法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

真空中における接触熱コンダクタンスに関する研究

TANDOU, Takumi / 丹藤, 匠

(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
100
(発行年 / Year)
2019-03-24
(学位授与番号 / Degree Number)
32675甲第456号
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2019-03-24
(学位名 / Degree Name)
博士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)
(URL)
https://doi.org/10.15002/00021752

平成 30 年度　法政大学審査学位論文

真空中における接触熱コンダクタンスに関する研究

Study on Thermal Contact Conductance in Vacuum

指導教員　御法川　学　教授

法政大学大学院 理工学研究科

機械工学専攻 博士後期課程

丹藤　匠

目 次

第 1 章　緒論　1
1.1　本研究の背景　2
1.2　本研究の目的　3
1.3　本研究の概要　4
1.4　接触熱コンダクタンスの分類と本研究の対象　5

第 2 章　真空中の温度制御とその問題点　6
2.1　半導体製造装置におけるウエハ温度制御の重要性　7
2.2　一般的なステージ構成と温度制御方法　8
2.3　温度制御の課題　9
2.4　第 2 章のまとめ　10

第 3 章　接触熱コンダクタンスの構成成分の把握とその基本特性評価　11
3.1　背景　12
3.2　研究対象のステージ構成　13
3.3　実験装置および実験方法　15
3.3.1　実験装置　15
3.3.2　測定試料　18
3.3.3　測定方法　22
3.3.4　測定条件　25
3.4　実験結果と考察　27
3.4.1　分子流領域における接触熱コンダクタンスの測定結果　27
3.4.2　伝熱性能の検討　36
3.5　第 3 章のまとめ　40

第 4 章　流れ状態を考慮したガス成分の特性評価と理論値の検討　41
4.1　背景　42
4.2　実験装置および実験方法　42
4.3　実験結果と考察　43
4.3.1　分子流および遷移流以上の圧力領域における接触熱コンダクタンスの測定結果　43
4.3.2　温度制御性能の検討　57
4.3.3　ウエハとステージ間の放電対策指針　63
4.4　第 4 章のまとめ　66

第 5 章　接触熱コンダクタンスに対する接触面粗さの影響評価　67
5.1　背景　68
5.2　実験装置および実験方法　68
5.3　実験結果と考察　71
5.4　第 5 章のまとめ　89

第 6 章　結論　90

参考文献　94

謝辞　98

付録（実験装置設計図）　100

主な記号

h ：接触熱コンダクタンス［W/m^{2}K］
h_c ：接触熱コンダクタンスの接触成分［W/m^{2}K］
h_g ：接触熱コンダクタンスのガス成分［W/m^{2}K］
q ：熱流束［W/m^2］
T_s ：接触面における試料の壁面温度［K］
ΔT_s ：接触面における試料間（壁面間）の温度差［K］
κ ：熱伝導率［W/mK］
P ：吸着面圧［Pa］
ε_0 ：真空の誘電率（8.85×10^{-12} [F/m]）
ε_s ：誘電体の比誘電率
V_d ：ウエハと内部電極間の電位差［V］
d_s ：誘電体の厚み［m］
K_n ：クヌッセン数［-］
λ ：平均自由行程［m］
D ：平均隙間距離［m］
T_w ：ウエハ温度［K］
T_p ：ステージ底面温度［K］
l ：ステージ構成材料の厚さ［m］
Λ ：自由分子熱伝導率［W/m^{2}K Pa］
p ：チャンバー内圧力［Pa］
γ ：比熱比
α ：適応係数
R ：ガス定数［J/kmol K］
M ：ガス(分子)の質量［kg/kmol］
T ：ガスの温度［K］
k ：ボルツマン定数（1.38×10^{-23} [J/K]）
d_g ：ガスの分子直径［m］
R_a ：算術平均粗さ［μm］
R_y ：最大高さ［μm］

第 1 章

緒　論

第１章　緒論

1.1　本研究の背景

真空技術は半導体製造，食品の製造や保存，医療用診断など，産業・医療を始めとする様々な分野において基盤技術となっている[1]．真空環境を用いた製造プロセスにおいては，プロセス中の被処理体の温度制御が求められることが多く，真空中において接触する固体間の伝熱現象を解明することは工業的に有用性が高い．本研究では，特に半導体製造分野に注目し，真空中における接触面の伝熱について検討する．

半導体製造分野では，半導体デバイスの製造に不可欠な微細加工（ドライエッチング）工程や薄膜形成（CVD：Chemical Vapor Deposition）工程などで，真空中においてウエハの処理が行われている．この際，高い処理性能を得るためにはウエハの温度を高精度に制御することが必要となる．具体的には，半導体製造における加工寸法の高精度化，歩留まり向上にはウエハの高精度な温度制御が不可欠であり[2)~4)]，ウエハとステージ（試料台）間の伝熱特性の解明が望まれている．上記半導体製造装置の一般的な構成として，ウエハは真空チャンバー内において温度調整されたステージ上に静電チャックで吸着固定される．また，ウエハとステージの接触面には伝熱用ガスの供給機構が設置されている[5]．このため，ウエハとステージ間の伝熱性能を考慮してウエハ温度を最適に制御するためには，接触面における接触の効果，伝熱用ガスの効果などを詳細に検討する必要がある．本論文では半導体製造分野の実使用条件を考慮しながら，真空中における接触面の接触熱コンダクタンスを詳細に検討し，伝熱メカニズムを考察することにした．

