

超音波温度計ナトリウム試験（2）

— 音響ガイド棒方式試験体の試験結果のまとめ —

1999年1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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Sections,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1194,

Japan

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

1999

超音波温度計ナトリウム試験(2)

—音響ガイド棒方式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ることで、ナトリウム温度を算出する。この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。本報告は、音響ガイド棒と低温用の超音波トランスデューサ（設計使用温度80℃）を用いた超音波温度計試験体のナトリウム試験結果をまとめた。

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、約4℃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は基準温度計との差（計測値のばらつき）で約2℃強程度と小さい値になった。
- 2) 配管に垂直な音響ガイド棒を用いた超音波温度計の低温（200℃）での試験のみによる校正の結果（一点校正）は、全試験温度校正を実施した場合に対して2℃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安定した値が得られる。
- 4) 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

The Ultrasonic Wave Thermometer Sodium Test (2)

— A Summary of Ultrasonic Thermometer Test Results for Pipe-flow Using
an Externally Mounted Ultrasonic Transducer with Acoustic Guide Rods —

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

Abstract

An ultrasonic thermometer based on the temperature dependence of the velocity of sound in a medium is being developed to measure the temperature of sodium non-intrusively. 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 conducted in sodium pipe-flow in order to evaluate various aspects of implementing the ultrasonic thermometer. This report describes sodium test results of the ultrasonic thermometers using acoustic guide rods and a heat-resistant, but low temperature (the 80 °C design use temperature) ultrasonic transducer.

The results and conclusions to date are as follows:

- 1) The ultrasonic 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 in the experiment was approximately 2 °C, a smaller value than the expected 4 °C of the system.
- 2) The ultrasonic thermometer using vertical acoustic guide rods for pipeflow has 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 and a two-point calibration approach, over the temperature range is only expected to be about 2 °C.
- 3) The number of transmit and receive cycles from which a mean value was calculated was determined.
- 4) The in-sodium test period was about 2 months. No noticeable change in measurement characteristics of the ultrasonic thermometer were observed.

Therefore, there is growing confidence in the device 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	5
3.1 超音波によるNa温度の計測	5
3.2 Na温度の算出方法	5
3.2.1 垂直式温度計	5
3.2.2 斜角式温度計	6
3.3 試験結果の比較について	7
3.3.1 計測誤差	7
3.3.2 各サイクルの違い	8
3.4 Na温度以外の影響	8
3.4.1 Na流速の影響	8
3.4.2 カバーガス圧力の影響	9
3.4.3 Na中不純物濃度の影響	9
3.4.4 音響ガイド棒の影響	9
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）	9
3.5.1 超音波温度計によるNa温度測定	9
3.5.2 200℃のみの校正の検討	10
3.5.3 まとめ	11
3.6 超音波波形の検討（音響結合材、配管Na濡れ影響等検討）	11
3.6.1 受信波形強度変化	11
3.6.2 まとめ	12
3.7 今後の改良点等	12
第4章 結論	14
謝辞	15
参考文献	16

表リスト

表 2.1	超音波温度計試験体の仕様	17
表 2.2	試験パラメータ	17
表 2.3	試験評価項目	18

図リスト

図 2.1	超音波温度計の計測概念	19
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	20
図 2.3	試験体配管部構造	21
図 2.4	音響ガイド棒への超音波トランスデューサ取り付け部の構成	22
図 2.5	Na試験装置の説明図	23
写真 2.1	超音波温度計試験体	24
図 3.1	ナトリウム温度と超音波伝搬時間の関係 (垂直式)	25
図 3.2	ナトリウム温度と超音波伝搬時間の関係 (斜角式)	26
図 3.3	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 (垂直式)	27
図 3.4	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	28
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 (垂直式)	29
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 (斜角式)	30
図 3.7	流速による超音波伝搬経路の変化	31
図 3.8	圧力の違いによる超音波温度計と基準温度計との差 (垂直式)	32
図 3.9	圧力の違いによる超音波温度計と基準温度計との差 (斜角式)	33
図 3.10	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 (垂直式)	34
図 3.11	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 (斜角式)	35
図 3.12	音響ガイド棒の影響 (垂直式)	36
図 3.13	音響ガイド棒の影響 (斜角式)	37
図 3.14	超音波温度計と基準温度計との差のまとめ (垂直式)	38
図 3.15	超音波温度計と基準温度計との差のまとめ (斜角式)	39
図 3.16	超音波温度計計測値のばらつき	40
図 3.17	熱膨張の試験データによる補正と文献値による補正の差	41

図 3.18	温度と時間による波形変化（超音波温度計 垂直式）	4 2
図 3.19	温度と時間による波形変化（超音波温度計 斜角式）	4 3
図 3.20	配管の Na 濡れ変化による信号波形強度の変化	4 4

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、漏洩箇所となった温度計さや (熱電対ウエル) 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) 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。なお、同時に試験した高温用超音波トランスデューサを用いる超音波トランスデューサ配管直付型試験体については、既に報告済みである¹⁾。

本試験に用いた超音波温度計試験体は、音響ガイド棒を配管と超音波トランスデューサの間に介することで (本試験体では、音響ガイド棒は試験体配管部に溶接で取り付けられている。)、高温配管内Na中の超音波伝搬時間計測を低温用 (設計使用温度 80 °C) の超音波トランスデューサで計測する方式を採用している。低温用の超音波トランスデューサは、構造的には超音波探傷等で一般に使用されているものと同様のもので、高温用のもの¹⁾ (素子にニオブ酸リチウムを用いて 500 °C 以上の使用を考慮したもの) に対して感度と信頼性が高いものが使用できる。さらに、超音波トランスデューサは、配管から離れたガイド棒の先端に取り付けられることになるので、供用中に容易に単体で交換可能である。

なお、超音波温度計試験体は、Na温度計測のみを考えて配管に垂直に超音波を伝搬させてNa温度計測するものと、比較参考用 (本試験体の斜角式超音波温度計の構成では良い性能が期待できないために、斜角式でも計測可能か確認することを目的とした。) に超音波流量計との兼用を想定して配管に対して斜めに超音波を伝搬させて計測するものの2種類を試験した。

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、音響ガイド棒の存在がNa温度計測に及ぼす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等について検討する。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音響ガイド棒を介してNa中に超音波を送信し、配管の対面に同様に取り付けられ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、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、正確なNa中超音波伝搬時間の計測（音響ガイド棒の影響や熱膨張等による配管内Na中伝搬距離の変化を考慮）を行う必要がある。

2.2 試験体及び試験装置

2.2.1 試験体

本試験体は、試験体配管部分に溶接した音響ガイド棒を介して、低温用（設計使用温度80℃）の超音波トランスデューサを取り付ける形式をとり、Na中の超音波の伝搬時間を計測する。

試験体の音響ガイド棒は試験体配管部に溶接で取り付けられ、垂直に設置したもの（垂直式超音波温度計）と、斜めに設置したもの（斜角式超音波温度計）の2種類の形式を採用した。これは、超音波による温度計測のみを考えると垂直式が良いが、斜角式とすることで上流及び下流側への超音波伝搬時間の差から流速成分が計測でき、超音波流量計と共用することが可能なので将来的な発展性を考えたためである。但し、本試験体の斜角式超音波温度計の構造は、下記のように音響ガイド棒影響軽減のためのガイド棒伝搬時間計測が適切とは言えないために垂直式ほどの性能は期待できないために、その試験結果は比較参考用として用いることとした。

試験体は、Na中の超音波伝搬時間の計測において音響ガイド棒の影響を軽減するために、ガイド棒中で反射する超音波の伝搬時間をガイド棒を介してNa中を透過する超音波の伝搬時間から引くことで、Na中のみの伝搬時間を抽出している（図2.2参照）。なお、斜角式では、Na流れの上流方向と下流方向の超音波伝搬時間の和（図2.2の②+④）をとることで、Na流れの影響を除去している（同様に差をとれば超音波流量計となる。）。

ところで、斜角式の音響ガイド棒の影響の軽減は、音響ガイド棒伝搬時間のみを示す反射信号が垂直式の様に配管内面部分で得ることが困難なために、本試験体では図2.2の様に反射溝を用いてガイド棒部分の伝搬時間としている。このため、斜角式ではガイド棒全長の伝搬時間よりやや短い時間（ガイド棒の端面から反射溝までの伝搬時間）を用いてガイド棒影響の軽減処理を行っている。このため、完全にはガイド棒の伝搬時間分を除かず、Na中伝搬時間としてガイド棒の一部の伝搬時間が含まれるものを用いている。当初の考えでは、斜角式の音響ガイド棒を伝搬し配管内面で反射した超音波を、斜角式音響ガイド棒から配管を経た反射位置に短い反射計測用音響ガイド棒（図2.3参

照)を設け、その反射信号を基にガイド棒影響軽減処理を行うことを考えていた。しかしながら、今回用いた試験体では反射計測用音響ガイド棒から良好な反射信号が得られなかったため、ガイド棒影響軽減処理には前記の反射溝による方法のみを採用した。

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用いる方法を採用した。但し、図2.2の超音波伝搬経路の切り替えと、垂直式及び斜角式超音波温度計の切り替えや、伝搬時間測定値の保存等には手動の操作が必要な信号処理装置(超音波探傷器を改造して製作)を用いたために測定に時間がかかったので、一定な試験条件の確保などの点から、平均値を得るための伝搬時間計測の回数は5回程度とした。なお、試験体で用いた超音波は、2MHzの0.5周期分を超音波トランスデューサに送ることで発生させている。

試験体は、図2.3に示す様に、試験装置配管内径に合わせた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2種類(垂直式と斜角式)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対の音響ガイド棒の先端に超音波トランスデューサを取り付けて構成している。音響ガイド棒は試験体配管部に溶接で取り付けられ、超音波トランスデューサと音響ガイド棒との音響結合材には超音波探傷に使用される超音波接触媒質(品番ソコト-BSG 日合アセチレン株式会社製:グリセリンペースト)を用いている。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をするために、試験体の最下流側にNa温度を計測する基準温度計(ウエル内蔵タイプのE型クラス1熱電対、3.2φ)を取り付けている。

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、トランスデューサの送受波面に音響結合材を塗布して、音響ガイド棒端面に押し付けボルトで押し付けることで、良好な超音波透過性を確保する構造としている。

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、三菱電機株式会社が実施した。

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℃~500℃の間(50℃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、その次の降温過程を第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、

N a 流速の影響（0～実機の約40%にあたる190cm/s（1000 l/min.））、カバーガス圧力の影響（0.2～2.0kg/cm²）、N a 中不純物濃度の影響（コールドトラップ温度150℃と250℃）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N a と馴染むまで超音波の伝搬性が悪いことが考えられるので、第1サイクル試験前にN a 温度を上昇させて超音波の伝搬特性を調べた（N a 濡れ性影響確認）。試験装置でのN a 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、N a 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、本試験体では超音波伝搬経路の異なる垂直式と斜角式（比較参考用）の2種類の超音波温度計を取り付けており、そのN a 温度計測特性の違いも確認した。

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～図3.2に示す。本試験体は、2.2.1項で記述したように、全伝搬時間から音響ガイド棒中の伝搬時間を引いてやる（図2.2参照）ことでNa中のみの伝搬時間を求めている。

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、本方式の超音波温度計が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。なお、斜角式でもNa温度計測が可能か確認することを目的とした斜角式超音波温度計の結果の図3.2は、本試験体では図2.2の様に音響ガイド棒の配管近傍部分の伝搬時間がNa伝搬時間計測値に含まれているため、それも加えて点線で示した計算値の算出（Na温度や熱膨張による伝搬時間の計算）を行っているが、熱膨張を考慮しても図3.1に比べて誤差が大きいことが示されている。

3.2 Na温度の算出方法

超音波によるNa温度の算出は、Na中の伝搬時間を測定し、その値で伝搬距離を除いてNa中の音速を求め、音速とNa温度の関係²⁾からNa温度を求める。

3.2.1 垂直式温度計

垂直式の場合のNa温度の算出は以下ようになる（なお、式3-2の係数は用いた文献²⁾が異なるために前報¹⁾（JNC TN9400 98-001）の配管直付型超音波温度計試験体と異なる。）。

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

$$V = 2578 - 0.52T \quad (3-2)$$

V : Na中の音速 (m/s)

D : 超音波伝搬距離 (配管内径) (m)

t : Na中の超音波伝搬時間 (s)

T : Na温度 (°C)

ここで配管内径（超音波伝搬距離）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°C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。

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

D_0 : 初期配管内径 (温度 T_0 の配管内径)

T_0 : 初期温度

α : 熱膨張係数

超音波による $N a$ 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¹⁾。図3.3に、 $N a$ 温度をパラメータとした試験結果を、試験体寸法実測値 (配管内径) と文献値^{2) 3) 4)} を用いて式3-1～式3-3により $N a$ 温度に変換した場合の基準温度との差を示す。

そこで温度算出に用いる初期配管内径を寸法実測値ではなく、超音波の伝搬試験結果を基に算出することとした。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ものとなる。さらには、 $N a$ 中の音速の文献値も文献^{2) 4)} により微妙に異なることから、式3-2及び式3-3の係数を実際の試験データから逆算して求めた (算出は、第1サイクルは試験体計器の調整を実施しているために、第2サイクルのデータを用い、基準温度計出力を基に $N a$ 中の音速 V と配管内径 D を1次式に近似させて求めた)。この結果、 $N a$ 中の超音波伝搬時間 t (s) から $N a$ 温度 T ($^{\circ}\text{C}$) を算出する式は以下の様になる。

$$T = (-0.105365 + 2554.8 t) / (1.8 \times 10^{-6} + 0.52 t) \quad (3-4)$$

これらにより、超音波温度計を本試験温度 $200 \sim 500^{\circ}\text{C}$ により出力校正したこととなる。

3.2.2 斜角式温度計

斜角式も $N a$ 中の伝搬時間が求めれば、垂直式と同様に式3-1～式3-3により $N a$ 温度が算出される。但し、送受信に用いる音響ガイド棒の配管取り付け位置が配管軸上で正対していないために、超音波は配管中を斜めに進むので式3-3の $N a$ 中超音波伝搬距離は配管内径よりも長くなる。さらに、本試験体では、2.2.1項で記述した様に、完全には $N a$ 中伝搬時間のみを抽出して計測することはできていない (ガイド棒伝搬時間の一部を含めて $N a$ 中伝搬時間として計測される)。

$$t_a = t_1 + t_2 \quad (3-5)$$

$$t_1 = D / (\sin \theta \cdot V) \quad (3-6)$$

$$t_2 = D_2 / V_s \quad (3-7)$$

t_a : 計測される $N a$ 中の超音波伝搬時間

t_1 : 真の $N a$ 中の超音波伝搬時間

t_2 : ガイド棒の反射溝から配管内面までの超音波伝搬時間 (送受信側の平均値)

D : 配管内径

$\sin \theta$: $N a$ 中を配管軸方向に対して斜めに超音波が伝搬するために、配管径より伝搬距離が伸びる効果

V : Na中の音速

D₂ : 反射溝から配管内面までの超音波伝搬距離

V_s : ガイド棒中の音速

D, Vは、式3-2及び式3-3の様にNa温度との関係式となる。同様に、D₂, V_sも温度との関係式で表される^{3) 4)}。また、超音波の伝搬距離は、3.2.1項で記述したように1mmの違いが算出温度に対して大きな誤差になるので、垂直式の場合と同様に試験結果から式の各係数及び定数を逆算することが必要になる。但し、垂直式と比べて斜角式では、ガイド棒の一部の超音波伝搬時間が式中に存在するために、試験データから式中の全係数を逆算することは困難である。

そこで、超音波温度計を200℃～500℃の範囲で校正するという観点で考え、斜角式超音波温度計により求まる超音波伝搬時間を基準温度計と2次式で近似させることとし、近似2次関数の係数を求めた(垂直式と同様に第2サイクルのデータを基に算出した。)。これは、前記式の各パラメータは不明のままであるが、斜角式超音波温度計でNa温度の計測が可能か確認する(Na温度が一意的な値で計測できるか)には十分である。その結果、Na中の超音波伝搬時間t(s)からNa温度T(℃)を算出する式は以下の様になる。

$$T = ((f^2 - 4ke + 4kt \times 10^6)^{0.5} - f) / 2k \quad (3-8)$$

$$e = 64.456, \quad f = 1.26459 \times 10^{-2}, \quad k = 2.53436 \times 10^{-6}$$

