

工学博士伊藤英覚君の「管内流れ特に曲り管内の流れに 関する流体力学的研究」に対する授賞審査要旨

静止直管内の流体の流れに関してはハーゲン、ポアゼイユ以来多数の研究があり、プラントルその他による近代流体力学の創設とともに流体力学的諸法則は十分明らかにされたが、曲り管、回転管等の流れに関しては広範囲にわたる流体力学的重要性にもかかわらず、古い水力学的研究を散見するのみであった。この分野における伊藤英覚君の研究は著明なものであり、独創性のある流体力学的理論と精密にして広範な実験によって、曲り管および回転直管の管摩擦抵抗法則、ベンドの損失公式等工學上有用な法則または実験式を多数寄与し、その研究成果は學界および工業界で世界的に広く使用されている。伊藤君の研究は内外の数多くの論文に引用されており、特に世界的に有名な単行本の流体力學的専門書には数多く引用されている。以下伊藤君の寄与した管内流れ特に曲り管内の流れに関する論文の内容を大別して項目的に略述する。

一、研究内容

(一) 曲り管内乱流の管摩擦抵抗法則の解明

伊藤君は流体力學特に管内流に関する数多くの研究成果を挙げているが、その一環として曲り管内乱流の管摩擦抵抗法則を解明した。曲り管内の流れでは流路の湾曲による遠心力が流体各部に作用し、管内にはいわゆる二次流（二

重渦)を生じ直管とは全く相違した流動となるが、その詳細は特に乱流において不明であった。伊藤君は乱流では強い二次流は管壁に接した粘性の働く薄い層すなわち境界層内に限定され、これに対し管の中心部分は微弱な二次流を伴った非粘性の流れと見做し得ることに着目し、境界層の運動量方程式を積分する理論解析により、曲り管と直管の管摩擦係数比は無次元特性数 Re (a/R)² (ここに Re はレイノルズ数、 a は曲り管の内半径、 R は中心軸の曲率半径) の関数となることを理論的に導いた(論文6、本文末尾の論文番号による。以下同様)。ついで広範な実験により理論の正当性を立証し、実験と良く一致する管摩擦公式を導いた。さらに曲り管の臨界レイノルズ数が直管に比較し著しく増加する現象に着目し、曲り管の臨界レイノルズ数を与える実験式を得た(論文11)。本研究は発表後直ちに米国 Seban 教授(四一一一)、本文末尾の引用文献番号による。以下同様)、英国 Rogers 教授(四一一一)、独逸 Schmidt 博士(四一一三)等により追試が行われ、伊藤君の管摩擦公式および臨界レイノルズ数公式は広範囲の半径比にわたって十分な精度を有することが確認され、よって国際的に高い評価を受けた。

前記管摩擦公式および臨界レイノルズ数公式は海外の多数の専門書(四一一一ないし四一一六、四一一一三)に掲載され、曲り管の熱伝達、物質分散、気液混相流、流体制御等関連する多数の研究(四一一一ないし四一一二九)の端緒となったが、特に専門書のあるもの(四一一七)は前記無次元特性数を英国 Dean 教授(一九二七)が見出した曲り管内層流の特性数である Dean 数と対応させ、Itô number と命名している。なお論文11は原子炉用熱交換器(四一一四、四一一二五)、化学反応装置(四一一五)、航空機ダクト等の曲り管の工学的設計に海外でも広く使用されている。

(二) 曲り管内の層流の解明

曲り管内の層流では Dean 数の小さい場合に、基礎式であるナビエ・ストークス方程式を摂動法で解いた前記 Dean (一九二七) の理論が著名であるが、伊藤君は同様の解析を楕円形および長方形断面の曲り管に拡張した(論文5)。つぎに円形断面曲り管の Dean 数の高い場合について、伊藤君は境界層内外を結ぶ二次流の連続条件を微分方程式で導入することにより、境界層の外縁速度を境界層の諸量と同時に求める精密な解法を考案し管摩擦係数の理論式を求め、実験と非常に良く一致することを示した(論文20)。物体まわりの境界層を解析するには外縁速度分布を予め設定する必要があり、この意味で曲り管の境界層の解法が物体まわりの境界層の解法とは手法を異にすることを示したのも、斬新なものといえる。諸外国ではロケットエンジン用冷却器、化学反応装置、血管内の流れ等への応用のため、曲り管内の層流に関しナビエ・ストークス方程式の数値解法が近時盛んであるが、この方法では高い Dean 数領域は不正確(四―二―三四ないし四―二―三八)となる。依って伊藤君の管摩擦係数式は諸家により上記領域の基準値を与えるものと考えられている(四―二―三七ないし四―二―三九)。一方、論文11では広い Dean 数範囲に適用出来る管摩擦係数の実験式を得、該当箇所は和文でのみ発表されたが、外国単行本(四―一―五)にも掲載されて、広く使用されている。また論文20では三六〇度ベンド流量計の流量係数式を求めているが、ベンド流量計の近代流体力学的理論は伊藤君が最初といえる。

