

JAERI-M
85-114

2ブロッククロス流れ実験・第2報
実験結果及び炉心設計への適用

1985年8月

滝塚 貴和・蕪木 英雄

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

2ブロッククロス流れ実験・第2報
実験結果及び炉心設計への適用

日本原子力研究所東海研究所高温工学部
滝塚 貴和・燕木 英雄

(1985年7月15日受理)

多目的高温ガス実験炉炉心の燃料要素接触面ギャップを通るクロス流れについて、その流動特性を定量的に把握するため、実寸大の2ブロックモデルによる実験を行った。実験では、常温、大気圧の空気を用い、クロス流れ流量と圧力差を測定した。接触面ギャップはブロック間にシムを挿入することによって模擬した。また、荷重負荷実験及び黒鉛ブロック内透過量の測定を行った。

実験結果は、クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数の関係で整理した。さらに、実験炉炉心の熱流動設計を行うのに有用なクロス流れ実験式を導いた。

JAERI-M 85-114

Two-Block Crossflow Experiments, II
Experimental Results and Application to VHTR Core Design

Takakazu TAKIAUKA and Hideo KABURAKI

Department of High Temperature Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 15, 1985)

Two-block crossflow experiments were conducted to obtain quantitative information on the characteristics of crossflow through the interface gaps between fuel elements in the VHTR core. Overall crossflow rates and pressure drops were measured on a full-scale two-block model with shims inserted to simulate the interface gap between the blocks. Atmospheric air at ambient temperature was used as a working fluid. Further objective of the experiments were to evaluate the effect of contact pressure on the crossflow and to determine the permeation flow rate through the blocks.

The experimental results were expressed by a relation between crossflow loss coefficient factor and Reynolds number. Empirical equations, which accurately reproduce the experimental crossflow coefficient correlations, were devised for the thermal hydraulic design of the VHTR core.

Keywords: VHTR, Reactor Core, Thermal Hydraulics, Fuel Element,
Crossflow, Two-Block Model, Crossflow Loss Coefficient
Factor

目 次

1. まえがき	1
2. 実験装置及び実験方法	1
2.1 実験装置	1
2.2 実験方法	2
3. 実験結果	2
3.1 クロス流れ流量と圧力差の関係	2
3.2 荷重負荷実験	3
3.3 黒鉛ブロック内透過流量の測定	3
4. クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数	3
4.1 クロス流れ抵抗係数	4
4.2 レイノルズ数	5
4.3 クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数の関係	5
5. 圧力損失係数とレイノルズ数	6
6. クロス流れ流動特性の検討	6
6.1 無次元換算レイノルズ数	7
6.2 低レイノルズ数領域	7
6.3 高レイノルズ数領域	8
6.4 クロス流れ実験式	8
7. クロス流れ抵抗係数とギャップ幅	12
8. ま と め	14
謝 辞	14
参考文献	15

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental apparatus and procedure	1
2.1 Experimental apparatus	1
2.2 Experimental procedure	2
3. Experimental Results	2
3.1 Relation between crossflow rate and pressure difference ...	2
3.2 Loading Experiment	3
3.3 Measurement of permeation flow rate through blocks	3
4. Crossflow loss coefficient factor and Reynolds number	3
4.1 Crossflow loss coefficient factor	4
4.2 Reynolds number	5
4.3 Relation between crossflow loss coefficient factor and Reynolds number	5
5. Pressure loss coefficient and Reynolds number	6
6. Crossflow coefficient correlation	6
6.1 Dimensionless reduced Reynolds number	7
6.2 Low Reynolds number region	7
6.3 High Reynolds number region	8
6.4 Empirical equation	8
7. Crossflow loss coefficient factor and gap width	12
8. Summary	14
 Acknowledgements	 14
References	15

1. まえがき

ブロック型の燃料要素で炉心が構成されている多目的高温ガス実験炉においては、積み重ねられた燃料ブロックの段間接触面に開いたギャップを通して冷却材のクロス流れが発生する。このクロス流れは、炉心における冷却材有効流量及び流量配分に著しい影響を与え、また炉心カラムの不安定現象等を誘発する可能性があるため、その流動特性を把握することが炉心設計上最も重要な課題となっている。

このため、クロス流れの流動特性を明らかにすると共に、実験炉炉心の設計に必要なデータを取得することを目的として、2ブロッククロス流れ実験装置を製作し、一連の実験を行った。実験では、作動流体として、常温、大気圧の空気を用いた。試験体は実験炉詳細設計⁽¹⁾の燃料ブロックに基づく2ブロックモデルで、種々のブロック接触面ギャップについてクロス流れの流量と圧力損失を測定した。また荷重負荷実験及び黒鉛ブロック内透過流量の測定を行った。

⁽²⁾前報では、2ブロッククロス流れ実験装置の概要及び実験条件の検討について述べた。2ブロッククロス流れ実験の主要な結果及び解析については既に報告しているが^{(3),(4)}ここではこれらについて詳述すると共に特に実験で得られたデータを実験炉の炉心熱流動設計に適用するために必要な実験結果の整理方法に関する検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

2ブロッククロス流れ実験装置全体のフローダイアグラムをFig.1に示す。本実験装置は密封試験装置の一部から成り、2ブロッククロス流れ試験部、配管系、計測系などから構成されている。各部の詳細については既に報告している⁽²⁾ので、ここでは概略の説明だけに止める。

実験には、2段に積み重ねた黒鉛(IG-11)製の模擬燃料ブロック(Fig.2)を用いた。ブロックは実験炉詳細設計⁽¹⁾の燃料ブロックに基づいており、12ピン、ピン・イン・ブロック型構造の六角柱状ブロック(平径299mm)である。但し、ブロックの高さは実寸の1/2(285mm)としている。

試験体ブロックの各冷却材流路の入口及び出口は各12本の入口及び出口流路管に接続している。各流路管には流量計が設けられており、全体流量及び各冷却材流路流量を測定することができる。試験体ブロックの周囲はシュラウドに囲まれている。シュラウドにはバイパス流路管が接続されており、ブロック外周部の圧力を調節し、またクロス流れの流量を測定できるようになっている。

試験部の上部には荷重負荷装置が設けられており、油圧を加えることにより、黒鉛ブロック接触面に最大20kNまでの荷重を負荷することができる。

1. まえがき

ブロック型の燃料要素で炉心が構成されている多目的高温ガス実験炉においては、積み重ねられた燃料ブロックの段間接触面に開いたギャップを通して冷却材のクロス流れが発生する。このクロス流れは、炉心における冷却材有効流量及び流量配分に著しい影響を与え、また炉心カラムの不安定現象等を誘発する可能性があるため、その流動特性を把握することが炉心設計上最も重要な課題となっている。

このため、クロス流れの流動特性を明らかにすると共に、実験炉炉心の設計に必要なデータを取得することを目的として、2ブロッククロス流れ実験装置を製作し、一連の実験を行った。実験では、作動流体として、常温、大気圧の空気を用いた。試験体は実験炉詳細設計⁽¹⁾の燃料ブロックに基づく2ブロックモデルで、種々のブロック接触面ギャップについてクロス流れの流量と圧力損失を測定した。また荷重負荷実験及び黒鉛ブロック内透過流量の測定を行った。

⁽²⁾前報では、2ブロッククロス流れ実験装置の概要及び実験条件の検討について述べた。2ブロッククロス流れ実験の主要な結果及び解析については既に報告しているが^{(3),(4)}ここではこれらについて詳述すると共に特に実験で得られたデータを実験炉の炉心熱流動設計に適用するために必要な実験結果の整理方法に関する検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

2ブロッククロス流れ実験装置全体のフローダイアグラムをFig.1に示す。本実験装置は密封試験装置の一部から成り、2ブロッククロス流れ試験部、配管系、計測系などから構成されている。各部の詳細については既に報告している⁽²⁾ので、ここでは概略の説明だけに止める。

実験には、2段に積み重ねた黒鉛（IG-11）製の模擬燃料ブロック（Fig.2）を用いた。ブロックは実験炉詳細設計⁽¹⁾の燃料ブロックに基づいており、12ピン、ピン・イン・ブロック型構造の六角柱状ブロック（平径299 mm）である。但し、ブロックの高さは実寸の1/2（285 mm）としている。

試験体ブロックの各冷却材流路の入口及び出口は各12本の入口及び出口流路管に接続している。各流路管には流量計が設けられており、全体流量及び各冷却材流路流量を測定することができる。試験体ブロックの周囲はシュラウドに囲まれている。シュラウドにはバイパス流路管が接続されており、ブロック外周部の圧力を調節し、またクロス流れの流量を測定できるようになっている。

試験部の上部には荷重負荷装置が設けられており、油圧を加えることにより、黒鉛ブロック接触面に最大20 kNまでの荷重を負荷することができる。

ブロウの最大流量は約 200g/s (常温, 大気圧, 空気) であり, 試験体ブロックの外周部と冷却材流路の間のクロス流れ部に加えられる圧力差は最大 25kPa である。

2.2 実験方法

試験体ブロックの外周部と冷却材流路の間の圧力差を変えて, ブロック段間接触面を漏れるクロス流れ流量を測定した。クロス流れ流量は, 流量範囲によりバイパス流路管の流量計 (4 台) を切り換えて測定した。

実験は, Fig.3 に示す 2 種類のギャップ (平行ギャップ及びくさび形ギャップ) について行った。これらのギャップは, ブロック接触面に金属製のシム (厚さ 0.05-2.0 mm) を挿入することによって設定した。

荷重負荷実験及び黒鉛ブロック内透過流量の測定では, ブロック接触面にシムを挿入せず, ブロックが正常に積み重ねられている状態で実験を行った。

3. 実験結果

3.1 クロス流れ流量と圧力差の関係

クロス流れの質量流量 M とクロス流れ部 (ブロック外周部と冷却材流路の間) の圧力差 Δp の関係を Fig.4 に示す。Fig.4(a) は平行ギャップ, Fig.4(b) はくさび形ギャップの場合である。図に示したパラメータ δ の値はブロック接触面に挿入したシムの厚さを示している。平行ギャップの場合には δ は接触面で一樣なギャップ幅に対応し, くさび形ギャップの場合には開口辺におけるギャップ幅に対応している。但し, 図中 $\delta = 0.0$ mm は, シムを挿入せず, ブロックが正常に積み重ねられている状態を示す。

これらの図から, クロス流れ流量は圧力差が増加すると共に, またギャップ幅が広くなると共に大きくなることが分かる。クロス流れ流量と圧力差の関係はギャップ幅及び流量によって異なっている。すなわち, ギャップ幅が狭く, クロス流れ流量が小さい領域では, クロス流れ流量は圧力差にほぼ比例している。一方, ギャップ幅が広く, クロス流れ流量が大きい領域では, クロス流れ流量は圧力差の $1/2$ 乗にほぼ比例している。このような流量と圧力差の関係から, クロス流れの圧力損失に対して, ギャップ幅が狭く, 流量の小さい領域では粘性力が, またギャップ幅が広く, 流量の大きい領域では慣性力が支配的であると考えられる。

Fig.4(a) と Fig.4(b) の比較から, 同じギャップ幅及び圧力差に対して, くさび形ギャップの場合のクロス流れ流量は平行ギャップの場合より小さいことが分かる。

クロス流れに与える冷却材流路主流の影響を調べるため, 主流流量が 100g/s までの範囲で実験を行ったが, 明確な影響は認められなかった。

ブロウの最大流量は約 200g/s (常温, 大気圧, 空気) であり, 試験体ブロックの外周部と冷却材流路の間のクロス流れ部に加えられる圧力差は最大 25kPa である。

2.2 実験方法

試験体ブロックの外周部と冷却材流路の間の圧力差を変えて, ブロック段間接触面を漏れるクロス流れ流量を測定した。クロス流れ流量は, 流量範囲によりバイパス流路管の流量計 (4 台) を切り換えて測定した。

実験は, Fig.3 に示す 2 種類のギャップ (平行ギャップ及びくさび形ギャップ) について行った。これらのギャップは, ブロック接触面に金属製のシム (厚さ 0.05-2.0 mm) を挿入することによって設定した。

荷重負荷実験及び黒鉛ブロック内透過流量の測定では, ブロック接触面にシムを挿入せず, ブロックが正常に積み重ねられている状態で実験を行った。

3. 実験結果

3.1 クロス流れ流量と圧力差の関係

クロス流れの質量流量 M とクロス流れ部 (ブロック外周部と冷却材流路の間) の圧力差 Δp の関係を Fig.4 に示す。Fig.4(a) は平行ギャップ, Fig.4(b) はくさび形ギャップの場合である。図に示したパラメータ δ の値はブロック接触面に挿入したシムの厚さを示している。平行ギャップの場合には δ は接触面で一樣なギャップ幅に対応し, くさび形ギャップの場合には開口辺におけるギャップ幅に対応している。但し, 図中 $\delta = 0.0$ mm は, シムを挿入せず, ブロックが正常に積み重ねられている状態を示す。

これらの図から, クロス流れ流量は圧力差が増加すると共に, またギャップ幅が広くなると共に大きくなることが分かる。クロス流れ流量と圧力差の関係はギャップ幅及び流量によって異なっている。すなわち, ギャップ幅が狭く, クロス流れ流量が小さい領域では, クロス流れ流量は圧力差にほぼ比例している。一方, ギャップ幅が広く, クロス流れ流量が大きい領域では, クロス流れ流量は圧力差の $1/2$ 乗にほぼ比例している。このような流量と圧力差の関係から, クロス流れの圧力損失に対して, ギャップ幅が狭く, 流量の小さい領域では粘性力が, またギャップ幅が広く, 流量の大きい領域では慣性力が支配的であると考えられる。

Fig.4(a) と Fig.4(b) の比較から, 同じギャップ幅及び圧力差に対して, くさび形ギャップの場合のクロス流れ流量は平行ギャップの場合より小さいことが分かる。

クロス流れに与える冷却材流路主流の影響を調べるため, 主流流量が 100g/s までの範囲で実験を行ったが, 明確な影響は認められなかった。

3.2 荷重負荷実験

接触面に加わる荷重がクロス流れに及ぼす影響を調べるため、荷重負荷装置により最大 23.2 kN までの荷重を接触面に加えて、クロス流れ流量の測定を行った。但し、この場合には、接触面にシムを挿入せず、黒鉛ブロックが正常に積み重ねられている状態で実験を行った。