これらにより、斜角式超音波温度計は本試験温度200～500℃で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E型クラス1の熱電対を用いており、許容差として200℃の時1.5℃、500℃の時2℃である⁵⁾。また、基準温度計の温度変換に用いた計測器は、分解能が0.5℃、確度が0.5℃、基準接点保証確度が0.5℃である。これより、基準温度の誤差は、次の様になる。

$$(1.5^2 + 0.1^2 + 0.5^2 + 0.5^2)^{1/2} \cong 1.7^\circ\text{C} \quad (200^\circ\text{C時}) \quad (3-9)$$

$$(2^2 + 0.1^2 + 0.5^2 + 0.5^2)^{1/2} \cong 2.2^\circ\text{C} \quad (500^\circ\text{C時}) \quad (3-10)$$

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3.0℃(サンプリング周期31.3ns)があり、3.2節で述べた試験データに基づく各係数値等の設定誤差を2.0℃と想定すると合わせて約3.6℃になる。

$$(3.0^2 + 2.0^2)^{1/2} \cong 3.6^\circ\text{C} \quad (3-11)$$

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4℃の計測誤差が考えられる。

$$(1.7^2 + 3.6^2)^{1/2} \cong 4.0^\circ\text{C} \quad (200^\circ\text{C時}) \quad (3-12)$$

$$(2.2^2 + 3.6^2)^{1/2} \cong 4.2^\circ\text{C} \quad (500^\circ\text{C時}) \quad (3-13)$$

3.3.2 各サイクルの違い

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の平均値を、各試験サイクル毎にまとめたものを図3.4に示す。

図3.4は、各サイクル間の違いが各3.3.1項に記述した誤差と比べて十分小さく、各サイクルにおいて再現性が良好であることが示されている。

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℃、350℃、500℃での試験結果を図3.5～図3.6に示す。図で500℃の斜角式については、第3及び第4サイクルにおいて反射信号が時々不良になり明らかに異常な計測値となったために、それらデータは図に記述していない（この原因は、3.6.1項に後記した様に、斜角式の音響ガイド棒の寸法が短かったことにより、予想より温度が上がり、超音波トランスデューサと音響ガイド棒との間の液状の音響結合材が仕様温度（設計使用温度）以上になり変質したことがわかった。）。

また、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は、流量が0であるために試験体内Na に温度分布がついて¹⁾、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。特に、流量0cm/sの計測では、ループ条件の設定等に時間がかかることもあり、測定までにNa に温度分布がついて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3.5～図3.6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最大±2℃強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、垂直式超音波試験体で代表させて考えると、超音波がNa の流れによりΔX分だけ流れ方向に流されるとし、500℃（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、ΔX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3.7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℃（試験体では、20μmの変化が、約1℃に相当）の違いしかないために、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℃と500℃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3.8～図3.9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±2℃強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。

これは、垂直式超音波試験体で代表させて考えて、カバーガス圧の変動による試験体配管部の膨張量⁴⁾を計算すると、2.0kg/cm²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℃のオーダー（試験体では、20μmの変化が、約1℃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℃と250℃とした場合の試験を行った（但し、本試験ループでは、不純物濃度を計測するプラグイン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℃、流速が約190cm/s、カバーガス圧力が0.2kg/cm²での結果を図3.10～図3.11に示す。図では、基準温度計との差が±1℃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。

3.4.4 音響ガイド棒の影響

本試験体は、2.2.1項で記述したように、全伝搬時間から音響ガイド棒中の伝搬時間を引いてNa中のみの伝搬時間を求める様にしている（図2.2参照）。しかしながら、垂直式温度計のガイド棒影響軽減（ガイド棒伝搬時間を除く処理）効果と、斜角式温度計では音響ガイド棒の一部の伝搬時間が計測される伝搬時間に含まれる影響などを調べるために、各試験サイクルのナトリウム温度が200℃または500℃、流速が約190cm/s、カバーガス圧力が0.2kg/cm²の時の超音波温度計出力、音響ガイド棒温度、雰囲気温度について基準温度との差を計測し図3.12～図3.13にまとめた（図3.13の斜角式超音波温度計の第4サイクルについては、3.6.1項に後記した音響結合材の高温による変質により良好なデータが得られなかったので記述してない）。図は、超音波温度計の出力が、試験サイクルにより雰囲気温度や音響ガイド棒温度が異なっても余り影響されないことを示しており、音響ガイド棒の影響の軽減効果は良好であるといえる。

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（計測誤差の範囲）

と考えられる。また、再現性についても、図3.4の様に第1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1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3.14～図3.15のようになる。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3.14～図3.15の最大差は、2.3℃）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。

また、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畳などで変動し、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、本試験では、試験体の伝搬時間計測として超音波パルスの送受信による受信波形計測を5回程行い、その平均値から伝搬時間を求めている。図3.16に、5回の超音波温度計計測値のばらつきの例を示す（第1サイクルの試験データ）。この例では、ばらつきは計測誤差範囲内であるが、平均化する計測を増やすことは計測結果のばらつきを減少させるのに有効である（ちなみに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3℃であるが、多数計測の平均値を用いることで、より真値に近づけられる。また、計測回数が5回程度と少ないのは、超音波伝搬時間は配管内1経路当たり100 μ sのオーダー程度であるが、本試験体では2.2.1項で記した様に計測に手動操作が必要なために時間がかかり多くの計測ができなかったためである。）。

3.5.2 200℃のみの校正の検討

以上の検討は、3.2節で記述したように、各係数を試験データを基に算出するなどにより試験温度範囲で校正した結果を評価している。配管内径初期値等の寸法は、3.2節で記したように、僅かの寸法測定誤差が超音波温度計出力では大きな誤差になる。そのため、実際にNaでの伝搬時間を基に算出してやる必要があり、200℃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。そして、200℃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、熱膨張係数等は文献等の既知の値を用いる必要がある。そこで、200℃での校正と熱膨張係数等に文献^{2) 3) 4)}の値を用いた補正を行った場合を検討した（図3.17に結果を示す。）。なお、図で斜角式超音波温度計は、計測される超音波伝搬時間（ガイド棒の一部が含まれている。）がNaのみと仮定して計算した場合（ガイド棒考慮なし）と、音響反射溝から配管内面までの音響ガイド棒の一部の超音波伝搬時間（対象のガイド棒の一部の温度は、Naと同じと仮定した。）を考慮したものの両者を図示している。この図で垂直式超音波温度計は、各係数を試験データから算出したもの（図3.14に当たる。）に対して約2℃強の違いである。これより、垂直式は音響ガイド棒の影響が余りない（本手法で十分軽減できている。）ために、20

0℃のみの校正で使用しても全試験範囲で校正したものと大差（約2℃）は無く、3.3.1項の計測誤差を考慮すると、使用可能な値と考えられる。しかしながら、斜角式は2.2.1項で記した様に、音響ガイド棒の一部（図2.2の反射溝から配管内面まで）の影響が計測値に残っていることでガイド棒の一部の寸法誤差が大きく影響し、全試験範囲で校正したもの（図3.15に当たる。）と大きな違い（図の「ガイド棒考慮あり」は、残った反射溝から配管内面までのガイド棒について寸法実測値を基に計算しているが、実際の伝搬経路とのわずかな寸法誤差により約13℃の差となっている。）が生じている。このため、200℃のみの校正で斜角式超音波温度計を用いるには、ガイド棒影響軽減手法の改良が必要であると考えられる。

3.5.3 まとめ

以上から、本試験範囲では、本方式の音響ガイド棒方式超音波温度計は、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、約4℃の試験誤差を有する本試験での計測値は、基準温度計と比較すると2℃強程度の差になる。

そして、超音波温度計の校正方法としては、低温（200℃）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垂直式超音波温度計では高々2℃程度異なるくらいである（また、斜角式超音波温度計を低温のみの校正で用いるには、本試験体では不十分でありガイド棒影響軽減手法の改良が必要である。）。したがって、垂直式超音波温度計は、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、複数回の計測の平均値を用いることで精度が向上したが、今回採用した5回程度よりも計測数を増やすことで、さら精度向上が期待できる。これは、現状の超音波計測での手動部分を自動化し、高速で複数回の計測が可能な様にすることで対応できる。

なお、音響ガイド棒を用いる本超音波温度計試験体（垂直式）の試験結果は、既報¹⁾の配管直付型超音波温度計試験体とほぼ同様の結果を示している。

3.6 超音波波形の検討（音響結合材、配管Na濡れ影響等検討）

3.6.1 受信波形強度変化

図3.18～図3.19に、200℃と500℃の第1サイクル及び第4サイクルの超音波受信波形（垂直式及び斜角式の配管透過信号整流値）を示す。

垂直式超音波温度計は図3.18の様に、温度変化及び経時変化に対して信号強度の変化がほとんどなく安定しており、約2ヶ月にわたる試験期間中において良好な計測ができた。それに対して斜角式超音波温度計は図3.19の様に、第1サイクル時には温度変化に対して信号強度の変化は認められないなど垂直式と同様であったが、第4サイクル時に

は超音波信号強度が低下し超音波温度計測がうまくできなかった。これは、斜角式超音波温度計の音響ガイド棒が予想より高温になったために、液状の音響結合材（グリセリンペースト）が仕様温度（設計使用温度）を超えて変質（固化）したことによる。図2.3の試験体配管構造図の様に、斜角式超音波温度計の音響ガイド棒は垂直式に比べて配管に近く、音響ガイド棒が保温材に包まれている部分が多いため高温になったと考えられる。但し、超音波トランスデューサについては異常は生じず、Na試験後に音響結合材を再塗布して行った水試験では、垂直式及び斜角式超音波温度計ともに正常に機能した。

また、試験体配管部内面は、最初にNaをチャージした時にNaと馴染むまでの時間、配管外からNa中への超音波伝搬特性が悪いために超音波温度計が機能しないことが考えられる。¹⁾そこで、第1サイクル試験前のNaチャージ直後からの超音波信号波形強度を測定している（図3.20に示す）。図の左側がNaチャージ直後で、信号強度を時間経過とともに示しているが、Naチャージ直後から良好な超音波信号が得られ、その後もあまり変化していない。既報¹⁾の配管直付型超音波温度計では、Naチャージ後、Naを昇温するまで超音波伝搬特性が良くないという結果が得られている。しかしながら、本試験体では、既報の試験体と異なり試験体配管部内面を鏡面加工しているために、配管内面とNaが良好に馴染みNaチャージ直後から良好な音響伝搬特性が得られたものと考えられる。

3.6.2 まとめ

音響ガイド棒を用いる本超音波温度計は、（音響ガイド棒の長さが適切で超音波トランスデューサ部が高温にならなければ）Na温度変化や経時変化により超音波波形強度にあまり変化がなく、良好に計測できることがわかった。また、超音波温度計配管内面を鏡面加工した本試験体は、Naチャージ直後からNaと配管の音響伝搬特性的な濡れ性が良好で、超音波による温度計測がNaチャージ直後から可能であることがわかった。

3.7 今後の改良点等

以上の結果から超音波温度計は、Na温度以外のNa流速やカバーガス圧力等の影響をあまり受けないうために、超音波温度計により得られるNa温度の精度（基準温度計誤差などの本試験体系に起因する誤差を除いた超音波温度計自体の計測誤差）向上のための方策としては、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。

そして、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音速変化の式の係数と熱膨張係数値（超音波温度計を実機で用いる場合を考えると、低温時（200℃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。)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3℃）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、雑音等により超音波波形が変化すると伝搬時間計測に誤りを生じる恐れがあり、現状の手動計測を自動化して多数回の計測の平均を用いるなどの SN 比向上を図ることが有効である。そして、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 比の悪い状況となっても、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。

なお、これらは、既報¹⁾の配管直付型超音波温度計と同様な改良項目である。

第4章 結論

配管非貫通で内部流体（Na）の温度を計測する技術の開発の一環として、配管に溶接した音響ガイド棒と低温用超音波トランスデューサ（設計使用温度80℃）を用いる超音波温度計試験体のNa試験を実施した結果、以下の様な知見を得た。なお、試験体の音響ガイド棒は、配管に垂直に設置したもの（垂直式超音波温度計）と斜めに設置したもの（斜角式超音波温度計）の2種類を試験した。

- 1) 垂直式及び斜角式温度計ともに、超音波により配管中のNa温度を計測することができる。
- 2) 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、約4℃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基準温度計との差は約2℃強程度と小さい値に収まった。これは、計測誤差を原因としたばらつきの範囲内といえる。
- 3) 超音波温度計の校正方法としては、使用温度範囲全体で校正すれば、校正用温度計に対して、前記計測誤差に起因するばらつき程度の差となり、計測誤差内で校正できる。また、垂直式超音波温度計は、低温（200℃）のみの試験と熱膨張係数等に既知の値を用いて一点校正を行えば、使用温度範囲全体で校正したものに対して高々2℃程度異なるくらいに収まる。
- 4) 超音波伝搬時間の計測は、複数回の超音波送受信計測の平均値を用いることで安定した値が得られる。
- 5) 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、超音波温度計の計測精度を詳細に評価するためには、さらに高精度な基準温度計との比較試験が必要であるが、超音波温度計そのものの精度向上策としては、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3℃）や配管熱膨張係数等の正確な把握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。

なお、これらは、既報¹⁾の配管直付型超音波温度計試験体とほぼ同様の結論である。

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三菱電機株式会社の荒木等氏，古賀達也氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 林田, 小柿 他: 超音波温度計ナトリウム試験(1)ー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ー, JNC TN9400 98-001, (1998.10)
- 2) 古川: 高速炉用液体Na工学の現況と問題点(修正三訂版), JAERI-memo 第3164号, 日本原子力研究所, (1968.8)
- 3) 伝熱工学資料 改訂第3版, 日本機械学会, (1975)
- 4) 高須, 磯崎 他: ナトリウム技術実用物性値表, PNC TN941 81-73, (1981.4)
- 5) 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	構造	音響ガイド棒取付け角度	材 料
垂直式	超音波接触媒質 (ソニコート-BSG 日合アセチレン 株式会社製)	音響ガイド棒 を用いる (音響ガイド 棒は配管に溶 接)	配管に垂直 (90°)	SUS 304
斜角式	同上	同上	33°	
装 置		項 目		仕 様
超音波トランスデュー サ	周波数	2MHz		
	圧電素子材料	PZT (チタン酸ジルコン酸鉛)		
発受信器	回路数	1 回路		
	出力電圧波形	Sin 波 (0.5周期分)		
	出力電圧	200 V		
超音波伝搬経路	4 系統×2 体 (垂直式 及び斜角式)	切り替えは、手動スイッチによ る		
計測ユニット	A/D サンプルング周波数	32 MHz (10 bit)		
	取り込みデータ長	128 KB		
SN比改善処理	超音波伝搬時間計測	複数回の計測を行い、複数の計 測値から平均値を算出する		

表 2.2 試験パラメータ

項 目		範 囲	備 考
試験装置設定	Na 温度	200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 °C	
	Na 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190cm /sec で実機の約 40%。
	カバーガス圧力	0.2, 1.0, 2.0 kg/cm ²	
	Na 中不純物濃度	コールドトラップ (CT) 温度 150 °C, [250 °C]	[] 内は、第1, 4 サイクルのみ。

