

冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(VI)

— DINUS-3コードによるナトリウム温度ゆらぎ特性の検討 —

1994年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (VI)
～DINUS-3 コードによるナトリウム温度ゆらぎ特性の検討～

村松 壽晴*

要 旨

炉心構成要素毎の熱流力特性（集合体発熱量、集合体流量）の違いから、炉心燃料集合体間あるいは炉心燃料集合体 - 制御棒集合体間などで冷却材に温度差が生じ、それらが混合する過程で不規則な温度ゆらぎ挙動が原子炉の炉心出口近傍に発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が、炉心上部機構各部（整流筒、制御棒上部案内管、集合体出口温度計装ウエルなど）の表面近傍を通過する際に、冷却材中の不規則な温度ゆらぎが構造材中に伝播すると、その材料は高サイクル熱疲労を受ける（サーマルストライピング）。特に、冷却材として液体金属ナトリウムを使用する高速増殖炉では、高い熱伝導率を持つ液体金属ナトリウムの性質から大きな熱疲労の発生が懸念されている。

本報では、分子拡散効果が乱流拡散効果に対して相対的に卓越する液体金属流の温度ゆらぎ評価に対する DINUS-3 コードの適用性を検討するため、非等温平行噴流ナトリウム実験の解析を行い、水を作動流体とした同実験結果との比較検討を行った。この結果、実験により既に確認されている以下の特性を、模擬できることが確かめられた。

- (1) ナトリウムを作動流体とした場合の境界層による温度ゆらぎ振幅の減衰量は、境界層厚さが水の場合の約 1/4 と薄いため、水を作動流体とした場合の約 1/3 倍に留まる。ナトリウムを作動流体とした場合、境界層厚さが薄くなる主な原因は、分子拡散効果が卓越することにより境界層内での状態量が急速に平坦化されるためである。
- (2) ナトリウムを作動流体とした場合の確率密度関数の標準偏差は、水を作動流体とした場合の約半分となる。これは、ナトリウムが持つ高い熱伝導率と小さな分子粘性に起因するものであり、現象自体が小渦塊スケールに支配されるためである。
- (3) 作動流体の違いによる温度ゆらぎ頻度分布特性の変化は、実験において未だ現象論的解釈が行われていないものの、実験で確認されているその特性の変化、すなわち、水を作動流体とした場合の温度ゆらぎ頻度分布がレイリー分布に従い、またナトリウムを作動流体とした場合のそれが指数分布となる実験的事実はDINUS-3 コードによって模擬可能である。

以上より、DINUS-3 コードは、分子拡散効果が相対的に卓越する液体金属温度ゆらぎ現象の評価に対しても十分な適用性を持つことが確認された。

*：大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

Development of Analytical Model for Temperature Fluctuation in Coolant (VI)
~Investigation of Sodium Temperature Fluctuation by the DINUS-3 Code~

Toshiharu MURAMATSU*

Abstract

A three-dimensional temperature fluctuation analysis was carried out using a general-purpose multi-dimensional thermohydraulics direct numerical simulation code DINUS-3 for parallel impinging jet experiments in sodium and water simulating thermal striping phenomena. The code utilized a third-order upwind scheme and an adaptive control system based on the Fuzzy theory to control time step sizes. The calculated results in both the cases showed evident differences mainly attributed to fluid properties such as heat conductivity, molecular viscosity, etc.. From the analysis, the following conclusions were obtained. (1) The amount of the temperature fluctuation damping by fluid mixing in sodium flow shows approximately two times larger than in water flow. While the damping amounts due to the laminar sub-layer in sodium flow is approximately 1/3 of that in water flow. (2) The variance of the probability density function for the calculated sodium temperature fluctuations is two times of the calculated water temperature fluctuations, and (3) The histogram of the normalized amplitude for calculated water temperature fluctuations can be fitted by a Layleigh distribution . By contrast, in the sodium case, the profile is very much like a exponential distribution. The results obtained in this work are very encouraging; the DINUS-3 code is one of the efficient measures to evaluate thermal striping phenomena in sodium, a low Prandtl number fluid, when one wishes to perform thermal striping evaluation in Liquid Metal Fast Breeder Reactors.

* : Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC, PNC

冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (VI)

～ DINUS-3 コードによるナトリウム温度ゆらぎ特性の検討 ～

目 次

第 1 章 緒 言	1
第 2 章 非等温平行噴流ナトリウム実験の解析	2
2.1 実験概要	2
2.2 解析条件	2
2.3 解析結果	2
第 3 章 検討および考察	4
3.1 水実験解析結果の概要	4
3.2 温度ゆらぎ振幅の減衰特性に関する検討	4
3.3 温度ゆらぎ統計量に関する検討	5
第 4 章 結 言	7
参考文献	8
謝 辞	9

List of Figures

Fig. 2-1	Apparatus of Parallel Impinging Jet Experiment	10
Fig. 2-2	Analytical Domain for DINUS-3 Calculations	11
Fig. 2-3	Temperature Contour Transients in Sodium	12
Fig. 2-4	Comparison of Calculated Temperature Transients at the Two Positions From the Test Piece Surface in Sodium	13
Fig. 3-1	Temperature Contour Transients in Water	14
Fig. 3-2	Sample Transients of calculated Temperature Fluctuation at the Central Position of the Test Piece	15
Fig. 3-3	Calculated Axial Distribution of the Allotment Ratio Between Molecular and Turbulent Diffusions at the Central Position of the Test Piece	16
Fig. 3-4	Comparison of Calculated Fluid Temperature Transients at the Central Position of the Test Piece	17
Fig. 3-5	Comparison of Damping Effects of Temperature Fluctuation Range	18
Fig. 3-6	Comparison of the Ratio of Molecular Diffusion to Whole Diffusion Process	19
Fig. 3-7	Comparison of Probability Density Functions for Calculated Fluid Temperature Transients at the at the Central Position of the Test Piece Between Water and Sodium	20
Fig. 3-8	Comparison of Two-Dimensional Probability Functions for Calculated Fluid Temperature Transients at the at the Central Position of the Test Piece Between Water and Sodium	21
Fig. 3-9	Comparison of Histograms for Calculated Fluid Temperature Fluctuation Range at the at the Central Position of the Test Piece Between Water and Sodium	22
Fig. 3-10	Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Calculated Fluid Temperature Transients at the at the Central Position of the Test Piece Between Water and Sodium	23

第1章 緒言

炉心構成要素毎の熱流力特性（集合体発熱量、集合体流量）の違いから、炉心燃料集合体間あるいは炉心燃料集合体 - 制御棒集合体間などで冷却材に温度差が生じ、それらが混合する過程で不規則な温度ゆらぎ挙動が原子炉の炉心出口近傍に発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が、炉心上部機構各部（整流筒、制御棒上部案内管、集合体出口温度計装ウェルなど）の表面近傍を通過する際に、冷却材中の不規則な温度ゆらぎが構造材中に伝播すると、その材料は高サイクル熱疲労を受ける（サーマルストライピング）。特に、冷却材として液体金属ナトリウムを使用する高速増殖炉では、高い熱伝導率を持つ液体金属ナトリウムの性質から大きな熱疲労の発生が懸念されている。

前報 [1] では、サーマルストライピング現象を特徴づける温度ゆらぎ周期を解析的に評価できるようにするため、3次風上差分法による直接シミュレーションコード DINUS-3 (Direct Numerical Simulation using a 3rd order upwind scheme) を新たに開発し、水を作動流体とした非等温平行噴流実験の解析を通じてその適用性を評価すると共に、実規模体系におけるサーマルストライピング現象の解析的評価の可能性に言及した。

本報では、分子拡散効果が卓越する液体金属ナトリウム流への DINUS-3 コードの適用性を評価すると同時に、作動流体が異なる場合の温度ゆらぎ特性の違いについて検討を加える。

第 2 章 非等温平行噴流ナトリウム実験の解析

2.1 実験概要 [2]

本実験は、作動流体の違いによる温度ゆらぎ挙動の減衰過程を詳細に把握することを目的として、電力中央研究所と米国 EPRI との共同研究の形で実施されたものである。実験に用いられた装置の概略を Fig. 2-1 に示す。実験装置は、19.1 mm 隔てて設置した高低温それぞれのナトリウムを流出させるための 2 本のノズル (幅 5.3 mm)、ノズル下流 38 mm に設置した熱電対 (0.25 mm^φ、非接地型、時定数 20 msec) を有する試験片およびこれを支持するサポートより成り、これらが半径 820 mm x 高さ 565 mm の円筒容器内に収納されている。試験片に設置された熱電対は、試験片近傍の流体温度を計測するためのもの (試験片表面より 2 mm 突起) と試験片の表面温度を計測するためのもの (試験片表面位置) の 2 種類に分類される。これらの熱電対は、試験片の水平方向に 12.5 mm の間隔を持って、それぞれ 20 本が取り付けられた。主要な実験パラメータは、(1) ノズル出口面から試験片表面までの距離 L、(2) 両ノズル間の流量比 β である。

2.2 解析条件

解析は、数多く実施された実験条件の内から、 $L = 38$ mm、 $\beta = 1.0$ とした標準ケースを選定して行った。以下に具体的な実験条件を列記する。

高温側流量・温度	:	28.2 l/min・577 °C
低温側流量・温度	:	28.2 l/min・354 °C
流量比 β	:	1.0
全温度差 ΔT	:	223 °C
レイノルズ数 Re	:	154000 (高温側)、114000 (低温側)

