圧損失とよぶことにする．この $\Delta\langle\bar{p}_t\rangle$ には抵抗体通過による圧力損失，壁面摩擦による損失や乱流エネルギ散逸による損失などが含まれる．

さて，ディフューザ効率 η として実際の圧力回復とポテンシャル流れを仮想したときの圧力回復の比を考える．本報ではディフューザ入口における流速分布は一様であると仮定する．ディフューザの出口，入口の面積比を m とすると，η は前述の $\Delta\langle\bar{p}_t\rangle$ と α を用いて

$$\eta=\frac{(m^2-\alpha_2)-2m^2\Delta\langle\bar{p}_t\rangle}{m^2-1} \qquad (4)$$

のように表される．ここに α_2 はディフューザ出口における運動エネルギ係数である．

3. 数値シミュレーションの条件

計算の対象とする流れ場を図1に，その空間分割方法を図2に示す．本報ではディフューザの片側拡がり角が $\theta=15°$，面積比が $m=(D_1/D_0)^2=4$，レイノルズ数が

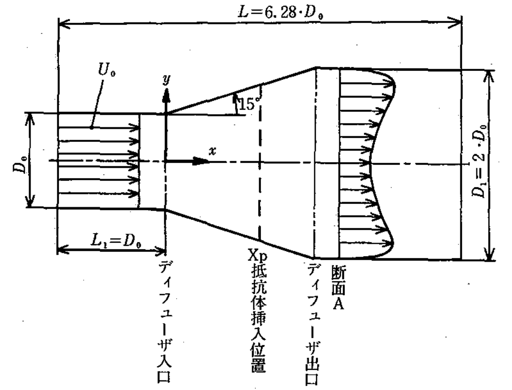


図1　計算対象の流れ場

* 東京大学生産技術研究所　第2部

研　究　速　報

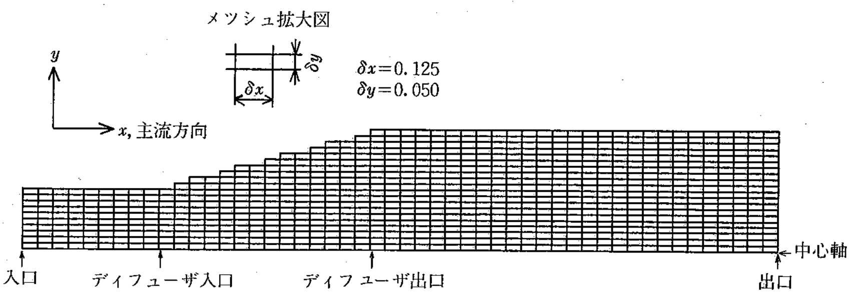


図2　流れ場の空間分割

表1　k-ε モデル乱流計算における数値定数

C_D	C_1	C_2	σ_1	σ_2
0.09	1.59	0.18	1.0	1.3

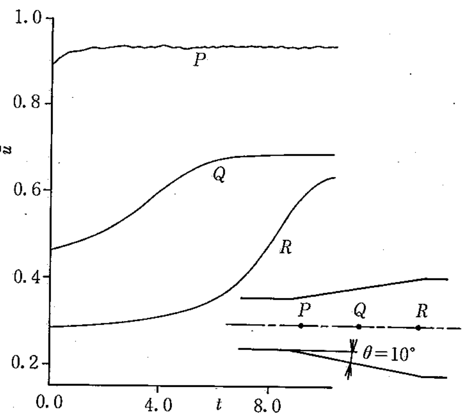


図3　定常状態への変化過程

表2　数値実験における K と x_p の組合せ

K ＼ xp	0.75	1.15	1.25	1.38	1.63
0.75	○			○	○
1.16	○	○			
1.19			○		
1.44	○	○		○	○
1.70					○
2.00	○			○	○
3.00	○			○	○
3.46	○	○			
4.00				○	
5.00					○
8.16	○				
11.66	○				