Fig.5 は、負荷荷重をパラメータにとり、クロス流れ流量 M と圧力差 Δp の関係を示したものである。図中の負荷荷重の値には、荷重負荷装置による荷重 (0 - 20 kN) のほかに、上段ブロック、フランジなどの重量 (約 365 kg) を含んでいるが、流体の圧力差 (最大 25 kPa) による力は含んでいない。3.6 - 23.2 kN の荷重によって、ブロック接触面には 100 - 660 kPa の面圧が加わる。

この図から、ブロック接触面の荷重を増加するとともに、クロス流れ流量が減少する傾向が見られる。負荷荷重によるクロス流れ流量の変化は比較的小さく、荷重が最小の場合と最大の場合との間で約 10% 程度である。

3.3 黒鉛ブロック内透過流量の測定

黒鉛は多孔質であるため、接触面ギャップを漏れるクロス流れのほかに、黒鉛ブロック内部を透過する流れが生じる。接触面のギャップ幅が非常に狭い場合には、クロス流れ流量が少なくなるため、測定した全流量に対して透過流量が無視できない割合を占めるようになると考えられる。実験では、黒鉛ブロックを正常に積み重ねた状態で、接触面ギャップをコンパウンドでシールすることによって、透過流量のみを測定できるようにした。

透過流量 M_p と圧力差 Δp の関係を Fig.6 に示す。透過流量は圧力差にほぼ比例していることが分かる。

ここで、透過流量は次のように圧力差に比例するものとし

$$M_p = C \Delta p \quad (1)$$

この比例定数 C を測定結果から最小 2 乗法を用いて決定すると

$$C = 2.37 \text{ s/m} \quad (2)$$

となる。この関係式を図中破線で示す。

Fig.4 に示した結果と比較すると、ギャップ幅が 0.0 mm の場合、透過流量は全体流量の約 50% を占めていることがわかる。ギャップ幅が広くなるとともに、透過流量は相対的に減少し、0.1 mm の平行ギャップの場合には 0.5% 程度になる。

4. クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数

クロス流れの測定により、種々のギャップ条件に対して、クロス流れの質量流量 M とクロス

3.2 荷重負荷実験

接触面に加わる荷重がクロス流れに及ぼす影響を調べるため、荷重負荷装置により最大 23.2 kN までの荷重を接触面に加えて、クロス流れ流量の測定を行った。但し、この場合には、接触面にシムを挿入せず、黒鉛ブロックが正常に積み重ねられている状態で実験を行った。

Fig.5 は、負荷荷重をパラメータにとり、クロス流れ流量 M と圧力差 Δp の関係を示したものである。図中の負荷荷重の値には、荷重負荷装置による荷重 (0 - 20 kN) のほかに、上段ブロック、フランジなどの重量 (約 365 kg) を含んでいるが、流体の圧力差 (最大 25 kPa) による力は含んでいない。3.6 - 23.2 kN の荷重によって、ブロック接触面には 100 - 660 kPa の面圧が加わる。

この図から、ブロック接触面の荷重を増加するとともに、クロス流れ流量が減少する傾向が見られる。負荷荷重によるクロス流れ流量の変化は比較的小さく、荷重が最小の場合と最大の場合との間で約 10% 程度である。

3.3 黒鉛ブロック内透過流量の測定

黒鉛は多孔質であるため、接触面ギャップを漏れるクロス流れのほかに、黒鉛ブロック内部を透過する流れが生じる。接触面のギャップ幅が非常に狭い場合には、クロス流れ流量が少なくなるため、測定した全流量に対して透過流量が無視できない割合を占めるようになると考えられる。実験では、黒鉛ブロックを正常に積み重ねた状態で、接触面ギャップをコンパウンドでシールすることによって、透過流量のみを測定できるようにした。

透過流量 M_p と圧力差 Δp の関係を Fig.6 に示す。透過流量は圧力差にほぼ比例していることが分かる。

ここで、透過流量は次のように圧力差に比例するものとし

$$M_p = C \Delta p \quad (1)$$

この比例定数 C を測定結果から最小 2 乗法を用いて決定すると

$$C = 2.37 \text{ s/m} \quad (2)$$

となる。この関係式を図中破線で示す。

Fig.4 に示した結果と比較すると、ギャップ幅が 0.0 mm の場合、透過流量は全体流量の約 50% を占めていることがわかる。ギャップ幅が広くなるとともに、透過流量は相対的に減少し、0.1 mm の平行ギャップの場合には 0.5% 程度になる。

4. クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数

クロス流れの測定により、種々のギャップ条件に対して、クロス流れの質量流量 M とクロス

流れ部の圧力差 Δp の関係が求められた。この流量と圧力差の関係をより一般的な流体条件に対しても適用できるようにするため、クロス流れ抵抗係数 A とレイノルズ数 Re を用いて結果を整理する。

4.1 クロス流れ抵抗係数

クロス流れ部の圧力差 Δp は無次元の圧力損失係数 K を用いて表すことができる。圧力損失係数 K は次のように定義される。

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho U_m^2} \quad (3)$$

ここで、 ρ は流体の密度である。代表速度として、ブロック接触面外縁での流体の内向き平均速度 U_m をとるものとする。クロス流れ流量 M は

$$M = \rho U_m A \quad (4)$$

と表される。ここで、 A はブロック接触面外縁でのギャップ開口面積である。圧力損失係数はクロス流れ流量を用いて次のように書ける。

$$K = \frac{2 \rho \Delta p}{M^2} A \quad (5)$$

しかしながら、炉心内に生じるブロック接触面のギャップでは、一般に、ギャップ流路の形状及び寸法を明確に評価することが困難である。このため、ギャップ開口面積 A を含めた形で

$$A = \frac{K}{A^2} \quad (6)$$

と定義される圧力損失パラメータを用いる方が便利であり、実際に実験結果の整理及び流量配分の解析に用いられている^{(6),(7)}。この圧力損失パラメータ A はクロス流れ抵抗係数と呼ばれ、 $[m^{-4}]$ の次元を持つ。式(5)、(6)より

$$A = \frac{2 \rho \Delta p}{M^2} \quad (7)$$

となり、クロス流れ抵抗係数はギャップによらず、クロス流れ流量と圧力差で表される。

クロス流れ抵抗係数 $[m^{-4}]$ の次元を持っているため、一般には、モデルのスケールファクタの4乗で補正するか、あるいは無次元化した形で用いる必要がある。本実験では実寸大のモデルを用いているため、実験で得られたクロス流れ抵抗係数の値をそのまま実験炉炉心設計に用いることができる。

4.2 レイノルズ数

クロス流れのレイノルズ数 Re は、ギャップの等価直径 d_e 及び平均速度 U_m をそれぞれ代表長さ及び代表速度にとって、ブロック接触面外縁で次のように定義される。

$$Re = \frac{\rho U_m d_e}{\mu} \quad (8)$$

ここで、 μ は流体の粘性係数である。等価直径 d_e は、ブロック接触面外縁におけるギャップ開口面積 A とぬれ縁長さ L ($=12a$, a は接触面一辺の長さ) を用いて

$$d_e = \frac{4A}{L} \quad (9)$$

である。実験炉詳細設計(I)の燃料ブロックでは、 $L = 1.997 \text{ m}$ ($a = 0.1664 \text{ m}$) である。式(8)は、式(4), (9)を用いて

$$Re = \frac{4M}{\mu L} \quad (10)$$

となり、レイノルズ数もギャップによらない形で表される。

4.3 クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数の関係

Fig.7 は、Fig.4 に示した実験結果をクロス流れ抵抗係数とレイノルズ数の関係で整理し直したものである。

Fig.7(a)は平行ギャップの場合であり、ギャップ幅が広くなると共に、クロス流れ抵抗係数は順次減少している。また、レイノルズ数が低く、ギャップ幅の狭い領域と、レイノルズ数が高く、ギャップ幅の広い領域では、クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数の関係が異なっている。レイノルズ数が低く、ギャップ幅の狭い領域では、クロス流れ抵抗係数はレイノルズ数にほぼ逆比例している。これは圧力差とクロス流れ流量が比例していることを表しており、この領域では、クロス流れの圧力損失に対し、粘性力が支配的であると考えられる。一方、レイノルズ数が高く、ギャップ幅の広い領域では、クロス流れ抵抗係数はレイノルズ数によらずほぼ一定の値になっている。これは圧力差がクロス流れ流量の2乗に比例していることを表しており、この領域では、クロス流れの圧力損失に対し、慣性力が支配的であると考えられる。

Fig.7(b)はくさび形ギャップのクロス流れ抵抗係数とレイノルズ数の関係を示したものである。くさび形ギャップの場合も、Fig.7(a)に示した平行ギャップの場合と同様の傾向を示している。但し、くさび形ギャップのクロス流れ抵抗係数の値は、平行ギャップの場合に比べて高くなっているのが分かる。

5. 圧力損失係数とレイノルズ数の関係

前章では、実験結果をクロス流れ抵抗係数 A とレイノルズ数 Re の関係で整理した。幾何学的に相似の流路の流動特性は、一般に、圧力損失係数 K とレイノルズ数 Re の関係でまとめられる。本実験では、接触面ギャップの形状及び寸法が明確に決まっているため、無次元の圧力損失係数 K を求めることが可能である。ここでは、実験結果を圧力損失係数とレイノルズ数の関係で整理してみる。

ギャップの開口面積 A は次のように書ける。

$$A = \alpha \delta L \quad (11)$$

ここで、 α はギャップの形状係数で、平行ギャップの場合には $\alpha = 1/2$ 、くさび形ギャップの場合には $\alpha = 1/4$ である。圧力損失係数 K は、式(5)、(11)から

$$K = \frac{2 \rho \Delta p}{M^2} \alpha^2 \delta^2 L^2 \quad (12)$$

となる。

Fig.8 は圧力損失係数 K とレイノルズ数 Re の関係を示したものである。図中の記号は Fig.7 に対応している。

Fig.8(a) は平行ギャップの場合である。圧力損失係数はギャップ幅が狭いほど大きい。レイノルズ数が低い領域では圧力損失係数はレイノルズ数にほぼ逆比例している。一方、レイノルズ数の高い領域では圧力損失係数はレイノルズ数によらない一定の値に近づく傾向が見られる。これは、クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数の関係で示した Fig.7 の傾向と同様であるが、クロス流れ抵抗係数の値はギャップ幅によって大きく変化するのに対し、圧力損失係数に対するギャップ幅の影響は比較的小さいことが分かる。

Fig.8(b) はくさび形ギャップの場合である。くさび形ギャップの場合も、Fig.8(a) に示した平行ギャップの場合と同様の傾向を示している。ギャップ幅が広く、レイノルズ数の高い領域では、くさび形ギャップの圧力損失係数は平行ギャップの場合とほぼ同じ値である。ギャップ幅が狭く、レイノルズ数の低い領域では、くさび形ギャップの圧力損失係数は平行ギャップの場合より小さくなっている。

6. クロス流れ流動特性の検討

ここでは、クロス流れの流動特性について定性的な考察を加え、実験炉炉心設計に適用できる実験式を導くため、2ブロッククロス流れ実験で得られた結果を統一的に整理する方法について検討を行う。

5. 圧力損失係数とレイノルズ数の関係

前章では、実験結果をクロス流れ抵抗係数 A とレイノルズ数 Re の関係で整理した。幾何学的に相似の流路の流動特性は、一般に、圧力損失係数 K とレイノルズ数 Re の関係でまとめられる。本実験では、接触面ギャップの形状及び寸法が明確に決まっているため、無次元の圧力損失係数 K を求めることが可能である。ここでは、実験結果を圧力損失係数とレイノルズ数の関係で整理してみる。

ギャップの開口面積 A は次のように書ける。

$$A = \alpha \delta L \quad (11)$$

ここで、 α はギャップの形状係数で、平行ギャップの場合には $\alpha = 1/2$ 、くさび形ギャップの場合には $\alpha = 1/4$ である。圧力損失係数 K は、式(5)、(11)から

$$K = \frac{2 \rho A p}{M^2} \alpha^2 \delta^2 L^2 \quad (12)$$

となる。

Fig.8 は圧力損失係数 K とレイノルズ数 Re の関係を示したものである。図中の記号は Fig.7 に対応している。

Fig.8(a) は平行ギャップの場合である。圧力損失係数はギャップ幅が狭いほど大きい。レイノルズ数が低い領域では圧力損失係数はレイノルズ数にほぼ逆比例している。一方、レイノルズ数の高い領域では圧力損失係数はレイノルズ数によらない一定の値に近づく傾向が見られる。これは、クロス流れ抵抗係数とレイノルズ数の関係で示した Fig.7 の傾向と同様であるが、クロス流れ抵抗係数の値はギャップ幅によって大きく変化するのに対し、圧力損失係数に対するギャップ幅の影響は比較的小さいことが分かる。

Fig.8(b) はくさび形ギャップの場合である。くさび形ギャップの場合も、Fig.8(a) に示した平行ギャップの場合と同様の傾向を示している。ギャップ幅が広く、レイノルズ数の高い領域では、くさび形ギャップの圧力損失係数は平行ギャップの場合とほぼ同じ値である。ギャップ幅が狭く、レイノルズ数の低い領域では、くさび形ギャップの圧力損失係数は平行ギャップの場合より小さくなっている。

6. クロス流れ流動特性の検討

ここでは、クロス流れの流動特性について定性的な考察を加え、実験炉炉心設計に適用できる実験式を導くため、2ブロッククロス流れ実験で得られた結果を統一的に整理する方法について検討を行う。

6.1 無次元換算レイノルズ数

実験結果から、ギャップ幅が狭く、レイノルズ数の低い領域では、クロス流れの圧力損失に対し粘性力が支配的であると考えられる。これに対し、ギャップ幅が広く、レイノルズ数の高い領域では、慣性力が支配的になると考えられる。

ギャップを通る流れにおいて、粘性力は $\mu U \ell^2 / d_e$ のオーダーであり、一方、慣性力は $\rho U^2 \ell d_e$ のオーダーである。ここで、 U はクロス流れの代表速度、 ℓ は接触面内の代表長さである。

