

二次温度計とその評価に関する調査研究

齊藤郁彦*

(平成 27 年 7 月 7 日受理)

Survey on secondary thermometers and their evaluation

Ikuhiko SAITO

Abstract

Temperature measurement is done frequently in almost any aspect of social activities. Various types of thermometers have been developed and are used to suit the objectives of individual applications.

This survey reports a summary of several investigations related to secondary thermometers for contact thermometry used in the field. Attempts are being made to resolve the technical problems for the standard platinum resistance thermometers (SPRTs). Although such studies are still premature to replace the SPRTs, it is worth monitoring the progress for such new developments. For research on thermistors and quartz thermometers, challenges are being made to pursue their ultimate limits in precision such as improvements in the instrumentation. To promote the innovation of these measurement techniques, further research and evaluation is necessary. To meet this demand, further improvement and development on evaluation techniques based on comparison measurements specialized for each temperature range is essential.

1. 目的

温度測定は生活・産業・学術といった社会のあらゆる分野で頻繁に行われており、欠かすことができない測定である。これまで各分野での要求に応じて、測定原理や形状、特性が異なる多種多様な温度計が開発されている。

温度計は大別すると、一次温度計と二次温度計に分けられる。一次温度計とは、熱力学温度との関係が理論的に知られている物理量を測定することで、熱力学温度そのものの測定が可能な温度計を指す。例えば定積気体温度計や、音響気体温度計、熱雑音温度計、絶対放射温度計などである。

一方、本調査研究で取り上げる二次温度計とは、温度変化に伴う物性量の変化を利用した温度計であり、一次温度計によって構築された温度目盛に基づき校正するこ

とで温度測定が可能となる。現在国際的に用いられている温度目盛である 1990 年国際温度目盛 (International Temperature Scale of 1990・ITS-90)^{1),2)} では、 -259°C (13.8K) から 962°C の温度域において、温度定点間の温度を補間するための温度計として、標準用白金抵抗温度計が用いられているが、これは二次温度計の一つである。また産業現場や学術研究の場で多く用いられる工業用白金抵抗温度計や熱電対なども二次温度計である。これらの二次温度計は、古くから様々な観点での研究が行われており、それらの成果を生かして適切に温度測定を行うことができる。

一方で、現状の二次温度計と比較して、精度や安定性を改善し、さらに温度測定の応用分野を広げることを目的として、新しいタイプの二次温度計の研究が進められている。

そこで本調査研究では、産業現場や学術研究の場において広く使われている二次温度計、特に室温以上で使われる接触式二次温度計に関連したいくつかの研究を紹介

*計測標準研究部門温度湿度科高温標準研究室

する。

2. 二次温度計に関連した研究

前述したように、二次温度計を校正するためには、一次温度計に基づき構築された温度目盛が必要になる。一次温度計とは、熱力学の法則に基づき熱力学温度を直接測定する温度計であり、例えば理想気体の状態方程式を利用し、定積容器の圧力変化を測定する定積気体温度計や、気体の音速を測定する音響気体温度計、抵抗体の熱雑音の強度を測定する熱雑音温度計（ジョンソンノイズ温度計）、黒体放射の強度を測定する絶対放射温度計などがある。これらの温度計は、熱力学温度の研究には必要不可欠であるため各国の国家計量標準機関で研究が行われている³⁾⁻⁵⁾。一方で、現状では装置が大掛かりなものとなり、構造や取扱い方法が複雑であるため、産業現場や学術研究の場での温度測定に利用することは困難である。

一方の二次温度計は、温度によって変化する物性を測定することで、温度を決定する温度計である。例えば、金属や半導体の電気抵抗の温度依存性を利用した抵抗温度計や、異なる金属素線を接合し、素線上の温度分布に応じて発生する熱起電力を利用した熱電対等が挙げられる。二次温度計は一次温度計に比べ構造が簡単で利便性も良く、そして再現性に優れている。

本節ではこの二次温度計について、二つの観点で最近の研究を紹介する。第一は温度の標準の実現と供給に用いている標準用白金抵抗温度計の代替を目指す、高精度な二次温度計の研究を紹介する。第二は産業界で抵抗温度計や熱電対よりも高い精度での温度測定を行うために、用いられている二次温度計の研究を紹介する。

2.1 標準用温度計を目指す新たな二次温度計

二次温度計を用いた温度測定を可能にするための温度目盛として現在使われている物が、1990年国際温度目盛（International Temperature Scale of 1990・ITS-90）^{1),2)}である。これは、一次温度計による熱力学温度の研究成果を元に、二次温度計による測定結果がなるべく熱力学温度に近似し、十分な再現性が得られるように構築された温度目盛であり、以下の二要素からなる。

1. 凝固点や融解点、三重点といった、物質に固有で再現性のある現象の温度を利用した「定義定点」とその温度値
2. 定義定点間の温度を補間するための補間計器と呼ばれる二次温度計と、測定値を温度に変換する補

間式

ITS-90では補間計器は4種類定義されており、その中で、 $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ (13.8K) から $962\text{ }^{\circ}\text{C}$ での温度範囲では、白金抵抗温度計が補間計器として規定されている。補間計器として使用できるものは標準用白金抵抗温度計（Standard Platinum Resistance Thermometers・SPRT）と呼ばれており、ITS-90においていくつかの条件が定められている。

SPRTは、その役割の重要性のため、数多くの観点からの評価が行われており、同時に優れた特性が明らかにされている。一方で中・高温域での白金の酸化や、機械的な安定性といった課題があることが判明している⁶⁾⁻¹²⁾。

そこで海外の国家計量標準機関では、SPRTの代替を目指す新たな標準用の温度計として、ウイスパリング・ギャラリー温度計と、フォトニック温度計の研究が行われている。いずれの温度計も、SPRTのような電気抵抗ではなく、電磁波の周波数を測定することで、温度を決定する。周波数は電気抵抗よりも高い精度で測定を行うことができる量であり、温度測定の高精度化を実現する可能性がある。一方で温度計としての研究は始まったばかりであり、評価されていない要素が多く、その特性は未知数である。このため今後の動向に注目する必要がある。

