

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年2月22日(22.02.2018)



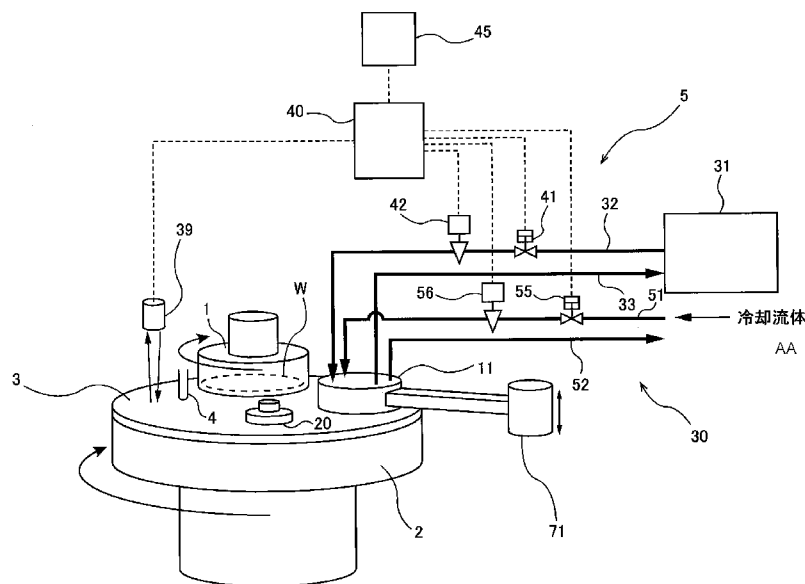
(10) 国際公開番号

WO 2018/034308 A1

- (51) 国際特許分類:
B24B 37/015 (2012.01) B24B 49/14 (2006.01)
B24B 37/34 (2012.01) H01L 21/304 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2017/029453
- (22) 国際出願日: 2017年8月16日(16.08.2017)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2016-159963 2016年8月17日(17.08.2016) JP
- (71) 出願人: 株式会社 荏原製作所 (EBARA CORPORATION) [JP/JP]; 〒1448510 東京都大田区羽田旭町 1 1 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 梶 沢 雅 志 (KABASAWA, Masashi); 〒1448510 東京都大田区羽田旭町 1 1 番 1 号 株式会社 荏原製作所内 Tokyo (JP).
松尾 尚典 (MATSUO, Hisanori); 〒1448510 東京都大田区羽田旭町 1 1 番 1 号 株式会社 荏原製作所内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 廣澤 哲也, 外 (HIROSAWA, Tetsuya et al.); 〒1600023 東京都新宿区西新宿 7 丁目 5 番 8 号 GOWA 西新宿 4 階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,

(54) Title: POLISHING METHOD, POLISHING DEVICE, AND RECORDING MEDIUM WITH COMPUTER PROGRAM RECORDED THEREON

(54) 発明の名称: 研磨方法、研磨装置、およびコンピュータプログラムを記録した記録媒体



AA Cooling fluid

(57) Abstract: The present invention relates to a polishing method for polishing a substrate such as a wafer. The polishing method comprises: polishing a substrate (W) by pressing the substrate (W) against the surface of a polishing pad (3); changing the surface temperature of the polishing pad (3) by operating flow rate control valves (42, 56) that are for controlling the flow rate of a fluid flowing through a pad temperature adjusting member (11) during the polishing of the substrate (W); measuring the surface temperature of the polishing pad (3); computing a PID parameter on the basis of

HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

- 一 国際調査報告（条約第21条(3)）

a change in the surface temperature of the polishing pad (3) over time; calculating operation quantities of the flow rate control valves (42, 56) that are for minimizing the deviation between a target temperature value and a measured value of the surface temperature of the polishing pad by using a PID arithmetic expression that includes the PID parameter; and operating the flow rate control valves (42, 56) in accordance with the operation quantities during the polishing of the substrate (W).

(57) 要約：本発明は、ウェーハなどの基板を研磨する研磨方法に関するものである。研磨方法は、基板（W）を研磨パッド（3）の表面に押し付けて基板（W）を研磨し、基板（W）の研磨中に、パッド温度調整部材（11）に流れる流体の流量を制御するための流量制御バルブ（42, 56）を操作することで、研磨パッド（3）の表面温度を変化させ、研磨パッド（3）の表面温度を測定し、研磨パッド（3）の表面温度の時間変化に基づいて、PIDパラメータを算定し、PIDパラメータを備えたPID演算式を用いて、温度目標値と研磨パッドの表面温度の測定値との偏差を最小にするための流量制御バルブ（42, 56）の操作量を計算し、基板Wの研磨中に、操作量に従って流量制御バルブ（42, 56）を操作する。

明 細 書

発明の名称：

研磨方法、研磨装置、およびコンピュータプログラムを記録した記録媒体
技術分野

[0001] 本発明は、ウェーハなどの基板を研磨する研磨方法、研磨装置、および該研磨装置の研磨パッドの表面温度を制御するためのコンピュータプログラムを記録した記録媒体に関するものである。

背景技術

[0002] CMP (Chemical Mechanical Polishing) 装置は、半導体デバイスの製造において、基板の表面を研磨する工程に使用される。CMP装置は、基板を研磨ヘッドで保持して基板を回転させ、さらに回転する研磨テーブル上の研磨パッドに基板を押し付けて基板の表面を研磨する。研磨中、研磨パッドには研磨液（スラリー）が供給され、基板の表面は、研磨液の化学的作用と研磨液に含まれる砥粒の機械的作用により平坦化される。

[0003] 基板の研磨レートは、基板の研磨パッドに対する研磨荷重のみならず、研磨パッドの表面温度にも依存する。これは、基板に対する研磨液の化学的作用および研磨パッドの硬さが温度に依存するからである。したがって、半導体デバイスの製造においては、基板の研磨レートを上げて更に一定に保つために、基板研磨中の研磨パッドの表面温度を最適な値に保つことが重要とされる。

[0004] そこで、研磨パッドの表面温度を測定し、測定された研磨パッドの温度情報に基づいてPID制御により研磨パッドの研磨面の温度を調整する研磨装置が提案されている（例えば特許文献1参照）。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2011-136406号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、P I Dパラメータを決定するための方法については、明確な指針は存在せず、ユーザーは試行錯誤を重ねながらP I Dパラメータを決定しなければならない。また、P I Dパラメータの決定方法については、特別な知識や経験、ノウハウを有する熟練者に依存している場合も多い。したがって、P I Dパラメータを決定するために、多くの時間が必要となり、コストもかかってしまう。

[0007] そこで、本発明は、特別な知識や経験、ノウハウを必要とせず、さらに、短時間で、かつ効率的にP I Dパラメータを算定する研磨方法、および研磨装置を提供することを目的とする。また、本発明は、研磨パッドの表面温度を制御するためのプログラムを記録した記録媒体を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 上述した目的を達成するために、本発明の一態様は、基板を研磨パッドの表面に押し付けて該基板を研磨し、前記基板の研磨中に、パッド温度調整部に流れる流体の流量を制御するための流量制御バルブを操作することで、前記研磨パッドの表面温度を変化させ、前記研磨パッドの表面温度を測定し、前記研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいて、P I Dパラメータを算定し、前記P I Dパラメータを備えたP I D演算式を用いて、温度目標値と前記研磨パッドの表面温度の測定値との偏差を最小にするための前記流量制御バルブの操作量を計算し、前記基板の研磨中に、前記操作量に従って前記流量制御バルブを操作することを特徴とする研磨方法である。

[0009] 本発明の好ましい態様は、前記研磨パッドの表面温度を測定する工程は、前記研磨パッドの中心と外周部とを含む領域における温度分布を測定する工程を含むことを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記研磨パッドの表面温度を変化させる工程は、前記基板の研磨中に、パッド温度調整部材を前記研磨パッドの表面に接触させ、または近接させて該パッド温度調整部材に流れる流体の流量を制御す

るための流量制御バルブを操作することで、前記研磨パッドの表面温度を変化させる工程であることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記研磨パッドの表面温度を変化させる工程は、前記基板の研磨中に、パッド温度調整部材から前記研磨パッドの表面上に供給される流体の流量を制御するための流量制御バルブを操作することで、前記研磨パッドの表面温度を変化させる工程であることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記流体は、加熱流体および冷却流体であることを特徴とする。

[0010] 本発明の好ましい態様は、前記PIDパラメータを算定する工程は、リミットサイクル法、ステップ応答法、ジークラ・ニコルスの限界感度法のうちのいずれかを用いて、前記研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいて、PIDパラメータを算定する工程であることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記PID演算式を用いて計算した操作量で前記流量制御バルブを操作した結果として予想される前記研磨パッドの表面温度のシミュレーションを実行することを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記温度目標値を変更した場合に予想される前記研磨パッドの表面温度の時間推移を示すシミュレーションをさらに実行することを特徴とする。

[0011] 本発明の他の態様は、研磨パッドを支持する研磨テーブルと、基板を前記研磨パッドに押し付ける研磨ヘッドと、前記研磨パッドの表面温度を調整するパッド温度調整システムとを備え、前記パッド温度調整システムは、流体が流れる流路が内部に形成されたパッド温度調整部材と、前記流路に接続された流体供給管と、前記流体供給管に取り付けられた流量制御バルブと、前記研磨パッドの表面温度を測定するパッド温度測定器と、前記流量制御バルブを操作するPID制御部とを備え、前記PID制御部は、前記基板の研磨中において、前記流量制御バルブを操作して、前記研磨パッドの表面温度を変化させ、前記研磨パッドの表面温度の測定値を前記パッド温度測定器から取得し、前記研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいて、PIDパラメー

タを算定し、前記P I Dパラメータを備えたP I D演算式を用いて、温度目標値と前記研磨パッドの表面温度の測定値との偏差を最小にするための前記流量制御バルブの操作量を計算し、前記操作量に従って前記流量制御バルブを操作することを特徴とする研磨装置である。

[0012] 本発明の好ましい態様は、前記パッド温度測定器は、赤外線放射温度計、熱電対温度計、サーモグラフィ、およびサーモパイルのうち、少なくとも1つの温度測定器であることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記パッド温度測定器は、前記研磨パッドの中心と外周部とを含む領域における温度分布を測定するように構成されていることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記パッド温度調整システムは、前記パッド温度測定器によって測定された前記研磨パッドの表面温度を表示する温度表示器をさらに備えていることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記パッド温度調整部材は、前記研磨パッドの表面に冷却流体を吹きかける冷却ノズルであることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記パッド温度調整部材は、前記研磨パッドの表面に接触可能なパッド接触面を有することを特徴とする。

[0013] 本発明の好ましい態様は、前記P I D制御部は、リミットサイクル法、ステップ応答法、ジークラ・ニコルスの限界感度法のうちのいずれかを用いてP I Dパラメータを算定することを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記P I D制御部は、前記P I D演算式を用いて計算した操作量で前記流量制御バルブを操作した結果として予想される前記研磨パッドの表面温度のシミュレーションを実行するように構成されていることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記P I D制御部は、前記温度目標値を変更した場合に予想される前記研磨パッドの表面温度の時間推移を示すシミュレーションをさらに実行するように構成されていることを特徴とする。

[0014] 本発明のさらに他の態様は、研磨ヘッドに指令を与えて、基板を研磨パッ

ドの表面に押し付けて該基板を研磨する動作を前記研磨ヘッドに実行させるステップと、パッド温度調整部材に流れる流体の流量を制御するために設けられた流量制御バルブを操作することで、前記研磨パッドの表面温度を変化させるステップと、前記研磨パッドの表面温度の測定値を取得するステップと、前記研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいて、P I Dパラメータを算定するステップと、前記P I Dパラメータを備えたP I D演算式を用いて、温度目標値と前記研磨パッドの表面温度の測定値との偏差を最小にするための前記流量制御バルブの操作量を計算するステップと、前記操作量に従って前記流量制御バルブを操作するステップをコンピュータに実行させるためのプログラムを記録した非一時的なコンピュータ読み取り可能な記録媒体である。

発明の効果

- [0015] 本発明によれば、基板の研磨中において、研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいてP I Dパラメータを自動で算定することができるため、P I Dパラメータを決定するための試行錯誤による実験、特別な知識や経験、ノウハウは不要であり、熟練者に頼る必要はない。したがって、P I Dパラメータを短時間で、かつ効率的に決定することができる。

図面の簡単な説明

- [0016] [図1]研磨装置の一実施形態を示す模式図である。
[図2]研磨装置の他の実施形態を示す模式図である。
[図3]パッド温度測定器の温度測定領域を上から見た図である。
[図4]パッド温度測定器の温度測定領域を横から見た図である。
[図5]パッド温度調整部材を示す水平断面図である。
[図6]研磨パッド上のパッド温度調整部材と研磨ヘッドとの位置関係を示す平面図である。
[図7]温度表示器を示す模式図である。
[図8]パッド温度調整部材の他の実施形態を示す図である。
[図9]リミットサイクル法を説明するための図である。

[図10]流量制御バルブの2位置動作を示す図である。

[図11]P I Dパラメータの算定に用いられる係数の一例を示す図である。

[図12]P I Dパラメータを算定するときのフィードバック制御系を示す図である。

[図13]P I D制御部の構成を示す模式図である。

[図14]プログラムに従って動作するP I D制御部のステップを示すフローチャートである。

[図15]ステップ応答法を説明するための図である。

[図16]ジググラ・ニコルスの限界感度法を説明するための図である。

[図17]研磨パッドの表面温度の時間推移を示すシミュレーション結果を示す図である。

[図18]P I Dパラメータがウェーハの研磨プロセスごとに算定される様子を示すフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0017] 以下、本発明の実施形態について図面を参照して説明する。