$R_e=10^5$ の場合に限定する．

乱流計算法としては k-ε 型二方程式乱流モデルと圧力損失のみを考慮する抵抗体モデルとを用いた差分計算法[1]を用いる．流れ場は特に乱流の場合，軸対称であるとは考え難いが，ここでは時間平均量の予測を目標としているため第1近似的に軸対称性を仮定する．差分計算における空間分割数は 50×20（$\delta x=0.125, \delta y=0.05, x, y$ は D_0 によって無次元化），時間分割は D_0/U_1 による無次元時間で 1/1000 である．境界条件はディフューザ入口では一様流入を課し k, ε の値としては発達管内乱流の実測値[4]を与え，ディフューザ出口では自由流出を与えている．ディフューザ部に相当する階段状多段管の境界条件としては壁面に垂直方向速度成分を0，壁面に平行な方向の速度成分に関して1/7乗則を考慮したスリップを与えている．k, ε の輸送方程式および渦粘性係数 ν_T の記述式における定数としては Spalding らの提唱した，いわゆる標準値[5]を用いる（表1参照）．

初期条件としては，$\bar{u}$ として管軸方向の断面積変化に応じた平均流速を，$\bar{v}$ として0を，$\bar{p}$ としてベルヌーイの定理より求まる平均圧力を用いる．また，k, ε としては入口断面における値を全領域に与える．なお，繰返し計算の収束条件は

$$\mathrm{M_{ax}}\left|\left[dif\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}+\frac{\bar{v}}{y}\right)\right]_N\right|<0.001 \qquad (5)$$

である．ここに，dif は差分式を，添字 N は繰返し計算の回数を意味する，一例として管軸付近の数点における $\bar{u}$ の計算ステップによる変化を図3に示す．

本報では抵抗体の抵抗係数 K およびその挿入位置 x_p をパラメタとして流速分布，圧力分布の時間平均値を数値実験によって求める．K と x_p の組み合わせを表2に示す．

4．ディフューザ性能に及ぼす抵抗体の効果

流速分布の一様性の尺度 α に及ぼす K, x_p の影響を

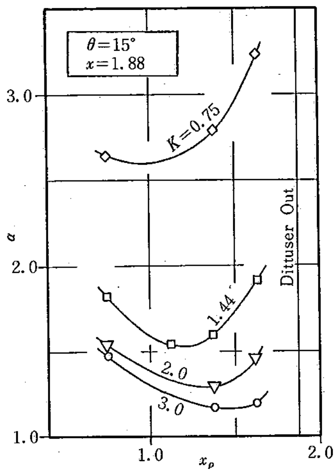
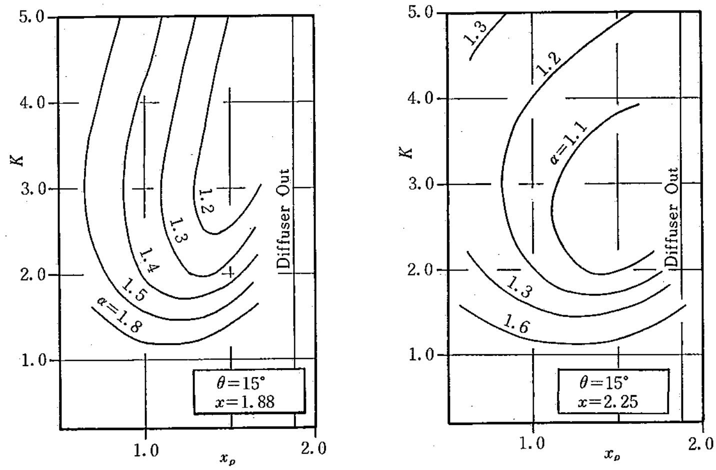