2.1.1 ウイスパリング・ギャラリー温度計 原理

凹曲面に波が入射すると、曲面に沿った波の伝播が起こる。この波の伝播が円筒や球の内部で発生すると、特定の周波数で曲面での反射が繰り返され、共振現象が起こる。この時生じる波を、Whispering Gallery Mode (WGモード) と言う。この現象を利用し、極めて周波数が安定したマイクロ波の発生源として使われているのがCryogenic Sapphire Oscillator や Whispering Gallery Mode Resonator と呼ばれる装置である。これは図1に示すような、銅製キャビティと、直径が数mm程度の円筒状の人工サファイア結晶で構成されており、人工サファイア結晶内部で発生するマイクロ波のWGモードを利用している。この共振器におけるWGモードの共振周波数は、人工サファイアの膨張率と誘電率に依存しているが、これらのパラメータは温度によって変化してしまうため、周波数源として用いる際には発振周波数を安定させるため、数K程度まで冷却して使用する。

逆にこれらのパラメータの温度依存性を利用し、共振周波数から温度を測定することを目論んだ温度計が研究されており、ウイスパリング・ギャラリー温度計（Whispering Gallery Thermometer, WGT）と呼ばれてい

る¹³⁾⁻¹⁶⁾。

課題

WGTが実用化される上での課題は大きく分けて二つある。第一の課題は共振周波数と温度の関係式が確立されておらず、実測値と関係式との差異が大きい点である。最初にWGTについて言及したG. F. Strouseの論文によれば、0℃から100℃の温度域において二次の多項式や三次の多項式を用いた関係式を構築した結果、最大14 mK程度残差が生じていたとしている¹³⁾。SPRTのノンユニークネス¹⁷⁾が同一温度域で0.1 mKオーダーであることを考慮すると、更なる研究が必要であることがわかる。Lili Yuらは、この課題に対する解決策として、シミュレーションを元に球状や棒状¹⁴⁾の人工サファイアを設計し、その評価を行っている。特に直径12 mmの球状の人工サファイア結晶を使用したWGTについては、2012年に発表した論文の中で、-40℃~85℃の温度域での不確かさが4 mKであったと報告している¹⁵⁾。

第二の課題はWGTの形状である。G. F. Strouse氏が製作したWGTは、25 mmの銅製キャビティの内部に直径8.8 mmの人工サファイアが吊り下げられている構造となっており、WGモードは14 GHzから20 GHzの間に5つ存在している。キャビティは直径7~8 mmのSPRTと比較してかなり太いため、定点等の校正装置を使用することができない。その一方で小型化すると、WGモードの共振周波数がさらに高くなり、高価な測定器が必要となる、という問題もある。

2.1.2 フォトニック温度計

原理

光を長距離伝送するための伝送路である光ファイバについて、一本の光ファイバで送れる情報量を増やす手法の一つに、様々な波長の光をまとめて光ファイバに導入

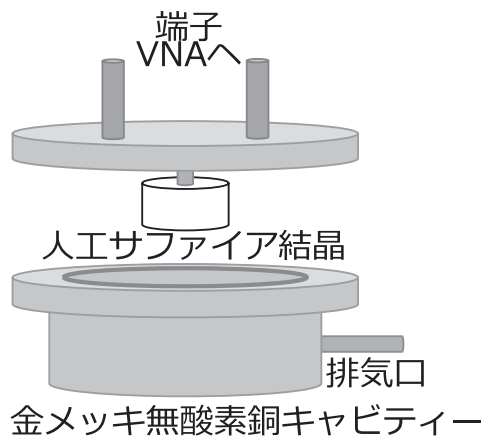


図1 WGTの中心部の概要図¹⁴⁾

し、受け手側で目的の波長の光を分離するという物がある。この際、特定の波長のみを取り出すために用いられる装置の一つが光リング共振器である。これは光ファイバを用いたリング状の導光路で構成され、光を導入すると導光路の経路長と導光路に使用した物質の誘電率に依存した、特定の波長の光を捕縛する。

近年この光リング共振器は、微細な導光路を集積し光の制御を可能にするシリコンフォトニクス技術を用いることで、シリコン基板上に構成することが可能になっている。さらに光リング共振器の近傍にヒーターを設置することで、光リング共振器の経路長や誘電率を変化させ、可変波長の共振器として利用する研究もある¹⁸⁾。

そこで、シリコン基板上の光リング共振器の共振波長から温度を決定し、小型かつ耐衝撃性に優れた温度計の研究が行われている。この温度計は、フォトニック温度計と呼ばれている。図2にこの温度計の概略図と実際に評価する際の模式図を載せる¹⁹⁾。ここでは可変波長レーザーの出力波長を、波長計を用いて測定し、同時に一方からシリコン基板上のリング共振器にレーザー光を入力し、もう一方から出力された光の強度を測定することで、共振波長を調べている。また2本の白金抵抗温度計の値を元に、ペルチェ素子の出力を制御し、温度を安定させている。

性能

最初にフォトニック温度計について言及したG. D. Kimらの論文では、幅500 nmの導光路を用いたリング共振器を用いた場合、15℃から45℃の温度範囲で温度係数が83 pm/Kであると報告している²⁰⁾。

また2014年に報告されたH. Xuらの論文では、15℃

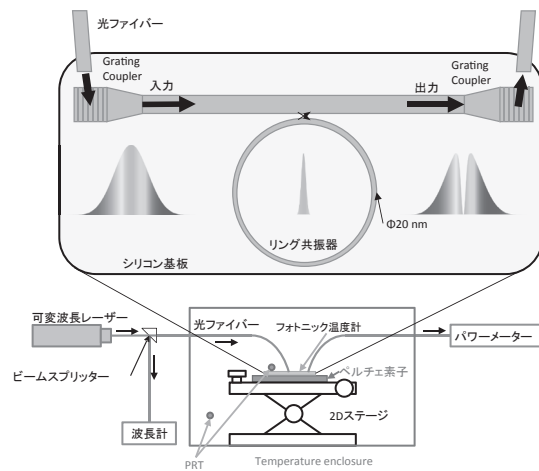


図2 フォトニック温度計の測定システムと共振器の動作¹⁹⁾

から 33 °C での温度域の温度係数が 77 pm/K であったと報告している。これは、波長計の分解能が 0.1 pm であるため、1 mK 程度の分解能に相当するとしている。また分解能をさらに向上させるため、「side of fringe, constant power mode」という、吸収スペクトルの裾野の強度から共振周波数を決定する手法により、分解能を 80 μK まで向上させることができると報告している¹⁹⁾。

このフォトニック温度計測の課題は、感温部の外形が複雑な点である。板状のシリコン基板を用いており、同時にレーザー光の入出力口が存在するため、現段階では SPRT 用に作られた定点装置等を使用することができない。この課題の改善方法を含め、今後も慎重に動向を追う必要がある。

