(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第5382364号
(P5382364)
(45)発行日　平成26年1月8日(2014.1.8)　(24)登録日　平成25年10月11日(2013.10.11)

(51)Int.Cl.　F I
G01K 11/12 (2006.01)　G01K 11/12 F

請求項の数 4 (全 18 頁)

(21)出願番号　特願2010-196706 (P2010-196706)
(22)出願日　平成22年9月2日(2010.9.2)
(65)公開番号　特開2012-52952 (P2012-52952A)
(43)公開日　平成24年3月15日(2012.3.15)
審査請求日　平成25年2月6日(2013.2.6)

(73)特許権者　000006507
横河電機株式会社
東京都武蔵野市中町２丁目９番３２号
(72)発明者　阿川　久夫
東京都武蔵野市中町２丁目９番３２号　横河電機株式会社内

審査官　岡田　卓弥

(56)参考文献　特開平４－３１８４３２（ＪＰ，Ａ）
特開平１１－３３７４２０（ＪＰ，Ａ）

最終頁に続く

(54)【発明の名称】光ファイバ温度分布測定装置

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
光ファイバをセンサとして用い、ラマン後方散乱光を利用して前記光ファイバに沿った温度分布を測定するように構成された光ファイバ温度分布測定装置において、
前記センサとして用いる光ファイバの近傍に設けた基準温度測定手段と、
この基準温度測定手段の温度測定データをパラメータとする補正式を用いて測定温度を補正する基準温度利用温度補正手段と、
ラマン散乱スペクトラムの広がりによる温度計算誤差を補正するスペクトラム広がり分布補正手段と、
前記基準温度利用温度補正手段で補正された温度値に対し、前記スペクトラム広がり分布補正手段によりあらかじめ求めておいたスペクトラム分布の広がりによる補正値による補正を行う温度誤差補正手段、
を設けたことを特徴とする光ファイバ温度分布測定装置。
【請求項２】
前記温度補正手段の補正式は、パラメータとして、装置本体に設けられている温度基準部のラマンシフト周波数、前記センサとして用いる光ファイバのラマンシフト周波数および前記基準温度測定手段で測定した真の温度値を含むことを特徴とする請求項１記載の光ファイバ温度分布測定装置。
【請求項３】
前記センサとして用いる光ファイバのラマンシフト周波数を、前記基準温度測定手段で

測定した温度とその時点における温度計算値に基づき求めることを特徴とする請求項１または２記載の光ファイバ温度分布測定装置。

【請求項４】

前記温度補正手段は、前記基準温度測定手段の温度測定データをリアルタイムに取り込むことを特徴とする請求項１から３のいずれかに記載の光ファイバ温度分布測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、後方ラマン散乱光を利用した光ファイバ温度分布測定装置に関し、詳しくは、温度補正の改善に関する。

【背景技術】

【０００２】

光ファイバをセンサとして用いた分布型測定装置の一種に、光ファイバに沿った温度分布を測定するように構成された温度測定装置がある。この技術は光ファイバ内で発生する後方散乱光を利用している。

【０００３】

後方散乱光には、レイリー散乱光、ブリルアン散乱光、ラマン散乱光などがあるが、温度測定には温度依存性の高い後方ラマン散乱光が利用され、この後方ラマン散乱光を波長分波して測定を行う。後方ラマン散乱光には、入射光の波長に対して短い波長側に発生するアンチストークス光ＡＳと、長い波長側に発生するストークス光ＳＴがある。

【０００４】

光ファイバ温度分布測定装置は、これらアンチストークス光の強度Ｉasとストースク光の強度Ｉstとを測定してその強度比から温度を算出し、光ファイバに沿った温度分布を表示するものであり、プラント設備の温度管理、防災関連の調査・研究、発電所や大型建設物の空調関連などの分野で利用されている。

【０００５】

図７は、光ファイバ温度分布測定装置の基本構成例を示すブロック図である。図７において、光源１は光分波器２の入射端に接続され、光分波器２の入出射端には光ファイバ３が接続され、光分波器２の一方の出射端には光電変換器（以下Ｏ／Ｅ変換器という）４stが接続され、光分波器２の他方の出射端にはＯ／Ｅ変換器４asが接続されている。

【０００６】

Ｏ／Ｅ変換器４stの出力端子にはアンプ５stおよびＡ／Ｄ変換器６stを介して演算制御部７に接続され、Ｏ／Ｅ変換器４asの出力端子にはアンプ５asおよびＡ／Ｄ変換器６asを介して演算制御部７に接続されている。なお、演算制御部７は、パルス発生部８を介して光源１に接続されている。

【０００７】

光源１としてはたとえばレーザダイオードが用いられ、パルス発生部８を介して入力される演算制御部７からのタイミング信号に対応したパルス光を出射する。光分波器２は、その入射端に光源１から出射されたパルス光が入射され、その入出射端から出射されたパルス光を光ファイバ３に出射し、光ファイバ３内で発生した後方ラマン散乱光をその入出射端から入射してストークス光とアンチストークス光に波長分離する。光ファイバ３は、その入射端から光分波器２から出射されたパルス光を入射し、光ファイバ３内で発生した後方ラマン散乱光をその入射端から光分波器２に向けて出射する。

【０００８】

Ｏ／Ｅ変換器４stおよび４asとしてはたとえばフォトダイオードが用いられ、Ｏ／Ｅ変換器４stには光分波器２の一方の出射端から出射されたストークス光が入射され、Ｏ／Ｅ変換器４asには光分波器２の他方の出射端から出射されたアンチストークス光が入射されて、それぞれ入射光に対応する電気信号を出力する。

【０００９】

アンプ５stおよび５asは、Ｏ／Ｅ変換器４stおよび４asから出力された電気信号をそれ

ぞれ増幅する。Ａ／Ｄ変換器６stおよび６asは、アンプ５stおよび５asから出力された信号をそれぞれディジタル信号に変換する。

【００１０】

演算制御部７は、Ａ／Ｄ変換器６stおよび６asから出力されたディジタル信号に基づいて後方散乱光の２成分、すなわち、ストークス光とアンチストークス光の強度比から温度を演算し、その時系列に基づいて光ファイバ３に沿った温度分布を表示手段（図示せず）に表示する。なお、演算制御部７にはあらかじめ、強度比と温度の関係がテーブルや式の形で記憶されている。また、演算制御部７は、光源１にタイミング信号を送り、光源１から出射される光パルスのタイミングを制御する。

【００１１】

次に温度分布測定の原理を説明する。ストークス光およびアンチストークス光の信号強度を光源１における発光タイミングを基準にした時間の関数として表すと、光ファイバ３中の光速が既知であるので、光源１を基準にして光ファイバ３に沿った距離の関数に置き換えることができる。すなわち、横軸を距離とし、光ファイバの各距離地点で発生したストークス光およびアンチストークス光の強度、つまり距離分布とみなすことができる。