図1は、研磨装置を示す模式図である。図1に示すように、研磨装置は、基板の一例であるウェーハWを保持して回転させる研磨ヘッド1と、研磨パッド3を支持する研磨テーブル2と、研磨パッド3の表面に研磨液（例えばスラリー）を供給する研磨液供給ノズル4と、研磨パッド3の表面温度を調整するパッド温度調整システム5とを備えている。研磨パッド3の表面（上面）は、ウェーハWを研磨する研磨面を構成する。

[0018] 研磨ヘッド1は鉛直方向に移動可能であり、かつその軸心を中心として矢印で示す方向に回転可能となっている。ウェーハWは、研磨ヘッド1の下面に真空吸着などによって保持される。研磨テーブル2にはモータ（図示せず）が連結されており、矢印で示す方向に回転可能となっている。図1に示すように、研磨ヘッド1および研磨テーブル2は、同じ方向に回転する。研磨パッド3は、研磨テーブル2の上面に貼り付けられている。

[0019] 研磨装置は、研磨テーブル2上の研磨パッド3をドレッシングするドレッ

サ 20 をさらに備えている。ドレッサ 20 は研磨パッド 3 の表面上を研磨パッド 3 の半径方向に揺動するように構成されている。ドレッサ 20 の下面は、ダイヤモンド粒子などの多数の砥粒からなるドレッシング面を構成する。ドレッサ 20 は、研磨パッド 3 の研磨面上を揺動しながら回転し、研磨パッド 3 を僅かに削り取ることにより研磨パッド 3 の表面をドレッシングする。

[0020] ウェーハ W の研磨は次のようにして行われる。研磨されるウェーハ W は、研磨ヘッド 1 によって保持され、さらに研磨ヘッド 1 によって回転される。一方、研磨パッド 3 は、研磨テーブル 2 とともに回転される。この状態で、研磨パッド 3 の表面には研磨液供給ノズル 4 から研磨液が供給され、さらにウェーハ W の表面は、研磨ヘッド 1 によって研磨パッド 3 の表面（すなわち研磨面）に対して押し付けられる。ウェーハ W の表面は、研磨液の存在下での研磨パッド 3 との摺接により研磨される。ウェーハ W の表面は、研磨液の化学的作用と研磨液に含まれる砥粒の機械的作用により平坦化される。

[0021] パッド温度調整システム 5 は、研磨パッド 3 の表面温度を調整するための流体が流れる流路が内部に形成されたパッド温度調整部材 11 と、温度調整された加熱流体および冷却流体をパッド温度調整部材 11 に供給する流体供給システム 30 とを備えている。パッド温度調整部材 11 は、研磨パッド 3 の表面に直接接触し、または研磨パッド 3 の表面に近接することができる。

[0022] パッド温度調整システム 5 は、パッド温度調整部材 11 を研磨パッド 3 の表面に対して垂直に移動させる上下動機構（垂直移動機構）71 をさらに備えている。パッド温度調整部材 11 は、上下動機構 71 に保持されている。この上下動機構 71 は、パッド温度調整部材 11 を研磨パッド 3 の表面に対して上下方向に移動させることが可能に構成されている。このような構成により、パッド温度調整部材 11 は、研磨パッド 3 の表面に直接接触し、または研磨パッド 3 の表面に近接することができる。上下動機構 71 としては、サーボモータとボールねじ機構との組み合わせ、またはエアシリンダなどから構成される。

[0023] パッド温度調整部材 11 は、研磨パッド 3 の表面に対して垂直に移動して

、研磨パッド3の表面上の領域（研磨パッド3の半径方向の位置）の温度を一定に維持するように構成されている。例えば、パッド温度調整部材11は、研磨パッド3の中心CLからの距離が100mmである研磨パッド3の半径方向の位置の温度を60度に維持するように、研磨パッド3の表面に対して垂直方向に移動する。ユーザーは、パッド温度調整部材11によって制御される研磨パッド3の表面温度および研磨パッド3の半径方向の位置を任意に決定（変更）することができる。例えば、ユーザーは、研磨パッド3の半径方向の位置として、研磨パッド3の中心CLからの距離を100mmから200mmに変更してもよく、研磨パッド3の表面温度として、60度から70度に変更してもよい。結果として、パッド温度調整部材11は、研磨パッド3の中心CLからの距離が200mmである研磨パッド3の半径方向の位置の温度を70度に維持するように、研磨パッド3の表面に対して上下方向に移動する。

[0024] 流体供給システム30は、温度調整された流体を貯留する流体供給源としての流体供給タンク31と、流体供給タンク31とパッド温度調整部材11とを連結する加熱流体供給管32および加熱流体戻り管33とを備えている。加熱流体供給管32および加熱流体戻り管33の一方の端部は流体供給タンク31に接続され、他方の端部はパッド温度調整部材11に接続されている。

[0025] 温度調整された加熱流体は、流体供給タンク31から加熱流体供給管32を通じてパッド温度調整部材11に供給され、パッド温度調整部材11内を流れ、そしてパッド温度調整部材11から加熱流体戻り管33を通じて流体供給タンク31に戻される。このように、加熱流体は、流体供給タンク31とパッド温度調整部材11との間を循環する。流体供給タンク31は、ヒータ（図示せず）を有しており、加熱流体はヒータにより所定の温度に加熱される。

[0026] 加熱流体供給管32には、第1開閉バルブ41および第1流量制御バルブ42が取り付けられている。第1流量制御バルブ42は、パッド温度調整部

材 1 1 と第 1 開閉バルブ 4 1 との間に配置されている。第 1 開閉バルブ 4 1 は、流量調整機能を有しないバルブであるのに対し、第 1 流量制御バルブ 4 2 は、流量調整機能を有するバルブである。

[0027] 流体供給システム 3 0 は、パッド温度調整部材 1 1 に接続された冷却流体供給管 5 1 および冷却流体排出管 5 2 をさらに備えている。冷却流体供給管 5 1 は、研磨装置が設置される工場に設けられている冷却流体供給源（例えば、冷水供給源）に接続されている。冷却流体は、冷却流体供給管 5 1 を通じてパッド温度調整部材 1 1 に供給され、パッド温度調整部材 1 1 内を流れ、そしてパッド温度調整部材 1 1 から冷却流体排出管 5 2 を通じて排出される。

[0028] 冷却流体供給管 5 1 には、第 2 開閉バルブ 5 5 および第 2 流量制御バルブ 5 6 が取り付けられている。第 2 流量制御バルブ 5 6 は、パッド温度調整部材 1 1 と第 2 開閉バルブ 5 5 との間に配置されている。第 2 開閉バルブ 5 5 は、流量調整機能を有しないバルブであるのに対し、第 2 流量制御バルブ 5 6 は、流量調整機能を有するバルブである。

[0029] 図 2 は研磨装置の他の実施形態を示す模式図である。図 2 に示すように、冷却流体供給管 5 1 および冷却流体排出管 5 2 の一方の端部は流体供給タンク 3 1 に接続され、他方の端部はパッド温度調整部材 1 1 に接続されてもよい。本実施形態では、流体供給タンク 3 1 とパッド温度調整部材 1 1 との間を循環する冷却流体は流体供給タンク 3 1 内で冷却される。同様に、流体供給タンク 3 1 とパッド温度調整部材 1 1 との間を循環する加熱流体は流体供給タンク 3 1 内で加熱される。図 2 では、冷却流体排出管 5 2 は冷却流体戻り管である。

[0030] 図 1 に戻り、パッド温度調整システム 5 は、研磨パッド 3 の表面温度（以下、パッド表面温度ということがある）を測定するパッド温度測定器 3 9 と、パッド温度測定器 3 9 により測定されたパッド表面温度に基づいて第 1 流量制御バルブ 4 2 および第 2 流量制御バルブ 5 6 を操作する P I D 制御部 4 0 とをさらに備えている。第 1 開閉バルブ 4 1 および第 2 開閉バルブ 5 5 は

、通常は開かれている。

[0031] パッド温度測定器 39 は、研磨パッド 3 の表面の上方に配置されており、非接触で研磨パッド 3 の表面温度を測定するように構成されている。パッド温度測定器 39 は、P I D 制御部 40 に接続されており、さらに P I D 制御部 40 を介して温度表示器 45 に接続されている。パッド温度測定器 39 は、研磨パッド 3 の表面温度を測定する赤外線放射温度計または熱電対温度計であってもよく、研磨パッド 3 の表面温度を測定し、研磨パッド 3 の温度分布を取得するサーモグラフィまたはサーモパイルであってもよい。パッド温度測定器 39 は、赤外線放射温度計、熱電対温度計、サーモグラフィ、およびサーモパイルのうち、少なくとも 1 つの温度測定器である。パッド温度測定器 39 に、ウェーハ W の研磨によって飛び散った液体（スラリーなど）が付着すると、パッド温度測定器 39 は、研磨パッド 3 の表面温度を正確に測定することができないことがある。したがって、パッド温度測定器 39 は研磨パッド 3 の表面から十分に高い位置に配置されている。

[0032] 図 3 はパッド温度測定器 39 の温度測定領域を上から見た図であり、図 4 はパッド温度測定器 39 の温度測定領域を横から見た図である。図 3 および図 4 に示すように、パッド温度測定器 39 は、研磨パッド 3 の中心 C L と研磨パッド 3 の外周部 3 a とを含む領域における研磨パッド 3 の表面温度を測定するように構成されている（図 3 および図 4 の点線参照）。

[0033] パッド温度測定器 39 は、非接触で研磨パッド 3 の表面温度を測定し、表面温度の測定値を P I D 制御部 40 に送る。パッド温度測定器 39 は、所定時間毎に研磨パッド 3 の表面温度を測定してもよい。P I D 制御部 40 は、パッド表面温度が、予め設定された目標温度に維持されるように、測定されたパッド表面温度に基づいて、第 1 流量制御バルブ 42 および第 2 流量制御バルブ 56 を操作する。第 1 流量制御バルブ 42 および第 2 流量制御バルブ 56 は、P I D 制御部 40 からの制御信号に従って動作し、パッド温度調整部材 11 に供給される加熱流体の流量および冷却流体の流量を調整する。パッド温度調整部材 11 を流れる加熱流体および冷却流体と研磨パッド 3 との

間で熱交換が行われ、これによりパッド表面温度が変化する。

[0034] パッド温度調整部材 11 に供給される加熱流体としては、温水が使用される。温水は、流体供給タンク 31 のヒータにより、例えば約 80℃ に加熱される。より速やかに研磨パッド 3 の表面温度を上昇させる場合には、シリコンオイルを加熱流体として使用してもよい。シリコンオイルを加熱流体として使用する場合には、シリコンオイルは流体供給タンク 31 のヒータにより 100℃ 以上（例えば、約 120℃）に加熱される。パッド温度調整部材 11 に供給される冷却流体としては、冷水またはシリコンオイルが使用される。シリコンオイルを冷却流体として使用する場合には、冷却流体供給源としてチラーを冷却流体供給管 51 に接続し、シリコンオイルを 0℃ 以下に冷却することで、研磨パッド 3 を速やかに冷却することができる。

[0035] 加熱流体供給管 32 および冷却流体供給管 51 は、完全に独立した配管である。したがって、加熱流体および冷却流体は、混合されることなく、同時にパッド温度調整部材 11 に供給される。加熱流体戻り管 33 および冷却流体排出管 52 も、完全に独立した配管である。したがって、加熱流体は、冷却流体と混合されることなく流体供給タンク 31 に戻され、冷却流体は、加熱流体と混合されることなく排出される。

[0036] 次に、パッド温度調整部材 11 の一例について、図 5 を参照して説明する。図 5 は、パッド温度調整部材 11 を示す水平断面図である。図 5 に示すように、パッド温度調整部材 11 は、その内部に形成された加熱流路 61 および冷却流路 62 を有する熱交換部材である。加熱流路 61 および冷却流路 62 は、互いに隣接して延びており、かつ螺旋状に延びている。本実施形態では、加熱流路 61 は、冷却流路 62 よりも短い。

[0037] 加熱流体供給管 32 は、加熱流路 61 の入口 61a に接続されており、加熱流体戻り管 33 は、加熱流路 61 の出口 61b に接続されている。冷却流体供給管 51 は、冷却流路 62 の入口 62a に接続されており、冷却流体排出管 52 は、冷却流路 62 の出口 62b に接続されている。加熱流路 61 および冷却流路 62 の入口 61a, 62a は、パッド温度調整部材 11 の周縁

部に位置しており、加熱流路 6 1 および冷却流路 6 2 の出口 6 1 b, 6 2 b は、パッド温度調整部材 1 1 の中心部に位置している。したがって、加熱流体および冷却流体は、パッド温度調整部材 1 1 の周縁部から中心部に向かって螺旋状に流れる。加熱流路 6 1 および冷却流路 6 2 は、完全に分離しており、パッド温度調整部材 1 1 内で加熱流体および冷却流体が混合されることはない。なお、加熱流路 6 1 および冷却流路 6 2 の形状は、図 5 に示す実施形態に限定されず、パッド温度調整部材 1 1 は、ジグザグ状の加熱流路および冷却流路を有してもよい。