なお，「真空」とは「大気圧よりも低い圧力状態」のことであり，文献値[6]を参照すると，10^5Pa から 10^2Pa までが低真空，10^2Pa から 10^{-1}Pa までが中真空，それより低い圧力状態が高真空，超高真空，極高真空と定義されている．半導体デバイスの製造プロセスにおいては，ウエハとステージの接触面のガス圧力は伝熱用ガスの供給量を制御することによって数 Pa～数千 Pa 程度に調節されることが想定される．このことから，本論文においても主に低真空から中真空（1Pa～5000Pa）のガス圧力状態における伝熱特性の評価・検討を実施することにした．

1.2　本研究の目的

真空中における固体間の伝熱特性を理解するためには，接触面における接触熱コンダクタンスの特性を明らかにすることが必要である．接触熱コンダクタンスは接触成分，ガス成分，放射成分から構成されるものと考える[7]．この中で放射成分の値は，伝熱する試料の放射係数を考慮ながら平行二面間の放射伝熱量を算出することで容易に推定することが可能である[8]．このため，本研究では主に接触成分とガス成分を研究対象とする．

接触熱コンダクタンスに関連する研究は過去に多くの報告例が存在し，海外では1960 年代から研究が盛んとなり，その初期における YU. P. SHLYKOV らの論文[9] がその後の研究者に多く参照されている．国内においては，1980 年代から研究が盛んとなり，例えば柳ら[10]が基礎研究を開始した．

接触熱コンダクタンスの中でも接触成分に関しては過去において多くの研究者が評価・検討を実施し，関連する報告例が多数存在する[9)~15)]．この中には真空中における評価結果もある[9)10)11)15)]．ただし，これらの報告は主に締結体の接触面などを対象としたものであり，0.1MPa 以上の高い接触面圧時における検討であった．これに対して半導体製造装置のウエハとステージの接触は静電吸着力によって保持されることが一般的であり[5]，その接触面圧は数 kPa から高くても数十 kPa である．接触面圧の詳細は第 3 章の 3.3.4 項で説明する．つまり，半導体製造装置の接触面を考える場合には，締結体を対象とした過去の報告例よりも低い接触面圧時における接触熱コンダクタンスの検討が必要である．また，半導体製造装置ではウエハとステージの接触面に伝熱用ガスの供給機構が設置されている[5]．このため，接触熱コンダクタンスを接触成分とガス成分に切り分けて，各々の成分に対する接触面圧とガス圧力（真空度）の影響を詳細に検討することが必要である．

そこで，本研究では半導体製造装置の実使用条件における接触状態を模擬しながら，接触面圧，ガス圧力に対する接触熱コンダクタンスの接触成分およびガス成分を各々評価可能な実験系を構築することにした．その上で，①接触熱コンダクタンスの各成分の基本特性の把握，②ガス成分の特性解明と算出方法の検討，③解明した伝熱メカニズムおよび得られた知見を基にして，半導体製造装置で課題となる接触面圧の変動，接触面粗さの経時変化などの外乱に対して，ロバストな接触面の設計指針を提案すること，を目的とした．

1.3　本研究の概要

第 1 章では緒論として，本研究の背景・目的・概要を述べ，本研究において検討を実施する対象範囲を明確にする．

第 2 章では真空中の温度制御とその問題点として，半導体製造装置における一般的なウエハの温度制御方法とその課題について述べる．

第 3 章では本研究における研究対象のステージ構成や実験装置および実験方法を説明し，接触熱コンダクタンスの各成分の基本特性を評価した結果について述べる．

第 4 章では流れ状態を考慮したガス成分の特性評価と算出方法の検討結果について述べる．その上で，接触面圧の変動に対する設計指針を提案する．更に，ガス圧力に関連して，ウエハとステージ間の放電対策指針を検討した結果についても説明する．

第 5 章では接触熱コンダクタンスに対する接触面粗さの影響を評価した結果について述べる．その上で，接触面粗さの経時変化に対する設計指針を提案する．

第 6 章では結論として，本研究で得られた結果を総括する．

1.4　接触熱コンダクタンスの分類と本研究の対象

接触熱コンダクタンスは過去において多く研究者が評価・検討を実施し，関連する報告例（過去の報告例）が複数存在する[9)~15)]．接触面圧の強度，および接触面のガス圧力の観点において，過去の報告例と本研究の関係をまとめると表 1 のようになる．過去の報告は主に機械構造物の接合面など，ボルト締結体の接触面等を対象としたものであり，0.1MPa 以上の高い接触面圧時における検討に主眼が置かれていた．これに対して，1.2 項で述べた通り，半導体製造装置におけるウエハとステージの接触面圧は数 kPa から高くても数十 kPa 程度である．このことから，本研究では半導体製造装置の実使用条件に合わせて 50kPa 以下の低接触面圧時における接触熱コンダクタンスを評価し，その特性・挙動を明らかにすることが必要であると考えた．

また，接触面におけるガス圧力の観点で接触熱コンダクタンスの研究を分類すると，過去の報告例は 10Pa 以下の比較的真空度の高い領域もしくは大気圧の評価であった．これに対して，本研究では半導体製造装置における実使用条件を想定して 1～5000Pa のガス圧力における評価を実施する．なお，ガス圧力は本論文中においては全て絶対圧で表記している．