(三) ベンドの損失係数の解明

伊藤君は前記曲り管の管摩擦抵抗法則の解明と前後して、曲り管の上流および下流に直管を接続したベンドの損失

係数の解明を多年にわたり行ったが、その成果は同様に高い評価を受けている。すなわちベンドに関する水力学的研究は従来多数散見されたが、損失係数は諸家により著しく相違しその理由は不明であった。これに対し伊藤君はまず流れがはく離しない程度に半径比の大きいベンドでは、損失係数は前記特性数を含めた二個の無次元特性数の関数となることを理論的に導き（論文6、9）、転向角一八〇度のベンド（論文8）および各種転向角のベンド多数について損失係数を実験的に求め、よって理論の正当性を立証し、半径比の大きいベンドの損失公式を得た（論文9）。また特に高いレイノルズ数に対しても新たに特性数を導入、損失公式を導いた（論文10）。これらは伊藤君の初期の研究であるが、独逸の碩学 Pfleiderer 教授は当時既にこの成果に注目していた（四一一八）。つぎに流体を輸送する管路には半径比の小さいベンドが用いられる場合が多い。伊藤君は精密工作ベンド多数についての実験により、湾曲流の影響は管内径の約五〇倍下流まで及び、しかもベンド下流に生ずる損失は看過出来ぬ大きさに達することを定量的に解明した。よってベンドの損失係数に下流に生ずる損失を考慮に入れた物理的に厳密な定義を導入し、半径比の小さいベンドの損失係数は、前記半径比の大きいベンドの損失係数に半径比および転向角によって定まるある定数を乗じたものとなることを示し、広範囲の半径比に適用される非常に正確なベンドの損失公式を求めた。同時に従来ベンドの損失係数が諸家により一致しなかった主な理由はベンドによる下流側の攪乱を無視したためであること、したがって十分下流までその損失を考慮に入れた諸家の実験値は前記公式と良く一致することを示した（論文12）。ベンド下流に生ずる損失の重要性は論文12により広く認識され、今日ではベンドの損失係数に厳密な物理的意味を有する伊藤君の定義および損失係数値が世界的に広く採用されている（四一一九ないし四一一二、四一一二九、四一一二

四四、四一一―四五）ばかりでなく、従来ベンダの損失係数はレイノルズ数に無関係と見なされていたに反し、公式の $\zeta \propto Re^{-0.17}$ （ここには損失係数）の關係は伊藤君が実験を行わなかつた 10° を越える高いレイノルズ数でも成立することが英國 B.H.R.A. で確認され、「レイノルズ数補正項」と稱し円形以外の断面形状のベンダに対しても使用されている（四一一―一〇）。一方、論文12と同様の結果は正方形断面のベンダに対しても成立することが英國 Smith 博士（四一一―一、四一二―四四）により確認され、単独ベンダの損失係数の解明は今や満足すべき状態になつたと考えられる。論文12は多数の関連研究（四一二―二六ないし四一二―二九、四一二―四〇ないし四一二―四四）および工学的設計資料に使用され、また固氣・固液混相流研究においてベンダの基本的損失係数式として重要な役割を果し、混相流研究に大きく貢献（四一二―四五、四一二―五一、四一二―五二）した。論文11、12の結果は総合論文13にまとめてある。

實際の管路ではベンダが隣り合つて設置される場合が多い。伊藤君は主として二個のベンダが平面的あるいは立体的各種幾何形状に配置された場合について損失係数を求め、ベンダ間の距離が管内径の約三〇倍以内では干渉の影響が生ずることを示し、新たに干渉係数を導入して結果を整理した（論文14）。論文14は和文で発表されたが唯一の干渉係数の基準値として重用され、その数値は海外の専門書（例えば四一一―一〇）にも掲載されている。また伊藤君の導入した干渉係数はレイノルズ数にほぼ無関係で使用が容易なため、今日ではベンダ以外の各種管路抵抗体に対しても使用（四一一―一〇）されている。