無次元の換算レイノルズ数 Re^*

$$Re^* = \frac{\alpha \delta}{L} Re \quad (13)$$

と定義すれば

$$Re^* \sim \frac{\rho U^2 \ell d_e}{\mu U \ell^2 / d_e} \quad (14)$$

であり、ギャップを通る流れの慣性力と粘性力の比を表したものになっている。従って、ギャップ幅が狭く、レイノルズ数の低い領域では、無次元換算レイノルズ数が小さく、慣性力に比べて粘性力が大きいことが分かる。これに対し、ギャップ幅が広く、レイノルズ数の高い領域では、無次元換算レイノルズ数が大きく、粘性力に比べて慣性力が大きくなる。

6.2 低レイノルズ数領域

無次元換算レイノルズ数 Re^* が十分小さい領域 ($Re^* \ll 1$) では、慣性力は粘性力に比べて無視することができる。従って、クロス流れの圧力損失は接触面の粘性摩擦によって決まり

$$\Delta p \sim \frac{\mu U \ell}{d_e^2} \quad (15)$$

となる。この式はクロス流れの流量 M を用いて

$$\Delta p \sim \frac{\mu M}{\rho \alpha^3 \delta^3} \quad (16)$$

と書ける。従って、クロス流れ抵抗係数 A とレイノルズ数 Re の関係は次のようになる。

$$A \sim \frac{1}{\alpha^3 \delta^3 L Re} \quad (17)$$

クロス流れ抵抗係数は、ギャップ幅が広くなるとともに小さくなり、レイノルズ数に逆比例することが分かる。このような傾向は、ギャップ幅が狭く、レイノルズ数の低い領域の実験結果と一致している。

6.3 高レイノルズ数領域

無次元換算レイノルズ数 Re^* が十分大きい領域 ($Re^* \gg 1$) では、粘性力は慣性力と比べて無視することができる。従って、クロス流れの圧力損失は

$$\Delta p \sim \rho U^2 \quad (18)$$

となる。この式はクロス流れの流量 M を用いて

$$\Delta p \sim \frac{M^2}{\rho \alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (19)$$

と書ける。クロス流れ抵抗係数は

$$A \sim \frac{1}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (20)$$

と表される。クロス流れ抵抗係数は、ギャップ幅が広くなると共に小さくなり、またレイノルズ数には依存しないことが分かる。このような傾向は、ギャップ幅が広く、レイノルズ数の高い領域の実験結果と一致している。

6.4 クロス流れ実験式

クロス流れ抵抗係数は、低レイノルズ数領域及び高レイノルズ数領域で、それぞれ、式(17)及び式(20)のように表されることが分かった。中間レイノルズ数領域 ($Re^* \sim 1$) では、慣性力と粘性力が同じオーダーとなり、これまで述べたような単純な定性的議論をすることは困難である。

実験結果には、中間レイノルズ数領域においてギャップ幅に依存したクロス流れ特性の顕著な変化が見られず、また実験結果が低レイノルズ数領域から高レイノルズ数領域へ滑らかにつながっていることから、低レイノルズ数領域の式(17)と高レイノルズ数領域の式(20)を加え合わせた形で、全レイノルズ数領域にわたるクロス流れ抵抗係数を記述できるものと期待できる。すなわち、クロス流れ抵抗係数は次のような形式で書き表される。

$$A = \frac{C_1}{\alpha^3 \delta^3 L Re} + \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (21)$$

ここで、 C_1 及び C_2 はブロック接触面の形状で決まる無次元の定数である。クロス流れ抵抗係数はギャップ幅によって変化するが、圧力損失係数 K 及び無次元換算レイノルズ数 Re^* を用いて式(21)を書き直すと

$$K = \frac{C_1}{Re^*} + C_2 \quad (22)$$

となり、ギャップ幅に依存しない1本の曲線で表される。

Fig.9は、圧力損失係数Kと無次元換算レイノルズ数 Re^* を用いて実験結果を整理したものである。

Fig.9(a)は平行ギャップの場合である。図から、全領域にわたってギャップ幅に依存しない1本の曲線で実験結果を整理できることが分かる。低レイノルズ数領域及び高レイノルズ数領域の実験結果から、それぞれ、式(21)、(22)の定数 C_1 及び C_2 を決定すると、 $C_1 = 0.167$ 、 $C_2 = 3.12$ となる。これらの値を用いた実験式

$$K = \frac{0.167}{Re^*} + 3.12 \quad (23)$$

をFig.9(a)に破線で示す。中間レイノルズ数領域で実験結果とやや不一致が生じているが、式(23)は全般的に実験結果を良く再現していることが分かる。

Fig.9(b)はくさび形ギャップの場合である。くさび形ギャップの場合にも、圧力損失係数Kと無次元換算レイノルズ数 Re^* を用いることにより、ギャップ幅に依存しない形で実験結果を良く整理できることが分かる。図中の一点鎖線は、平行ギャップの場合の実験式(23)を示したものである。無次元換算レイノルズ数が大きい領域ではくさび形ギャップの実験結果は平行ギャップの実験式と良く一致しているが、無次元換算レイノルズ数の小さい領域では両者は大きく異なっている。この相違は、無次元換算レイノルズ数の小さい領域のクロス流れ特性は接触面外縁での平均量だけでは決まらないことを意味している。

平行ギャップとくさび形ギャップのクロス流れ特性の相違を明らかにするために、ここではブロック接触面各辺のクロス流れ特性に基づいて考察を加える。

接触面の辺 j ($j = 1, 2, \dots, 6$)から流入するクロス流れ流量 M_j は、各辺の平均ギャップ幅 δ_j によって決まるものと考えられる。従って、低レイノルズ領域では、各辺について式(16)と同様の関係が成立する。

$$\Delta p \sim \frac{\mu M_j}{\rho \alpha_j^3 \delta_j^3} \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (24)$$

各辺のギャップ形状係数 α_j は、各辺のギャップ開口面積 A_j に関する式(11)と同様の関係

$$A_j = \frac{1}{6} \alpha_j \delta_j L \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (25)$$

から決まる。ここでは、各辺のギャップ幅として各辺の平均ギャップ幅をとっているため、 α_j は一定値($= 1/2$)となる。

接触面全体のクロス流れ流量 M は

$$M = \sum_{j=1}^6 M_j \quad (26)$$

である。従って、式(24)は次のように表される。

$$\Delta p \sim \frac{\mu M}{\rho \alpha_j^3 \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta_j^3} \quad (27)$$

クロス流れ抵抗係数は、

$$A \sim \frac{1}{\alpha_j^3 \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta_j^3 L Re} \quad (28)$$

となる。ここで、平行ギャップの場合 ($\delta_j = \delta$) には、

$$\frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta_j^3 = \delta^3 \quad (29)$$

であり、低レイノルズ数領域で式28が式21に一致するように比例定数を定めれば

$$A = \frac{C_1}{\alpha_j^3 \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta_j^3 L Re} \quad (30)$$

となる。

くさび形ギャップの場合には、開口辺を $j = 1$ とし、周方向に辺番号 j を付ければ、ギャップの幾何学的形状から

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \delta, \\ \delta_2 &= \delta_6 = 3\delta/4, \\ \delta_3 &= \delta_5 = \delta/4, \\ \delta_4 &= 0 \end{aligned}$$

である。従って

$$\frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta_j^3 = \frac{5}{16} \delta^3 \quad (31)$$

となり、

$$\alpha_j^3 \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta_j^3 = \frac{5}{2} \alpha^3 \delta^3 \quad (32)$$

となる。上式を式28に代入すれば、くさび形ギャップのクロス流れ係数とレイノルズ数の関係は次のように表される。

$$A = \frac{2 C_1}{5 \alpha^3 \delta^3 L Re} \quad (33)$$

高レイノルズ数の領域において、各辺のクロス流れ流量と圧力差の関係は、式(19)と同様に

$$\Delta p \sim \frac{M_j^2}{\rho \alpha_j^2 \delta_j^2 L^2} \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (34)$$

となり，クロス流れ抵抗係数は

$$A = \frac{C_2}{\alpha_j \left(\frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta_j \right)^2 L^2} \quad (35)$$

と表される。平行ギャップの場合も，くさび形ギャップの場合も

$$\alpha_j^2 = \left(\frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta_j \right)^2 = \alpha^2 \delta^2 \quad (36)$$

である。従って，どちらの場合にもクロス流れ抵抗係数は

$$A = \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (37)$$

と表される。

以上の考察から，くさび形ギャップの場合のクロス流れ抵抗係数は全領域にわたり

$$A = \frac{2 C_1}{5 \alpha^3 \delta^3 L Re} + \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (38)$$

と書ける。ここで，定数 C_1 及び C_2 は平行ギャップの場合の値と同じである。圧力損失係数 K と無次元換算レイノルズ数 Re^* を用いて式38を書き直すと

$$K = \frac{2 C_1}{5 Re^*} + C_2 \quad (39)$$

となる。くさび形ギャップの圧力損失係数は，無次元換算レイノルズ数が小さい領域において平行ギャップの場合 $2/5$ となり，無次元換算レイノルズ数が大きい領域において平行ギャップの場合と同じ値をとることが分かる。

Fig.9(b)の破線は式39を示したものである。この式はくさび形ギャップの実験結果を良く再現していることが分かる。

以上により，実験炉詳細設計(I)の燃料ブロックについて行ったクロス流れ実験の結果は次のようにまとめられる。平行ギャップの式21及びくさび形ギャップの式38に，ギャップの形状係数 α (それぞれ， $1/2$ 及び $1/4$)，ぬれ縁長さ L ($= 1.997 \text{ m}$)，実験結果から決定した定数 C_1 ($= 0.167$)， C_2 ($= 3.12$)を代入して，以下の実験式が得られる。

i) 平行ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{0.670}{\delta Re} + 3.13 \quad (40)$$

ii) くさび形ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{2.14}{\delta Re} + 12.5 \quad (41)$$

但し、クロス流れ抵抗係数 A 及びギャップ幅 δ の単位は、それぞれ、(m^{-4}) 及び (m) である。

7. クロス流れ抵抗係数とギャップ幅

前章では、クロス流れ抵抗係数をレイノルズ数とギャップ幅の関数で表示する実験式を導いたが、クロス流れ抵抗係数を圧力差とギャップ幅の関数で表した方が実験炉炉心設計には有用であると思われる。

平行ギャップの場合、式(21)から

$$\frac{2 \rho \Delta p}{M^2} = \frac{\mu C_1}{4 \alpha^3 \delta^3 M} + \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (42)$$

であり、流量は

$$M = -\frac{\mu L^2 C_1}{8 \alpha \delta C_2} + \left[\left(\frac{\mu L^2 C_1}{8 \alpha \delta C_2} \right)^2 + \frac{2 \rho \Delta p \alpha^2 \delta^2 L}{C_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

となる。従って、クロス流れ抵抗係数は次のように書ける。

$$A = \frac{\mu^2 C_1}{64 \alpha^6 \delta^6 \rho \Delta p} \left[1 + \left(1 + \frac{128 \alpha^4 \delta^4 \rho \Delta p C_2}{\mu^2 L^2 C_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (44)$$

同様に、くさび形ギャップの場合には

$$A = \frac{\mu^2 C_1}{400 \alpha^6 \delta^6 \rho \Delta p} \left[1 + \left(1 + \frac{800 \alpha^4 \delta^4 \rho \Delta p C_2}{\mu^2 L^2 C_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (45)$$

i) 平行ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{0.670}{\delta Re} + 3.13 \quad (40)$$

ii) くさび形ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{2.14}{\delta Re} + 12.5 \quad (41)$$

但し、クロス流れ抵抗係数 A 及びギャップ幅 δ の単位は、それぞれ、(m^{-4}) 及び (m) である。

7. クロス流れ抵抗係数とギャップ幅

前章では、クロス流れ抵抗係数をレイノルズ数とギャップ幅の関数で表示する実験式を導いたが、クロス流れ抵抗係数を圧力差とギャップ幅の関数で表した方が実験炉炉心設計には有用であると思われる。

平行ギャップの場合、式(21)から

$$\frac{2 \rho \Delta p}{M^2} = \frac{\mu C_1}{4 \alpha^3 \delta^3 M} + \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (42)$$

であり、流量は

$$M = -\frac{\mu L^2 C_1}{8 \alpha \delta C_2} + \left[\left(\frac{\mu L^2 C_1}{8 \alpha \delta C_2} \right)^2 + \frac{2 \rho \Delta p \alpha^2 \delta^2 L}{C_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

となる。従って、クロス流れ抵抗係数は次のように書ける。

$$A = \frac{\mu^2 C_1}{64 \alpha^6 \delta^6 \rho \Delta p} \left[1 + \left(1 + \frac{128 \alpha^4 \delta^4 \rho \Delta p C_2}{\mu^2 L^2 C_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (44)$$

同様に、くさび形ギャップの場合には

$$A = \frac{\mu^2 C_1}{400 \alpha^6 \delta^6 \rho \Delta p} \left[1 + \left(1 + \frac{800 \alpha^4 \delta^4 \rho \Delta p C_2}{\mu^2 L^2 C_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{C_2}{\alpha^2 \delta^2 L^2} \quad (45)$$

となる。これらの式より、圧力差が小さく、ギャップ幅の狭い領域ではクロス流れ抵抗係数はギャップ幅の -6 乗に比例し、圧力差に逆比例することが分かる。一方、圧力差が大きく、ギャップ幅の広い領域ではギャップ幅の -2 乗に比例し、圧力差には依存しないことが分かる。実験結果から決定した定数 C_1 及び C_2 の値を用いて、式44及び式45は次のように書ける。

i) 平行ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{0.0280}{\delta^4 \Delta P^+} \left[1 + (1 + 224 \delta^4 \Delta P^+)^{\frac{1}{2}} \right] + 3.13 \quad 46$$

ii) くさび形ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{0.287}{\delta^4 \Delta P^+} \left[1 + (1 + 87.4 \delta^4 \Delta P^+)^{\frac{1}{2}} \right] + 12.5 \quad 47$$

