

超音波温度計ナトリウム試験(1)

—超音波トランスデューサ配管直付型試験体の試験結果のまとめ—

1998年10月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1998

超音波温度計ナトリウム試験(1)

—超音波トランスデューサ配管直付型試験体の試験結果のまとめ—

林田 均*, 小柿 信寿*,
上田 雅司**, 磯崎 正*,
荒 邦章*

要 旨

ナトリウム中の音速が温度により変化することを利用して、配管外からナトリウム温度を計測する超音波温度計の開発を実施している。超音波温度計は、ナトリウム中の伝搬時間を計測し、伝搬時間と伝搬距離から音速を求めて、ナトリウム温度を算出する。超音波温度計の開発の一環として、超音波温度計のナトリウム温度計測適用性を検討するために、実際にナトリウム試験装置により試験を実施した。

その結果、以下のような知見を得た。

- 1) 本試験範囲では、超音波温度計は、Naの流速、カバーガスの圧力、Na中の不純物濃度などの影響を受けない。また、2.5°Cの試験誤差を有する本試験において、超音波による温度計測値のはらつきは約1°C強程度と小さい値になった。
 - 2) 超音波温度計は、低温(200°C)のみの校正と既知の熱膨張係数を用いることで、全試験温度範囲の校正を実施した場合に対して1°C程度の違いに収まる。
 - 3) 超音波伝搬時間の計測は、複数回の超音波送受信による計測の平均値を用いることで十分安定した値が得られる。
 - 4) 超音波トランスデューサと配管との音響結合材としては、水ガラスよりも銅板の方が適している。音響結合材に銅板を用いる場合に、配管への押付力は試験で用いた2.0 kg/mm²よりも小さな値で十分である。
 - 5) 超音波トランスデューサの配管への取り付けは、配管に溶接を必要としないクランプ方式で十分安定して使用できる。
 - 6) 約2ヶ月のNa試験期間では、超音波温度計の計測特性に変化は生じない。
- したがって、本手法の超音波温度計は、配管内のNa温度を計測する温度計として適用可能性が高いと考えられる。

* 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学グループ

** 敦賀本部 国際技術センター プラント制御工学グループ

October, 1998

The Ultrasonic Wave Thermometer Sodium Test (1)

— A Summary of Test Results of the Externally Mounted Ultrasonic Transducer for Pipe-flow —

H. Hayashida*, N. Kokaki*,
M. Ueda**, T. Isozaki*,
K. Ara*

Abstract

Based on the temperature dependence of the velocity of sound in sodium, an ultrasonic thermometer that measures the temperature of sodium non-intrusively is being developed. The principle of the device is based on the propagation time of an acoustic pulse wave, and the back calculation of the sodium temperature. As the part of the development a test was actually carried out in sodium pipe-flow in order to evaluate various aspects of realizing the ultrasonic wave thermometer.

The results and conclusions to date are as follows:

- 1) Within the present test range, the ultrasonic wave thermometer appears relatively insensitive to flow velocity of sodium, pressure of the cover gas and the impurity concentration in sodium. The calculated error of the measured thermometry was in the experiment about 1 °C, a smaller value than the expected 2.5 °C of the system.
- 2) The ultrasonic thermometer has only been used wherein the thermal expansion coefficient was known and with 200 °C as the reference temperatures. For the entire temperature range tested the difference between this approach and a two-point calibration over a temperature range is only expected to be about 1 °C.
- 3) By using the mean value of multiple ultrasonic wave transmit and receive measurements, a value whereby the ultrasonic propagation time was stabilized is obtained.
- 4) As acoustic coupling material between the ultrasonic transducer and piping, a copper plate was found to be more suitable than a specialized acoustic bonding material. A weight equivalent, area distributed force of 2.0 kg/mm² was used to press the test copper plate to the pipe. A slightly smaller force appears more than sufficient as well.
- 5) We found that mounting the ultrasonic transducer to the exterior surface of the pipe by a clamping method is sufficient such that no welding is needed.
- 6) The in-sodium test period was about 2 months. No noticeable change in measurement characteristics of the ultrasonic thermometer were observed.

Therefore, the applicability of the device seems to and the technique as a means of thermometry for sodium pipe flow is promising.

* Reactor Engineering Group, Sodium and Safety Engineering Division, OEC, JNC

** Control Engineering Group, International Cooperation and Technology Development Center, THO, JNC

目 次

| | |
|---|----|
| 第1章 緒論 | 1 |
| 第2章 試験方法 | 2 |
| 2.1 超音波温度計の計測概念 | 2 |
| 2.2 試験体及び試験装置 | 2 |
| 2.2.1 試験体 | 2 |
| 2.2.2 試験装置 | 3 |
| 2.3 試験内容 | 3 |
| 第3章 試験結果検討 | 4 |
| 3.1 超音波によるNa温度の計測 | 4 |
| 3.2 Na温度の算出方法 | 4 |
| 3.3 試験結果の比較について | 5 |
| 3.3.1 計測誤差 | 5 |
| 3.3.2 第1サイクルと第2サイクル以降の違い | 5 |
| 3.4 Na温度以外の影響 | 6 |
| 3.4.1 Na流速の影響 | 6 |
| 3.4.2 カバーガス圧力の影響 | 6 |
| 3.4.3 Na中不純物濃度の影響 | 7 |
| 3.5 超音波伝搬時間から求まるNa温度値に関するまとめ（再現性、精度等検討） | 7 |
| 3.5.1 超音波温度計によるNa温度測定 | 7 |
| 3.5.2 熱膨張係数の影響 | 8 |
| 3.5.3 まとめ | 8 |
| 3.6 超音波波形の検討（音響結合材、配管Na濡れ、トランステューザ押付力影響等検討） | 8 |
| 3.6.1 受信波形強度変化 | 8 |
| 3.6.2 まとめ | 10 |
| 3.7 今後の改良点等 | 10 |
| 第4章 結論 | 11 |
| 謝辞 | 12 |
| 参考文献 | 13 |

表リスト

| | |
|--------------------|----|
| 表 2.1 超音波温度計試験体の仕様 | 14 |
| 表 2.2 試験パラメータ | 14 |
| 表 2.3 試験評価項目 | 15 |

図リスト

| | |
|---|----|
| 図 2.1 超音波温度計の計測概念 | 16 |
| 図 2.2 ナトリウム中の超音波伝搬時間計測方法の説明図 | 17 |
| 図 2.3 試験体配管部構造 | 18 |
| 図 2.4 超音波トランスデューサ取付部の構成 | 19 |
| 図 2.5 Na 試験装置の説明図 | 20 |
| 写真 2.1 超音波温度計試験体 | 21 |
| | |
| 図 3.1 ナトリウム温度と超音波伝搬時間の関係 | 22 |
| 図 3.2 既知の値を基に伝搬時間から求めたナトリウム温度と基準温度との差 | 23 |
| 図 3.3 試験サイクル毎の超音波温度計と基準温度との差の平均値 | 24 |
| 図 3.4 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差 (超音波温度計①) | 25 |
| 図 3.5 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差 (超音波温度計②) | 26 |
| 図 3.6 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差 (超音波温度計③) | 27 |
| 図 3.7 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差 (超音波温度計④) | 28 |
| 図 3.8 ポンプ停止時の温度変化 | 29 |
| 図 3.9 流速による超音波伝搬経路の変化 | 30 |
| | |
| 図 3.10 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度計との差 (超音波温度計①) | 31 |
| 図 3.11 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度計との差 (超音波温度計②) | 32 |
| 図 3.12 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度計との差 (超音波温度計③) | 33 |
| 図 3.13 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度計との差 (超音波温度計④) | 34 |
| 図 3.14 ナトリウム中不純物濃度の違いによる超音波温度計と基準温度計との差 | 35 |
| 図 3.15 超音波温度計と基準温度計との差のまとめ (超音波温度計①) | 36 |
| 図 3.16 超音波温度計と基準温度計との差のまとめ (超音波温度計②) | 37 |
| 図 3.17 超音波温度計と基準温度計との差のまとめ (超音波温度計③) | 38 |
| 図 3.18 超音波温度計と基準温度計との差のまとめ (超音波温度計④) | 39 |
| 図 3.19 超音波温度計と基準温度計との差のまとめ (相関処理 超音波温度計①) | |
| | |
| | 40 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 図 3.20 熱膨張の試験データによる補正とハンドブック値による補正の差 | 4 1 |
| 図 3.21 熱膨張係数の値による基準温度との差の変化 | 4 2 |
| 図 3.22 温度と時間による波形変化（超音波温度計①） | 4 3 |
| 図 3.23 温度と時間による波形変化（超音波温度計③） | 4 4 |
| 図 3.24 温度と時間による波形変化（超音波温度計④） | 4 5 |
| 図 3.25 配管のNa濡れ変化による信号波形強度の変化 | 4 6 |
| 図 3.26 センサ押付力変更による信号波形強度の変化 | 4 7 |

第1章 緒論

原型炉もんじゅの2次主配管におけるナトリウム（Na）漏洩を受けて、漏洩箇所となつた温度計さや（熱電対ウェル）の様な配管挿入物を必要としない温度計測手法の開発を行っている。開発する手法は、音速がNa温度により変化することを利用したもので、配管外から超音波を送受し、Na中の超音波伝搬時間を測定してその変化からNa温度を求めるものである。

超音波による配管内流体の温度計測については、これまでに水試験等で原理的な確認を行っており、音速の変化から内部流体の温度が算出できることを確認している。しかしながら、水とNaの温度による音速変化値や伝搬特性の違い、使用温度が高温であることによる超音波トランスデューサ特性変化（高温耐久性確認）や配管の熱膨張の影響などについては、実際にNaを用いた試験により評価することが必要になる。そこで、本手法のNa温度計測への適用可能性を判断するために、Na試験用の試験体を用いてNa試験装置（試験ループ）による試験を実施した。

本試験に用いた超音波温度計試験体では、配管内Na中の超音波伝搬時間計測において、余分な伝搬経路の影響を排除して伝搬時間を正確に計測するために、配管の外面に直接に超音波トランスデューサを取り付ける形式を採用している（超音波トランスデューサは、圧電素子にニオブ酸リチウムを用いた高温用を使用し、供用中に単体で交換可能な取り付け構造としている。）。

本試験では、超音波温度計の基本的な配管内Na温度計測特性として、Na流速やカバーガス圧力等のNa温度以外の影響や、同一条件での再現性、総合的なNa温度計測精度などを評価する。また、試験体については、超音波トランスデューサと配管との音響結合材の違いや、配管への取り付け方法の違いによる影響などを評価する。さらに、超音波の伝送波形等を基に、本試験体で用いた信号処理方法の特性について検討する。これら本超音波温度計試験体の特性評価から、超音波温度計に関する今後の改良方策を提示することとする。

本報告は、上記のNa試験の結果とその評価等をまとめたものである。

第2章 試験方法

2.1 超音波温度計の計測概念

超音波温度計は、配管内のNaの音速が温度により変化することを利用して温度計測を行なう（図2.1に計測概念図を示す。）。実際には、配管外に取り付けた超音波トランスデューサからNa中に超音波を送信し、配管の対面に同様に取り付けた超音波トランスデューサで受信する。送受信信号からNa中の超音波の伝搬時間を測定し、音速を求める。Na温度に対する音速の関係からNa温度が算出される。

そのため、超音波による温度計測には、安定した超音波の送受信ができることと、Na中伝搬時間計測時の透過配管内伝搬時間の影響除去や熱膨張等による伝搬距離の変化を考慮する必要がある。

2.2 試験体及び試験装置

2.2.1 試験体

本試験体は、高温用の超音波トランスデューサを配管に直付けする形式をとり、配管中の超音波伝搬時間の影響を除去するために、配管内を最短距離で透過した直達波（最短距離で到達した波）と1.5往復波（配管内面を反射して1往復分だけ遅れてきた波）の時間差を計測して差を求める方法でナトリウム中の伝搬時間のみを抽出している（図2.2参照）。

また、超音波受信波形は雑音等の影響で変動するので、安定した伝搬時間の計測が可能な様に、複数回の送受信により計測される伝搬時間の平均値を算出して用いる方法を採用した。試験体は、5MHzのsin波の1周期分を增幅して超音波トランスデューサにより超音波としたものを用い、伝搬時間計測値は、50回の伝搬時間計測により得られた値の平均値を用いた。なお、参考用に相關処理を用いた計測¹⁾（M系列信号という疑似白色信号を発信波として用い、受信波との間で相互相關処理を行なって伝搬時間を求める方法。信号処理が複雑になるが、雑音は送信波と相互相關が小さいために除去されるので、SN比（対信号雑音比）向上に有効である。）も可能な回路構成とした。

試験体では、図2.3に示す様に、試験装置配管径に合わせた4インチ径の配管部（もんじゅ2次系配管は、22インチ）の上流（図面中の左側）から4器の超音波温度計が取付けられている。それぞれの超音波温度計は、対向した1対の高温用超音波トランスデューサで構成されている。超音波温度計①と②は、超音波トランスデューサと配管との音響結合材に高温用の超音波探傷に使用される高温用超音波接触媒質（品番HTC H-03 石川島検査計測株式会社製：通称水ガラスとも言われ高温で液体状になり、550℃程度の高温まで使用できる。以下、水ガラスと称する。）を用い、③と④は銅板を用いている。さらに、超音波温度計①～③は配管にクランプさせた着脱が可能な金具で取り付けており、④は配管に取付金具（台座）を溶接している。これらにより、音響結合材の違いや配管への取り付け方法による計測性の違いを検討する。

また、試験時に基準として使用し、超音波温度計の計測値と比較するために、試験体の最下流側にNa温度を計測する基準温度計（ウェル内蔵タイプのK型クラス1熱電

対、3.2φ)を取り付けている。

高温用超音波トランスデューサの取付部は、図2.4に示すように、トランスデューサを、先端に密着させた音響結合材を含めてスペーサを介した皿バネ(温度変化の影響を受け難いように保温材の外側に配置)により配管表面に対して押し付けることで、良好な超音波透過性を確保できる構造としている。

以上の構成の試験体について、超音波の送受信制御及び信号処理を行なう計測装置、超音波温度計(超音波トランスデューサ部)の仕様を表2.1に、設置状況を写真2.1に示す。なお、試験体の製作は、(株)東芝が実施した。

2.2.2 試験装置

Na試験装置としては、大洗工学センターのプラント過渡応答試験施設(PLANDTL: PLANT Dynamics Test Loop)を用いた。また、超音波温度計試験体(配管径4インチ)の試験装置への設置は、図2.5に示す位置とした。

2.3 試験内容

試験では、Na温度変化による超音波温度計温度測定値の特性を調べるために、Na温度を200°C～500°Cの間(50°Cステップ)で昇温・降温させた。そこでは、再現性や経時特性を調べるために複数回の同条件測定を行っており、最初の昇温過程を第1サイクル、その後の降温過程を第2サイクル、また次の昇温過程を第3サイクルとし、第4サイクルまで行なった。

また、各試験サイクルではNa温度以外の超音波温度計出力への影響を調べるために、Na流速の影響(0～実機の約40%にあたる190cm/s(1000l/min.))、カバーガス圧力の影響(0.2～2.0kg/cm²)、Na中不純物濃度の影響(コールドトラップ温度150°Cと250°C)についても試験パラメータとし、試験を行なった(各試験サイクルで用いた試験パラメータを表2.2に示す。)。

なお、試験体の配管部材が新規製作品のためにNaと馴染むまで超音波の伝搬性が悪いと考えられるので、第1サイクル試験前にNa温度を上昇させて超音波の伝搬特性を調べた(Na濡れ性影響確認)。試験装置でのNaドレン及びチャージは、全試験工程開始及び終了時以外にも、Na濡れ性影響確認後と第1サイクル終了後に行っている。

さらに、2.2.1項で記したように、本試験体では音響結合材として2種類のものを、配管への取り付け方についてもクランプ方式と台座溶接方式を採用しており、それらの違いによる影響も確認した。

以上の試験評価項目と実施内容をまとめると表2.3の様になる。

第3章 試験結果検討

3.1 超音波によるNa温度の計測

超音波温度計は、Na中の音速が温度により変わることを用いて、Na中の伝搬時間と伝搬距離から温度を算出する。Na温度を変えたときの伝搬時間の変化を図3.1に示す。伝搬時間は、図2.2の様に配管中を1.5往復したものと直達したものの到達時間の差で計測し、Na中ののみの伝搬時間（本手法では配管内径の2倍）を求めている。

図は、Na温度の変化により伝搬時間がほぼ直線的に変化しており、伝搬時間の変化からNa温度が算出可能なことを示している。この伝搬時間の変化を、Na温度による音速の変化²⁾のみと、熱膨張による伝搬経路長の変化³⁾も考慮した場合を図に示した。これより、音速の変化のみでNa温度を算出すると大きな誤差を生じるので、Na温度算出には熱膨張による伝搬経路長変化も考慮する必要があることがわかる。

3.2 Na温度の算出方法

超音波によるNa温度の算出は、Na中の伝搬時間t(s)を測定し、その値で伝搬距離2D(m)（本試験体の計測手法では、配管内径Dの2倍の伝搬時間を計測）を除してNa中の音速Vを求め、音速とNa温度T(℃)の関係²⁾からNa温度を求める。

$$V = 2D / t \quad (3-1)$$

$$V = 2577.25 - 0.524T \quad (3-2)$$

ここで配管内径Dは熱膨張により変化するため配管内径の熱膨張補正を行わないと数十℃の誤差が生じるため、測定精度向上のうえで配管の熱膨張補正を行う必要があり、配管内径Dは次のようになる。

$$D = D_0 (1 + \alpha (T - T_0)) \quad (3-3)$$

D₀：初期配管内径（温度T₀の配管内径）

T₀：初期温度

α ：熱膨張係数

超音波によるNa温度算出に係わる配管内径は超音波の伝搬経路であり、正確な配管の測定ができてもセンサの取り付け位置や角度、更には配管との接触状態により変わり、伝搬経路の1mmの違いが算出温度に対して大きな誤差になる。これは、図3.2の工場検査時の配管内径測定値により算出したNa温度の誤差に示されている。

そのため初期配管内径値を寸法測定値ではなく、超音波の伝搬試験結果を基に算出することとした。これは、初期温度を設定し測定した伝搬時間から式3-1～3を用いて逆に初期配管内径を算出した（3.3.2項の理由により、算出には第2サイクルの200℃データを用いた。）。

また、配管内径の熱膨張補正に用いる熱膨張係数 α も構造等の影響で文献値と異なる。そこで、初期配管内径値と同様に、第2サイクルの試験結果から式3-1～3により各温度

の配管内径Dを逆算し、それを基に1次近似直線を求めてその係数から算出した。
これらにより、超音波温度計を本試験温度200~500°Cにより出力校正したこととなる。

3.3 試験結果の比較について

3.3.1 計測誤差

本試験では、基準温度計としてK型クラス1の熱電対を用いており、許容差として200°Cの時1.5°C、500°Cの時2°Cである⁴⁾。また、基準温度計の温度変換に用いた計測器は、分解能0.1°Cで、確度が200°Cの時0.7°C、500°Cの時1.0°C、基準接点保証確度が0.5°Cである。これより、基準温度の誤差は、次のようになる。

$$(1.5^2 + 0.1^2 + 0.7^2 + 0.5^2)^{1/2} \approx 1.7^\circ\text{C} \quad (200^\circ\text{C} \text{ 時}) \quad (3-4)$$

$$(2^2 + 0.1^2 + 1^2 + 0.5^2)^{1/2} \approx 2.3^\circ\text{C} \quad (500^\circ\text{C} \text{ 時}) \quad (3-5)$$

また、超音波伝搬時間の計測及び伝搬時間から温度の算出に関わるものは、A/Dサンプリング周期による0.6°C（サンプリング周期12.5ns）を考え、熱膨張補正計算の誤差を0.9°C（係数を算出したデータの回帰計算誤差に基づく）、音速の式の誤差を0.2°C（1次の項の係数の4桁目を不定と考える）と置くと、総合で約1.1°Cになる。

$$(0.6^2 + 0.9^2 + 0.2^2)^{1/2} \approx 1.1^\circ\text{C} \quad (3-6)$$

これより、超音波温度計による温度と基準温度との差を考えると、約2.0°C（200°C時）～約2.5°C（500°C時）の計測誤差が考えられる。

$$(1.7^2 + 1.1^2)^{1/2} \approx 2.0^\circ\text{C} \quad (200^\circ\text{C} \text{ 時}) \quad (3-7)$$

$$(2.3^2 + 1.1^2)^{1/2} \approx 2.5^\circ\text{C} \quad (500^\circ\text{C} \text{ 時}) \quad (3-8)$$