（四）ベンダおよびエルボの性能向上への寄与

曲り流路内を流体が流れるときは損失が大きいのが普通であるが、壁面上の圧力分布を好適に選ばれば良好な曲り流路が得られるとの考えから、伊藤君は二次元ポテンシャル流れの理論を用い、各種曲り流路の形状とその特性を調べた(論文7、15、16)。つぎに偏流板の効果を検討し、円形断面のベンダの損失係数を可及的に小ならしめる偏流板の好適位置および偏流板が有効なベンダの半径比を実験により解明した(論文17)。従来長方形断面のベンダに対する断片的資料は存在したが、円形断面のベンダについての組織的研究は伊藤君が最初であり、その結果は広く実用に供されている。つぎに一般配管用ねじ込形エルボの損失係数は従来特に大きい欠点があったが、伊藤君はその形状を流体力学的に改良し、損失係数の著しく小さいねじ込形エルボを試作し(論文18)海外にも引用されている(四一—一〇、四二—四六)。

(四)回転管内の流れの解明

直管が管軸に垂直な軸のまわりに回転すると、内部を流れる流体はコリオリ力の作用による二次流を生じ、曲り管に極めて類似した流動となる。伊藤君は流れ場を強い二次流の生ずる境界層と微弱な二次流を伴った非粘性の主流に分け、論文20と同様な方法で管内の層流を理論的に解明し、一方、精密かつ広範な実験により理論と実験が良く一致することを示し、回転直管の管摩擦抵抗法則を層流および乱流の両者に対して確立し、あわせて臨界レイノルズ数の実験式を得た(論文21)。この結果はガスタービン翼、発電機冷却流路等の摩擦損失をはじめヘリコプター用回転流路、半径流型羽根車内の二次流損失の解明等(四二—四八、四二—四九)に重要な貢献をなすものであり、米国機械学会より一九七一年度 Moody 賞を受賞している。つぎに発電機、電動機等の冷却流路には曲り管も使用される(四

一二二〇、四二二二四)が、論文22では層流の場合について流れ方向と曲り流の回転方向が逆であればコリオリ力の作用により二次流の向きが逆転することを理論的に示し、逆転時の二次流の状況を初めて解明した。

(丙)各種直管内層流の理論的解明

レーリー卿はナビエ・ストークス方程式の慣性項を無視し得る流れではエネルギーの逸散が最小となることを示したが、伊藤君はこの関係を用いると各種非円形断面直管内の層流等において比較的容易に近似解もしくは厳密解が得られることを示した(論文3、4)。同様の解法は英国では伊藤君より三年後れ一九五四年に、米国では一九五九年に至りようやく発表されている。論文1では円すい管内の層流を解析、論文2ではラプラス変換を用いて各種圧力勾配下の円管内非定常層流を解析したが、その結果は定常層流とは全く相違するものであり、外国単行本(四一一一一)にも引用されている。

(丁)分岐合流管の損失係数の解明

分岐合流管内の流れは曲り流れを基幹とした複雑な流動であるが、伊藤君はすべての流れ方向を考慮に入れた分岐合流管の完全特性表示を世界で最も早い時期に提唱、また損失係数は流量比の二次式で表わされることを示し(論文19)、各流れ方向に対し内壁の曲率の影響を考慮に入れた損失公式を導いた(論文19、23)。この結果はスラリ輸送、タンカー荷役等に広く使用され、著明である。

以上要するに伊藤君の管内流れ特に曲り管内の流れに関する研究業績は、水力学の一分野に他にさきがけて流体力学的方法を導入し、幅広い新生面を開拓したもので、機械工学、航空工学、土木工学、化学工学、原子力工学等にお

ける流体力学とその応用面に顕著なる貢献をしたものと認められる。

二、受賞

論文11（和文）に対し日本機械学会より昭和三五年四月一日日本機械学会賞

論文21（英文）に対し The Fluids Engineering Division, the American Society of Mechanical Engineers からの
昭和四七年三月二十九日 The Lewis F. Moody Award

三、主要な著書および論文目録

(一) 該当論文（左記番号は前記文中の引用文献番号に該当する）

- (1) 伊藤英覚 拡大及び収縮円錐管内の層流の理論 東北大学高速力学研究所報告 第三卷（一九五〇）第二七
号 六五—七六頁。
- (2) 伊藤英覚 圧力勾配が非定常の円管内層流の理論 東北大学高速力学研究所報告 第三卷（一九五〇）第二
九号 九五—一一頁。

H. Ito: Theory of Laminar Flow through a Pipe with Non-Steady Pressure Gradients, Rep. Inst.
High Speed Mech., Tohoku Univ., Vol. 3 (1953), No. 30, pp. 163-180.