[0038] 図 6 は、研磨パッド 3 上のパッド温度調整部材 1 1 と研磨ヘッド 1 との位置関係を示す平面図である。パッド温度調整部材 1 1 は、上から見たときに円形であり、パッド温度調整部材 1 1 の直径は研磨ヘッド 1 の直径よりも小さい。研磨パッド 3 の中心 C L からパッド温度調整部材 1 1 の中心までの距離は、研磨パッド 3 の中心 C L から研磨ヘッド 1 の中心までの距離と同じである。加熱流路 6 1 および冷却流路 6 2 は、互いに隣接しているので、加熱流路 6 1 および冷却流路 6 2 は、研磨パッド 3 の径方向のみならず、研磨パッド 3 の周方向に沿って並んでいる。したがって、研磨テーブル 2 および研磨パッド 3 が回転している間、研磨パッド 3 に接触または近接するパッド温度調整部材 1 1 は、加熱流体および冷却流体の両方と熱交換を行う。

[0039] 図 7 は温度表示器 4 5 を示す模式図である。図 7 に示すように、パッド温度調整システム 5 は、パッド温度測定器 3 9 によって測定された研磨パッド 3 の表面温度を表示する温度表示器 4 5 をさらに備えている。P I D 制御部 4 0 はパッド温度測定器 3 9 および温度表示器 4 5 に接続されている。パッド温度測定器 3 9 は、その温度測定領域において、研磨パッド 3 の表面温度を測定し、測定された研磨パッド 3 の表面温度は温度表示器 4 5 に表示される。温度表示器 4 5 には、研磨パッド 3 の各表面位置（つまり、直交座標系で表される研磨パッド 3 の表面位置）の温度が色で表現されるなど、視覚的にわかりやすく表示される。例えば、温度が高い研磨パッド 3 の表面位置は赤色で表され、温度が低い研磨パッド 3 の表面位置は青色で表される。温度

表示器 4 5 は、研磨パッド 3 の表面温度の分布を、色分布として表示する。

[0040] ユーザーは、研磨パッド 3 の測定位置を温度表示器 4 5 上で指定してもよく、または研磨パッド 3 の測定位置を座標入力によって指定してもよい。温度表示器 4 5 には、指定された研磨パッド 3 の測定位置の現時刻における温度、任意時刻の温度、温度の時間推移、研磨パッド 3 の温度分布、最大温度、最小温度、平均温度、測定された温度の時間積分値などが表示される。

[0041] P I D 制御部 4 0 は、予め設定された目標温度と、測定された研磨パッド 3 の表面温度との差を無くするために必要な第 1 流量制御バルブ 4 2 の操作量および第 2 流量制御バルブ 5 6 の操作量を計算するように構成されている。第 1 流量制御バルブ 4 2 の操作量および第 2 流量制御バルブ 5 6 の操作量は、言い換えれば、バルブ開度である。第 1 流量制御バルブ 4 2 の操作量は、加熱流体の流量に比例し、第 2 流量制御バルブ 5 6 の操作量は、冷却流体の流量に比例する。

[0042] 第 1 流量制御バルブ 4 2 および第 2 流量制御バルブ 5 6 のそれぞれの操作量を 0 % から 1 0 0 % までの数値で表したときに、P I D 制御部 4 0 は、第 1 流量制御バルブ 4 2 の操作量を 1 0 0 % から引き算することで、第 2 流量制御バルブ 5 6 の操作量を決定するように構成されている。一実施形態では、P I D 制御部 4 0 は、第 2 流量制御バルブ 5 6 の操作量を 1 0 0 % から引き算することで、第 1 流量制御バルブ 4 2 の操作量を決定してもよい。

[0043] 第 1 流量制御バルブ 4 2 の操作量が 1 0 0 % であることは、第 1 流量制御バルブ 4 2 が全開であることを示し、第 1 流量制御バルブ 4 2 の操作量が 0 % であることは、第 1 流量制御バルブ 4 2 が完全に閉じられていることを示している。同様に、第 2 流量制御バルブ 5 6 の操作量が 1 0 0 % であることは、第 2 流量制御バルブ 5 6 が全開であることを示し、第 2 流量制御バルブ 5 6 の操作量が 0 % であることは、第 2 流量制御バルブ 5 6 が完全に閉じられていることを示している。

[0044] 第 1 流量制御バルブ 4 2 の操作量が 1 0 0 % であるときの加熱流体の流量は、第 2 流量制御バルブ 5 6 の操作量が 1 0 0 % であるときの冷却流体の流

量と同じである。したがって、第1流量制御バルブ42を通過する加熱流体の流量と、第2流量制御バルブ56を通過する冷却流体の流量との合計は、常に一定である。

[0045] PID制御部40は、第1流量制御バルブ42の操作量と、第2流量制御バルブ56の操作量との総和が100%となるように、第1流量制御バルブ42および第2流量制御バルブ56を操作する。

[0046] 本実施形態によれば、パッド温度調整部材11の加熱流路61には加熱流体のみが流れ、冷却流路62には冷却流体のみが流れる。加熱流体および冷却流体のそれぞれの流量は、研磨パッド3の表面温度に基づいて制御される。つまり、第1流量制御バルブ42および第2流量制御バルブ56は、研磨パッド3の表面温度と目標温度との差に基づいてPID制御部40によって操作される。したがって、研磨パッド3の表面温度を目標温度に安定して維持することができる。

[0047] 図8はパッド温度調整部材11の他の実施形態を示す図である。特に説明しない本実施形態の構成および動作は、上述した実施形態と同じであるので、その重複する説明を省略する。図8に示すように、パッド温度調整部材11は、研磨パッド3の表面に冷却流体を吹きかける冷却ノズルである。本実施形態では、冷却流体として、空気または不活性ガス（例えば窒素ガス）などの冷却気体が使用される。冷却ノズルであるパッド温度調整部材11の内部には、冷却流体が流れる冷却流路12が形成されている。冷却流路12は、冷却流体供給管51およびパッド温度調整部材11の噴射口に接続されている。冷却流体供給管51を通じてパッド温度調整部材11に冷却流体を供給すると、冷却流体はパッド温度調整部材11の噴射口から研磨パッド3の表面上に供給される。冷却流体供給管51には、パッド温度調整部材11から研磨パッド3の表面上に供給される冷却流体の流量を制御するための流量制御バルブ56が取り付けられている。本実施形態では、加熱流体は使用されない。

[0048] パッド温度調整部材11が熱交換部材（図5参照）である場合、PID制

御部４０は、ウェーハＷの研磨中に、流量制御バルブ４２，５６を操作することで、研磨パッド３の表面温度を変化させることができる。パッド温度調整部材１１が冷却ノズル（図８参照）である場合、ＰＩＤ制御部４０は、ウェーハＷの研磨中において、流量制御バルブ５６を操作することで、研磨パッド３の表面温度を変化させることができる。

[0049] パッド温度測定器３９は、ウェーハＷを研磨しているときの研磨パッド３の表面温度を測定し、表面温度の測定値をＰＩＤ制御部４０に送る。ＰＩＤ制御部４０は、研磨パッド３の表面温度の測定値をパッド温度測定器３９から取得し、研磨パッド３の表面温度の時間変化に基づいて、ＰＩＤパラメータを算定するように構成されている。

[0050] ＰＩＤパラメータは、リミットサイクル法、ステップ応答法、およびジューグ・ニコルスの限界感度法のうちのいずれかを用いて、研磨パッド３の表面温度の時間変化に基づいて算定される。これらの方法によって算定されたＰＩＤパラメータをファジィ推論に基づいて調整してもよく、目標値追従性と外乱抑制性とをともに最適化することができる２自由度ＰＩＤ方式を用いてＰＩＤパラメータを算定してもよい。

[0051] ＰＩＤ制御部４０は、上述の方法により算定されたＰＩＤパラメータを備えたＰＩＤ演算式（後述する）を用いて、研磨パッド３の温度目標値と表面温度の測定値との偏差を最小にするための流量制御バルブ４２，５６の操作量を算定する。そして、ＰＩＤ制御部４０は、ウェーハＷの研磨中において、算定された操作量に従って流量制御バルブ４２，５６を操作する。

[0052] ＰＩＤ制御部４０は、ウェーハＷの研磨中において、自動的にＰＩＤパラメータを算定するように構成されている。以下、ＰＩＤパラメータを算定する方法の一例であるリミットサイクル法について、図面を参照して説明する。

[0053] 図９はリミットサイクル法を説明するための図である。図９において、符号ＰＶは研磨パッド３の表面温度の測定値を示しており、符号ＭＶは流量制御バルブ４２，５６の操作量を示しており、符号ＳＶは研磨パッド３の表面

温度の温度目標値を示している。なお、図9における測定値PVと時間との関係を示すグラフ（図9の上側のグラフ）において、縦軸は測定値PVを示しており、横軸は時間を示している。図9における流量制御バルブ42，56の操作量MVと時間との関係を示すグラフ（図9の下側のグラフ）において、縦軸は流量制御バルブ42，56の操作量MVを示しており、横軸は時間を示している。

[0054] 流量制御バルブ42，56が全開と全閉とを繰り返すように流量制御バルブ42，56の操作量が決定される。より具体的には、第1流量制御バルブ42が全開（操作量100%）であるとき、第2流量制御バルブ56は全閉（操作量0%）である。さらに、第2流量制御バルブ56が全開（操作量100%）であるとき、第1流量制御バルブ42は全閉（操作量0%）である。このように、流量制御バルブ42，56が全開と全閉とを繰り返す動作は流量制御バルブ42，56の2位置動作と呼ばれる。

[0055] 流量制御バルブ42，56の2位置動作の制御について、図10を参照しつつ説明する。図10は流量制御バルブ42，56の2位置動作を示す図である。図10において、縦軸は流量制御バルブ42，56の操作量MVを示しており、横軸は偏差eを示している。第1流量制御バルブ42の操作量が0%であり、かつ第2流量制御バルブ56の操作量が100%であるとき、流量制御バルブ42，56の操作量は-Mである。第1流量制御バルブ42の操作量が100%であり、かつ第2流量制御バルブ56の操作量が0%であるとき、流量制御バルブ42，56の操作量は+Mである。

[0056] 図9に示すように、測定値PVが温度目標値SVよりも高いときには、PID制御部40は、第1流量制御バルブ42を操作量0%で全閉にし、かつ第2流量制御バルブ56を操作量100%で全開にして、研磨パッド3の表面温度を低下させる。測定値PVが温度目標値SVよりも低いときは、PID制御部40は、第1流量制御バルブ42を操作量100%で全開にし、かつ第2流量制御バルブ56を操作量0%で全閉にして、研磨パッド3の表面温度を上昇させる。言い換えれば、PID制御部40は、測定値PVが温度

目標値 S_V よりも高いときには、冷却側の操作量 $-M$ を出力し、測定値 P_V が温度目標値 S_V よりも低いときには、加熱側の操作量 $+M$ を出力する。このように、 PID 制御部 40 は、流量制御バルブ 42, 56 を繰り返し開閉させて、研磨パッド 3 の表面温度を周期的に変化させる。このような周期的な温度変化はリミットサイクル波形と呼ばれる。発生させるリミットサイクル波形の周期は、2～3 周期でもよい。

[0057] ウェーハ W の研磨が進行するにつれて研磨パッド 3 の表面温度は徐々に上昇するため、 PID 制御部 40 は、第 1 開閉バルブ 41 を閉じた状態において、流量制御バルブ 56 の開閉を繰り返すことによっても、リミットサイクル波形を発生させることができる。つまり、 PID 制御部 40 は、測定値 P_V が温度目標値 S_V よりも高いときには、流量制御バルブ 56 を操作量 100% で全開とし、測定値 P_V が温度目標値 S_V よりも低いときには流量制御バルブ 56 を操作量 0% で全閉としてもよい。

[0058] パッド温度調整部材 11 が冷却ノズルである場合において、 PID 制御部 40 は、研磨パッド 3 の表面上に供給される冷却流体の流量を制御することにより、リミットサイクル波形を発生させることができる。つまり、測定値 P_V が温度目標値 S_V よりも高いときには、 PID 制御部 40 は、流量制御バルブ 56 を全開にして、研磨パッド 3 の表面上に冷却流体を供給する。測定値 P_V が温度目標値 S_V よりも低いときには、 PID 制御部 40 は、流量制御バルブ 56 を全閉にして、研磨パッド 3 の表面への冷却流体の供給を停止する。

[0059] PID 制御部 40 は、発生したリミットサイクル波形に基づいて研磨パッド 3 の表面温度の振幅 X およびむだ時間 L_t を決定する。むだ時間 L_t は、第 1 流量制御バルブ 42 を全閉し、かつ第 2 流量制御バルブ 56 を全開した時刻から、パッド表面温度が下降し始める時刻までの時間差 L_1 を求め、第 1 流量制御バルブ 42 を全開し、かつ第 2 流量制御バルブ 56 を全閉した時刻から、パッド表面温度が上昇し始める時刻までの時間差 L_2 を求め、時間差 L_1 と時間差 L_2 との和を 2 で割り算することで得られる。つまり、むだ