2.2 産業現場や学術研究の場で使われる二次温度計

産業現場や学術研究の場では、温度域や測定対象に合わせた二次温度計が使われている。二次温度計の中で特に白金抵抗温度計や熱電対は、様々な観点からの研究が行われ測定量と温度の関係式の妥当性や安定性・再現性、それらを含めた測定の不確かさが明らかにされている。そしてそれらの研究の成果を生かし、容易に測定量から温度に変換できるよう構造や特性が工業規格化されたことで幅広い分野に普及し、様々な用途の温度測定に用いられている。

一方、サーミスタや水晶温度計といった温度計も産業界では多く使われている。特にサーミスタは熱電対と並ぶほど様々な分野に普及しており、現代の温度測定に欠かすことができない。

サーミスタや水晶温度計の特徴は、白金抵抗温度計や熱電対よりも高分解能な測定を行うことができることである。そのため、極めて高い精度での温度測定が求められる分野にも用いられている。その一方で、温度標準の分野において、関係式の ITS-90 との一致の度合いや、再現性・長期的な安定性に関する情報は、白金抵抗温度計や熱電対ほど多くない。

そこで高い精度での温度測定を求める分野へ貢献するために、サーミスタや水晶温度計への理解を深め、更なる活用の可能性を検討することは重要である。本節ではこれらの温度計に注目して調査を行った。

2.2.1 サーミスタ

特徴

サーミスタとは、金属酸化物を焼結して作られる半導体で、温度変化に対して電気抵抗値が急激に変化する性質を持っている。温度計測には主として、電気抵抗が温度上昇と共に指数的に減少する Negative Temperature

Coefficient (NTC) Thermistor が使われる。

サーミスタは、抵抗値が大きく変化するため、温度域によっては、極めて感度が大きくなる。また抵抗値に対して外形を小さくすることができるため、熱容量を小さくすることができる。これらの特性から、高い感度での温度測定を行うことができるため、カロリメーター等の微小な温度差測定に利用されている²¹⁾。また櫻井は、温度の定義である水の三重点セルについて、測温孔の底で生じる、氷にかかる浮力による指示値への微小な影響を、サーミスタを用いて測定しており、底から 1 cm までの領域で、静水圧補正から予想される温度値よりも 0.2 mK 低下していることを報告している²²⁾。

一方で温度センサとしての安定性は白金抵抗温度計ほど優れていない場合が多く、過去の論文にて 1 年で 10 mK 程度ドリフトしたセンサがあった他²³⁾、室温から 150 °C までの温度変化の繰り返しによって最大 250 mK ドリフトした等の事例が報告されている²⁴⁾。また抵抗値の変化量が大きいため、感度の高さを生かせる温度域が限られているという欠点がある。

サーミスタは流通している種類が非常に多く、それぞれの特性の違いも大きい。小型で高感度という特徴は他の二次温度計と比べ卓越している。こうした特徴を適切に活用するためにも、安定性の評価や、特性式の評価を適切に行う必要がある。

特性式とその課題

一般的にサーミスタの特性式として使われるのが以下の式である。

$$R = R_0 \exp \left\{ B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\} \dots 2.1$$

T_0 及び R_0 は基準となる温度とその時の抵抗値であり、 B はサーミスタ定数と呼ばれている。しかし実際のサーミスタでは、上式をそのまま用いると実際の温度との残差が大きい。そこで関係式の次数や関数の形を工夫することで、残差を小さくした特性式が提案されている。例えば 1968 年に J. Steinhart らが、水晶温度計との比較測定を基に提案した以下の式が Steinhart-Hart の式として知られている²⁵⁾。

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c(\ln(R))^3 \dots 2.2$$

他にもサーミスタの特性式はいくつか提案されているが²⁶⁾⁻²⁸⁾、実際に各特性式の残差を網羅的に評価した論文を C. Chen が報告している。この報告では、4 種類のサーミスタを ITS-90 に基づき校正した SPRT と、0 °C から

70℃の範囲で比較し、温度値に対する抵抗値を測定した。その結果を元に、上記の2式(式と式)と1988年にH. Hogeが発表した論文中の5つの式²⁶⁾、

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R + A_2 (\ln R)^2 \quad \dots 2.3$$

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R + A_2 (\ln R)^2 + A_3 (\ln R)^3 \quad \dots 2.4$$

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R + A_2 (\ln R)^2 + A_3 (\ln R)^3 + A_4 (\ln R)^4 \quad \dots 2.5$$

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R + A_2 (\ln R)^2 + \frac{A_5}{\ln R} \quad \dots 2.6$$

$$\ln R = b_0 + \frac{b_1}{T + b_2} \quad \dots 2.7$$

の各式のパラメータを決定し、実測値との残差を評価した。ある1種類のサーミスタの実測値を用いて各式の係数を決定した際の残差の大きさを図3に示す。この測定結果において、式2.1を用いた場合、残差が200 mK以上もあり、図3からは除外している。一方で式2.2、式2.4、式2.5、式2.6の残差についてはほとんど大きな差異が無く、特に小さい温度域で1 mK以内となっている²⁹⁾。

2.2.2 水晶温度計

特徴

水晶温度計は、様々な電子機器の周波数源として使われている水晶振動子の発振周波数が、周囲の温度に依存する性質を利用した温度計である。

周波数測定は電圧や電流の測定と比較して高い精度で行うことができるため、水晶温度計は高分解能な測定が可能とされている。安定性については少なくともサーミスタよりも良好で、2008年にL. Spassovが発表した論文によれば、氷点に15秒さらした場合、0.5 Hz (0.5 mK相当)、液体窒素に150秒さらした場合では、1.3 Hz

(1.3 mK相当)ほど指示値が変化したと報告している。また長期的な安定性として、25℃及び80℃で1年間測定したところ、±0.5 ppm (10 mK) 以内で安定したとしている³⁰⁾。

水晶温度計の課題は外部からの振動に弱い点があげられる。これは、水晶の発振機構が圧電効果による電氣的振動と機械的振動の相互作用で生じているためである。同時に水晶片自体も薄く壊れやすい他、水晶片と電極との接合も、余計な外力を与えないようにするため非常に難しい。このため衝撃や振動が加わらない環境下で用いる必要がある。

切り出し角度と温度特性

水晶振動子は、高純度な水晶結晶を薄い板状に切り出した水晶片を利用する。この水晶片を切り出す際に、結晶の成長方向を光軸(Z軸)、光軸と結晶の稜線を垂直につないだ電気軸(X軸)、電気軸に垂直な機械軸(Y軸)からなる座標系が定義されている。これらの軸に対し、角度と厚さを調節することで、発振周波数や温度特性を変えることができる。例えば、ATカットと呼ばれる光軸に対し約32.25°で切り出した水晶片は、1次の温度係数が非常に小さく発振周波数の変化が小さいため、この水晶片で作られた水晶振動子は電子回路の周波数源として広く使われている。