以上をまとめると，本研究の研究対象範囲を過去の報告例と比較すると，接触面圧は低い領域の評価となり，ガス圧力は中間領域の評価となる．

Table 1 Comparison of previous reports and this study

	Previous reports[9)-15)]	This study
Research subject	Bolt fastening surface	Electrostatic chucking surface
Contact pressure	> 100 [kPa]	6.7 ～ 50 [kPa]
Gas pressure on contact surface (Degree of vacuum)	< 10 [Pa] or 101.3 [kPa] (Atmospheric pressure)	100 ～ 5000 [Pa]

第 2 章

真空中の温度制御とその問題点

第 2 章　真空中の温度制御とその問題点

2.1　半導体製造装置におけるウエハ温度制御の重要性

IoT（Internet of Things）時代が到来し，自動車，飛行機などの乗り物，テレビ，冷蔵庫などの家電製品，スマートフォンなどの電子通信機器等，様々な物がインターネットにつながり，多種多様なデータを送受信するようになった．今後，インターネットに接続される機器類は更に増加し，それら機器には更なる通信速度の向上やデータ容量の増大が必要になると予想される．これらのデジタル技術の進歩を支えているのが，マイクロプロセッサやメモリなどの LSI（Large Scale Integration，半導体集積回路）の性能向上である．LSI の高性能化・高集積化に伴って半導体製造に必要な微細加工（ドライエッチング）工程や薄膜形成（CVD）工程などでは，更に高い処理性能が要求されるようになっている．半導体の微細化トレンドはムーアの法則として知られており，過去において最小加工寸法は 3 年ごとに約 0.7 倍に縮小されてきた[16]．今後も物理限界を迎えるまで微細化トレンドは続くものと推察される．2018 年現在，先端の LSI 製造工程では 7nm プロセスに対応した量産が開始している[17]．更に，近年ではトランジスタやメモリの構造が平面型（2 次元型）から 3 次元型に移行しており[18]，LSI の製造難易度は益々高くなっている．

半導体製造装置としてドライエッチング装置を例に挙げると，加工処理中のウエハ温度を最適に制御することで，加工形状の制御[2)3)]やウエハ面内における加工均一性の確保[4)]が可能であり，ウエハ温度制御は加工性能を左右する重要な技術となっている．今後，次世代，次々世代の LSI を実現させていくためにはそれに対応した製造技術を確立させていく必要があり，製造工程においてキー技術となっているウエハ温度制御の重要性は益々高まっていくものと予想される．

なお，本論文では「半導体製造装置」として主にドライエッチング装置を代表例として説明する．ドライエッチング装置のウエハ用ステージの構成は，同様の構成が他の半導体製造装置でも採用されていることから，本研究の検討結果および知見は半導体製造装置全般に活用できるものと考えている．

2.2　一般的なウエハステージ構成と温度制御方法

半導体製造装置では，プラズマ中の反応活性種や荷電粒子の効果を利用してウエハ表面への微細加工を実現している．このため，一般的な装置構成としては，真空チャンバー内において，上部にプラズマ生成機構，下部にウエハを載置するステージが設置されている[16]．ステージには温度制御機構が内蔵されており，ステージからの加熱または冷却，更にプラズマからの入熱によってウエハの温度が決定される．ステージの温度制御機構として最も一般的な構成は，ステージ内部に冷媒を流し，かつ流路の上方にヒーターを設置して，ヒーターの出力を制御する方式である．この方式により，プラズマからの入熱量に応じてヒーターの出力を制御することで，プロセス中（プラズマを用いた加工処理中）のウエハ温度を所望の温度に制御することができる．他の方式として，ステージ内を流れる冷媒温度を高速に制御してステージ，ひいてはウエハの温度を高速に制御する方式などもある[3]．なお，ステージの詳細構成図は次章 3.2 項で説明する．

上記，いずれの方法（ステージの温度制御機構）でウエハの温度制御をする場合でも，結局はウエハとステージの接触面における伝熱の状態，いわゆる接触熱コンダクタンスがウエハ温度を決める重要なパラメータとなる．なお，プロセス中のウエハの温度を計測しながら，ウエハ温度をフィードバック制御できれば理想的であるが，プロセス中のウエハは表面がプラズマに曝されており，またウエハ裏面はステージとの伝熱面であることから，プロセスに影響を与えずにウエハに温度計を接触させることは困難である．仮に，ステージ側からウエハ裏面に温度計を接触させたとすると，温度計設置領域は他の領域に比べて伝熱特性が変化してしまうため，ウエハ温度の面内均一性が崩れ，ウエハ面内の加工均一性が低下する恐れがある．

このため，ステージの温度を高精度にフィードバック制御することにより，ステージとの伝熱によってプロセス中のウエハ温度を目標値に制御する構成が一般的に採用されている[3]．しかし，この構成ではウエハとステージ間の接触熱コンダクタンスが長期に亘って安定していることが大前提となり，これを可能とするステージ表面の設計・運用指針が求められている．指針を検討するためには，まずは接触熱コンダクタンスの詳細な特性や挙動を把握する必要があるが，1.4 項で説明した通り，過去の研究報告例では接触面圧やガス圧力の領域が半導体製造装置の実使用条件から外れているため，報告されている検討結果を設計データとしてそのまま使用することができない．このため，本研究では半導体製造装置における実使用条件を想定した評価を実施することにした．