【００１２】

一方、アンチストークス光強度Ｉasとストークス光強度Ｉstはいずれも光ファイバ３の温度に依存し、さらに、両光の強度比Ｉas／Ｉstも光ファイバ３の温度に依存する。したがって、強度比Ｉas／Ｉstが分かればラマン散乱光が発生した箇所の温度を知ることができる。ここで、強度比Ｉas／Ｉstは距離ｘの関数Ｉas（ｘ）／Ｉst（ｘ）であるから、この強度比Ｉas（ｘ）／Ｉst（ｘ）から光ファイバ３に沿った温度分布Ｔ（ｘ）を求めることができる。

【００１３】

図８は従来の光ファイバ温度分布測定装置の一例を示すブロック図であり、図７と共通する部分には同一の符号を付けている。

【００１４】

図８において、光分波器２と光ファイバ３との間には数十ｍ巻回された光ファイバよりなる温度基準部９がコネクタ接続部１３を介して設けられていて、この温度基準部９には実際の温度を測定するためのたとえば白金測温抵抗体よりなる温度計１０が設けられている。この温度計１０の出力信号は、演算制御部７に入力されている。なお、温度センサとして用いる光ファイバ３の近傍にも、実際の温度を測定するためのたとえば白金測温抵抗体よりなる基準温度計１１が設けられている。

【００１５】

このような構成において、光ファイバ３の温度がＴ（Ｋ）の時、アンチストークス光（ＡＳ）とストークス光（ＳＴ）との強度比は、（１）式で求められる。

【００１６】

$$\frac{I_{as}}{I_{st}} = G_{as} \times \left(\frac{\omega_0+\omega_r}{\omega_0-\omega_r}\right)^4 \times \exp\left(-\frac{h\,\omega_r}{2\pi\,kT}\right) \qquad (1)$$

【００１７】

G_{as}　:アンチストークス(AS)とストークス(ST)系の利得の比

ω_0　:光信号の周波数

ω_r　:ラマンシフト周波数

h　:プランク定数（6.626×10^{-34} Js）

k　:ボルツマン定数（1.38×10^{-23} JK^{-1}）

ここで、

【００１８】

$$L_n = G_{as} \times \left(\frac{\omega_0+\omega_r}{\omega_0-\omega_r}\right)^4 \qquad (2)$$

【００１９】
とした場合、実際のシステムではL_nは未知であるが、この値は、温度基準部９に設けられている温度計１０の温度データから求めることができる。
【００２０】
　温度基準部９に設けられている温度計１０の温度をT_0、その時の強度比Ias/Istを$G_0(T_0)$とすると、式（１）、（２）から、
【００２１】
$$L_n = G_0(T_0) \times \exp\left(\frac{h\,\omega_r}{2\pi\,kT_0}\right) \qquad (3)$$
【００２２】
となる。
　この値を使い、ＡＳとＳＴの光強度比（Ias/Ist）から温度Ｔを求める式は、式（１）、（３）から、
【００２３】
$$T = \frac{h\,\omega_r}{2\pi\,k} \times \frac{1}{-\log\left(\frac{Ias}{Ist}\right) + \log(L_n)} = \frac{h\,\omega_r}{2\pi\,k} \times \frac{1}{-\log\left(\frac{Ias}{Ist}\right) + \log(G_0(T_0)) + \frac{h\,\omega_r}{2\pi\,kT_0}} \qquad (4)$$
【００２４】
となる。
　この式（４）は、ラマン散乱のスペクトラムが線スペクトラムであることを前提としている。ところが、実際のシステムにおけるラマン散乱は、たとえば図９に示すように広いスペクトラムを持っているため、線スペクトラムを前提とした（４）式で求めた温度には誤差が含まれている。
【００２５】
　そこで、図９に示すようなラマン散乱のスペクトラムの広がりによる温度誤差を少なくするため、特許文献１では複数のラマンシフト周波数を用いて温度を計算し、その平均値を使うことが提案されている。
【先行技術文献】
【特許文献】
【００２６】
【特許文献１】特開平１１−３３７４２０号公報
【発明の開示】
【発明が解決しようとする課題】
【００２７】
　しかし、ラマン散乱強度と温度との関係は非線形であるため、特許文献１に記載されているように複数のラマンシフト周波数で計算した温度の平均を求める方法でも、ラマン散乱のスペクトラムの広がりによる温度誤差を小さくするのには十分ではなかった。
【００２８】
　本発明はこのような課題を解決するもので、その目的は、ラマン散乱のスペクトラムの広がりに起因する温度誤差を小さくできる光ファイバ温度分布測定装置を提供することにある。
【課題を解決するための手段】
【００２９】
　このような課題を達成するために、本発明のうち請求項１記載の発明は、
　光ファイバをセンサとして用い、ラマン後方散乱光を利用して前記光ファイバに沿った温度分布を測定するように構成された光ファイバ温度分布測定装置において、
　前記センサとして用いる光ファイバの近傍に設けた基準温度測定手段と、
　この基準温度測定手段の温度測定データをパラメータとする補正式を用いて測定温度を

補正する基準温度利用温度補正手段と、
ラマン散乱スペクトラムの広がりによる温度計算誤差を補正するスペクトラム広がり分布補正手段と、
前記基準温度利用温度補正手段で補正された温度値に対し、前記スペクトラム広がり分布補正手段によりあらかじめ求めておいたスペクトラム分布の広がりによる補正値による補正を行う温度誤差補正手段、
を設けたことを特徴とする。
【００３０】
請求項２記載の発明は、
請求項１記載の光ファイバ温度分布測定装置において、
前記温度補正手段の補正式は、パラメータとして、装置本体に設けられている温度基準部のラマンシフト周波数、前記センサとして用いる光ファイバのラマンシフト周波数および前記基準温度測定手段で測定した真の温度値を含むことを特徴とする。
【００３１】
請求項３記載の発明は、
請求項１または２記載の光ファイバ温度分布測定装置において、
前記センサとして用いる光ファイバのラマンシフト周波数を、前記基準温度測定手段で測定した温度とその時点における温度計算値に基づき求めることを特徴とする。
【００３２】
請求項４記載の発明は、
請求項１から３のいずれかに記載の光ファイバ温度分布測定装置において、
前記温度補正手段は、前記基準温度測定手段の温度測定データをリアルタイムに取り込むことを特徴とする。
【発明の効果】
【００３３】
これらにより、温度校正処理を簡略化するとともに、ラマン散乱のスペクトラムの広がりに起因する温度誤差を小さくできて、高精度の温度補正が行える。
【図面の簡単な説明】
【００３４】
【図１】本発明の一実施例を示すブロック図である。
【図２】２５℃と３００℃で温度校正を行った場合の誤差補正値例図である。
【図３】２５℃と１００℃で温度校正を行った場合の誤差補正値例図である。
【図４】ラマンスペクトラムの広がりによる誤差の補正例図である。
【図５】図１における演算制御部７と基準温度利用温度補正部１２２の具体例を示すブロック図である。
【図６】本発明の補正式による温度補正の効果例を示す説明図である。
【図７】光ファイバ温度分布測定装置の基本構成例を示すブロック図である。
【図８】従来の光ファイバ温度分布測定装置の一例を示すブロック図である。
【図９】ラマン散乱のスペクトラム例図である。
【発明を実施するための最良の形態】
【００３５】
以下、本発明の実施の形態について、図面を用いて詳細に説明する。図１は本発明の一実施例を示すブロック図であり、図８と共通する部分には同一の記号を付して重複する説明は省略する。図１と図８の相違点は、図１では演算制御部７に温度補正部１２が接続されていることである。
【００３６】
温度補正部１２は、スペクトラム広がり分布補正部１２１と、基準温度利用温度補正部１２２と、温度誤差補正部１２３とで構成されている。
【００３７】
スペクトラム広がり分布補正部１２１は、スペクトラム分布の広がりによる誤差補正値