また、解析条件を以下に示す。

計算領域	:	Fig. 2-2 に示す直方体領域 (ポテンシャル コア長が約 31.8 mm (=5.3/2) x 12) であり、試験片表面での温度ゆらぎ挙動に関する議論では、その周囲の流れの影響は無視できる程度に小さいものと判断できる)
座標系	:	x-y-z 3 次元直交座標系
メッシュ分割	:	$350^i \times 5^j \times 190^k$
メッシュ幅	:	0.2 mm ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$)
総メッシュ数	:	332500
模擬時間	:	30 秒 (10 秒間を模擬した初期過渡解析の終了時点を 0 秒とした)
流入条件	:	軸方向流速成分および平均温度は、横方向に分布を持たないとして一様に与えた。
流出条件	:	自由流出
試験片表面条件	:	No-Slip / z 方向 1 次元熱伝導

2.3 解析結果

Fig. 2-3 に、0.2 秒間についての温度場の時間推移を示す。結果より分かる通り、系全体の熱流動挙動は、噴流ノズルより流出した高低温流体が左右に振動しながら下流側に輸送され、試験片に衝突した後左右の流出面より体系外に排出される。ここで特徴的な点は、流体の連続的な振動に伴い、高温流体あるいは低温流体が離散的に存在し、解析体系中に高温領域 (ホットスポット) と低温領域 (コールドスポット) が点在することにある。

試験片に流体中温度測定用として取り付けられた合計 20 点の熱電対の内、その中央位置に相当する場所での温度ゆらぎ挙動を 10 秒間について Fig. 2-4 に示す。同図内上図は、試験片表面より 2.0 mm 位置 (境界層外側) での解析結果であり、下図は試験片表面より 0.1 mm 位置 (境界層内側) での結果である。結果より分かる様に、境界層の外側での温度ゆらぎ振幅は境界層を通過することによって大きく減衰されている。これは、境界層内での熱流動挙動が分子拡散に支配されていることを表すものであり、境界層外側での挙動 (乱流拡散) と質的に異なるものである。詳細は、次章で記述する。

第3章 検討および考察

3.1 水実験解析結果の概要 [1]

実験 [3] は、前章で記述したナトリウム実験でのものと同一の装置、試験片および熱電対を用いて実施されている。また、DINUS-3 による解析についても、ナトリウム実験解析条件と同様に、 $L = 38 \text{ mm}$ および $\beta = 1.0$ の標準ケースについて行われている。

Fig. 3-1 に、0.2 秒間についての温度場の時間推移を示す。結果より分かる通り、系全体の熱流動挙動は、噴流ノズルより流出した高低温流体が左右に振動しながら下流側に輸送され、試験片に衝突した後左右の流出面より体系外に排出される。この全体的な挙動は、ナトリウムを作動流体とした場合と同様である。

試験片に流体中温度測定用として取り付けられてた合計 20 点の熱電対の内、その中央位置に相当する場所での温度ゆらぎ挙動を 5 秒間について Fig. 3-2 に示す。同図内上図は、試験片表面より 2.0 mm 位置 (境界層外側) での解析結果であり、下図は試験片表面より 0.1 mm 位置 (境界層内側) での結果である。境界層内外での温度ゆらぎ振幅は、ナトリウムでの場合と同様に、境界層を通過することによって減衰されている。

Fig. 3-3 は、境界層近傍における熱量輸送に対する乱流拡散効果と分子拡散効果の分担を示したものである。なお、分子拡散量 Γ_M と乱流拡散量 Γ_T は、下式により算出した。

$$\Gamma_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{Cp_i} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_i \quad (3-1)$$

$$\Gamma_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i w'_i \theta'_i \quad (3-2)$$

ここで、

$$w'_i = w_i - \bar{w} = w_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \quad (3-3)$$

$$\theta'_i = T_i - \bar{T} = T_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (3-4)$$

w_i, T_i : i 時点での瞬時値

\bar{w}, \bar{T} : N 点間の平均値

である。同図より分かる通り、分子拡散量 Γ_M の分担は試験片表面に近づくに従って急激に増加し、試験片表面から 0.7 mm 程度の位置で乱流拡散量 Γ_T を上回るようになる。このため、境界層の外側での温度ゆらぎ挙動が試験片表面に到達するまでの過程では、分子拡散効果による大きな減衰効果を受けることを裏付けている。

3.2 温度ゆらぎ振幅の減衰特性に関する検討

Fig. 3-4 に、試験片表面より 2.0 mm 位置 (境界層外側) における 5 秒間の温度ゆらぎ挙動を、水の場合とナトリウムの場合とで比較する。図より分かる通り、ナトリウムを作動流体とした場合の結果では、温度ゆらぎ振幅が水を用いた場合のそれに比べて著しく小さなものとなっている。これは、Moriya ら [3] により指摘されているように、ナトリウムが持つ高熱伝導度に起因して発生したものである。すなわち、高温流体塊

あるいは低温流体塊が輸送される過程では、これらの周囲に存在する異温流体塊との熱的な相互作用によって場の温度を均一にしようとする作用が常に働く。この作用の大きさは、現象を支配する渦スケール同士の乱流混合作用に強く影響されるものの、流体そのものが持つ分子レベルでの熱輸送効果、すなわち熱伝導度に極めて強く依存する。つまり、ナトリウムの熱伝導度が水でのそれに比べて約 100 倍大きいことから、流体塊同士の熱的な相互作用が顕著となり、場の温度を均一にしようとする作用が水の場合よりも大きくなるためである。このような作動流体の違いによる温度ゆらぎ振幅の差異に関しては、これまで多くの研究者 ([4] - [6]) により報告されており、熱伝導度の違いに基づいた解釈が行われている。

Fig. 3-5 に、流体中での温度ゆらぎ挙動が試験片表面に到達するまでの過程における振幅減衰効果について、水とナトリウムを比較する。まず、流体中での乱流混合および熱伝導による減衰効果では、ナトリウムの場合、全温度ゆらぎ振幅の約 4 割が減衰する。この値は、水の場合の約 2 倍に相当する。一方、境界層による減衰効果では、ナトリウムの場合、境界層厚さが水での場合のそれに比べて約 1/4 倍と薄いため、その減衰効果は水での場合の約 1/3 倍と小さいものとなる。結果として、試験片表面上に到達する温度ゆらぎ振幅は、ナトリウムの場合に全温度ゆらぎ振幅の約 41 %、水の場合に約 20 % となる。この値は、同図中の括弧内に示した実験結果 (それぞれ 39 %、18 %) と極めて良好な一致を示す。Fig. 3-6 は、作動流体の違いによる熱的境界層厚さの変化を調べるため、分子拡散量 Γ_M (3-1 式) の割合を試験片表面から軸方向にプロットしたものである。なお、図中には、熱的境界層厚さを示す指標として、分子拡散量が概ね一定になる軸方向位置 (δ) を矢印で示した。図に示した結果によれば、作動流体をナトリウムとした場合の熱的境界層厚さ δ_{sodium} は、水を作動流体とした場合のそれ (δ_{water}) に比べて約 1/4 倍と極めて薄いものとなっている。これは、Fig. 3-5 に示した境界層領域による温度ゆらぎ振幅の減衰効果が、水の場合と比較して小さなものとなる結果を裏付けている。

3.3 温度ゆらぎ統計量に関する検討

Fig. 3-7 に、試験片中央位置における流体温度の規格化確率密度関数をナトリウムと水で比較する。同関数の算出にあたっては、30 秒間の解析結果を使用した。また、両図中には、標準偏差 σ を 1.0、平均値 m を 0.5 とした正規分布 (3-5 式) を実線で示した。

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3-5)$$

図中に示した結果より明かなように、同関数は作動流体の違いによらず正規分布に極めて近いものとなる。このことは、30 秒間の解析結果により、温度ゆらぎに関する統計量を議論するに十分な母集合であることを示唆している。なお、ナトリウムを作動流体とした場合の標準偏差が、水を作動流体とした場合のそれに比べて約半分と小さくなる原因は、熱伝導度の違いに起因したものであると解釈できる。すなわち、文献 [7] で述べられているように、熱伝導度の大きな液体金属流の場合、この熱輸送挙動を支配する渦塊スケールは熱伝導度の小さい流体でのそれに比べ小さくなることに起因する。これは、直感的にも推測できるように、高温あるいは低温の渦塊が温度の異なる渦塊と相互作用を起こす場合、熱伝導度が高い流体では熱輸送量が大きく、結果として渦塊温度が大きく変化するためである。

規格化平均温度 T_M と規格化温度ゆらぎ振幅 T_R との 2 次元確率分布関数を、ナトリウムの場合と水の場合で Fig. 3-8 に比較する。なお、温度ゆらぎ挙動の波形分離には、レインフロー法 [8] を使用した。水を作動流体とした場合の温度ゆらぎ挙動の波形は、 $0.4 < T_M < 0.6$ および $0.2 < T_R < 0.5$ の範囲内に集中し、比

較的白色性の卓越したものであることが分かる。一方、ナトリウムを作動流体とした場合には、優勢な温度ゆらぎ波形は存在せず、比較的小さな温度ゆらぎ振幅の波形のみによって温度ゆらぎ挙動が形成されていることを裏付けている。ここにみられるような作動流体の違いによる温度ゆらぎ特性の顕著な差異は、実験的にも確認されている [7]。