- (3) 伊藤英覚 粘性流体の一基礎式について 東北大学高速力学研究所報告 第四卷（一九五一）第三四号 八
七—九四頁。

(4) 伊藤英覚 直管及び曲管内の層流理論 東北大学高速力学研究所報告 第四卷（一九五一）第三五号 九五

- ⑤H. Ito: Theory on Laminar Flows through Curved Pipes of Elliptic and Rectangular Cross-Sections, Rep. Inst. High Speed Mech., Tohoku Univ., Vol. 1 (1951), No. 1, pp. 191-206.
- 伊藤英覚 楕円及び矩形断面曲管内の層流理論 東北大学高速力学研究所報告 第一一卷(一九五五)第一〇六号 九七一—一二〇頁。
- ⑥伊藤英覚 曲り管の乱流水頭損失について(第一報) 東北大学高速力学研究所報告 第七卷(一九五二)第六号 六三一—七六頁。
- ⑦伊藤英覚 曲り管の流れに関する理論的ならびに実験的研究Ⅲ(一般形状の肘及び曲り管流の二次元理論) 東北大学高速力学研究所報告 第一〇卷(一九五三)第九二号 一七一—四二頁。
- ⑧伊藤英覚 曲管の流れに関する理論的ならびに実験的研究Ⅳ(一八〇度曲管の流れについて) 東北大学高速力学研究所報告 第一一卷(一九五五)第一〇九号 一七一—一九〇頁。
- ⑨伊藤英覚 曲り管の流れに関する理論的並びに実験的研究Ⅴ(再び曲管の乱流水頭損失について) 東北大学高速力学研究所報告 第二二卷(一九五五)第一一二号 二七一—六四頁。
- H. Ito: On the Pressure Losses for Turbulent Flow in Smooth Pipe Bends, Rep. Inst. High Speed Mech., Tohoku Univ., Vol. 6 (1956), No. 54, pp. 55-102.
- ⑩H. Ito: On the Pressure Losses for Turbulent Flow in Smooth Pipe Bends (Report 2), Rep. Inst.

High Speed Mech., Tohoku Univ., Vol. 7 (1956), No. 68, pp. 149-174.

伊藤英覚 曲管の流れに関する理論的並びに実験的研究VI (三度び滑らかな曲管の乱流水頭損失について)
東北大学高速力学研究所報告 第三卷(一九五七) 第二四号 三九一六二頁。

(11)伊藤英覚 曲管の流れに関する理論的並びに実験的研究VII (乱れた曲り流れの管摩擦係数) 東北大学高速
力学研究所報告 第一四卷(一九五八/一九五九) 第一三七号 一三七一一七二頁。

H. Ito: Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes, J. Basic Engng., Trans. ASME, Ser.
D, Vol. 81 (1959), No. 2, pp. 123-134.

(12)伊藤英覚 曲管の流れに関する理論的並びに実験的研究VIII (半径比の小さい曲管の損失) 東北大学高速力
学研究所報告 第一五卷(一九五九/一九六〇) 第一四一号 一一三五頁。

H. Ito: Pressure Losses in Smooth Pipe Bends, J. Basic Engng., Trans. ASME, Ser. D, Vol. 82
(1960), No. 1, pp. 131-143.

(13)伊藤英覚 曲管内の流れとその損失 日本機械学会誌 第六二卷(一九五九) 第四九〇号 一六三四一
六四三頁。

(14)伊藤英覚 曲管の流れに関する理論的並びに実験的研究IX (二重屈折における曲管の損失) 東北大学高速
力学研究所報告 第一五卷(一九五九/一九六〇) 第一四二号 三七一六一頁。

(15)伊藤英覚 曲管の性能向上に関する研究/I (各種形状の曲管内の二次元ポテンシャル流れ) 東北大学高

速力学研究所報告 第一六卷 (一九六〇—一九六一) 第一五六号 一一九—一四〇頁。

(16) 伊藤英寛 曲管の性能向上に関する研究Ⅱ (再び各種曲管内の二次元ポテンシャル流れについて) 東北
大学高速力学研究所報告 第一七卷 (一九六一—一九六二) 第一六五号 八七一—〇九頁。

(17) H. Ito and K. Imai: Pressure Losses in Vaned Elbows of a Circular Cross Section, *J. Basic Engng.*,
Trans. ASME, Ser. D, Vol. 88 (1966), No. 3, pp. 684-685, (Technical Briefs).