を以下のようにして求める。

【００３８】

まず、ラマンスペクトラムの広がりがあるストークス光ＳＴを受光素子で受信したときの強度ＳＴＰ（Ｔ）を式（５）に基づいて計算する。

【００３９】

$$STP(T)=\int_{\omega 1}^{\omega 2} ST(\omega)\times\left\{1+\frac{1}{\exp\left(\frac{h\times\omega}{2\pi kT}\right)-1}\right\}d\omega \qquad (5)$$

【００４０】

また、ラマンスペクトラムの広がりがあるアンチストークス光ＡＳを受光素子で受信したときの強度ＡＳＰ（Ｔ）を式（６）に基づいて計算する。

【００４１】

$$ASP(T)=\int_{\omega 3}^{\omega 4} AS(\omega)\times\left(\frac{\omega 0+\omega}{\omega 0-\omega}\right)^{4}\times\left\{\frac{1}{\exp\left(\frac{h\times\omega}{2\pi kT}\right)-1}\right\}d\omega \qquad (6)$$

【００４２】

ＳＴ（ω）　：ストークス光ＳＴのスペクトラム特性
ＡＳＰ（ω）：アンチストークス光ＡＳのスペクトラム特性
ω０　：光信号の中心周波数
ω　：ラマンシフト周波数
ω１，ω２：ストークス光ラマンシフト周波数の下限，上限
ω３，ω４：アンチストークス光ラマンシフト周波数の下限，上限
ｈ　：プランク定数（6.626×10^{-34} Js）
ｋ　：ボルツマン定数（1.38×10^{-23} JK^{-1}）

【００４３】

これらストークス光強度とアンチストークス強度の強度比を式（７）により各温度毎に計算する。

Ｇ（Ｔ）＝ＡＳＰ（Ｔ）/ＳＴＰ（Ｔ）　（７）

【００４４】

温度校正点としてＴ１(ｋ),Ｔ２(ｋ)が選択された場合のその２点の強度比のデータから、温度計算に用いるラマンシフト周波数を式（８）により求める。なお式（８）は、式（１）を展開することにより求められる。

【００４５】

$$\omega r=\log\left(\frac{G(T1)}{G(T2)}\right)\times\frac{1}{\frac{-h}{2\pi k}\left(\frac{1}{T1}-\frac{1}{T2}\right)} \qquad (8)$$

【００４６】

上記で求めたラマンシフト周波数と、式（７）で得られたストークス/アンチストークス強度比を使い、式（９）を使って温度値を計算する。式（９）はラマンスペクトラムが線スペクトラムであることを前提にしている式（３）が元になっている。

【００４７】

$$Tr(T)=\frac{h\omega r}{2\pi k}\times\frac{1}{\left[-\log\{G(T)\}+\log\{G(T1)\}+\frac{h\omega r}{2\pi kT1}\right]} \qquad (9)$$

【００４８】
Ｔｒ（Ｔ）は実際の温度がＴのときにラマン散乱スペクトラムが線スペクトラムであると仮定したときの温度計算値となり、ラマン散乱スペクトラム分布を考慮しないことによる温度計算誤差は、
ΔＴ（Ｔ）＝Ｔｒ（Ｔ）－Ｔ
となる。これが温度Ｔのときの誤差補正値となる。
【００４９】
図２は２５℃と３００℃で温度校正を行った場合の誤差補正値例図、図３は２５℃と１００℃で温度校正を行った場合の誤差補正値例図である。広い温度範囲での測定を考えた場合、２点の温度校正点の差が小さいと誤差補正値は大きくなる。そこで、従来の構成では、このような影響を少なくするために、可能な限り２点の温度差を大きくして温度校正を行う必要があった。
【００５０】
図４は、ラマンスペクトラムの広がりによる誤差の補正例図である。図４の例では温度校正を２５℃と１００℃で行っている。ラマンスペクトラムの広がりによる誤差を補正する前は、温度校正点の外側である２００℃付近で約１℃の温度誤差が出ていたが、補正により２００℃付近の温度誤差は約０．２℃と小さくなっている。
これは、本来は温度測定誤差を小さくするために温度校正をできるだけ広い温度幅（たとえば２５℃と２００℃）で行う必要があったが、ラマンスペクトラムの広がりによる誤差の補正を行うことで、より温度校正が実施しやすい狭い温度幅（たとえば２５℃と１００℃）での温度校正でも高精度の温度測定ができることを示している。
【００５１】
基準温度利用温度補正部１２２は、温度センサとして用いる光ファイバ３の近傍に設けられた基準温度計１１の温度測定データと以下に説明する補正式を用いて装置本体の演算制御部７で演算される温度値に対する補正を行い、高精度の温度測定結果を出力する。なお、図１の基準温度計１１と基準温度利用温度補正部１２２を接続している破線は、オフラインで基準温度計１１の温度測定データを基準温度利用温度補正部１２２に取り込むことを表している。
【００５２】
基準温度利用温度補正部１２２による温度補正は、以下の手順で行う。
まず、従来と同様に、アンチストークス光ＡＳとストークス光ＳＴの強度比と装置本体に内蔵された温度基準部９に設けられている温度計１０の測定データを用い、式（４）に基づき温度値Ｔを求める。
【００５３】
次に、式（４）により求めた温度値Ｔに対し、以下の補正式を用いて補正を行う。
【００５４】
$$T_r = \omega_1 \frac{1}{\left(\dfrac{\omega_r}{T} - \dfrac{\omega_r}{T_1'} + \dfrac{\omega_1}{T_1}\right)} \qquad (10)$$
【００５５】
ここで、ω_1は温度センサとして用いる光ファイバ３のラマンシフト周波数に相当し、式（１１）で演算される値を用いる。
【００５６】
$$\omega_1 = \omega_r \times \frac{T_2' - T_1'}{T_1' \times T_2'} \times \frac{T_2 \times T_1}{T_2 - T_1} \qquad (11)$$
【００５７】
ω_1　：真のラマンシフト周波数
ω_r　：温度基準部９のラマンシフト周波数

Ｔ　　　　　：補正前の装置で計算した温度(K)
T_1，T_2　　：基準温度計１１で測定した基準温度値（K)
T_1'，T_2'：基準温度がT_1，T_2の時の補正前の測定温度値(K)

【００５８】
上記式（１１）は２点温度校正時に用いる式であるが、温度センサとして用いる光ファイバ３のラマンシフト周波数ω_1があらかじめ分かっている場合は、（１１）式によるω_1の計算は不要となり、T_1およびT_1'のみを使用した１点温度での校正が可能となる。