3.3.2 第1サイクルと第2サイクル以降の違い

Na試験は、2.3節に記したように、Na温度、流速、圧力をパラメータとし、再現性を確認するために同一条件のものを4回（4サイクル）実施した。流量（約190cm/s）及び圧力（0.2kg/cm²）を一定にして、Na温度を変えたときの超音波温度計による温度と基準温度との差を、各試験サイクル毎にまとめたものを図3.3に示す（なお、超音波温度計②は、第1サイクル時に取り付け部に不具合が生じ調整したため図では省略している。）。

図3.3では、3.3.1項に記述した誤差と比べて小さいが、第1サイクルと以降のものは傾向が異なっている様に見える。これは、基準温度計として使用している熱電対（K型）が、使用初期にプラス側に温度ドリフトが発生し、一旦、高温の試験を実施した後の第2サイクル以降は、出力が安定したのではないかと考えることができる（JIS C1605の解説⁴⁾では、K型熱電対はショートレンジオーダーリング（短範囲規則格子変態：ある温度で原子配列に規則性が生じる現象）により、クロムを含む熱電対では350°C～550°C近傍で短時間に熱起電力が変化するとされている。）。以上のことは推定にすぎないが、超音波温度計自身ではなく基準温度計に起因した特性変化の可能性が考えられるということから、以降の超音波温度計試験体の検討は、安定した結果となる第2サイクル以降

の試験結果に基づき行っている。

3.4 Na温度以外の影響

3.4.1 Na流速の影響

ナトリウム試験では、流速0cm/sから約190cm/s（原型炉もんじゅ2次冷却系主配管のナトリウム流速の約40%に相当）まで流速を変化させて、基準温度との差を求め影響を検討した。各超音波温度計毎のNa温度200°C, 350°C, 500°Cでの試験結果を図3.4～図3.7に示す。

ここで、流速0cm/sにおいて全般的に温度誤差が大きく、超音波温度計毎の温度のばらつきも大きくなる傾向にあることがわかる。この誤差の増大の原因を調査するために、試験ループのポンプを停止させ、超音波温度計の出力と合わせて、各部の温度等を測定した。測定結果である図3.8について、超音波温度計の上流（図中記述の試験体上流位置温度）と下流（図中記述の基準温度計）に取付けられた熱電対の値を連続的に計測した値に着目すると、超音波温度計の下流側の基準温度計と超音波温度計の上流側の熱電対との温度差が時間とともに増大し、ポンプ停止後30分程度で10°C程度まで広がることが確認できる。即ち、上流側と下流側でループ内に温度差がついており、流速ゼロでの計測誤差は、試験体内の配管部に温度分布がついたことにより、基準温度計の位置の流体温度と各超音波温度計位置での流体の温度が異なっているためであると考えられる。流量0cm/sの計測では、ループ条件の設定等に時間がかかり、測定までにNa温度分布がついてしまい誤差が大きくなっていると考えられる。

以上のことから、流速による影響の確認は流量ゼロ以外のデータに着目して考える。そこで、図3.4～図3.7で最小流速（流速ゼロを除く）から最大流速までを比較すると、ほとんどのケースで基準温度計との差が±1°C程度であるとともに流量の違いによる有為な差は観測されていない。

これは、試験体において超音波がNaの流れにより△X分だけ流れ方向に流されるとする、500°C（音速2315m/sとする。）で試験の最大流速を200cm/sと想定して計算すると、△Xは、約0.09mmとなる。これは、（送信ビームパターンの広がりにより）上流側に向いて送信された超音波が受信位置に到達することを表しており、図3.9の様に、流れが無いときの経路に比べて経路長が約0.04μm増加する。この経路変化量は、温度に換算して約0.002°C（試験体では、20μmの変化が、約1°Cに相当）の違いしかないとみに、その影響が無視できることによると考えられる。

3.4.2 カバーガス圧力の影響

試験では、200°Cと500°Cでカバーガス圧力を0.2kg/cm²の他に、1.0と2.0kg/cm²に変化させた。試験結果を図3.10～図3.13に示す。図で、試験の最低圧力から最高圧力までを比較すると、流量の影響と同様に、基準温度との差は±1°C程度であるとともに圧力

の違いによる有為な差は観測されていない。

なお、カバーガス圧の変動による試験体配管部の膨張量³⁾を計算すると、 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の圧力増加では、試験体の配管直径が高々数 μm 増加するだけである。これを温度に換算しても 0.1°C のオーダー（試験体では、 $20\mu\text{m}$ の変化が、約 1°C に相当）の値となるので、カバーガス圧力の影響は無視できるからと考えられる。

3.4.3 Na中不純物濃度の影響

ナトリウム中の不純物による影響を確認するため、不純物を除去するためのコールドトラップ（CT）の温度を、 150°C と 250°C とした場合の試験を行った（ただし、本試験ループでは、不純物濃度を計測するプラギング計が故障していたため正確な不純物濃度は計測できていない）。ナトリウム温度が 250°C 、流速が約 190cm/s 、カバーガス圧力が $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ での結果を図3.14に示す。図では、基準温度計との差が $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下であるとともにCT温度の違いによる有為な差は観測されていない。

3.5 超音波伝搬時間から求まるNa温度値に関するまとめ（再現性、精度等検討）

3.5.1 超音波温度計によるNa温度測定

以上の様に超音波の伝搬時間によるNa温度計測では、流速、カバーガス圧力、不純物濃度は影響せず、得られるデータは他の要因によるばらつきの範囲と考えられる。また、再現性についても、図3.3の様に第2サイクルから第4サイクルではほとんど変化しておらず、良好である。そこで、超音波温度計毎に、第2サイクルから第4サイクルまでの全ての試験結果（流速、カバーガス圧力、不純物濃度の違いを無視し、試験温度毎に整理する。）をまとめて表すと図3.15～図3.18の様になる。図では、試験データと合わせて各試験温度毎の標準偏差も示した。

これらから、各超音波温度計は、基準温度計との差に関してはあまり違いが無く、データのばらつきも3.3.1項の計測誤差に比べて十分小さい値（図3.15～図3.18の最大差は、 -1.4°C ）となっていることがわかる。これは、本手法による超音波温度計が、既存の温度計（基準温度計として用いた熱電対など）と同様にNa温度計測用として使用可能なことを示している。

ただし、超音波温度計は、計測した伝搬時間を温度に変換するために、伝搬した超音波信号の波形が雑音の重畠などで変動し、伝搬時間計測に影響すると誤差を生じることとなる。そのため、本試験体の伝搬時間計測では、超音波パルスの送受信による受信波形計測を50回行い、その波形の平均値から伝搬時間を求める方法をとった。図3.15～図3.18の総合結果は、この方法により十分正確な伝搬時間が計測できたことも示している（伝搬時間計測の時のA/Dサンプリング周期による誤差が1サンプリング当たり 0.6°C であり、この点からも良好な計測であったといえる。）。また、同様に超音波受信信号の変動効果を減らす方法として、M系列信号を超音波に重畠して送信し、その受信信号を送信信号と相互関係処理して伝搬時間を求める方法がある。これは、信号処理回路が複

雑になるが、SN比の向上が期待できる。本試験では、この相互相関を用いる方法での計測も実施しており、図3.19に結果の一例を示す。これは、図3.15～図3.18と同様な結果であり、複雑な信号処理が必要な相互相関法による伝搬時間計測を用いる必要がないことがわかる。

3.5.2 熱膨張係数の影響

以上の検討は、熱膨張係数として試験データを基に算出したものを用いている。配管内径初期値は、3.2節の様に実際にNaでの伝搬時間を基に算出しないと非常に誤差が大きいので、200°Cの様な低温の決まった温度でのデータ採取（校正）が必要になる。200°Cでの低温での校正のみで超音波温度計を用いようとすると、熱膨張係数は文献等の既知の値を用いる必要がある。そこで、熱膨張係数に文献³⁾の値を用いた場合を検討した（図3.20に結果を示す。）。これより、熱膨張係数を試験データから算出したものに対して約1～2°Cの違いを生じている。超音波温度計の一つで熱膨張係数の違いによる基準温度計との差を比較すると、図3.21の様になる。これより、熱膨張係数が 0.1×10^{-5} 違うと結果として1°C強の違いとなるが、元々計測に伴う誤差が3.3.1項の様に2°C以上あるため、文献の熱膨張係数を用いても本試験での計測体系に対しては十分な精度の補正が行える。

3.5.3 まとめ

以上から、本試験範囲では、本方式の超音波伝搬時間からNa温度を計測する超音波温度計は、Naの流速、カバーガスの圧力、Na中の不純物濃度などの影響を受けないことがわかった（これらについては、試験範囲とその影響を考えると、もんじゅ実機においても同様に無視できると考えられる。）。また、2.5°Cの試験誤差を有する本試験での計測値は、約1°C強のばらつきになる。そして、超音波温度計の校正方法としては、使用範囲全体で校正すれば、ばらつき程度の精度となる。また、低温（200°C）のみの校正と熱膨張係数に既知の値を用いても、使用範囲全体で校正したものに対して高々1°C程度異なるくらいである。したがって、温度計として十分な性能を持つことがわかった。

また、超音波伝搬時間の計測は、複数回の超音波送受信による計測（50回）の平均値を用いることで十分安定した値が得られ、M系列を用いる相互相関法などの複雑な方法を用いる必要がないことがわかった。

3.6 超音波波形の検討（音響結合材、配管Na漏れ、トランステューサ押付力影響等検討）

3.6.1 受信波形強度変化

図3.22～図3.24に、200°Cと500°Cの第2サイクル及び第4サイクルの超音波受信波形（1.5往復波）を示す。

超音波温度計①～④の違いは、①と②は超音波トランステューサと配管との音響結合

材として高温用の超音波探傷に使用される水ガラスを用いており、③と④は銅板を用いている点と、①～③は配管にクランプさせた金具で取り付けており、④は配管に取付金具（台座）を溶接している点である。

図3.22の様に、超音波温度計①では、Na温度が200℃に低下すると、センサと配管との間の接触媒質（水ガラス）が固化しだすので音響伝搬特性が悪化し、波形出力値が低下する。これにより低温ではSN比が悪化している。対して、図3.23～図3.24の超音波温度計③、④は、温度の変化で波形出力値変化はほとんどなく安定している。また、第2サイクルと第4サイクルでの波形再現性は良好であり、約2ヶ月にわたる試験期間中においても信号強度等は安定していた。

また、試験体配管部の内面は、鏡面加工等を行わない通常の仕上げ状態の新規製作品であるために、Naが濡れにくく、配管外面からNa中への超音波伝搬特性が悪いと考えられる。そこで、第1サイクル試験前のNaチャージ直後において、配管内壁にNaが馴染んでいないときの状態の信号波形強度を測定している（図3.25に示す。）。図の様に、初期においては、1.5往復波が計測できていないが、Na温度を340℃近辺に上昇させたら計測できるようになった。但し、一度、配管内壁がNaに馴染んで濡れた状態になると、以降は低温でも安定して計測できている（第1サイクル以降においては、Naチャージ直後の200℃でも1.5往復波形を計測できている。）。この図からも超音波温度計④の波形出力値は、配管が濡れた後は安定しているのに対して、超音波温度計①の波形出力値は、接触媒質（水ガラス）の影響により低温になると低下していることがわかる。

次に、銅板を音響結合材に使用している超音波温度計③と④について、超音波トランスデューサの配管への押付力の変化による超音波伝搬特性への影響を調べるために、第4サイクル終了後に押付力を低下させて超音波波形を測定した。元々、超音波トランスデューサの配管への押付力は、超音波が十分配管内に透過して計測が可能な値として約2.0 kg/mm²と設定しており、この値は配管の許容値以内である。しかしながら、超音波温度計を配管にできるだけ影響を与えずに取り付けるという観点からは、押付力は小さければ小さいほど良いといえる。図3.26にNa温度300℃において、超音波トランスデューサの押付力を約2.0 kg/mm²から0.5 kg/mm²まで低下させた場合の超音波波形強度の推移を示す。図では、直達波および1.5往復波とも、1.0 kg/mm²までは波形強度低下が僅かであり、0.5 kg/mm²の時点で、2.0kg/mm²における波形強度に比べて約5dB強低下が認められたが、この状態でも良好な計測を行なうことができた。また、波形形態もほとんど変化していない。これは、超音波トランスデューサの押付力を現状の2.0 kg/mm²から低減できる可能性が示されたといえる。

3.6.2 まとめ

以上から、超音波トランスデューサと配管との音響結合材としては、水ガラスよりも銅板の方が適しており、配管への押付力は試験で用いた 2.0 kg/mm^2 よりも軽減できることがわかった。また、超音波温度計③と④の特性に差がないことから、超音波トランスデューサの配管への取り付けは、クランプ方式で十分安定して使用できることがわかった。

3.7 今後の改良点等

超音波温度計により得られるNa温度の精度（絶対値）向上の方策は、Na中超音波伝搬時間の正確な取得と伝搬時間からNa温度への変換の実現が主となると考えられる。

3.5.1項で記した様に、試験結果はNa温度以外の影響、再現性、測定値のばらつきなどが小さいことを示しており、超音波温度計出力は同一Na温度ではほぼ同一値（1°C強）となることがわかる。

そこで、超音波温度計で測定されたNa中超音波伝搬時間から、Na温度を求める時に、補正に用いる熱膨張係数値（超音波温度計を実機で用いる場合を考えると、低温時（200°C等）の校正のみで使用温度範囲内で十分な計測精度が要求され、3.5.2項で記した様に、配管の熱膨張係数を設定する必要がある。）の設定値が精度に影響するので、正しい係数の把握が計測精度向上のために有効である。

また、本試験体の時間計測分解能（本試験の時間分解能は、3.5.1項で記した様にサンプリング誤差として約0.6°C）は、超音波温度計出力のばらつきを考えると大きな値になっており、計測精度向上のためには時間計測分解能を高めることが有効である。

さらに、3.6.1項で記した様に、伝搬時間計測の誤りがあるがSN比が良好であれば、複数回の計測の平均により正しい伝搬時間値が得られる。逆に言えば、計測信頼性向上のためには、仮に音響伝搬特性が悪化してSN比の悪い状況となつても、受信波形から正確な時間計測ができる信号処理アルゴリズムを確立することが有効である。

第4章 結論

配管非貫通で内部流体のNa温度を計測する技術の開発の一環として、高温用超音波トランステューサを配管に直付けする形式の試験体を用いた超音波温度計のNa試験を実施した結果、以下の様な知見を得た。

- 1) 本試験範囲では、超音波温度計は、Naの流速、カバーガスの圧力、Na中の不純物濃度などの影響を受けない。また、2.5°Cの試験誤差を有する本試験において、超音波による温度計測値のはらつきは約1°C強程度と小さい値に収まる。
- 2) 超音波温度計の校正方法としては、使用範囲全体で校正すれば、校正用温度計に対して、ばらつき程度の精度となる。また、低温(200°C)のみの校正と熱膨張係数に既知の値を用いても、使用範囲全体で校正したものに対して高々1°C程度異なるくらいである。
- 3) 超音波伝搬時間の計測は、複数回の超音波送受信による計測の平均値を用いることで十分安定した値が得られる。
- 4) 超音波トランステューサと配管との音響結合材としては、水ガラスよりも銅板の方が適している。音響結合材に銅板を用いる場合に、配管への押付力は試験で用いた2.0 kg/mm²よりも小さな値で十分である。
- 5) 超音波トランステューサの配管への取り付けは、配管に溶接を必要としないクランプ方式で十分安定して使用できる。
- 6) 約2ヶ月のNa試験期間では、超音波温度計の計測特性に変化は生じない。

したがって、本手法の超音波温度計は、配管内のNa温度を計測する温度計として適用可能であると考えられる。

今後、さらに計測精度（絶対値）の向上を図るためにには、高精度な基準温度計との比較試験が必要であるが、超音波温度計として、時間計測分解能の向上（本試験の時間分解能は、サンプリング誤差として約0.6°C）や配管熱膨張係数の正確な把握（低温のみの校正で用いる熱膨張係数値に関して、材料や構造の特性によりハンドブック等の値と生じる差）が有効と考えられる。

また、超音波温度計の計測信頼性向上のためには、仮に音響伝搬特性が悪化してSN比の悪い状況でも受信波形から正確な時間計測ができる信号処理アルゴリズムの確立と、長時間使用に基づく耐久性評価の実施が考えられる。

謝　　辞

本試験の実施において協力頂いた常陽産業（株）の方々、試験データ整理において協力頂いた原子力システム（株）の大和田康雄氏、試験実施及び試験データ整理等で御助力頂いた（株）東芝の唐沢博一氏、小舞正文氏（現 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課）、福家賢氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 長井、大田 他: 液体金属冷却原子力プラントの炉内目視化技術の開発, 火力原子力発電 1996年8月号, (社)火力原子力発電技術協会, (1996)
- 2) I.D.Macleod, G.Hughes, C. H. Monday: An Ultrasonic Technique for the Remote Measurement of Breeder Subassembly Outlet Temperature, IAEA/TWGFR Specialist Meeting on Instrumentation for the Supervision of Core Cooling in LMFBR's, Kalpakkam INDIA 12-15 Dec. (1989)
- 3) D. Peckner and I. M. Bernstein: Handbook of Stainless Steels, McGraw-Hill Book Company, (1977)
- 4) 日本工業規格 シース熱電対 JIS C1605-1995, (財)日本規格協会, (1995)

表 2.1 超音波温度計試験体の仕様

| 超音波温度計 | 音響結合材 | 取付け構造 | 取付け方向 | 押付力 | 材 料 |
|-------------|------------------------------------|-----------------------|-------|-----------------------|----------------|
| ① | 高温用超音波接觸媒質 (HTC H-03 石川島検査計測株式会社製) | クランプ | 水平 | 1.5kg/mm ² | S U S 3 1 6 |
| ② | 同上 | クランプ | 垂直 | 1.5kg/mm ² | |
| ③ | 銅板 | クランプ | 水平 | 2.0kg/mm ² | |
| ④ | 同上 | 台座 | 水平 | 2.0kg/mm ² | |
| 装 置 | 項 目 | 仕 様 | | | |
| 超音波トランスデューサ | 周波数 | 5 M H z | | | |
| | 圧電素子材料 | ニオブ酸リチウム | | | |
| 発受信器 | 出力回路数 | 4 回路 | | | |
| | 出力電圧波形 | Sin 波 (1 周期分), M 系列波 | | | |
| | 出力電圧 | 5 0 , 1 0 0 , 2 0 0 V | | | |
| 計測ユニット | A/D サンプリング周波数 | 8 0 M H z | | | |
| | SN比改善処理 | 平均化処理, 相関処理 | | | |
| | 取り込みデータ長 | 1 2 K W / 1 回路 | | | |

表 2.2 試験パラメータ

| 項 目 | 範 囲 | 備 考 |
|--------|------------|--|
| 試験装置設定 | N a 温度 | 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 °C |
| | N a 流量 | 0 l/min , 200 l/min, 400 l/min , 800 l/min, 1000 l/min 1000 l/min. での流速は約 190 cm/sec で実機の約 40%。 |
| | カバーガス圧力 | 0.2, 1.0, 2.0 kg/cm ² |
| | N a 中不純物濃度 | コールドトラップ (C T) 温度 150 °C, [250 °C] [] 内は、第 1, 4 サイクルのみ。 |

表2.3 試験項目

| 項目 | 内容 | 評価に用いる試験パラメータ |
|------------|---------------------------------|--|
| Na 温度計測性確認 | Na 温度に対応した配管内 Na 中伝搬時間が計測できるか確認 | Na 200 ~ 500 °C の範囲 流量 1000 l/min 一定 ガス圧力 0.2kg/cm ² 一定 CT 温度 150 °C |
| 再現性 | 同一条件で時間をおいて繰り返した場合に変化があるか把握 | 同一試験パラメータ（表 2.2 の条件：つまり、上記 Na 温度計測性確認と、下記 Na 温度以外の影響の試験パラメータ）で 4 回試験（4 サイクル）を実施 |
| Na 温度以外の影響 | Na 流速の影響 | Na 200, 350, 500 °C において 流量範囲 0 ~ 1000 l/min (流速 0 ~ 約 190cm/s) ガス圧力 0.2kg/cm ² 一定 CT 温度 150 °C |
| | ガス圧力の影響 | Na 200, 500 °C において ガス圧力 0.2, 1.0, 2.0kg/cm ² 流量 1000 l/min 一定 CT 温度 150 °C |
| | Na 中不純物の影響 | Na 250 °C において CT 温度 150, 250 °C 流量 1000 l/min 一定 ガス圧力 0.2kg/cm ² 一定 |
| 計測精度 | Na 温度の超音波温度計による計測について精度を把握 | 上記全試験パラメータ範囲 |
| 試験体条件 | 配管内壁 Na 濡れ性影響 | 上記試験実施前に Na チャージ後、温度を 200 ~ 500 °C まで上昇させる。その後、ドレンして再びチャージし、上記試験実施。 |
| | 音響結合材の違いの影響 | 超音波温度計①②と③④の違い（表 2.1 参照） |
| | トランステューサ押付力の影響 | 超音波温度計③④のトランステューサ押付力を上記試験後に低下させた。 押付力 2kg/mm ² ~ 0.5kg/mm ² |