時間 L_t は下記式 (1) から決定することができる。

$$L_t = (L_1 + L_2) / 2 \quad (1)$$

[0060] 振幅 X は、研磨パッド 3 の温度目標値 SV とパッド表面温度の極大値との差 (絶対値) A_1 を算出し、研磨パッド 3 の温度目標値 SV とパッド表面温度の極小値との差 (絶対値) A_2 を算出し、差 A_1 と差 A_2 との和を 2 で割り算することで求められる。つまり、振幅 X は、下記式 (2) から決定することができる。

$$X = (A_1 + A_2) / 2 \quad (2)$$

[0061] PID 制御部 40 は、流量制御バルブ 42, 56 の操作量の振幅 M 、研磨パッド 3 の表面温度の振幅 X 、およびむだ時間 L_t を用いて、限界感度 K_c および限界周期 T_c をそれぞれ算出する。限界感度 K_c は下記式 (3) を用いることによって求められ、限界周期 T_c は下記式 (4) を用いることによって求められる。

$$K_c = 4 \times M / (\pi \times X) \quad (3)$$

$$T_c = 4 \times L_t \quad (4)$$

[0062] PID 制御部 40 は、算定された限界感度 K_c および限界周期 T_c から、PID パラメータを算定する。PID パラメータは、流量制御バルブ 42, 56 を PID 制御するために必要なパラメータであり、比例ゲイン K_p と、積分時間 T_i と、微分時間 T_d とを含んでいる。以下、PID パラメータを算定する方法について説明する。

[0063] 図 11 は PID パラメータの算定に用いられる係数の一例を示す図である。図 11 には、定値制御向き (Ziegler and Nichols) および追値制御向き (Chien, Hrones, and Reswick) の制御ルールにおける PID パラメータ (および PI パラメータ) の算定に用いられる係数が表されている。なお、PID パラメータを算定するための係数は図 11 に表された数値に限定されるものではない。これら係数はウェーハ W の研磨条件に応じて予め決定されている。所定の係数と限界感度 K_c および限界周期 T_c とを、それぞれ、かけ算することによって、PI

Dパラメータ（つまり、比例ゲイン K_p 、積分時間 T_i 、および微分時間 T_d ）を算定することができる。

[0064] 上述したように、PID制御部40は、この算定されたPIDパラメータを備えたPID演算式を用いて、温度目標値SVと研磨パッド3の表面温度の測定値PVとの偏差を最小にするための流量制御バルブ42, 56の操作量を算定する。PID演算式は、

[数1]

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

と表すことができる。

[0065] 図12はPIDパラメータを算定するときのフィードバック制御系を示す図である。図12に示すように、測定値PVと温度目標値SVとの偏差 e に対して、非線形要素 $N(X)$ としての偏差 e を基準とした流量制御バルブ42, 56の2位置動作を行い、偏差 e を最小にするための制御対象 $P(j\omega)$ への入力、すなわち、流量制御バルブ42, 56の操作量MVを算定する。このようにして、PID制御部40は、流量制御バルブ42, 56を操作して、研磨パッド3の表面温度を所望の目標温度に維持する。

[0066] 本実施形態では、PID制御部40は、専用のコンピュータまたは汎用のコンピュータから構成される。図13は、PID制御部40の構成を示す模式図である。PID制御部40は、プログラムやデータなどが格納される記憶装置110と、記憶装置110に格納されているプログラムに従って演算を行うCPU（中央処理装置）などの処理装置120と、データ、プログラム、および各種情報を記憶装置110に入力するための入力装置130と、処理結果や処理されたデータを出力するための出力装置140と、インターネットなどのネットワークに接続するための通信装置150を備えている。

[0067] 記憶装置110は、処理装置120がアクセス可能な主記憶装置111と、データおよびプログラムを格納する補助記憶装置112を備えている。主記憶装置111は、例えばランダムアクセスメモリ（RAM）であり、補助

記憶装置 112 は、ハードディスクドライブ（HDD）またはソリッドステートドライブ（SSD）などのストレージ装置である。

[0068] 入力装置 130 は、キーボード、マウスを備えており、さらに、記録媒体からデータを読み込むための記録媒体読み込み装置 132 と、記録媒体が接続される記録媒体ポート 134 を備えている。記録媒体は、非一時的な有形物であるコンピュータ読み取り可能な記録媒体であり、例えば、光ディスク（例えば、CD-ROM、DVD-ROM）や、半導体メモリ（例えば、USBフラッシュドライブ、メモリーカード）である。記録媒体読み込み装置 132 の例としては、CDドライブ、DVDドライブなどの光学ドライブや、カードリーダーが挙げられる。記録媒体ポート 134 の例としては、USB端子が挙げられる。記録媒体に記録されているプログラムおよび／またはデータは、入力装置 130 を介してPID制御部 40 に導入され、記憶装置 110 の補助記憶装置 112 に格納される。出力装置 140 は、ディスプレイ装置 141、印刷装置 142 を備えている。印刷装置 142 は省略してもよい。上述した温度表示器 45 は、PID制御部 40 のためのディスプレイ装置として用いてもよい。この場合は、ディスプレイ装置 141 は省略してもよい。

[0069] PID制御部 40 は、記憶装置 110 に電氣的に格納されたプログラムに従って動作する。図 14 はプログラムに従って動作するPID制御部 40 の動作ステップを示すフローチャートである。PID制御部 40 は、研磨ヘッド 1 に指令を与えて、ウェーハ W を研磨パッド 3 の表面に押し付けてウェーハ W を研磨する動作を研磨ヘッド 1 に実行させるステップ（図 14 のステップ 1 参照）と、ウェーハ W の研磨中において、流量制御バルブ 42, 56 を操作することで、研磨パッド 3 の表面温度を変化させるステップと（図 14 のステップ 2 参照）、研磨パッド 3 の表面温度を測定する動作をパッド温度測定器 39 に実行させ、研磨パッド 3 の表面温度の測定値を取得するステップと（図 14 のステップ 3, 4 参照）、研磨パッド 3 の表面温度の時間変化に基づいて、PIDパラメータを算定するステップと（図 14 のステップ 5

参照)、PIDパラメータを備えたPID演算式を用いて、温度目標値SVと研磨パッド3の表面温度の測定値PVとの偏差を最小にするための流量制御バルブ42, 56の操作量を計算するステップと(図14のステップ6参照)、この操作量に基づいて流量制御バルブ42, 56を操作するステップ(図14のステップ7参照)とを実行する。

[0070] これらステップをPID制御部40に実行させるためのプログラムは、非一時的な有形物であるコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録され、記録媒体を介してPID制御部40に提供される。または、プログラムは、インターネットなどの通信ネットワークを介してPID制御部40に提供されてもよい。

[0071] 次に、PIDパラメータを算定する方法の他の例であるステップ応答法について、図面を参照して説明する。図15はステップ応答法を説明するための図である。図15において、符号PVは研磨パッド3の表面温度の測定値を示しており、符号MVは流量制御バルブ42, 56の操作量を示している。図15の縦軸は測定値PVおよび操作量MVを示しており、図15の横軸は時間を示している。

[0072] 図15に示すように、PID制御部40は、第1流量制御バルブ42を全閉から全開に切り替え、かつ第2流量制御バルブ56を全開から全閉に切り替えて、研磨パッド3の表面温度を変化させる。パッド温度測定器39は、このときの研磨パッド3の表面温度を測定し、PID制御部40に送る。PID制御部40は、この測定値をパッド温度測定器39から取得し、研磨パッド3の表面温度の時間変化を示す曲線の接線TLの傾きRを算定し、接線TLの傾きR、むだ時間Lt、および時定数 τ を決定する。なお、図15に示す測定値PVの曲線はプロセス反応曲線と呼ばれる。

[0073] PID制御部40は、第1開閉バルブ41を閉じた状態において、第2流量制御バルブ56を全開から全閉に切り替えることによっても、プロセス反応曲線を発生させることができる。パッド温度調整部材11が冷却ノズルである場合も、PID制御部40は、研磨パッド3の表面上に供給される冷却

流体の流量を制御することにより、プロセス反応曲線を発生させることができる。つまり、P I D制御部40は、流量制御バルブ56を全開から全閉に切り替えることにより、プロセス反応曲線を発生させることができる。

[0074] 図15に示すように、接線TLは、測定値PVを0%から100%までの数値で表したとき、測定値PVが所定の数値（本実施形態では63%）まで上昇したときのプロセス反応曲線上の点P1を通る接線である。傾きRは接線TLに基づいて求められる。むだ時間Ltは、第1流量制御バルブ42を全開とした時刻から、接線TLと横軸との交点P2における時刻までの時間差を算定することで求められる。時定数τは、交点P2における時刻から点P1に対応する時刻までの時間差を算定することで求められる。

[0075] P I D制御部40は、接線TLの傾きR、むだ時間Lt、および時定数τを用いてP I Dパラメータを算定する。より具体的には、比例ゲインKpは下記式（6）を用いることによって求めることができる。

$$Kp = a / (R \times Lt) \quad (6)$$

[0076] 積分時間Tiは下記式（7）または下記式（8）を用いることによって求めることができる。

$$Ti = b \times Lt \quad (7)$$

$$Ti = b \times \tau \quad (8)$$

[0077] 微分時間Tdは下記式（9）を用いることによって求めることができる。

$$Td = c \times Lt \quad (9)$$

ここで、上記式（6）～（9）における係数a、b、cは所定の数値であり、例えば、係数aは1.2であり、係数bは2.0であり、係数cは0.5である。

[0078] P I D制御部40は、この算定されたP I Dパラメータを備えたP I D演算式（上記式（5）参照）を用いて温度目標値SVと研磨パッド3の表面温度の測定値PVとの偏差を最小にするための流量制御バルブ42、56の操作量を算定する。

[0079] 次に、P I Dパラメータを算定する方法のさらに他の例であるジークラ・

ニコルスの限界感度法について、図面を参照して説明する。図16はジークラ・ニコルスの限界感度法を説明するための図である。図16において、符号PVは研磨パッド3の表面温度の測定値を示しており、符号SVは研磨パッド3の表面温度の温度目標値を示しており、符号Puは限界ゲインの周期を示している。曲線Kp1は第1のゲインによる測定値PVの制御曲線であり、曲線Kp2は第1のゲインKp1よりも大きな第2のゲインによる測定値PVの制御曲線であり、曲線Kp3は第2のゲインKp2よりも大きな第3のゲインによる測定値PVの制御曲線である（ $Kp1 < Kp2 < Kp3$ ）。図16の縦軸は測定値PVを示しており、図16の横軸は時間を示している。

[0080] PID制御部40は、積分時間Tiおよび微分時間Tdを無効にした状態で、第1のゲインKp1、第2のゲインKp2、および第3のゲインKp3をこの順に増加させて、温度目標値SVと測定値PVとの間にハンチング（測定値PVの波形）を発生させる。一実施形態では、ゲインの数値は10ずつ増加される。図16では、第3のゲインKp3を出力したときに、ハンチングが生じている。この第3のゲインKp3は限界ゲインKuに決定される。

[0081] PID制御部40は、この限界ゲインKuの周期Puを算定する。PID制御部40は、限界ゲインKuおよび周期Puを用いて、PIDパラメータ（比例ゲインKp、積分時間Ti、微分時間Td）を算定する。より具体的には、比例ゲインKpは下記式（10）を用いることによって求めることができ、積分時間Tiは下記式（11）を用いることによって求めることができ、微分時間Tdは下記式（12）を用いることによって求めることができる。

$$Kp = a \times Ku \quad (10)$$

$$Ti = b \times Pu \quad (11)$$

$$Td = c \times Pu \quad (12)$$

ここで、上記式（10）～（12）における係数a、b、cは所定の数値

であり、例えば、係数 a は 0.6 であり、係数 b は 0.5 であり、係数 c は 0.125 である。

[0082] PID制御部40は、この算定されたPIDパラメータを備えたPID演算式（上記式（5）参照）を用いて温度目標値SVと研磨パッド3の表面温度の測定値PVとの偏差を最小にするための流量制御バルブ42, 56の操作量を算定する。

[0083] 本実施形態によれば、PID制御部40は、ウェーハWの研磨中において、研磨パッド3の表面温度の時間変化に基づいてPIDパラメータを自動的に算定することができるため、PIDパラメータを決定するための試行錯誤による実験、特別な知識や経験、ノウハウは不要であり、熟練者に頼る必要はない。したがって、短時間で、かつ効率的にPIDパラメータを決定することができる。さらに、本実施形態によれば、時間や人員を大幅に削減することができるため、コストを削減することができる。

[0084] PID制御部40は、上述したPID演算式を用いて計算した操作量で流量制御バルブ42, 56を操作した結果として予想される研磨パッド3の表面温度のシミュレーションを実行するように構成されている。シミュレーション結果が表示される研磨パッド3の表面位置はユーザーによって任意に決定され、PID制御部40は、PIDパラメータおよび温度目標値SVに基づいてシミュレーションを実行する。

[0085] さらに、PID制御部40は、温度目標値SVを変更した場合に予想される研磨パッド3の表面温度の時間推移を示すシミュレーションをさらに実行するように構成されている。図17は研磨パッド3の表面温度の時間推移を示すシミュレーション結果を示す図である。図17に示すように、研磨パッド3の表面温度の時間推移のシミュレーション結果は温度表示器45に表示される。シミュレーション結果が表示される研磨パッド3の表面位置はユーザーによって任意に決定される。