【００５９】
式（１０）を使って補正することで、シフト周波数の微調整や、係数、オフセットによる調整が不要となり、パラメータの追い込みも不要で、校正が短時間で行える。また校正による誤差も少なくなる。以下に、式（１０）に基づく補正について説明する。

【００６０】
（１）式から、温度基準部９が内蔵されている装置本体から出力されるアンチストークス光（ＡＳ）とストークス光（ＳＴ）との強度比は、以下の式で表せる。

【００６１】
$$\frac{Ias}{Ist}=G_r(T_0)=L_r\times\exp\left(\frac{-h\omega_r}{2\pi kT_0}\right)\times G_{as}\qquad(12)$$

【００６２】
ここで、
$Gr(T_0)$：温度基準部９の温度T_0の時に温度基準部から出力されるAS/ST光の強度比
G_{as}　　：ASとST系の利得比
ω_0　　：光信号の周波数
ω_r　　：温度基準部９のラマンシフト周波数
であり、L_rは式（１３）で表される。

【００６３】
$$L_r=\left(\frac{\omega_0+\omega_r}{\omega_0-\omega_r}\right)^4\qquad(13)$$

【００６４】
一方、演算制御部７でＡＳ、ＳＴの光強度比{(Ias/Ist)＝Ｇ}から温度Ｔを計算するのにあたっては、（１４）式で計算される。

【００６５】
$$T=\frac{h\omega_d}{2\pi k}\times\frac{1}{-\log(G)+\log(G_0(T_0))+\dfrac{h\omega_d}{2\pi kT_0}}\qquad(14)$$

【００６６】
ここで、ω_dは演算制御部７で温度計算パラメータとして使用したラマンシフト周波数である。

【００６７】
温度センサとして用いる光ファイバ３の温度がT_rの時の光強度比{(Ias/Ist)＝$G_1(T_r)$}は（１５）式のようになる。

【００６８】
$$G_1(T_r)=L_1\times\exp\left(\frac{-h\omega_1}{2\pi kT_r}\right)\times G_{as}\times\triangle G_c\qquad(15)$$

【００６９】
ここで、（１５）式におけるＬ１は（１６）式で表される。

【００７０】

$$L_1 = \left(\frac{\omega_0+\omega_1}{\omega_0-\omega_1}\right)^4 \qquad (16)$$

【００７１】

（１６）式において、

ω_1　：温度センサとして用いる光ファイバ３の真のラマンシフト周波数

ΔG_c　：装置本体と光ファイバ３を接続するコネクタのＡＳ光とＳＴ光との損失比

である。

【００７２】

（１４）、（１５）式より、光ファイバ３の温度がT_rの時に演算制御部７で計算される温度Ｔは、（１７）式のように表せる。

【００７３】

$$T = \frac{h\omega_d}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log\{G_1(T_r)\} + \log(G_r(T_0)) + \dfrac{h\omega_d}{2\pi k T_0}}$$

【００７４】

$$= \frac{h\omega_d}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log(L_1) - \log(G_{as}) - \log(\triangle G_c) + \dfrac{h\omega_1}{2\pi k T_r} + \log(L_r) + \log(G_{as}) - \dfrac{h\omega_r}{2\pi k T_0} + \dfrac{h\omega_d}{2\pi k T_0}}$$

【００７５】

$$= \frac{h\omega_d}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log(L_1) - \log(\triangle G_c) + \dfrac{h\omega_1}{2\pi k T_r} + \log(L_r) - \dfrac{h}{2\pi k T_0}(\omega_r - \omega_d)} \qquad (17)$$

【００７６】

（１７）式から、本体内部のシフト周波数（ω_r）と計算に用いるシフト周波数（ω_d）が等しい場合、右辺のT_0に関係する項は消えて、温度センサとして用いる光ファイバ３の温度計算値は本体の温度に依存しないことになる。従って、本体温度が変動した場合でも測定値が変動しないようにするには、温度計算に用いるシフト周波数として、本体温度基準部９に用いる光ファイバの真のシフト周波数の値を使う必要がある。

【００７７】

本体温度基準部９に用いる光ファイバのシフト周波数が既知で、温度計算に用いるシフト周波数と一致しているものとして、温度センサとして用いる光ファイバ３の温度校正について説明する。

【００７８】

（１７）式において、$\omega_d = \omega_r$とすると、温度測定値Ｔは以下のようになる。

【００７９】

$$T = \frac{h\omega_r}{2\pi k} \times \frac{1}{-\log(L_1) + \log(L_r) - \log(\triangle G_c) + \dfrac{h\omega_1}{2\pi k T_r}} \qquad (18)$$

【００８０】

光ファイバ３のラマンシフト周波数ω_1は、基準温度計１１により同じ場所で２点の基準温度T_1，T_2を測定して演算制御部７で演算した値T_1'，T_2'を用いることにより、（１１）式にしたがって補正演算できる。

【００８１】

最初の温度計算は、次式（１９）で行う。

【００８２】

$$T=\frac{h\,\omega_r}{2\pi\,k}\times\frac{1}{-\log(G_1(T_r))+\log\bigl(G_r(T_0)\bigr)+\dfrac{h\,\omega_r}{2\pi\,kT_0}} \qquad (19)$$

【００８３】

ここで

Ｔ$_{r}$　　：実際の温度（基準温度計１１で測定した温度）

Ｇ$_{1}$(Ｔ$_{r}$)：光ファイバ３（温度Ｔ$_{r}$）で測定したＡＳ／ＳＴ比

Ｇ$_{r}$(Ｔ$_{0}$)：温度基準部９（温度基準Ｔ$_{0}$）で測定した温度基準部９のＡＳ／ＳＴ比

ω$_{r}$　　：温度計算に使うラマンシフト周波数（＝温度基準部９のラマンシフト周波数）

【００８４】

（１９）式で計算される温度（Ｔ）を（１２）、（１５）式を使って分解すると、（２０）式のようになる。

【００８５】

$$T=\frac{h\,\omega_r}{2\pi\,k}\times\frac{1}{-\log(L_1)+\dfrac{h\,\omega_1}{2\pi\,kT_r}-\log(\triangle G_c)+\log(L_r)-\dfrac{h\,\omega_r}{2\pi\,kT_0}+\dfrac{h\,\omega_r}{2\pi\,kT_0}}$$

【００８６】

$$=\frac{h\,\omega_r}{2\pi\,k}\times\frac{1}{-\log(L_1)+\log(L_r)-\log(\triangle G_c)+\dfrac{h\,\omega_1}{2\pi\,kT_r}} \qquad (20)$$

【００８７】

（２０）式からＴとＴ$_{r}$の関係を逆に求めると（２１）式のようになる。

【００８８】

$$T_r=\frac{h\,\omega_1}{2\pi\,k}\times\frac{1}{\dfrac{h\,\omega_r}{2\pi\,kT}+\log(L_1)-\log(L_r)+\log(\triangle G_c)} \qquad (21)$$