表 2.3 試験評価項目

項目	内容	評価に用いる試験パラメータ	
N a 温度計測性確認	N a 温度に対応した配管内 N a 中伝搬時間が計測できるか確認	N a 200 ~ 500 °C の範囲 流量 1000 l/min 一定 か ^h -ガス圧力 0.2kg/cm ² 一定 C T 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 N a 温度計測性確認と、下記 N a 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	
N a 温度以外の影響	N a 流速の影響	同一 N a 温度で N a 流速の違いによる計測値への影響を把握	N a 200,350,500 °C において 流量範囲 0 ~ 1000 l/min (流速 0 ~ 約 190cm/s) か ^h -ガス圧力 0.2kg/cm ² 一定 C T 温度 150 °C
	か ^h -ガス圧力の影響	同一 N a 温度でか ^h -ガス圧力の違いによる計測値への影響を把握	N a 200,500 °C において か ^h -ガス圧力 0.2, 1.0, 2.0kg/cm ² 流量 1000 l/min 一定 C T 温度 150 °C
	N a 中不純物の影響	同一 N a 温度で N a 中不純物濃度コールドトラップ (C T) 温度の違いによる影響の把握	N a 250 °C において C T 温度 150, 250 °C 流量 1000 l/min 一定 か ^h -ガス圧力 0.2kg/cm ² 一定
計測精度	N a 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	音響ガイド棒の影響	N a 中超音波伝搬時間の計測では、音響ガイド棒の伝搬時間は計算により除去している。その除去状況 (計測値に音響ガイド棒の影響がどの程度残存しているか) を把握する。	上記試験範囲を実施した結果を基に音響ガイド棒の影響を検討
	垂直式と斜角式の特性の差	流量計としての応用が考えられる斜角式でも、N a 温度が計測可能か確認する。	垂直式と斜角式超音波温度計の違い (表 2.1 参照)
	配管内壁 N a 濡れ性影響	N a が配管内面と馴染むまでの超音波温度計測に関する影響を把握 (本試験体部配管内面の仕上げ状態は磨き上げた状態)	上記試験実施前に N a 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