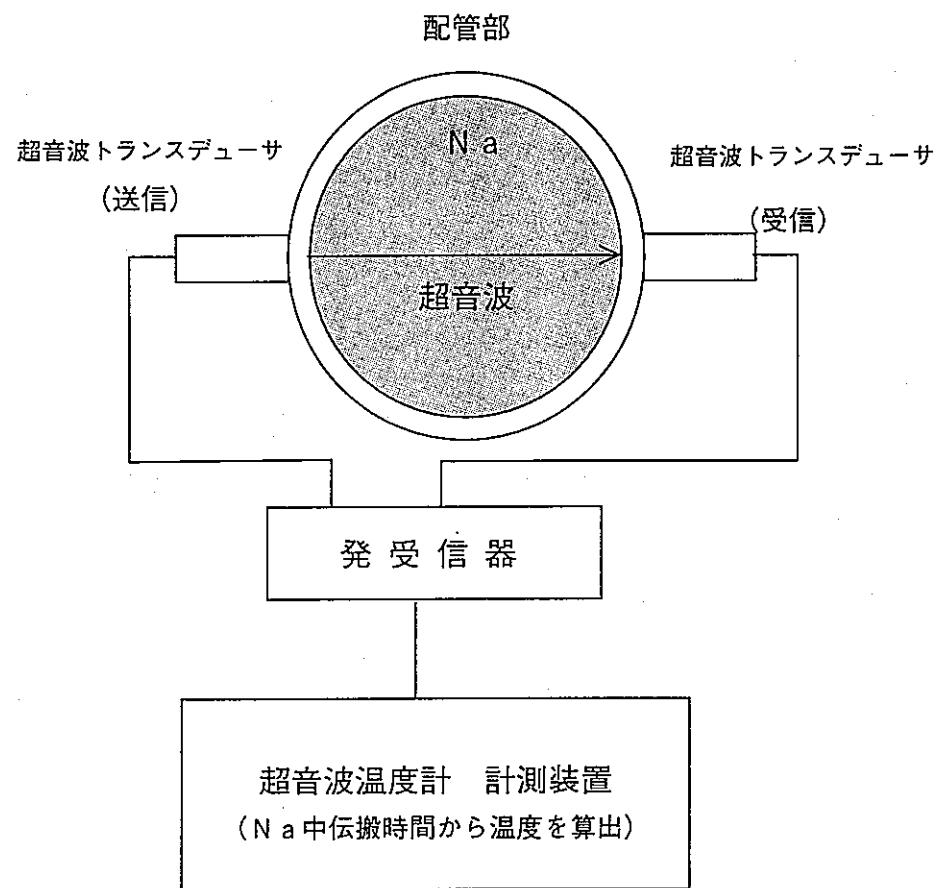


図2.1 超音波温度計の計測概念

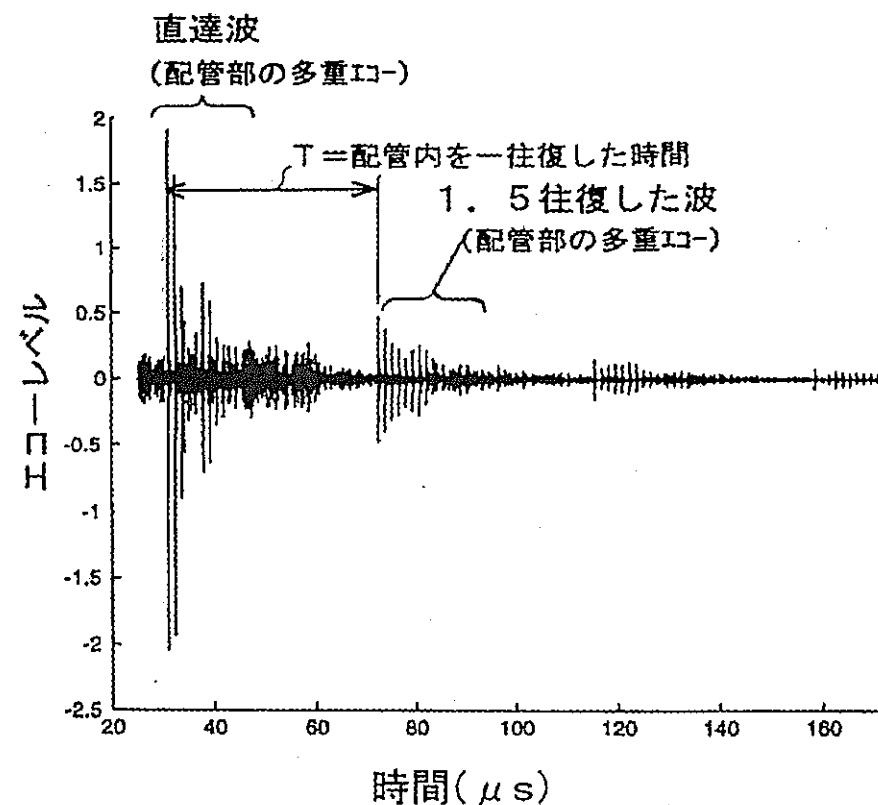
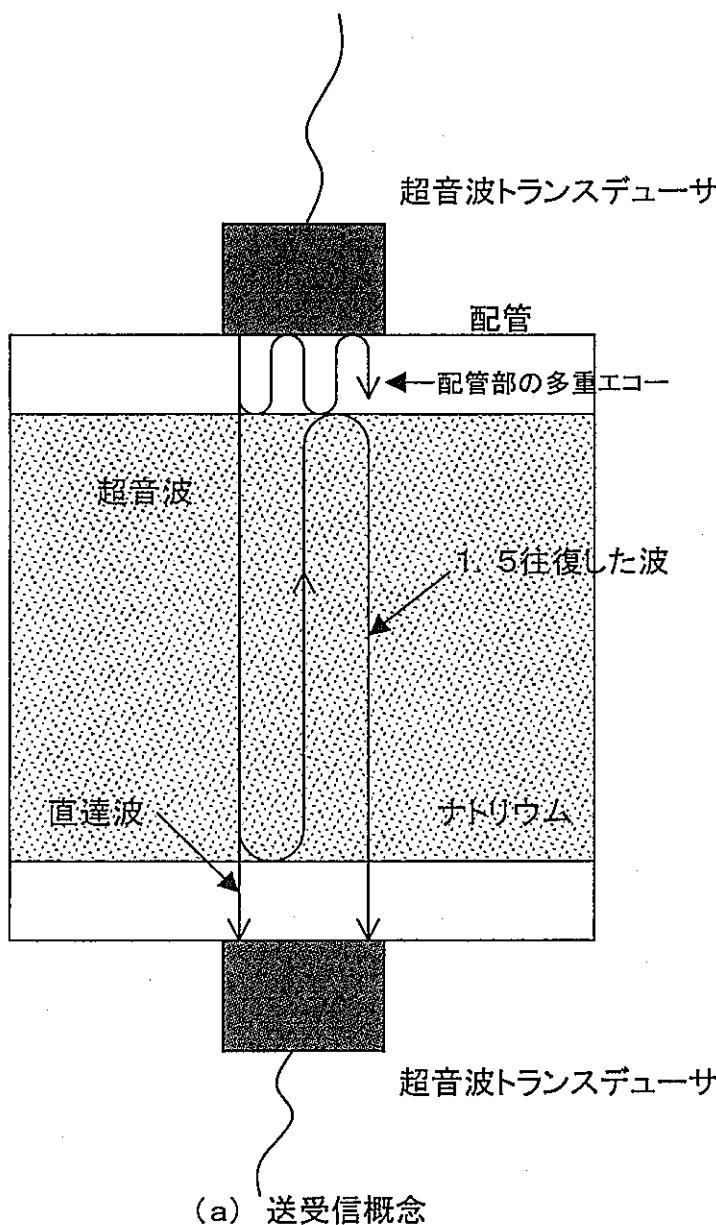


図2.2 ナトリウム中の超音波伝搬時間の計測方法の説明図

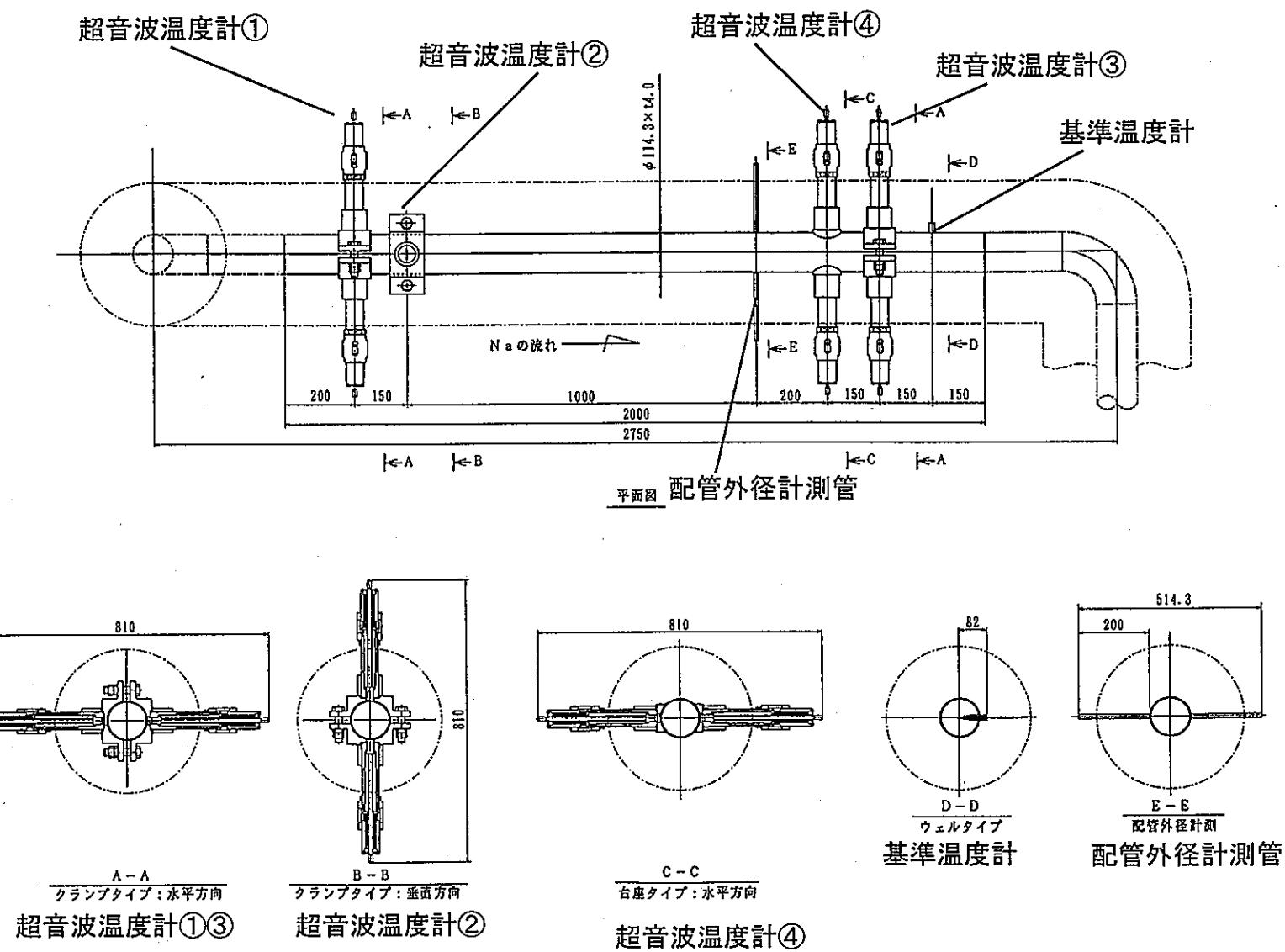


図2.3 試験体配管部構造

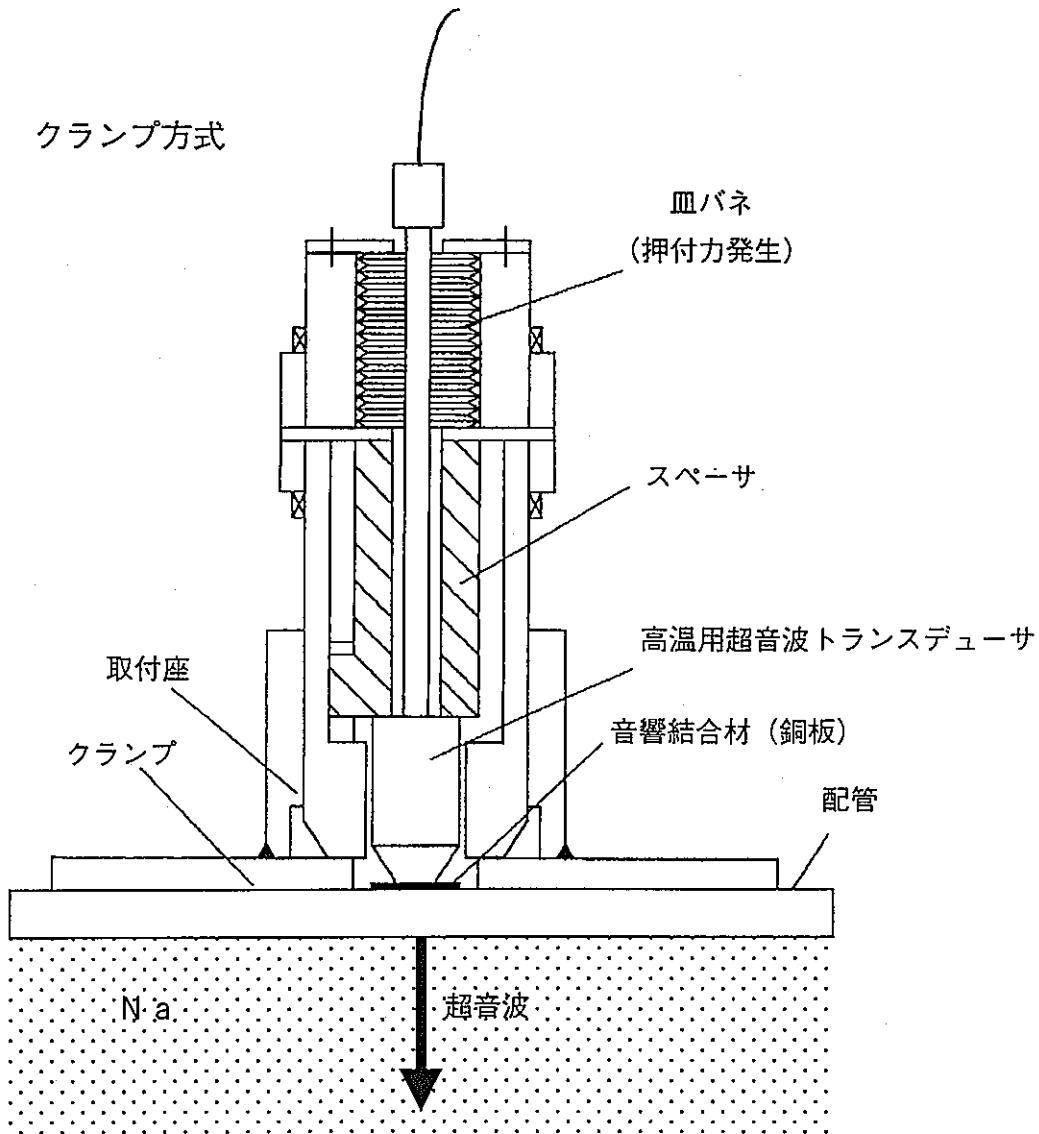


図2.4 超音波トランステューサ取付部の構成

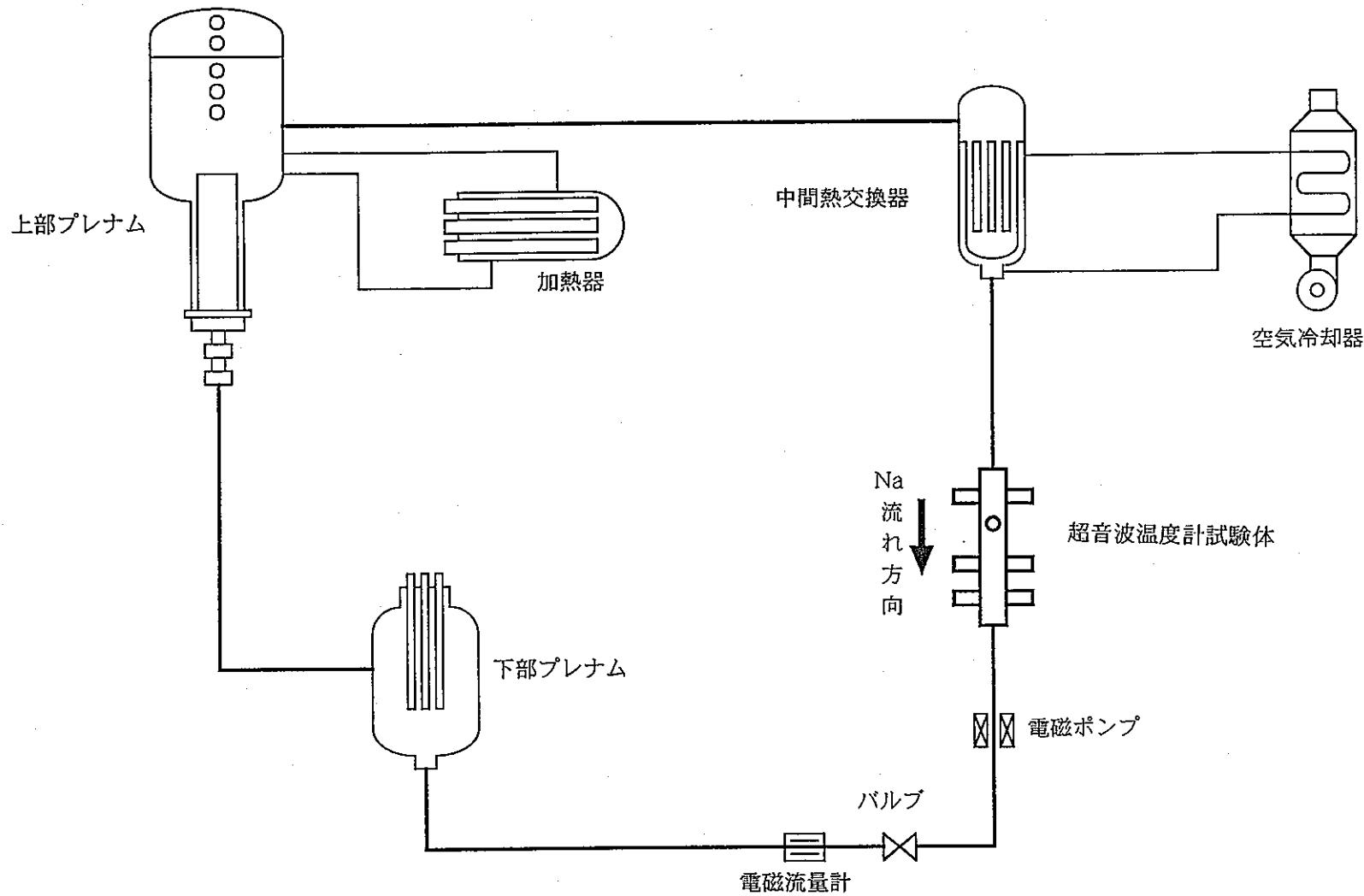
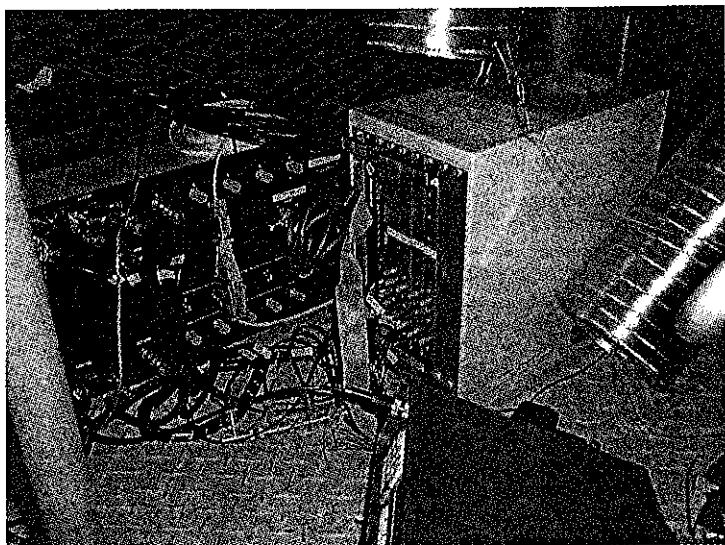
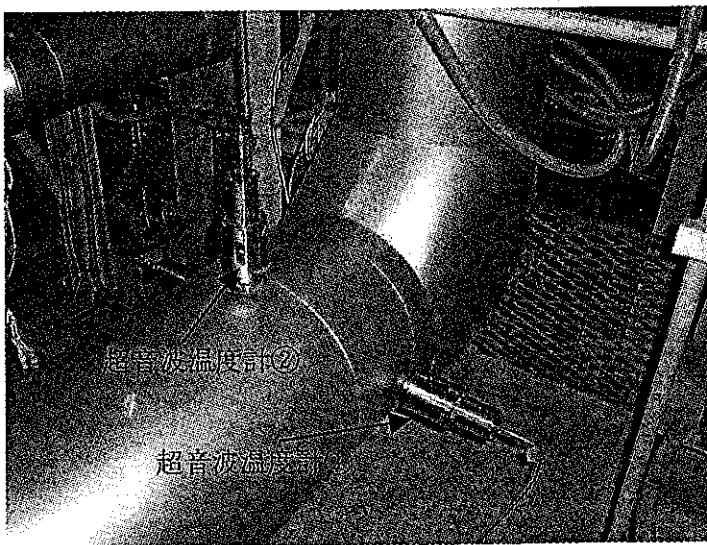