【００８９】

（２１）式は、演算制御部７で計算された温度Ｔから真の温度Ｔ$_{r}$を導き出す式となる。ここで、Ｘ＝－log(Ｌ$_{1}$)＋log(Ｌ$_{r}$)－log(ΔＧ$_{c}$)とすると、Ｘは光ファイバ３の近傍に設けられた基準温度計１１の温度測定データから求めることができる。

【００９０】

光ファイバ３の実温度Ｔ$_{r}$とそのときに演算制御部７で計算された温度Ｔとの関係は、式（１８）を書き直すと（２０）式のようになる。

【００９１】

$$\mathrm{T}=\frac{h\,\omega_r}{2\pi\,k}\times\frac{1}{X+\dfrac{h\,\omega_1}{2\pi\,kT_r}} \qquad (22)$$

【００９２】

基準温度計１１で測定した基準温度Ｔ$_{1}$が既知で、そのときの温度計算値がＴ$_{1}$'であったとすると、Ｘは（２２）式から（２３）式のように求められる。

【００９３】

$$X=\frac{h\,\omega_r}{2\pi\,kT_1'}-\frac{h\,\omega_1}{2\pi\,kT_1} \qquad (23)$$

【００９４】
これら（２１）式と（２３）式を組み合わせることにより、（１０）式に示した温度校正の演算式を（２４）式に示すように導くことができる。
【００９５】

$$T_r = \frac{h\omega_1}{2\pi k} \times \frac{1}{\dfrac{h\omega_r}{2\pi kT} - X}$$

【００９６】

$$= \frac{h\omega_1}{2\pi k} \times \frac{1}{\dfrac{h\omega_r}{2\pi kT} - \dfrac{h\omega_r}{2\pi kT_1'} + \dfrac{h\omega_1}{2\pi kT_1}}$$

【００９７】

$$T_r = \omega_1 \frac{1}{\left(\dfrac{\omega_r}{T} - \dfrac{\omega_r}{T_1'} + \dfrac{\omega_1}{T_1}\right)} \qquad (24)$$

【００９８】
Ｔ：演算制御部７で計算した補正前の温度計算値(K)
T_1：基準温度計１１で測定した基準温度値(K)
T_1'：基準温度がT_1の時の補正前の測定温度値(K)
ω_1：光ファイバ３の真のラマンシフト周波数
ω_r：温度基準部９のラマンシフト周波数
【００９９】
このように温度校正の（２４）式を導く過程で、補正後の温度T_rの計算がＡＳ光、ＳＴ光の損失差ΔＧcに無関係なことが明らかである。これは、補正によって、装置本体と温度センサとして用いる光ファイバ３の接続部分における損失の影響も補正されていることを示している。
【０１００】
（２４）式は基本的に１点での温度校正の式であって、センサとして用いる光ファイバ３のラマンシフト周波数ω_1があらかじめ分かっている場合に適用できる。ラマンシフト周波数ω_1が分からない場合は、以下に説明するように、（１１）式を使い２点温度校正によりω_1を計算すればよい。
【０１０１】
（１）式から、（２５）式が得られる。
【０１０２】

$$\frac{h\omega_r}{2\pi kT} = -\log\left(\frac{I_{as}}{I_{st}}\right) + \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0+\omega_r}{\omega_0-\omega_r}\right)^4\right) \qquad (25)$$

【０１０３】
温度センサとして用いる光ファイバ３の真のラマンシフト周波数がω_1で、真の温度T_1の時に補正前の測定温度値としてT_1'と計算されたとすると次式が成り立つ。
【０１０４】

$$\frac{h\omega_r}{2\pi kT_1'} = -\log\left(\frac{I_{as}}{I_{st}}\right) + \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0+\omega_r}{\omega_0-\omega_r}\right)^4\right)$$

【０１０５】

$$= \frac{h\omega_1}{2\pi kT_1} - \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0+\omega_1}{\omega_0-\omega_1}\right)^4\right) + \log\left(G_{as} \times \left(\frac{\omega_0+\omega_r}{\omega_0-\omega_r}\right)^4\right) \qquad (26)$$

【０１０６】
また、温度センサとして用いる光ファイバ３の真のラマンシフト周波数がω_1で、真の温度T_2の時に補正前の測定温度値としてT_2'と計算されたとすると次式が成り立つ。
【０１０７】
$$\frac{h\,\omega_r}{2\pi\ kT_2'}=\frac{h\,\omega_1}{2\pi\ kT_2}-\log(\ G_{as}\times(\frac{\omega_0+\omega_1}{\omega_0-\omega_1})^4)+\log(\ G_{as}\times(\frac{\omega_0+\omega_r}{\omega_0-\omega_r})^4)\quad(27)$$

【０１０８】
（２６）式の両辺から（２７）式の両辺を差し引くと、（２８）式が得られる。
【０１０９】
$$\frac{h\omega_r}{2\pi k}(\frac{1}{T_1'}-\frac{1}{T_2'})=\frac{h\omega_1}{2\pi k}(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2})\qquad(28)$$
【０１１０】
この（２８）式から、２点温度校正時に用いる（１１）式と同様な（２９）式が得られる。
【０１１１】
$$\omega_1=\omega_r\times\frac{T_2'-T_1'}{T_1'\times T_2'}\times\frac{T_2\times T_1}{T_2-T_1}\qquad(29)$$
【０１１２】
ω_1 ：センサ部３の真のラマンシフト周波数
ω_r ：温度基準部９のラマンシフト周波数
Ｔ ：補正前の装置で計算した温度(K)
T_1，T_2 ：基準温度計１１で測定した基準温度値（K)
T_1'，T_2'：基準温度がT_1，T_2の時の補正前の装置で計算した温度(K)
【０１１３】
図５は、演算制御部７と基準温度利用温度補正部１２２の具体例を示すブロック図である。
【０１１４】
まず、演算制御部７は、式（４）で表される温度演算を行う温度演算部７ａを中心に、プランク定数ｈおよびボルツマン定数ｋを格納する定数格納部７ｂ、装置内部の基準温度部９のラマンシフト周波数ω_r を格納する内部基準温度部ラマンシフト周波数格納部７ｃ、装置内部の基準温度部９の温度測定値T_0を格納する内部基準温度格納部７ｄ、装置内部の基準温度部９における光強度比$G_0(T_0)$を演算する内部基準温度部光強度比演算部７ｅ、温度センサとして用いる光ファイバ３の光強度比Ias/Istを演算するセンサ光強度比演算部７ｆなどで構成されている。
【０１１５】
そして、基準温度利用温度補正部１２２は、式（１０）および式（２４）で表される温度補正演算を行う温度補正演算部１２２ａを中心に、演算制御部７の温度演算部７ａで演算された温度Ｔを格納する演算温度格納部１２２ｂ、装置内部の基準温度部９のラマンシフト周波数ω_r を格納する内部基準温度部ラマンシフト周波数格納部１２２ｃ、温度センサとして用いる光ファイバ３の近傍に設けられた基準温度計１１で測定した基準温度T_1，T_2を格納するセンサ基準温度格納部１２２ｄ、基準温度がT_1，T_2の時の補正前の測定温度値T_1'，T_2'を格納するセンサ基準温度部演算温度格納部１２２ｅ、温度センサとして用いる光ファイバ３のラマンシフト周波数ω_1を演算するセンサラマンシフト周波数演算部１２２ｆなどで構成されている。
【０１１６】
図６は、本発明の補正式による温度補正の効果例を示す説明図である。この例で使用した補正式のパラメータは、以下のとおりである。