伊藤英寛・今井清 曲管の性能向上に関する研究Ⅲ (偏流板の効果) 東北大学高速力学研究所報告 第
二三卷 (一九六七—一九六八) 第二二五号 六七—八四頁。

H. Ito and K. Imai: Pressure Losses in Vaned Elbows of a Circular Cross Section, *Rep. Inst. High
Speed Mech., Tohoku Univ., Vol. 19 (1967/1968), No. 185, pp. 71-91.*

(18) 伊藤英寛・今井清 圧力損失のわずかなねじ込形管継手 東北大学高速力学研究所報告 第二三卷 (一九六
六—一九六七) 第二二四号 六三—九九頁。

H. Ito and K. Imai: Efficient Screwed Fittings of a Special Design, *Rep. Inst. High Speed Mech.*,
Tohoku Univ., Vol. 18 (1966/1967), No. 174, pp. 67-102.

(19) 伊藤英寛 分岐・合流損失の理論および損失公式 分岐・合流管における流れの静特性研究分科会研究成果
報告書 日本機械学会 一九六八 一四五一—一八八頁。

(20) H. Ito: Laminar Flow in Curved Pipes, *Z. angew. Math. Mech.*, Bd. 49 (1969), Heft 11, S. 653-663.

伊藤英寛 曲管内層流の管摩擦抵抗の理論 東北大学高速力学研究所報告 第二六卷(一九七〇) 第二七〇号 一五七一—一八二頁。

[23] H. Itō and K. Nanbu: Flow in Rotating Straight Pipes of Circular Cross Section, *J. Basic Engng.*, *Trans. ASME, Ser. D, Vol. 93* (1971), No. 3, pp. 383-394.

伊藤英寛・南部健一 回転する直管内の流れに関する理論的および実験的研究 東北大学高速力学研究所報告 第三二卷(一九七三) 第三一八号 五五一—一〇五頁。

[22] 伊藤英寛・甕聡樹 回転する曲管内の層流理論(第一報 回転速度および半径比の小さい場合) 東北大学高速力学研究所報告 第三二卷(一九七二) 第三〇九号 一三一—四八頁。

H. Itō and T. Motai: Secondary Flow in a Rotating Curved Pipe, *Rep. Inst. High Speed Mech.*, *Tohoku Univ.*, Vol. 29 (1974), No. 270, pp. 33-57.

[21] H. Itō and K. Imai: Energy Losses at 90° Pipe Junctions, *J. Hyd. Div., Proc. ASCE, Vol. 99* (1973), No. HY9, pp. 1353-1368.

伊藤英寛・今井清 直角分岐・合流管のエネルギー損失の完全特性 東北大学高速力学研究所報告 第三四卷(一九七四) 第三三五号 一六三一—二〇三頁。

(2)その他の論文(一六論文中七論文のみ挙げる)

[24] 伊藤英寛 圧力勾配ある層流境界層 日本機械学会論文集 第一四卷(一九四八) 第四六号 二〇〇—二一

〇三頁。

(25) 伊藤英覚 境界層理論における曲率の影響 東北大学高速力学研究所報告 第三卷(一九五〇) 第二八号
七七一—九三頁。

(26) 沼知福三郎・伊藤英覚・川島乙彦 適列翼型の境界層とその剝離に関する考察 東北大学高速力学研究所報告 第八卷(一九五二) 第七八号 九一—一〇六頁。

(27) H. Ito: Laminar Boundary Layer with Large Temperature Difference, Rep. Inst. High Speed Mech., Tohoku Univ., Vol. 3 (1953), No. 24, pp. 23-49.

伊藤英覚 温度差の大なる層流境界層 東北大学高速力学研究所報告 第一一卷(一九五五) 第一〇七号
一一一—一四五頁。

(28) H. Ito: An Approximate Method of Solution of the Compressible Laminar Boundary Layer with Heat Transfer, Rep. Inst. High Speed Mech., Tohoku Univ., Vol. 4 (1954), No. 32, pp. 11-35.

伊藤英覚 熱伝達及び圧縮性のある層流境界層の一近似解法 東北大学高速力学研究所報告 第一一卷(一九五五) 第一〇八号 一四七—一六九頁。

(29) 伊藤英覚 流体工学における二次流れの問題 日本機械学会誌 第六六卷(一九六三) 第五三七号 一三六八—一三七五頁。

(30) 伊藤英覚 回転円板の摩擦抵抗公式 東北大学高速力学研究所報告 第一九卷(一九六三/一九六四) 第

一八五号 八三一―一一頁。

その他 九篇

(目録書(分担執筆))