2.3　温度制御の課題

前項（2.2 項）で説明した通り，半導体製造装置においてはウエハとステージ間の接触熱コンダクタンスが長期に亘って安定していることが望ましい．しかしその安定性の阻害要因として，接触面圧の変化や接触面の状態（表面粗さ）の変化などの外乱が想定される．半導体製造装置では，ロット毎またはウエハ毎にチャンバー内のクリーニングを実施する[19]．クリーニングは，プロセスガスや反応生成物などの残留物を除去してチャンバー内の状態を一定に維持するために実施される．これにより，ステージにおいても表面に付着した上記残留物が除去されて，クリーンな表面状態が維持される．しかし，クリーニングはプラズマを用いて実施されるため，ステージ表面はプラズマに暴露されることになる．これにより，ステージ表面自体が微量にエッチングさせることになり，長期的に見ればステージ表面が削れていく．詳細は次章 3.3.4 項で説明するが，ステージの表面は静電チャック構造となっており，静電チャックは表層の誘電体の膜厚によって吸着力が変化する．つまり，ステージ表面が時間に伴って削れていけば，これによって静電吸着力が変化し，ひいては接触面圧の経時変化が発生する．また，ステージ表面の削れが発生すれば，ステージ表面の粗さも変化することになる．

接触熱コンダクタンスは接触成分，ガス成分，放射成分で構成されるものと考えられる[7]．各種外乱に対する各成分の特性や挙動を把握し，対策を考察することで最適な設計指針を構築できるものと考える．

2.4　第 2 章のまとめ

本章では半導体製造装置におけるウエハ温度制御の重要性，一般的なステージ構成と温度制御方法，温度制御の課題について述べた．本章の内容のまとめを以下に示す．

(1) 半導体製造装置では，処理中のウエハ温度を最適に制御することで，加工形状の制御やウエハ面内における加工均一性の確保が可能であり，ウエハ温度制御は加工性能を左右する重要な技術となっている．

(2) ウエハを載置するステージには温度制御機構が内蔵されており，ステージからの加熱または冷却，更にプラズマからの入熱によってウエハの温度が決定される．
この構成においては，ウエハとステージの接触面における伝熱の状態，いわゆる接触熱コンダクタンスがウエハ温度を決める重要なパラメータとなる．

(3) 接触熱コンダクタンスに関する過去の報告例は，接触面圧やガス圧力の領域が半導体製造装置の実使用条件から外れているため，過去において報告されている検討結果を設計データとしてそのまま使用することができない．このため，半導体製造装置における実使用条件を想定した評価を実施することが必要である．

(4) 半導体製造装置においてはウエハとステージ間の接触熱コンダクタンスが長期に亘って安定していることが望ましい．しかしその安定性の阻害要因として，接触面圧の変化や接触面の状態（表面粗さ）の変化などの外乱が想定される．接触熱コンダクタンスは接触成分，ガス成分，放射成分で構成されるものと考えられ，各種外乱に対する各成分の特性や挙動を把握し，対策を考察することで最適な設計指針を構築できるものと考える．

第 3 章

接触熱コンダクタンスの構成成分の把握とその基本特性評価

第 3 章　接触熱コンダクタンスの構成成分の把握と その基本特性評価

3.1　背景

半導体デバイスの製造に不可欠な微細加工および薄膜形成工程の多くは真空中でウエハを処理している．上記製造工程の約 70%が真空技術に関わると言われている[20]．微細加工工程で使用されるドライエッチング装置では，真空チャンバー内における放電によって荷電粒子や反応活性種を生成し，ウエハ表面に所望の処理を行う．この際，高い処理性能を得るためにはウエハの温度を高精度に制御することが必要となる[2)~4)]．上記半導体製造装置の一般的な構成として，ウエハは真空チャンバー内において温度調整されたステージ上に静電チャックで吸着固定される．また，ウエハとステージの接触面には伝熱用ガスが導入される[5]．このため，ウエハとステージ間の伝熱性能を考慮してウエハ温度を最適に制御するためには，接触面における接触熱コンダクタンスを把握する必要があり，特にその接触成分とガス成分の各々の特性を理解することが求められる．

そこで，本研究ではウエハとステージ間の接触状態を模擬した実験系を構築し，半導体製造分野における実使用条件を想定した 5000Pa 以下の真空状態と 50 kPa 以下の接触面圧印加に対する接触熱コンダクタンスの接触成分およびガス成分を評価できるようにした．本章ではまず半導体製造装置のステージ構成，本研究における実験装置構成，接触熱コンダクタンスの測定方法・測定条件について説明する．そして，接触熱コンダクタンスの各成分の基本特性を評価した結果について述べる．