但し、クロス流れ抵抗係数 A 及びギャップ幅 δ の単位は、それぞれ、 (m^{-4}) 及び (m) である。また、ここで $\Delta P^+ (m^{-2})$ は

$$\Delta P^+ = \frac{\rho}{\mu^2} \Delta p \quad 48$$

と定義される換算圧力差である。式48右辺の係数 ρ/μ^2 の値は流体の種類と状態のみによって決まり、 $400^\circ C$ 及び $1000^\circ C$ 、 $4MPa$ のヘリウムガスでは、それぞれ、 $2.457 \times 10^9 N^{-1}$ 及び $5.340 \times 10^8 N^{-1}$ である。

Fig.10(a)及びFig.10(b)は、それぞれ、平行ギャップ及びくさび形ギャップについて、換算圧力値をパラメータとして、クロス流れ抵抗係数とギャップ幅の関係を示したものである。また、代表的な炉心条件におけるクロス流れ抵抗係数をFig.11(a)及びFig.11(b)に示す。

また、式44及び式45を無次元表示すると次のようになる。

(i) 平行ギャップの場合

$$\delta^{*2} A^* = \frac{4.37 \times 10^{-4}}{\delta^{*4}} \left[1 + (1 + 1.43 \times 10^4 \delta^{*4})^{\frac{1}{2}} \right] + 3.12 \quad 49$$

(ii) くさび形ギャップの場合

$$\delta^{*2} A^* = \frac{6.99 \times 10^{-5}}{\delta^{*4}} \left[1 + (1 + 8.93 \times 10^4 \delta^{*4})^{\frac{1}{2}} \right] + 3.12 \quad 50$$

但し、 A^* 及び δ^* は、それぞれ、以下のように定義される無次元クロス流れ抵抗係数及び無次元ギャップ幅である。

$$A^* = \frac{\mu L^3}{\sqrt{\rho \Delta p}} A \quad 51$$

$$\delta^* = \frac{\alpha (\rho \Delta p)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{\mu L}} \delta \quad 52$$

Fig.12 に無次元クロス流れ抵抗係数 A^* と無次元ギャップ幅 δ^* の関係を示す。

8. ま と め

多目的高温ガス実験炉の燃料ブロック接触面ギャップを漏れるクロス流れについて、詳細設計(I)に基づく実寸大モデルを用いて2ブロッククロス流れ実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) クロス流れ流量は、圧力差が増加すると共に、またギャップ幅が広くなると共に大きくなる。ギャップ幅が狭く、流量が小さい領域では流量は圧力差にほぼ比例し、ギャップ幅が広く、流量が大きい領域では流量は圧力差の $1/2$ 乗にほぼ比例する。
- (2) ギャップ幅が狭い場合には、黒鉛ブロック内部を透過する流れはクロス流れに対して無視できない流量割合を占める。
- (3) ブロック接触面の荷重が増加すると、クロス流れ流量は僅かに減少する。
- (4) クロス流れ抵抗係数は次のような実験式で表される。

(i) 平行ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{0.670}{\delta Re} + 3.13$$

あるいは

$$\delta^2 A = \frac{0.0280}{\delta^4 \Delta P^+} \left[1 + (1 + 224 \delta^4 \Delta P^+)^{\frac{1}{2}} \right] + 3.13$$

(ii) くさび形ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{2.14}{\delta Re} + 12.5$$

あるいは

$$\delta^2 A = \frac{0.287}{\delta^4 \Delta P^+} \left[1 + (1 + 87.4 \delta^4 \Delta P^+)^{\frac{1}{2}} \right] + 12.5$$

謝 辞

本実験を遂行するに当たり、有益なご助言を頂いた高温工学部佐野川好母部長、並びに本実験についてご助力を頂いた功刀資彰研究員、橋本憲吾氏（現、名古屋大学）に感謝の意を表す。また、本報告をまとめるに当たり、ご指導、ご討論を頂いた高温工学部構造工学研究室の武藤康室長に感謝の意を表す。

Fig.12 に無次元クロス流れ抵抗係数 A^* と無次元ギャップ幅 δ^* の関係を示す。

8. ま と め

多目的高温ガス実験炉の燃料ブロック接触面ギャップを漏れるクロス流れについて、詳細設計(I)に基づく実寸大モデルを用いて2ブロッククロス流れ実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) クロス流れ流量は、圧力差が増加すると共に、またギャップ幅が広くなると共に大きくなる。ギャップ幅が狭く、流量が小さい領域では流量は圧力差にほぼ比例し、ギャップ幅が広く、流量が大きい領域では流量は圧力差の $1/2$ 乗にほぼ比例する。
- (2) ギャップ幅が狭い場合には、黒鉛ブロック内部を透過する流れはクロス流れに対して無視できない流量割合を占める。
- (3) ブロック接触面の荷重が増加すると、クロス流れ流量は僅かに減少する。
- (4) クロス流れ抵抗係数は次のような実験式で表される。

(i) 平行ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{0.670}{\delta \text{Re}} + 3.13$$

あるいは

$$\delta^2 A = \frac{0.0280}{\delta^4 \Delta P^*} \left[1 + (1 + 224 \delta^4 \Delta P^*)^{\frac{1}{2}} \right] + 3.13$$

(ii) くさび形ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{2.14}{\delta \text{Re}} + 12.5$$

あるいは

$$\delta^2 A = \frac{0.287}{\delta^4 \Delta P^*} \left[1 + (1 + 87.4 \delta^4 \Delta P^*)^{\frac{1}{2}} \right] + 12.5$$

謝 辞

本実験を遂行するに当たり、有益なご助言を頂いた高温工学部佐野川好母部長、並びに本実験についてご助力を頂いた功刀資彰研究員、橋本憲吾氏（現、名古屋大学）に感謝の意を表す。また、本報告をまとめるに当たり、ご指導、ご討論を頂いた高温工学部構造工学研究室の武藤康室長に感謝の意を表す。

Fig.12 に無次元クロス流れ抵抗係数 A^* と無次元ギャップ幅 δ^* の関係を示す。

8. ま と め

多目的高温ガス実験炉の燃料ブロック接触面ギャップを漏れるクロス流れについて、詳細設計(I)に基づく実寸大モデルを用いて2ブロッククロス流れ実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) クロス流れ流量は、圧力差が増加すると共に、またギャップ幅が広くなると共に大きくなる。ギャップ幅が狭く、流量が小さい領域では流量は圧力差にほぼ比例し、ギャップ幅が広く、流量が大きい領域では流量は圧力差の $1/2$ 乗にほぼ比例する。
- (2) ギャップ幅が狭い場合には、黒鉛ブロック内部を透過する流れはクロス流れに対して無視できない流量割合を占める。
- (3) ブロック接触面の荷重が増加すると、クロス流れ流量は僅かに減少する。
- (4) クロス流れ抵抗係数は次のような実験式で表される。

(i) 平行ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{0.670}{\delta \text{Re}} + 3.13$$

あるいは

$$\delta^2 A = \frac{0.0280}{\delta^4 \Delta P^+} \left[1 + (1 + 224 \delta^4 \Delta P^+)^{\frac{1}{2}} \right] + 3.13$$

(ii) くさび形ギャップの場合

$$\delta^2 A = \frac{2.14}{\delta \text{Re}} + 12.5$$

あるいは

$$\delta^2 A = \frac{0.287}{\delta^4 \Delta P^+} \left[1 + (1 + 87.4 \delta^4 \Delta P^+)^{\frac{1}{2}} \right] + 12.5$$

謝 辞

本実験を遂行するに当たり、有益なご助言を頂いた高温工学部佐野川好母部長、並びに本実験についてご助力を頂いた功刀資彰研究員、橋本憲吾氏（現、名古屋大学）に感謝の意を表す。また、本報告をまとめるに当たり、ご指導、ご討論を頂いた高温工学部構造工学研究室の武藤康室長に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 多目的高温ガス実験炉設計室：“多目的高温ガス実験炉設備設計の概要，システム総合設計に基づく”，JAERI-M 84-172（1984）。
- (2) 滝塚貴和，蕪木英雄，功刀資彰，佐野川好母：“2ブロッククロス流れ実験・第1報，実験装置の概要及び実験条件の検討”，JAERI-M 84-222（1984）。
- (3) 滝塚貴和，蕪木英雄：“多目的高温ガス実験炉炉心のクロス流れ，(I)2ブロッククロス流れ実験”，日本原子力学会誌，Vol.27，No.4，PP.347-356（1985）。
- (4) 蕪木英雄，滝塚貴和，橋本憲吾：“多目的高温ガス実験炉炉心のクロス流れ，(II)2ブロッククロス流れの解析”，日本原子力学会誌，Vol.27，No.5，PP.450-456（1985）。
- (5) Gulf General Atomic：“Public Service Company of Colorado 330-MWe High-Temperature Gas-Cooled Reactor Research and Development Program, Quarterly Progress Report for the Period Ending June 30, 1967,” GA-8038（1967）。
- (6) Malek, G. J., Hausermann, R.：“Analysis of the Multi Column Flow Distribution Test Data,” GAMD-8423（1968）。
- (7) Kiefer, R. J.：“Crossflow Calculation for the Fort St. Vrain Nuclear Reactor Core,” GAMD-9984（1970）。