[0086] ウェーハWの研磨プロセスごとに適切なPIDパラメータは異なるため、PID制御部40は、ウェーハWの研磨プロセスごとにPIDパラメータを

自動的に決定するように構成されている。ウェーハWの研磨プロセスは、例えば、ウェーハWの膜厚、研磨パッド、スラリーの種類によって変更される。

[0087] 図18は、PIDパラメータがウェーハWの研磨プロセスごとに算定される様子を示すフローチャートである。まず、適切なPIDパラメータを算定するために、リミットサイクル法、ステップ応答法、およびジググラ・ニコルスの限界感度法のうちのいずれかを用いて1枚のウェーハWを研磨する（図18のステップ1参照）。このとき、ウェーハWは、PIDパラメータを算定するための研磨レシピに従って研磨される。なお、リミットサイクル法を用いる場合、1枚のウェーハWを研磨するときの温度目標値SVは、実際の研磨プロセスにおいてウェーハWを研磨するときの温度目標値と同じである。

[0088] リミットサイクル法、ステップ応答法、およびジググラ・ニコルスの限界感度法から最も適切なPIDパラメータを算定し（図18のステップ2参照）、算定されたPIDパラメータを反映したウェーハWの研磨を実行する（図18のステップ3参照）。このウェーハWの研磨時における研磨プロセスとは異なる研磨プロセスによりウェーハWを研磨する場合は、再度、1枚のウェーハWを研磨して、最も適切なPIDパラメータを算定する（図18のステップ4参照）。なお、研磨パッド3の温度目標値SVのみを変更する場合、PID制御部40は、予想される研磨パッド3の表面温度のシミュレーションを実行してもよい（図18のステップ5参照）。この場合、温度表示器45には、流量制御バルブ42、56を操作してから研磨パッド3の表面温度が変化するまでの時間、研磨パッド3の表面温度の変化に生じたオーバーシュートの大きさ、温度目標値SVと測定値PVとの偏差、研磨パッド3の表面温度の測定値PVの波形に生じたハンチングの大きさが表示されてもよい。

[0089] 上述した実施形態は、本発明が属する技術分野における通常の知識を有する者が本発明を実施できることを目的として記載されたものである。上記実

施形態の種々の変形例は、当業者であれば当然になしうることであり、本発明の技術的思想は他の実施形態にも適用しうることである。したがって、本発明は、記載された実施形態に限定されることはなく、特許請求の範囲によって定義される技術的思想に従った最も広い範囲に解釈されるものである。

産業上の利用可能性

[0090] 本発明は、ウェーハなどの基板を研磨する研磨方法、研磨装置、および該研磨装置の研磨パッドの表面温度を制御するためのコンピュータプログラムを記録した記録媒体に利用可能である。

符号の説明

[0091]	1	研磨ヘッド
	2	研磨テーブル
	3	研磨パッド
	4	研磨液供給ノズル
	5	パッド温度調整システム
	11	パッド温度調整部材
	20	ドレッサ
	30	流体供給システム
	31	流体供給タンク
	32	加熱流体供給管
	33	加熱流体戻り管
	39	パッド温度測定器
	40	PID制御部
	41	第1開閉バルブ
	42	第1流量制御バルブ
	45	温度表示器
	51	冷却流体供給管
	52	冷却流体排出管
	55	第2開閉バルブ

- 5 6 第2 流量制御バルブ
- 6 1 加熱流路
- 6 2 冷却流路
- 7 1 上下動機構（垂直移動機構）
- 1 1 0 記憶装置
- 1 2 0 処理装置
- 1 3 0 入力装置
- 1 4 0 出力装置
- 1 5 0 通信装置

請求の範囲

- [請求項1] 基板を研磨パッドの表面に押し付けて該基板を研磨し、
 前記基板の研磨中に、パッド温度調整部材に流れる流体の流量を制御するための流量制御バルブを操作することで、前記研磨パッドの表面温度を変化させ、
 前記研磨パッドの表面温度を測定し、
 前記研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいて、P I Dパラメータを算定し、
 前記P I Dパラメータを備えたP I D演算式を用いて、温度目標値と前記研磨パッドの表面温度の測定値との偏差を最小にするための前記流量制御バルブの操作量を計算し、
 前記基板の研磨中に、前記操作量に従って前記流量制御バルブを操作することを特徴とする研磨方法。
- [請求項2] 前記研磨パッドの表面温度を測定する工程は、前記研磨パッドの中心と外周部とを含む領域における温度分布を測定する工程を含むことを特徴とする請求項1に記載の研磨方法。
- [請求項3] 前記研磨パッドの表面温度を変化させる工程は、前記基板の研磨中に、パッド温度調整部材を前記研磨パッドの表面に接触させ、または近接させて該パッド温度調整部材に流れる流体の流量を制御するための流量制御バルブを操作することで、前記研磨パッドの表面温度を変化させる工程であることを特徴とする請求項1に記載の研磨方法。
- [請求項4] 前記研磨パッドの表面温度を変化させる工程は、前記基板の研磨中に、パッド温度調整部材から前記研磨パッドの表面上に供給される流体の流量を制御するための流量制御バルブを操作することで、前記研磨パッドの表面温度を変化させる工程であることを特徴とする請求項1に記載の研磨方法。
- [請求項5] 前記流体は、加熱流体および冷却流体であることを特徴とする請求項1に記載の研磨方法。

- [請求項6] 前記PIDパラメータを算定する工程は、リミットサイクル法、ステップ応答法、ジークラ・ニコルスの限界感度法のうちのいずれかを用いて、前記研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいて、PIDパラメータを算定する工程であることを特徴とする請求項1に記載の研磨方法。
- [請求項7] 前記PID演算式を用いて計算した操作量で前記流量制御バルブを操作した結果として予想される前記研磨パッドの表面温度のシミュレーションを実行することを特徴とする請求項1に記載の研磨方法。
- [請求項8] 前記温度目標値を変更した場合に予想される前記研磨パッドの表面温度の時間推移を示すシミュレーションをさらに実行することを特徴とする請求項7に記載の研磨方法。
- [請求項9] 研磨パッドを支持する研磨テーブルと、
基板を前記研磨パッドに押し付ける研磨ヘッドと、
前記研磨パッドの表面温度を調整するパッド温度調整システムとを備え、
前記パッド温度調整システムは、
流体が流れる流路が内部に形成されたパッド温度調整部材と、
前記流路に接続された流体供給管と、
前記流体供給管に取り付けられた流量制御バルブと、
前記研磨パッドの表面温度を測定するパッド温度測定器と、
前記流量制御バルブを操作するPID制御部とを備え、
前記PID制御部は、
前記基板の研磨中において、前記流量制御バルブを操作して、前記研磨パッドの表面温度を変化させ、
前記研磨パッドの表面温度の測定値を前記パッド温度測定器から取得し、
前記研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいて、PIDパラメータを算定し、

前記P I Dパラメータを備えたP I D演算式を用いて、温度目標値と前記研磨パッドの表面温度の測定値との偏差を最小にするための前記流量制御バルブの操作量を計算し、

前記操作量に従って前記流量制御バルブを操作することを特徴とする研磨装置。

[請求項10] 前記パッド温度測定器は、赤外線放射温度計、熱電対温度計、サーモグラフィ、およびサーモパイルのうち、少なくとも1つの温度測定器であることを特徴とする請求項9に記載の研磨装置。

[請求項11] 前記パッド温度測定器は、前記研磨パッドの中心と外周部とを含む領域における温度分布を測定するように構成されていることを特徴とする請求項9に記載の研磨装置。

[請求項12] 前記パッド温度調整システムは、前記パッド温度測定器によって測定された前記研磨パッドの表面温度を表示する温度表示器をさらに備えていることを特徴とする請求項9に記載の研磨装置。

[請求項13] 前記パッド温度調整部材は、前記研磨パッドの表面に冷却流体を吹きかける冷却ノズルであることを特徴とする請求項9に記載の研磨装置。

[請求項14] 前記パッド温度調整部材は、前記研磨パッドの表面に接触可能なパッド接触面を有することを特徴とする請求項9に記載の研磨装置。

[請求項15] 前記P I D制御部は、リミットサイクル法、ステップ応答法、ジューグ・ニコルスの限界感度法のうちのいずれかを用いてP I Dパラメータを算定することを特徴とする請求項9に記載の研磨装置。

[請求項16] 前記P I D制御部は、前記P I D演算式を用いて計算した操作量で前記流量制御バルブを操作した結果として予想される前記研磨パッドの表面温度のシミュレーションを実行するように構成されていることを特徴とする請求項9に記載の研磨装置。

[請求項17] 前記P I D制御部は、前記温度目標値を変更した場合に予想される前記研磨パッドの表面温度の時間推移を示すシミュレーションをさら

に実行するように構成されていることを特徴とする請求項 16 に記載の研磨装置。

[請求項18]