Fig. 3-9 に、規格化温度ゆらぎ振幅 T_R についての頻度分布をナトリウムの場合と水の場合とで比較する。なお、水を作動流体とした場合の図中には (3-6) 式による実線 (レイリー分布) を、ナトリウムを作動流体とした場合の図中には (3-7) 式による実線 (指数分布) をそれぞれ載せた。

$$P(x) = \frac{1}{\sigma^2} x \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\}, \text{ with } \sigma = 0.5 \quad (3-6)$$

$$P(x) = \lambda \exp(-\lambda x), \text{ with } \lambda = 0.5 \quad (3-7)$$

結果より明かなように、水を作動流体とした場合の頻度分布はレイリー分布により、一方ナトリウムを作動流体とした場合の頻度分布は指数分布により極めて良好にフィッティングが行えることが分かる。このような傾向の存在は、守屋らによって実験的に確認 [3] されているものの、その現象論的解釈は未だ行われていない。

Fig. 3-10 は、遅れ時間 τ を 100 として計算した自己パワースペクトル密度関数を比較したものである。図より明かなように、水を作動流体とした場合の分布は、20 Hz 程度まで比較的平坦なパワーが継続するが、ナトリウムを作動流体とした場合には、その平坦な領域が小さくなる。これは、ナトリウムの粘性が水に比べ小さいことから、比較的低周波領域からエネルギーの散逸が相対的に顕著となるためであると解釈できる。

以上に示した温度ゆらぎ統計量の諸特性は、実験において完全に現象論的な解釈が行われていないものも含まれるが、DINUS-3 コードによる結果はそれら全ての傾向を良好に再現した。これにより、分子拡散効果が卓越する液体金属流の評価にも、DINUS-3 コードが十分な適用性を持つことを示唆しているものと判断できる。

第4章 結 言

分子拡散効果が卓越する液体金属流の温度ゆらぎ評価に対する DINUS-3 コードの適用性を検討するため、非等温平行噴流ナトリウム実験の解析を行うと共に、水を作動流体とした同実験結果との比較検討を行って以下の結果を得た。。

- (1) 構造物表面に到達する流体温度ゆらぎ振幅の減衰特性が作動流体によって異なる実験的事実は、DINUS-3 コードによって模擬が可能である。本報での実験体系の場合、構造物の表面に到達する温度ゆらぎ振幅の実験値が、ナトリウムの場合 39 %、水の場合 18 % であるのに対し、DINUS-3 コードによる結果は、それぞれ 40 %、21 % を予測した。
- (2) 作動流体の物性値の違いによって変化する温度ゆらぎ挙動の確率密度関数や頻度分布特性も、同様に模擬可能である。

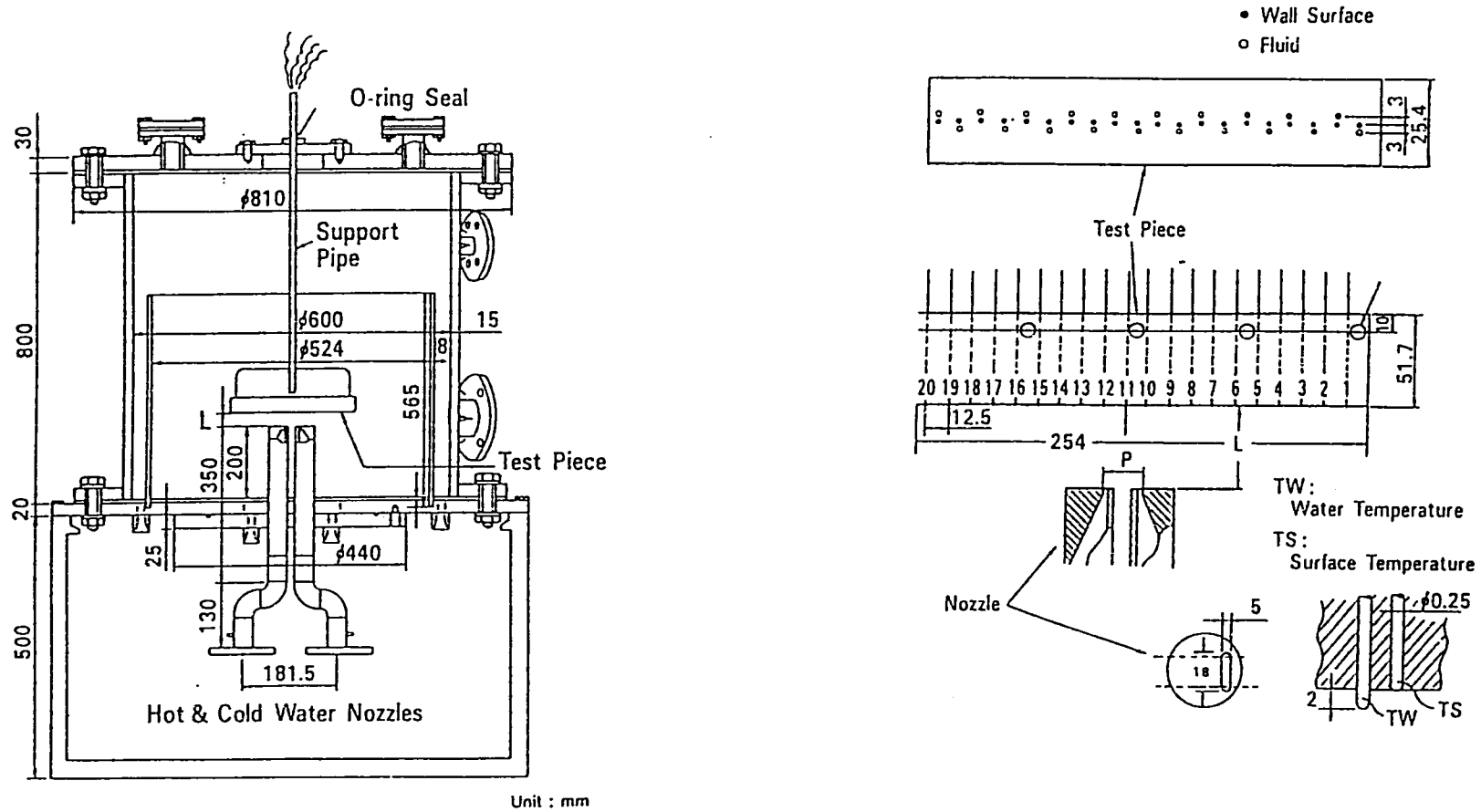
以上より、DINUS-3 コードは、分子拡散効果が卓越する液体金属温度ゆらぎ現象の評価に対しても十分な適用性を持つことが確認された。

参考文献

- [1] 村松 壽晴、冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (IV)、直接シミュレーションによる温度ゆらぎ周期評価手法の開発、PNC ZN9410 92-105 (1992)
- [2] Jetter, R. I., Evaluation of Sodium Thermal Striping Test Results at AI, DOE/PNC Specialist Meeting on Reactor Thermal Hydraulic Performance, Sunnyvale, USA (1982)
- [3] Moriya, S., Ushijima, S., Tanaka, N., Adachi, S. and Ohshima, I., Prediction of Thermal Striping in Reactor, Proc. Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, FR '91, Kyoto, Japan (1991)
- [4] Loos, R. L, Characteristics of Turbulent Temperature Fluctuations in Mercury, M. S. Thesis, Purdue University (1971)
- [5] Hochreiter, L. E., Turbulent Structure of Isothermal and Nonisothermal Liquid Metal Pipe Flow, Ph. D. Thesis, Purdue University (1971)
- [6] Flaherty, T. W., An Investigation of Non-Isothermal Turbulent Pipe Flow of Mercury, Ph. D. Thesis, Purdue University (1974)
- [7] Tsai, H. M., Leslie, D. C. and Voke, P. R., Thermal Striping: Structures in Interacting Jets, Proc. Turbulence 89, Grenoble, France (1991) 125-138.
- [8] Endo, T., Damage Evaluation of Metals for Random or Varying Loading, Proc. Sympo. on Mechanical Behavior of Materials,, 1 (1974) 371-180.

謝 辞

DINUS-3 コードによる解析結果のカラー図形表示は、CSK 株式会社の浜田 隆弘 氏によるものである。直接シミュレーション解析における可視化技術は、熱流動挙動の現象論的解釈に極めて有効であり、同氏の協力に謝意を表します。