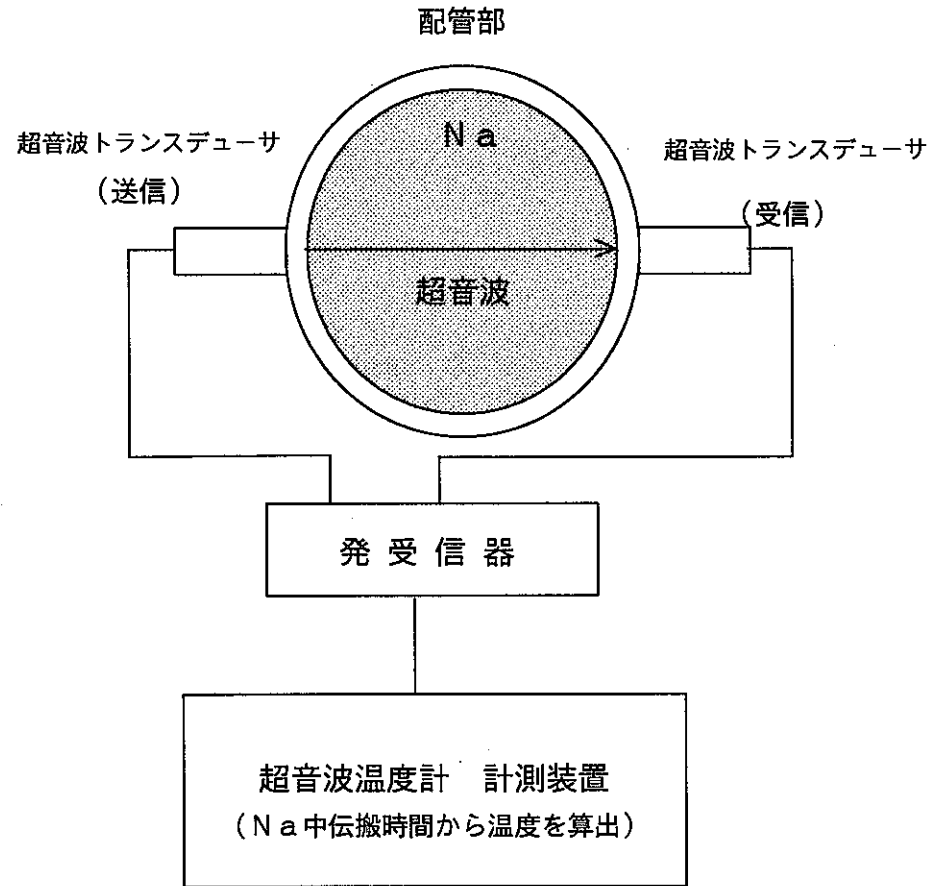


図 2.1 超音波温度計の計測概念

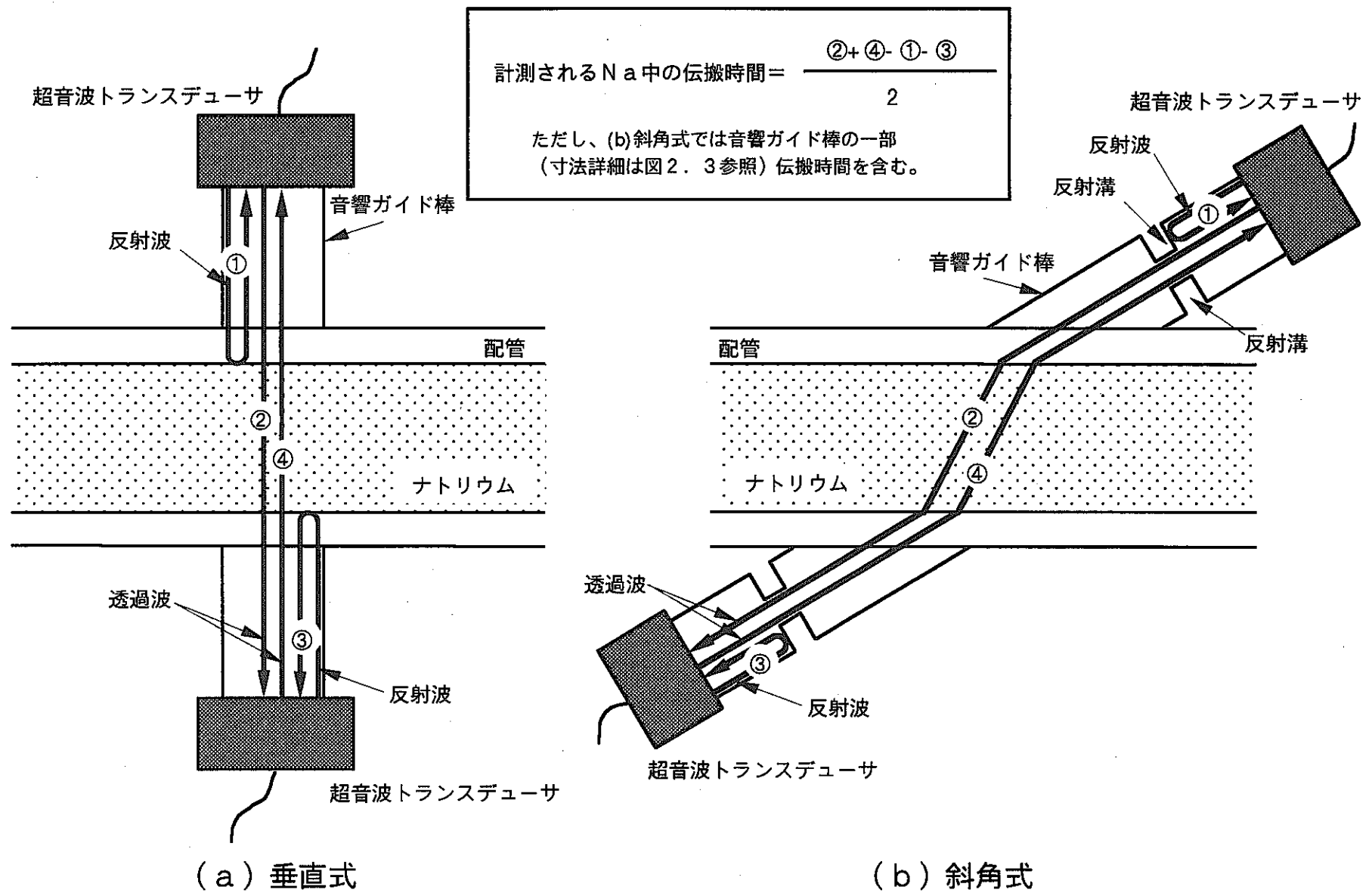


図 2.2 ナトリウム中の超音波伝搬時間の計測方法の説明図

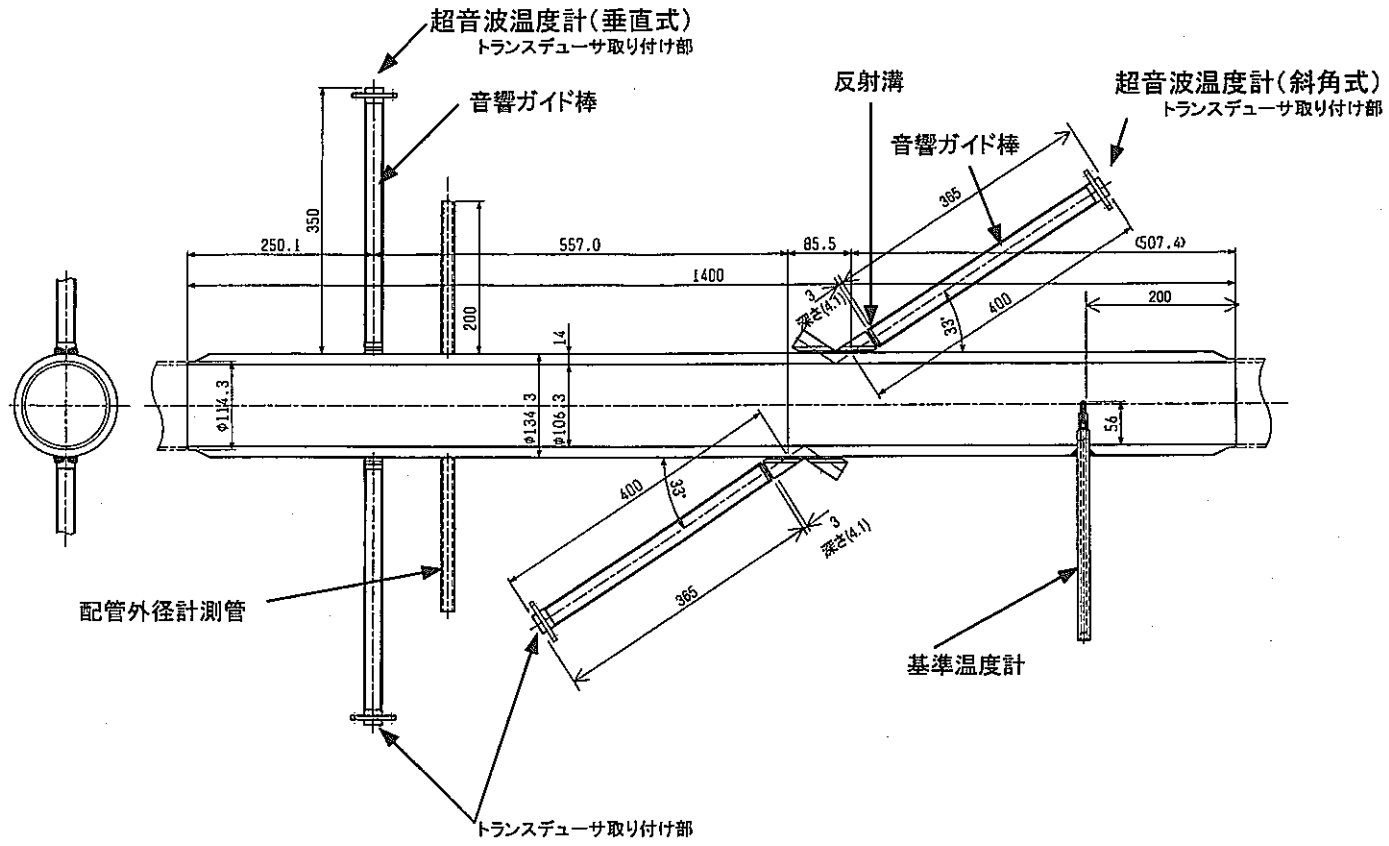


図2.3 試験体配管部構造

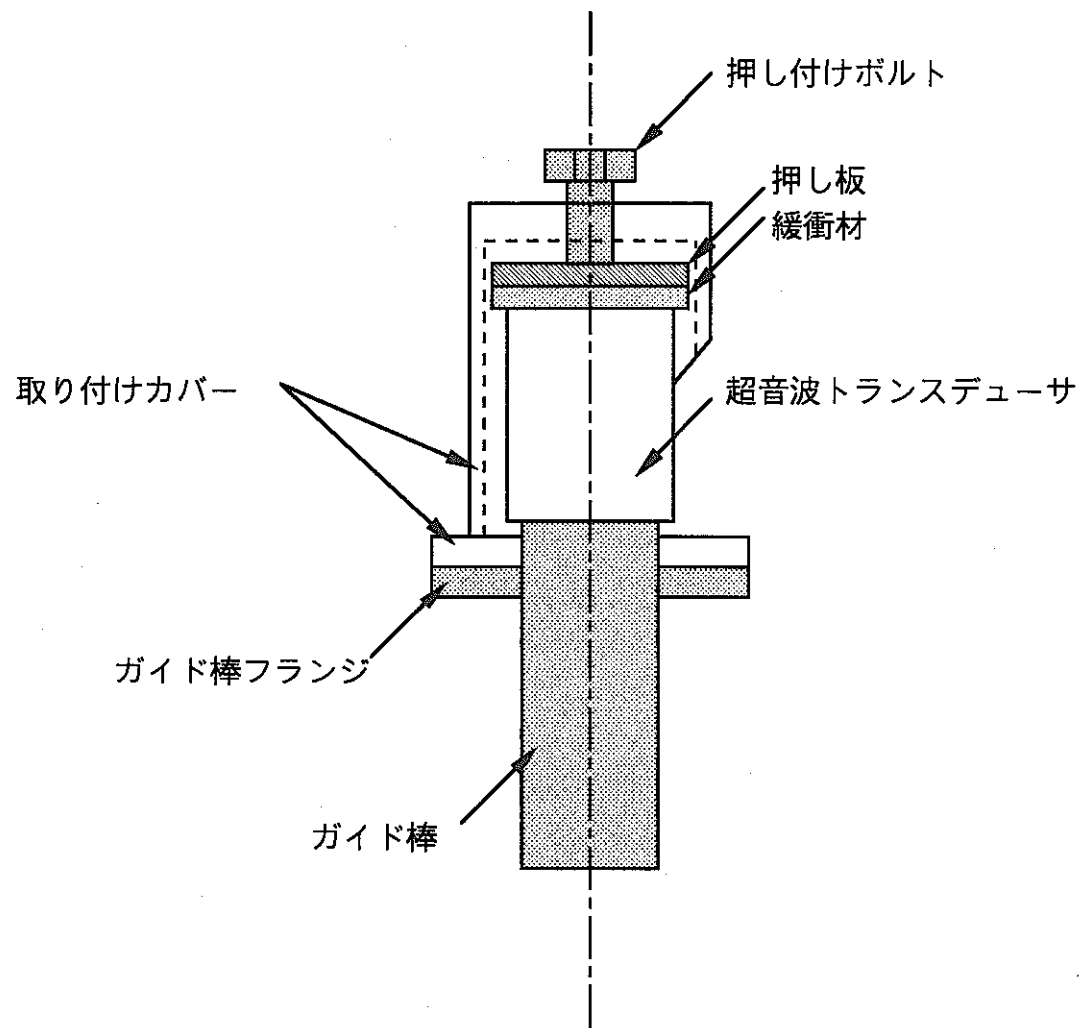


図 2.4 音響ガイド棒への超音波トランスデューサ取り付け部の構成

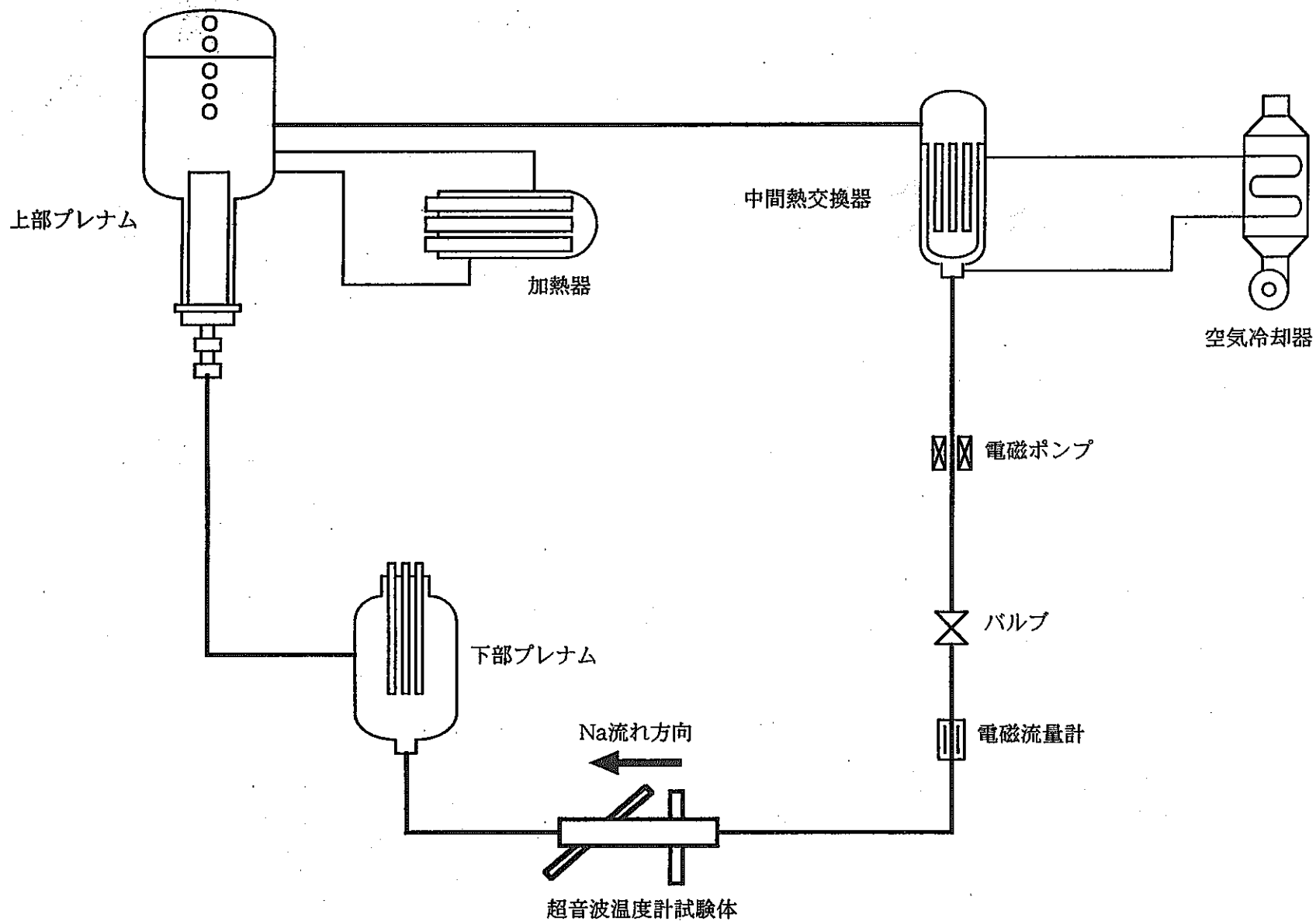
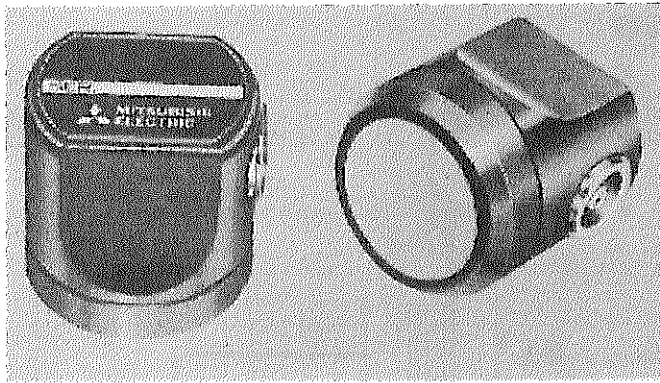
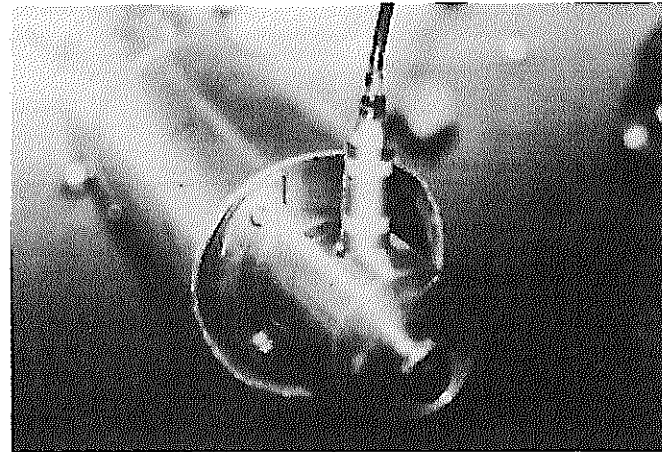


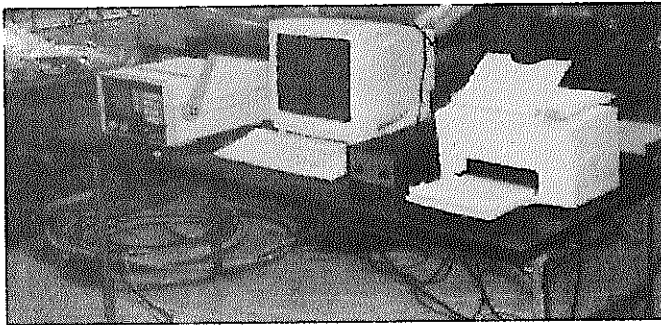
図2.5 Na試験装置の説明図



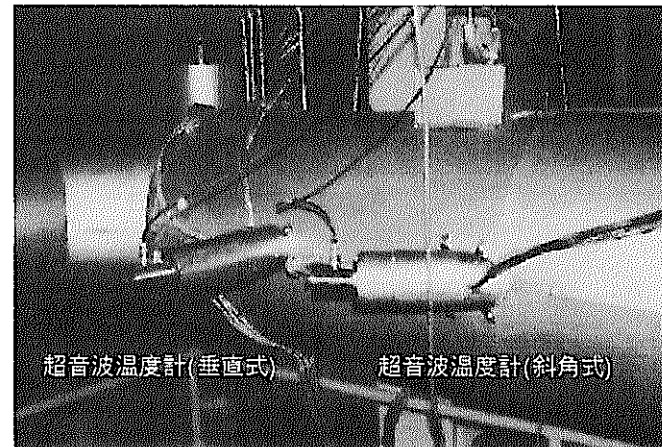
(a) 超音波トランスデューサ



(c) 試験体配管部(超音波トランスデューサ取付部拡大)



(b) 超音波送受信器及び計算機システム(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

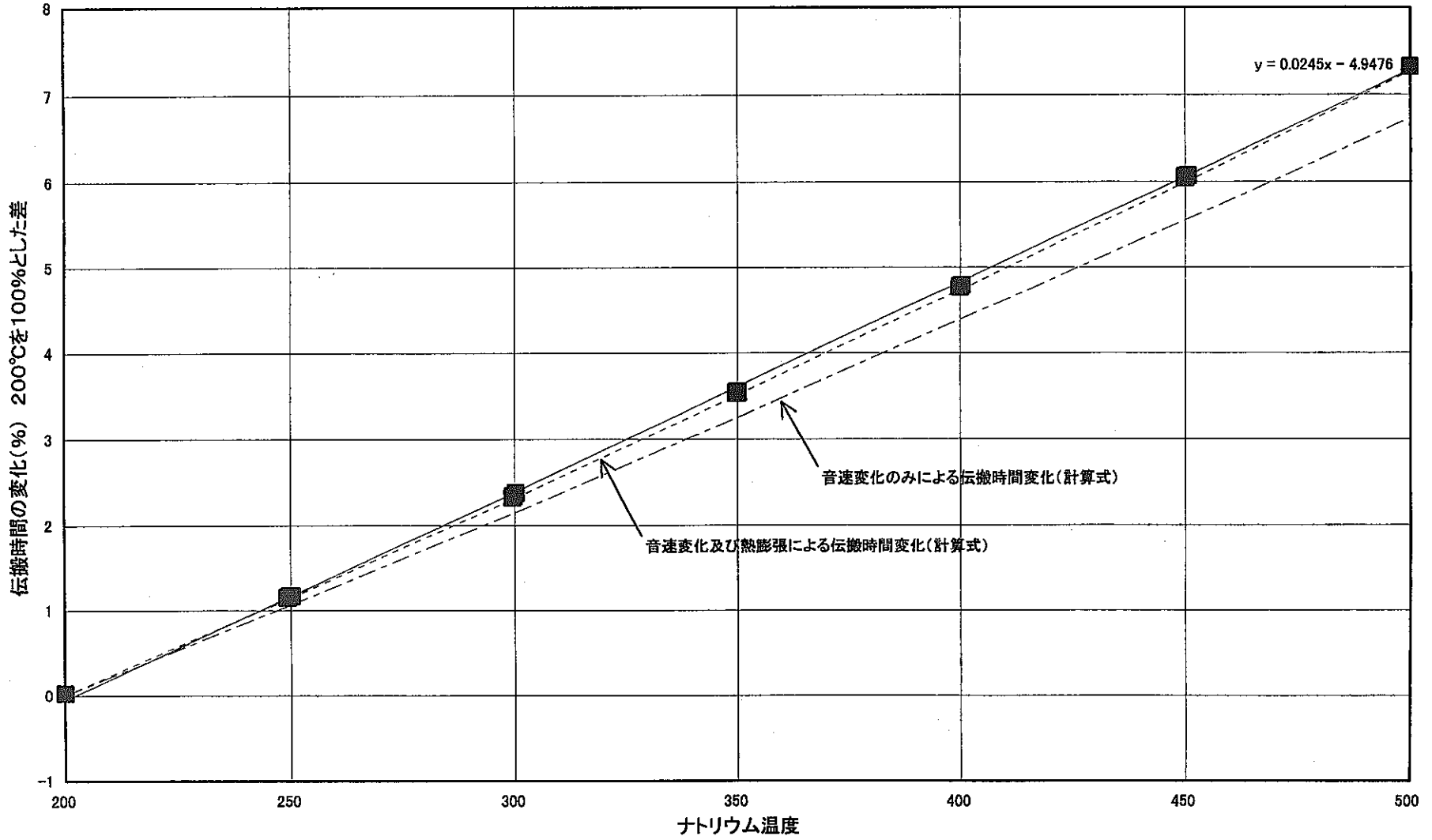


図3. 1 ナトリウム温度と超音波伝搬時間の関係(垂直式)

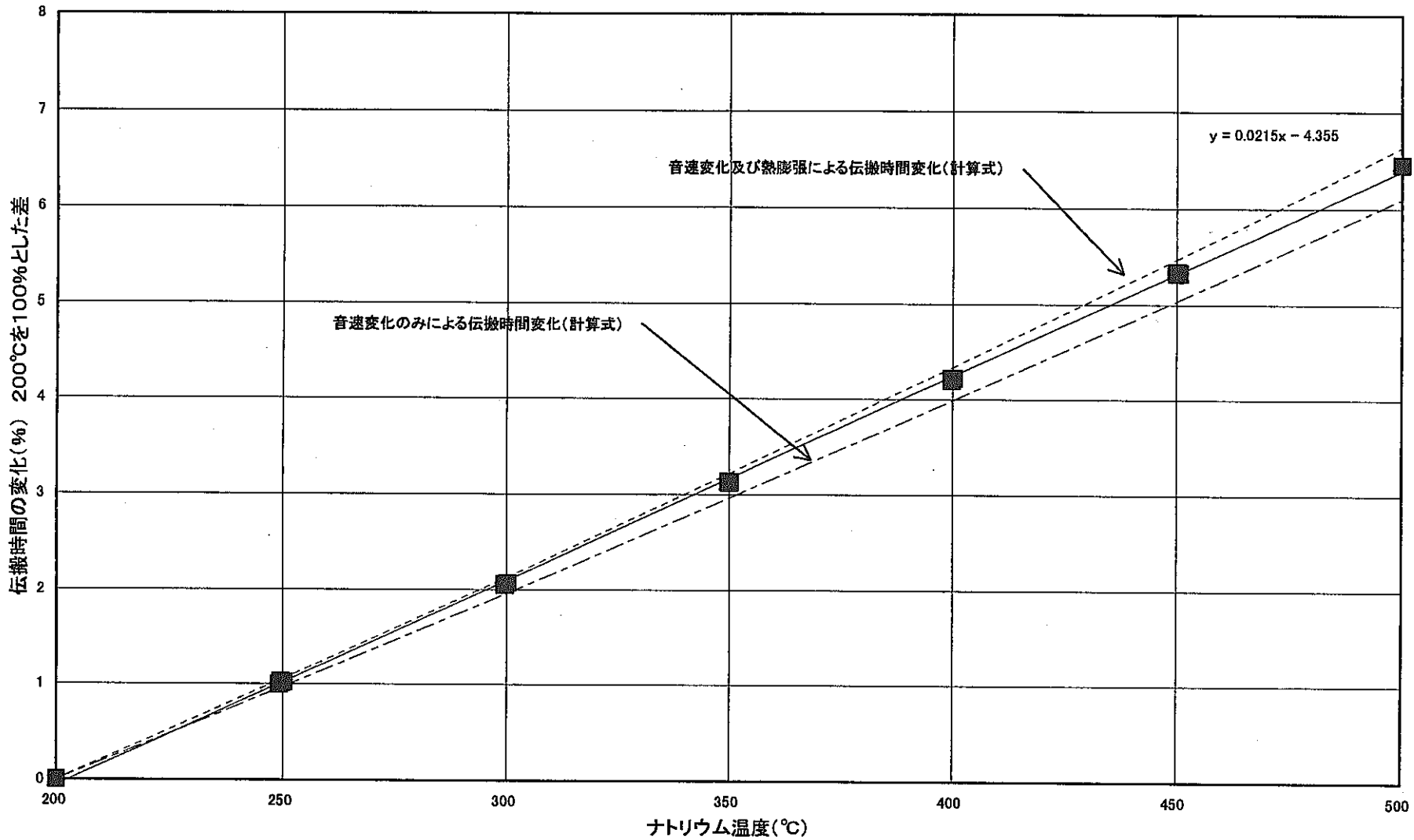


図3. 2 ナトリウム温度と超音波伝搬時間の関係(斜角式)

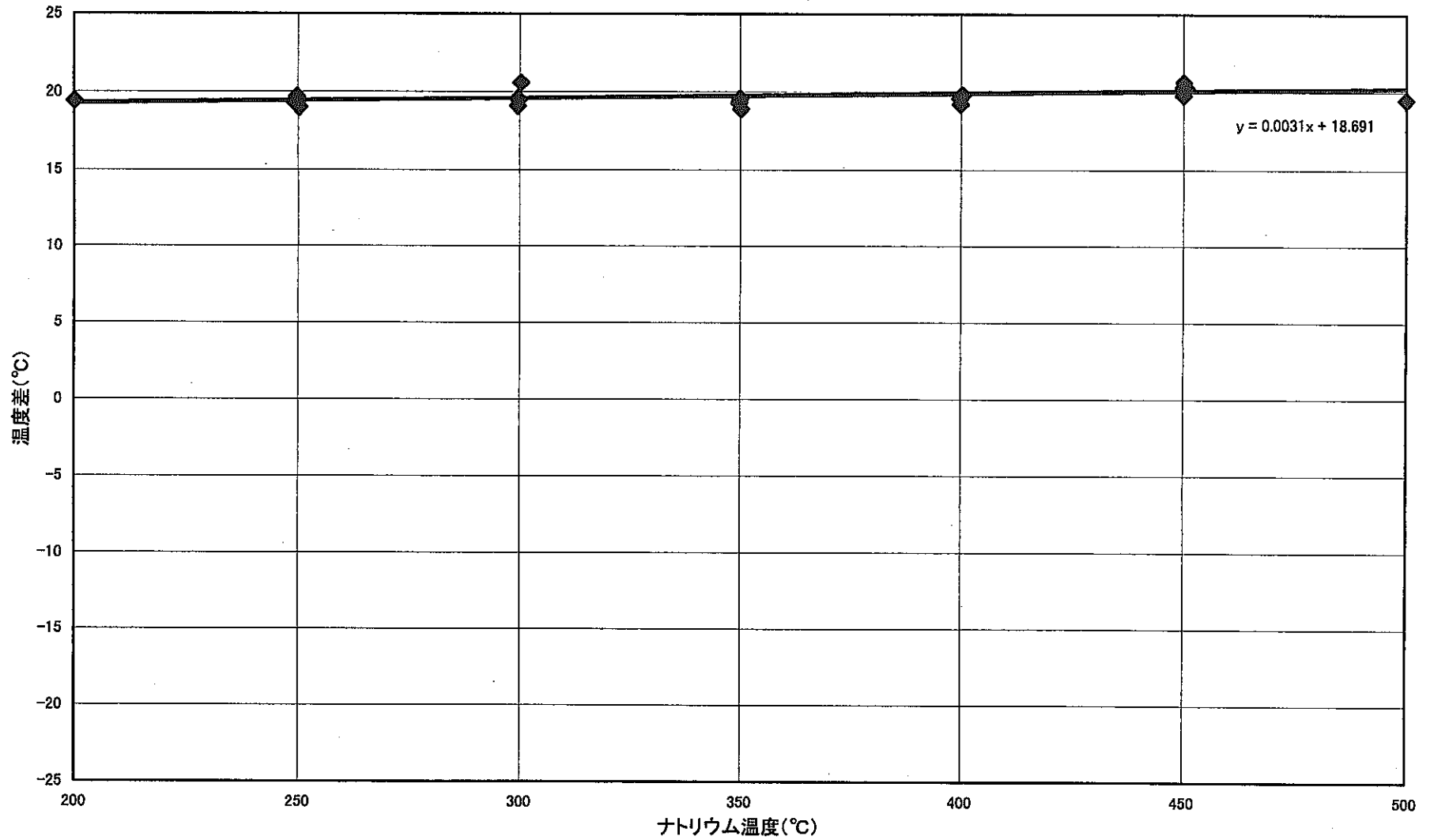


図3. 3 既知の値(工場検査寸法、音速変化式、熱膨張係数)を基に伝搬時間から求めたナトリウム温度と基準温度との差(垂直式)