補正前の温度計算に用いたラマンシフト周波数ω_r:72.4×10^{12} (rad/Hz)
実温度T_1,T_2： 295.85(K) (22.7(℃))、521.25(K) (248.1(℃))
温度補正前の温度計算値T_1',T_2'： 298.15(K) (25.0(℃)), 540.25 (267.1(℃))

【０１１７】
補正前の温度測定誤差は、実際の温度１００℃で約６℃、２５０℃で約１９℃と、大きくなっている。これは、装置本体と温度センサとして用いる光ファイバ３の接続損失による誤差および装置本体内部の温度基準部９に用いている光ファイバのラマンシフト周波数と温度センサとして用いる光ファイバ３のラマンシフト周波数との差によるものと考えられる。これに対し、本発明による補正式を用いた補正後の温度測定誤差は、実際の温度１００℃で－０．１℃以下になって２５０℃ではほぼ０℃と小さくなり、大幅に改善されている。

【０１１８】
なお、上記実施例では、温度センサとして用いる光ファイバ３の近傍に基準温度計１１を配置し、その温度測定データをオフラインで取得して演算制御部７の計算パラメータとして使用する方法を示したが、装置本体と温度センサとして用いる光ファイバ３との接続損失が変動してしまうような場合には、基準温度計１１のデータをリアルタイムに取り込み、温度補正式のパラメータをリアルタイムに変化させるようにしてもよい。

【０１１９】
温度誤差補正部１２３は、基準温度利用温度補正部１２２で補正された温度値に対し、スペクトラム広がり分布補正部１２１によりあらかじめ求めておいたスペクトラム分布の広がりによる補正値による補正を行う。具体的には、基準温度利用温度補正部１２２で補正された温度値から、スペクトラム広がり分布補正部１２１により求めたスペクトラム分布の広がりによる誤差補正値を差し引くことにより、補正を行う。

【０１２０】
このような構成によれば、基準温度利用温度補正部１２２において温度基準部の温度値をパラメータとした原理式から導かれた温度補正式による補正で温度が決定されるため、線形近似の場合に生じていた誤差は無くなり、校正作業は単純化されて短時間での校正が可能になるとともに、スペクトラム広がり分布補正部１２１で求められたラマンスペクトラム分布の広がりによる温度測定誤差補正値を用いて温度誤差補正部１２３で補正することにより、ラマンスペクトラム分布の広がりによる温度測定誤差を無くすことができ、高精度の温度分布測定結果を得ることができる。

【０１２１】
そして、正確な温度測定を行うのにあたり、従来はラマンスペクトラム広がりによる誤差の影響を少なくするため温度校正を行う２点の温度差をできるだけ大きく取る必要があったが、本発明ではラマンスペクトラム広がりによる誤差を補正するため温度校正を行う２点の温度差を小さくすることができる。

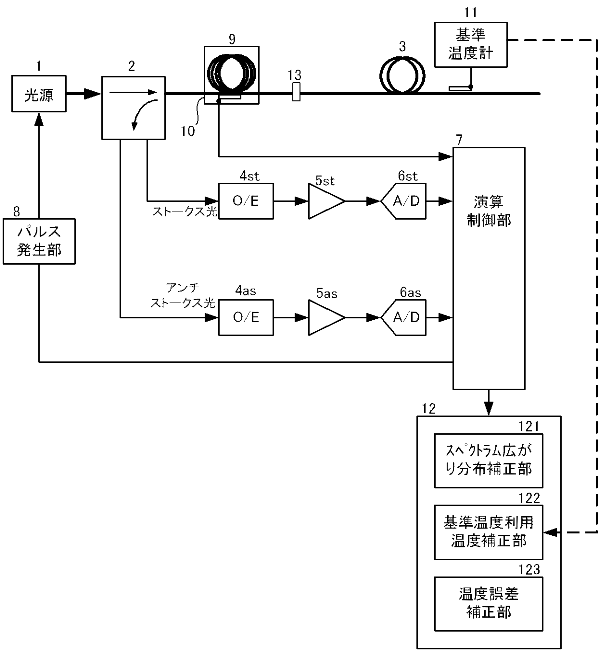
【０１２２】
以上説明したように、本発明は、光ファイバをセンサとして温度分布測定や故障検出などを行う光ファイバ温度分布測定装置の高精度化に好適である。

【符号の説明】

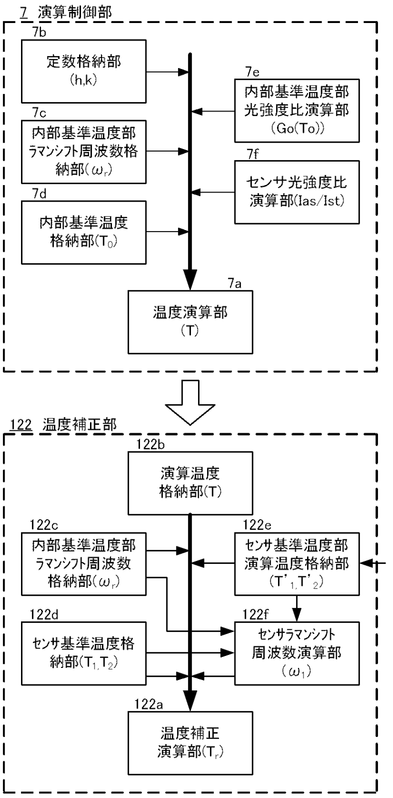
【０１２３】
１　光源
２　光分波器
３　光ファイバ
４st，４as　Ｏ／Ｅ変換器
６st，６as　Ａ／Ｄ変換器
７　演算制御部
　７ａ　温度演算部
　７ｂ　定数格納部
　７ｃ　内部基準温度部ラマンシフト周波数格納部

　　７ｄ　内部基準温度格納部
　　７ｅ　内部基準温度部光強度比演算部
　　７ｆ　センサ光強度比演算部
　８　パルス発生部
　９　温度基準部
１０　温度計
１１　基準温度計
１２　温度補正部
　１２１　スペクトラム広がり分布補正部
　１２２　基準温度利用温度補正部１
　　１２２ａ　温度補正演算部
　　１２２ｂ　演算温度格納部
　　１２２ｃ　内部基準温度部ラマンシフト周波数格納部
　　１２２ｄ　センサ基準温度格納部
　　１２２ｅ　センサ基準温度部演算温度格納部
　　１２２ｆ　センサラマンシフト周波数演算部
　１２３　温度誤差補正部
１３　コネクタ接続部