Details of the Test Piece

Fig. 2-1 Apparatus of Parallel Impinging Jet Experiment

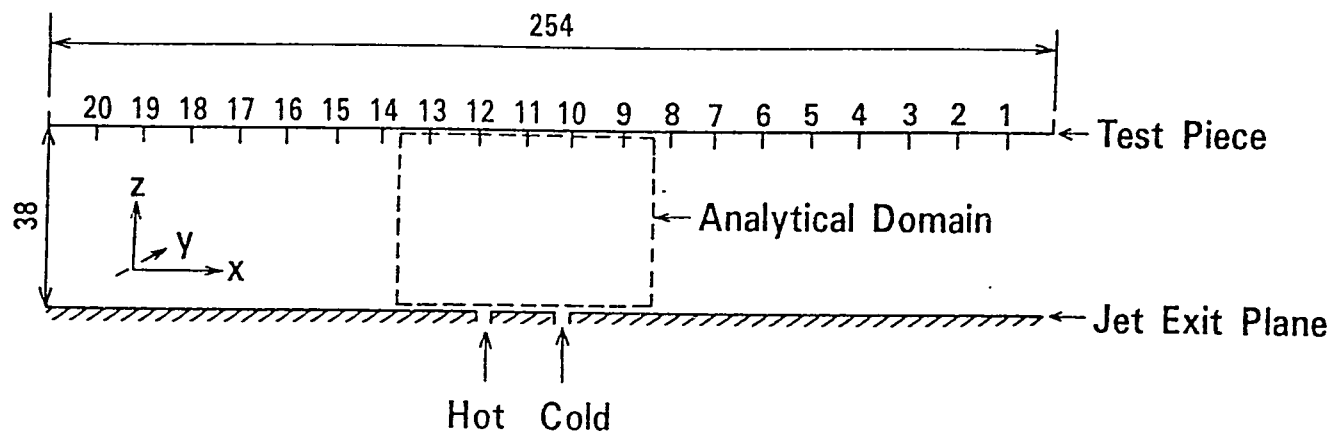
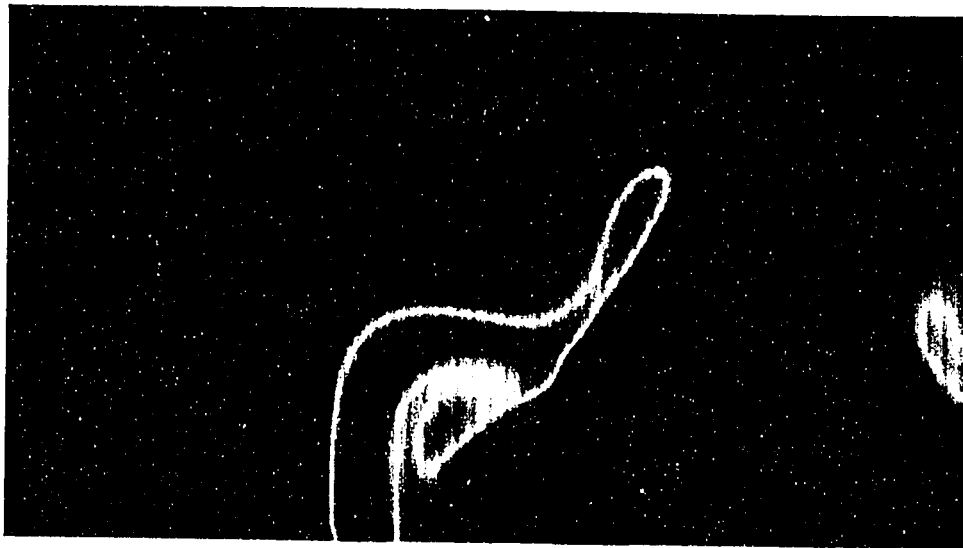
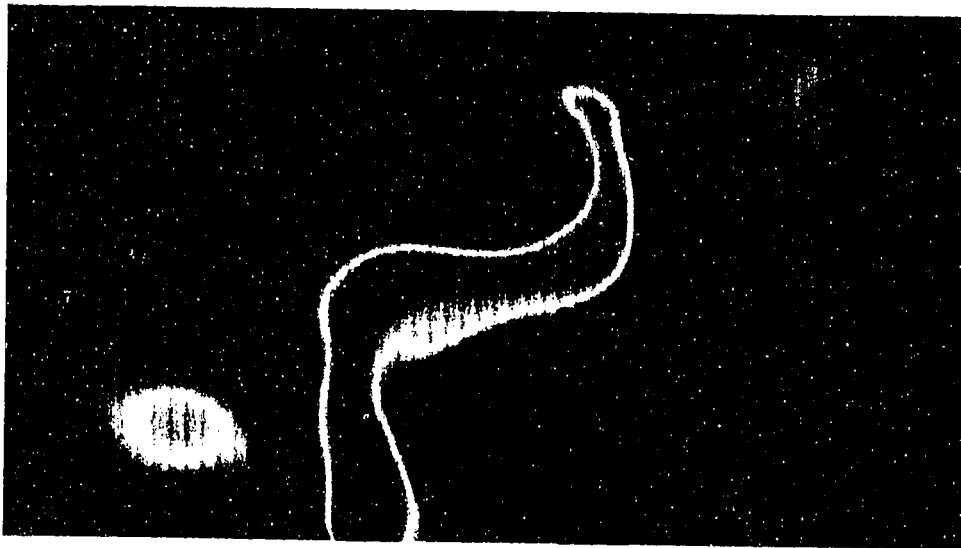


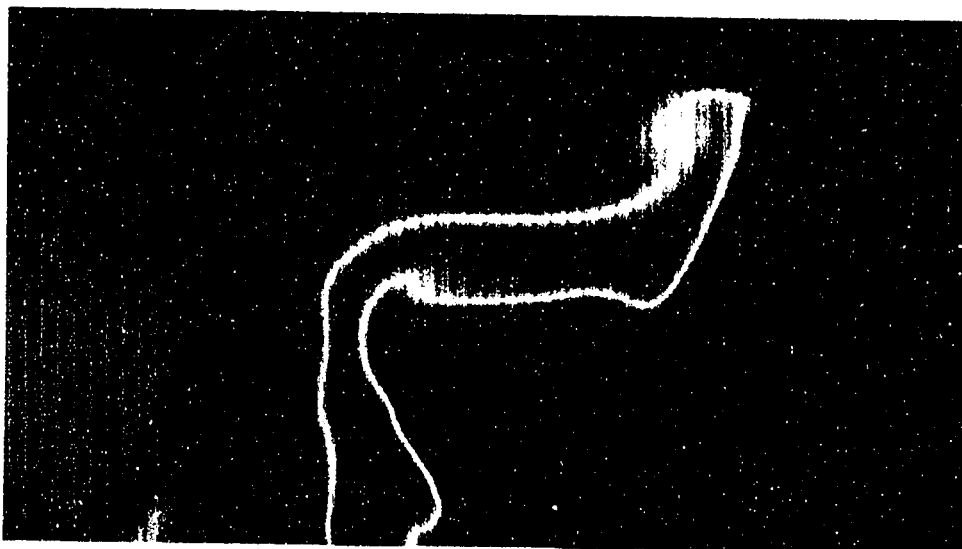
Fig. 2-2 Analytical Domain for DINUS-3 Calculations



0.000 (sec)



0.100(sec)



0.200 (sec)

Temperature Contour Transients in Sodium

Fig. 2-3 Temperature Contour Transients in Sodium

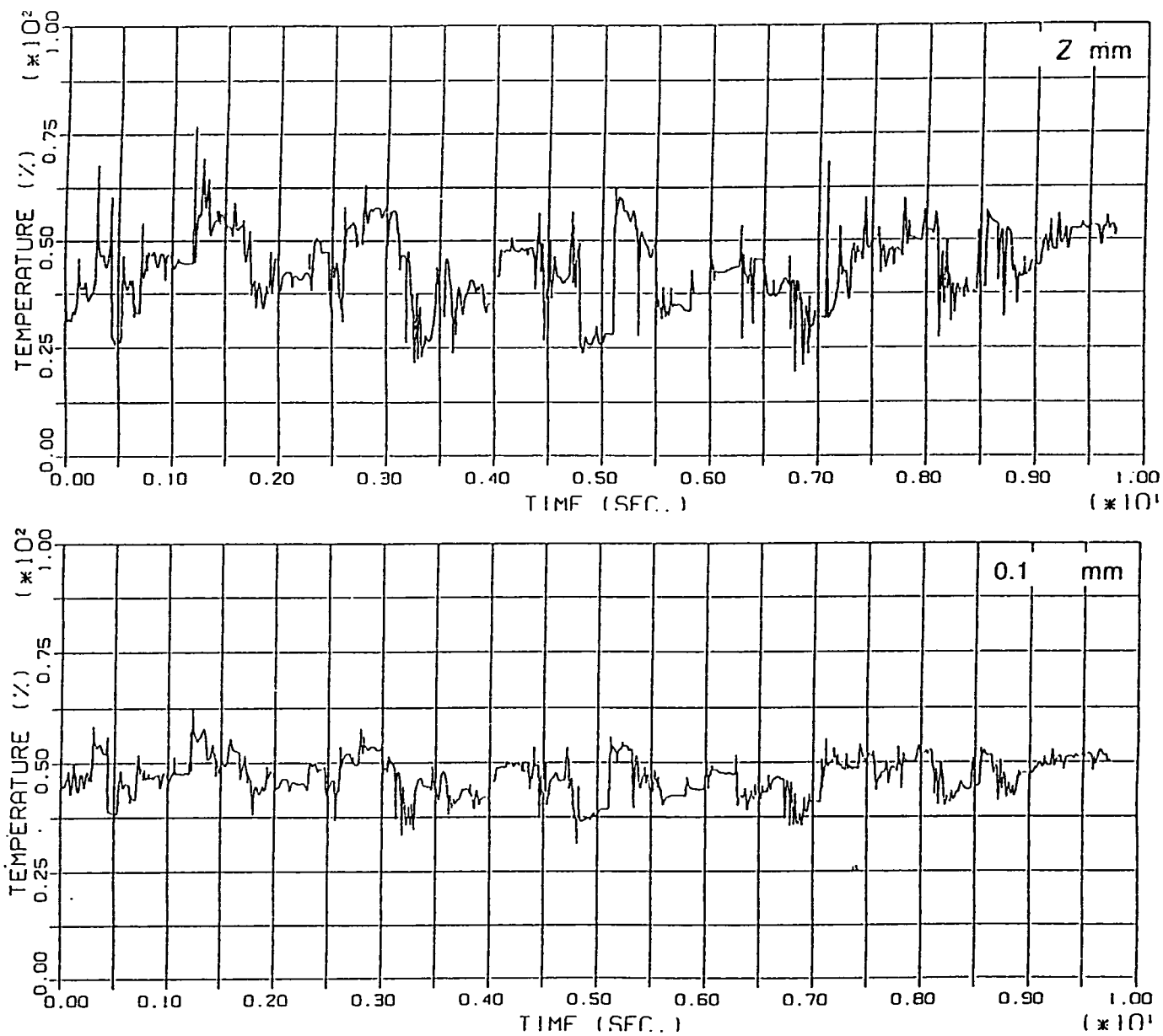
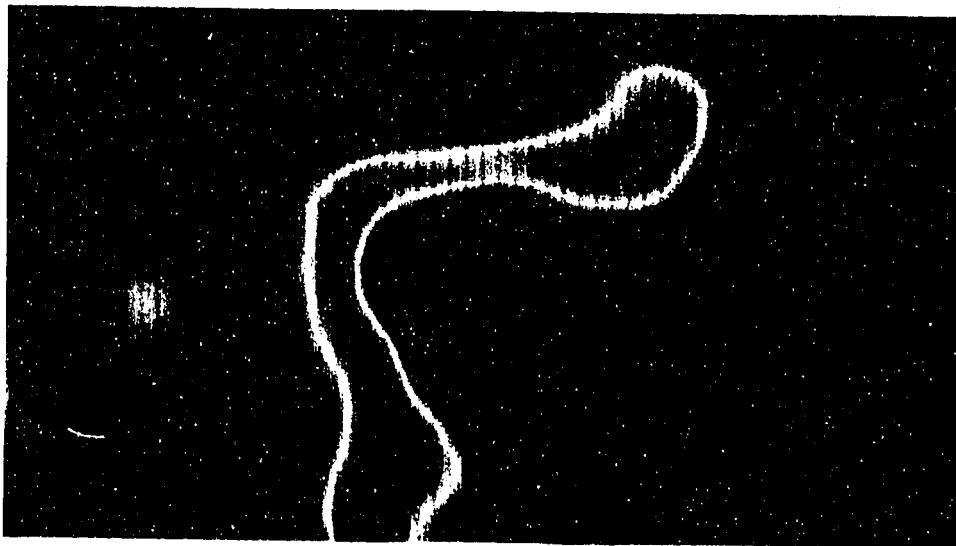