3.2　研究対象のステージ構成

真空中においてウエハ温度を制御するステージの一例として，半導体製造装置で一般的に用いられるステージの構成を図 1 に示す [5]．内部に冷媒循環路が形成された金属製の台座の上面に静電チャックが形成されている．静電チャックはセラミックなどの誘電体内に内部電極を設置した構成であり，内部電極に直流電圧を印加することで内部電極と Si ウエハの間にクーロン力を発生させ，ウエハを静電チャック上に吸着固定させる．また，ウエハとステージの接触面には伝熱性能を向上させるために He などの伝熱用ガスが供給される．上記構成において，台座の材料には A5052，誘電体には Al_2O_3 の焼結体または溶射膜などが多用される．なお，台座内部の冷媒循環路の形状は多種多様な例が存在するため，図中では簡略化して台座下面が面内均一に冷却されているものとした．ウエハ表面に微細加工処理を行う際には，プラズマ中で生成されたイオンの入射エネルギーなどにより，ウエハに入熱が発生する [3]．図 1 の構成においては，微細加工中のウエハの温度は，プラズマからの入熱量，台座内冷媒循環路の冷却性能，およびウエハから冷媒循環路までの熱通過率により決定される．このため，ウエハと静電チャック間の接触熱コンダクタンスは熱通過率，ひいてはウエハ温度を決定する重要なパラメータとなっている．なお，半導体製造装置のステージ内部にはヒーターが設置されることも多いが，接触熱コンダクタンスを検討する上ではヒーターの有無は本質的な問題ではないため，本論文ではヒーター構造は省略して検討を実施することにした．また，半導体の量産工程において，現在主流のウエハ直径は 300mm（12 inch）であるため，本論文においてもウエハ直径は 300mm と仮定して，伝熱計算等を実施した．

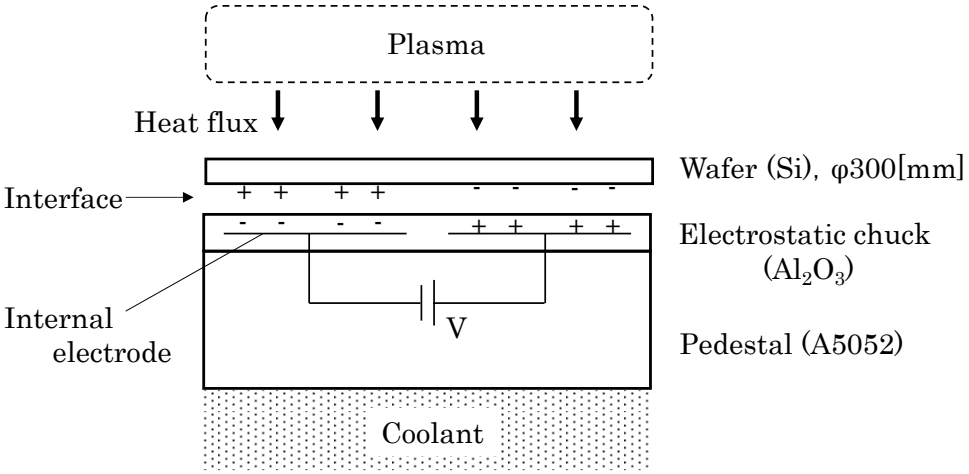


Fig.1 Typical structure of the wafer stage

3.3　実験装置および実験方法

3.3.1　実験装置

ウエハとステージの接触状態を模擬しながら接触熱コンダクタンスを測定するために，実験装置を設計・製作した．実験装置の構成を図 2 に，写真を図 3 に示す．チャンバー内に上部試料，および下部試料を設置し，各試料に熱電対を 10mm 間隔で 6 点取り付け，各試料の温度分布を測定できるようにした．上部試料の上端部にはラバーヒーターを設置し，ヒーター固定用の A5052 板を介して入熱が上部試料の上端部に伝熱する構成とした．なお，A5052 板と上部試料の間には伝熱用グリスを塗布し，両者はボルトで締結した．下部試料の下端部は冷却水により冷却した．チャンバー上部には直動の押付機構を設置した．これにより，ロードセルを埋設した直動部を介して上部試料上端に所望の押付力を付加し，上部試料と下部試料の接触面圧を目標値に制御した．この際，接触面の片当りを防ぐために，下部試料の接触面の水平度，および上部試料の接触面と押付面の平行度を確保し，押付機構の直動部が上部試料の中心部を押付けるように構成した．本実験では，試料の接触面における伝熱用ガスとして空気を使用し，チャンバー内のガス圧力を制御することで，接触面における伝熱用ガスの圧力を制御した．このために，チャンバーにはドライポンプ，圧力計，開度調整バルブから成る排気システムを設置し，チャンバー内の圧力を 1Pa から 101.3kPa まで任意に調節できるようにした．