(1) 水力機械工学便覧編集委員会編 水力機械工学便覧 基礎篇第三章第三節 高次元の流れ コロナ社 一九五七 六七―八九頁。

(2) 日本機械学会編 機械工学便覧 改訂第五版 第八篇第一章第二節 静水力学 同第三節 動水力学一般 日本機械学会 一九六六 四―一一頁。

(3) 沼知福三郎・本間仁監修 水工学便覧 基礎篇第二章 一樣な流れの中の物体の抵抗 森北出版 一九六六 一三四―一四一頁。

(4) 水力機械工学便覧編集委員会編 改訂水力機械工学便覧 基礎篇第三章第二節 高次元の流れ コロナ社 一九六八 四一―六二頁。

(5) 齊藤清一編 スーパーキャビテーション 第二章第一節第三項 スーパーキャビテーションの始まる点 同第二節第一項 空どうならびに後流の境界、内部の圧力および気液状況 菜根出版 一九七二 一四―二三頁。

四、引用文献

伊藤君の業績は左記の単行本及び學術雜誌の文献に引用されている。

四一、単行本 (左記著者の前記文中の引用文献著者の姓初字を)

- 四一—一— W. M. Rohsenow and H. Y. Choi: Heat, Mass, and Momentum Transfer, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1961, p. 61.
- 四一—一— W. M. Kays: Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York, 1966, p. 76.
- 四一—一— H. Schlichting: Grenzschicht-Theorie, 5 Aufl., G. Braun, Karlsruhe, 1965, S. 583.
- 四一—一— H. Schlichting (Translated by J. Kestin): Boundary Layer Theory, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1960, p. 530; Ditto, 6th ed., 1968, p. 590.
- 四一—一— W. M. Rohsenow and J. P. Hartnett: Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1973, pp. 7-149-7-150.
- 四一—一— H. Richter: Rohrhydraulik, 4 Aufl., Springer, Berlin, 1962, S. 183, 190, 194; Ditto, 5 Aufl., 1971, S. 206, 214, 217.
- 四一—一— J. M. Kirshner: Fluid Amplifiers, McGraw-Hill, New York, 1966, p. 116, 118.
- 四一—一— C. Pfeleiderer: Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase, 5 Aufl., Springer, Berlin, 1961, S. 74-75.
- 四一—一— J. K. Vennard: Elementary Fluid Mechanics, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1961, pp. 317-318.

- 图—|—| O D.S. Miller: Internal Flow—A Guide to Losses in Pipe and Duct Systems, The British Hydromechanics Research Association, Cranfield, England, 1971, p. 71, 156-157, 160-161, 191-192, 265, 275.
- 图—|—| | A.J.W. Smith: Pressure Losses in Ducted Flows, Butterworths, London, 1971, pp. 33-37, 58-59.
- 图—|—| | | L. Rosenhead: Laminar Boundary Layers, Clarendon, Oxford, 1963, pp. 389-390.
- 图—|—| | | | A.J. Reynolds: Turbulent Flows in Engineering, John Wiley & Sons, New York, 1974, pp. 220-221.
- 图—|—| | 管中湍流 (日本国科学出版社) (日本国科学出版社)
- 图—|—| | R.A. Seban and E.F. McLaughlin: Heat Transfer in Tube Coils with Laminar and Turbulent Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 6 (1963), pp. 387-395.
- 图—|—| | G.F.C. Rogers and Y.R. Mayhew: Heat Transfer and Pressure Loss in Helically Coiled Tubes with Turbulent Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 7 (1964), pp. 1207-1216.
- 图—|—| | | E.F. Schmidt: Wärmeübergang und nicht-isothermer Druckverlust bei erzwungener Strömung in schraubenförmig gekrümmten Rohren, Dissertation, T.H. Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1966, S. 1-100.

- 四—1—四 P.V. Gill: Der Reibungsbeiwert von Einphasen-Strömungen in eben und räumlich gekrümmten Röhren, *Österr. Ing. Z.*, Bd. 7 (1964), S. 361-370.
- 四—1—四 J.A. Koutsky and R.J. Adler: Minimization of Axial Dispersion by Use of Secondary Flow in Helical Tubes, *Canad. J. Chem. Engng.*, Vol. 42 (1964), pp. 239-246.
- 四—1—六 Y. Mori and W. Nakayama: Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes (1st Report, Laminar Region), *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8 (1965), pp. 67-82.
- 四—1—七 V. Kubair and N.R. Kuloor: Heat Transfer to Newtonian Fluids in Coiled Pipes in Laminar Flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9 (1966), pp. 63-75.
- 四—1—八 Y. Mori and K. Futagami, S. Tokuda and M. Nakamura: Forced Convective Heat Transfer in Uniformly Heated Horizontal Tubes, 1st Report—Experimental Study on the Effect of Buoyancy, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9 (1966), pp. 453-463.
- 四—1—九 Y. Mori and W. Nakayama: Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes (2nd Report, Turbulent Region), *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 10 (1967), pp. 37-59.
- 四—1—10 Y. Mori and W. Nakayama: Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes (3rd Report, Theoretical Analysis Under the Condition of Uniform Wall Temperature and Practical Formulae), *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 10 (1967), pp. 681-695.