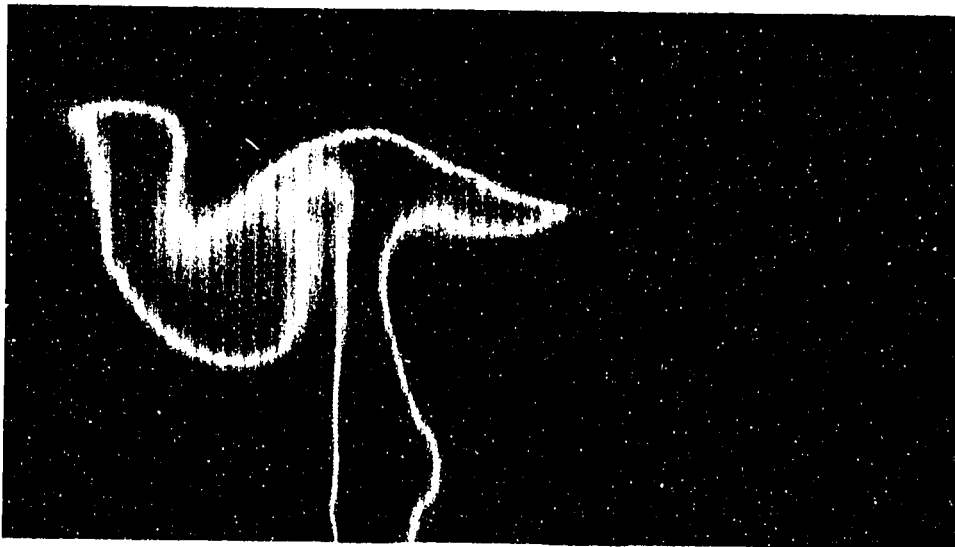
Fig. 2-4 Comparison of Calculated Temperature Transients at the Two Positions From the Test Piece Surface in Sodium



0.000 (sec)



0.100 (sec)



0.200 (sec)

Temperature Contour Transients in Water

Fig. 3-1 Temperature Contour Transients in Water

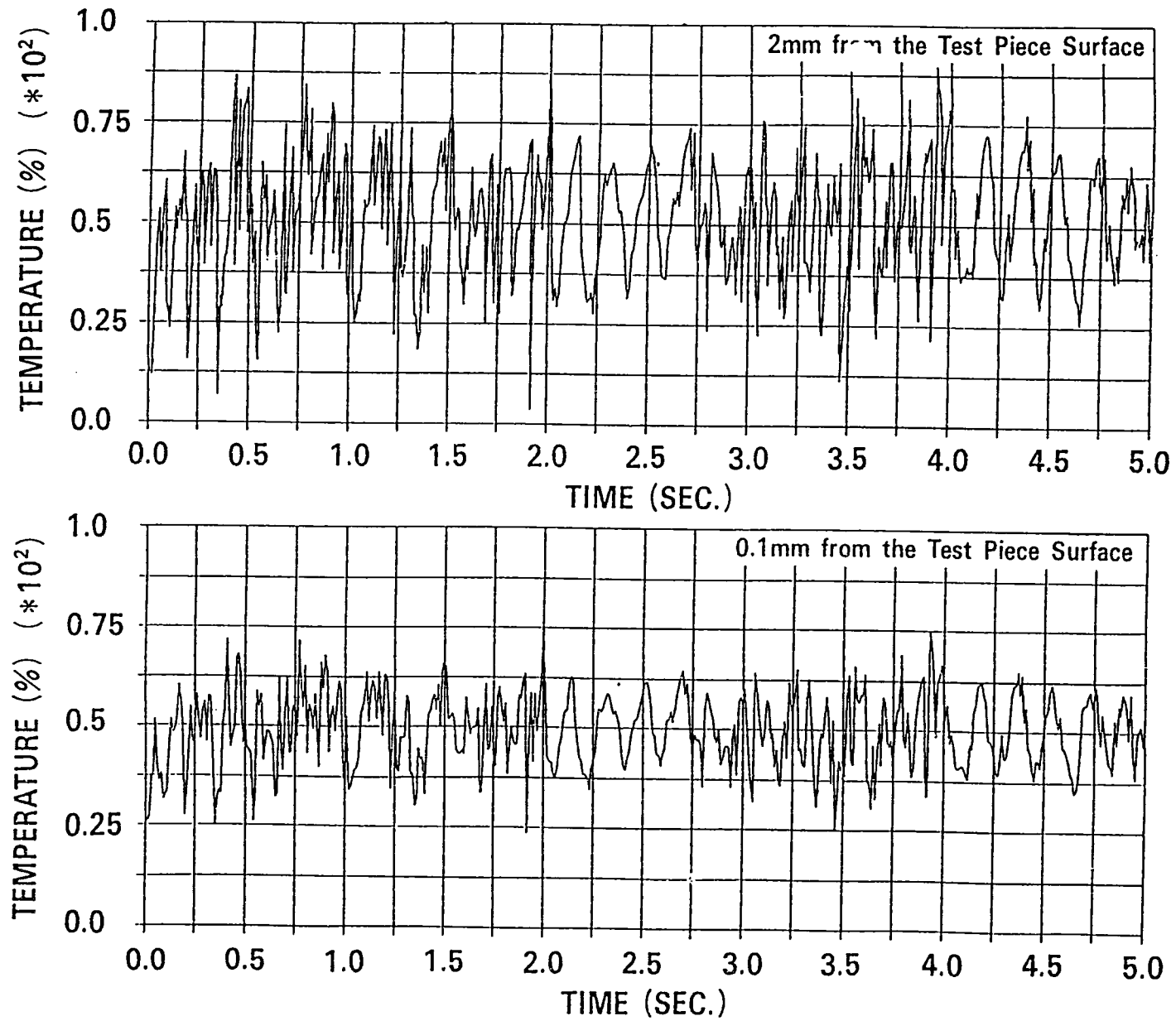


Fig. 3-2 Sample Transients of calculated Temperature Fluctuation at the Central Position of the Test Piece