図4　運動エネルギ係数に及ぼすパラメタの影響



(a)　ディフューザ出口直後の断面 (x=1.88)　(b)　直管部における断面 (x=2.25)
図6　運動エネルギ係数の等値線図

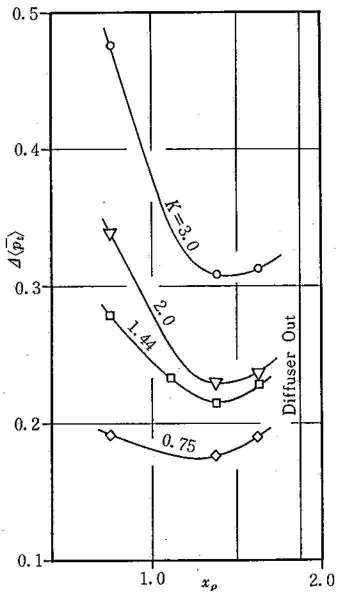


図5　全圧損失に及ぼすパラメタの影響

図4に示す．図のように K の値が 0.75～3 という比較的小さな値の場合には x_p を固定して考えれば α は K の増加とともに減少する．すなわち，抵抗体の抵抗を強くすることで流速分布の一様性が改善される．しかし，図には記載されていないが，さらに大きな K(たとえば K=8.16) を選ぶと前報[2]で実験的にも確認したように管路周辺部に高流速の領域を生じるようになり一様性は悪化する．図4において K を固定して α と x_p の関係を調べてみると，K=0.75～3 の範囲ではそれぞれの K に対して α を極小にする x_p が存在すること，その位置は K が大きくなるにつれて後方に移動することがわかる．このことは，K の値が小さい場合には整流効果が弱く，したがって x_p を大きく選ぶと抵抗体上流に発達する非一様性が出口においても残存すること，K が大きくなると十分な整流効果をもつようになり，x_pを大きく選んでも抵抗体上流の非一様性を消去することができ，逆に抵抗体下流における拡大部による非一様性の発達を押さえ得ることによって説明できる．

全圧損失 $\Delta\langle p_t\rangle$ に及ぼす K, x_p の影響を図5に示す．K の定義[1] $\Delta p = K\bar{u}^2/2$ より明らかなように K が大きくなると抵抗体前後の静圧差は大きくなる．一方，図4の K の範囲 (K=0.75～3.0) では α の値は1～3程度である．したがって $\Delta\langle p_t\rangle$ は $\Delta\langle p\rangle$ と同様の傾向もち，K の増加とともに増大する傾向にある．x_p が $\Delta\langle p_t\rangle$ に及ぼす影響は次の2つの要因に分けられよう．まず，ディフューザ内部に相当する部分では x_p が増加するにしたがって断面平均流速が減少し，抵抗体通過時の全圧損失は小さくなる．一方，x_p が増加するにつれて抵抗体上流部の非一様性が大きくなり全圧損失を増加させる要因となる．これら逆の傾向をもつ2つの要因によって $\Delta\langle\overline{p}_t\rangle$ はある x_p において極小値をもつようになる．

5.　抵抗体選定のための線図

K と x_p が $\Delta\langle\overline{p}_t\rangle$ および α に与える影響を整理し直すと抵抗体選定のための $K-x_p$ 線図が得られる．

α の等値曲線を図6に示す．図の(a)はディフューザ出口直後の断面 (x=1.88) における α の線図，(b)はそれより後流の直管部 (x=2.25) における線図である．図6(a)は，ディフューザ出口において K を 3.0～3.5, x_p を 1.4～1.5 程度に選定すると一様性の高い流速分布が

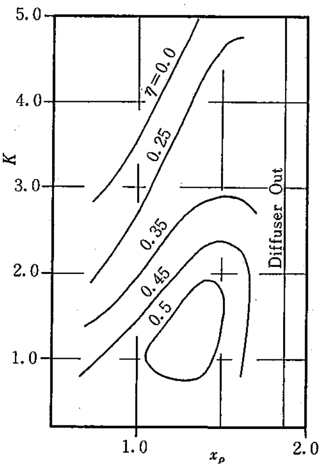


図7　ディフューザ効率の等値線図

得られることを示している．

次にディフューザ効率 η の等値曲線を図7に示す．図より，$K=1.1\sim1.2, x_p=1.2\sim1.4$ 付近で η は最大となり0.5程度の値に達することがわかる．抵抗体のない円錐ディフューザにおけるKlineらの実験[6]によれば，$\theta=15°$ の場合 η は0.4程度とされているので，適当な K, x_p の組合せの選定によりディフューザ効率の改善が期待される．