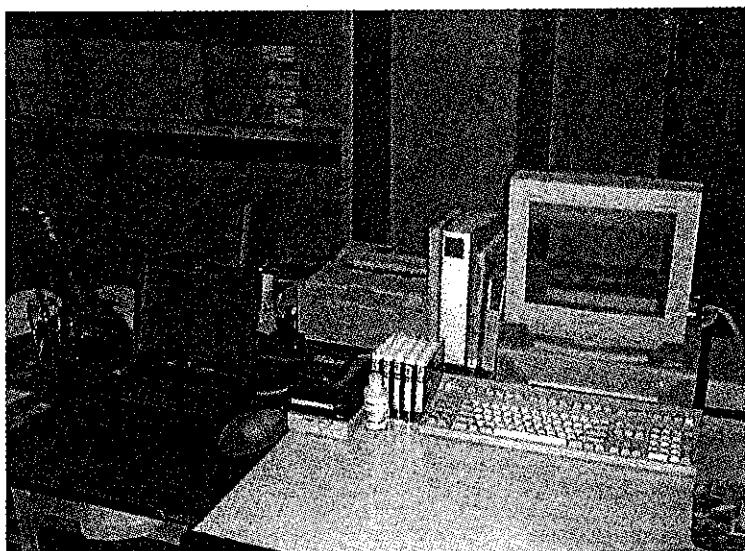
図2.5 Na試験装置の説明図



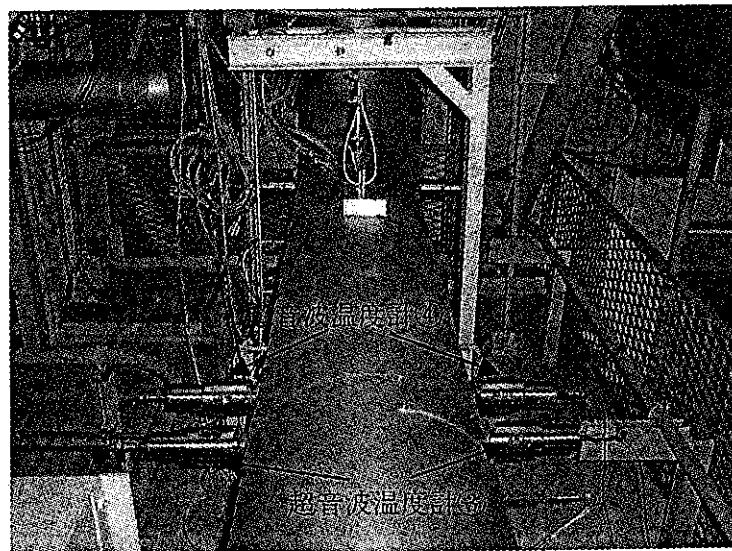
(a) 現場計器（超音波送受信部等）



(c) 試験体配管部



(b) 計測室の計算機システム（温度算出部）



(d) 試験体配管部

写真2.1 超音波温度計試験体

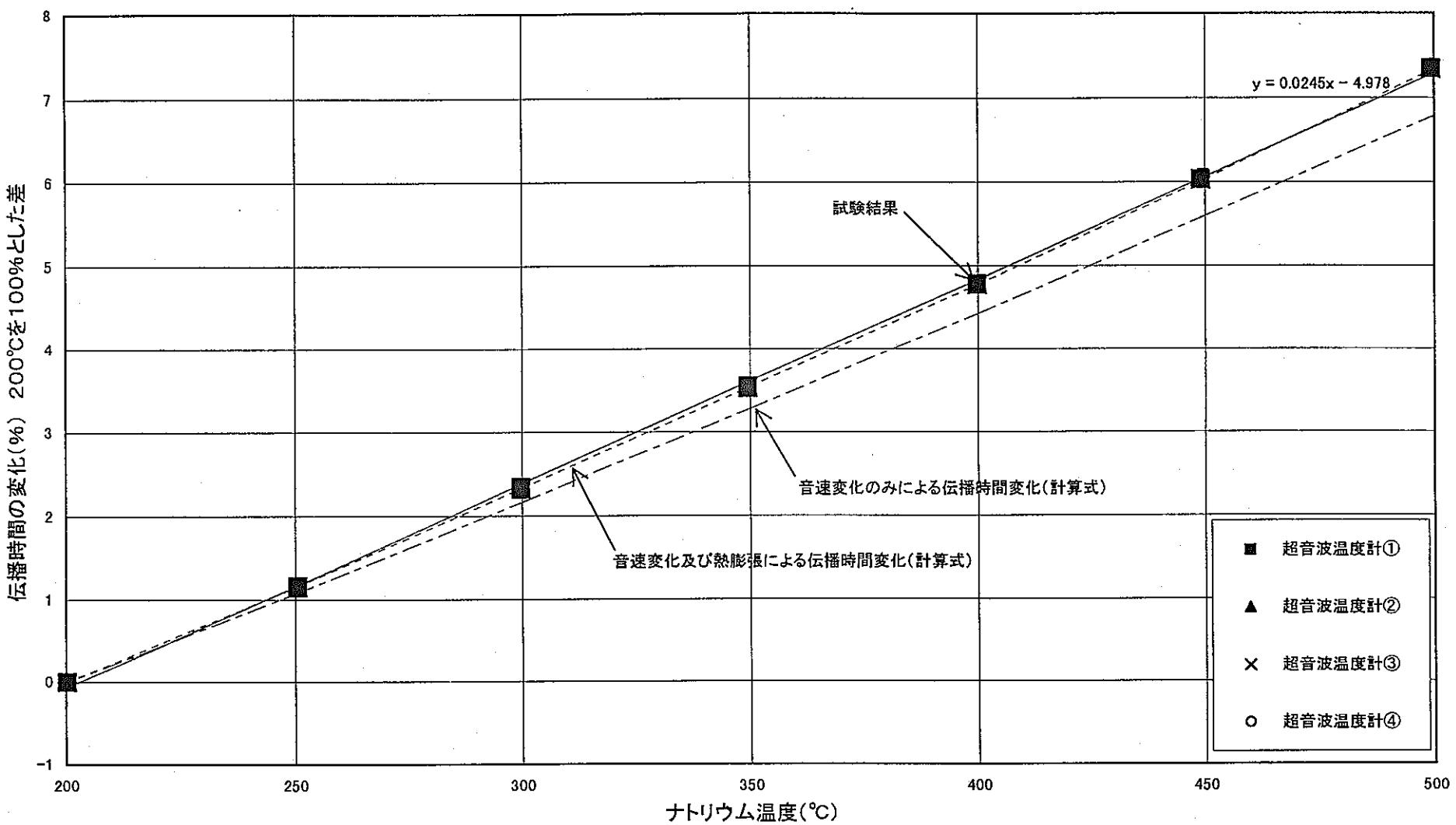


図3.1 ナトリウム温度と超音波伝播時間の関係

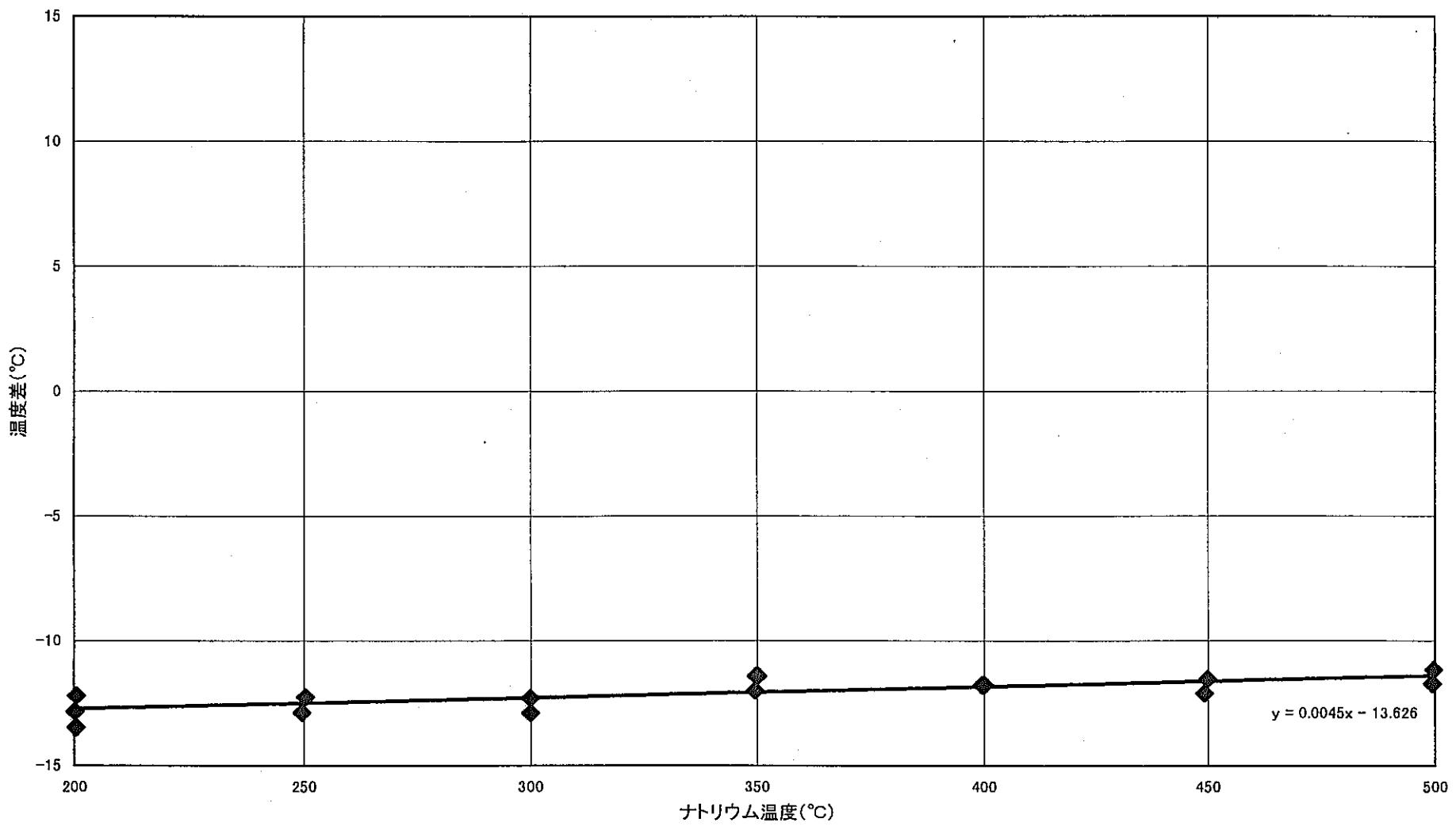


図3.2 既知の値(工場検査配管内径、音速変化式、熱膨張係数)を基に伝播時間から求めたナトリウム温度と基準温度との差
(超音波温度計①)

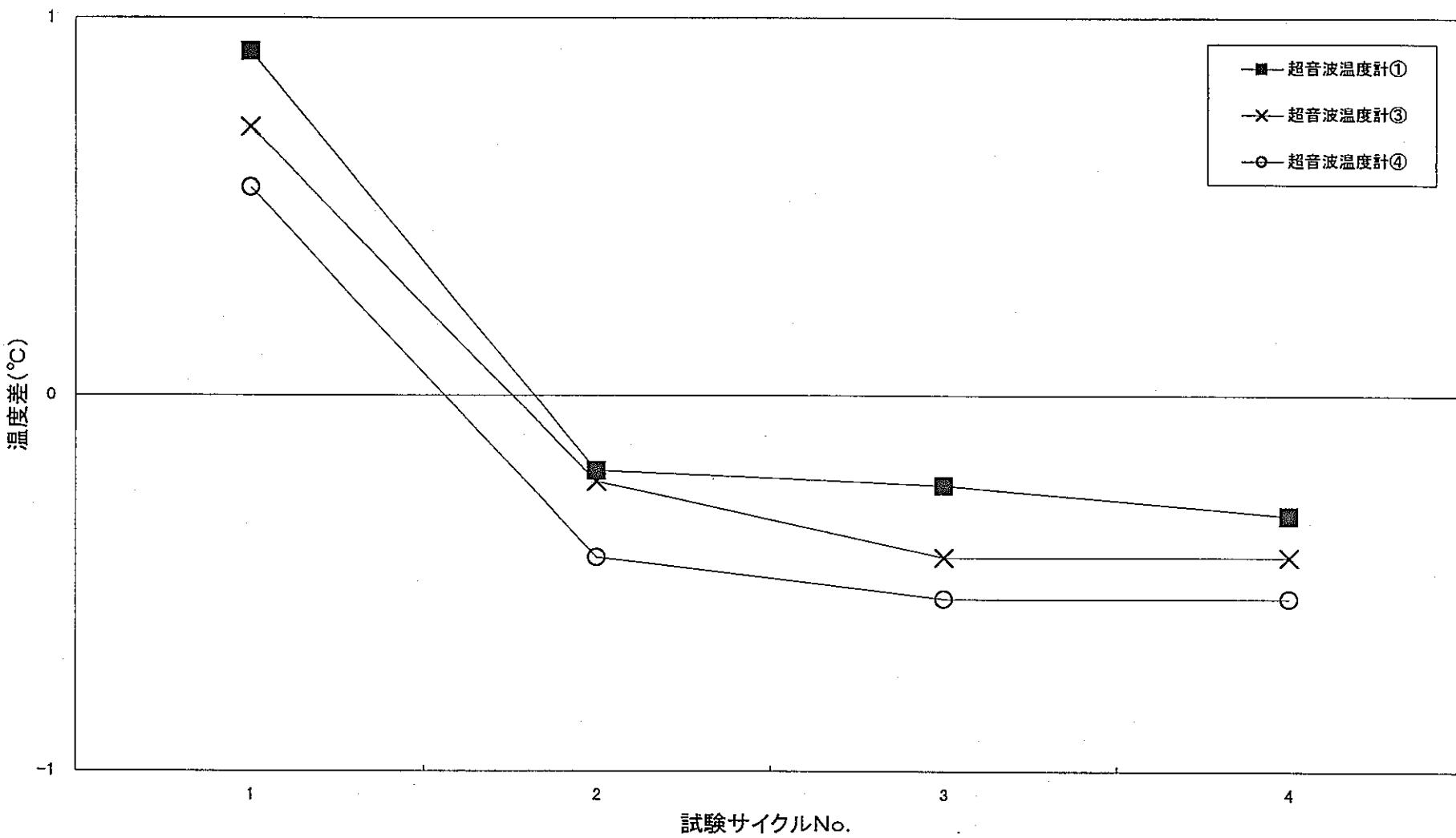


図3.3 試験サイクル毎の超音波温度計と基準温度との差の平均値(200°Cから500°Cデータ平均値)

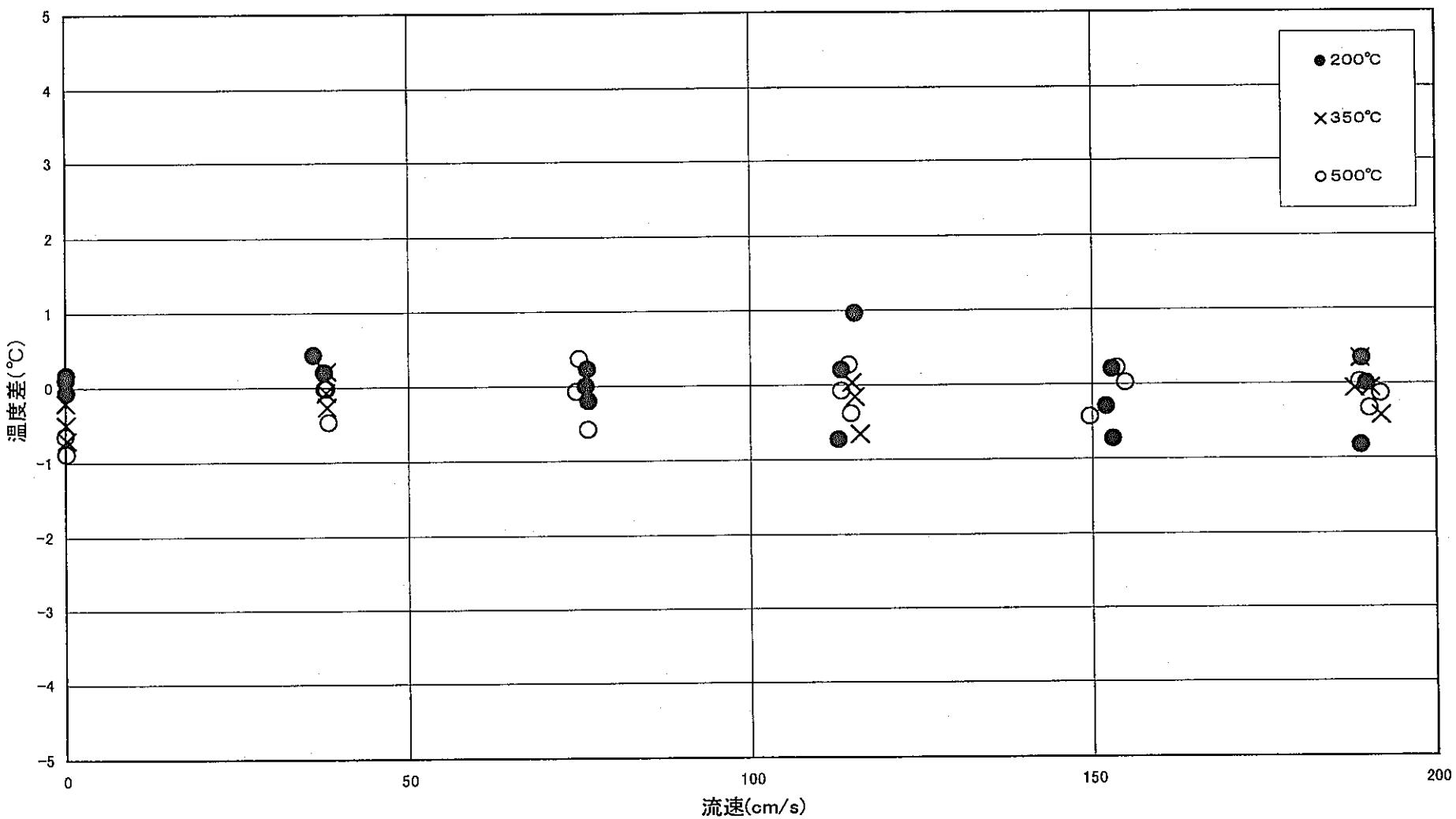


図3.4 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差(第2～第4サイクル 超音波温度計①)