研磨ヘッドに指令を与えて、基板を研磨パッドの表面に押し付けて該基板を研磨する動作を前記研磨ヘッドに実行させるステップと、

パッド温度調整部材に流れる流体の流量を制御するために設けられた流量制御バルブを操作することで、前記研磨パッドの表面温度を変化させるステップと、

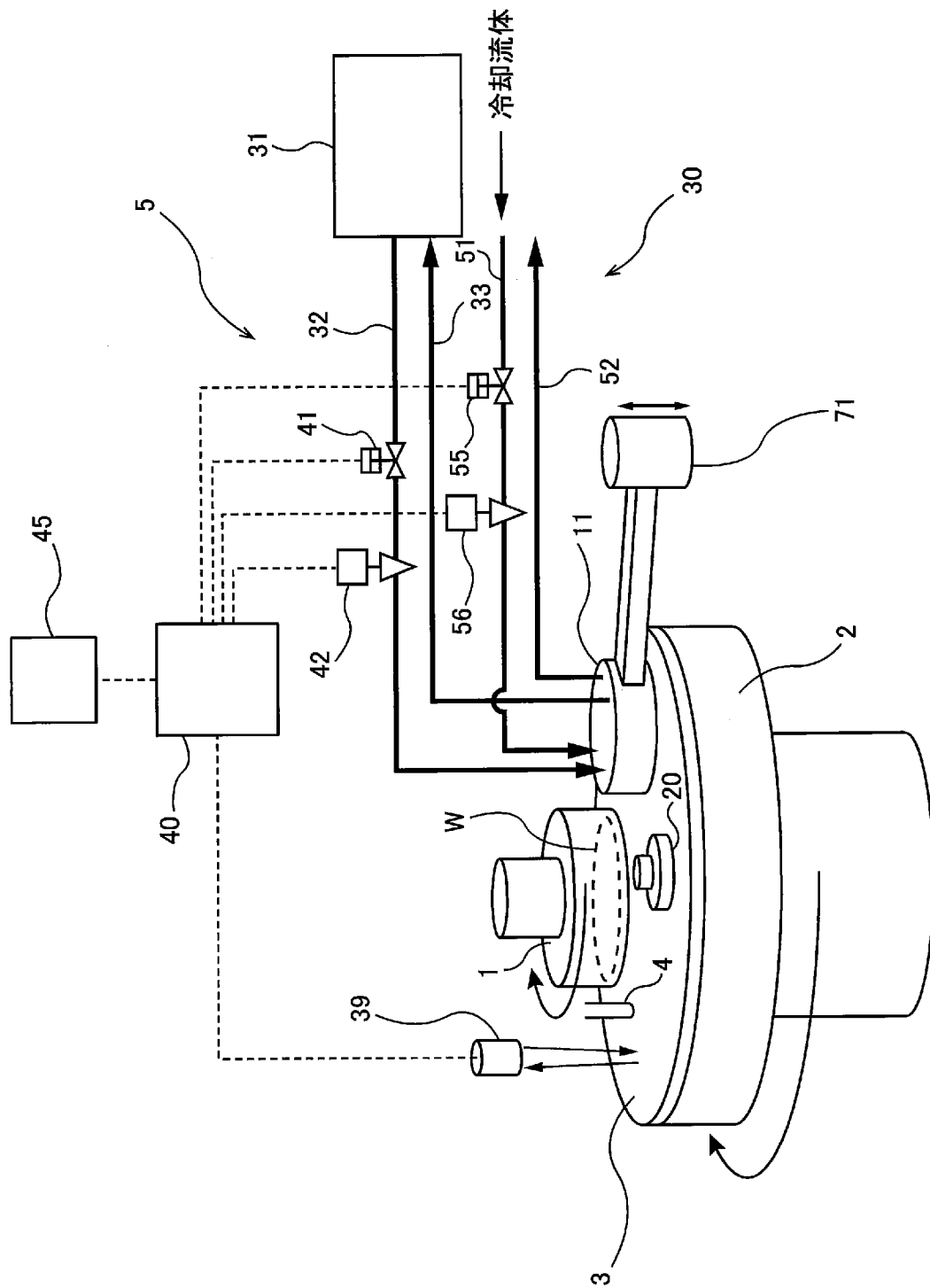
前記研磨パッドの表面温度の測定値を取得するステップと、

前記研磨パッドの表面温度の時間変化に基づいて、PIDパラメータを算定するステップと、

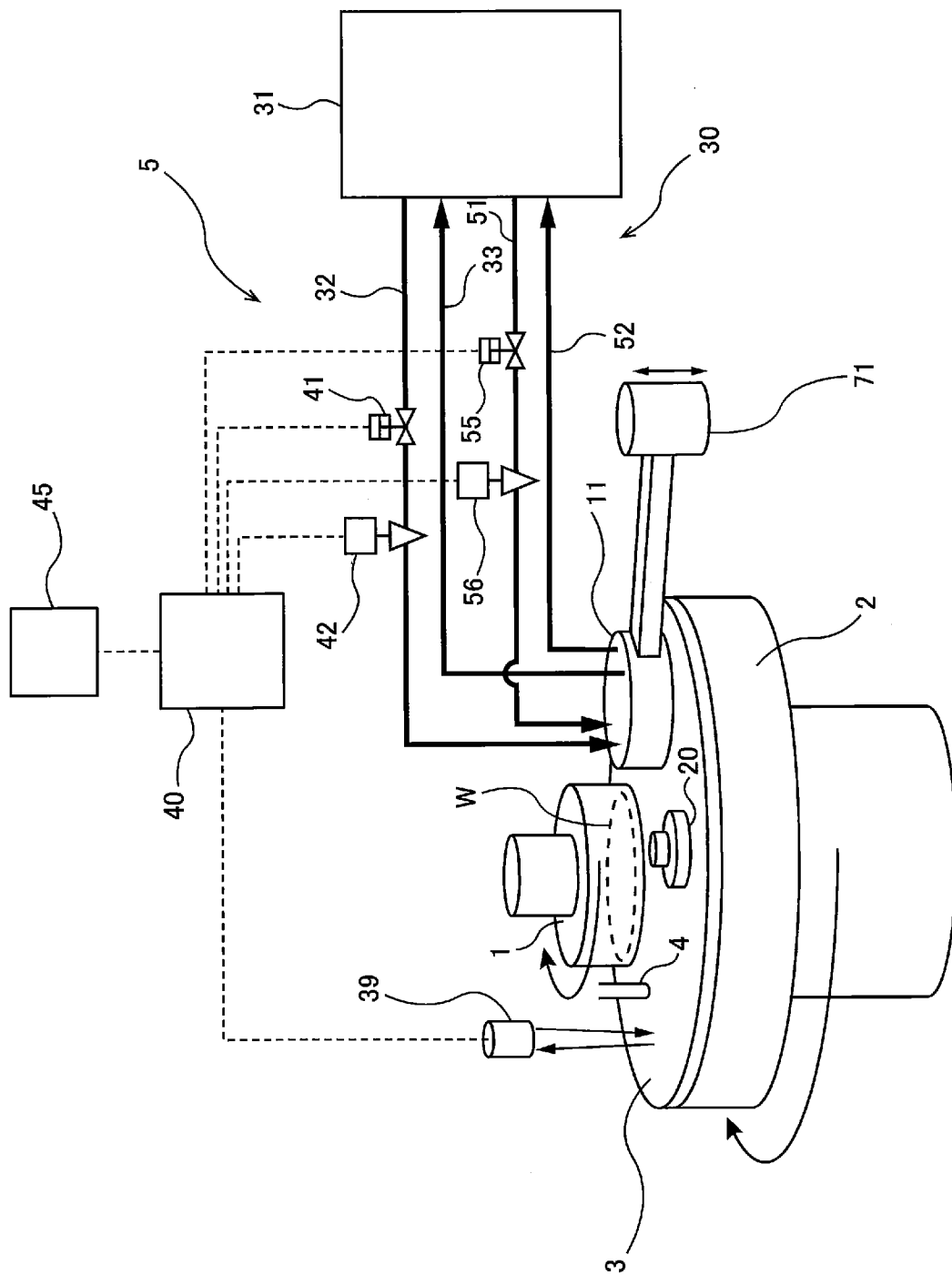
前記PIDパラメータを備えたPID演算式を用いて、温度目標値と前記研磨パッドの表面温度の測定値との偏差を最小にするための前記流量制御バルブの操作量を計算するステップと、

前記操作量に従って前記流量制御バルブを操作するステップをコンピュータに実行させるためのプログラムを記録した非一時的なコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

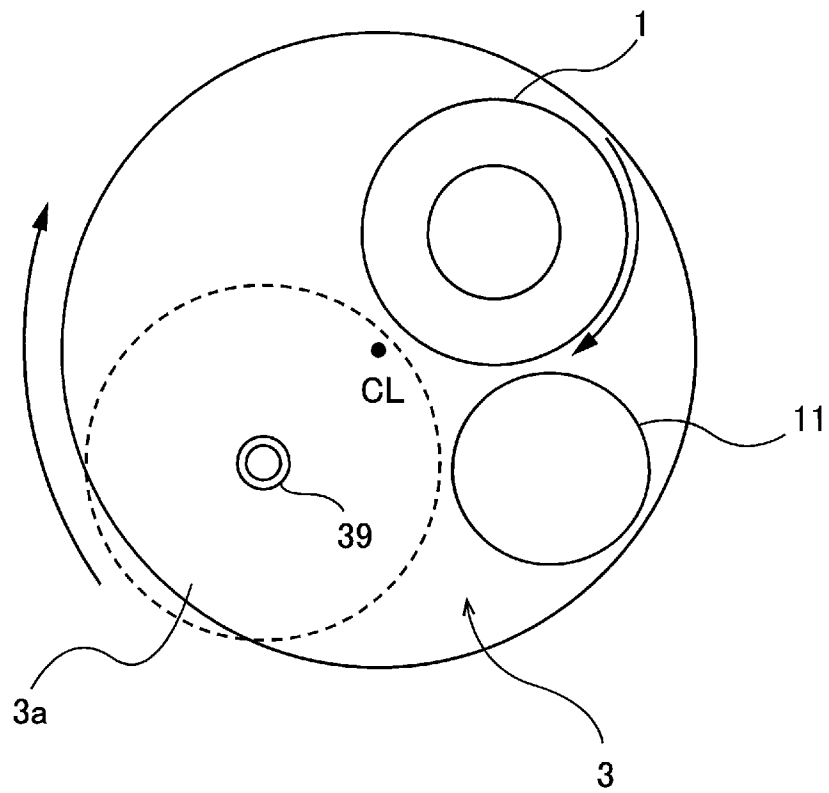
[図1]



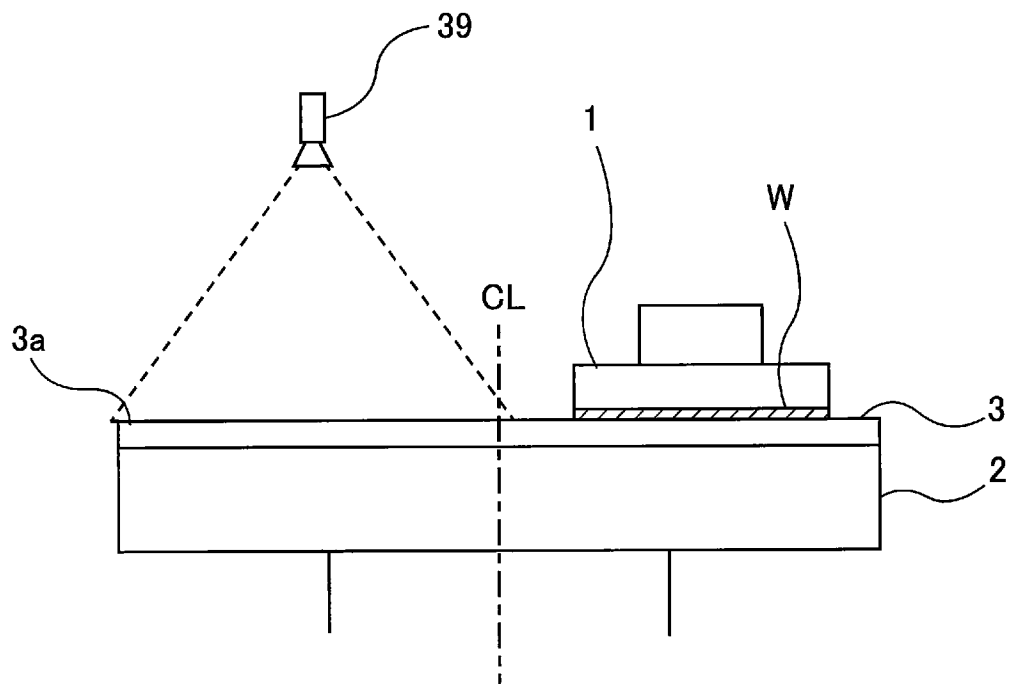
[図2]



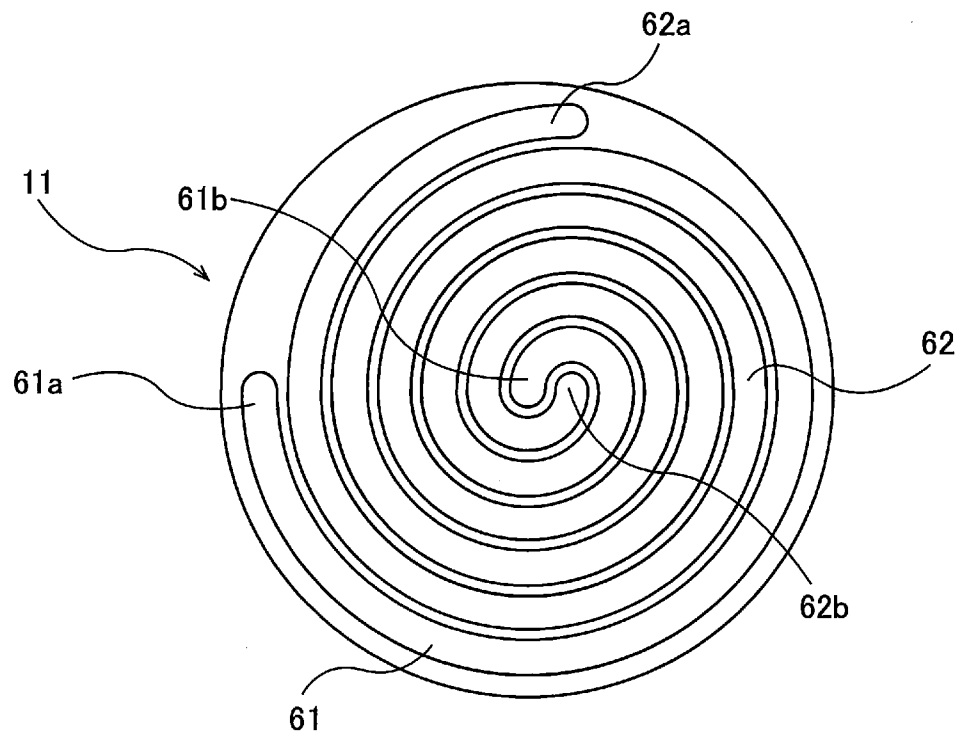
[図3]



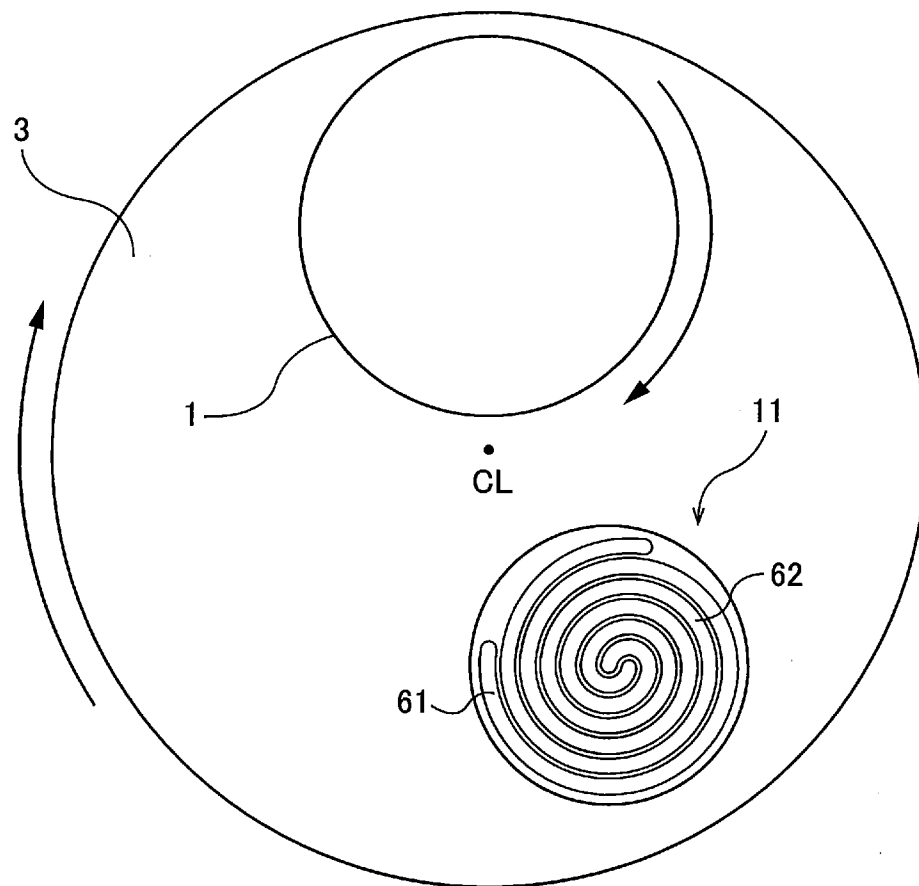
[図4]



[図5]



[図6]



[図7]