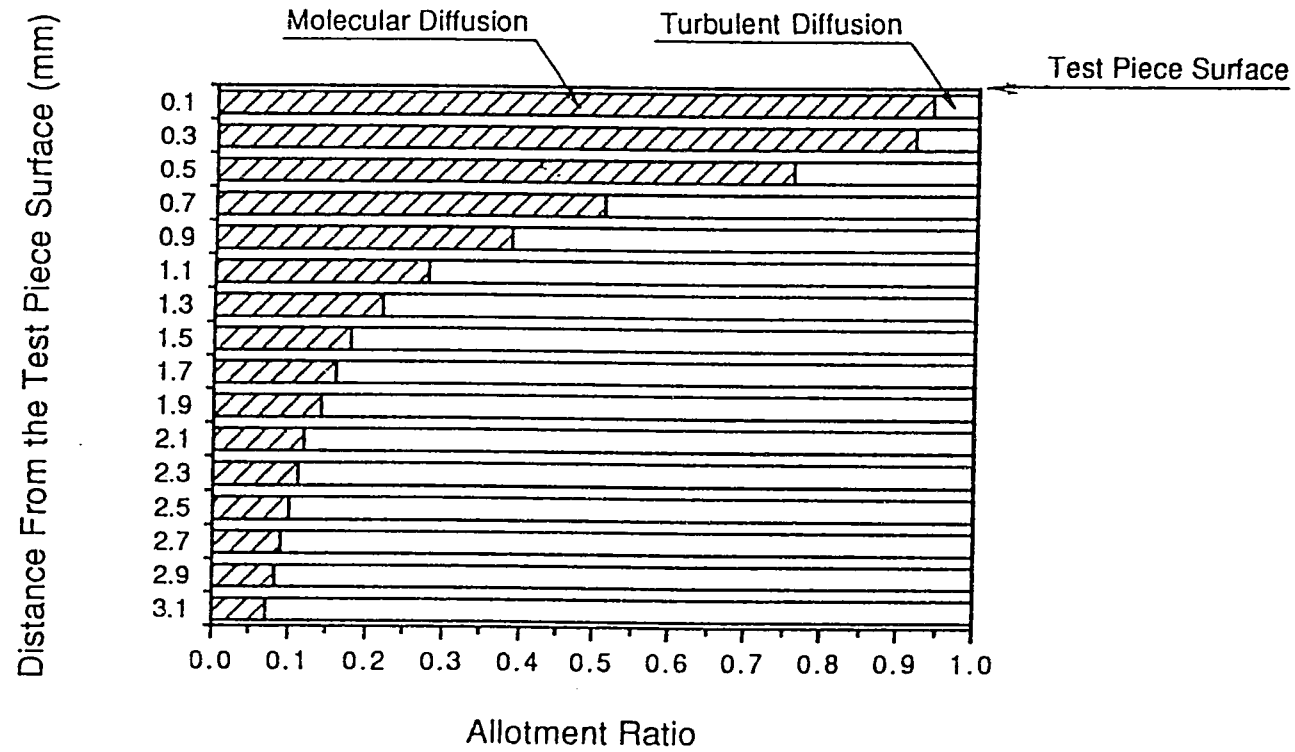


Fig. 3-3 Calculated Axial Distribution of the Allotment Ratio Between Molecular and Turbulent Diffusions at the Central Position of the Test Piece

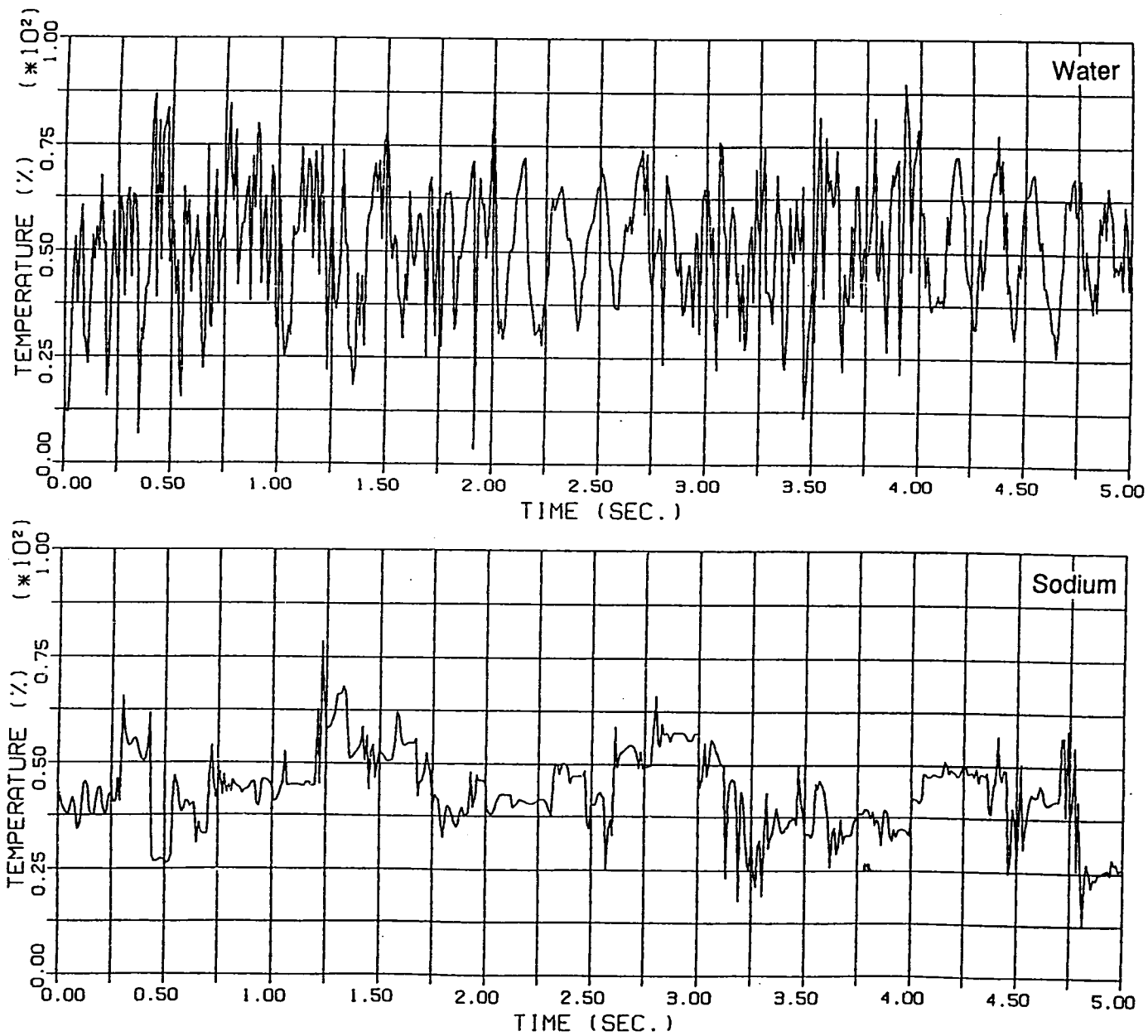


Fig. 3-4 Comparison of Calculated Fluid Temperature Transients at the Central Position of the Test Piece

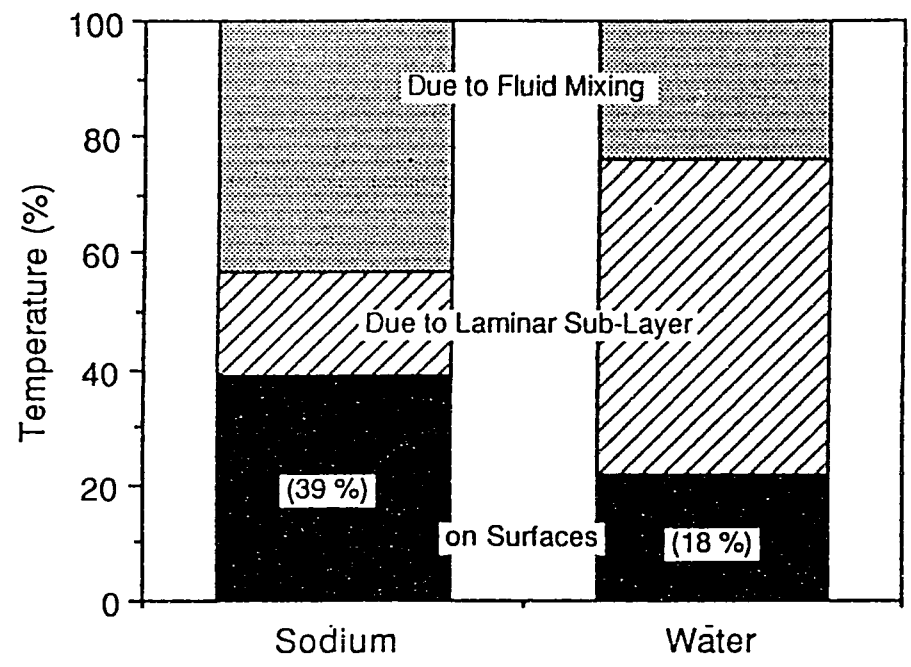


Fig. 3-5 Comparison of Damping Effects of Temperature Fluctuation Range

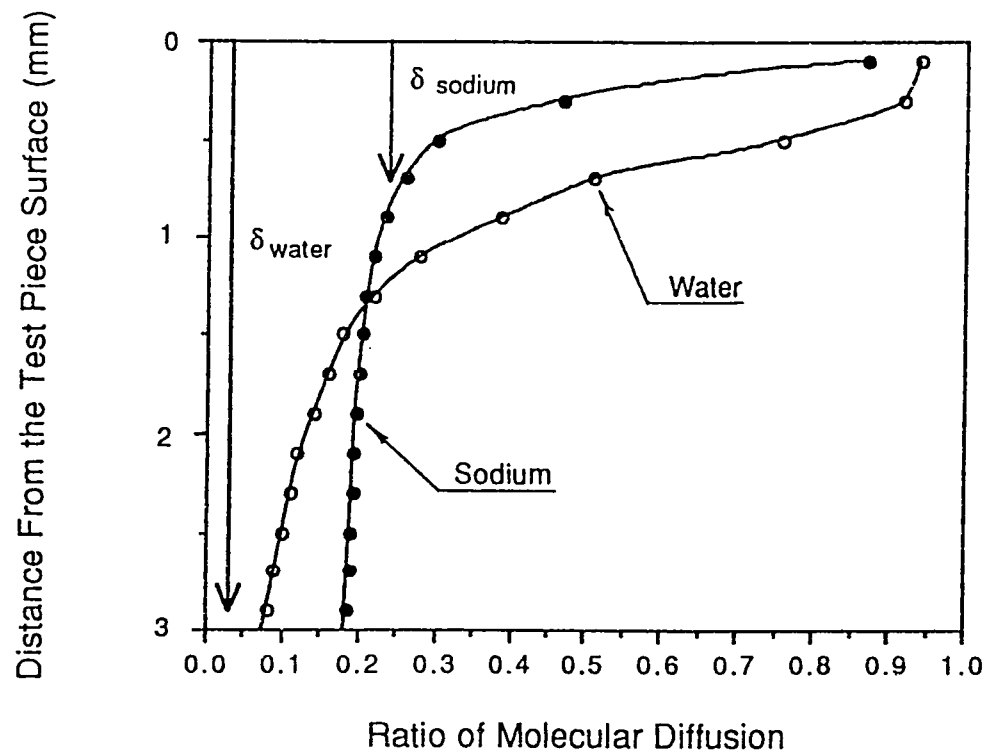


Fig. 3-6 Comparison of the Ratio of Molecular Diffusion to Whole Diffusion Process

