

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2000-227366
(P2000-227366A)

(43) 公開日 平成12年8月15日 (2000.8.15)

(51) Int.Cl.⁷
G 0 1 K 17/00

識別記号

F I
G 0 1 K 17/00

テマコード* (参考)
A

審査請求 有 請求項の数 4 OL (全 7 頁)

(21) 出願番号 特願平11-29827
(22) 出願日 平成11年2月8日 (1999.2.8)

(71) 出願人 392030209
核融合科学研究所長
岐阜県土岐市下石町322の6
(72) 発明者 長壁 正樹
岐阜県土岐市土岐津町高山113-1 ラ・
リーブ・アンH号室
(74) 代理人 100058479
弁理士 鈴江 武彦 (外5名)

(54) 【発明の名称】 物体の熱負荷計測方法

(57) 【要約】

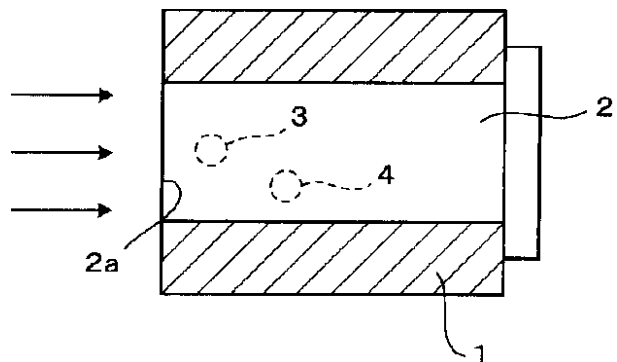
【課題】 高熱負荷環境のもとで所定の物体の熱負荷の経過時間での変化を連続して測定することの可能な方法を提供する。

【解決手段】 受熱面 2 a からの距離が x_a の点と距離が x_b の点との温度を夫々測定するように温度測定素子 3, 4 を有する計測チップ 2 を使用して被測定物の受熱面 2 a の熱負荷の時間変化を計測する方法である。これら測定素子により測定された温度 T_a , T_b を次式に代入して熱負荷 q_{in} を計測する。

【数 1】

$$q_{in} = -\kappa \frac{T_b - T_a}{x_b - x_a} + C_p \cdot \rho \left(\frac{x_a + x_b}{2} \right) \frac{\partial T_a}{\partial t}$$

ここで、 κ は被測定物の熱伝導率、 C_p は定圧熱容量、 ρ は被測定物の密度である。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 被測定物の受熱面の熱負荷の時間変化を計測する方法であり、受熱面からの距離が x_a の点と距離が x_b の点との温度を測定し、この測定された温度 T_a 、 T_b を次式に代入して熱負荷 q_{in} を計測することを特徴とする方法。

【数1】

$$q_{in} = -\kappa \frac{T_b - T_a}{x_b - x_a} + C_p \cdot \rho \left(\frac{x_a + x_b}{2} \right) \frac{\partial T_a}{\partial t}$$

$$q_{in} = -\kappa(b + 2 \cdot c \cdot x_{roi})$$

$$+ C_p \cdot \rho \left(x_{roi} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{1}{2} x_{roi}^2 \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{1}{3} x_{roi}^3 \frac{\partial c}{\partial t} \right)$$

ここで、 κ は被測定物の熱伝導率、 C_p は定圧熱容量、 ρ は被測定物の密度、 x_{roi} は、受熱面からの x_a と x_b との間の所定の距離であり、また、 a 、 b 、 c は、次式で規定される。

【数3】

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_a & x_a^2 \\ 1 & x_b & x_b^2 \\ 1 & x_c & x_c^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} T_a \\ T_b \\ T_c \end{pmatrix}$$

【請求項3】 被測定物の受熱面の熱負荷の時間変化を計測する方法であり、受熱面からの夫々異なる距離の点(x_1 、 x_2 、 x_3 ... x_n)の温度を測定し、この測定された温度 T_1 、 T_2 、 T_3 ... T_N を次式に代入して熱負荷 q_{in} を計測することを特徴とする方法。

【数4】

$$q_{in} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{roi}} + C_p \cdot \rho \cdot \overline{\partial T} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx$$

ここで、 κ は被測定物の熱伝導率、 C_p は定圧熱容量、 ρ は被測定物の密度、 x_{roi} は、受熱面からの x_a と x_b との間の所定の距離である。

【請求項4】 前記式の右辺の第1項並びに第2項に補正係数 a 、 b を夫々乗じることを特徴とする請求項3に記載の方法。ここで、 a 、 b は次式の残差平方和 M が最小になるように選ばれている。