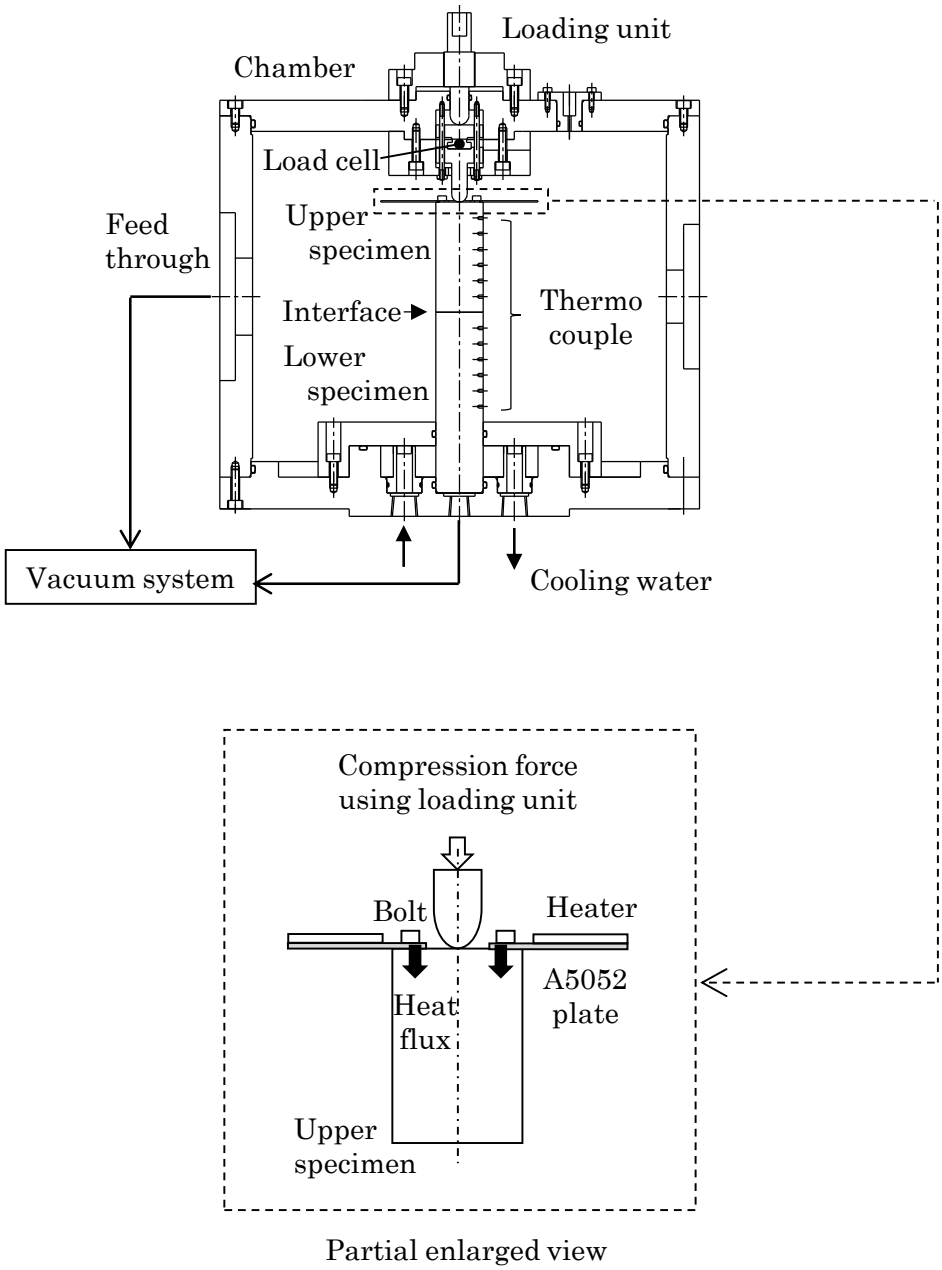


Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus

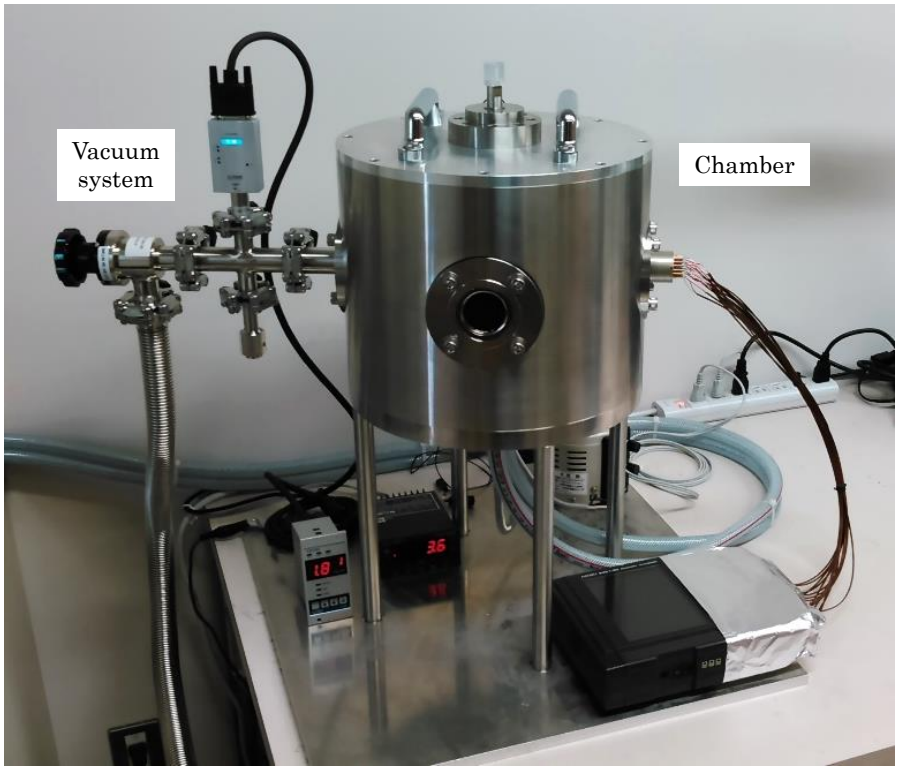


Fig.3 Picture of the experimental setup

3.3.2　測定試料

実験に使用した試料の仕様を表 2 に, 写真を図 4 に示す. 過去の報告 [10)13)] において, 接触する材料間の接触熱抵抗は材料の熱伝導率，ヤング率，ビッカース硬度に影響を受けることが示されている. ウエハステージ用の静電チャックの材料としては一般的にセラミックが多用されるため，本論文ではセラミックと比較的物性値が近く，加工性の良い SUS304 を試料として使用した．試料の物性値を表 3 に示す [10)21)]．なお，SUS304 は半導体製造装置における真空チャンバー内の構成材料としても多用されており，SUS304 を用いて接触面の熱コンダクタンスを検討することは, ウエハとステージ間の伝熱特性の理解のみならず, チャンバー内全体の熱設計にも役立つものと考えた. 次に, 試料の接触面における表面粗さの測定結果を表 4 に示す. 表面粗さの測定方法については, JIS B 0633 [22)]において加工の筋目を横切る方向で測定することが推奨されている. 本実験で使用した試料の接触面は旋盤を用いて切削加工で仕上げたため, 周方向の切削痕が存在する．このため，表面粗さ計（Mitutoyo, C-3000）の触針は径方向に移動させて測定を行った．測定は面内 4 か所，90°間隔で行い，条件はカットオフ値 0.8mm，基準長さ 0.8mm，評価長さ 4mm とした．表面粗さの測定時のセットアップを図 5 に示す．なお，本章では以下，上部試料を単に「試料」と表記する．また，本論文内の各種評価において複数の上部試料および下部試料を使用するため, グループ分けをして表記することにする．本章では図 4 のグループ A を使用する.