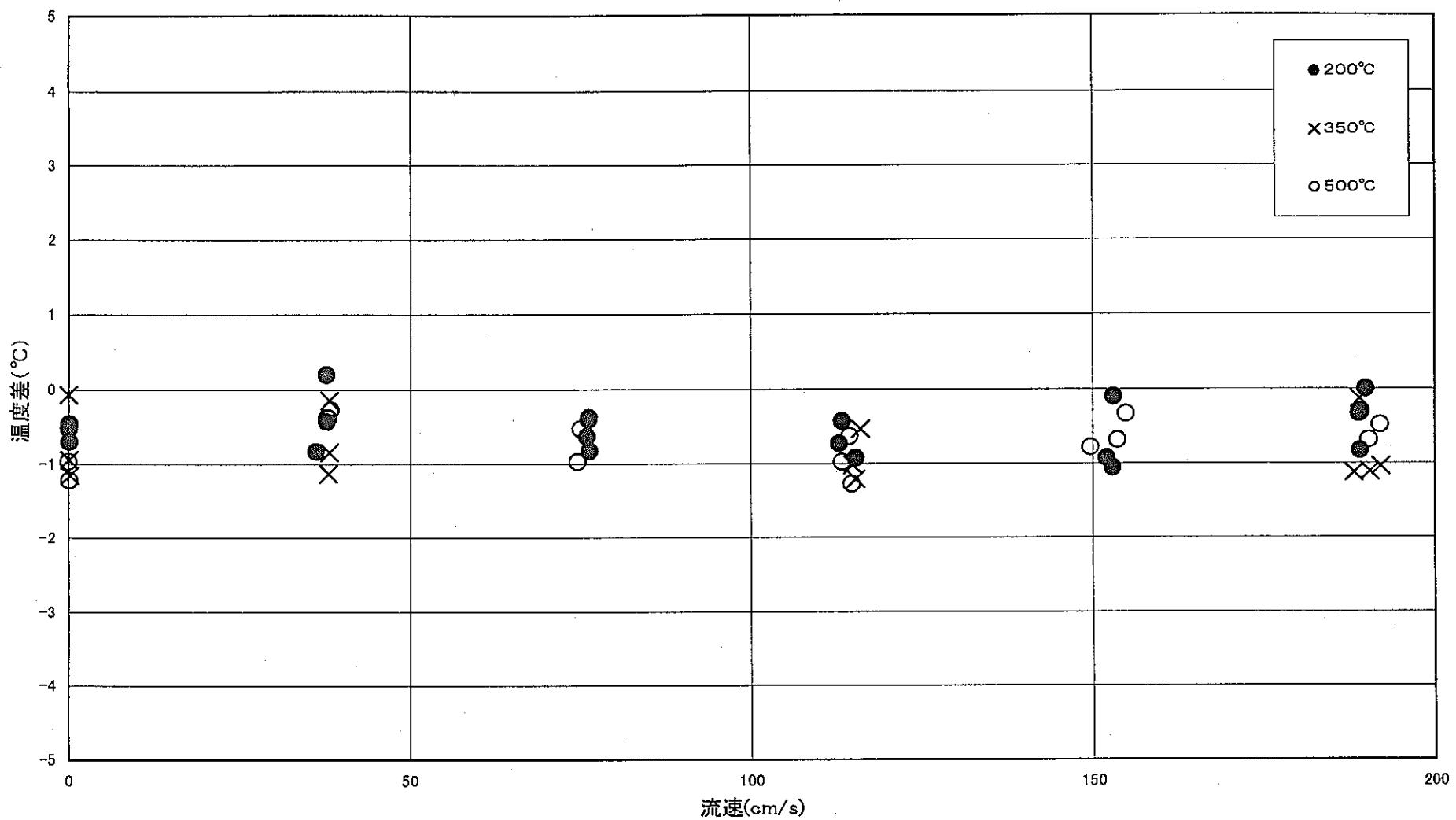


図3.5 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差(第2～第4サイクル 超音波温度計②)

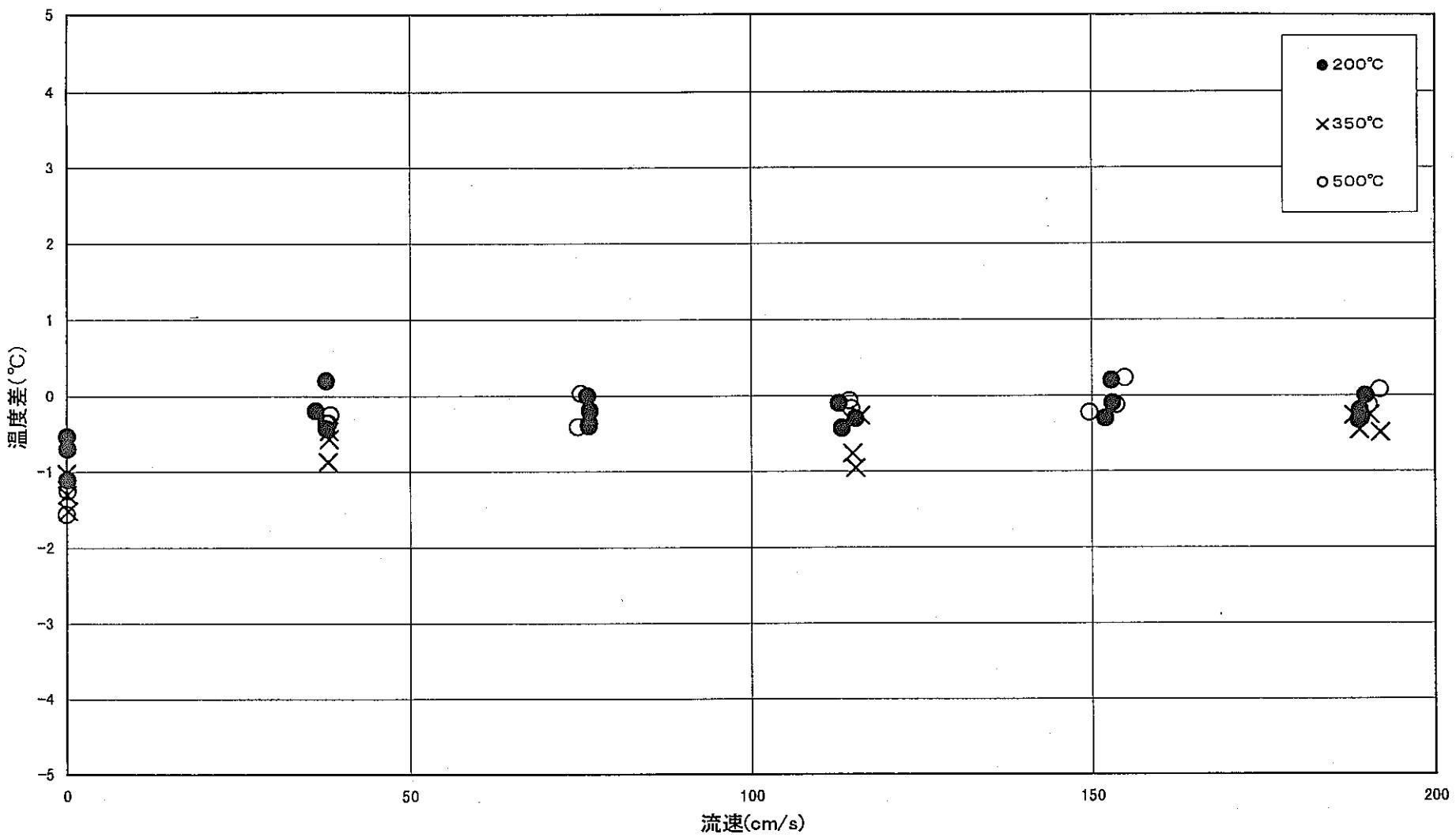


図3.6 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差(第2～第4サイクル 超音波温度計③)

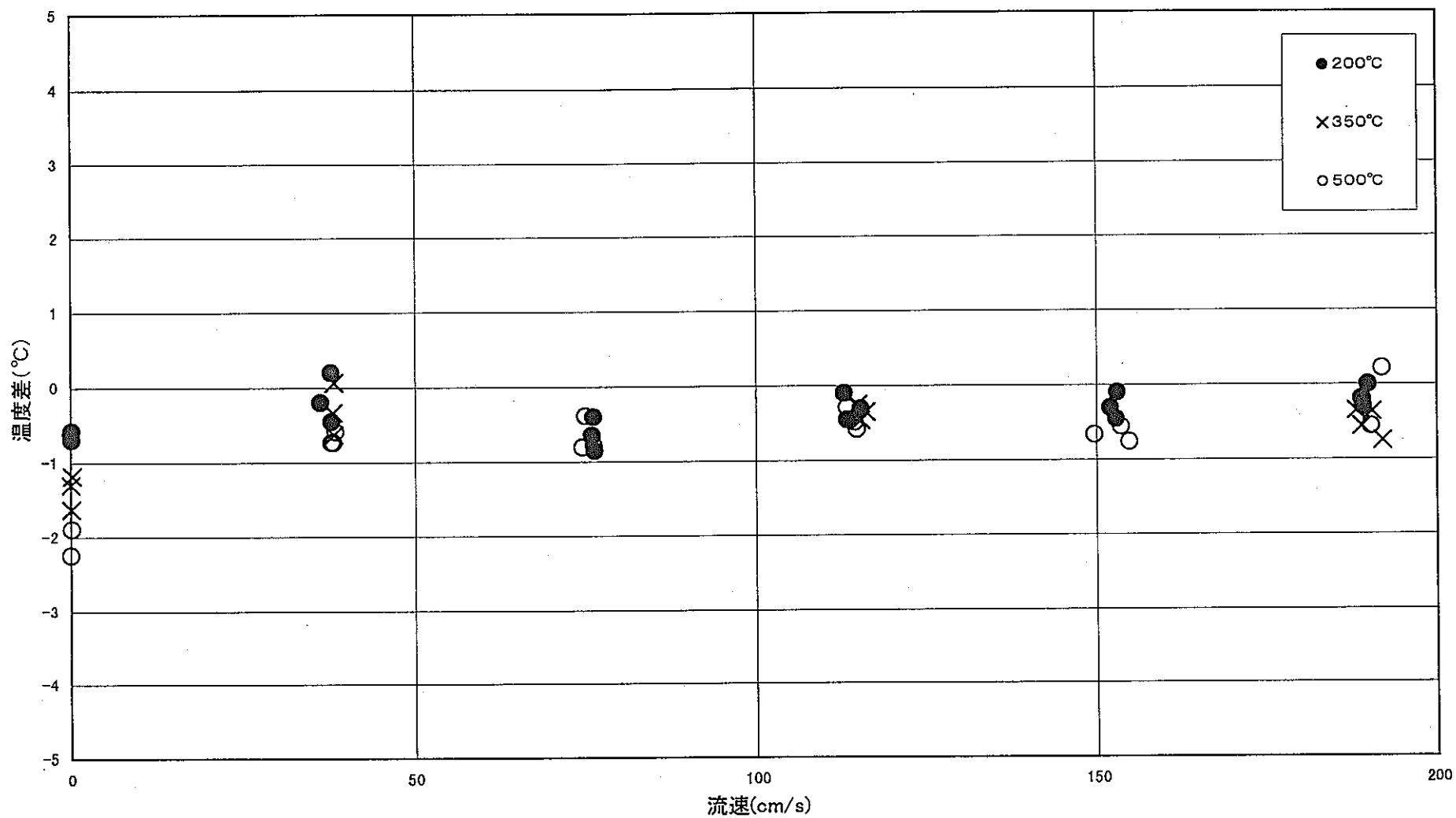


図3.7 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差(第2~第4サイクル 超音波温度計④)

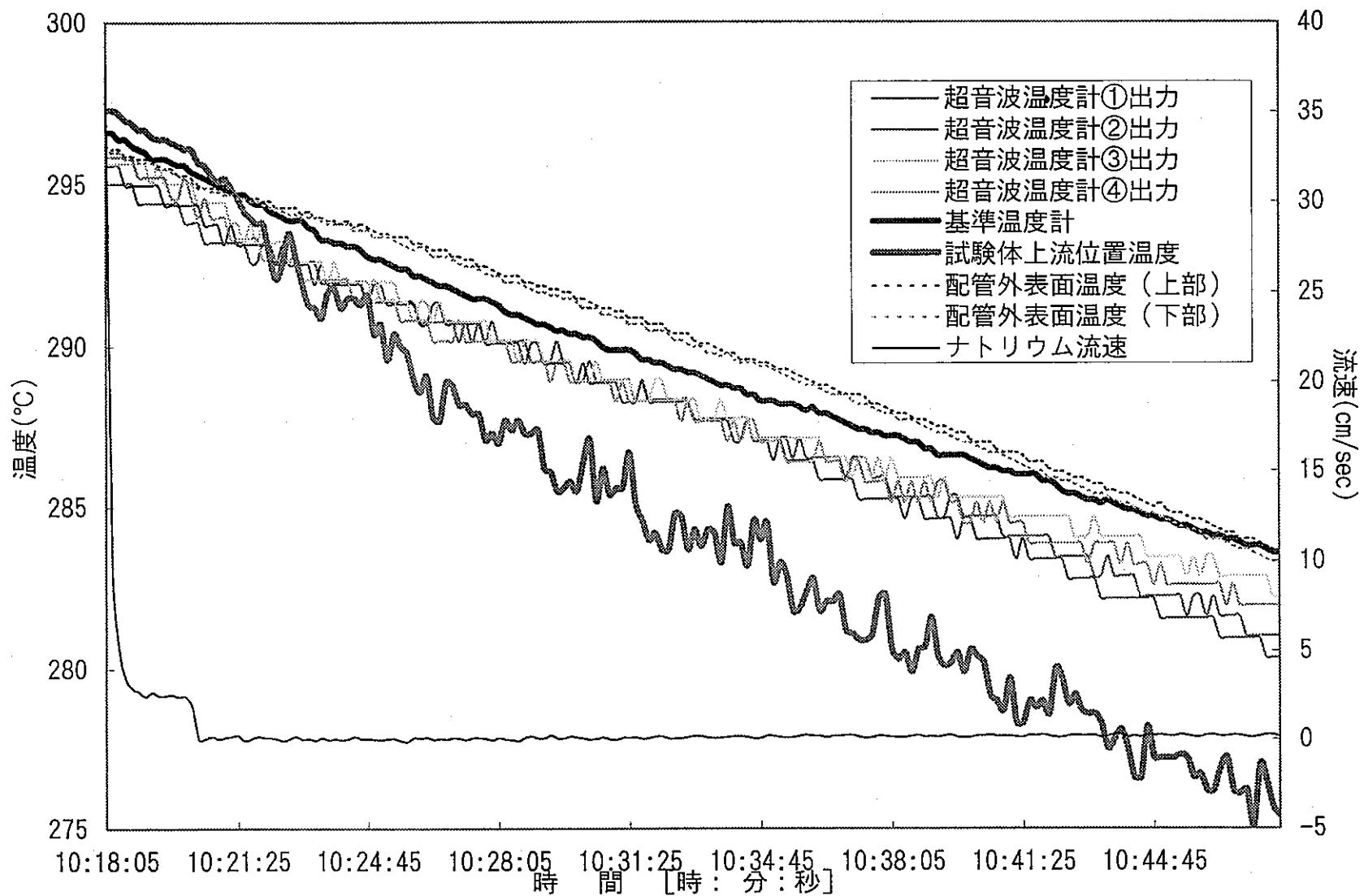


図 3.8 ポンプ停止時の温度変化（流速 40cm/sec → 0cm/sec）

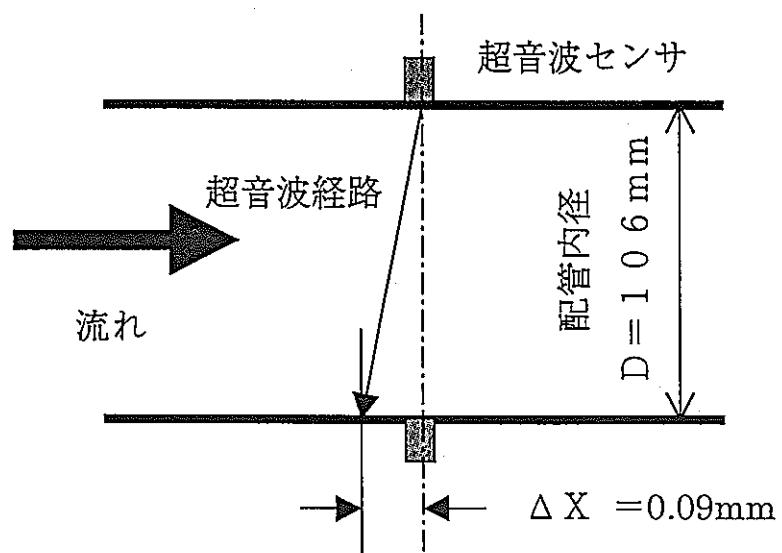


図3.9 流速による超音波伝搬経路の変化

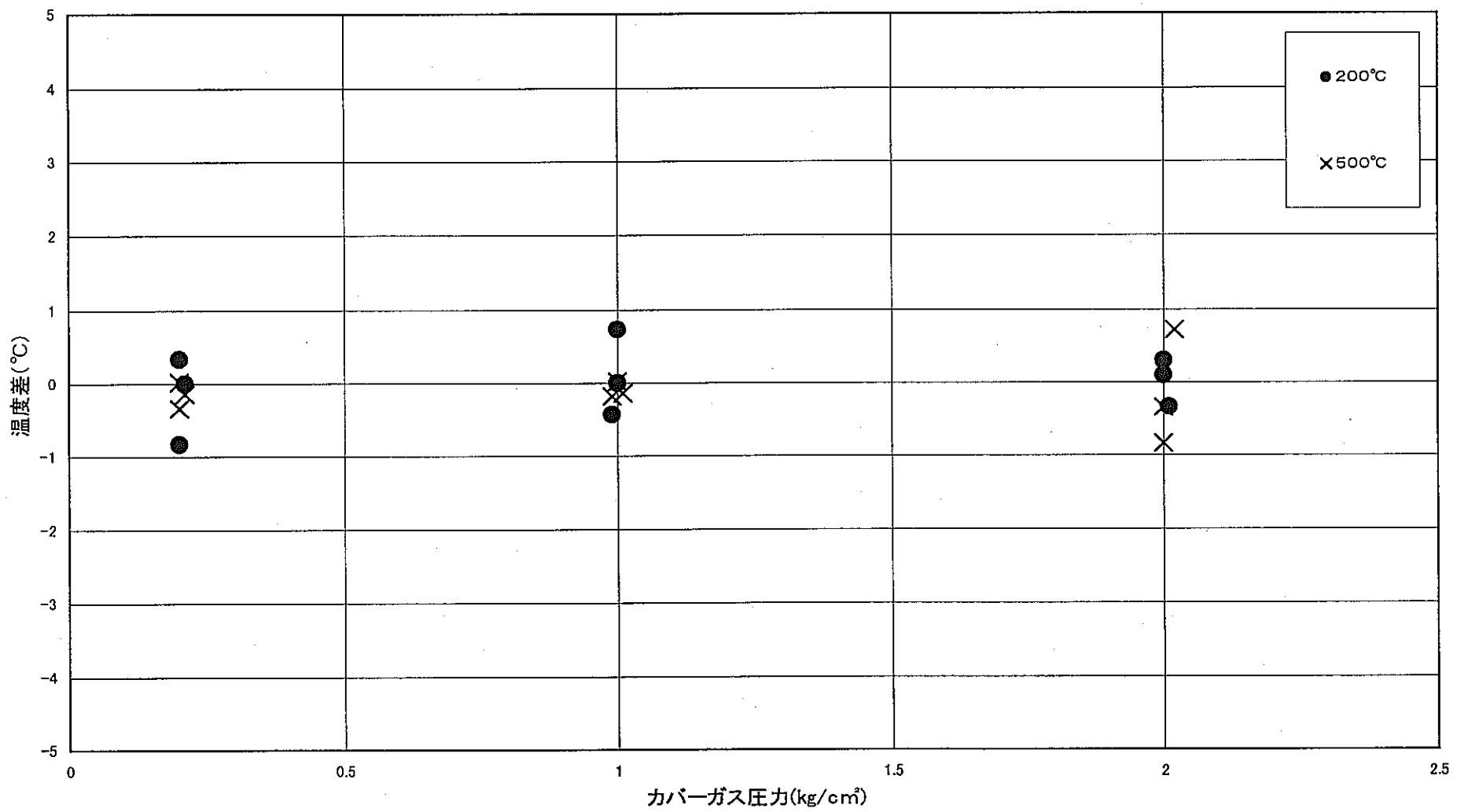


図3. 10 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度との差(第2~第4サイクル 超音波温度計①)