【数5】

ここで、 κ は被測定物の熱伝導率、 C_p は定圧熱容量、 ρ は被測定物の密度である。

【請求項2】 被測定物の受熱面の熱負荷の時間変化を計測する方法であり、受熱面からの距離が x_a の点と、距離が x_b の点と、距離が x_c の点との温度を測定し、この測定された温度 T_a 、 T_b 、 T_c を次式に代入して熱負荷 q_{in} を計測することを特徴とする方法。

【数2】

$$M = \sum_{k=1}^{\ell} (Q_{in}^h - Q'_{in}^h)^2, \text{ 即ち, } \frac{\partial M}{\partial a} = 0, \frac{\partial M}{\partial b} = 0$$

ここで

$$Q_{in}^h = C_p \cdot \rho \cdot m \cdot \Delta T_h \quad (h = 1, \dots, \ell)$$

$$Q'_{in}^h = -\alpha \cdot \kappa \int_0^{t_{end}} \frac{\partial T^h}{\partial x} \Big|_{x=x_{roi}} dt$$

$$+ \beta \cdot C_p \cdot \rho \left[\int_0^{x_{roi}} T^h(x) dx \right]_0^{t_{end}}$$

($h = 1, \dots, \ell$)

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、所定の物体(固体、流体)の表面での熱負荷の時間変化を計測する方法に関する。

【0002】

【従来の技術】例えば、高熱にさらされた物体の表面の熱負荷を測定することは、種々の分野においてなされている。しかし、実際にある時点での熱負荷を測定するだけでは、汎用性に限界があった。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】従って、この熱負荷の経過時間での変化を連続して計測する技術が多くの分野で望まれているのにも係わらず、開発されていなかった。

【0004】

【0004】本発明は、上記状況のもとで、案出されたものであり、その目的は、高熱負荷環境のもとで所定の物体の熱負荷の経過時間での変化を連続して計測することの可能な方法を提供することである。

【0005】

【課題を解決するための手段】本発明の一態様は、被測定物の受熱面の熱負荷の時間変化を計測する方法であり、受熱面からの距離が x_a の点と距離が x_b の点との温度を測定し、この測定された温度 T_a 、 T_b を次式に代入して熱負荷 q_{in} を計測することを特徴とする方法。

【0006】

【数6】

$$q_{in} = -\kappa \frac{T_b - T_a}{x_b - x_a} + C_p \cdot \rho \left(\frac{x_a + x_b}{2} \right) \frac{\partial T_a}{\partial t}$$

【0007】ここで、 κ は被測定物の熱伝導率、 C_p は定圧熱容量、 ρ は被測定物の密度である。

【0008】本発明の他の態様は、被測定物の受熱面の熱負荷の時間変化を計測する方法であり、受熱面からの

$$q_{in} = -\kappa(b + 2 \cdot C \cdot x_{roi})$$

$$+ C_p \cdot \rho \left(x_{roi} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{1}{2} x_{roi}^2 \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{1}{3} x_{roi}^3 \frac{\partial c}{\partial t} \right)$$

【0010】ここで、 κ は被測定物の熱伝導率、 C_p は定圧熱容量、 ρ は被測定物の密度、 x_{roi} は、受熱面からの x_a と x_b との間の所定の距離であり、また、 a 、 b 、 c は、次式で規定される。

【0011】

【数8】

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_a & x_a^2 \\ 1 & x_b & x_b^2 \\ 1 & x_c & x_c^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} T_a \\ T_b \\ T_c \end{pmatrix}$$

【0012】さらに本発明の他の態様は、被測定物の受熱面の熱負荷の時間変化を計測する方法であり、受熱面からの夫々異なる距離の点 (x_1 、 x_2 、 $x_3 \dots x_n$) の温度を測定し、この測定された温度 T_1 、 T_2 、 $T_3 \dots T_N$ を次式に代入して熱負荷 q_{in} を計測することを特徴とする方法。

【0013】

【数9】

$$q_{in} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{roi}} + C_p \cdot \rho \cdot \overline{\partial T} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx$$

【0014】ここで、 κ は被測定物の熱伝導率、 C_p は定圧熱容量、 ρ は被測定物の密度、 x_{roi} は、受熱面からの x_a と x_b との間の所定の距離である。

【0015】

【実施例】以下に本発明に係わる物体の熱負荷測定方法並びに装置の一実施の形態として、プラズマの発生を維持するために、中性粒子ビームでプラズマを連続して照射する場合の、プラズマを透過した中性粒子ビームパワーの時間変化を計測する場合につき添付図面を参照して説明する。