これに対し、水晶振動子を温度計として利用するためには、水晶片の発振周波数の温度依存性を大きくする必要がある。また温度と周波数の関係が線形であることも、実際に利用する上で重要となる。1965年にD. L. Hammondらが開発した、光軸から約13°、電気軸から約8°44'で切り出したLCカットの水晶片はこれらの要件を満たしており、使用可能な温度域は-40℃から230℃まで、基準周波数は28 MHz、温度係数は35.4 ppm/℃、分解能は0.1 mKとしている³¹⁾。その後は加工の容易性・温度特性の線形性・温度係数の大きさを改良した切り出し方が発表されている³²⁾⁻³⁴⁾。主な切り出し方を表1に示す。

一方で従来の、水晶片を所定の角度と厚さで切り出す手法では、加工するうえでの強度を確保するため、形状の自由度と薄さに限界があり、得られる特性に限りがある。そこで、半導体微細加工技術を使用し、任意の形状の水晶片を製作することで、目的に沿った特性の水晶振動子を得る研究がある。例えば2013年にJun XUらが発表した論文では、共振周波数とその振動モードをシミュレーションした上で、数μmの音叉状の水晶片を試作し、評価を行っている。図4に試作した水晶温度計の概要図を示す。室温付近での基準周波数が37 kHzで、0

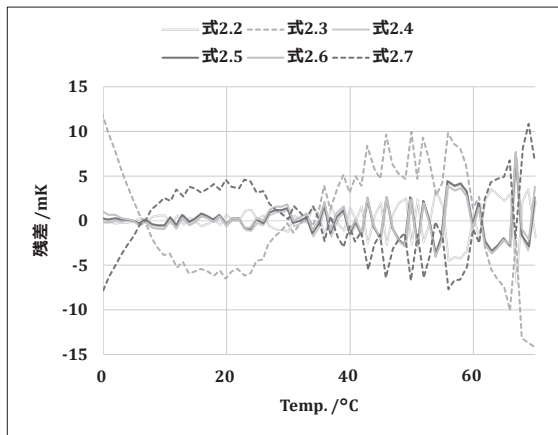


図3 サーマスタの実測値と各種特性式との間の残差²⁹⁾

℃から 100 ℃までの温度域の温度係数が $-70 \text{ ppm}/\text{℃}$ であったと報告している³⁵⁾。

2.2.3 その他の温度計

蛍光温度計

蛍光体とは、波長の短い光（励起光）を照射すると長い光（蛍光）を発する物質である。その強度は、励起光の照射を止めると、図5のように時間が経つと共に減衰していく。この時間が、蛍光体の温度に応じて変化する性質を利用した温度計が蛍光温度計である。具体的には蛍光の強度が $1/e$ 倍（ e はネイピア数）まで減衰するまでの、時定数 τ を測定することで温度を決定する。 τ は使用する蛍光体によっても異なるが、2013年にP. Y. Sollazzo が発表した論文では、イットリア安定化ジルコニアにディスプレイシウム（Dy）を微量添加した蛍光体に、Nd:YAG レーザー（355 nm）を照射したところ、時定数は 600 ℃では 0.6 ミリ秒、800 ℃では 2 マイクロ秒であると報告している³⁶⁾。

蛍光を利用した温度測定は、原理的には蛍光を発する物質と励起させる手段さえ用意することができれば、様々な環境下で利用できる可能性がある。市販されている蛍光温度計は、爆発物や強電磁場が存在し、熱電対等の電気的なセンサが使用できない場所での温度測定に用いられている。また生体細胞内部や物質表面の微小領域

等の、従来の温度計では測定することが出来なかった分野での温度測定に利用するための研究が行われている。

蛍光を利用した温度計は、蛍光体を測温対象に接触させる / 取り付けるという観点では接触式の二次温度計である。一方で、温度の検出には入射した光によって発生した蛍光を測定するため、非接触式の温度計測を行うことができる。そのため熱電対などの他の接触式の二次温度計と異なり、導線に沿った熱流などの誤差要因はないという特徴も備える。このため仮に温度値と高精度・高分解能な特性関係を備えるものが開発できれば、現場計測や微小領域の温度測定などのニーズに対応できる可能性も秘めている^{37)~44)}。

光ファイバを利用した温度計

光ファイバは光を効率よく遠くへ送ることが可能な伝送路であり、通信線として広く使われている。この特性を生かし、蛍光温度計や放射温度計では、効率よく光を集め、離れた位置にある検出器に導く導光路として使われている。特に製鉄分野では光ファイバを直接溶融した金属に刺し、光ファイバを解かしつつ、特定ポイントの温度を放射温度計で測定するという、消耗型光ファイバ温度計も実用化されている^{45),46)}。

また光ファイバに特定の波長の光を透過・反射する光フィルタを接続し、その温度依存性を利用する温度計もある。具体的には、2.1.2 のフォトニック温度計で紹介したリング共振器や、Fiber Bragg Grating (FBG) と呼ばれる素子が使われる。FBG は光ファイバ内部の屈折率を周期的に変化させることで、周期に応じた波長の光を反射させる素子であり、この周期が熱膨張によって変化し、反射波長が変わるため、温度の測定に用いることができる^{20),47)~53)}。

一方で光ファイバ自体の光学的な特性を利用して温度

表 1 主な水晶の切り出し方

カット名	LC	NL1	NLSC	NLC
発表年	1965	1985	1987	1996
電気軸/光軸からの角度(°)	8.73/13	24/95	10/110	0/-31.5
基準周波数(25℃) / MHz	28	11.24	10.45	29.3
厚さ/mm	不明	0.5	0.5	0.083
温度域 / °C	-40 ~ 230	-160 ~ 180	-100 ~ 145	-40 ~ 150
温度係数 / ppm・°C ⁻¹	35.4	62	14.4	34
時定数 / s	10	25	11	44
参考文献	31)	32)	33)	34)