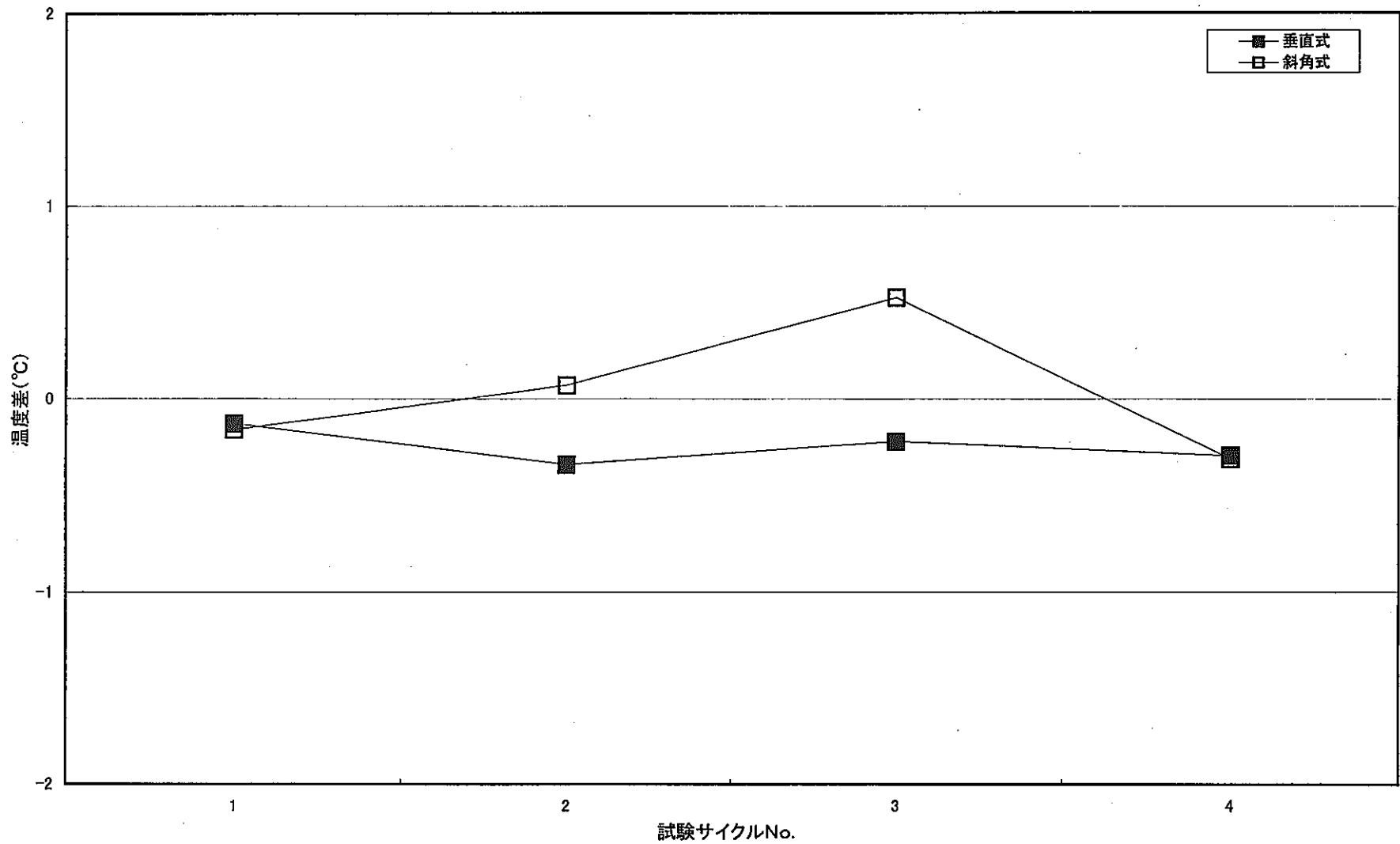


図3. 4 試験サイクル毎の超音波温度計と基準温度との差の平均値(200°Cから500°Cデータ平均値)

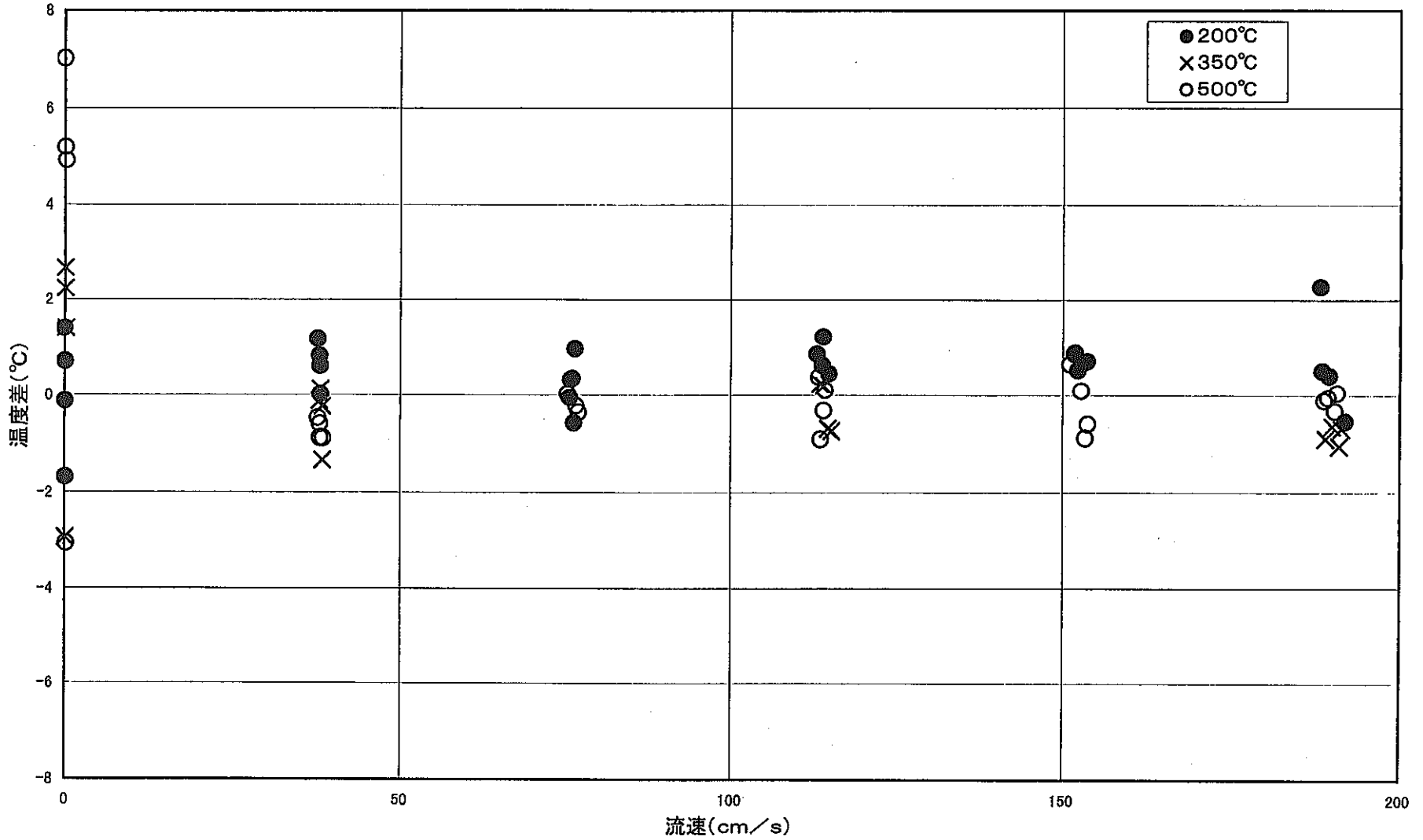


図3.5 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差(垂直式)

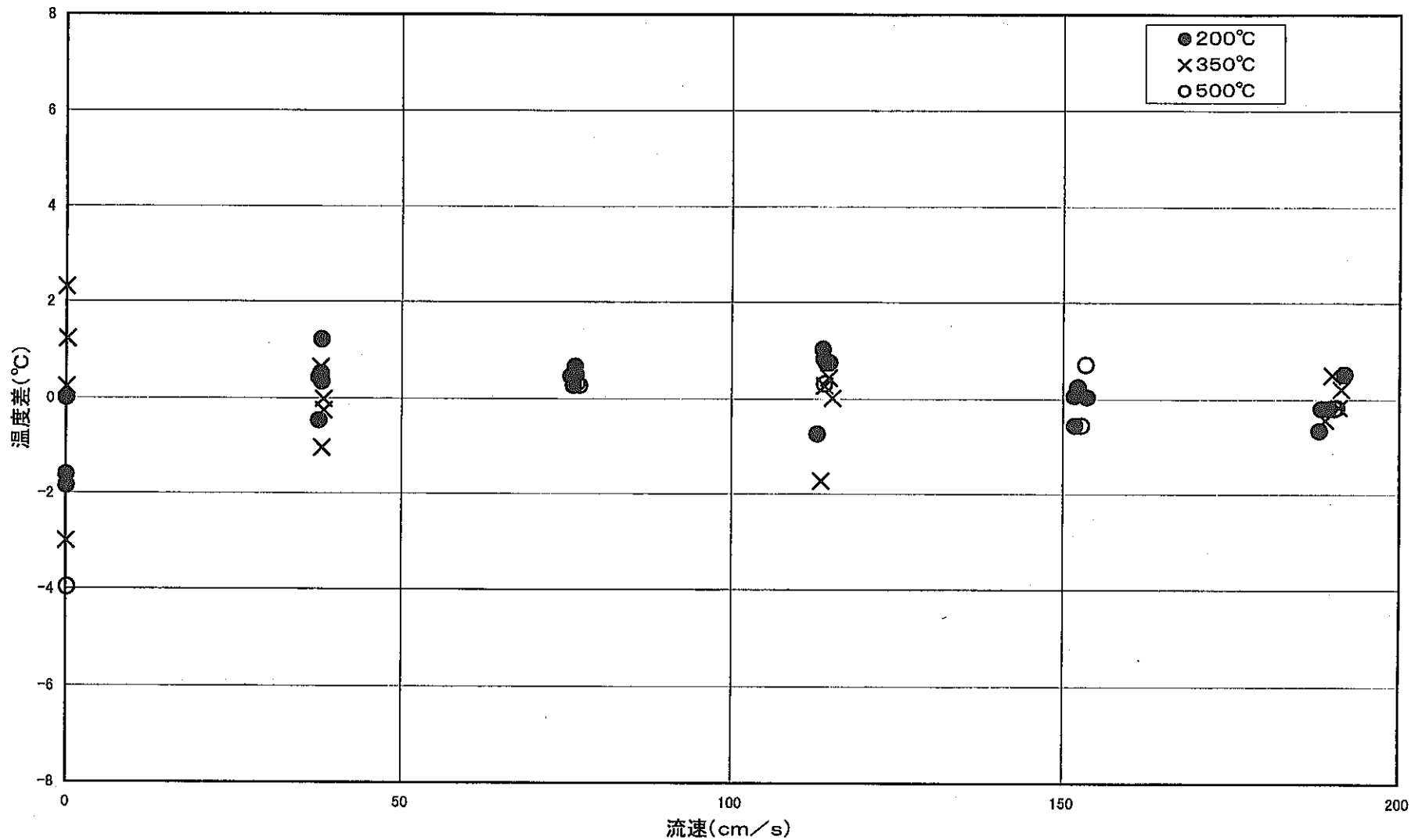


図3.6 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差(斜角式)

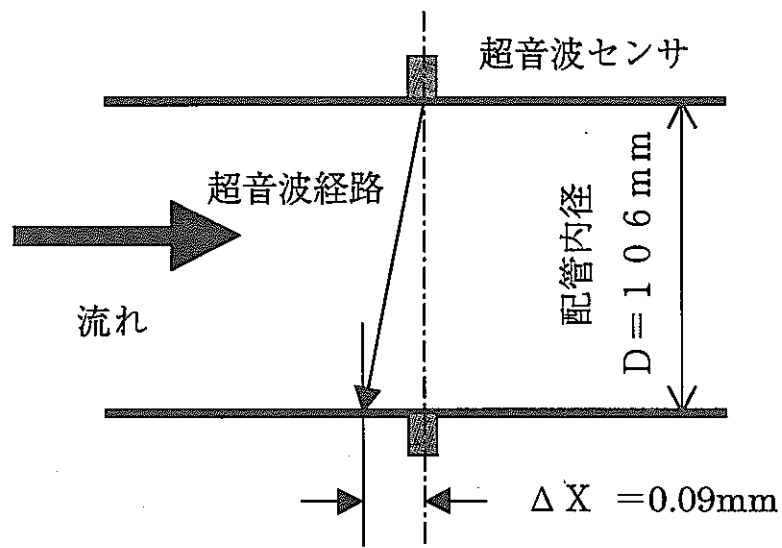


図3. 7 流速による超音波伝搬経路の変化

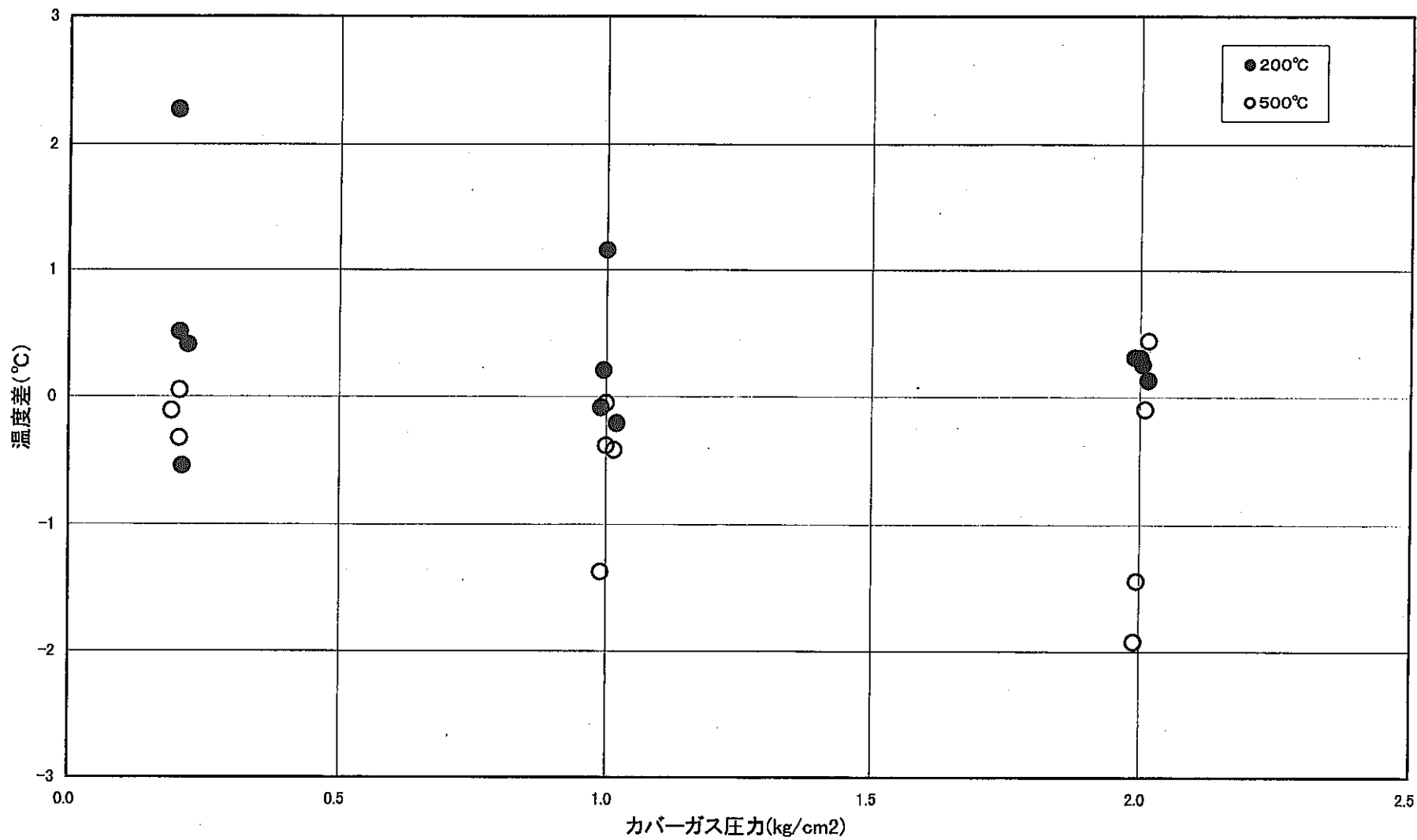


図3. 8 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度との差(垂直式)