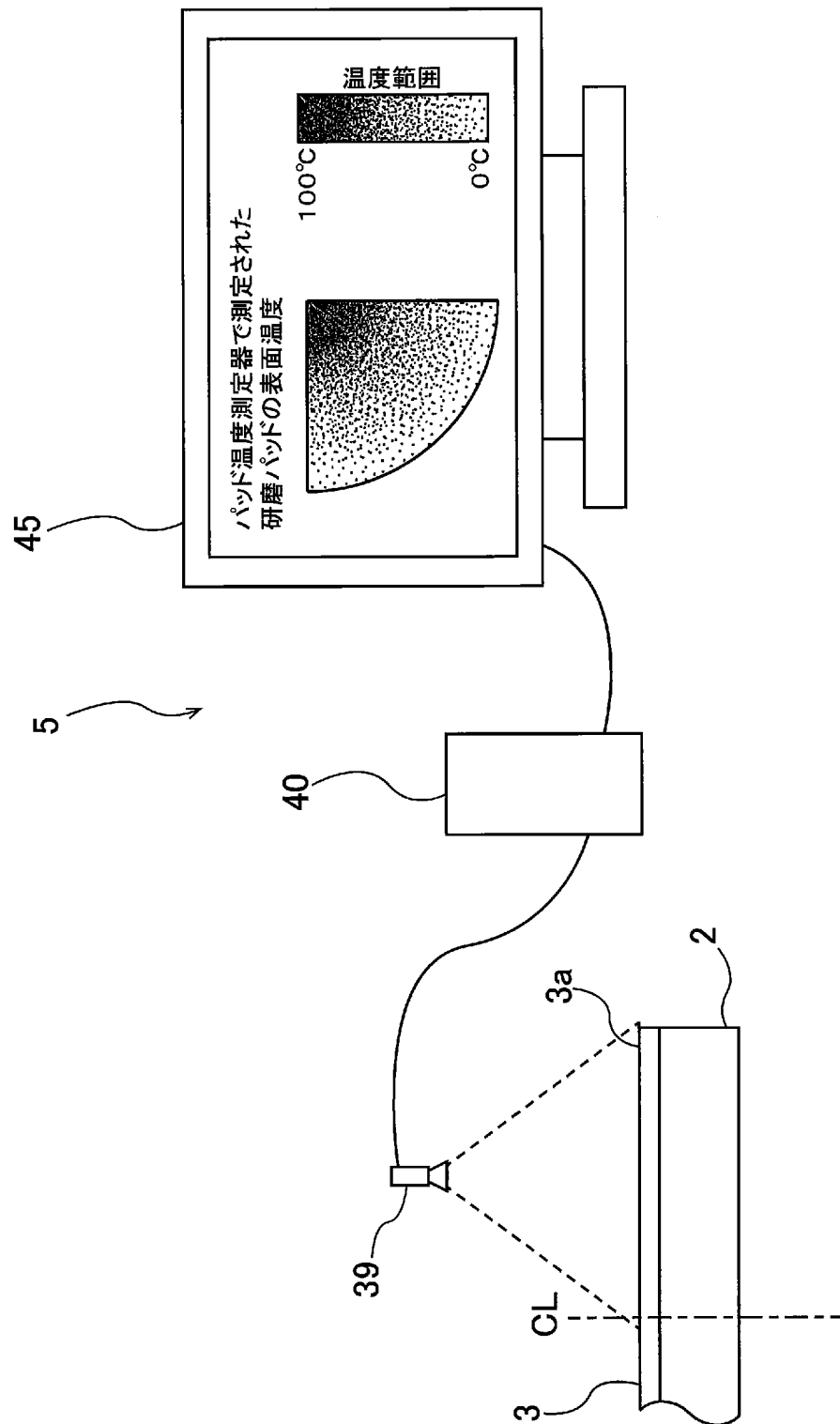
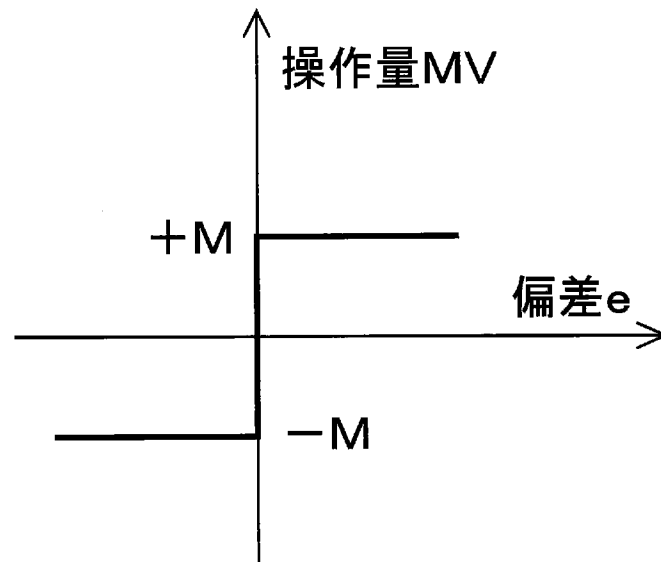


Figure 1 is a schematic diagram of a cooling system for a rotating body. The diagram shows a large circular body 1 with a central circular component 39. A dashed line 3a represents a flow path. A rectangular cooling element 11 is positioned near the center, with dashed lines 12 indicating its internal structure. A cooling fluid inlet 51, controlled by a valve 56, directs the cooling fluid into the system. The text "冷却流体" (Cooling fluid) is written next to the inlet line.

The figure consists of two vertically aligned plots sharing a common horizontal time axis.

- Top Plot (PV vs. time):** Shows a sinusoidal wave representing the Process Variable (PV). A horizontal dashed line indicates the Setpoint (SV). The wave oscillates around SV. Two vertical dashed lines mark specific points on the wave: one at a peak and one at a trough. The horizontal distance from the SV line to the first peak is labeled $L1$. The horizontal distance between the two vertical dashed lines is labeled $L2$. The vertical distance from the SV line to the peak is labeled $A1$. The vertical distance from the SV line to the trough is labeled $A2$.
- Bottom Plot (MV vs. time):** Shows a square-wave signal representing the Manipulated Variable (MV). The signal is low (baseline) and high (setpoint level). The transitions of the MV signal occur at the same time points as the peaks and troughs of the PV signal, as indicated by the vertical dashed lines.

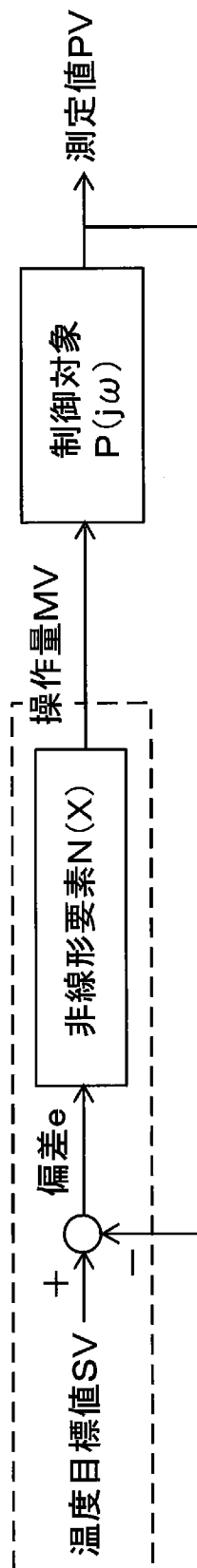
[図10]



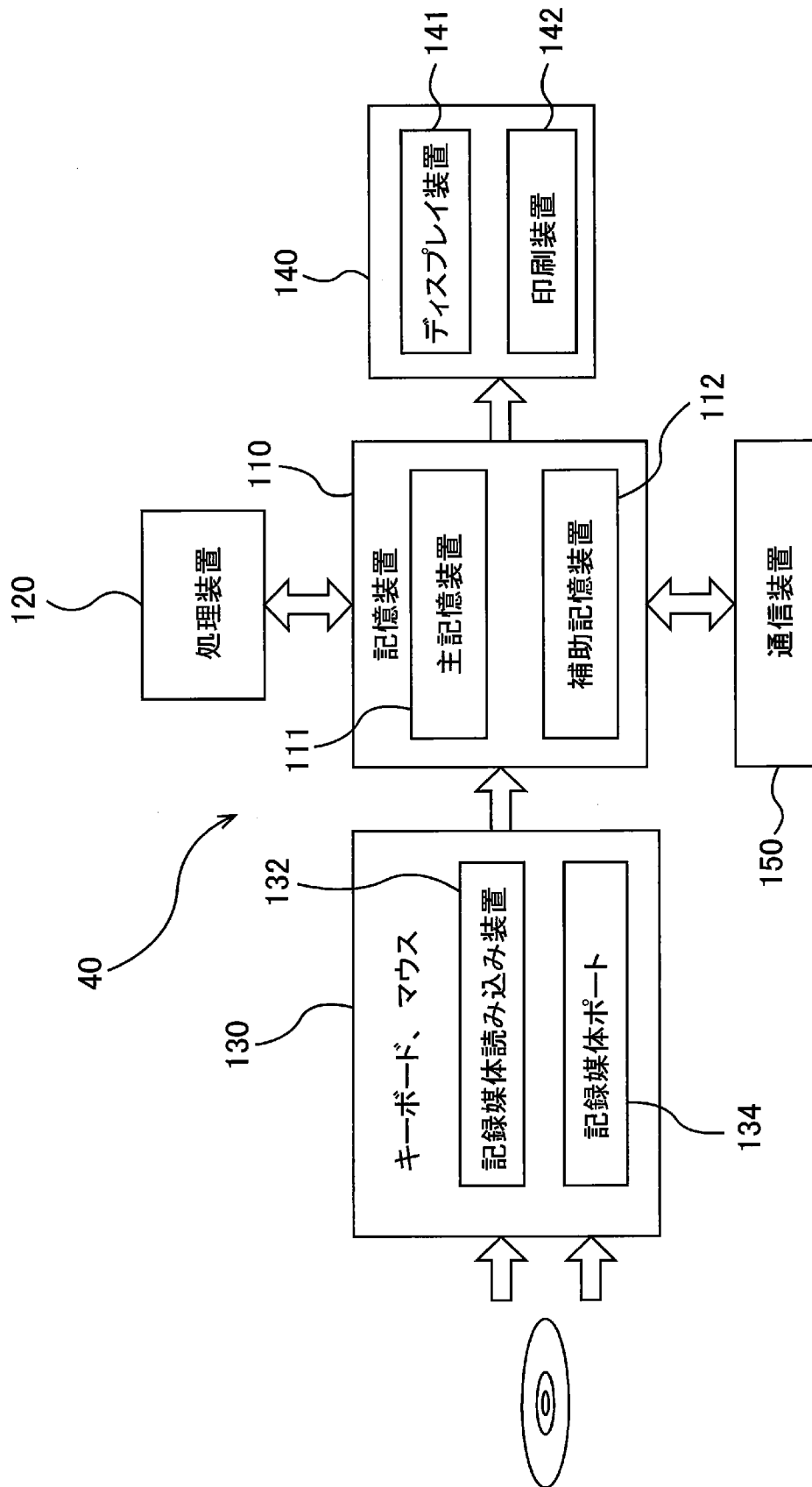
[図11]

制御の種類	K_p	T_i	T_d	
PI制御	$0.45K_c$	$0.83T_c$	—	Z-N法 (定値制御)
PID制御	$0.6K_c$	$0.5T_c$	$0.125T_c$	
PI制御	$0.3K_c$	$1.0T_c$	—	CHR法 (追値制御)
PID制御	$0.45K_c$	$0.6T_c$	$0.1T_c$	

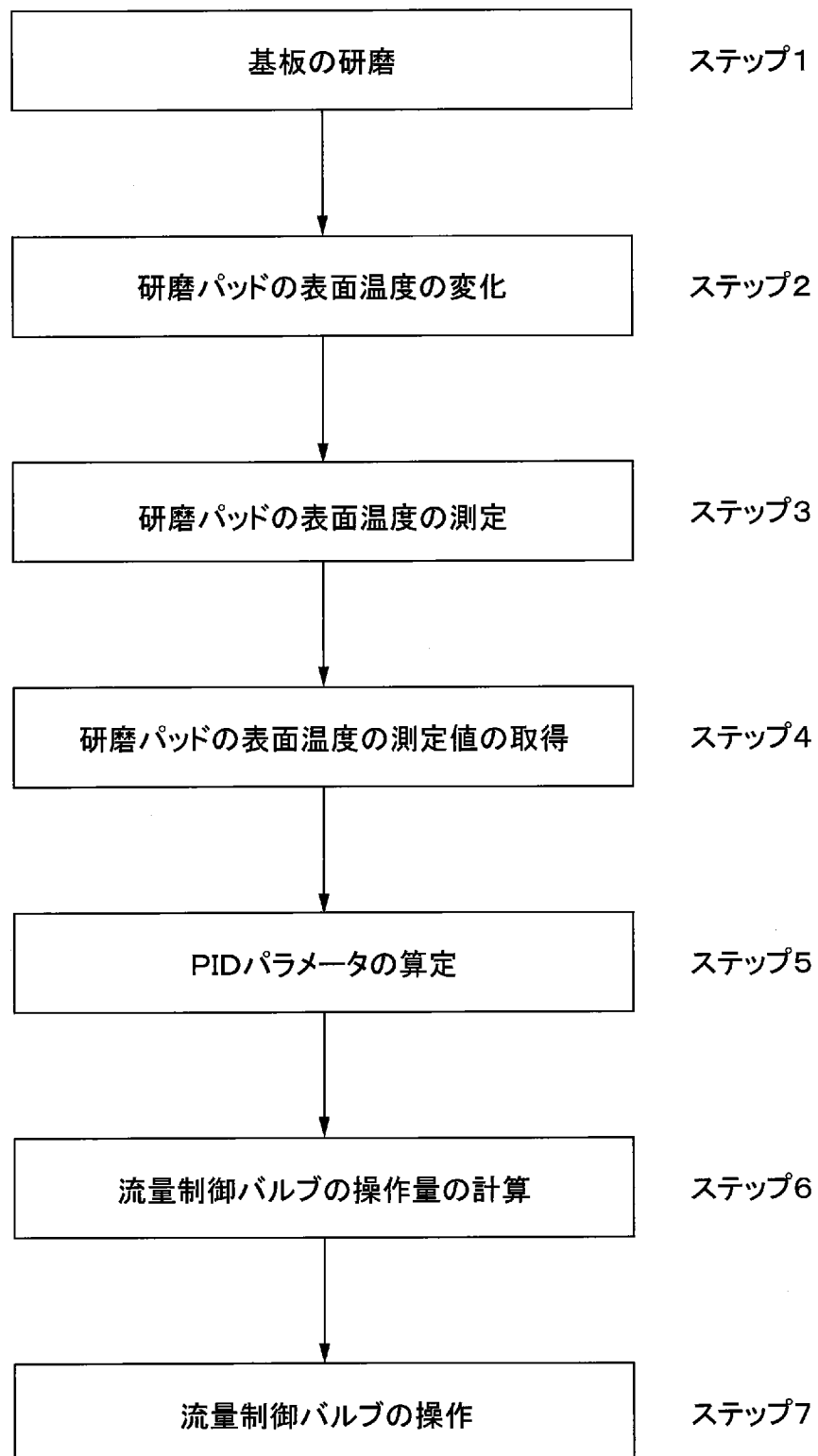
[図12]