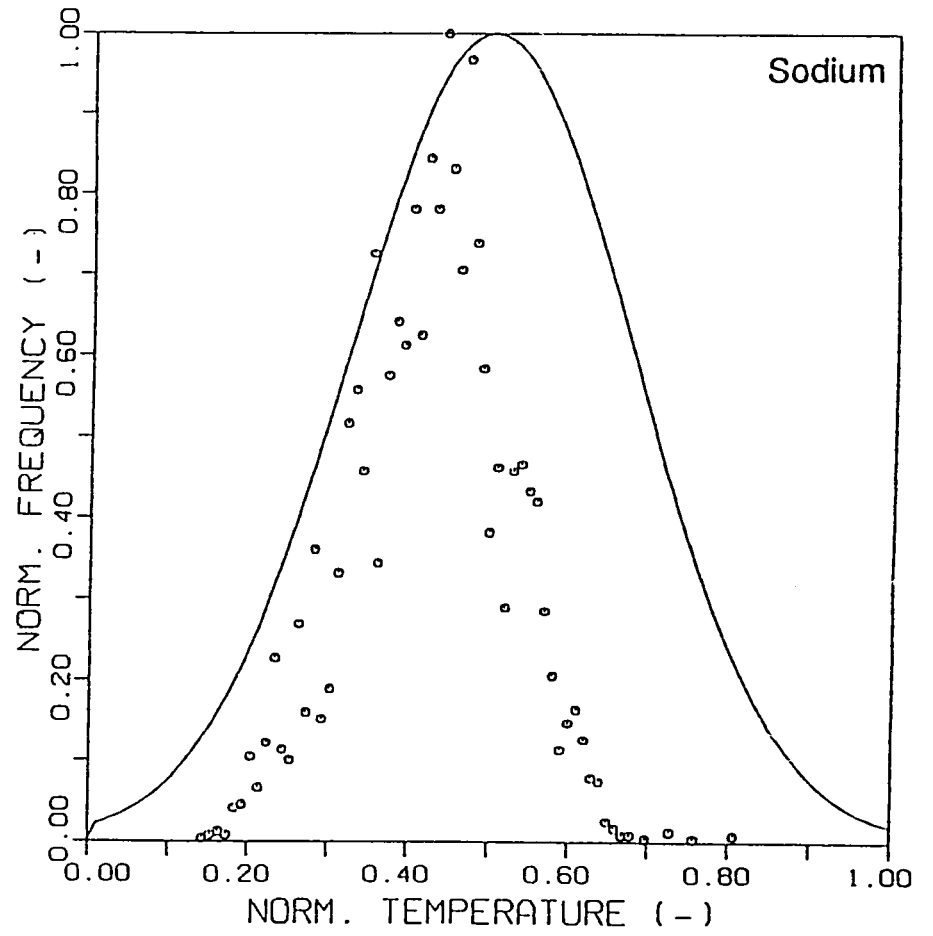
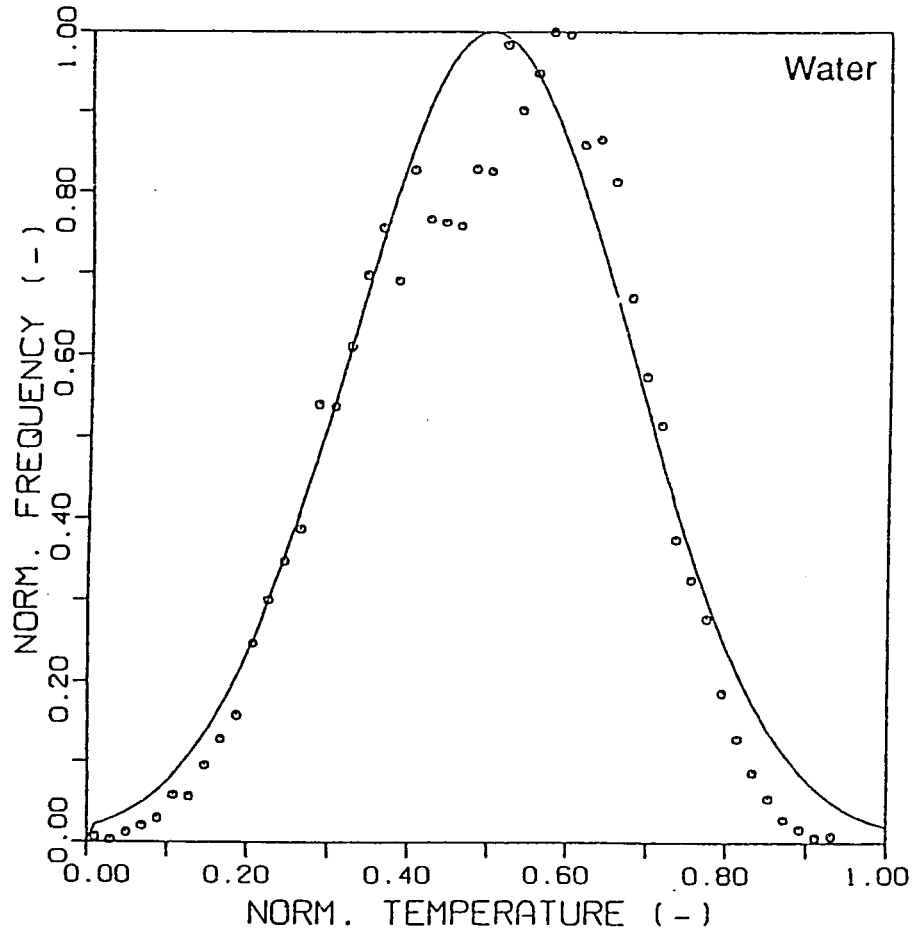


Fig. 3-7 Comparison of Probability Density Functions for Calculated Fluid Temperature Transients at the at the Central Position of the Test Piece Between Water and Sodium

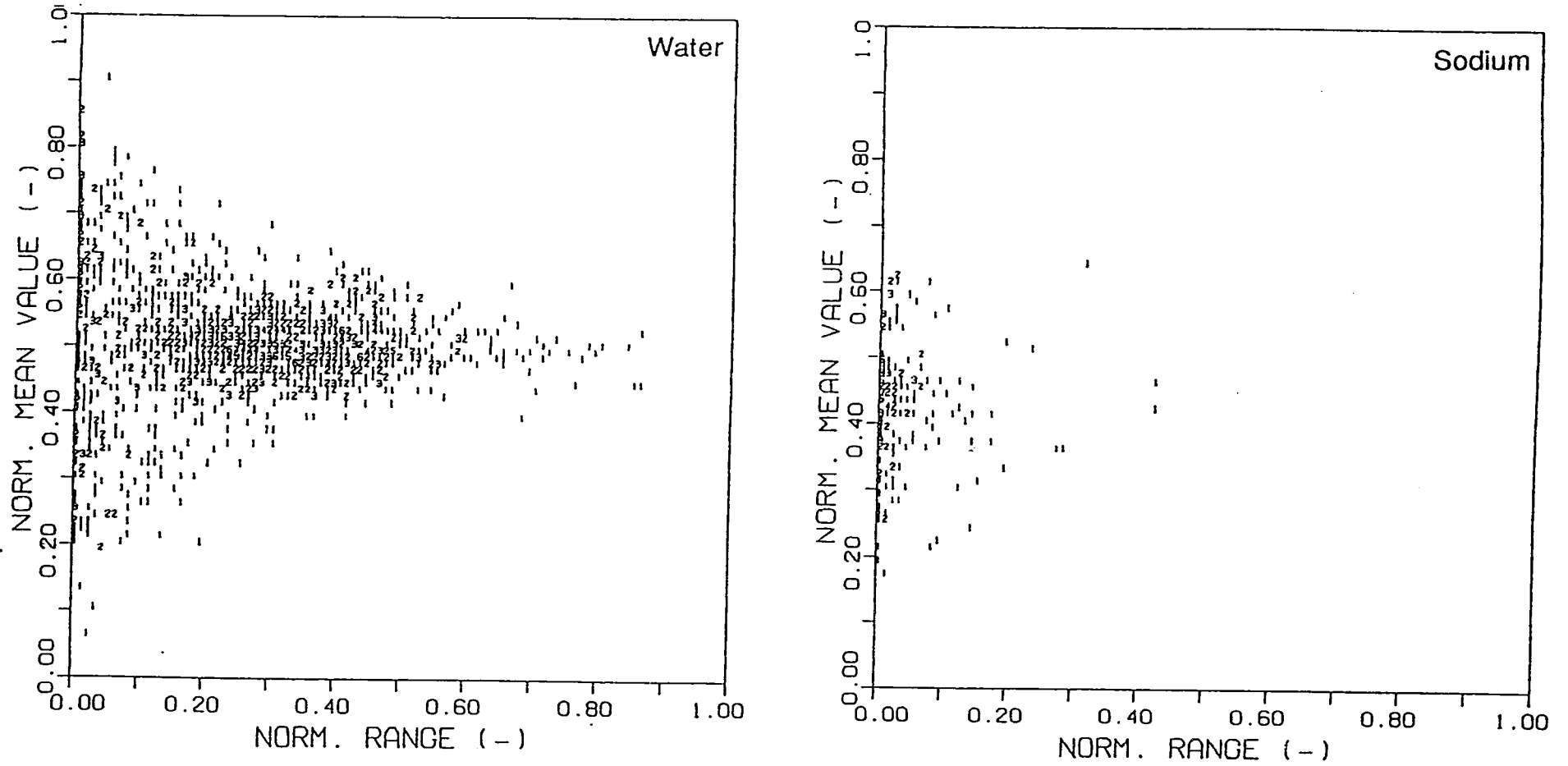


Fig. 3-8 Comparison of Two-Dimensional Probability Functions for Calculated Fluid Temperature Transients at the at the Central Position of the Test Piece Between Water and Sodium