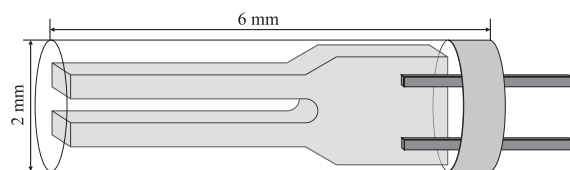


図 4 微細加工技術を用いて製作した音叉型水晶温度計の構造

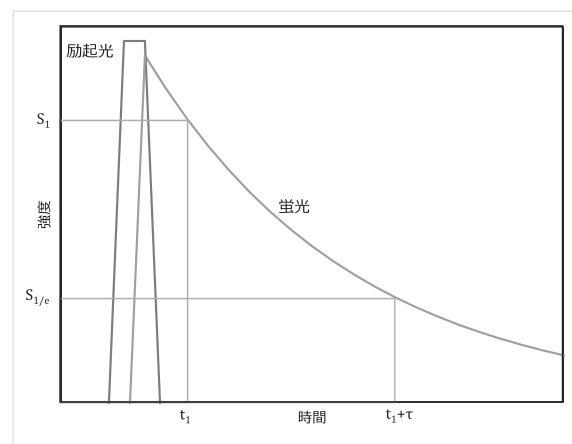


図 5 パルス光励起による蛍光の強度変化

を測定する技術もある。光ファイバに強力な光を導入すると、ラマン散乱やブリルアン散乱と言った現象が起こり、入射光とは異なる波長の散乱光が発生する。この散乱光は光ファイバを構成する物質である二酸化ケイ素が置かれている温度や圧力等に依存して波長や強度が変化するため、この性質を利用して温度を測定する事ができる。図6に温度計の模式図を示す。

最大の特徴は、散乱光が測定器に到達するまでの時刻が、光ファイバ上で散乱光が発生した位置に依存している点である。そこで、散乱光が発生する位置と、測定器まで到達するのに要す時間との対応を事前に調べることができれば、励起光を入射した時点からの散乱光の強度の経時変化を元に、光ファイバの経路上の温度分布を連続して測定することができる。この性質を利用することで、センサを大量に設置することなく、広い範囲に渡る温度分布の測定を行うことができる⁵⁴⁾。このような用途での温度測定は Distributed temperature sensing (DTS・温度分布計測) と呼ばれている⁵⁵⁾。

また散乱光によっては、光ファイバに加わる圧力の影響を受ける物もあり、温度同様に経路上の圧力分布の測定にも用いられている⁵⁵⁾⁻⁶⁰⁾。

3. 二次温度計による特殊な温度計測の例

産業現場や学术研究の場では温度計測は頻繁に行われており、その温度や測定対象は様々である。その中には非常に特殊な環境下での温度計測も存在する。この節ではこのような温度計測の一例として、海洋温度計測と断層の温度計測を紹介する。気象や地質関連の研究・観測において温度が重要な役割を担っている例であり、高精

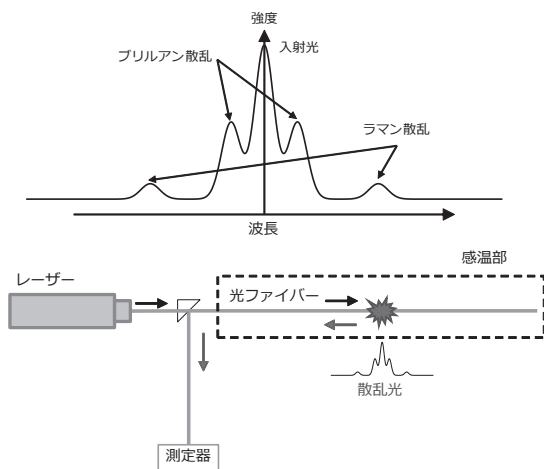


図6 光ファイバの非線形光学効果を利用した温度計の模式図

度な測定が求められている。今後積極的に研究を推進、支援する必要がある。

3.1 海洋の温度計測

近年、環境問題への関心が高まっており、その一つである地球温暖化とそれに起因する気候変動が大きな問題となっている。そのため現状を正確に理解するため気象関係の様々な観測データの重要性が増している。同時に、観測データの与える影響は大きく、その信頼性の向上が求められている。

この気候変動に対して大きな影響を与えているのは、海洋である。そもそも海洋は地球の表面積のおよそ70%を占めており、膨大な体積を持つ。また大気と比較して4倍程度比熱容量が大きく、その結果、海洋全体の熱容量は大気全体の約1000倍も大きい。さらに海流により赤道から極地へ膨大な熱量の輸送が行われている。そのため海洋の温度についての詳細な観測データは地球規模の気候変動を観測するために重要な意味を持つ。そこで世界気象機関(WMO)が中心となり、各国の海洋研究機関は World Ocean Circulation Experiment (WOCE) などの国際的な枠組みを構築し、分担して世界中の海洋の観測を行い、得られた観測データを共有している。

実際の海洋観測では、温度、圧力、電気伝導度を測定するセンサを一台に搭載した測定器であるCTD (Conductivity Temperature Depth) センサ等を深海に投下したのち、牽引索で引き上げて水深を変えながら各量の深さ方向の分布の測定を行う。同時にこれらのデータを元に塩分の深さ方向の分布を算出している。

海水は熱容量が大きいため温度変化が起こりにくく、さらに太陽光が届かない深海では、ほとんど温度が変化しない。そのため極めてわずかな変化であっても重要な意味を持つ可能性がある。例えば、2004年に発表された論文では、北太平洋にて深さ5000mまでの海水温を1985-1999年の15年間にわたり測定したところ、約5mKの上昇が観測され、地球温暖化との関連が疑われている⁶¹⁾。また温度と塩分の分布は、海流の原動力の一つである熱塩循環に極めて大きな影響を与えており、特に塩分を高精度で決定するため、海洋温度センサは極めて高い精度で測定を行う必要がある。

この海洋の温度測定に用いられる代表的な温度センサが図7に示した Sea-Bird Electronics 社製 SBE35 である。これは金属製の保護管(直径約7mm、長さ約465mm)の先端にサーミスタが封入されており、またヘッド部内の電気回路においてサーミスタの抵抗値の測定及び温度値への換算を行っている。SBE35はサーミスタの特性

である温度係数の高さを生かし、非常に高分解能での測定を実現しており、製造メーカーのスペックによれば-5℃から35℃の温度域で±1 mKの不確かさでの測定が可能としている⁶²⁾。この性能を生かし、その他の海洋温度計測用の温度計の校正にも使われている。

2012年に山澤らは、SBE35の校正不確かさの評価結果を報告している。この報告では2台のSBE35を水の三重点(0.01℃)、及びガリウムの融点(29.7646℃)を用いて定点校正を行い、さらに標準用白金抵抗温度計と1℃から30℃の間で比較校正を行い、不確かさを推定している。その結果、水の三重点における校正の不確かさは0.16 mK ($k=2$)、ガリウムの融点では0.33 mK ($k=2$)となった。比較校正では2本のSBE35の一方で、僅か(0.6 mK程度)ではあるが、ヒステリシスが存在していることがわかり、それらを考慮した結果20℃において0.32 mK ($k=2$)程度の不確かさで校正が可能であることを確認している⁶³⁾。