Table 2 Specifications of the specimens

Material	SUS304
Diameter	30[mm]
Length	Upper: 70[mm], Lower: 115[mm]
Position of thermocouple	10,20,30,40,50,60[mm] from interface

Table 3 Comparison of physical properties

Material	Al_2O_3(92%)	SUS304
Thermal Conductivity [W/mK]	16	16
Young's Modulus [GPa]	280	190
Vickers Hardness [Hv]	1204	225

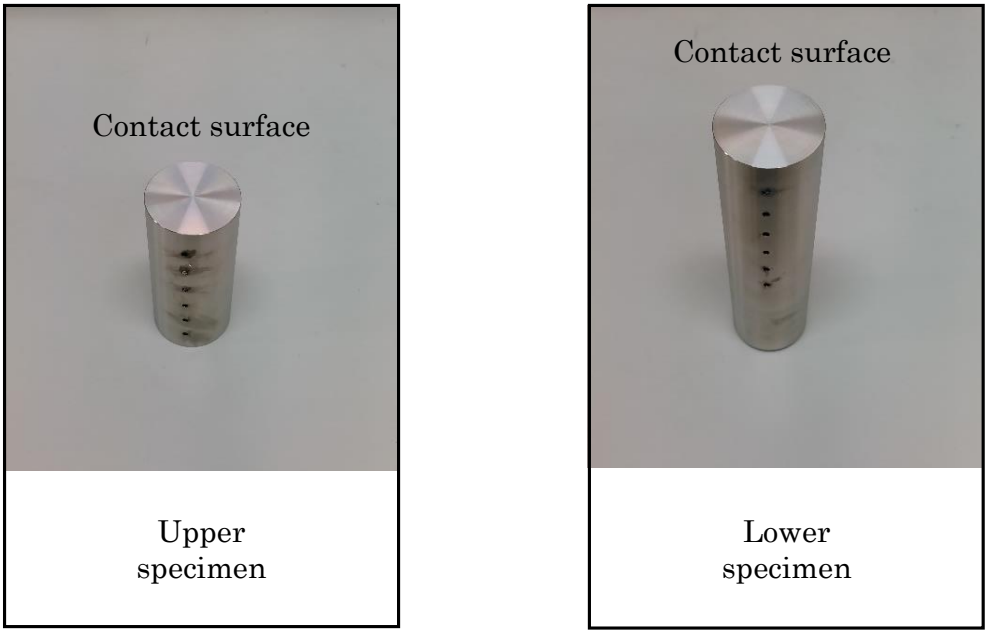
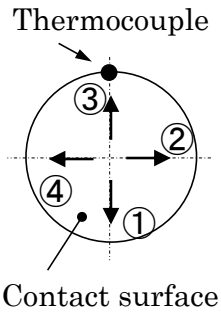


Fig.4 Picture of the specimens (Group A)

Table 4 Surface roughness on contact surface (Group A)

Measurement position	Upper specimen		Lower specimen	
	R_a [μm]	R_y [μm]	R_a [μm]	R_y [μm]
①	0.23	1.35	0.45	2.64
②	0.27	1.47	0.47	2.21
③	0.25	1.37	0.46	2.22
④	0.27	1.43	0.42	2.11