【0016】図1は、実施の形態の測定装置（以下にカロリーメータと称する）を概略的に示し、符号1は、矢印で示すようにプラズマを透過した中性粒子ビームが表面にのみ入射するようにプラズマの近くに配置される円板状のビームリミッターを示す。このビームリミッターの中心には、中性粒子ビームの流れる方向に延びた円形の透孔が形成されている。この透孔内には、計測チップ

距離が x_a の点と、距離が x_b の点と、距離が x_c の点との温度を測定し、この測定された温度 T_a 、 T_b 、 T_c を次式に代入して熱負荷 q_{in} を計測することを特徴とする方法。

【0009】

【数7】

2が、表面（受熱面2a）をビームリミッターの表面と同一平面となるようにして埋め込まれている。この計測チップ2は、例えば無酸素銅のような熱伝導度の大きい金属により形成された円筒体と、この円筒体内に互いに軸方向に離間して配設された2つの温度測定素子3、4とを有する。この実施の形態では、第1の測定素子3は、受熱面2aから1mmの所（A点）に、また、第2の測定素子4は、3mmの所（B点）に配置されており、この配置された箇所での中性粒子ビームによる熱負荷に起因した計測チップの温度変化が測定可能となっている。即ち、2つの測定素子3、4は、中性粒子ビームの流れる方向での2点の温度を測定可能となっている。これら測定素子としては、好ましい実施の形態では、Type-T（銅-コンスタンタン）の熱電対を使用しているが、温度測定素子は、このような形態のものに限定されることはなく、所定箇所の温度変化を連続して測定し、その測定信号を連続して出力できるものであれば、どのようなものでも良い。これら測定素子3、4の出力側には、計測チップの受熱面での熱負荷の、即ち、中性粒子ビームの熱負荷の時間変化を後述する原理にもとづいて計算するカロリー計算回路（例えば、ADCとパソコンと専用ソフトとの組み合わせ）を使用が接続されている。この計算回路には、この回路により作成される時間の熱負荷変化をグラフと表示してディスプレイや、記録するメモリー等が接続されている。

【0017】以下に、カロリー計算回路での計算原理を、図1に示す装置を原理的に示した図2を参照して説明する。

【0018】図2は、中性粒子ビームBは、計測チップ2にこの熱受面2aに垂直に入射し、A点とB点とを順次通過する様子を示す。この図において、A点とB点との間の所定の位置2bと受熱面2aとの間の距離を x_{roi} で、A点と受熱面2aとの間の距離を x_a で、B点と受熱面2aとの間の距離を x_b で、受熱面2aでの熱負荷を q_{in} で、そして、前記所定の位置2bでの熱負荷を q_{out} で夫々示されている。

【0019】熱伝達に関する単位時間当たりの熱流 q は、この分野では良く知られているように次式で表される。

【0020】

【数10】

$$q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial q}{\partial x} = -C_p \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

【0021】ここで、 κ は熱伝導率、 C_p は定圧熱容

$$q_{in} = q_{out} + C_p \cdot \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx \quad \dots (1)$$

【0024】ここで、前記A点とB点とを適切に選ぶことによって、式(1)の右辺第1項並びに右辺第2項は次式で夫々近似することができる。

$$q_{out} \cong -\kappa \frac{T_b - T_a}{x_b - x_a} \quad \dots (2)$$

$$C_p \cdot \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx \cong C_p \cdot \rho \left(\frac{x_a + x_b}{2} \right) \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad \dots (3)$$

【0026】ここで、 T_a 、 T_b は、夫々A点、B点での測定温度である。

【0027】従って、夫々の測定素子3, 4で測定経過時間と共に測定した T_a 、 T_b を式(2)並びに(3)にリアルタイムに代入していくことにより、受熱面2aでの熱負荷が連続して測定することが可能になる。

【0028】このようにして得られた受熱面での熱負荷の時間変化は、中性粒子ビームの強度と対応しているので、この強度と、ビームの加速電圧、電流及びビームプロファイルデータベース(比較例)より求めた計測点でのビーム強度とを比較評価したグラフを図3に示す。図3にて、aで示す曲線はカロリメータでの測定結果を、また、bで示す曲線は、比較例を示す。また、図3で(a)は、通常のビームの場合を、(b)はビームモジュレーション運転時の場合を、そして、(c)は、イオン源のアーカタイミングを通常より遅らせた運転時の

$$q_{out} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{roi}} \quad \dots (4)$$

【0032】受熱面2bから距離xの点での温度をxの2次関数で表すと以下ようになる。 $T(x) = a + bx + cx^2$

A点と、B点と、C点とでの温度計測値により次式を得る。

【0033】

【数14】

$$\begin{pmatrix} T_a \\ T_b \\ T_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_a & x_a^2 \\ 1 & x_b & x_b^2 \\ 1 & x_c & x_c^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