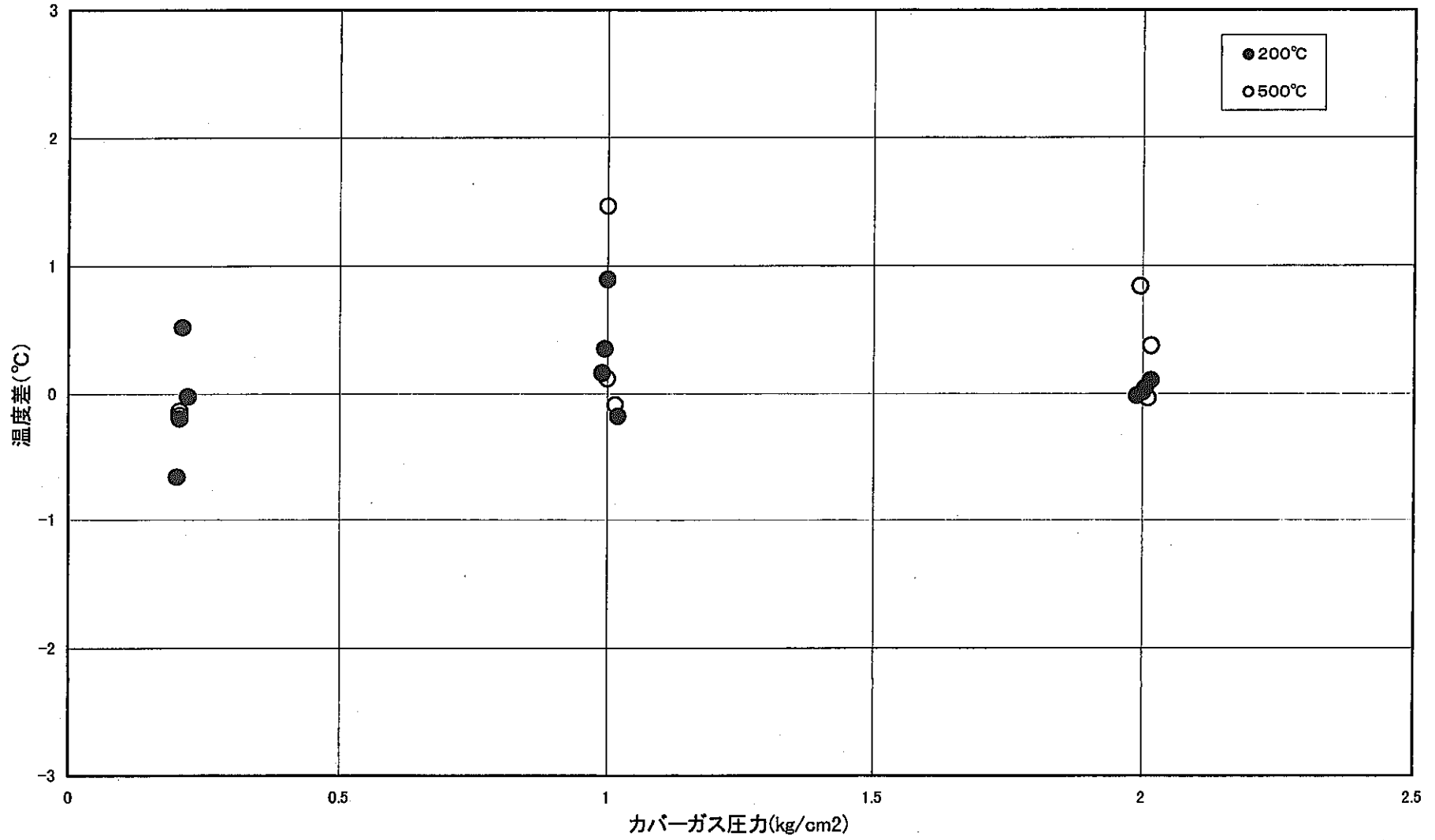


図3. 9 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度との差(斜角式)

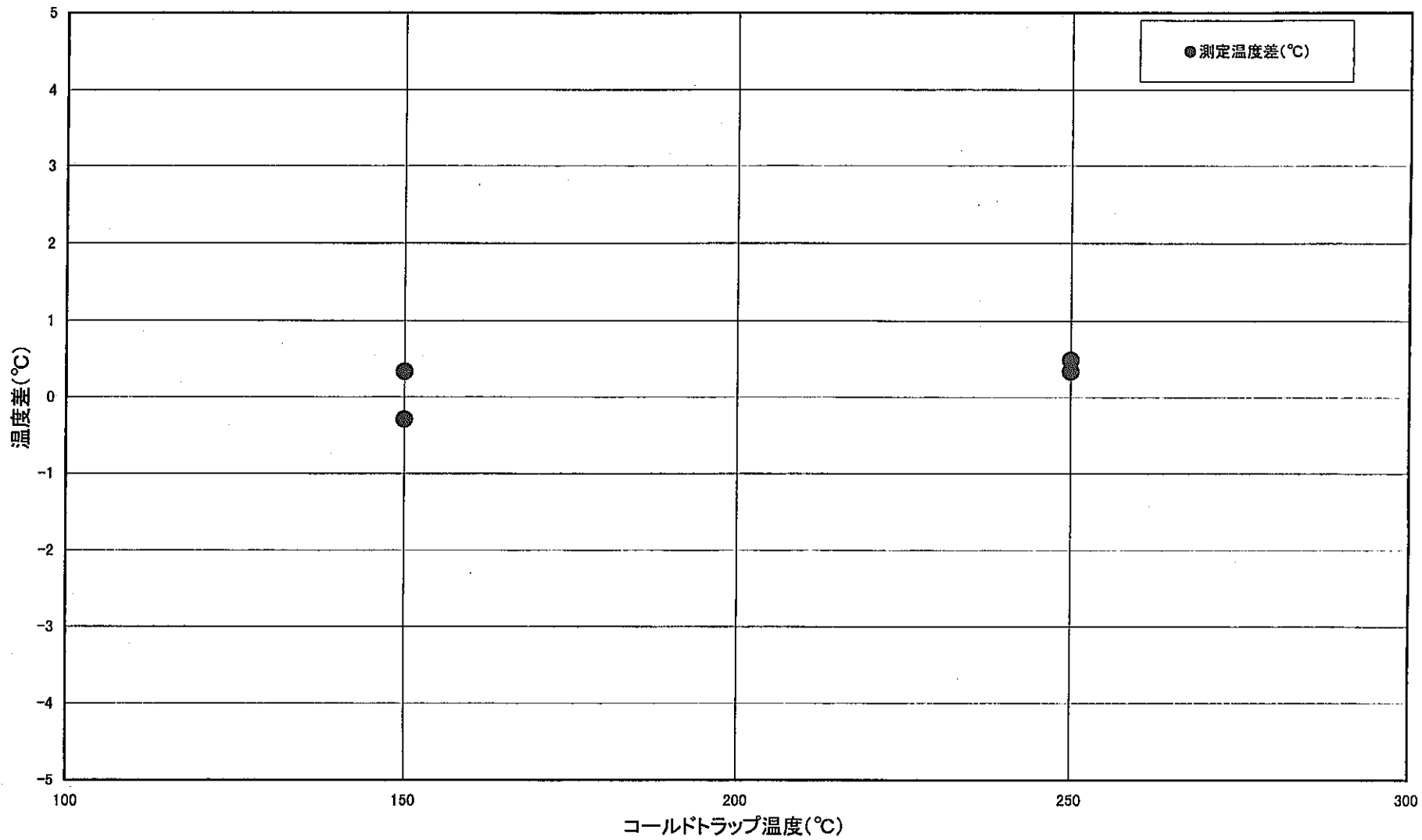


図3. 10 ナトリウム中不純物濃度の違いによる超音波温度計と基準温度との差(垂直式)

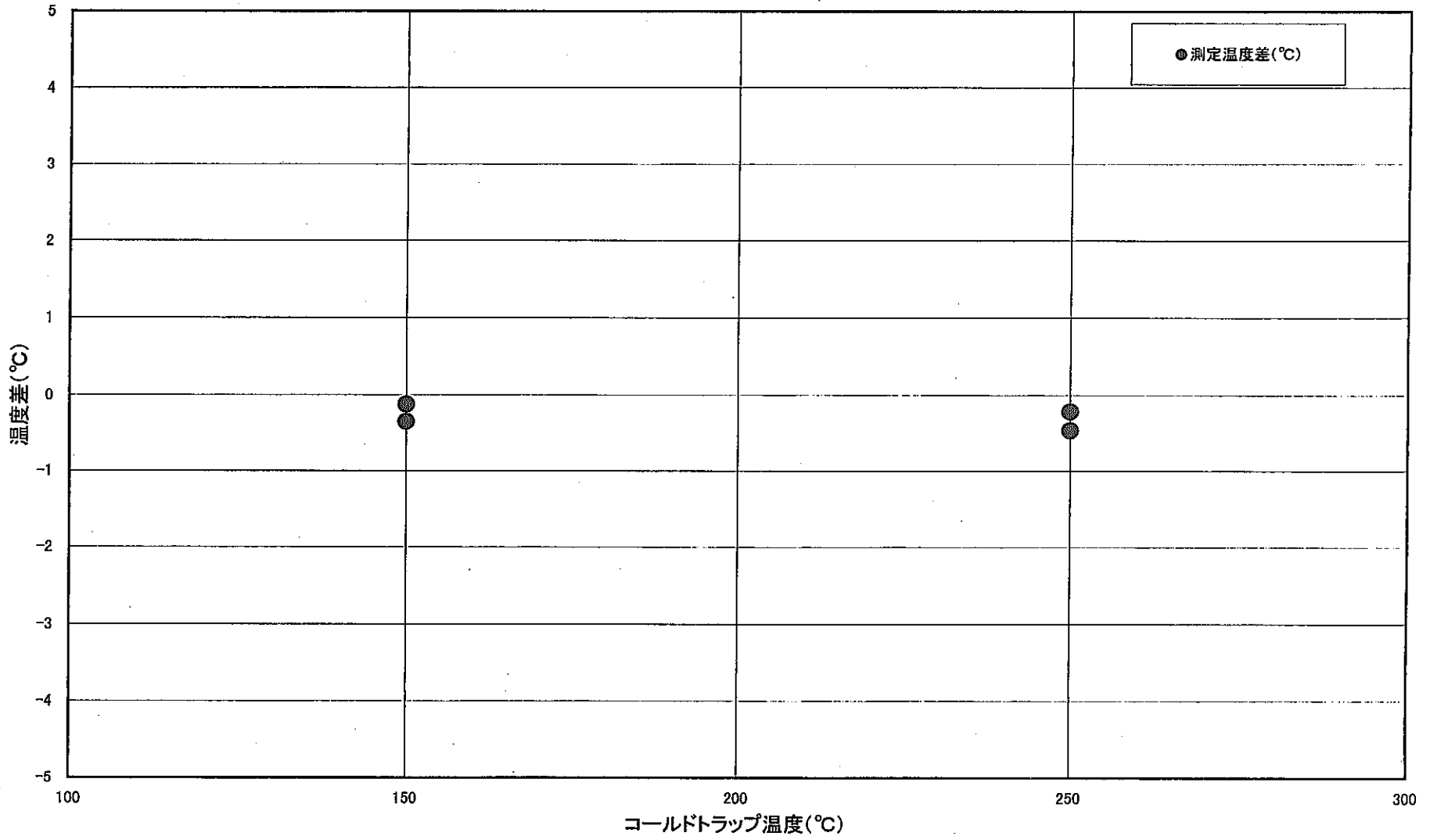


図3. 11 ナトリウム中不純物濃度の違いによる超音波温度計と基準温度との差(斜角式)

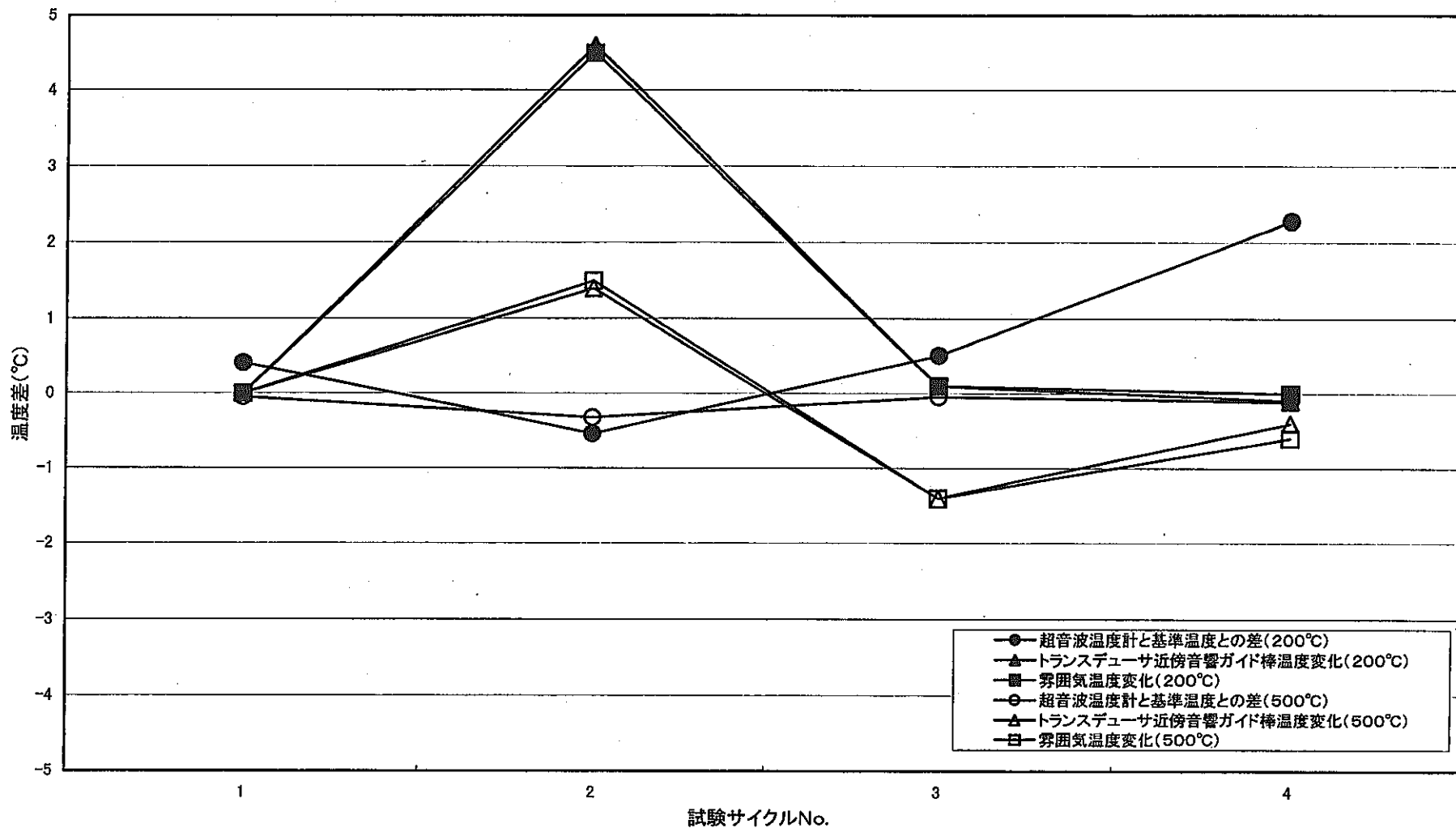


図3. 12 音響ガイド棒の影響(垂直式)