一方で2.2.1にて記述したように、SBE35で使われているサーミスタは、一般的には長期的な安定性に課題があるとされている。そのためSBE35についても継続的に校正を行うことで、安定性を調べる必要がある。

3.2 断層帯の温度計測

日本は頻繁に地震が発生する国であり、地震の全体像を把握することは、防災・減災といった観点から極めて重要な意味がある。一般に地震は、活断層が地圧によってずれ動くことで発生する。この際、ずれ動いた断層面で摩擦熱が発生し、断層近傍では温度が上昇することが予想される。この摩擦熱を、断層近傍の温度分布から推定することで、地質や断層に加わる応力等、地震の規模や周期の推定に必要な特性を明らかにしようとする研究が行われている。

2006年にY. Kanoらが発表した論文では、1999年台

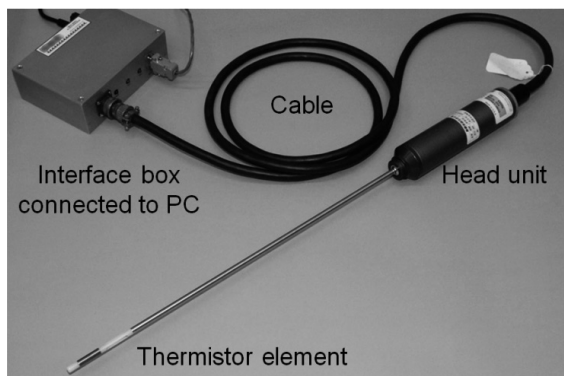


図7 SBE35の外形

湾集地震(921大地震)の原因となった断層について、別の計画で掘削された断層帯を貫通する孔の温度分布を測定している。分解能3 mKの水晶温度計を使用し、適宜孔内での位置を変化させることで温度分布を測定した結果、地下水位や地圧等による影響を補正した上で、断層帯付近にて60 mKの温度上昇が見られたと報告している^{64), 65)}。

また2012年4月に行われた統合国際深海掘削計画(IODP)第343/343T次研究航海では、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の原因となった、日本海溝内の断層帯(プレート境界)を貫通するボーリング調査を行うと共に、掘削した孔内に、精度±1 mKのサーミスタ温度計を55台収めた装置を設置することで断層帯の前後の温度分布を測定している。9ヶ月間測定した結果、深さ6900 mの海底から、さらに820 m下に存在する断層帯付近にて、温度が周囲よりも0.31℃ほど高いという結果が得られている⁶⁶⁾⁻⁶⁸⁾。

他には2010年のIODP第332次研究航海において、紀伊半島沖の南海トラフと呼ばれる、大地震の発生が危惧されている海域に、図8に示すような、温度計を含む様々なセンサを搭載した長期孔内計測システムが設置されており、地震の兆候の観測に用いられている。

このように断層帯の温度計測は地震という自然現象を詳細に理解するため高精度な測定が求められている。この測定では、地表から深くなるほど増加する地熱中から、摩擦熱に由来する微小な温度差を捉えなくてはならないという特徴がある。また深海の海底に設置するた

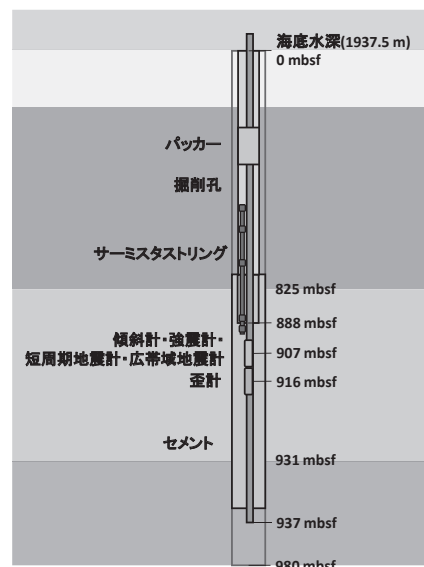


図8 長期構内計測システムの概要：mbsf (metres below seafloor) は海底からの深さ⁶⁹⁾

め、長期間にわたり校正ができない状態で高精度な測定を行う必要がある。このため温度計自体に長期的な安定性が求められる。

4. まとめ

本調査研究では産業現場や学術研究の場において広く使われている二次温度計に関する研究について紹介した。

2.1 の標準用温度計を目指す新たな二次温度計では、標準用白金抵抗温度計の課題を解決し、更なる高精度化を目指す先進的な温度計について紹介した。これらの温度計は実用化の可否も含め研究途上であるため、継続的に研究の動向を見守る必要がある。

また 2.2 の産業現場や学術研究の場で使われる二次温度計では、すでに社会の広い分野で使われているながらも、温度標準の分野ではあまり研究されてこなかった温度計であるサーミスタや水晶温度計について紹介した。

そして第 3 節ではサーミスタや水晶温度計の能力を、限界まで活用している事例を紹介した。測定がすでに行われており、今後これらの温度計について積極的に研究・評価を推進していく必要がある。

温度標準の分野において、ITS-90 に関連した SPRT や定義定點自体の研究項目は既に限られつつある。そこで次に必要となるのが比較測定技術の研究と改善である。ITS-90 に基づき校正された SPRT は、その指示値が温度の参照値となるが、この参照値と SPRT 以外の温度計を比較測定によって評価し、測定量と関連付けることで、SPRT 以外の温度計を用いた温度測定が可能となる。

今後、多様な環境下における温度を高精度に測定するという要望に対応するためには、比較測定技術の研究が必要となると考えられる。

5. 謝辞

本調査研究を行うにあたり、丹波 純 温度湿度科長、山澤 一彰 高温標準研究室長、及び高温標準研究室の皆様には様々な助言を頂きました。この場を借りて、感謝を述べさせていただきます。

参考文献

- 1) Preston-Thomas H.:The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* 27-1 (1990) 3-10.
- 2) 計量研究所：1990 年国際温度目盛 (ITS-90) , 計量

研究所報告 40-4 (1991) p308-17.