量、 ρ は密度である。

【0022】かくして、計測チップ2の受熱面2aでの熱負荷は、次式で表すことができる。

【0023】

【数11】

【0025】

【数12】

場合を夫々示す。この図3より、実施の形態のカロリメータでの測定結果が、比較例と近似していることが理解できよう。

【0029】次に、温度測定点が3つの場合、即ち、中性粒子ビームの流れる方向でB点の下流側のC点に第3の測定素子を付加してこの箇所の温度 T_c を測定するように、計3個の測定素子を互いに所定間隔を有して配置した場合につき説明する。尚、受熱面2aとC点との間の距離を x_c とする。

【0030】受熱面2aから x_{roi} の距離の領域について考える(x_{roi} の値は数値シミュレーション等で最適な値を予め決めておく。例えば、 $x_{roi} = (x_a + x_b) / 2$)と、上記式(1)は同じであるが、式(2)は以下ようになる。

【0031】

【数13】

【0034】よって各時刻tでの係数a, b, cは次式で表される。

【0035】

【数15】

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_a & x_a^2 \\ 1 & x_b & x_b^2 \\ 1 & x_c & x_c^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} T_a \\ T_b \\ T_c \end{pmatrix} \quad \dots (5)$$

【0036】 $x = x_{roi}$ における q_{in} 、 q_{out} の値は次式で表される。

$$\begin{aligned} q_{out} &= -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{roi}} \\ &= -k(b + 2 \cdot C \cdot x_{roi}) \\ C_p \cdot \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx \\ &= C_p \cdot \rho \left(x_{roi} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{1}{2} x_{roi}^2 \cdot \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{1}{3} x_{roi}^3 \cdot \frac{\partial c}{\partial t} \right) \\ q_{in} &= q_{out} + C_p \cdot \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx \\ &= -k(b + 2 \cdot C \cdot x_{roi}) \\ &\quad + C_p \cdot \rho \left(x_{roi} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{1}{2} x_{roi}^2 \cdot \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{1}{3} x_{roi}^3 \cdot \frac{\partial c}{\partial t} \right) \quad \dots (6) \end{aligned}$$

【0038】 従って、式(5)並びに(6)に、夫々測定温度 T_a 、 T_b 、 T_c を代入すれば、受熱面 2 a での熱負荷 q_{in} がリアルタイムで測定される。上記実施の形態では、温度測定点が 2 並びに 3 の場合について説明したが、この測定点は、2 以上であれば、幾つでも良い。以下に測定素子が 2 個以上の場合、即ち、 n 個の場合につき説明する。この説明では、測定点は、A、B、C、...N (x_1 、 x_2 、 x_3 ... x_n とする) 差の場合につき説明する。

【0039】 n 個の測定素子により n 個の点での温度 T_j が計測されるものとし、また、カロリメータ中ののビームの流れる方向の温度分布 $T(x)$ を a_j ($j = 1 \sim m$) という定数を使用した関数 $f(a_j; x)$ で表すとする。

【0040】 i) $n = m$ の場合
各時刻の各計測点での温度 $T_i(t)$ より、以下の連立方程式が得られる。

【0041】
【数 17】

$$\begin{cases} T_1(t) = f(a_j; x_1) \\ T_2(t) = f(a_j; x_2) \\ \vdots \\ T_i(t) = f(a_j; x_i) \\ \vdots \\ T_n(t) = f(a_j; x_n) \end{cases}$$

【0042】 この連立方程式を a_j について解くことによって、各時刻での a_j の値 $a_j(t)$ ($j = 1 \sim m$) を得る。

【0037】
【数 16】

【0043】 ii) $n > m$ の場合
最小 2 乗法を用いて、次式で表される残差平方和を定義する。

【0044】
【数 18】

$$L = \sum_{i=1}^n w_i (T_i - f(a_j; x_i))^2$$

ここで σ_i は T_i の誤差

w_i として $w_i = 1 / \sigma_i^2$ (T_i の誤差) 等を用いる

【0045】 この L が最小になる様に a_j を決める。具体的には下記の連立方程式を各時刻の $T_j(t)$ 、 x_i を用いて、 a_j ($j = 1 \sim m$) に対して解いて各時刻の $a_j(t)$ を得る。

【0046】
【数 19】

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial a_1} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial a_2} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial a_k} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial a_m} = 0 \end{cases}$$