音響ガイド棒温度および雰囲気温度は、それぞれの基準温度との差を第1サイクルの値をゼロとして記述

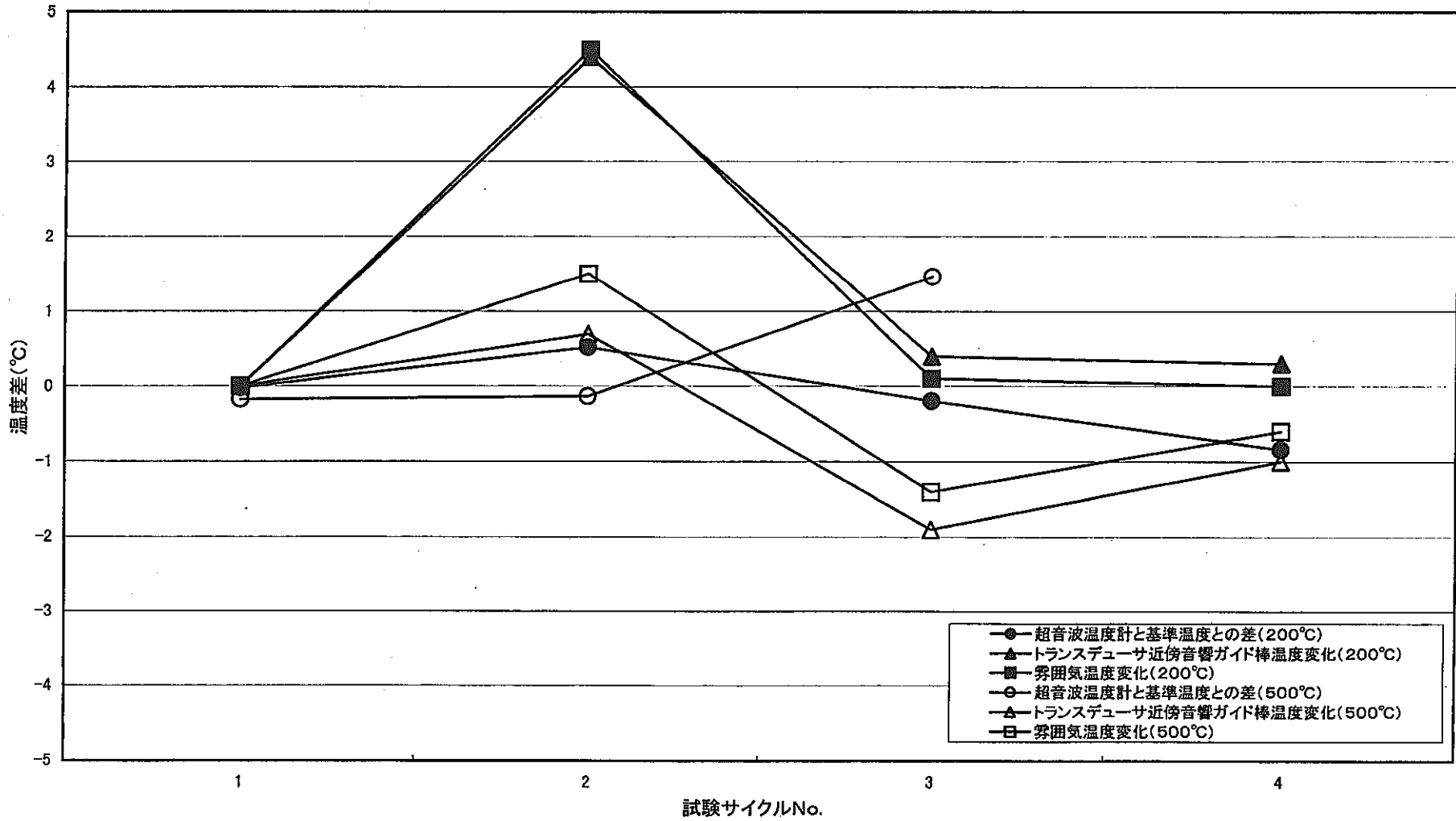


図3.13 音響ガイド棒の影響(斜角式)

音響ガイド棒温度および雰囲気温度は、それぞれの基準温度との差を第1サイクルの値をゼロとして記述

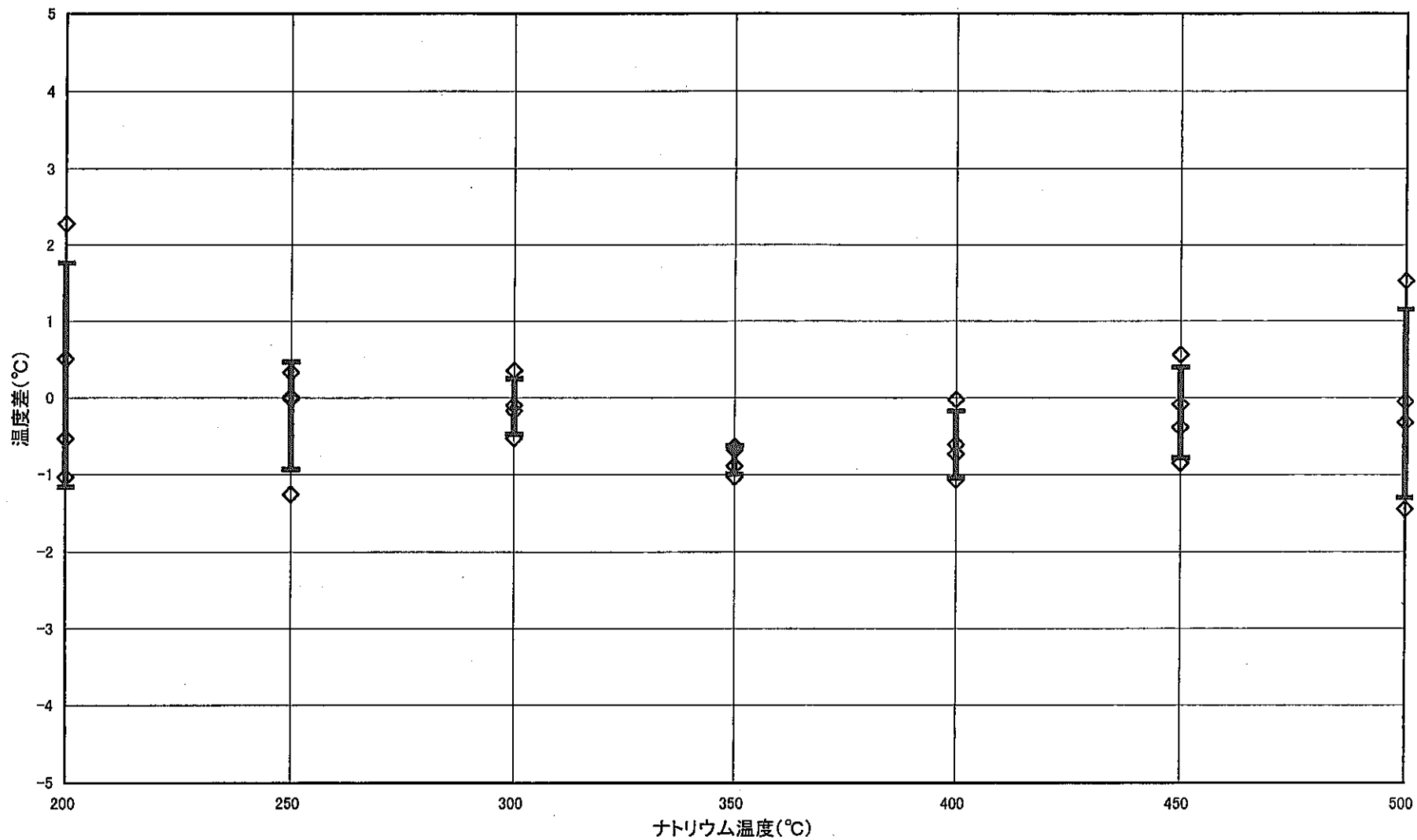


図3. 14 超音波温度計と基準温度の差のまとめ(垂直式)

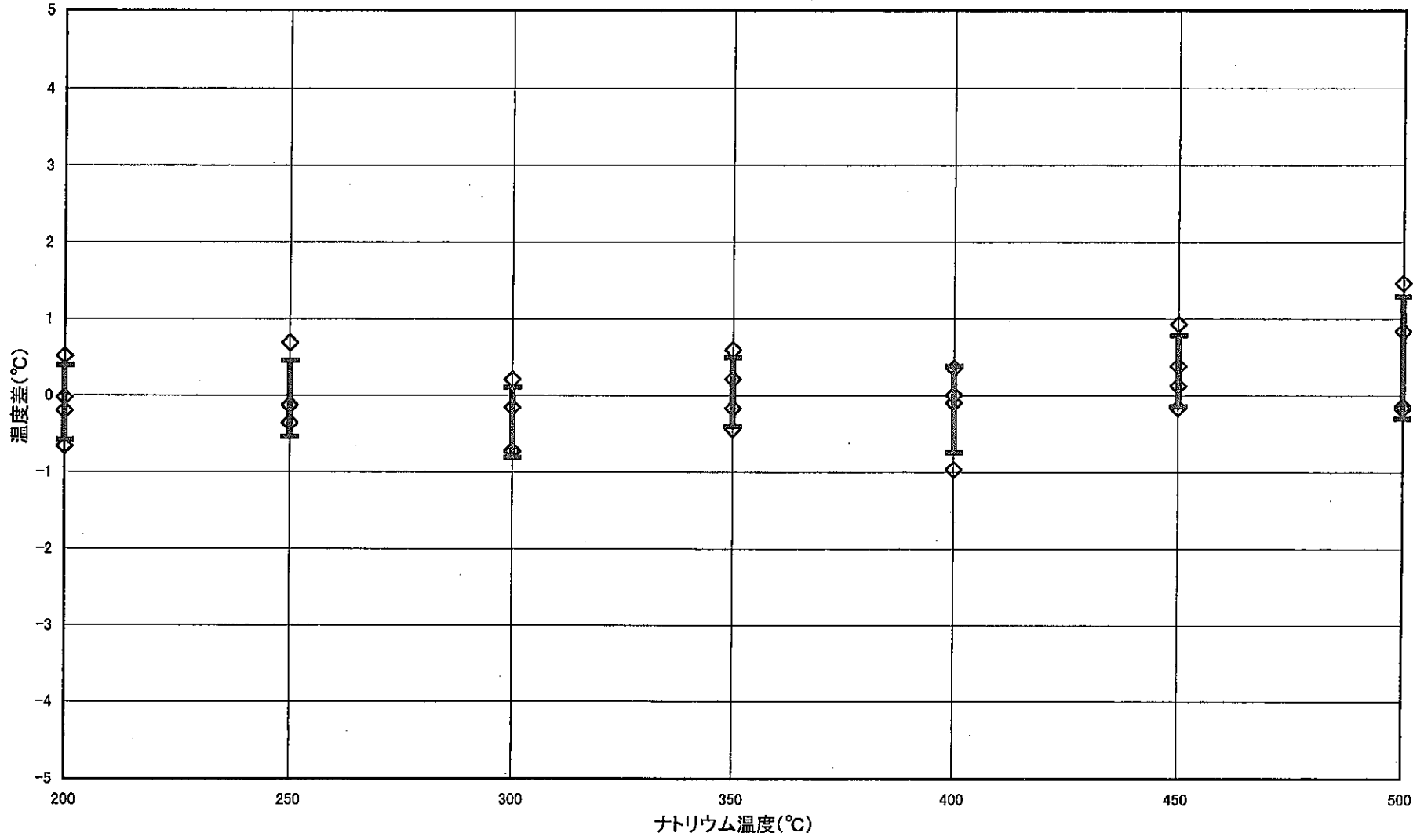


図3. 15 超音波温度計と基準温度の差のまとめ(斜角式)

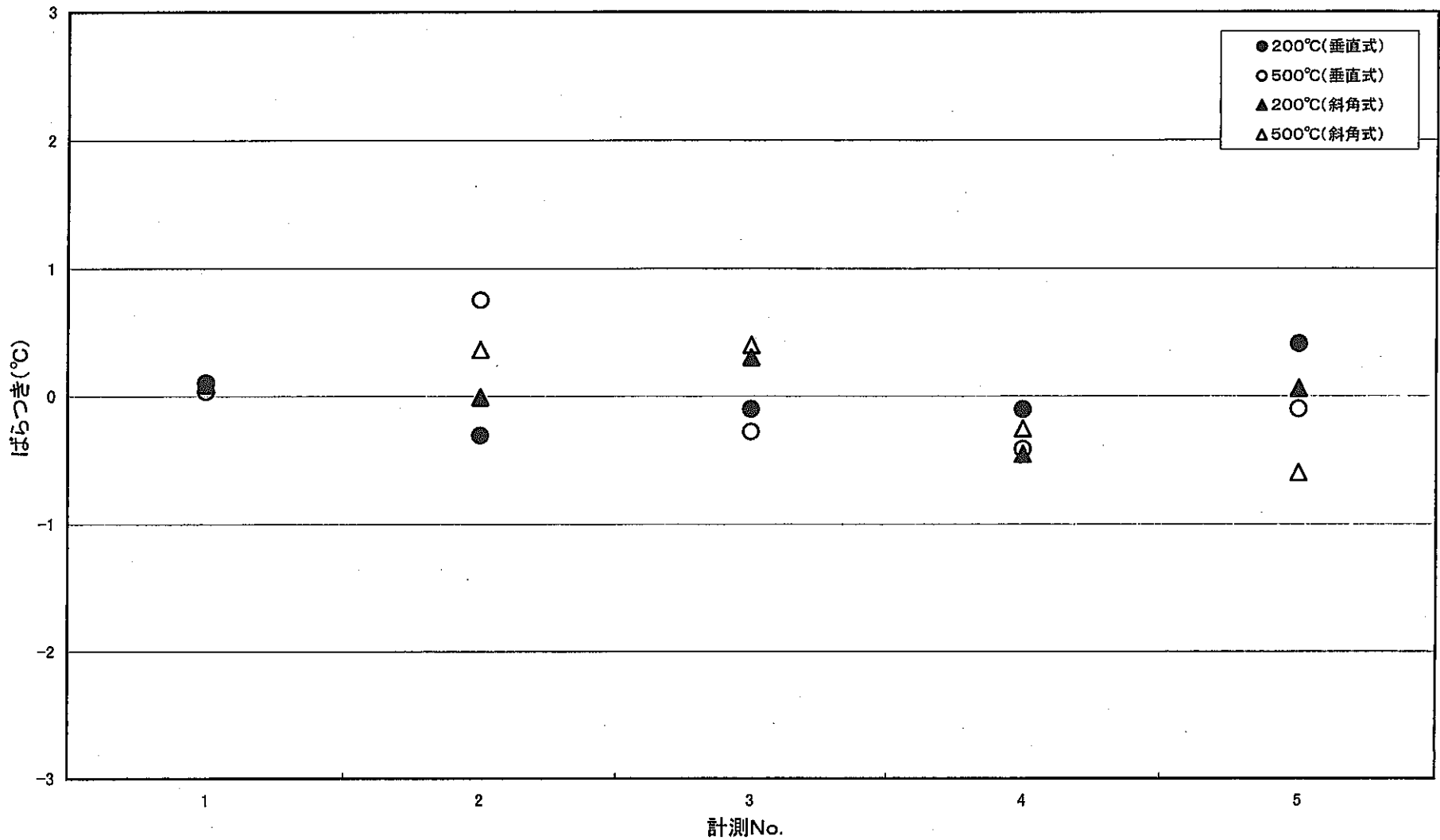


図3. 16 超音波温度計計測値のばらつき(平均値を0とする)