図6と図7の比較から，ディフューザ効率と流速分布の一様性という評価項目にはそれぞれ異なる最適組合せが存在すること，高い一様性を追求する組合せではディフューザ効率の改善は困難であることが知られる．

6．複数の抵抗体を用いる場合のディフューザ性能

前述のように単独の一様な抵抗体を用いる場合には高いディフューザ効率と高い流速分布一様性を同時に達成することは困難である．しかし，直管内乱流に対する複数抵抗体の整流効果に関する実験的研究[7]や前報における実験例を参考にすると，複数の抵抗体を高拡がり角ディフューザに挿入することにより高い η と高い α を同時に達成する可能性がある．抵抗体の枚数を増すと数値実験の回数が飛躍的に増大するためのパラメタの限定を行う．

まず，抵抗体は2枚とする．それぞれの抵抗係数，挿入位置を K_1, K_2, x_{p1}, x_{p2}，挿入断面における断面平均流速を $\langle\bar{u}_1\rangle, \langle\bar{u}_2\rangle$ とする．このときそれぞれの抵抗体による圧力落差の和は，

$$\Sigma\Delta\bar{p}=\{K_1\langle\bar{u}_1\rangle^2+K_2\langle\bar{u}_2\rangle^2\}/2$$

と表すことができる．さらに，$K_1=K_2=K$ および $x_{p1}=0.75$ (固定) という制限を加えると $\Sigma\Delta\bar{p}$ は K と x_{p2} から定められる．すなわち，$\Sigma\Delta\bar{p}$ を等しく保つような K と x_{p2} の組合せを選定することができる．このような条件の下に2種の K, x_{p2} の組合せに対して数値実験を行った結果を表3に示す．単独の抵抗体を用いて $\Delta\bar{p}$ を等しくなるよう K を選定した場合の例をCase 1として併記してある．表より $\Delta\bar{p}$ を等しくなるように組合わせた2枚の抵抗体を用いると，単独の場合と比較してディフューザ出口部での流速分布の一様性が向上していることがわかる．すなわち，同程度の一様性を達成するためには単独の抵抗体の場合よりも小さい $\Sigma\Delta p$ を生じる組合せでよいことになり，効率の改善が可能であることが予想される．

表3　複数抵抗体の効果

Case	$K_1(=K_2)$	X_{p1}	X_{p2}	$\Sigma\Delta\bar{p}$	$\Delta\langle\bar{p}\rangle$	α_2	η
1	1.44	0.75	――	0.187	0.279	1.816	0.354
2	1.057	0.75	1.625	0.188	0.279	1.308	0.388
3	0.976	0.75	1.375	0.185	0.276	1.308	0.393

7．ま　と　め

片側拡がり角 $\theta=15°$，拡がり面積比4の軸対称円錐ディフューザに抵抗体を挿入した場合について k-ε 型乱流モデルと単純化した抵抗体モデルを用いて数値シミュレーションを行った．主な結論は次のとおりである．

（1） 単独の抵抗体を挿入する場合，ディフューザ効率および出口部の流速分布の一様性に対して，抵抗体の抵抗係数と挿入位置の最適組合せが存在し，しかも評価項目によってその組合せは異なってくる．

（2） 抵抗体を2枚用いることにより単独抵抗体の場合に比して，一様性を悪化させることなしにディフューザ効率の向上が可能である．

本研究の数値計算は本所FACOM-M 180システムによって行われた．数値計算にあたり元大学院学生　中山亨氏，大学院学生　森西洋平氏の助力を得た．また．本研究の一部は本所選定研究費によることを付記し謝意を表する．

(1985年4月5日受理)

参　考　文　献

1) 小林・中山・石原，生産研究，36-3(1984)，170.
2) 小林・中山・佐賀，生産研究，37-2(1985)，72.
3) 小林ほか，機械学会論文集 50-465(1985)，掲載予定.
4) Laufer, J., NACA Rep.1174(1953).
5) Launder, B.E., Jones, W.P., Intern. J. Heat Mass Transfer 16- (1973), 1119.
6) Kline, S.J., et al, Trans. ASME Ser. D. 81-3(1959), 321.
7) Dryden, H.L., Schbauer, G.B., J. Aeron. Sci., 14(1947), 221.