- 3) 三澤哲郎：音響式気体温度計による熱力学温度測定に関する調査研究, 産総研計量標準報告 9-1 (2014) 75-98.
- 4) 三澤哲郎：音響気体温度計による熱力学温度測定に関する調査研究, 計測と制御 53-5 (2014) 444-51.
- 5) 山口祐：黒体放射による熱力学温度測定に関する調査研究, 産総研計量標準報告 8-4 (2013) 423-40.
- 6) Berry R. J.:Control of oxygen-activated cycling effects in platinum resistance thermometers, *Temperature Measurement (Institute of Physics,1975)* 99-106.
- 7) Berry R. J.: Study of multilayer surface oxidation of platinum by electrical resistance technique, *Surface Science* 76-2(1978) 415-42.
- 8) Berry R. J.:Effect of Pt Oxidation on Pt Resistance Thermometry, *Metrologia* 16-3(1980) 117-26.
- 9) Berry R. J.:Oxidation, stability, and insulation characteristics of Rosemount standard platinum resistance thermometers, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.5 (American Institute of Physics,1982)* 753-62.
- 10) Berry R. J.:Evaluation and control of platinum oxidation errors in standard platinum resistance thermometers, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.5 (American Institute of Physics,1982)* 743-52.
- 11) Ancsin J.:Oxidation of Platinum Resistance Thermometers, *Temperature: Its measurement and control in science and industry (AIP PRESS,2003)* 345-9.
- 12) Sakurai H., Yamaguchi T., Hiura N., Yoneshita K., Kimura H. and Tamura O.:Oxidization Characteristics of Some Standard Platinum Resistance Thermometers, *Japanese Journal of Applied Physics* 47-10(2008) 8071-6.
- 13) Strouse G. F.:Sapphire Whispering Gallery Thermometer, *International Journal of Thermophysics* 28-6(2007) 1812-21.
- 14) Yu L.:*Thermometry based on Whispering Gallery Mode resonators*, (Italy: Politecnico di Torino: 2012)
- 15) Yu L. and Fericola V. C.:Spherical-sapphire-based whispering gallery mode resonator thermometer., *The Review of scientific instruments* 83-9(2012) 094903.
- 16) Yu L. and Fericola V. C.:A temperature sensor based on a whispering gallery mode resonator, *Temperature: Its measurement and control in science and industry*

- vol.8 (AIP Publishing LLC,2013) 920-4.
- 17) White D. R., Ballico M., Chimenti V., Duris S., Filipe E., Ivanova A. G., Dogan A. K., Mendez-Lango E., Meyer C. W., Pavese F., Peruzzi A., Renaot E., Rudtsch S. and Yamazawa K.:Uncertainties in the Realisation of the SPRT Subranges of the ITS-90, CCT/08-19 (2009).
 - 18) Nemoto K., Kita T. and Yamada H.:Narrow-spectral-linewidth wavelength-tunable laser diode with si wire waveguide ring resonators, *Applied Physics Express* 5-8(2012) 83-6.
 - 19) Xu H., Hafezi M., Fan J., Taylor J. M., Strouse G. F. and Ahmed Z.:Ultra-sensitive chip-based photonic temperature sensor using ring resonator structures, *Optics Express* 22-3(2014) 3098.
 - 20) Kim G.-D., Lee H.-S., Park C.-H., Lee S.-S., Lim B. T., Bae H. K. and Lee W.-G.:Silicon photonic temperature sensor employing a ring resonator manufactured using a standard CMOS process, *Optics Express* 18-21(2010) 22215.
 - 21) 清水森人：医療用リニアックからの高エネルギー光子線の 水吸収線量標準に関する調査研究，産総研計量標準報告 8-4 (2013) 465-81.
 - 22) 櫻井弘久：水の三重点セルの静水圧補正係数の精密測定，計測自動制御学会論文集 38-7 (2002) 590-6.
 - 23) Wood S. D., Mangum B. W., Filliben J. J. and Tillett S. B.:An investigation of the stability of thermistors, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 83-3(1978) 247.
 - 24) Mangum B. W.:Stability of Thermistors, *Temperature Measurement* (China Academic Publishers,1986) 170.
 - 25) Steinhart J. S. and Hart S. R.:Calibration curves for thermistors, *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* 15-4(1968) 497-503.
 - 26) Hoge H. J.:Useful procedure in least squares, and tests of some equations for thermistors, *Review of Scientific Instruments* 59-6(1988) 975.
 - 27) Alexander M. D. and MacQuarrie K. T. B.:Toward a Standard Thermistor Calibration Method: Data Correction Spreadsheets, *Ground Water Monitoring and Remediation* 25-4 (2005) 75-81.
 - 28) Ilić D., Butorac J. and Ferković L.:Temperature measurements by means of NTC resistors and a two-parameter approximation curve, *Measurement* 41-3 (2008) 294-9.
 - 29) Chen C.:Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors, *Measurement* 42-7 (2009) 1103-11.
 - 30) Spassov L., Gadjanova V., Velcheva R. and Dulmet B.:Short- and long-term stability of resonant quartz temperature sensors., *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 55-7 (2008) 1626-31.
 - 31) Hammond D. L. and Benjaminson A.:The Linear Quartz Thermometer-a New Tool for Measuring Absolute and Difference Temperatures, *Hewlett-Packard Journal* 16-7 (1965) 1-7.
 - 32) Nakazawa M., Takemae T., Miyahara A. and Matsuyama K.:A Study of Quartz Temperature Sensors Characterized by Ultralinear Frequency-Temperature Responses, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics* 32-6 (1985) 828-34.
 - 33) Nakazawa M., Ballato A. and Lukaszek T.:An Ultralinear Stress-Compensated Temperature Sensor, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 34-2 (1987) 270-7.
 - 34) Spassov L., Yossifov E., Georgiev V. and Vergov L.:A rotated Y-cut quartz resonator with a linear temperature-frequency characteristic, *Sensors and Actuators A: Physical* 58-3 (1997) 185-9.
 - 35) Xu J., Li X., Duan J. and Xu H.:High-precision low-power quartz tuning fork temperature sensor with optimized resonance excitation, *Journal of Zhejiang University SCIENCE C* 14-4 (2013) 264-73.
 - 36) Sollazzo P. Y., Feist J. P., Berthier S., Charnley B., Wells J. and Heyes A. L.:Application of a production line phosphorescence sensor coating system on a jet engine for surface temperature detection, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.8* (AIP Publishing LLC,2013) 897-902.
 - 37) Wickersheim K. A. and Sun M. H.:Fiberoptic thermometry and its applications, *Journal of Microwave power and Electromagnetic energy* 22-2 (1987) 85.
 - 38) Fericola V. C. and Galleano R.:Optical fiber thermometry by laser-induced fluorescence, *Proceedings of TEMPMEKO* (Levrotto & Bella, 1996) 427.
 - 39) Allison S. W. and Gillies G. T.:Phosphor thermometry signal analysis and interpretation, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.8* (AIP Publishing LLC,2013) 863-6.
 - 40) Eldridge J. I. and Chambers M. D.:Temperature sens-