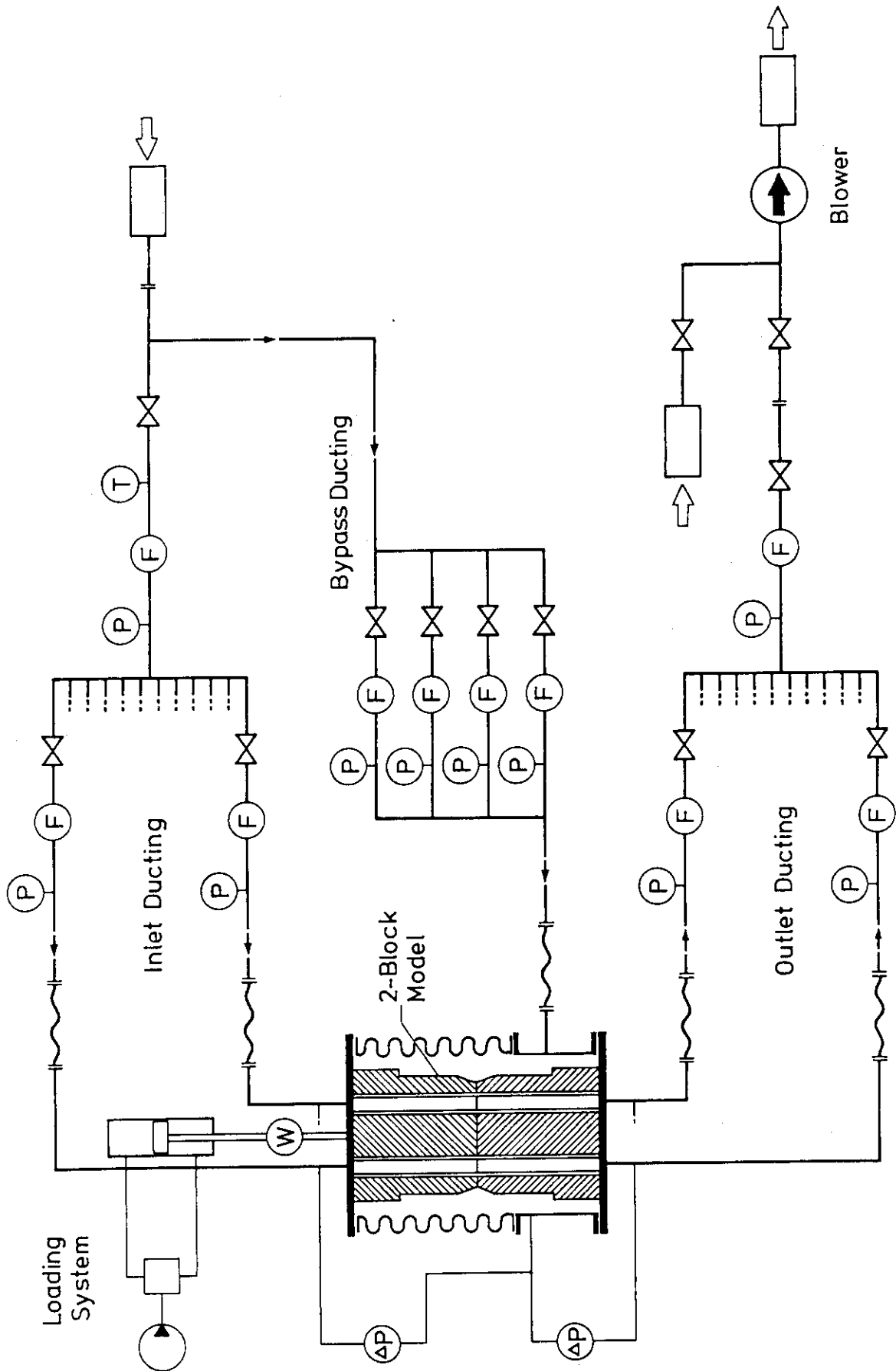


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

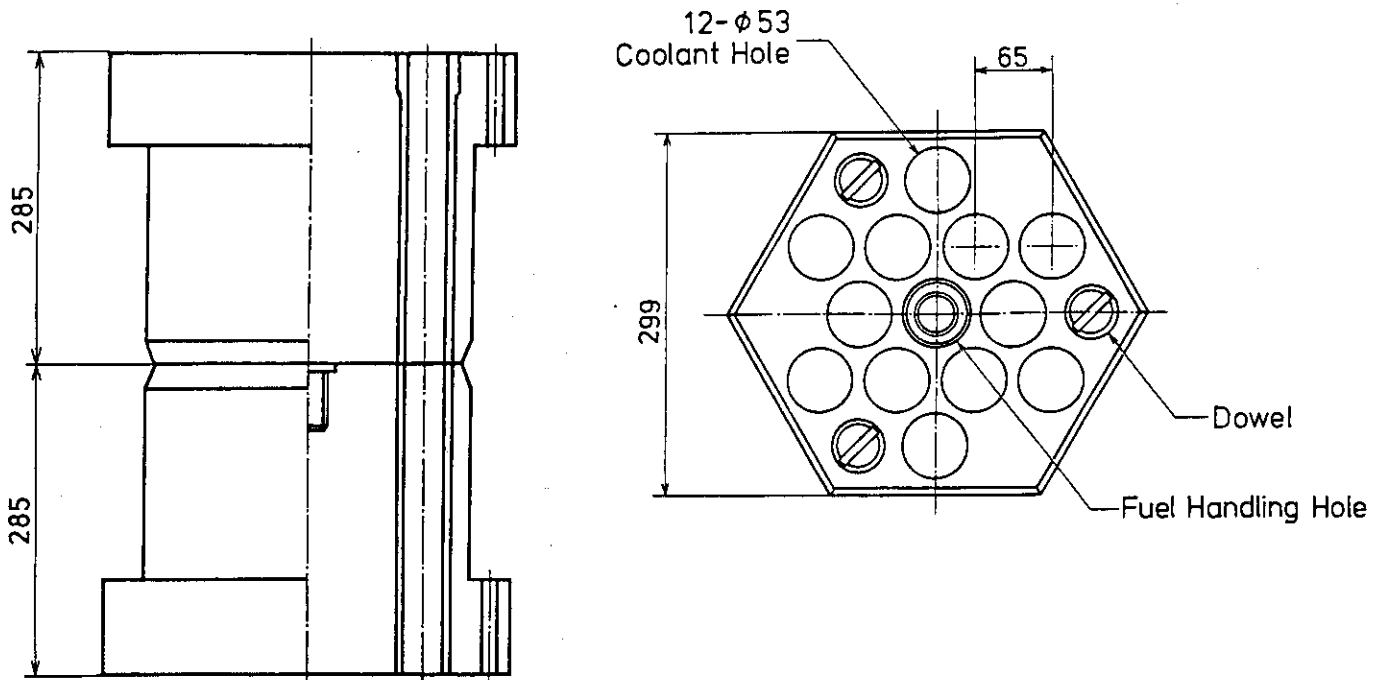


Fig.2 Two-Block Model

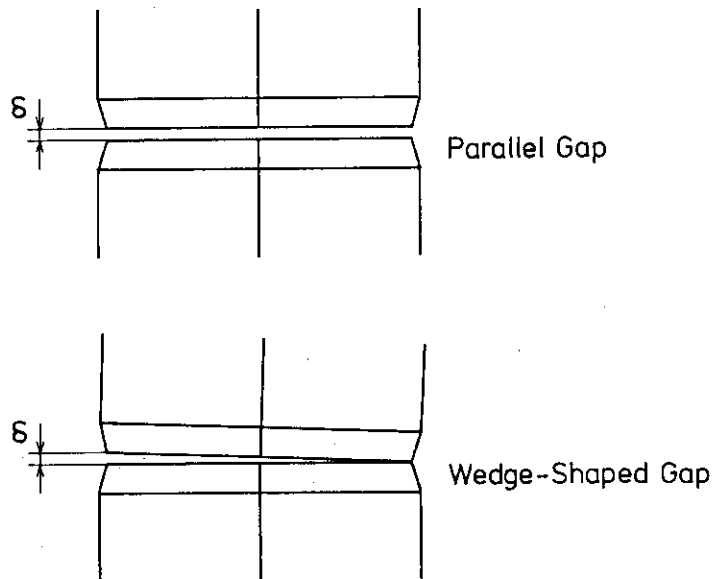


Fig.3 Gap Configurations

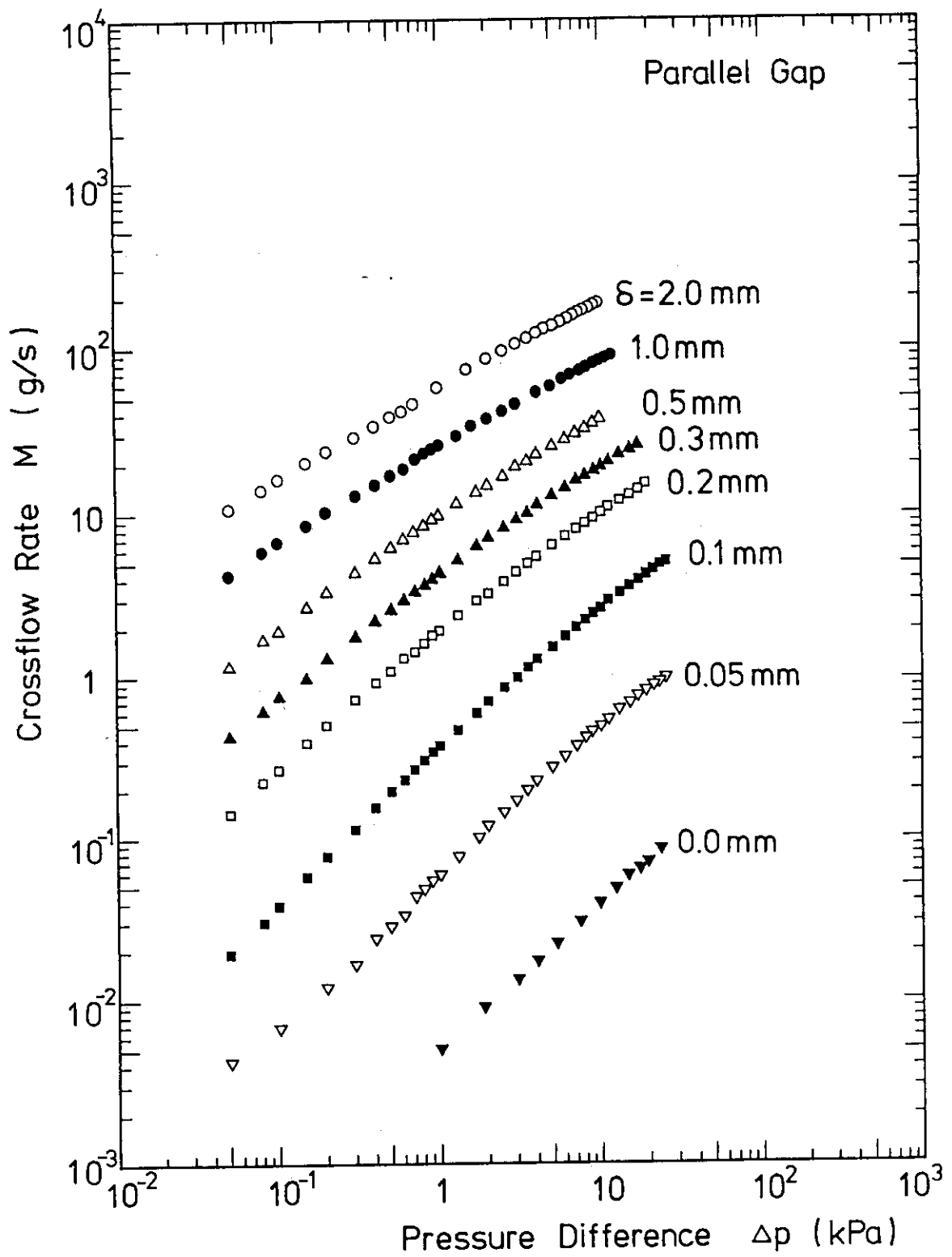


Fig.4(a) The Relation between Crossflow Rate and Pressure Difference for Parallel Gaps

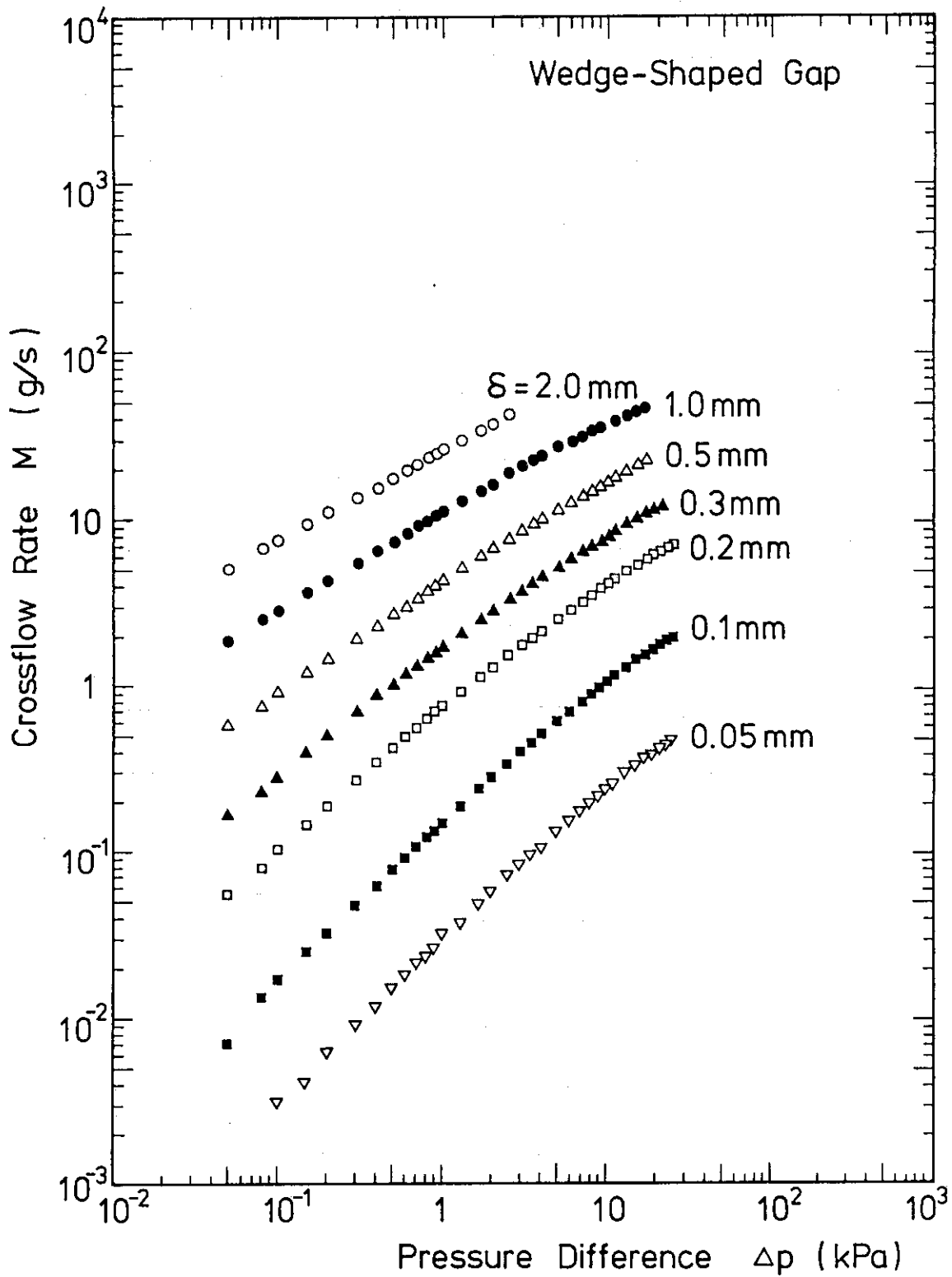


Fig.4(b) The Relation between Crossflow Rate and Pressure Difference for Wedge-Shaped Gaps