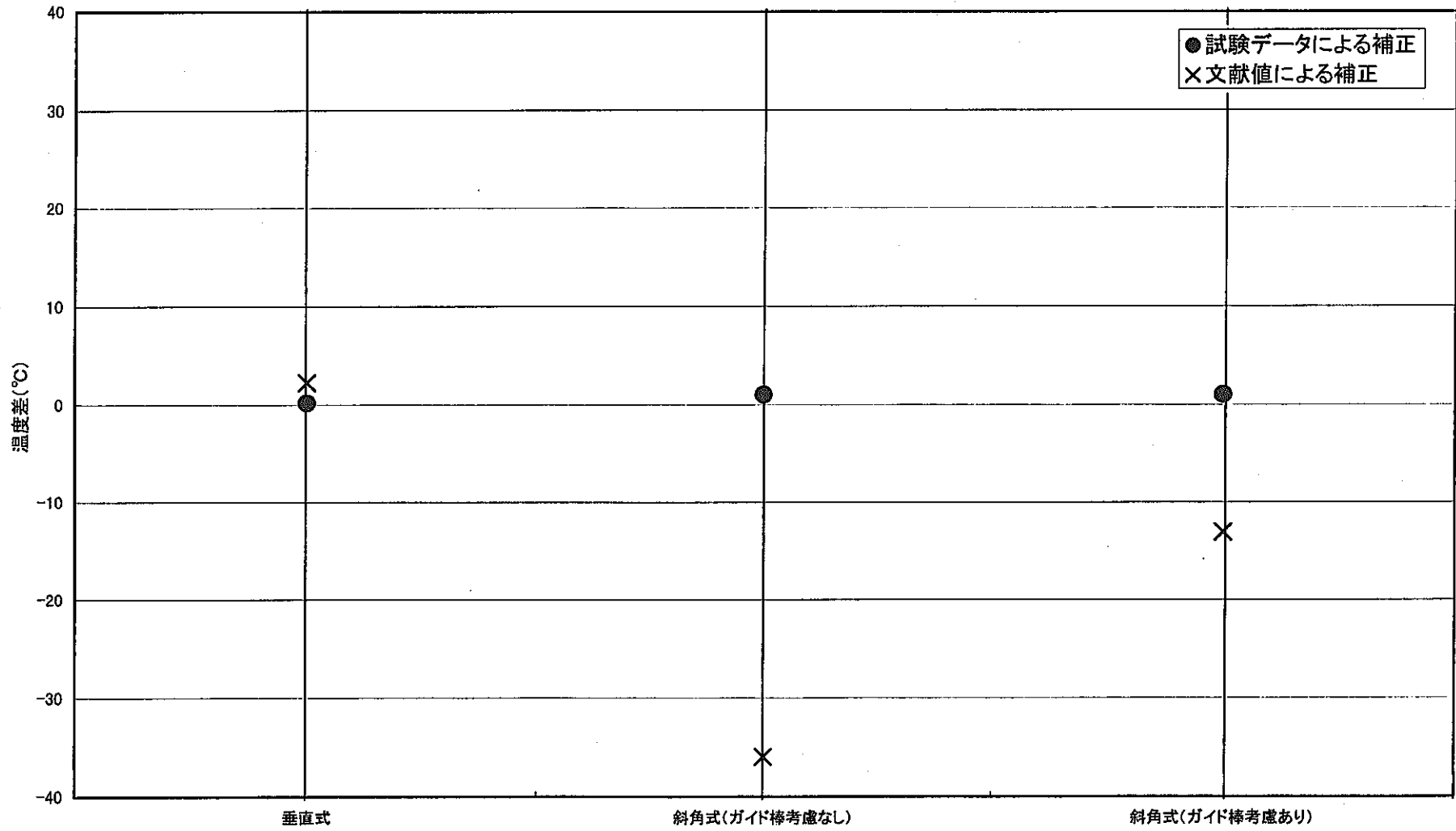


図3. 17 熱膨張の試験データによる補正と文献値による補正の差
 (ナトリウム温度500°Cの時の基準温度との差の平均値)

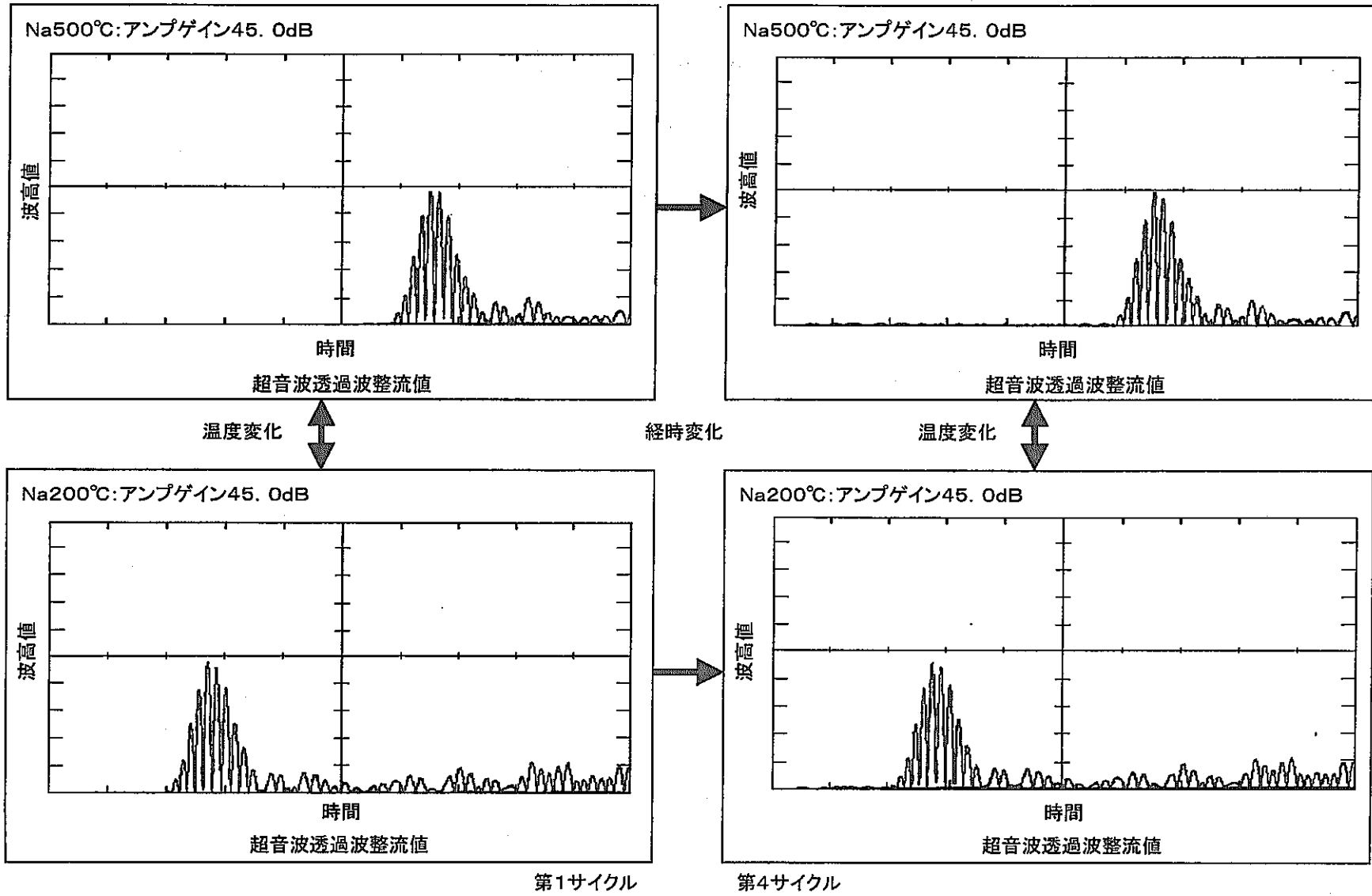


図3. 18 温度と時間による波形変化(超音波温度計 垂直式)

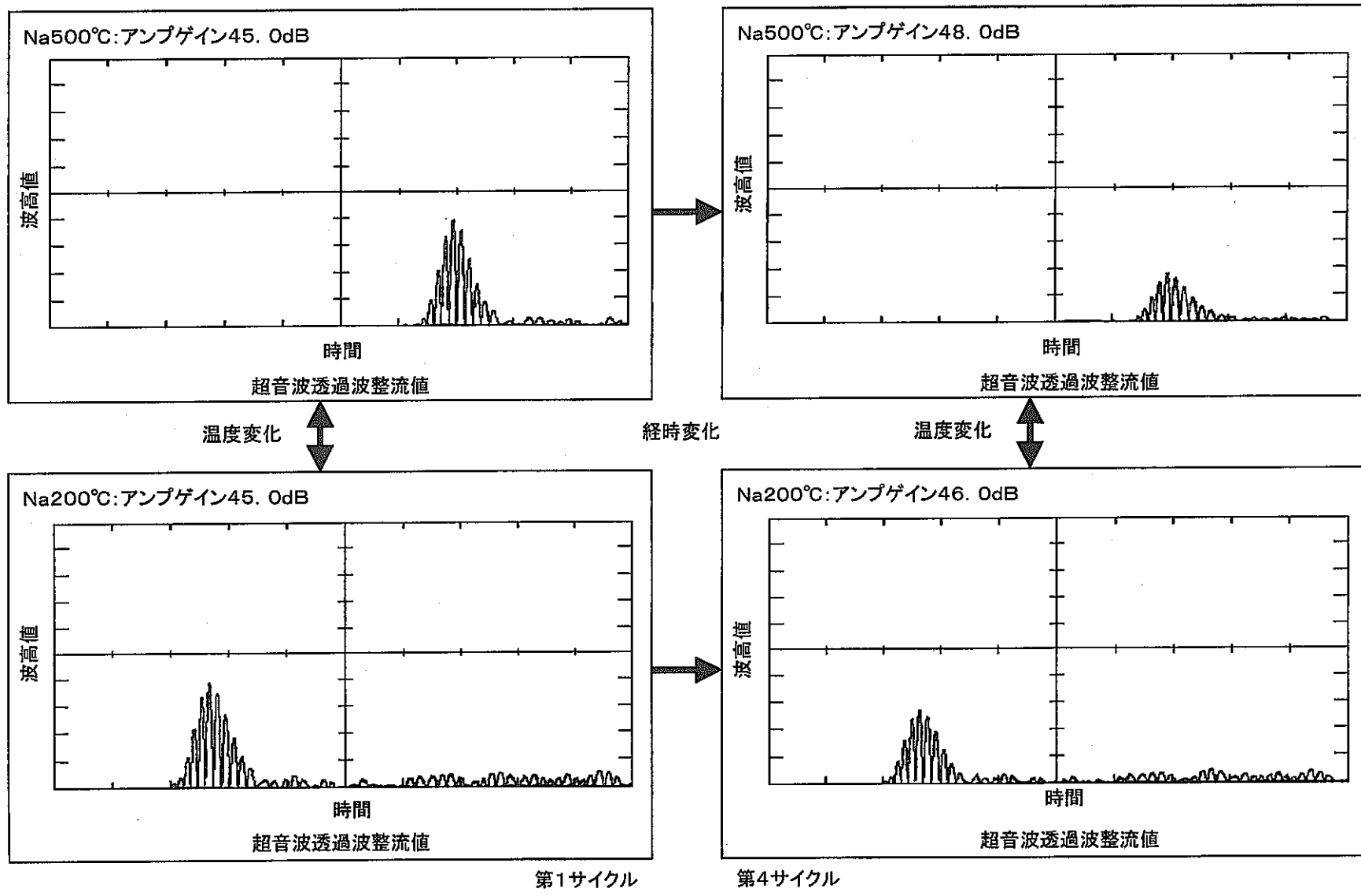


図3. 19 温度と時間による波形変化(超音波温度計 斜角式)

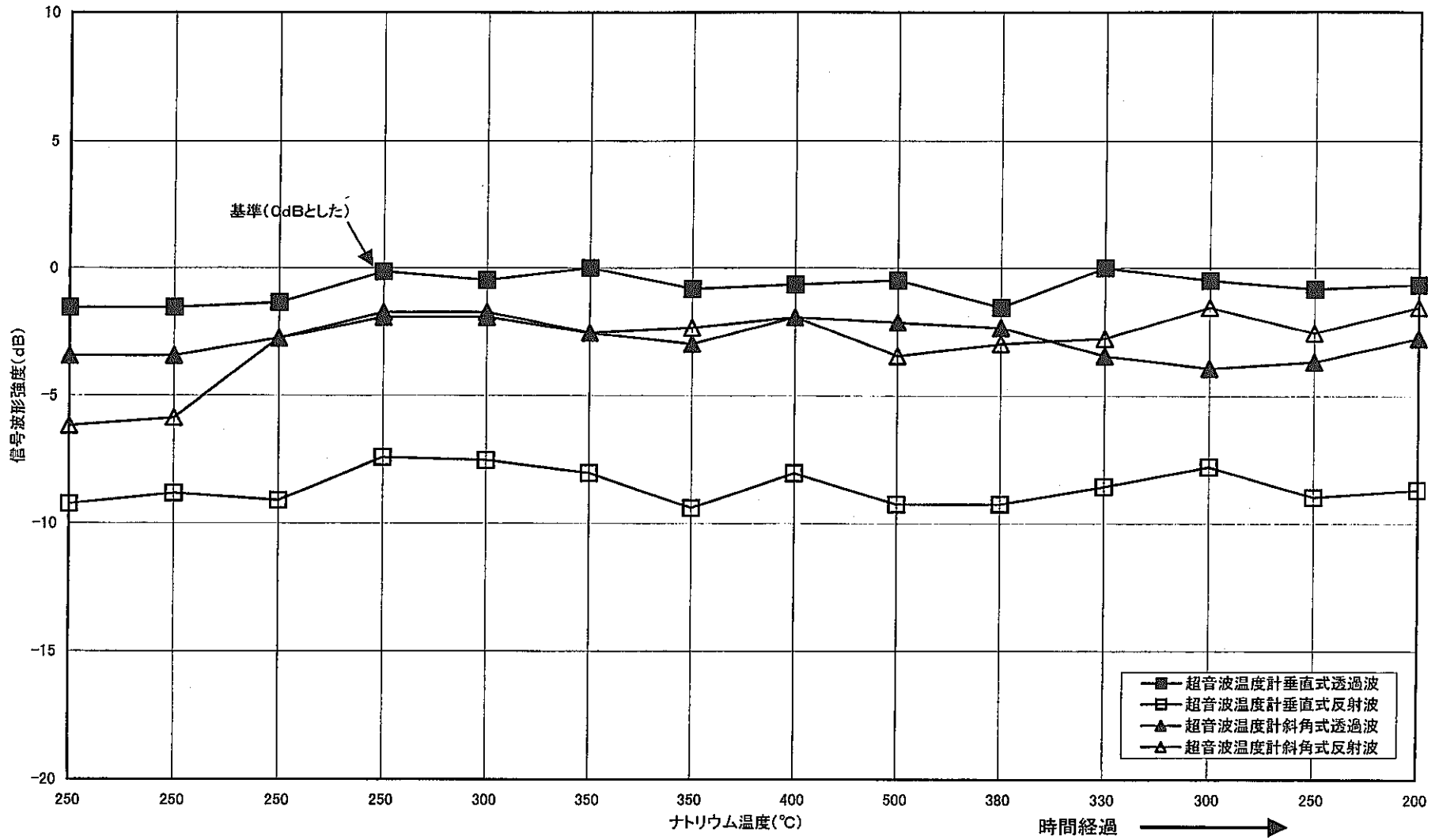


図3. 20 配管のNa濡れ変化による信号波形強度の変化