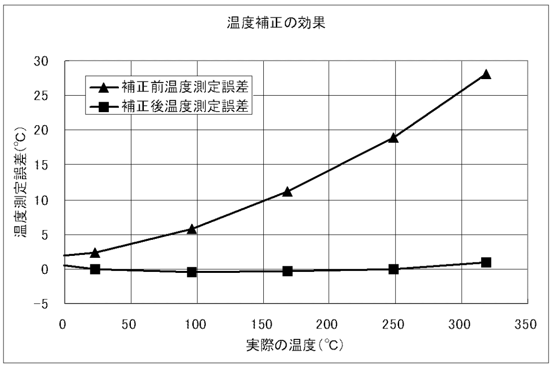
【図１】



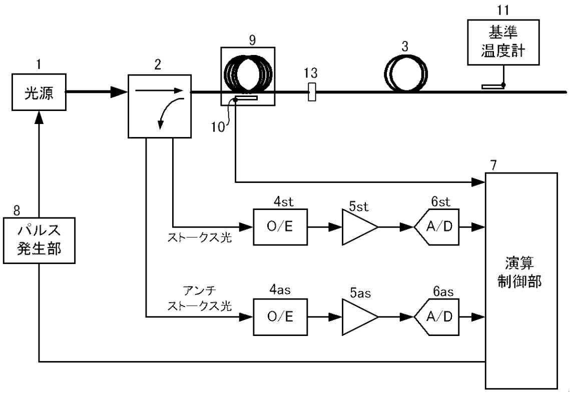
【図５】



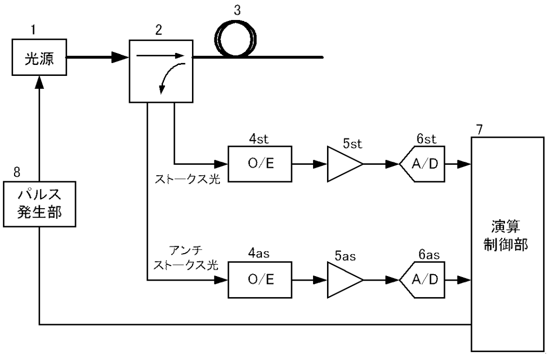
【図６】


温度補正の効果
補正前温度測定誤差
補正後温度測定誤差
温度測定誤差(℃)
実際の温度(℃)

【図８】


光源
基準
温度計
パルス
発生部
ストークス光
アンチ
ストークス光
O/E
A/D
演算
制御部

【図７】


光源
パルス
発生部
ストークス光
アンチ
ストークス光
O/E
A/D
演算
制御部

【図２】

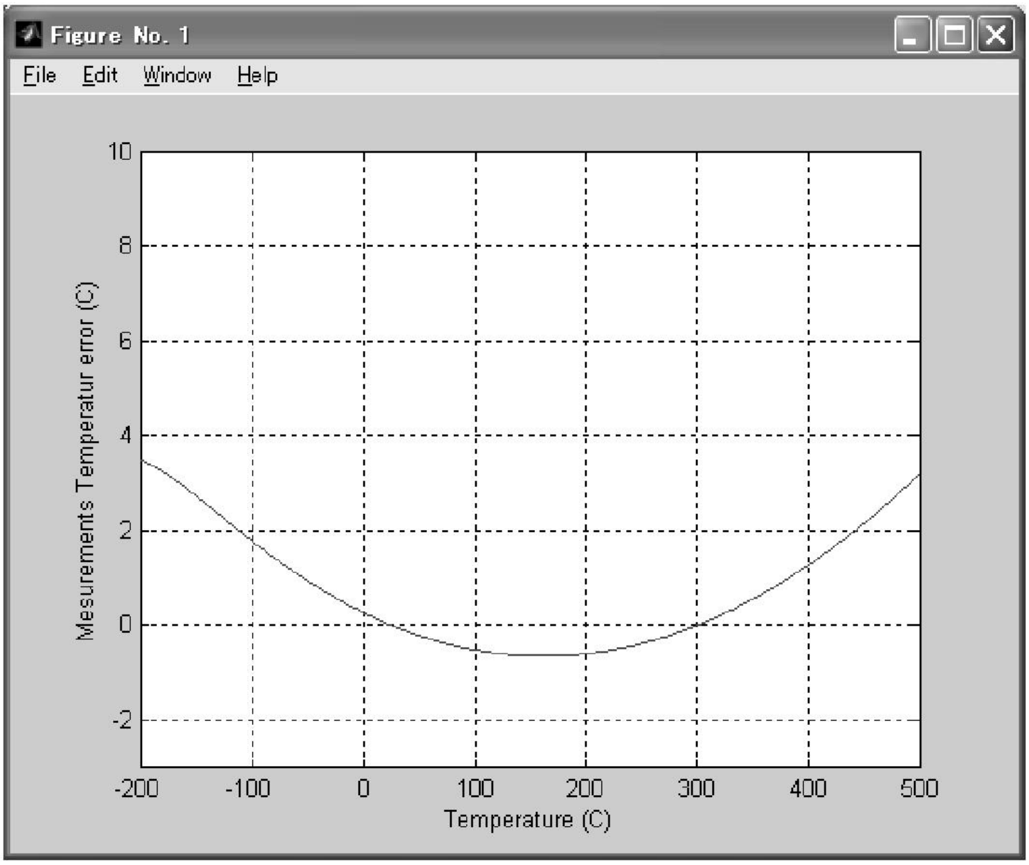


Figure No. 1
File Edit Window Help
Mesurements Temperatur error (C)
Temperature (C)