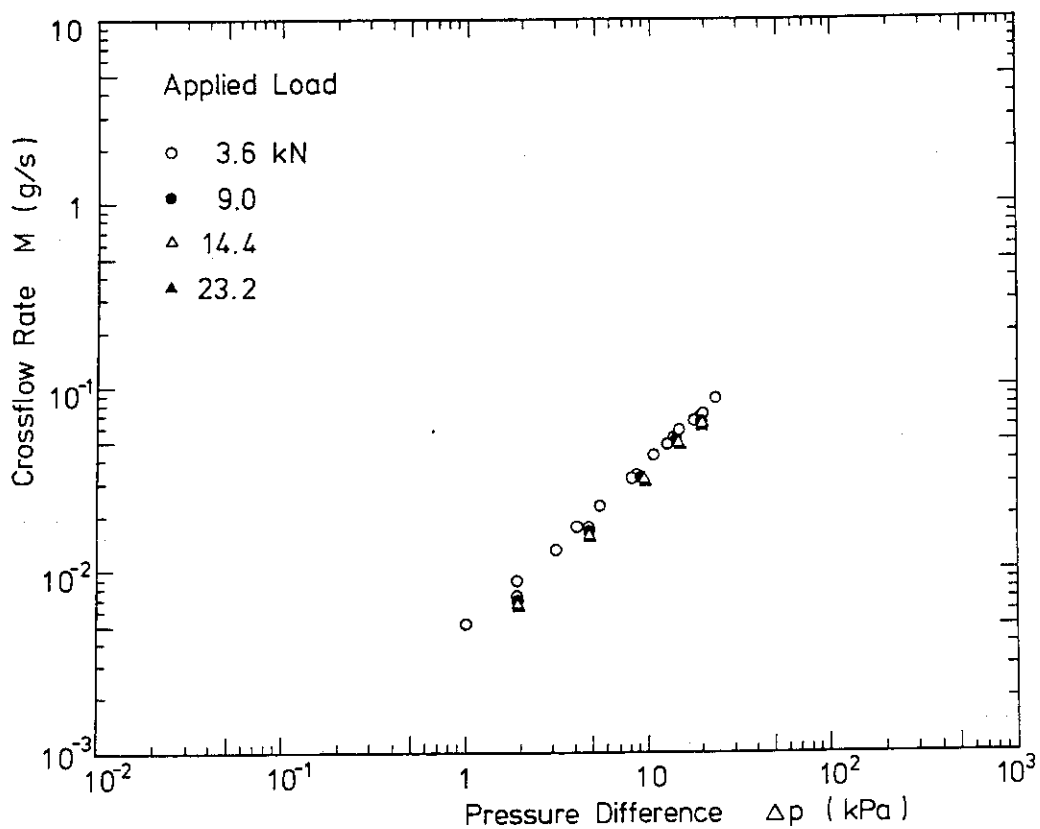


Fig.5 Effect of Applied Load on Crossflow

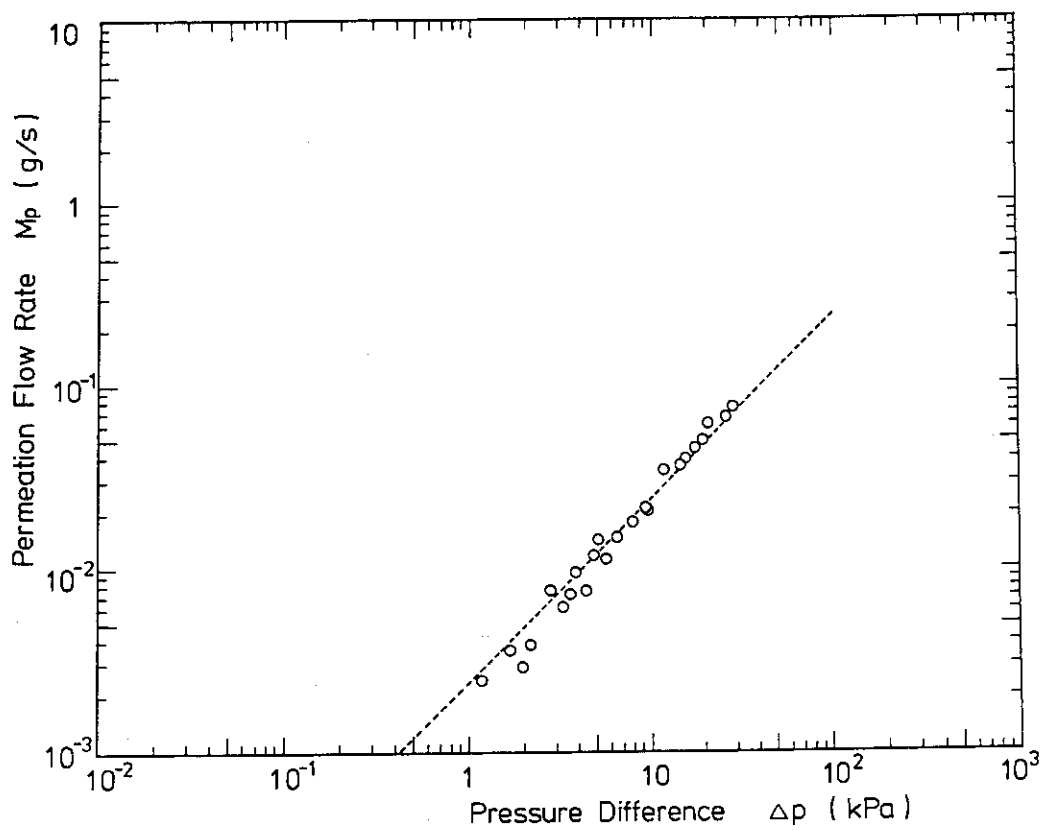


Fig.6 Permeation Flow Through Graphite Blocks

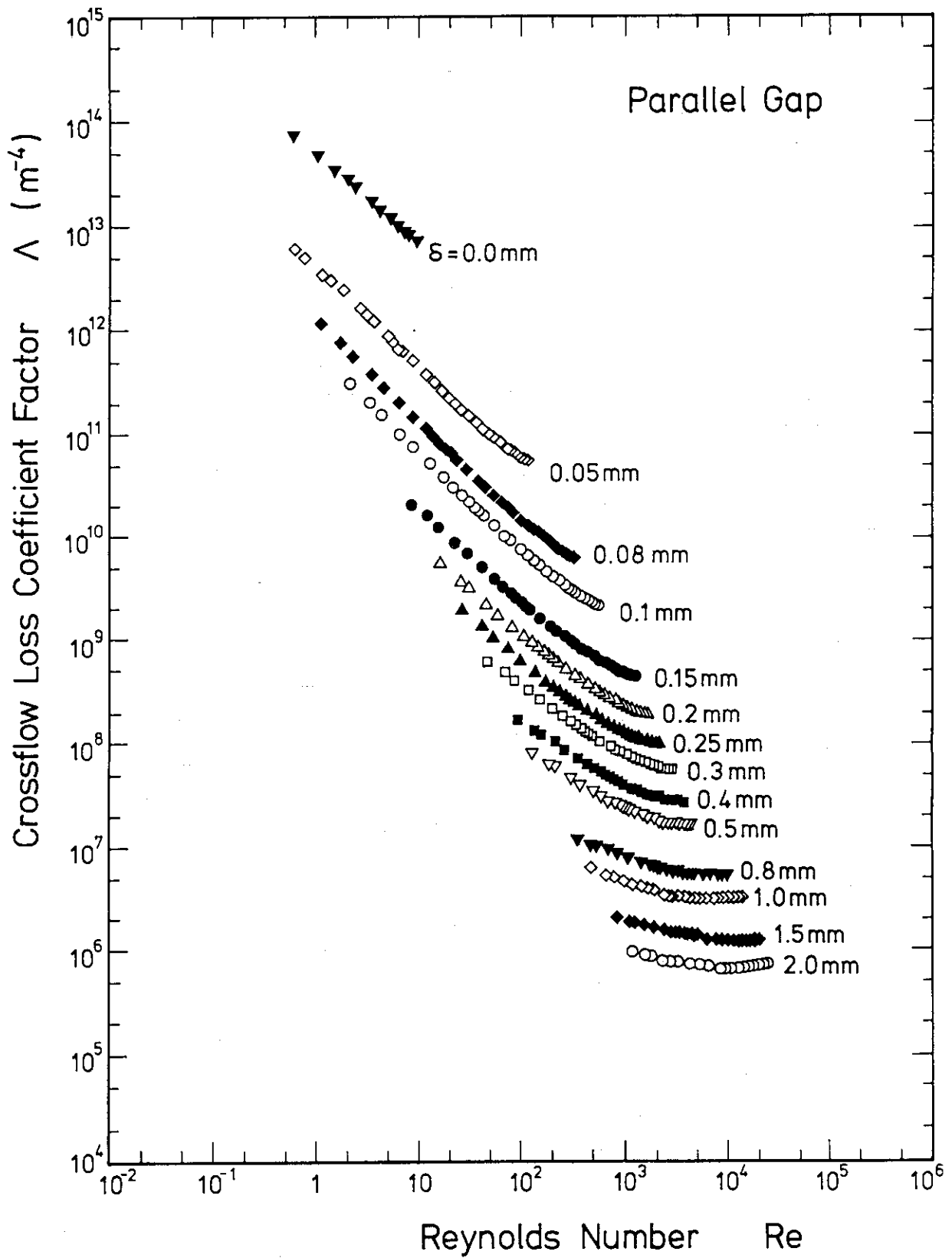


Fig.7(a) The Relation between Crossflow Loss Coefficient Factor and Reynolds Number for Parallel Gaps

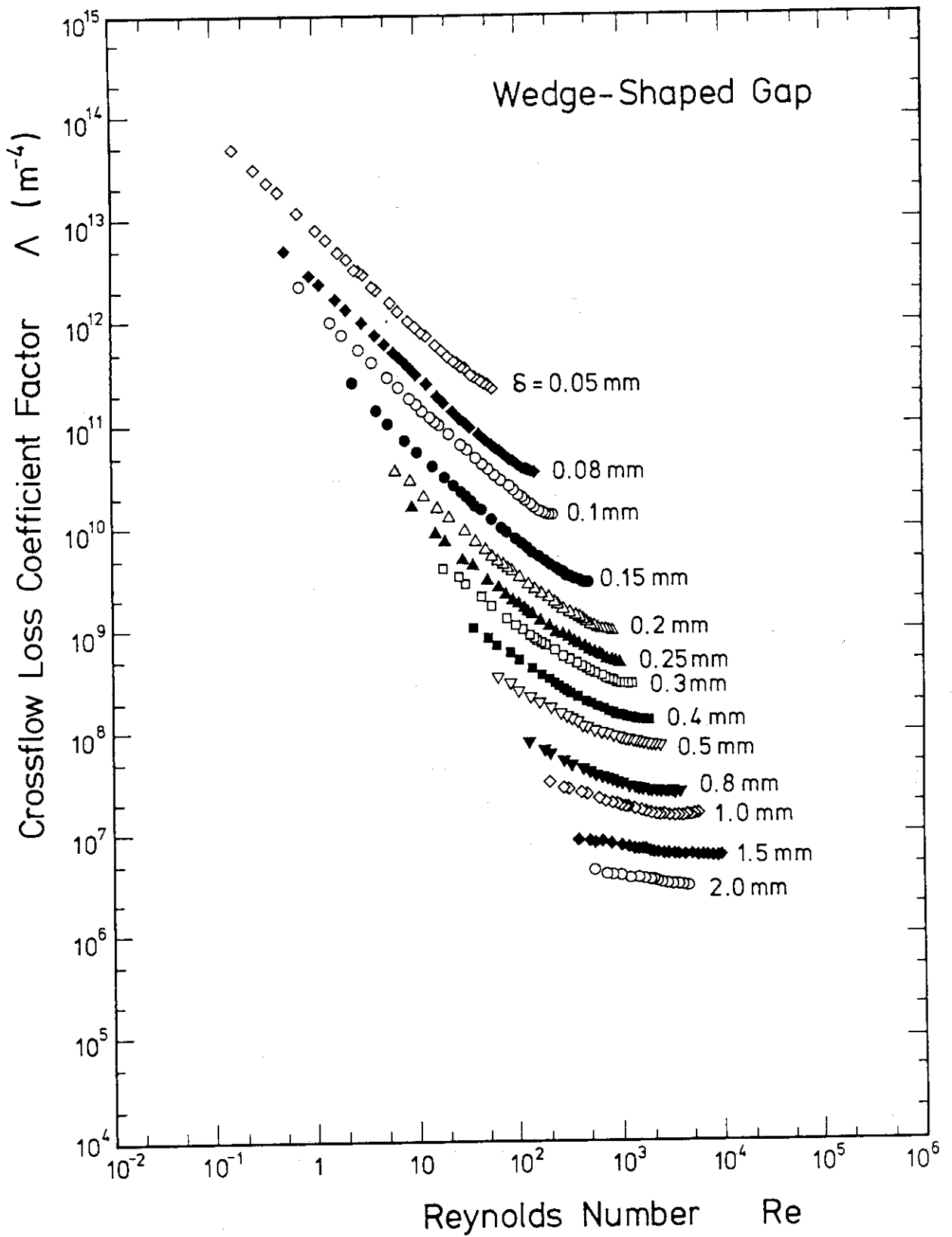


Fig.7(b) The Relation between Crossflow Loss Coefficient Factor and Reynolds Number for Wedge-Shaped Gaps

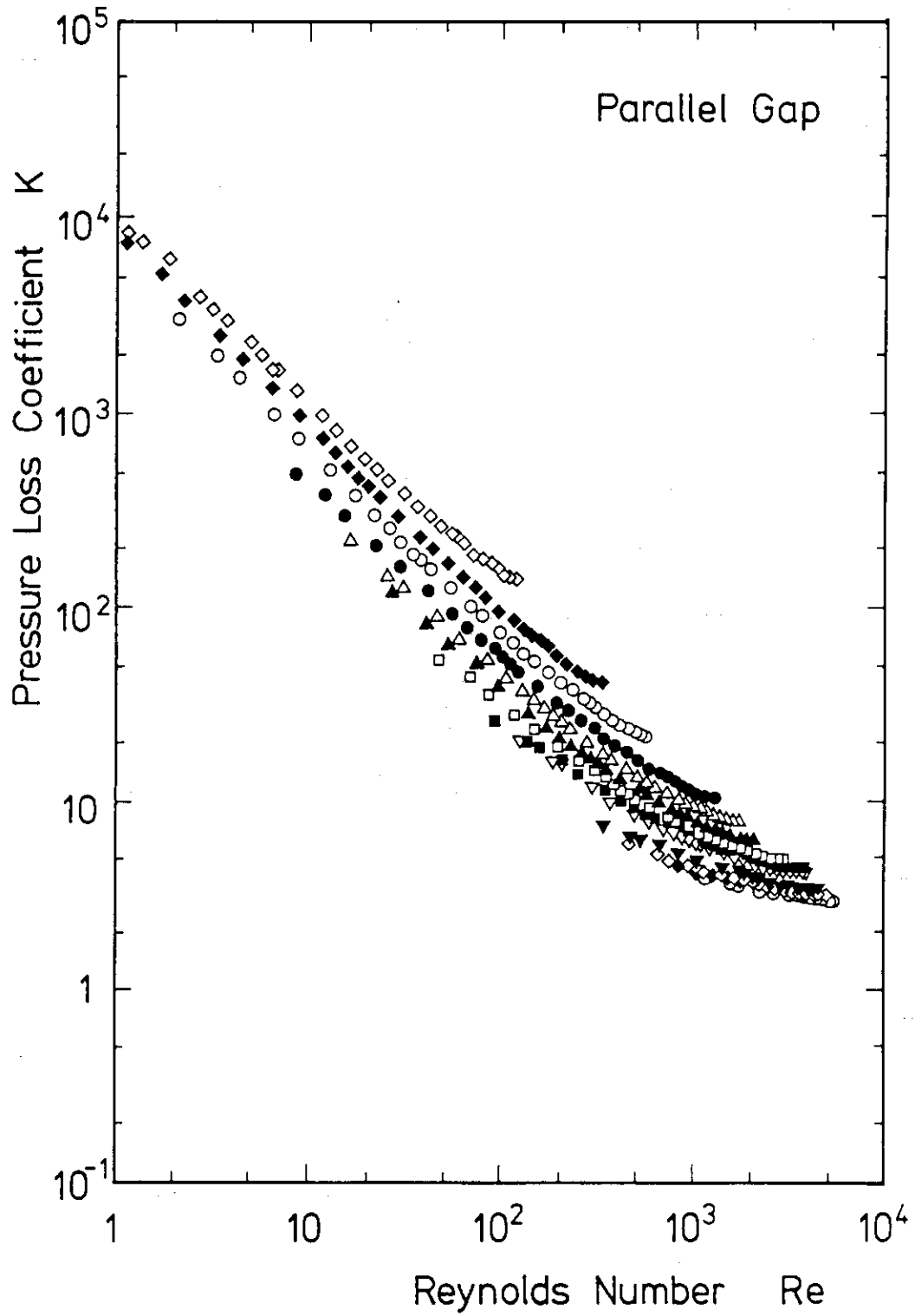


Fig.8(a) The Relation between Pressure Loss Coefficient and Reynolds Number for Parallel Gaps