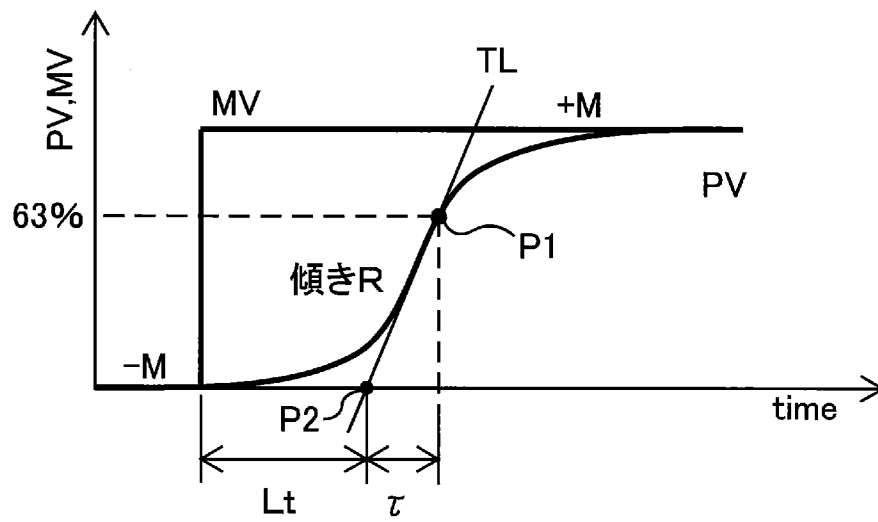
[図13]



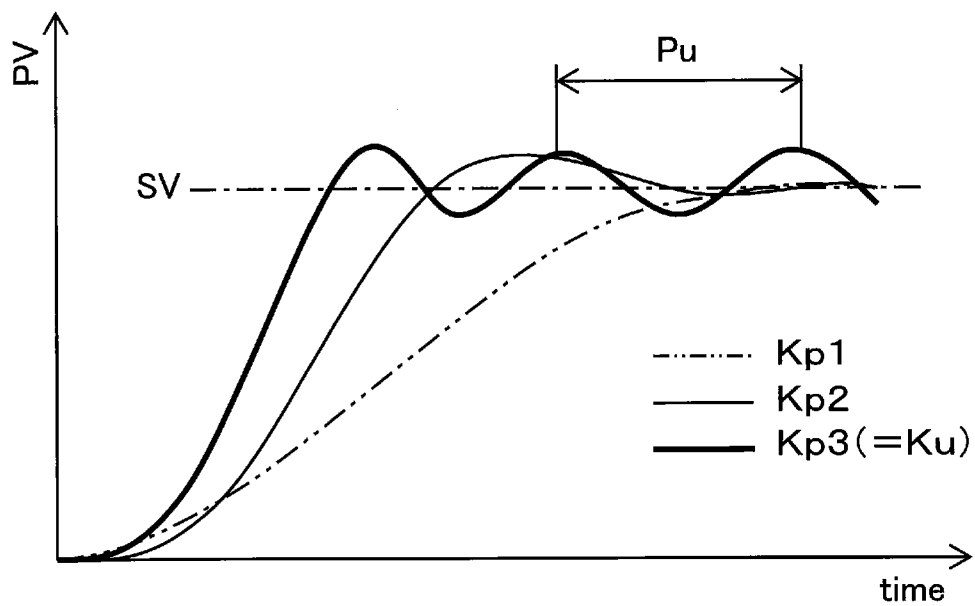
[図14]



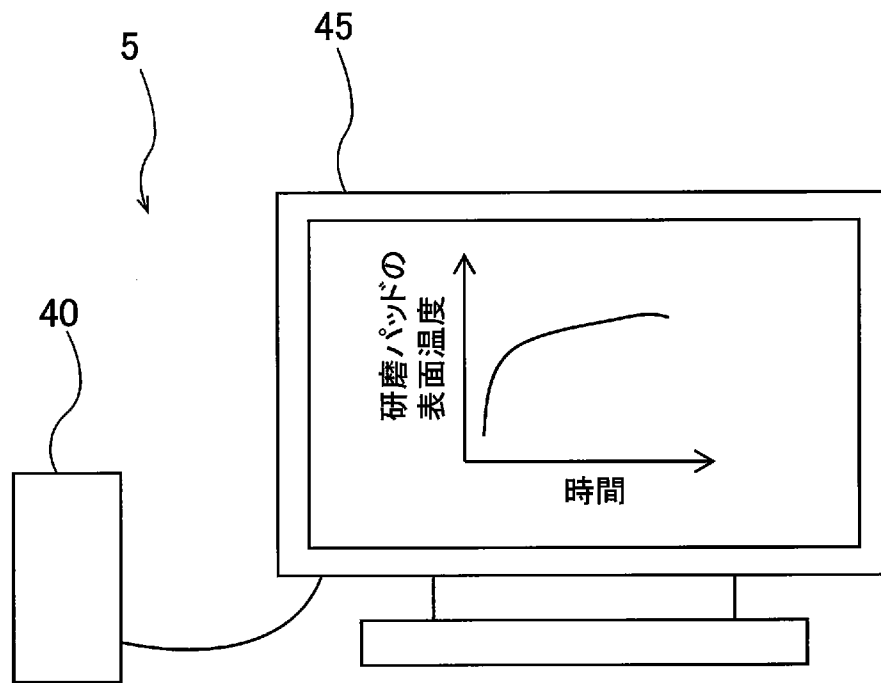
[図15]



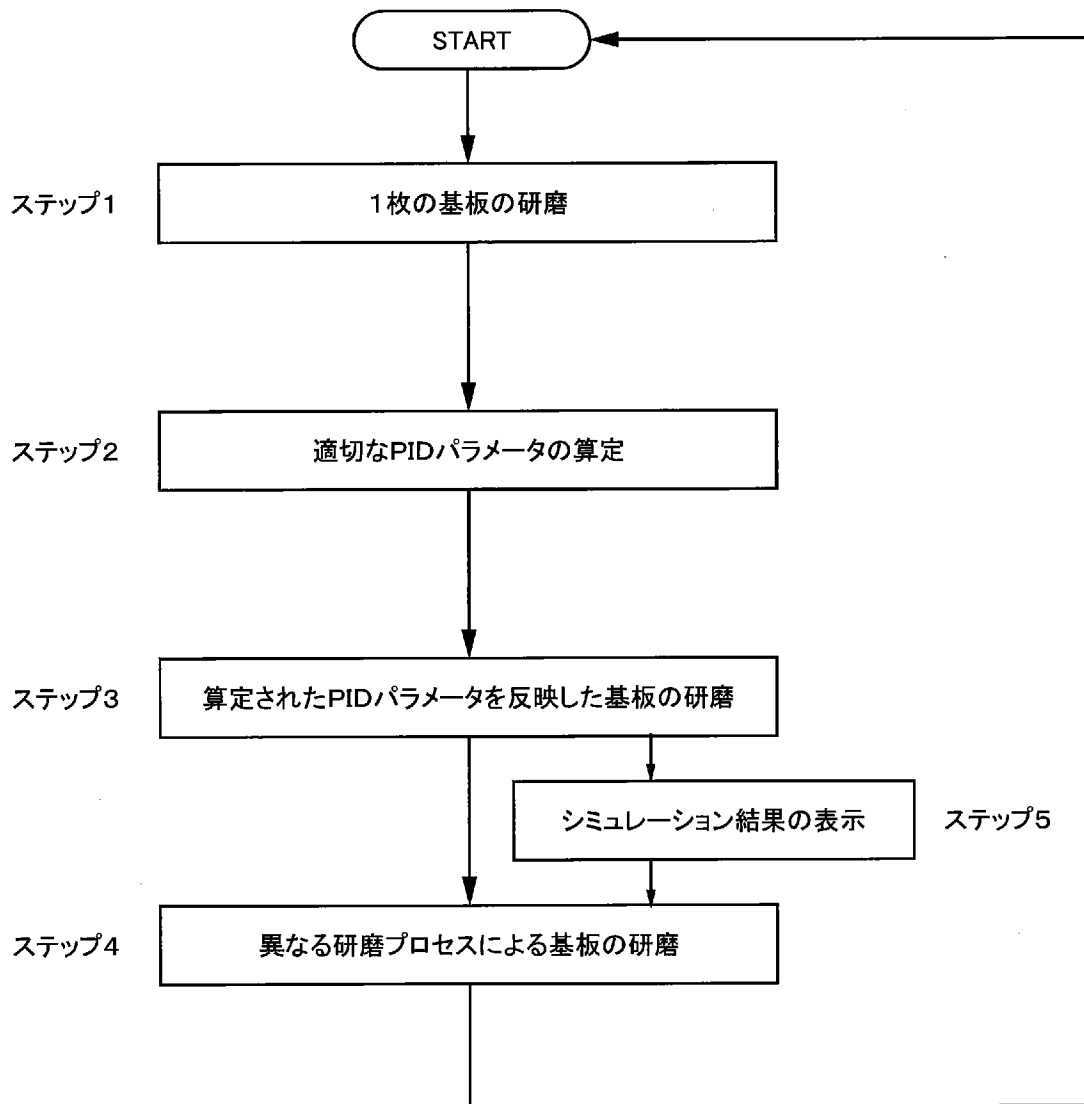
[図16]



[図17]



[図18]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/029453

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B24B37/015(2012.01)i, B24B37/34(2012.01)i, B24B49/14(2006.01)i,
H01L21/304(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B24B37/015, B24B37/34, B24B49/14, H01L21/304

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

DWPI (Derwent Innovation)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2011-136406 A (Ebara Corp.), 14 July 2011 (14.07.2011), paragraphs [0035] to [0069]; fig. 1 to 20 & US 2011/0159782 A1 paragraphs [0059] to [0093]; fig. 1 to 20 & US 2014/0364040 A1 & CN 102179757 A & CN 104842259 A & KR 10-2011-0076784 A	1-18
Y	JP 2014-117824 A (Omron Corp.), 30 June 2014 (30.06.2014), paragraphs [0002] to [0004] & CN 103869694 A	1-18

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
11 September 2017 (11.09.17)

Date of mailing of the international search report
26 September 2017 (26.09.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/029453

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2011-79076 A (Toshiba Corp.), 21 April 2011 (21.04.2011), paragraph [0040]; fig. 1 to 2 & US 2011/0081832 A1 paragraph [0044]; fig. 1 to 2	2, 11
Y	JP 2009-122965 A (Omron Corp.), 04 June 2009 (04.06.2009), paragraphs [0071] to [0074]; fig. 9 to 13 (Family: none)	7-8, 16-17

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. B24B37/015(2012.01)i, B24B37/34(2012.01)i, B24B49/14(2006.01)i, H01L21/304(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. B24B37/015, B24B37/34, B24B49/14, H01L21/304

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

DWPI (Derwent Innovation)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2011-136406 A (株式会社荏原製作所) 2011.07.14, 段落 0035-0069, 図 1-20 & US 2011/0159782 A1, 段落 0059-0093, 図 1-20 & US 2014/0364040 A1 & CN 102179757 A & CN 104842259 A & KR 10-2011-0076784 A	1-18
Y	JP 2014-117824 A (オムロン株式会社) 2014.06.30, 段落 0002-0004 & CN 103869694 A	1-18

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

11.09.2017

国際調査報告の発送日

26.09.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）
郵便番号 100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

中里 翔平

3C

3832

電話番号 03-3581-1101 内線 3324

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2011-79076 A (株式会社東芝) 2011.04.21, 段落 0040, 図 1-2 & US 2011/0081832 A1, 段落 0044, 図 1-2	2, 11
Y	JP 2009-122965 A (オムロン株式会社) 2009.06.04, 段落 0071-0074, 図 9-13 (ファミリーなし)	7-8, 16-17