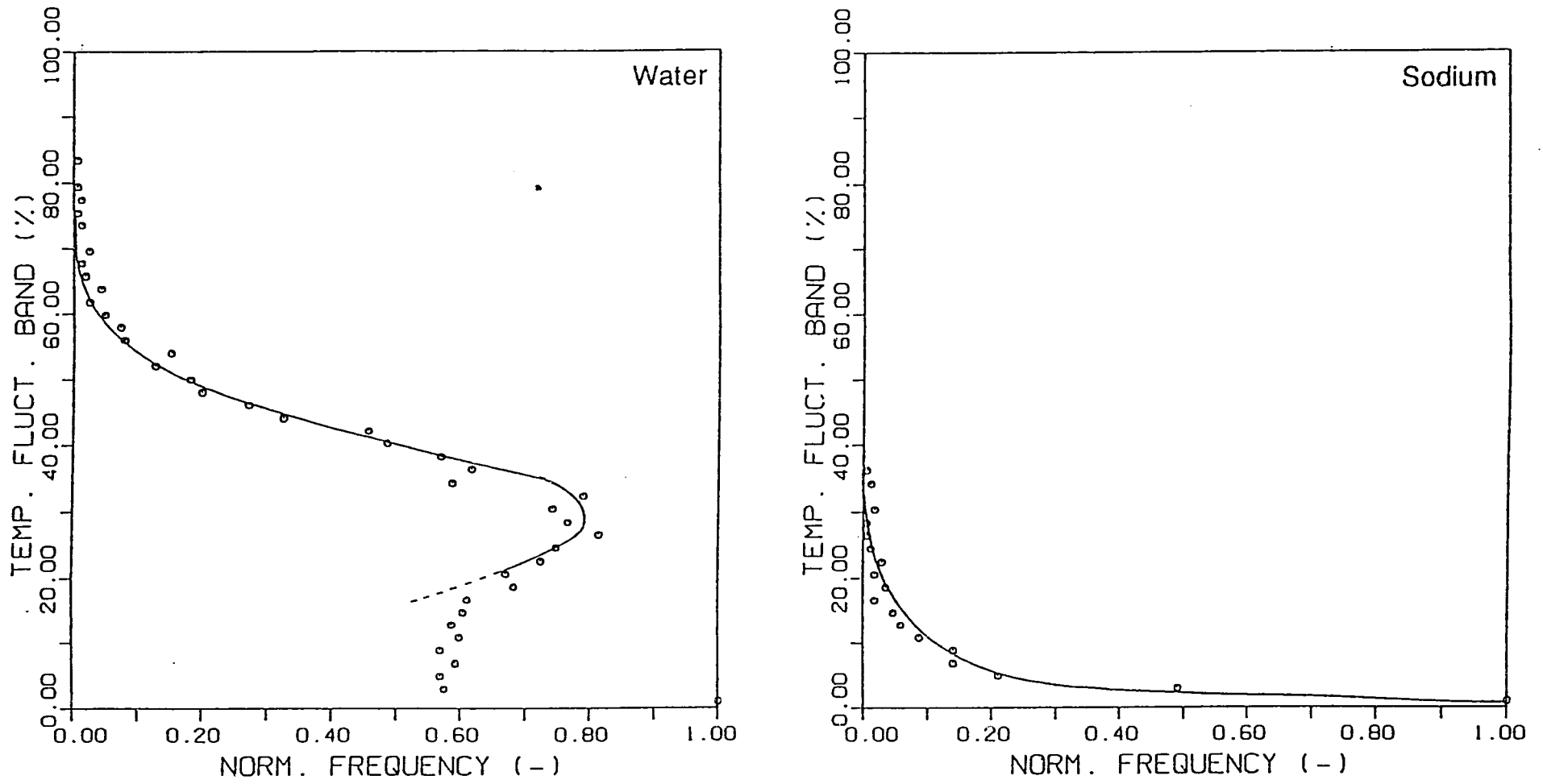


Fig. 3-9 Comparison of Histograms for Calculated Fluid Temperature Fluctuation Range at the at the Central Position of the Test Piece Between Water and Sodium

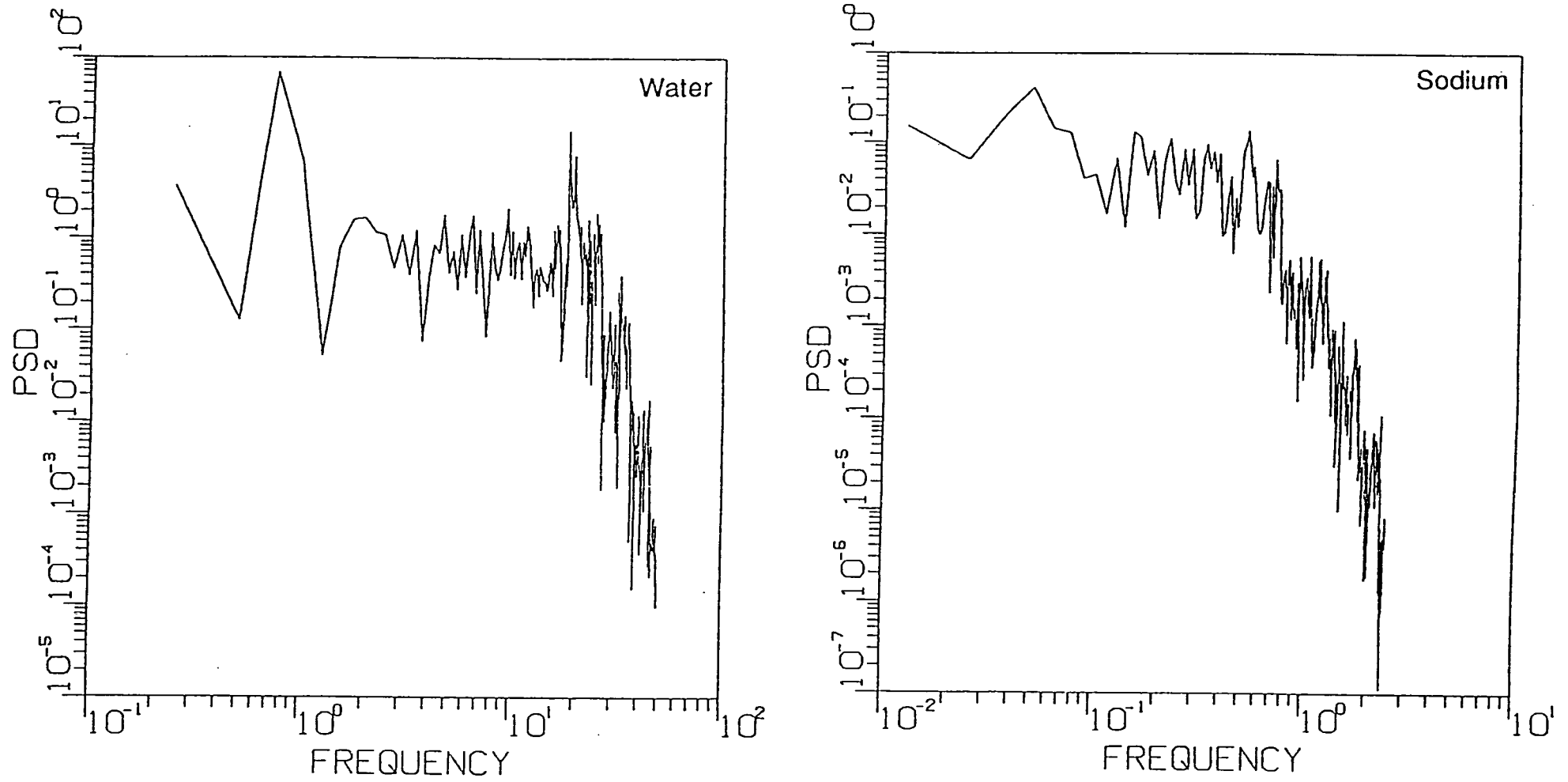


Fig. 3-10 Comparison of Auto-Power Spectral Density Functions for Calculated Fluid Temperature Transients at the at the Central Position of the Test Piece Between Water and Sodium