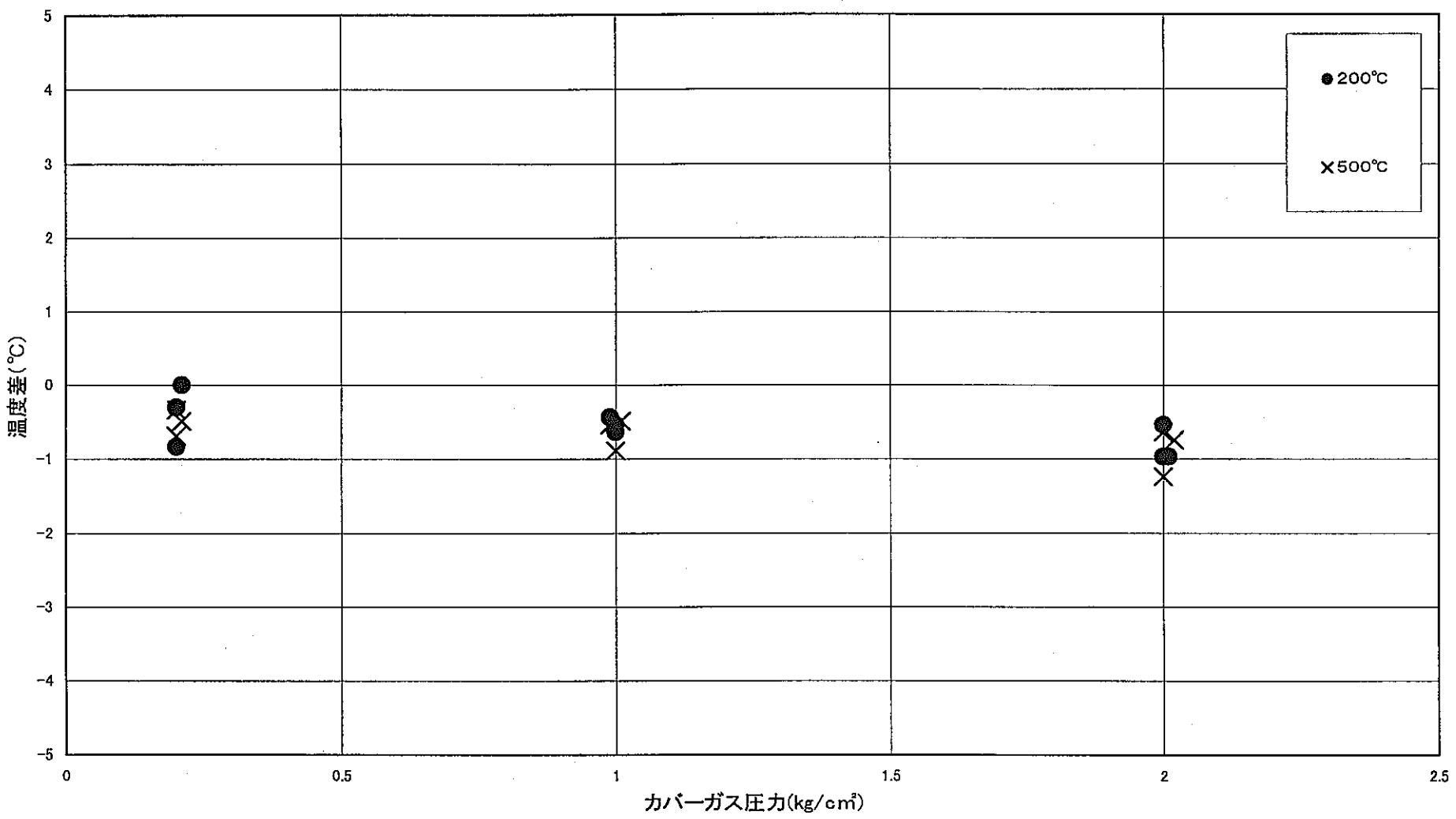


図3. 11 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度との差(第2～第4サイクル 超音波温度計②)

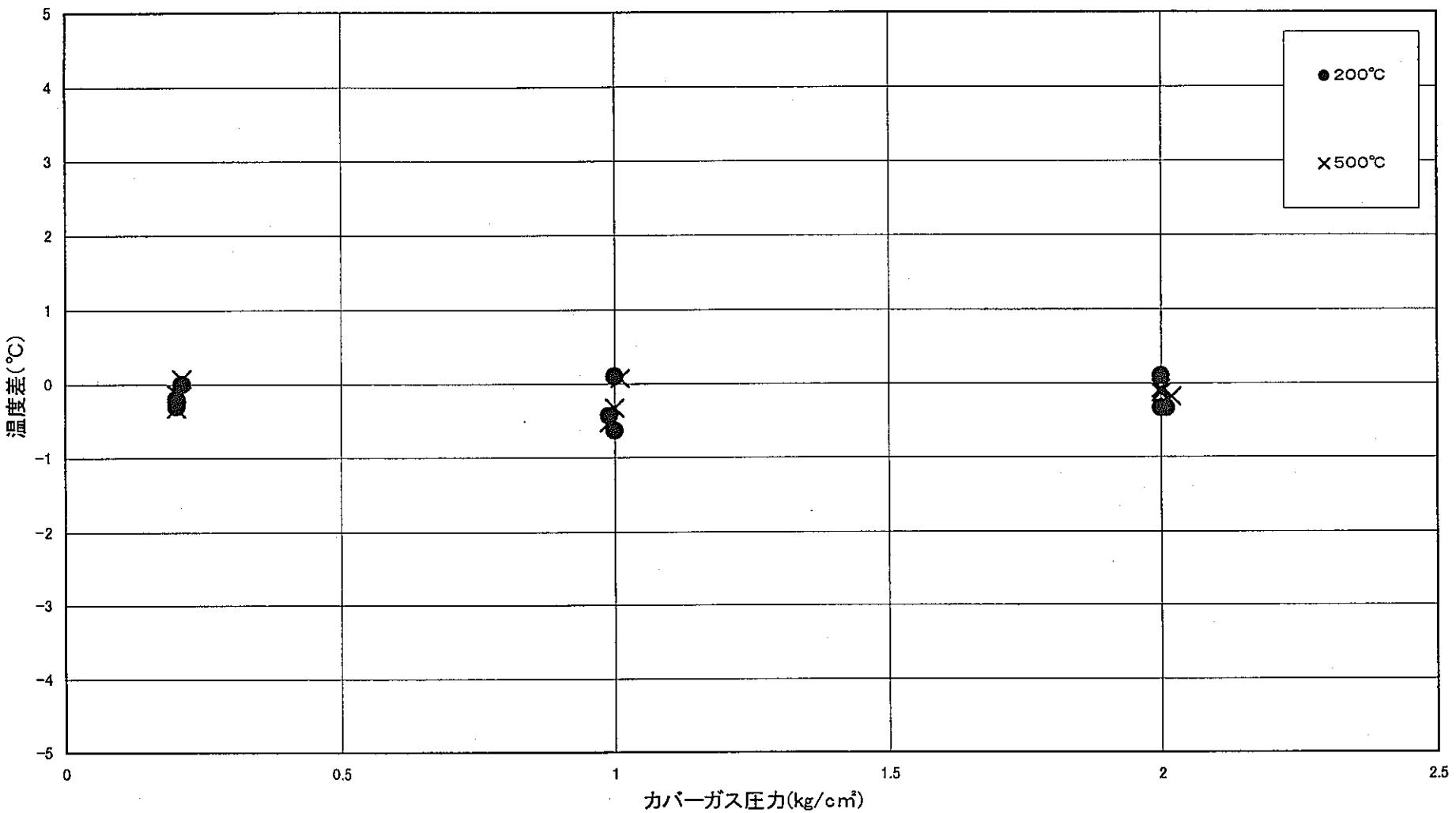


図3. 12 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度との差(第2～第4サイクル 超音波温度計③)

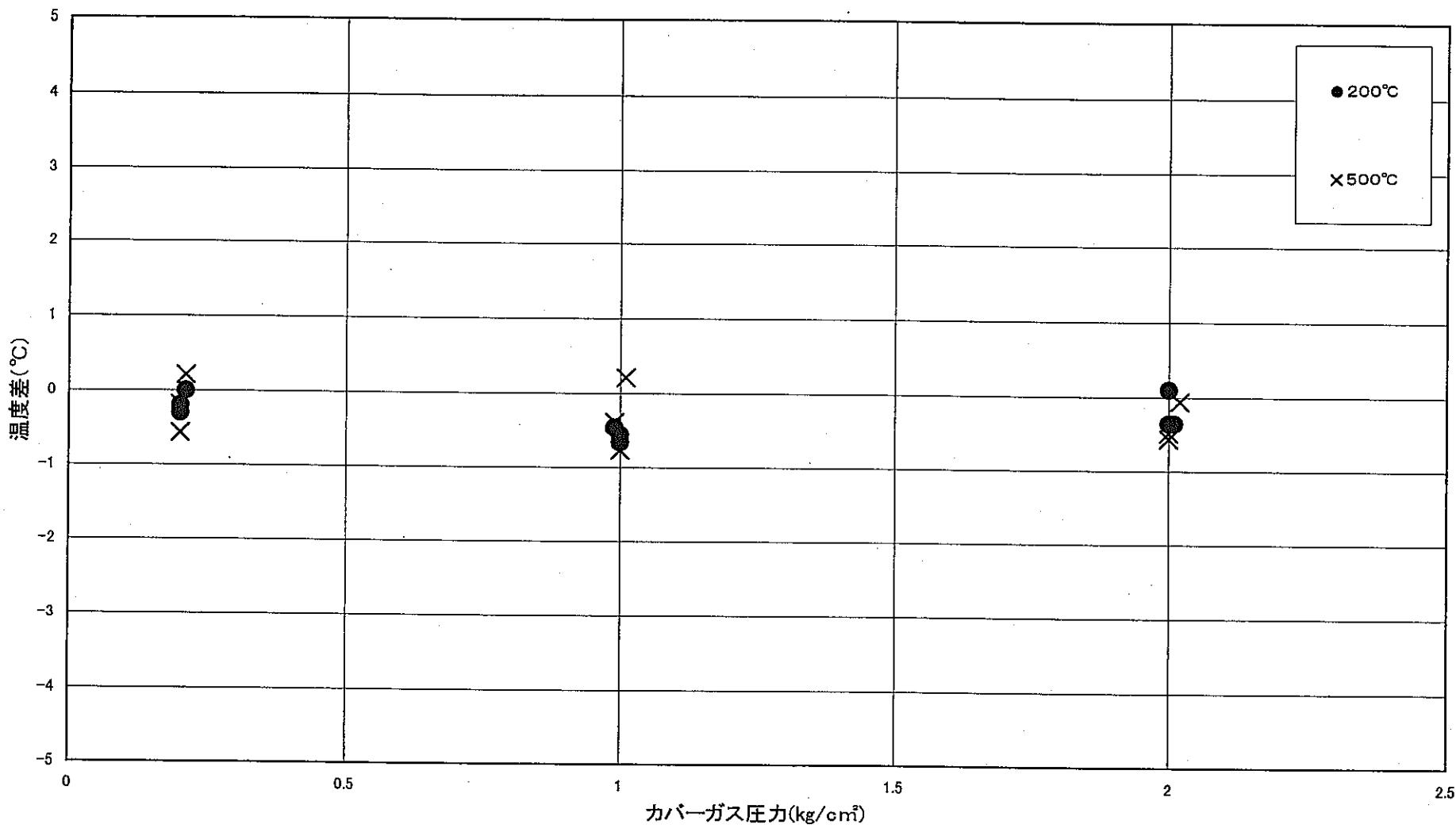


図3.13 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度との差(第2～第4サイクル 超音波温度計④)

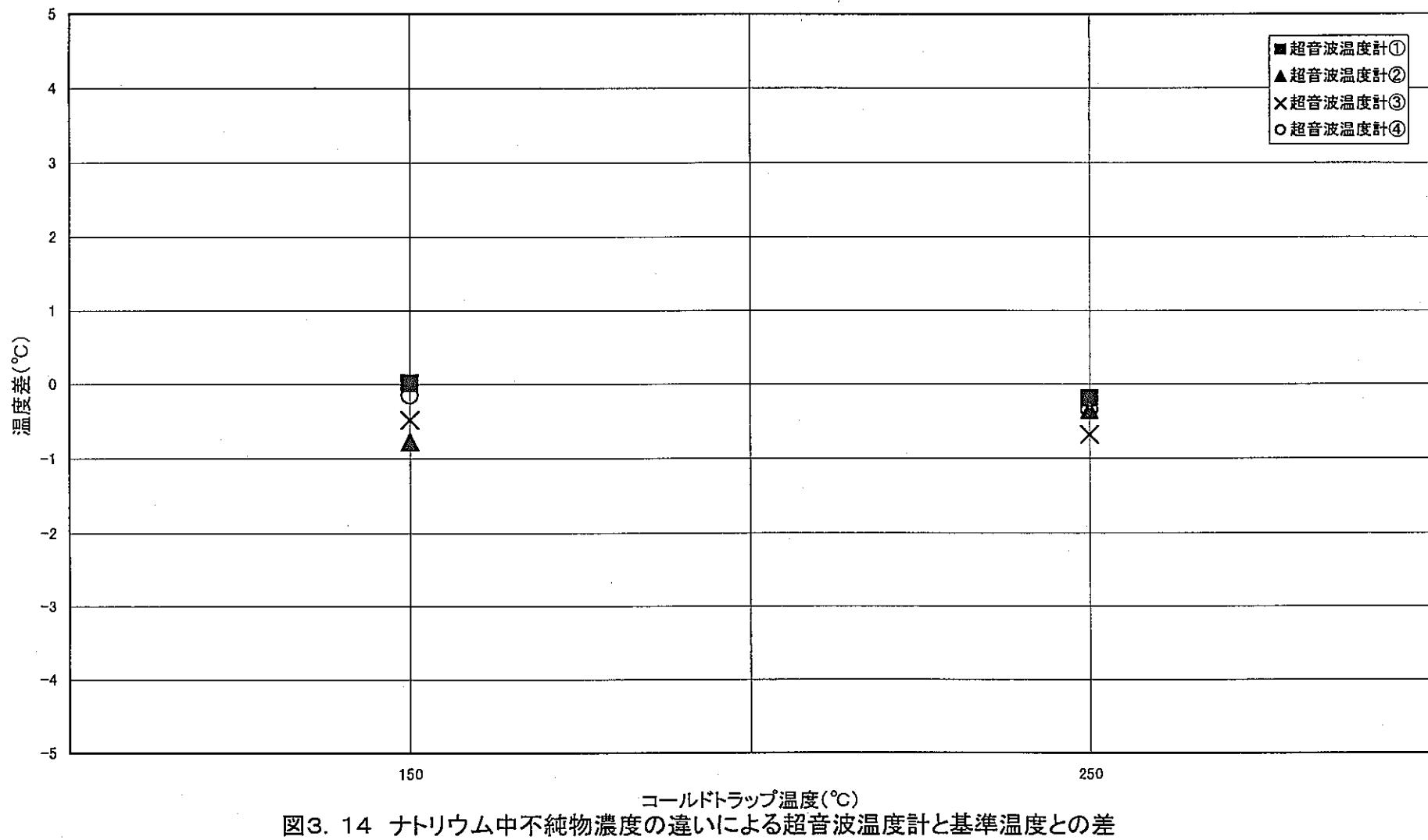


図3. 14 ナトリウム中不純物濃度の違いによる超音波温度計と基準温度との差

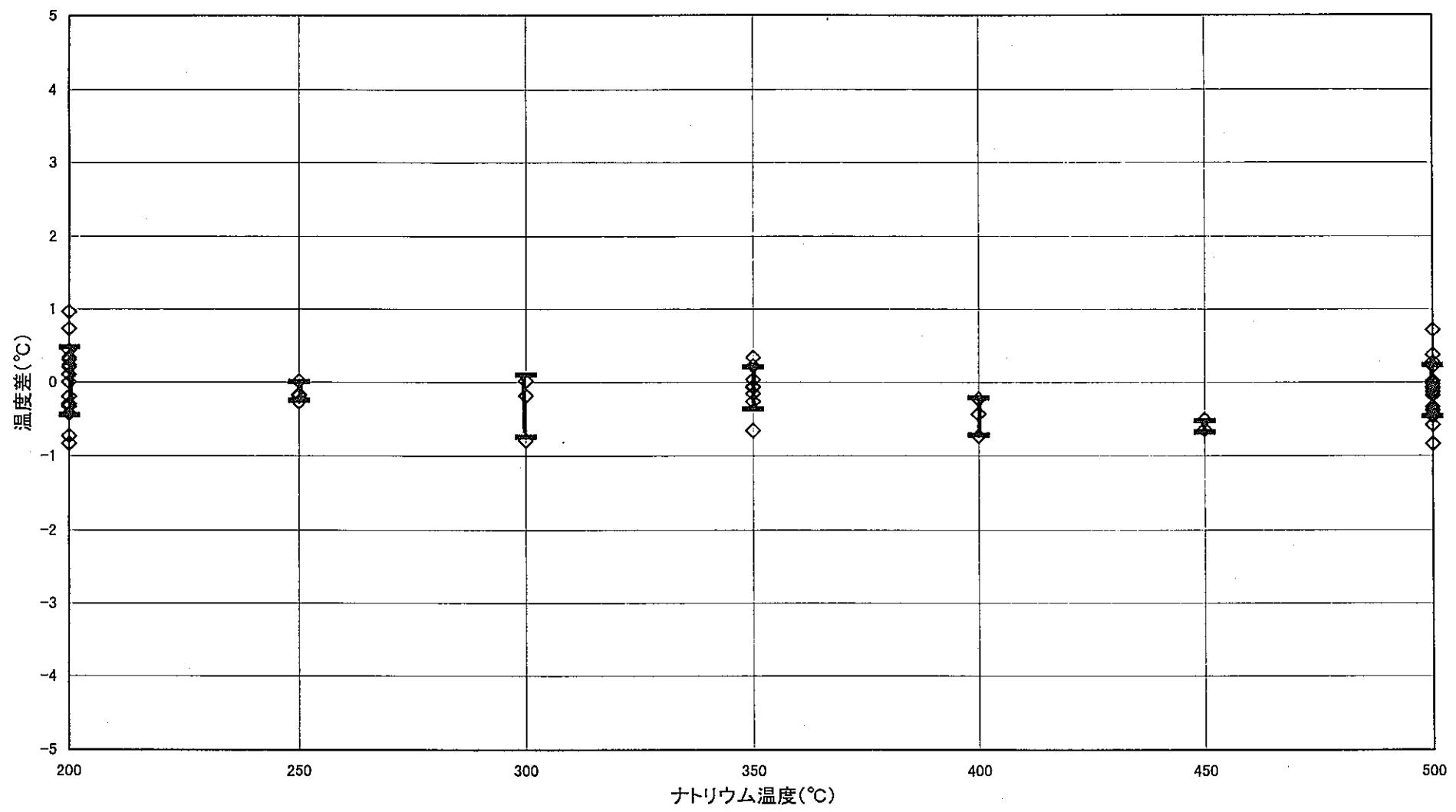


図3. 15 超音波温度計と基準温度との差のまとめ(超音波温度計①)