- 国-1-1 Y. Mori and W. Nakayama : Forced Convective Heat Transfer in a Straight Pipe Rotating Around a Parallel Axis (1st Report, Laminar Region), Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 10 (1967), pp. 1179-1194.
- 国-1-1 Y. Mori and K. Futagami : Forced Convective Heat Transfer in Uniformly Heated Horizontal Tubes (2nd Report, Theoretical Study), Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 10 (1967), pp. 1801-1813.
- 国-1-1 M.J. Tunstall and J.K. Harvey : On the Effect of a Sharp Bend in a Fully Developed Turbulent Pipe-Flow, J. Fluid Mech., Vol. 34 (1968), pp. 595-608.
- 国-1-1 A. Owahdi, K.J. Bell and B. Crain, Jr. : Forced Convection Boiling Inside Helically-Coiled Tubes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 11 (1968), pp. 1779-1793.
- 国-1-1 H. Krüger : Berechnung von Druckverlusten in Rohrkrümmern, Maschinenbautechnik, Bd. 19 (1970), S. 147-152.
- 国-1-1 P.S. Srinivasan, S.S. Nandapurkar and F.A. Holland : Friction Factors for Coils, Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 48 (1970), T156-T161.
- 国-1-1 M. Rowe : Measurements and Computations of Flow in Pipe Bends, J. Fluid Mech., Vol. 43 (1970), pp. 771-783.

- |—|< S. Rajasekharan, V.G. Kubair and N.R. Kulloor: Heat Transfer to Non-Newtonian Fluids in Coiled Pipes in Laminar Flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 13 (1970), pp. 1583-1594.
- |—|< D.A. White and J.A. Bond: A Low Shear Rate Turbulent Flow Apparatus, *Appl. Sci. Res.*, Vol. 23 (1971), pp. 368-372.
- |—|○ H. Miyazaki: Combined Free and Forced Convective Heat Transfer and Fluid Flow in a Rotating Curved Circular Tube, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14 (1971), pp. 1295-1309.
- |—| | | Y. Mori, Y. Uchida and T. Ukon: Forced Convective Heat Transfer in a Curved Channel With a Square Cross Section, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14 (1971), pp. 1787-1805.
- |—| | | | M. Akiyama and K.C. Cheng: Laminar Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes With Uniform Wall Temperature, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15 (1972), pp. 1426-1431.
- |—| | | | | I.G. Gorlov and A.I. Raev: Features of Hydrodynamics and Heat Exchange during the Flow of Liquids in Helically-Coiled Tubes, *Heat Transfer—Soviet Research*, Vol. 4 (1972), pp. 80-88.
- |—| | | | □ H. Miyazaki: Combined Free-and Forced-Convective Heat Transfer and Fluid Flow in Rotating Curved Rectangular Tubes, *J. Heat Transfer*, *Trans. ASME, Ser. C*, Vol. 95 (1973), pp. 64-71.
- |—| | | | □ A. Hunsbedt and J.M. Roberts: Thermal-Hydraulic Performance of a 2MWt Sodium-Heated, Forced Recirculation Steam Generator Model, *J. Engng. for Power*, *Trans. ASME, Ser. A*, Vol. 96

(1974), pp. 66-76.

- |-|-|K G.W. Hall: Application of Boundary Layer Theory to Explain Some Nozzle and Venturi Flow Peculiarities (Author's Reply), Proc. Instrn. Mech. Engrs., Vol. 173 (1959), pp. 837-870.
- |-|-|Y G.R. Guinn: A Review of Governing Processes and Liquid Cavitation Phenomena for Flow in Curved Ducts, Research Laboratories, Brown Engng. Co., TN R-119 (1964), pp. 1-79.
- |-|-|< K.J. Zanker and T.E. Brock: A Review of the Literature on Fluid Flow Through Closed Conduit Bends, B.H.R.A. Report TN 901 (1967), pp. 1-37.
- |-|-|R C.S. Lee: Strömungswiderstände in 90°-Rohrkümmern, Gesundheits-Ingenieur, Jr. 89 (1968), S. 341-344; 367-376; Jr. 90 (1969), S. 20-27.
- |-|-|O R.H. Norris, F.F. Buckland and N.D. Fitzroy: Data Books—Heat Transfer and Fluid Flow, General Electric Co., Schenectady, New York, 1969, Section 403.1, p. 3.
- |-|-|I E.R.G. Eckert, J.P. Hartnett and E.M. Sparrow: Heat Transfer Bibliography, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 2 (1961), pp. 163-172.
- |-|-|I E. Becker: Beitrag zur Berechnung von Sekundärströmungen, Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Nr. 13 (1956), S. 1-85.
- |-|-|I R.J. Nunge and L.R. Adams: Reverse Osmosis in Laminar Flow Through Curved Tubes,