【図３】

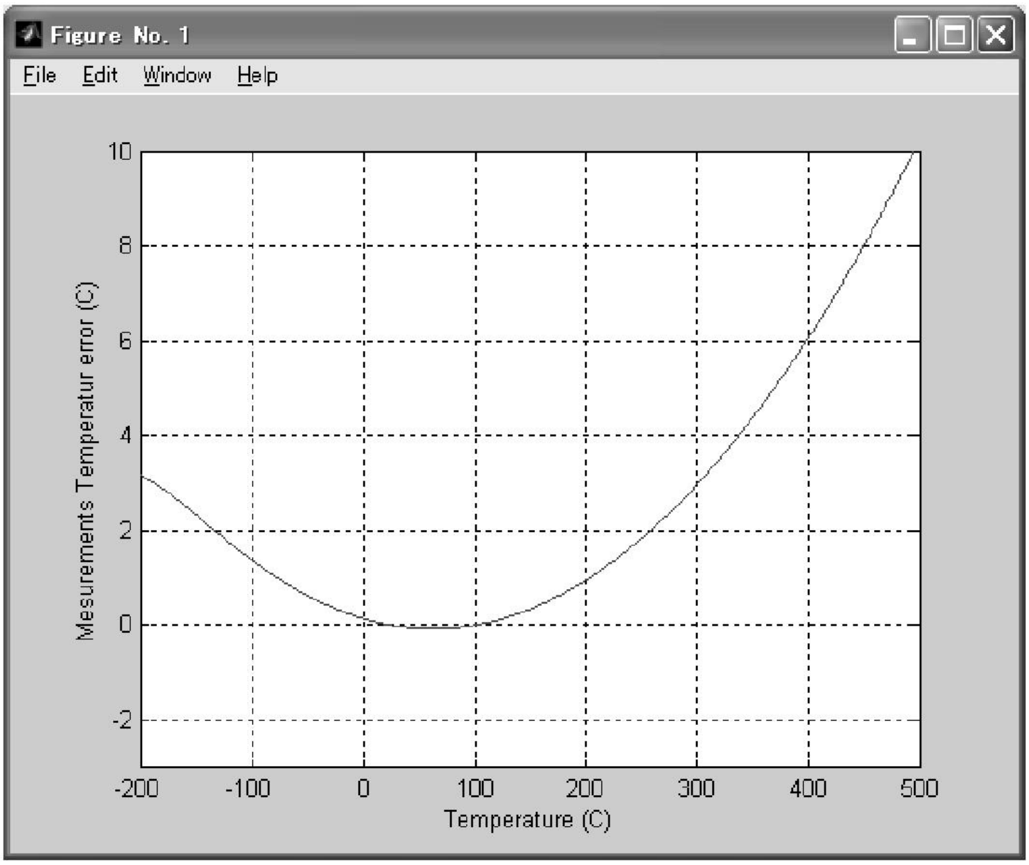
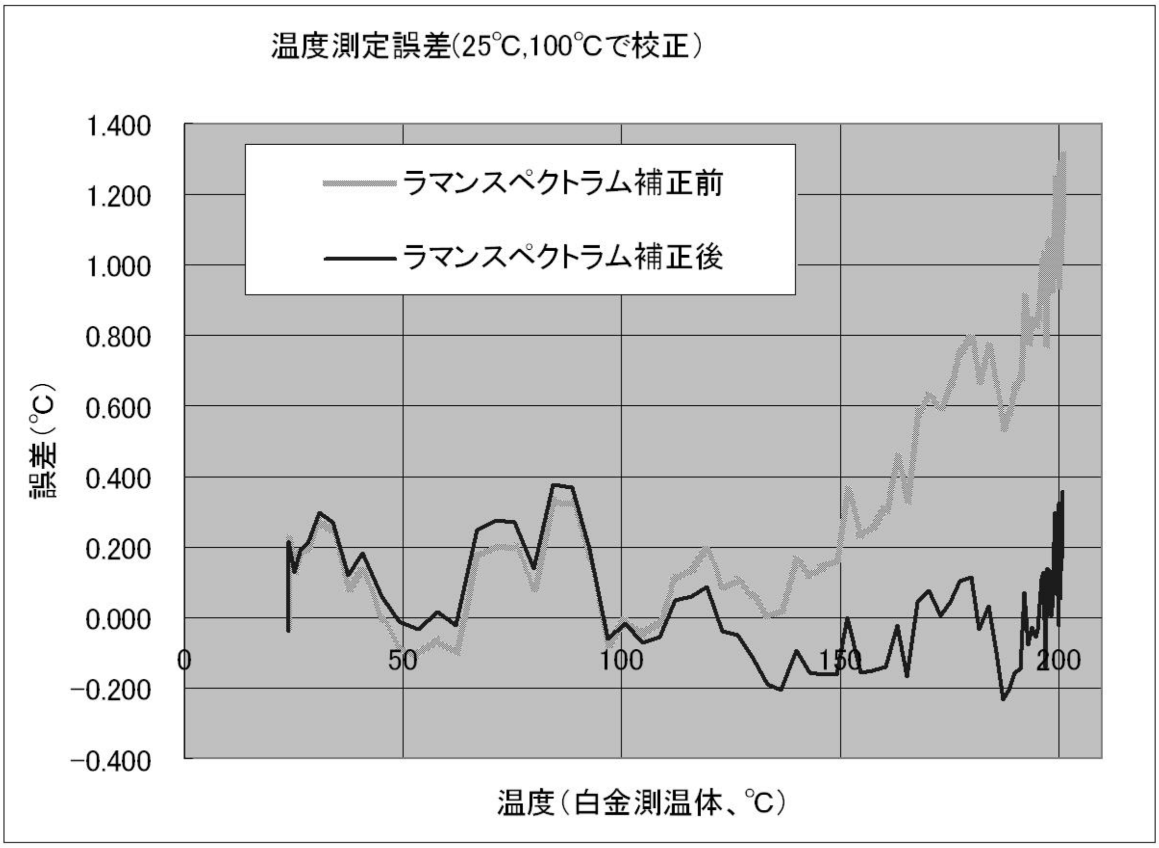
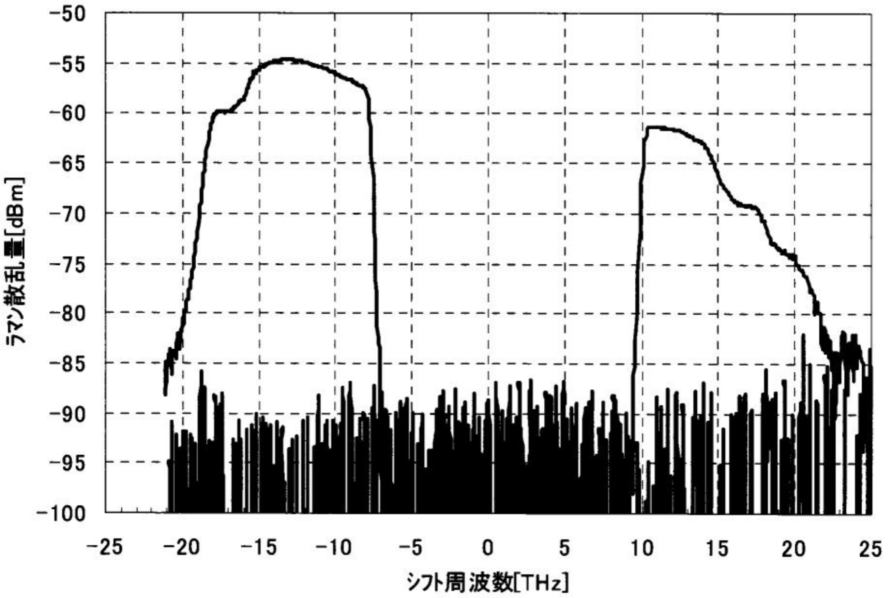


Figure No. 1
File Edit Window Help
10
8
6
4
2
0
-2
-200 -100 0 100 200 300 400 500
Temperature (C)
Mesurements Temperatur error (C)

【図４】


温度測定誤差(25℃,100℃で校正)
1.400
1.200
1.000
0.800
0.600
0.400
0.200
0.000
−0.200
−0.400
0 50 100 150 200
ラマンスペクトラム補正前
ラマンスペクトラム補正後
誤差(℃)
温度(白金測温体、℃)

【図９】


-50
-55
-60
-65
-70
-75
-80
-85
-90
-95
-100
ラマン散乱量[dBm]
-25
-20
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
25
シフト周波数[THz]

フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
　　　　　　　Ｇ０１Ｋ１１／１２
　　　　　　　Ｇ０１Ｄ　５／２６－　５／３８