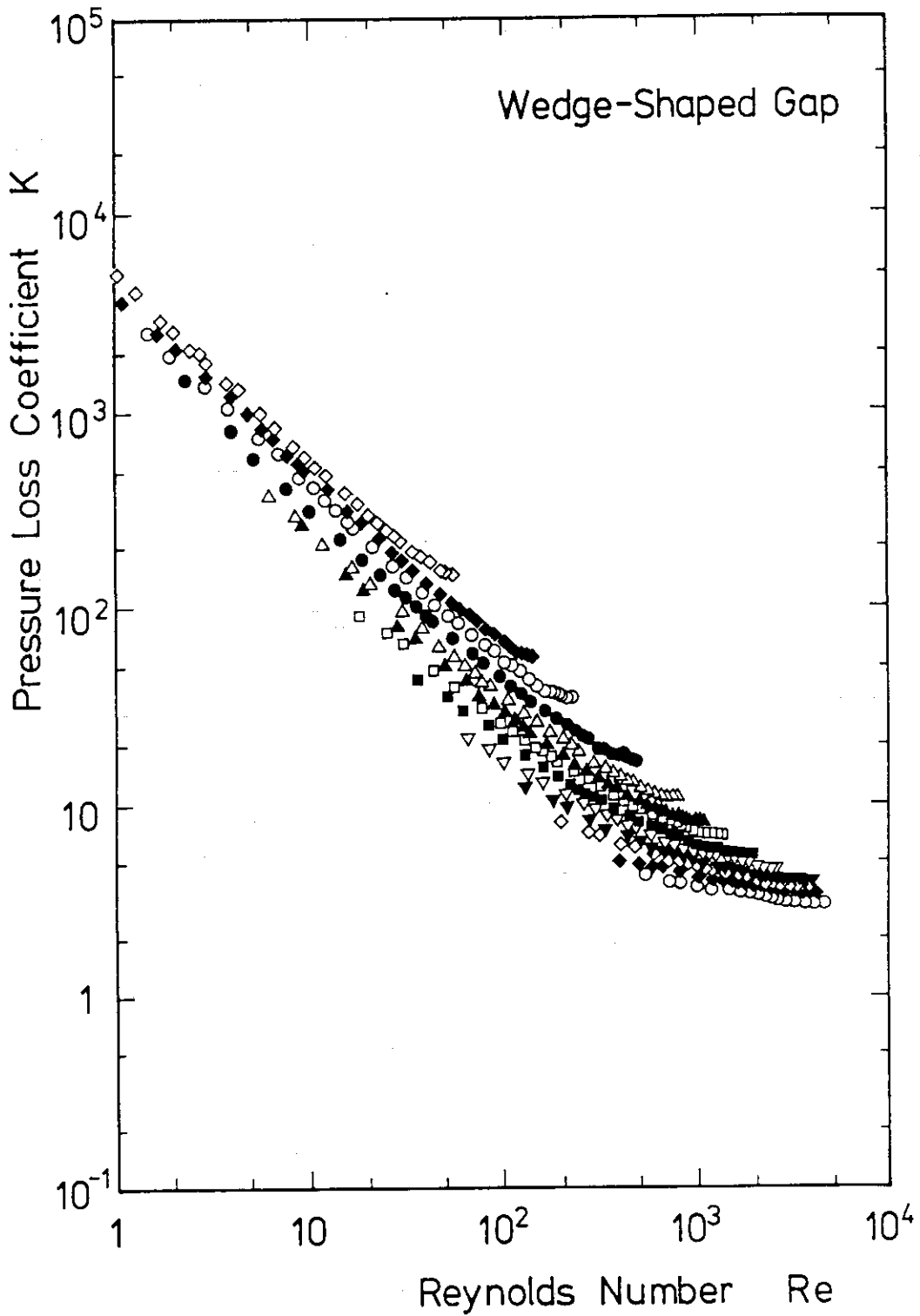


Fig.8(b) The Relation between Pressure Loss Coefficient and Reynolds Number for Wedge-Shaped Gaps

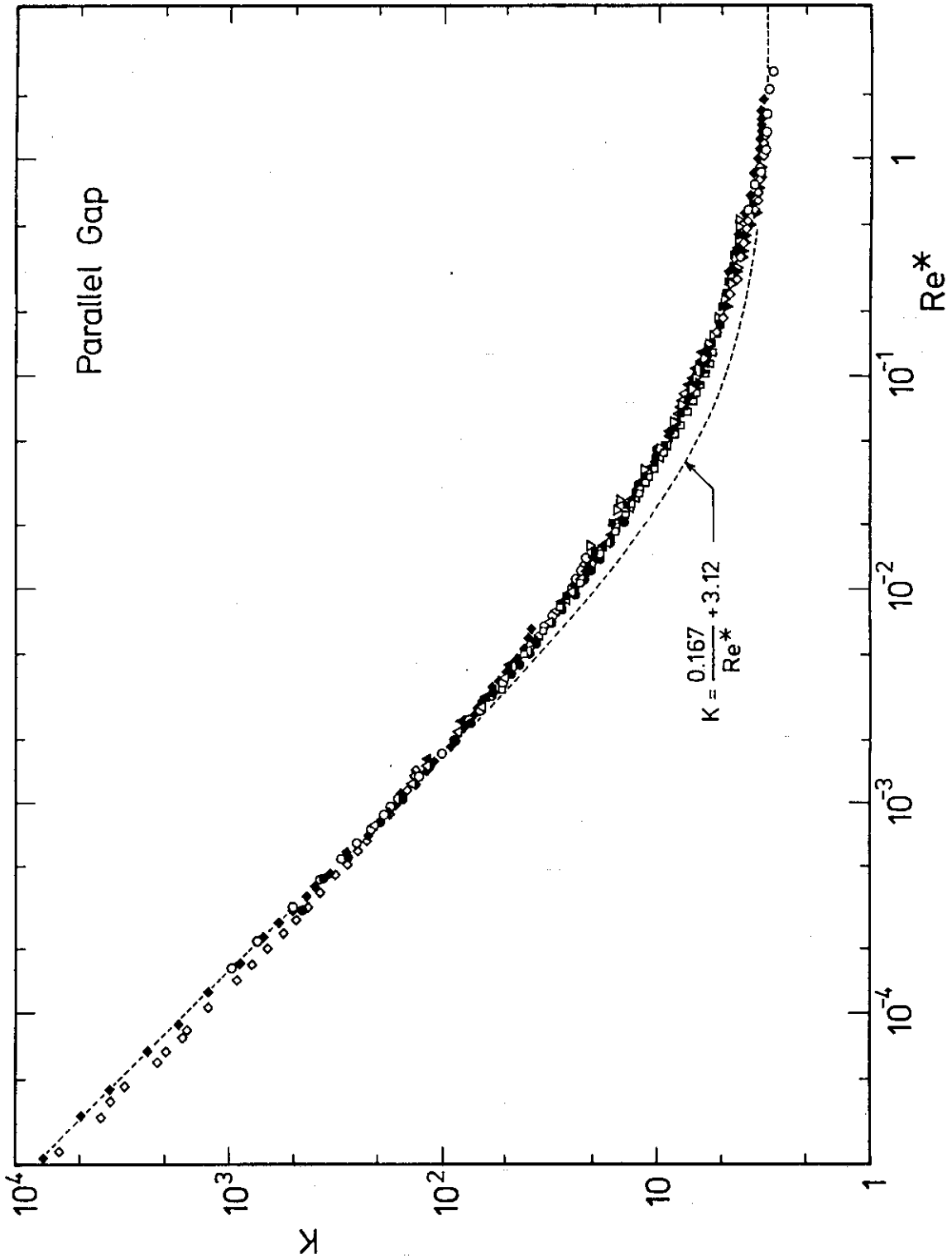


Fig.9(a) Pressure Loss Coefficient K vs. Dimensionless Reduced Reynolds Number Re^* for Parallel Gaps

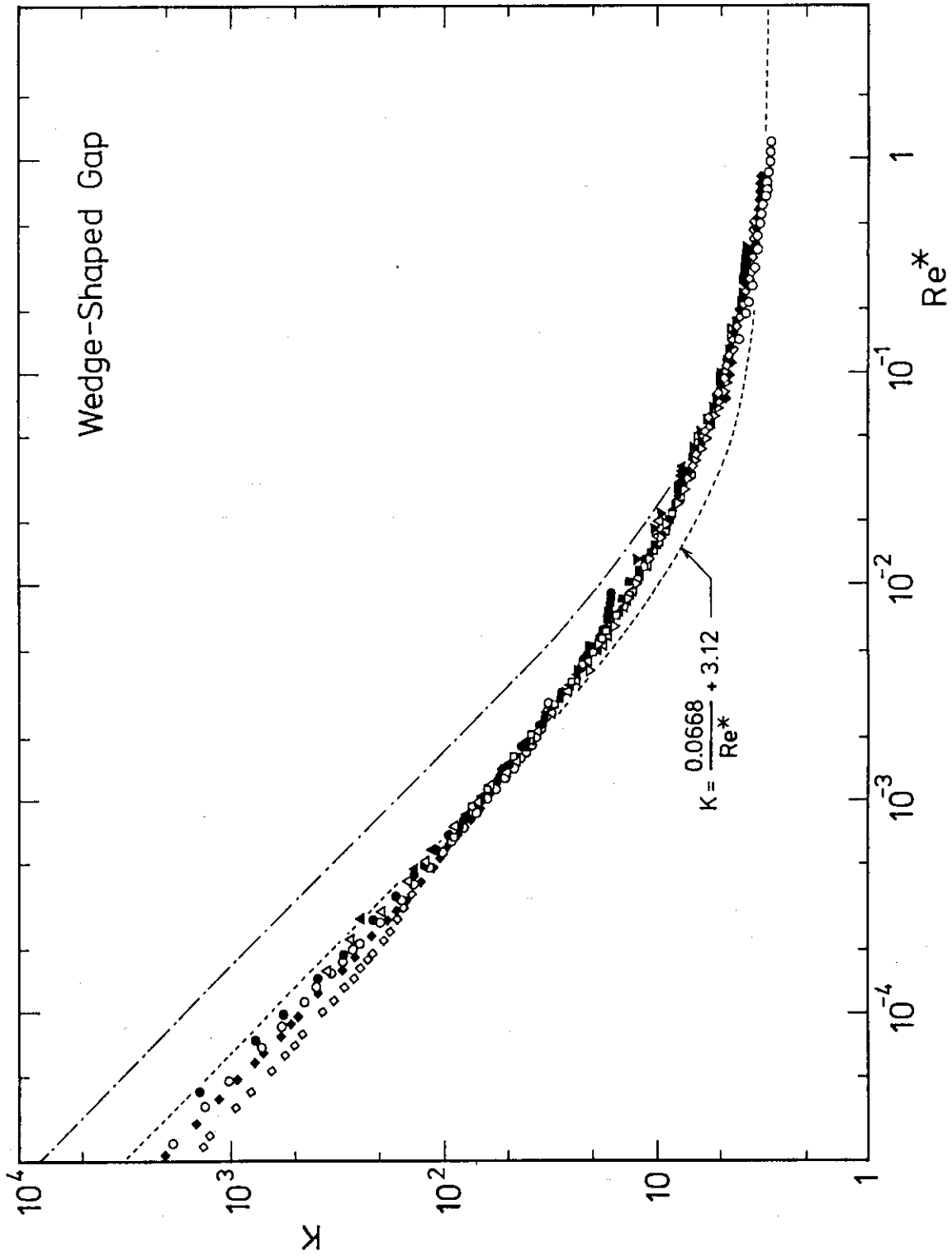


Fig-9(b) Pressure Loss Coefficient K vs. Dimensionless Reduced Reynolds Number Re^* for Wedge-Shaped Gaps

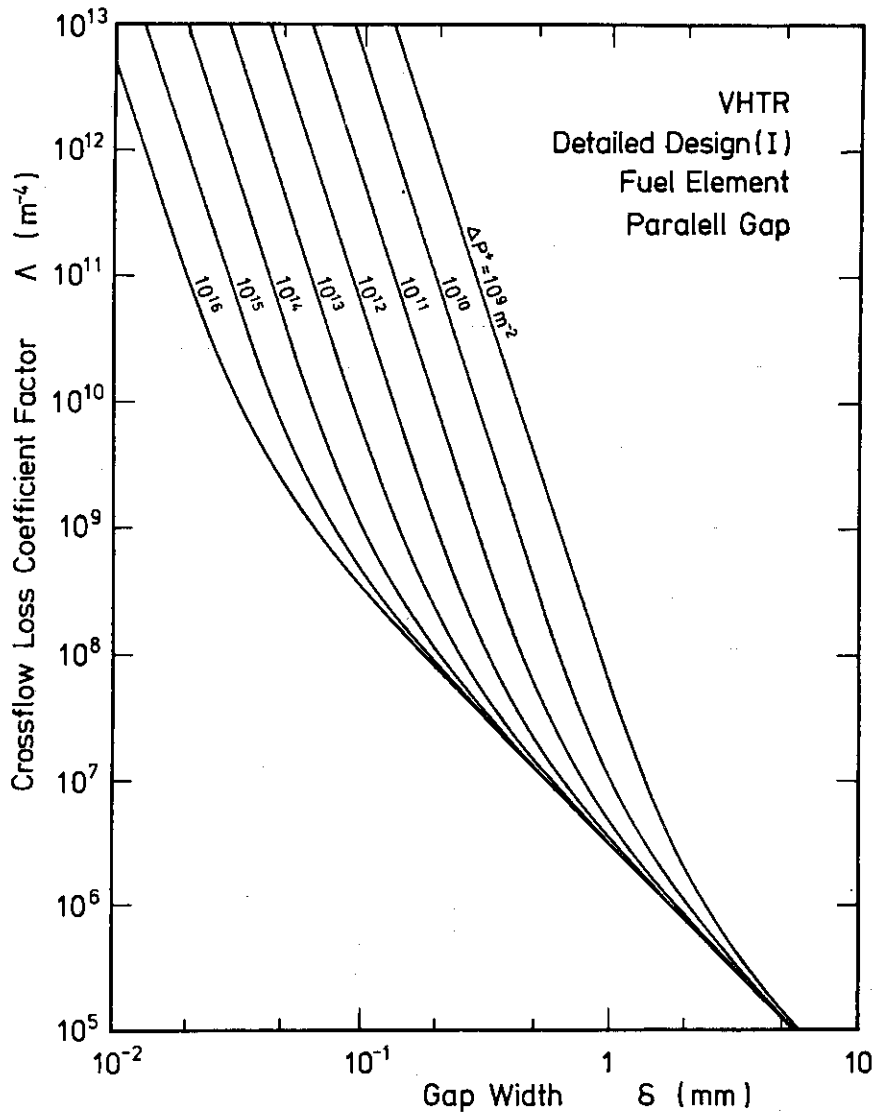


Fig-10(a) Variation of Crossflow Loss Coefficient Factor with Gap Width for Different Values of Reduced Pressure Difference for Parallel Gap