- ing above 1000°C using Cr-doped GdAlO [sub 3] spin-allowed broadband luminescence, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.8* (AIP Publishing LLC,2013) 873-8.
- 41) Fuhrmann N., Brübach J. and Dreizler A.:Phosphor thermometry at high repetition rates, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.8* (AIP Publishing LLC,2013) 867-72.
- 42) Heeg B. and Jenkins T. P.:Precision and accuracy of luminescence lifetime-based phosphor thermometry: A case study of Eu(III):YSZ, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.8* (AIP Publishing LLC,2013) 885-90.
- 43) Heyes A. L., Rabhiou A., Feist J. P. and Kempf A.:Thermal history sensing with thermographic phosphors, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.8* (AIP Publishing LLC,2013) 891-6.
- 44) Knappe C., Abou Nada F., Lindén J., Richter M. and Aldén M.:Response regime studies on standard detectors for decay time determination in phosphor thermometry, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.8* (AIP Publishing LLC,2013) 879-84.
- 45) 山田善郎, 山田健夫, 大角明, 板倉孝, 若井造, 山中善吉: 消耗型光ファイバ放射温度計による溶融金属测温, センシングフォーラム資料 13 (1996) 57-62.
- 46) 早坂祥和, 酒井敦, 櫻井雅昭: FIMPIT (消耗型光ファイバ温度計) を用いた高炉省エネの追求 (環境調和型鉄鋼技術小特集), NKK 技報-178 (2002) 32-6.
- 47) Patrick H. J., Williams G. M., Kersey A. D., Pedrazzani J. R. and Vengsarkar A. M.:Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination, *IEEE Photonics Technology Letters* 8-9(1996) 1223-5.
- 48) Rice T., Poland S., Childers B., Palmer M., Elster J., Fielder B., Maleski D. and Gunther M.:Fiber Optic Temperature Sensors—A New Temperature Measurement Toolbox, *Temperature: Its measurement and control in science and industry vol.7* (AIP PRESS,2003) 1015-20.
- 49) Jin L. and Kai G.:An embedded FBG sensor for simultaneous measurement of stress and temperature, *IEEE Photonics Technology Letters* 18-1(2006) 154-6.
- 50) Amemiya Y., Tanushi Y., Tokunaga T. and Yokoyama S.:Photoelastic Effect in Silicon Ring Resonators, *Japanese Journal of Applied Physics* 47-4(2008) 2910-4.
- 51) Zhang X. and Li X.:Design, fabrication and characterization of optical microring sensors on metal substrates, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18-1(2008) 015025.
- 52) Zhou L., Kashiwagi K., Okamoto K., Scott R. P., Fontaine N. K., Ding D., Akella V. and Yoo S. J. B.:Towards athermal optically-interconnected computing system using slotted silicon microring resonators and RF-photon comb generation, *Applied Physics A* 95-4(2009) 1101-9.
- 53) Jung J., Nam H., Lee B., Byun J. O. and Kim N. S.:Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with Controllable Sensitivity, *Applied Optics* 38-13(1999) 2752.
- 54) 武井文雄, 宇野和史, 笠嶋丈夫: 光ファイバによるリアルタイム超多点温度測定技術 (特集 我が国基礎・基盤研究の現状 - 富士通研究所), ITU ジャーナル 39-12 (2009) 22-5.
- 55) Kurashima T., Horiguchi T. and Tateda M.:Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers, *Optics Letters* 15-18(1990) 1038.
- 56) Hocker G. B.:Fiber-optic sensing of pressure and temperature., *Applied optics* 18-9(1979) 1445-8.
- 57) Iezzi V. L., Loranger S., Marois M. and Kashyap R.:High-sensitivity temperature sensing using higher-order Stokes stimulated Brillouin scattering in optical fiber., *Optics letters* 39-4(2014) 857-60.
- 58) Le Floch S. and Cambon P.:Study of Brillouin gain spectrum in standard single-mode optical fiber at low temperatures (1.4-370 K) and high hydrostatic pressures (1-250 bars), *Optics Communications* 219-1-6(2003) 395-410.
- 59) Yang R., Yu Y.-S., Xue Y., Chen C., Wang C., Zhu F., Zhang B., Chen Q.-D. and Sun H.-B.:A Highly Sensitive Temperature Sensor Based on a Liquid-Sealed S-Tapered Fiber, *IEEE Photonics Technology Letters* 25-9(2013) 829-32.
- 60) Hotate K.:Fiber Sensor Technology Today, *Japanese Journal of Applied Physics* 45-8B(2006) 6616-25.
- 61) Fukasawa M., Freeland H., Perkin R., Watanabe T., Uchida H. and Nishina A.:Bottom water warming in the North Pacific Ocean., *Nature* 427-6977(2004) 825-7.
- 62) Sea-Bird_Electronics:Measurement Accuracy at

- Triple Point of Water and Gallium Melt Point supports a Total Measurement Uncertainty of 0.0006 degrees C, (http://www.seabird.com/technical_references/TPW&GMPAccuracy.htm) Accessed: April 1, 2015
- 63) 山澤一彰, Widiatmo J. V., 丹波純, 内田裕, 河野健: 海洋温度センサの校正における不確かさの評価 (センシング技術の新たな展開と融合) - (温度計測), 第29回センシングフォーラム (2012) 215-20.
- 64) Kano Y., Mori J. J., Fujio R., Ito H., Yanagidani T., Nakao S. and Ma K.-F. F.: Heat signature on the Chelungpu fault associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Geophysical Research Letters* 33-14(2006) L14306.
- 65) Mori J. J., 加納靖之: 1999年台湾集集地震 (Mw = 7.6) と断層摩擦決定のための断層帯の温度計測, *自然災害科学* 28-2 (2009) 151-9.
- 66) Chester F. M., Mori J. J., Toczko S. and Eguchi N.: *IODP Expedition 343/343T Preliminary Report*, (2012)
- 67) 難波康広, 許正憲: 「ちきゅう」による東北地方太平洋沖地震源掘削で設置予定の孔内観測装置について, *日本船舶海洋工学会講演会論文集-14* (2012) 57-9.
- 68) Fulton P. M., Brodsky E. E., Kano Y., Mori J. J., Chester F., Ishikawa T., Harris R. N., Lin W., Eguchi N. and Toczko S.: Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements., *Science (New York, N.Y.)* 342-6163(2013) 1214-7.
- 69) 独立行政法人海洋研究開発機構: 長期孔内観測システム, (<http://www.jamstec.go.jp/donet/j/kounai/koumoku.html>) Accessed: April 1, 2015