- Desalination, Vol. 13 (1973), pp. 17-36.
- 四一—三三〇 K.C. Cheng and M. Akiyama: Laminar Forced Convection Heat Transfer in Curved Rectangular Channels, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 13 (1970), pp. 471-490.
- 四一—三三三 L.R. Austin and J.D. Seader: Fully Developed Viscous Flow in Coiled Circular Pipes, AIChE Journal, Vol. 19 (1973), pp. 85-94.
- 四一—三三六 S.V. Patankar, V.S. Prataap and D.B. Spalding: Prediction of Laminar Flow and Heat Transfer in Helically Coiled Pipes, J. Fluid Mech., Vol. 62 (1974), pp. 539-551.
- 四一—三三九 M. Akiyama and K.C. Cheng: Boundary Vorticity Method for Laminar Forced Convection Heat Transfer in Curved Pipes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 14 (1971), pp. 1659-1675.
- 四一—三四一 R.J. Nunge and T.S. Lin: Laminar Flow in Strongly Curved Tubes, AIChE Journal, Vol. 19 (1973), pp. 1280-1281.
- 四一—三四二 J.A. Bayliss: Experiments on Laminar Flow in Curved Channels of Square Section, J. Fluid Mech., Vol. 48 (1971), pp. 417-422.
- 四一—三四三 O A.J. Ede: The Effect of a Right Angled Bend on Heat Transfer in a Pipe, International Developments in Heat Transfer, Part III, ASME Publication, New York, 1961, pp. 634-642.
- 四一—三四四 S. Kamiyama: Cavitation Tests in Pipe Bends (Author's Closure), J. Basic Engng., Trans.

ASME, Ser. D, Vol. 88 (1966), pp. 252-260.

図一〇—四〇 W.A. Meehler: Factors Influencing Flow in Large Conduits (Discussion), J. Hyd. Div., Proc. ASCE, Vol. 92 (1966), pp. 203-218.

図一〇—四〇〇 D.K. Jamison: Pipe Fitting Losses in Laminar and Transitional Flow, Dissertation, Univ. of Wisconsin, 1969, pp. 1-189.

図一〇—四〇〇 A.J.W. Smith: The Flow and Pressure Losses in Smooth Pipe Bends of Constant Cross Section, J. Roy. Aero. Soc., Vol. 67 (1963), pp. 437-447.

図一〇—四〇一 T. Uematsu: Pressure Drop in the Pneumatic Conveyance of Granular Solids through a Pipe, Hydraulics and Fluid Mechanics, Proc. 1st Australasian Conference held at Univ. Western Australia, Dec. 1962, Pergamon Press, 1964, pp. 69-80.

図一〇—四〇二 S. Wolf and D.M. Gluntz: Losses in a Compact 180-Deg Return Flow Passage as a Function of Reynolds Number, J. Basic Engng., Trans. ASME, Ser. D, Vol. 92 (1970), pp. 193-194.

図一〇—四〇三 E.R.G. Eckert, E.M. Sparrow, R.J. Goldstein, C.J. Scott and W.E. Ibele: Heat Transfer Bibliography, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15 (1972), pp. 1271-1279.

図一〇—四〇四 Y. Mori, T. Fukada and W. Nakayama: Convective Heat Transfer in a Rotating Radial Circular Pipe (2nd Report), Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 14 (1971), pp. 1807-1824.

- 図一〇—四〇 R.E. Wagner and H.R. Velkoff: Measurements of Secondary Flows in a Rotating Duct, J. Engng. for Power, Trans. ASME, Ser. A, Vol. 94 (1972), pp. 261-270.
- 図一〇—四〇 T. Sarpkaya: Experimental Determination of the Critical Reynolds Number for Pulsating Poiseuille Flow, J. Basic Engng., Trans. ASME, Ser. D, Vol. 88 (1966), pp. 589-598.
- 図一〇—四一 Y. Morikawa: Druckabfall und Bewegung der Gutteilchen in Krümmern pneumatischer Förderleitungen bei kleiner Gutbeladung, Grundl. Landtechn., Bd. 16 (1966), S. 65-69.
- 図一〇—四二 Y. Morikawa und G. Segler: Druckverlust in Segment-Krümmern ohne und mit Gutbeladung, Grundl. Landtechn., Bd. 20 (1970), S. 143-148.