【0047】 結果として (i)、(ii) の相方の場合に対して、以下の各時刻での温度分布関数を得る。

【0048】 $T(x, t) = f(a_j(t); x)$
 上記の様に得られた各時刻の温度分布関数 $T(a, t)$ を次式に代入することにより、受熱面での熱負荷の

$$q_{in} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{roi}} + c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx \quad \dots (7)$$

【0050】この(7)式で x_{roi} の値は予め決めておく。

【0051】尚、実際の実験データを上記(7)式に単純にあてはめると q_{in} の値を過大評価もしくは過少評価する場合がある。このために、(7)式に、 という

$$q_{in} = -\alpha \cdot \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{roi}} + \beta \cdot c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx \quad \dots (8)$$

【0053】上記、は以下のようにして決める。

【0054】カロリメータの計測チップを十分に熱絶縁のとれた環境下におき、異なる熱負荷条件の下で測定を1回行う(1は3以上)。十分に熱絶縁のとれた環境下においてあるので、熱負荷の照射前後の計測チップの温度変化 T_h と、比熱 c_p と、チップの密度 ρ と、質量 m とにより照射熱負荷の時間積分値 $Q_{in} (= q_{in} \cdot dt)$ は次式で表される(従来のカロリメータの計算手法)。

$$Q_{in}^h = c_p \cdot \rho \cdot m \cdot T_h \quad (h = 1, 2, \dots, l)$$

また、本発明に係わる計測手法から推測される照射熱負荷の時間積分値は上記(8)式を区間 $[0, t_{end}]$ で積分して以下の式が得られる(T_{end} は照射終了時刻)。

【0056】

【数22】

$$Q_{in}^h = -\alpha \cdot \kappa \int_0^{t_{end}} \frac{\partial T^h}{\partial x} \Big|_{x=x_{roi}} dt + \beta \cdot c_p \cdot \rho \left[\int_0^{x_{roi}} T^h(x) dx \right]_0^{t_{end}}$$

($h = 1, \dots, l$)

【0057】ここで、 α, β は以下の残差平方和 M が最小になる様を選ぶ。

【0058】

【数23】

$$M = \sum_{k=1}^l (Q_{in}^h - Q_{in}^h)^2$$

【0059】即ち、以下の連立方程式を解くことによっ

瞬間変化 $q_{in}(t)$ が得られる。

【0049】

【数20】

補正係数を導入した以下の(8)式を使用することが好ましい。

【0052】

【数21】

て a, b の値を求める。

【0060】以上のような一般式を採用することにより、4点以上の測定点を設定しても受熱面での熱負荷の時間変化をリアルタイムで並びに/もしくははデータとして求めることができる。

【0061】尚、上記実施の形態では、熱負荷の時間変化測定物質として中性粒子ビームを使用したが、本発明の適用範囲は、これに限られるものではなく、飛行機もしくは自動車のエンジンの熱負荷の時間変化、超音波飛行機、ロケット、もしくは宇宙船の表面温度の時間変化、金属等の溶融炉もしくはゴミ焼却炉の炉内壁熱負荷の時間変化の計測など種々の対象物の熱負荷の時間変化の測定が可能である。

【0062】例えば、飛行中のロケットの表面温度の時間変化の計測は、ロケットの外壁に、少なくとも2つの温度測定素子を外壁の厚さ方向に所定間隔を有して位置するように、埋め込み、この測定素子で得られた温度の時間変化を上述したような方法により計算することにより、行われ得る。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態に係わるカロリメータを概略的に示す図である。

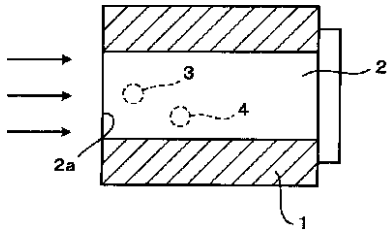
【図2】図1に示すカロリメータの原理を説明するための図である。

【図3】(a)ないし(c)は、実施の形態により測定された受熱面の熱負荷の時間変化と、比較例との関係を説明するための線図である。

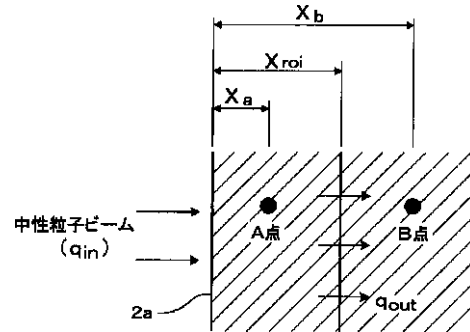
【符号の説明】

1...ビームリミッター、2...計測チップ、2a...受熱面、3, 4...温度測定素子。

【図1】



【図2】



【図3】