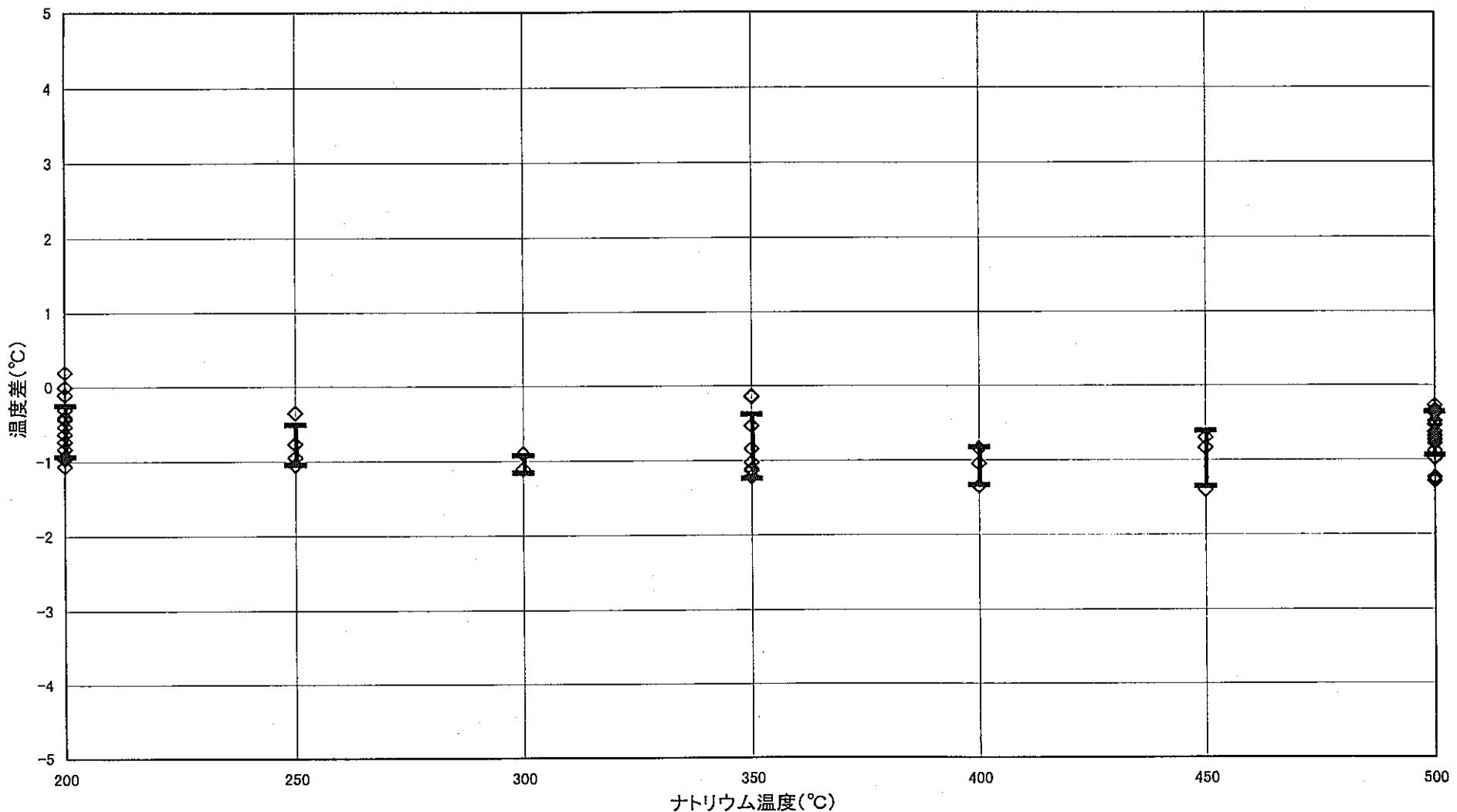


図3. 16 超音波温度計と基準温度との差のまとめ(超音波温度計②)

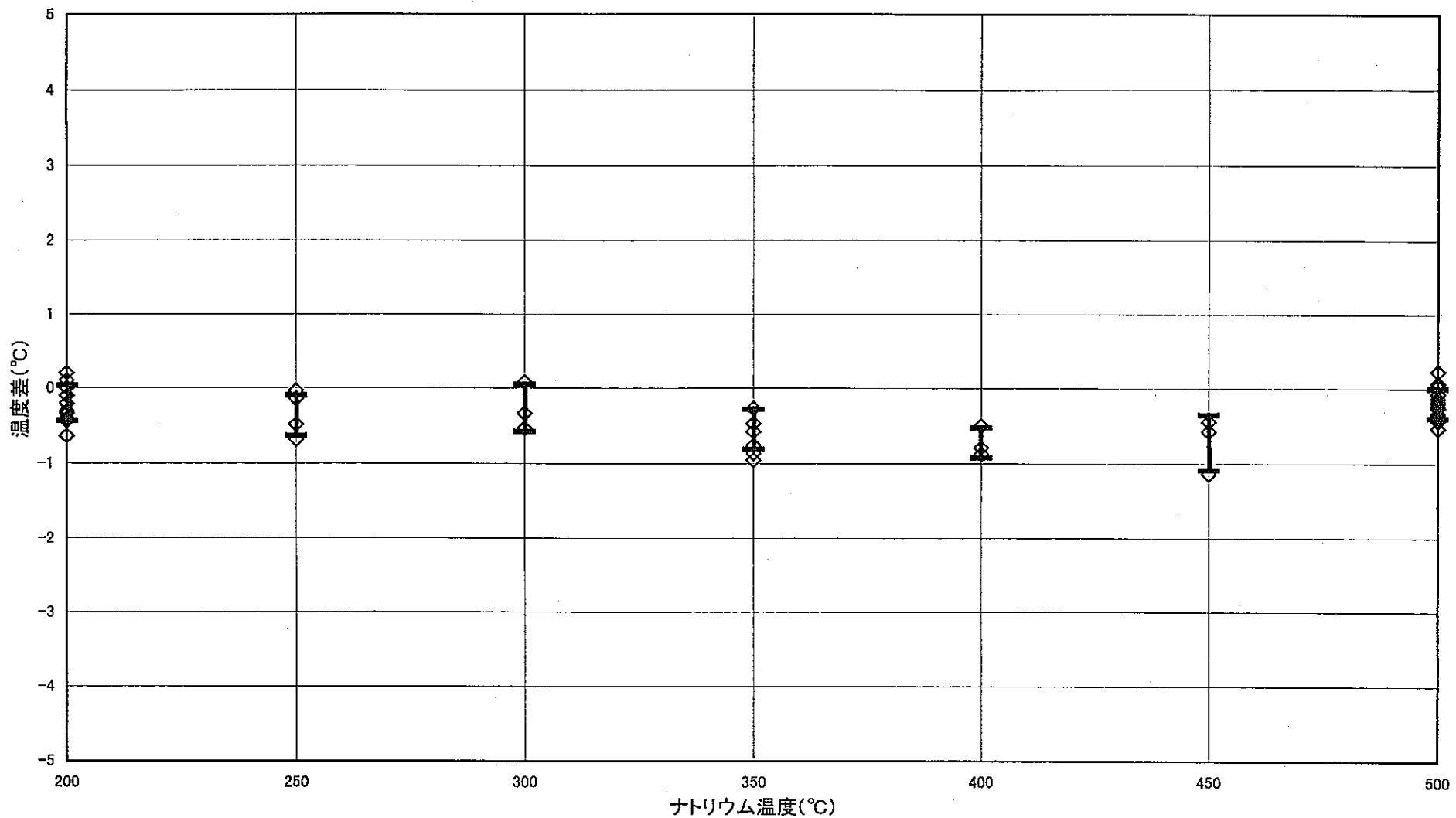


図3. 17 超音波温度計と基準温度との差のまとめ(超音波温度計③)

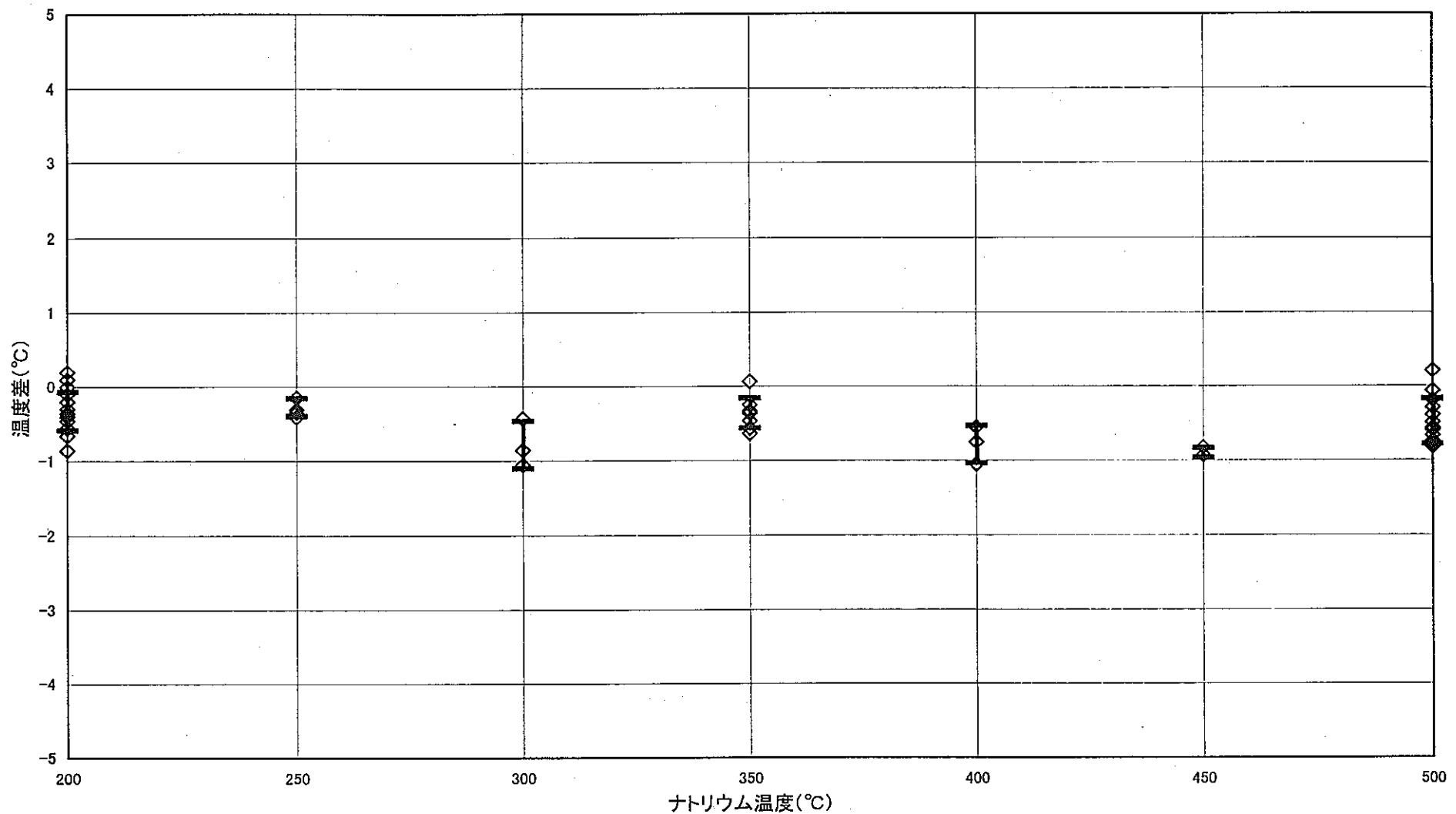


図3. 18 超音波温度計と基準温度との差のまとめ(超音波温度計④)

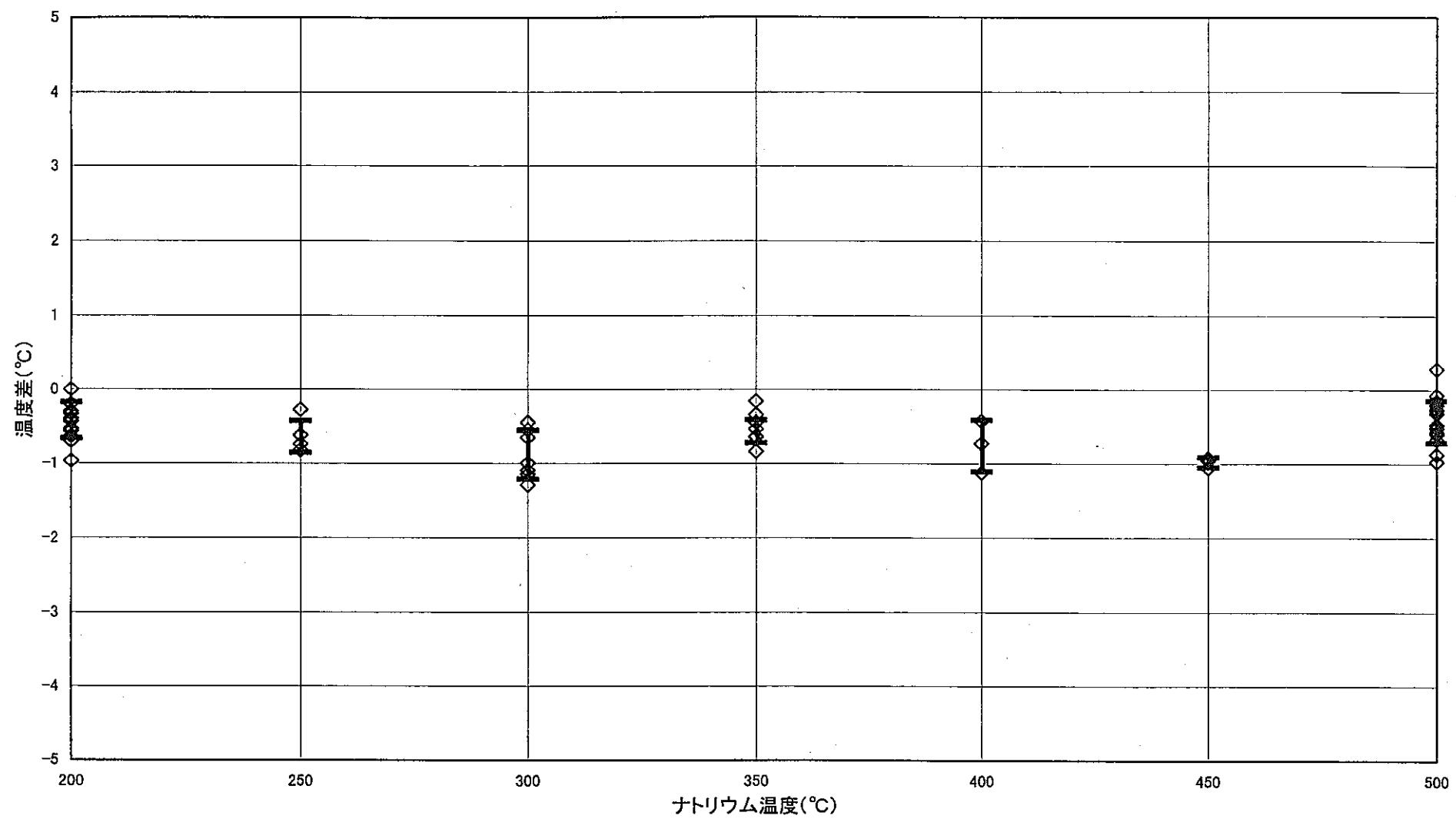


図3. 19 超音波温度計と基準温度との差のまとめ(相関処理 超音波温度計①)

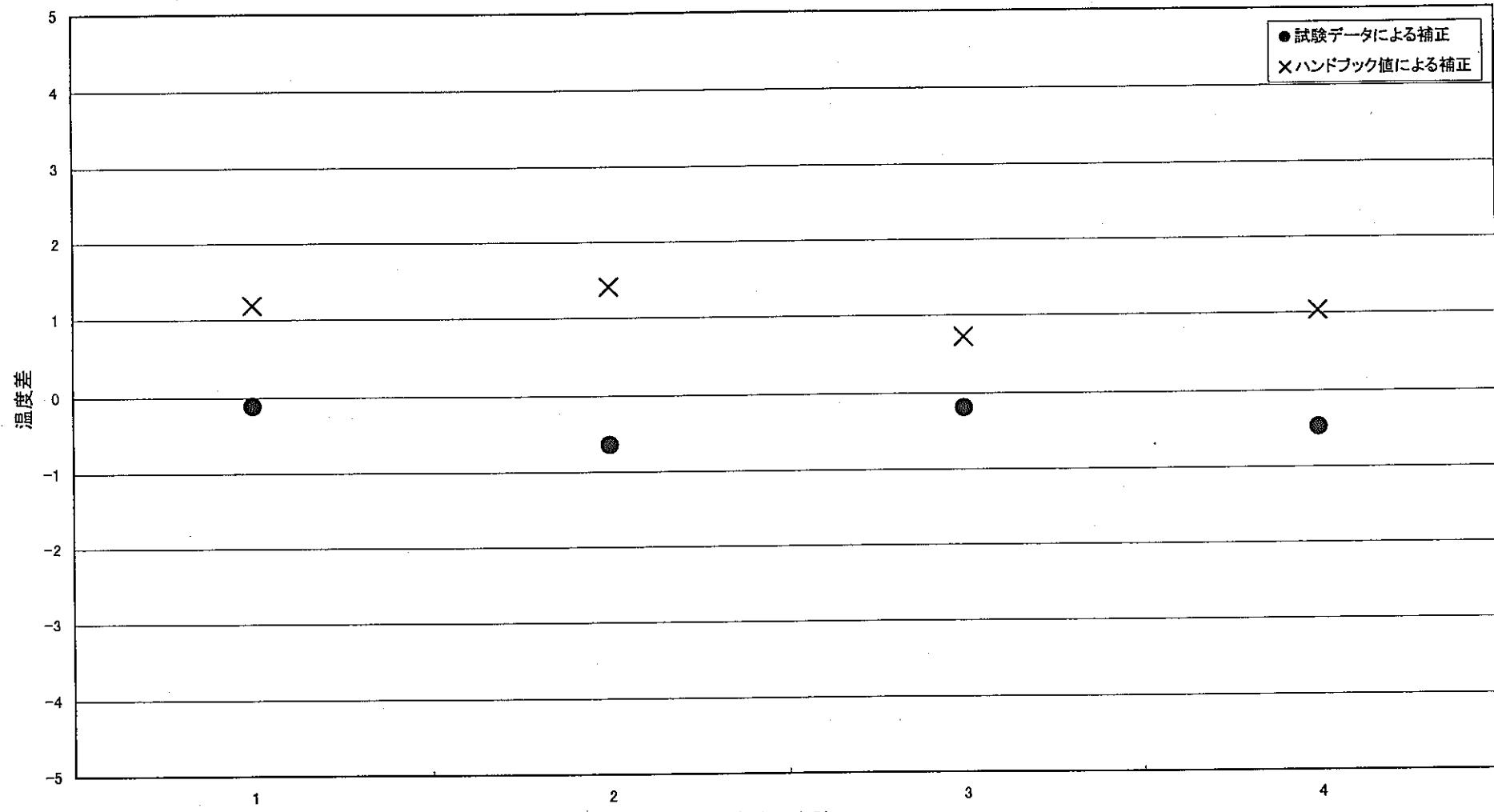


図3. 20 热膨胀の試験データによる補正とハンドブック値による補正の差
(ナトリウム温度500°Cの時の基準温度との差の平均値)

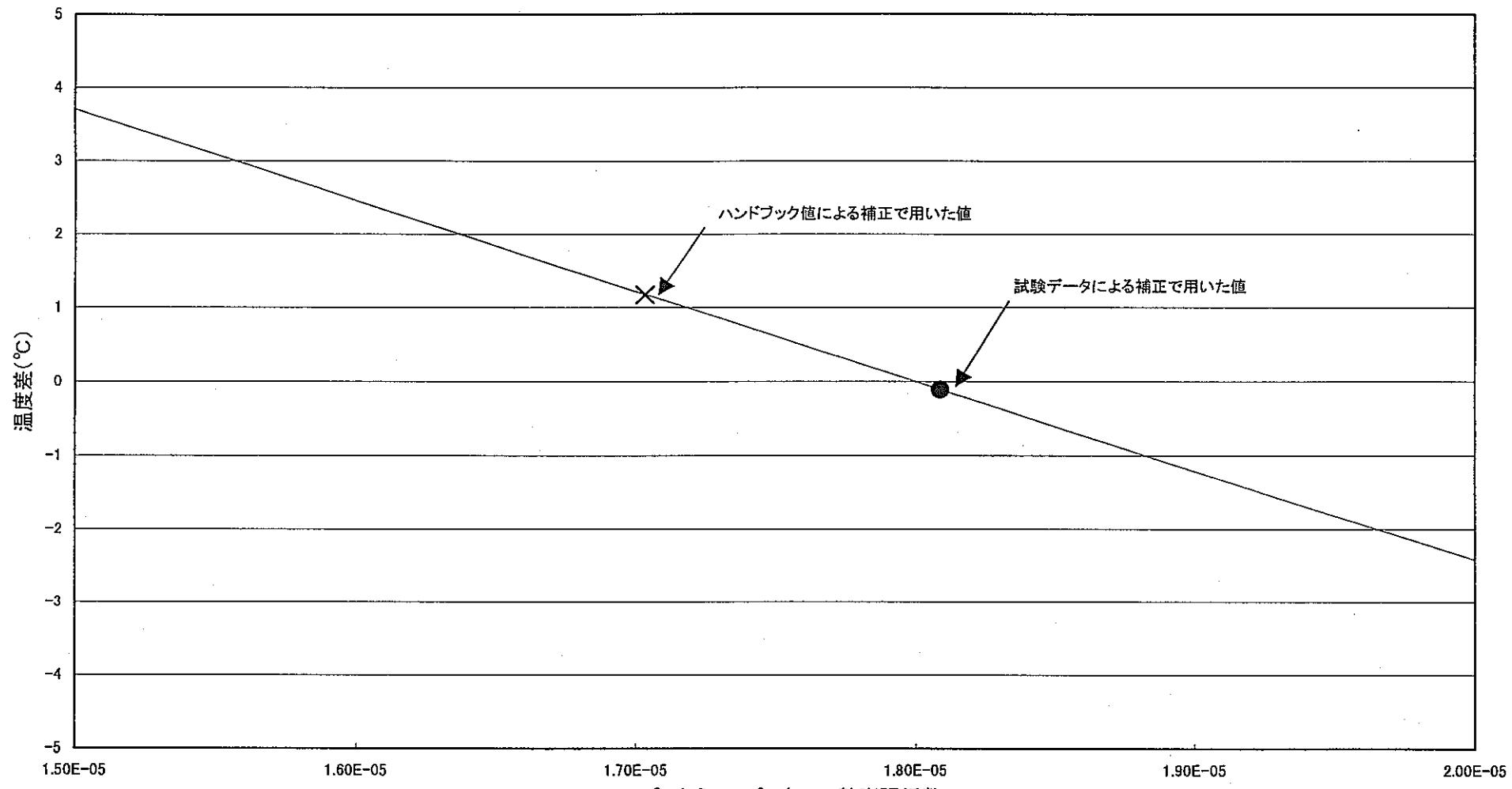


図3. 21 热膨張係数の値による基準温度との差の变化
(ナトリウム温度500°Cの時の基準温度との差の平均値)