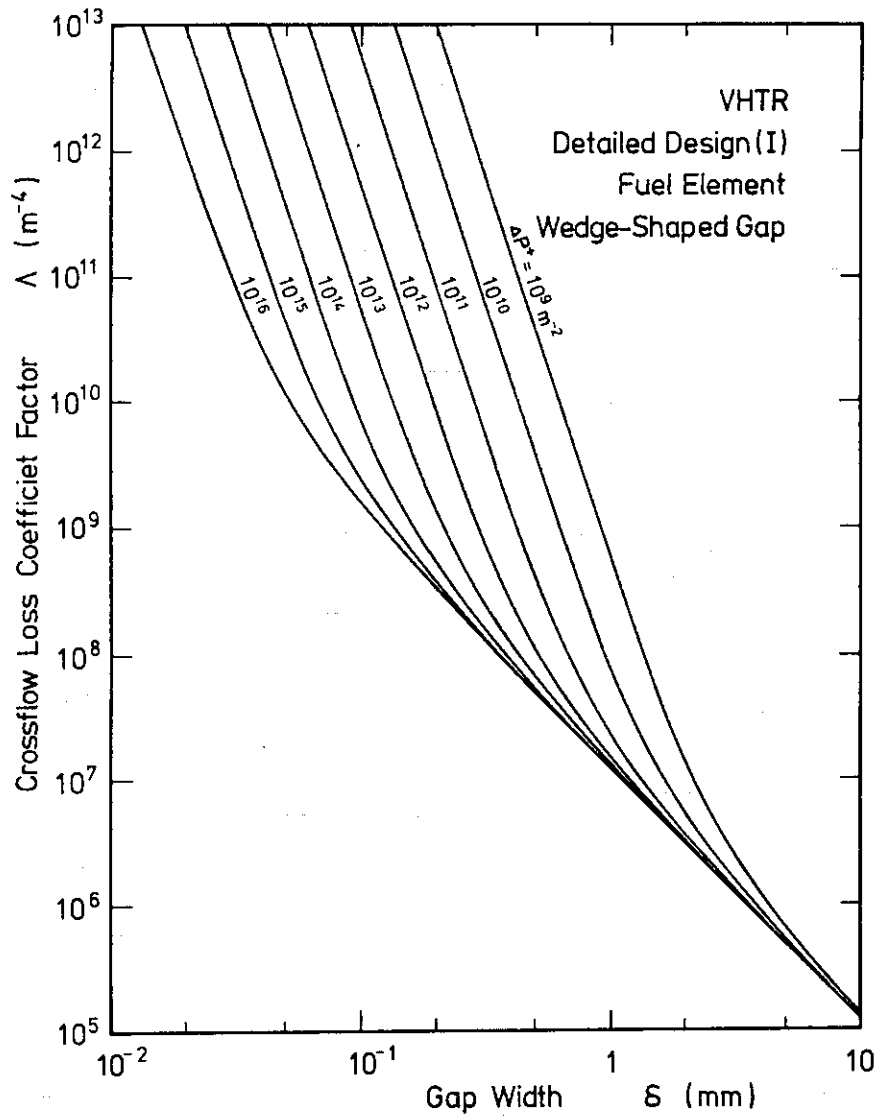


Fig.10(b) Variation of Crossflow Loss Coefficient Factor with Gap Width for Different Values of Reduced Pressure Difference for Wedge-Shaped Gap

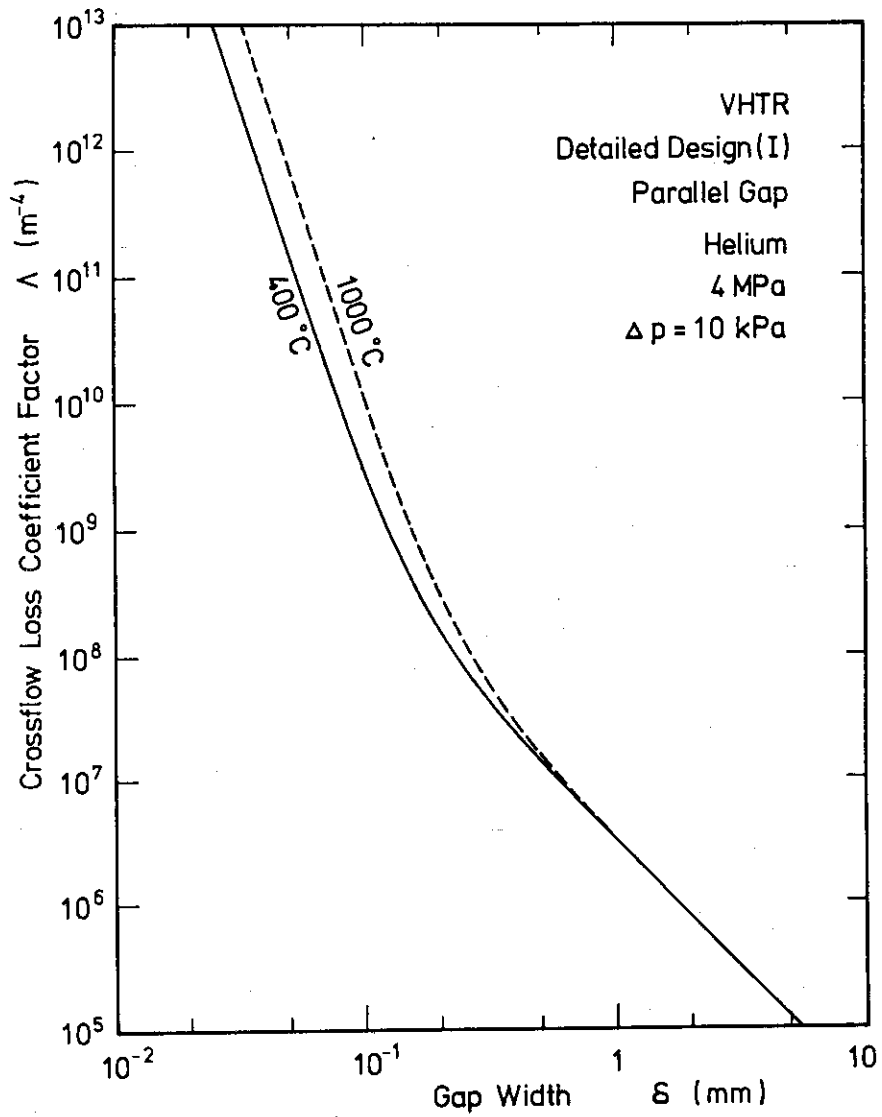


Fig. 11(a) Variation of Crossflow Loss Coefficient Factor with Gap Width Under Typical VHTR Core Operating Conditions for Parallel Gap

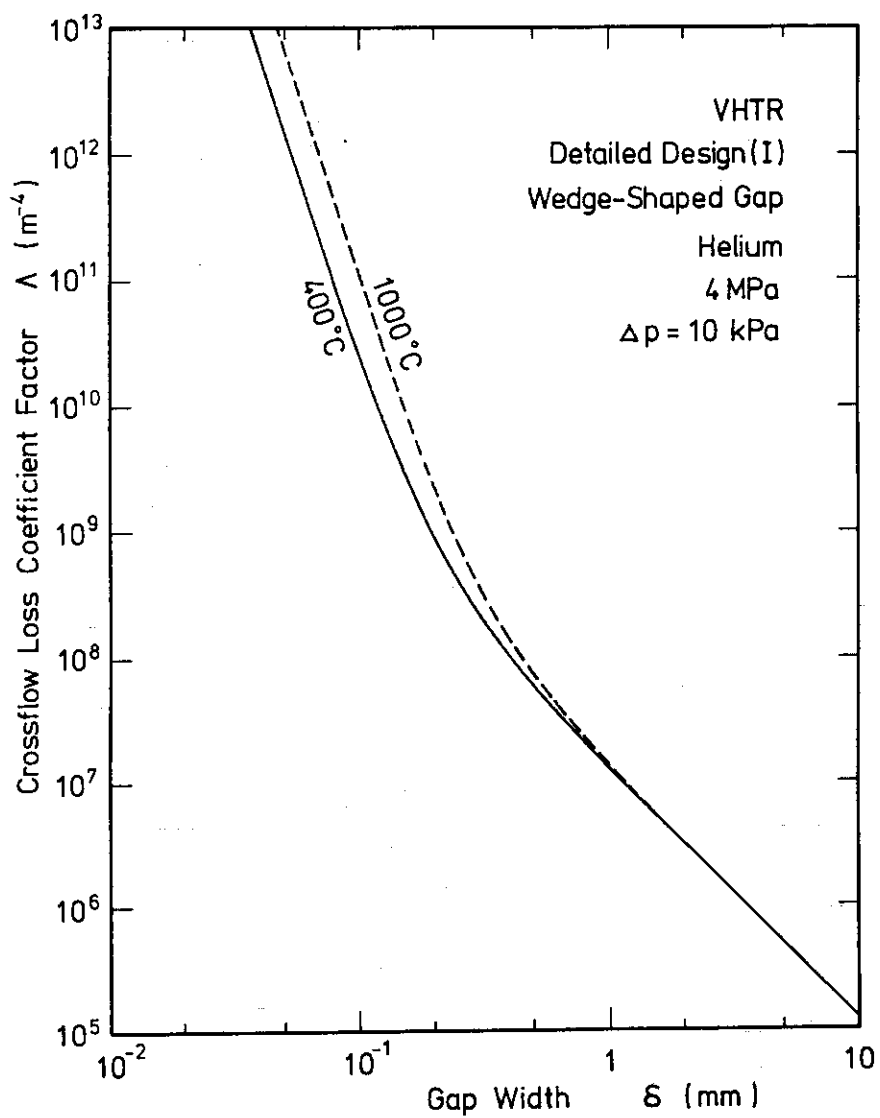


Fig. 11(b) Variation of Crossflow Loss Coefficient Factor with Gap Width Under Typical VHTR Core Operating Conditions for Wedge-Shaped Gap

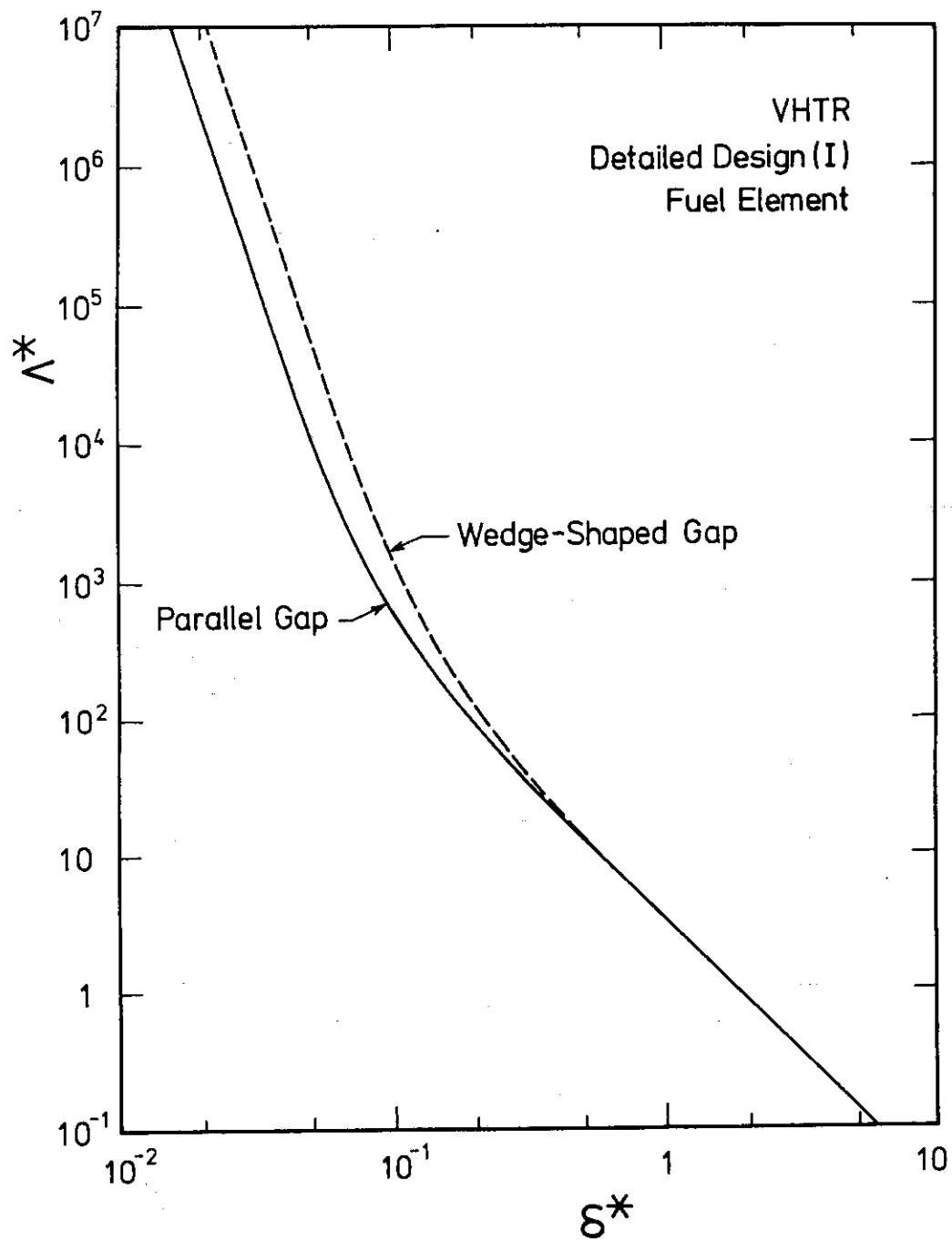


Fig.12 Variation of Dimensionless Crossflow Loss Coefficient Factor A^* with Dimensionless Gap Width δ^*