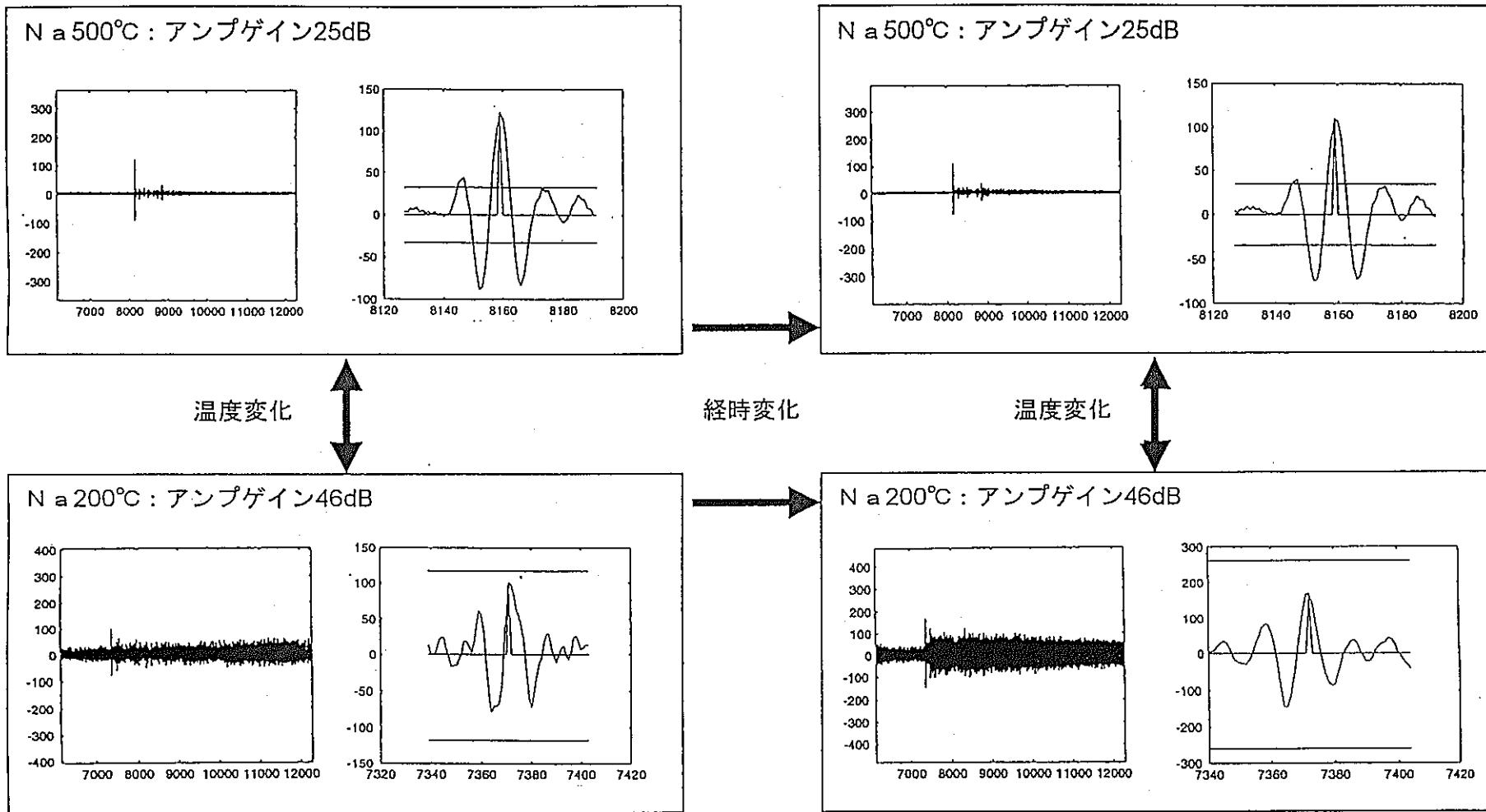
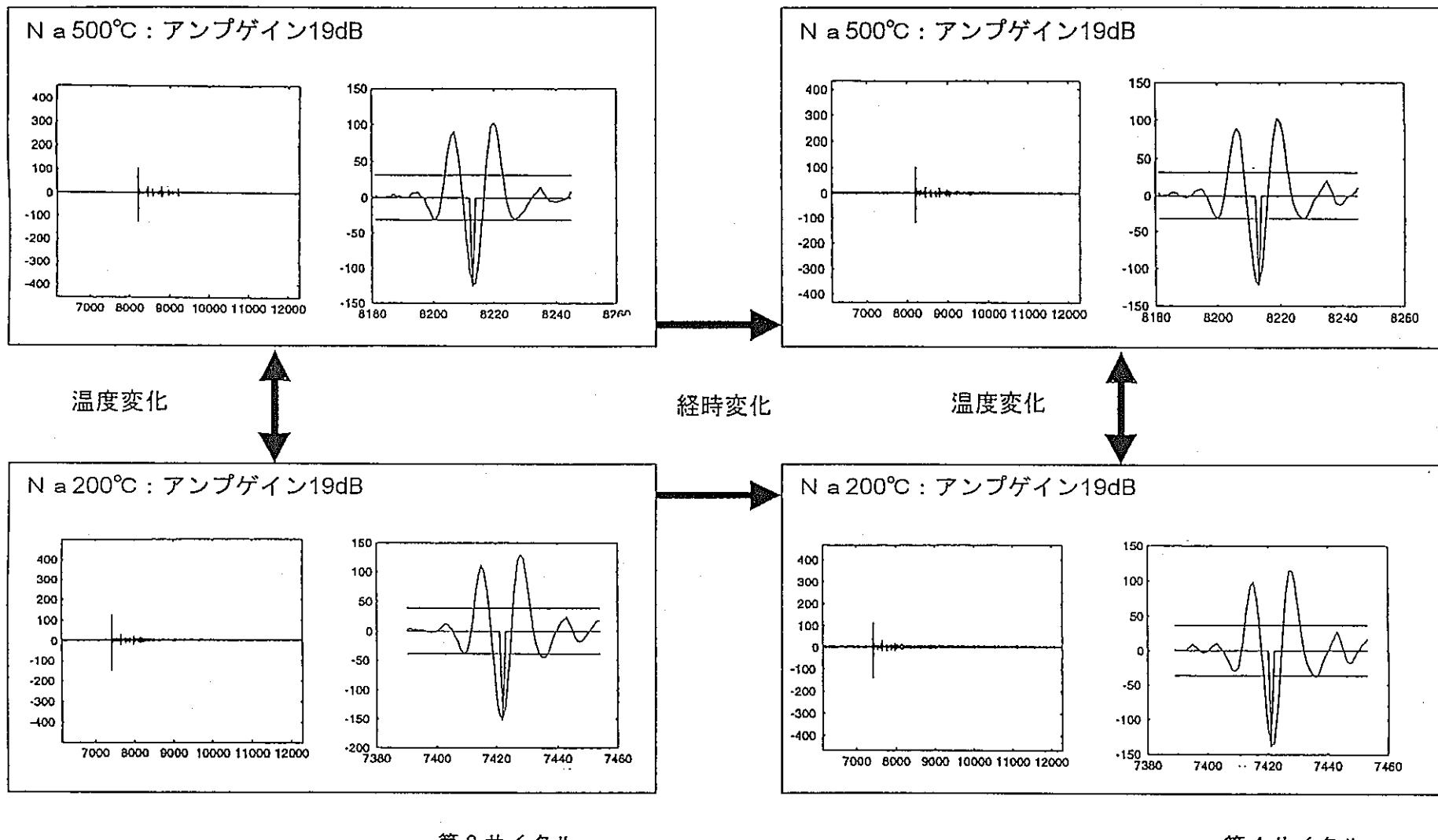


図3. 22 温度と時間による波形変化(超音波温度計① 1.5往復波)



第2サイクル

第4サイクル

図3. 23 温度と時間による波形変化(超音波温度計③ 1.5往復波)

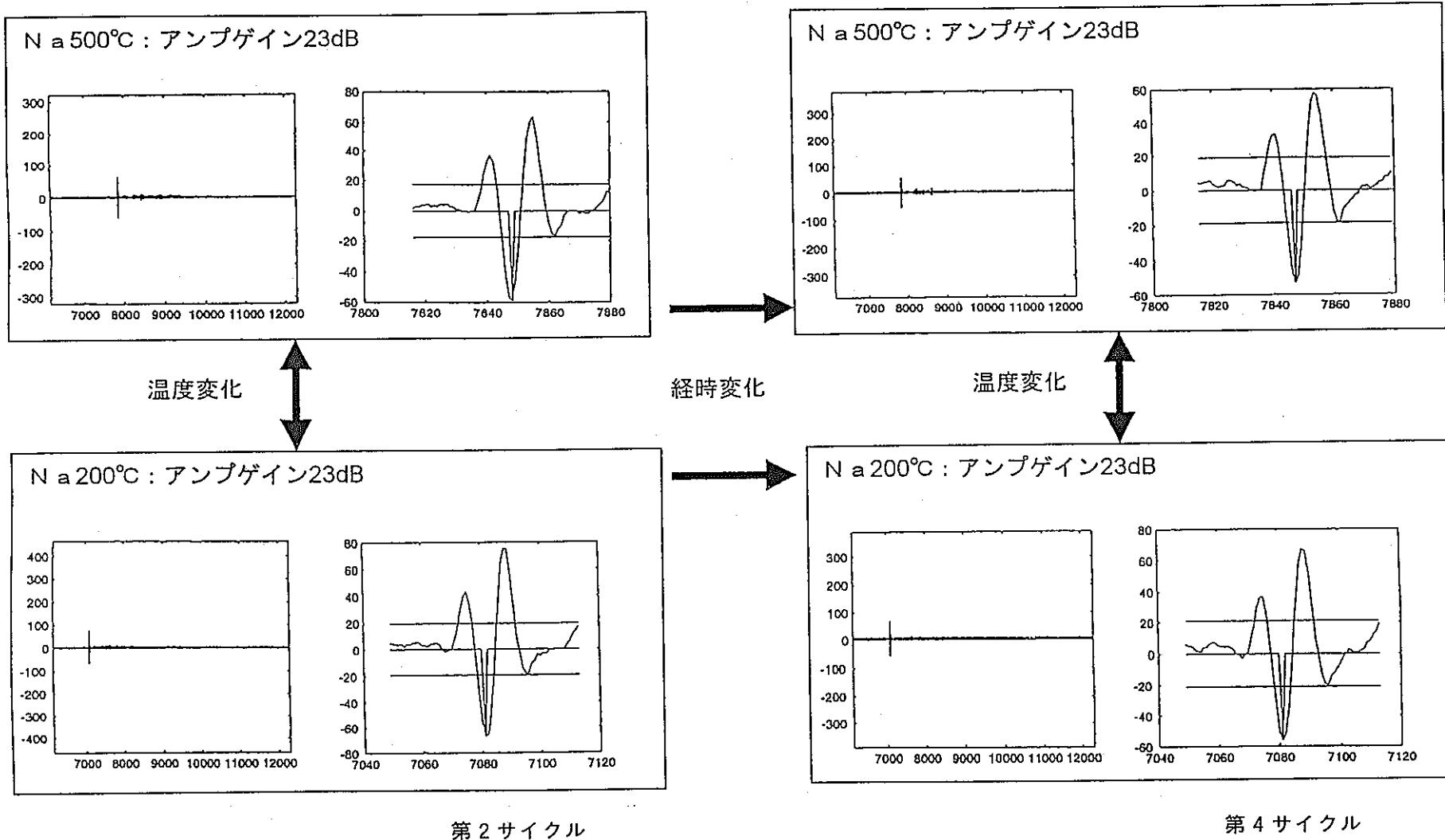


図3.24 溫度と時間による波形変化(超音波温度計④ 1.5往復波)

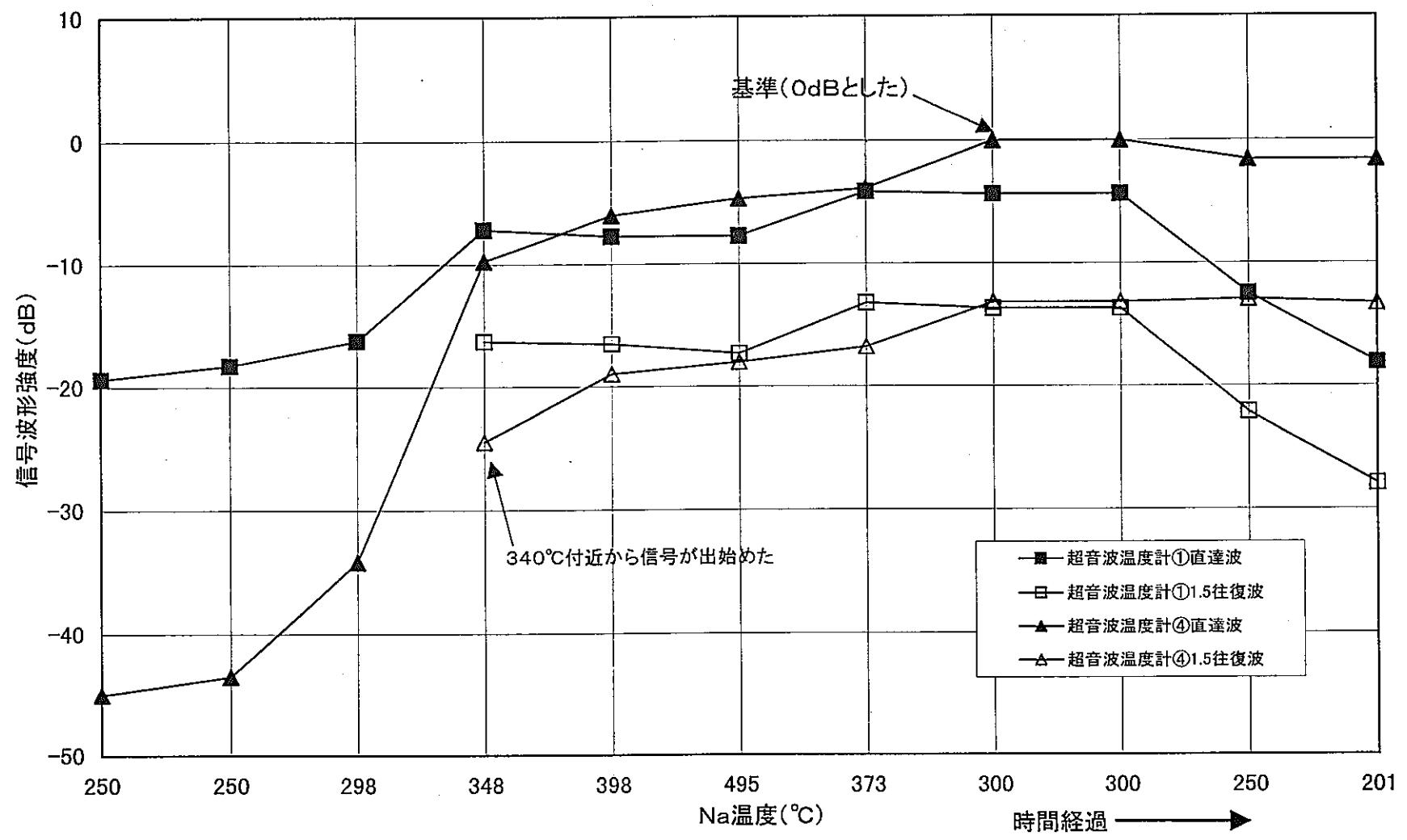


図3. 25 配管のNa濡れ変化による信号波形強度の変化

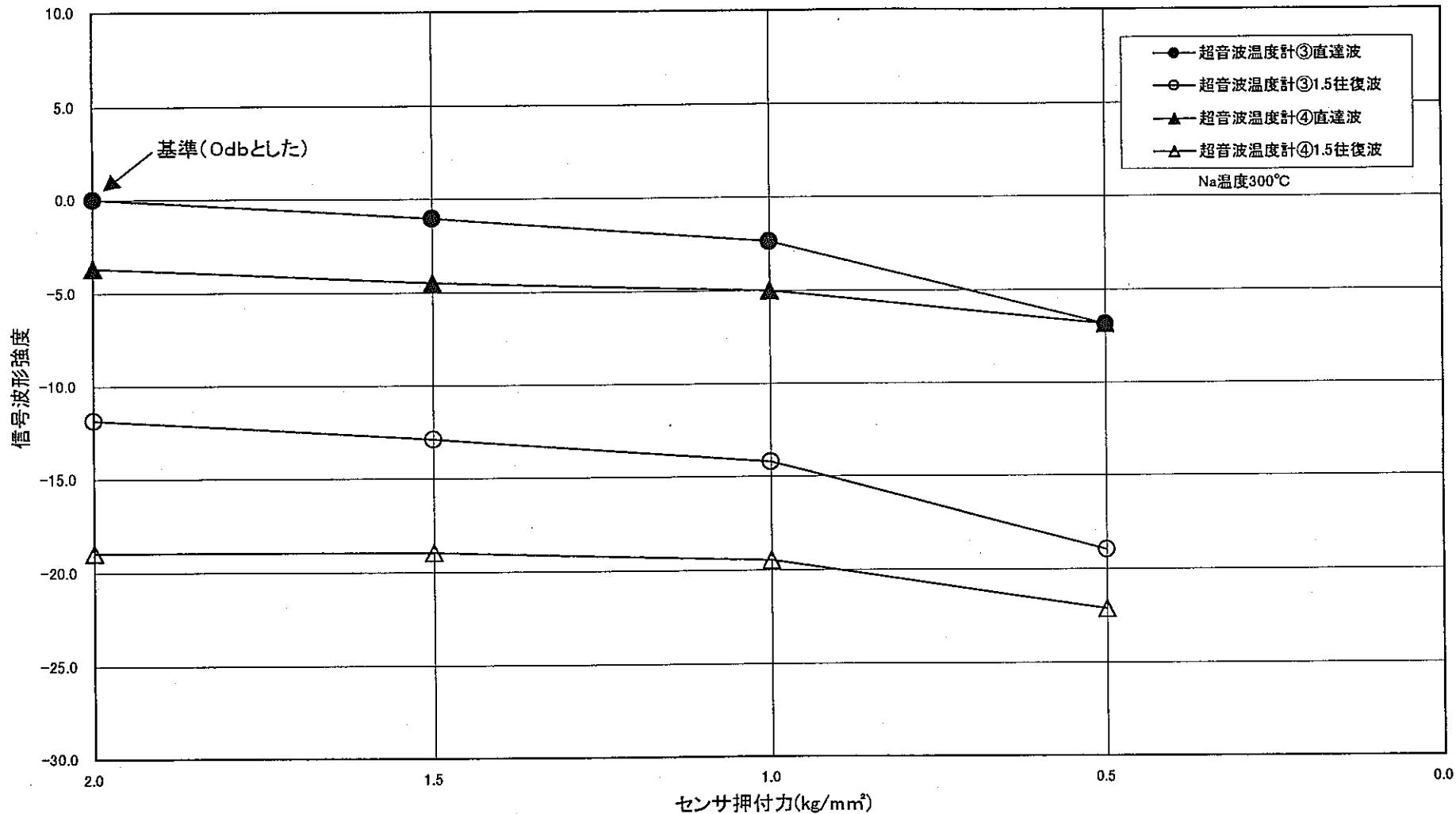


図3. 26 センサ押付力変更による信号波形強度の変化