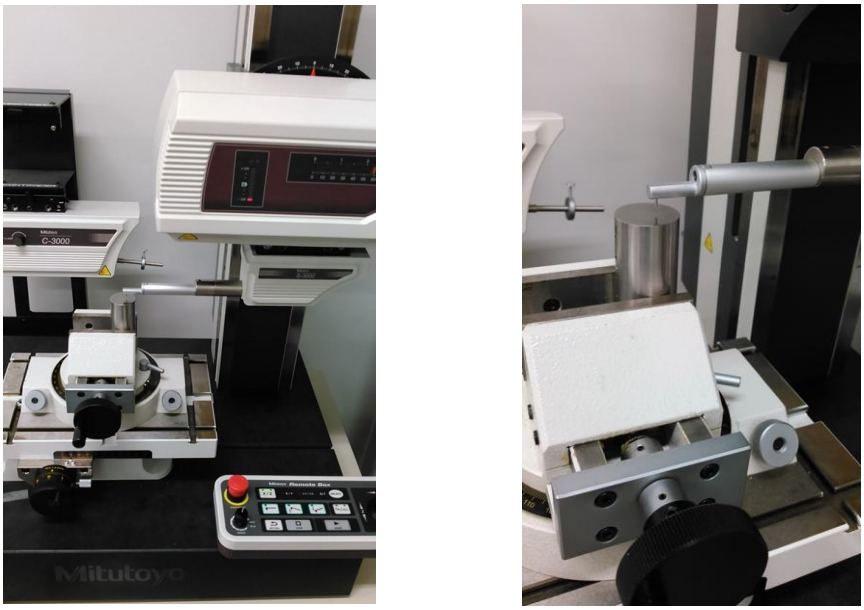


Fig.5 Measurement of the specimens

3.3.3　測定方法

本実験装置構成における試料間の接触熱コンダクタンス h W/m²K は以下の式を用いて算出できる [10)11)13)].

$$h = \frac{q}{\Delta T_s} \quad , \quad \left(q = -\kappa \frac{dT_s}{dx}\right) \tag{3.1}$$

ここで，q は接触面に垂直な熱流束 W/m²，ΔT_s は接触面における試料間の温度差 K である．接触面近傍における温度分布の模式図を図 6 に示す．また，試料の設置状態の写真を図 7 に示す．なお，接触面における試料間の温度差 ΔT_s は直接測定することが困難であるため，各試料の温度分布を測定し，測定値を最小二乗法で直線近似して各試料の接触面における温度を外挿することにより，試料間の温度差 ΔT_s を算出した．また，熱流束 q はフーリエの法則より，試料の熱伝導率 κ と試料内の温度勾配 dT_s/dx の積から算出できるため，本実験では上部試料および下部試料における熱流束 q を算出し，その平均値を用いて接触熱コンダクタンス h を算出した．なお，定常状態における温度分布を測定するために，測定条件を変える際には 120 分以上の温度安定化時間を設け，各測定点の温度が安定していることを確認後，データを取得した．

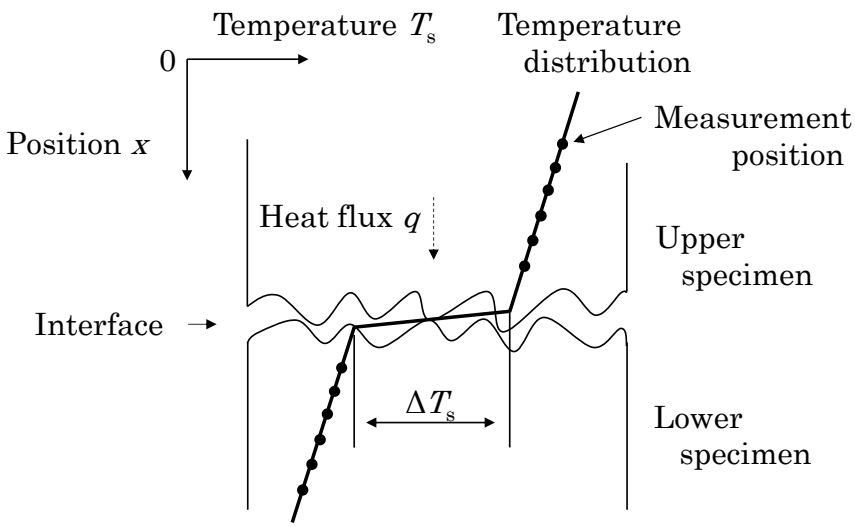


Fig.6 Heat flux and Temperature difference between the specimens

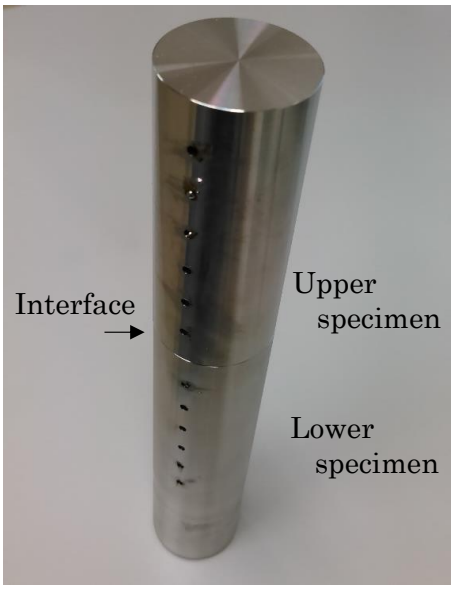


Fig.7 Picture of installation state with the specimens

3.3.4　測定条件

接触熱コンダクタンスを測定する際の接触面圧条件を決定するために，ドライエッチング装置におけるウエハとステージの接触面圧を検討した．図 1 に示した静電チャック（ESC：Electrostatic chuck）構成における吸着面圧 P Pa は以下の式を用いて算出できる [23]．

$$P = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{2}\left(\frac{V_d}{d_s}\right)^2 \tag{3.2}$$

ここで，ε_0 は真空の誘電率，ε_s は誘電体の比誘電率，V_d はウエハと内部電極間の電位差 V，d_s はウエハと内部電極間の誘電体の厚み m である．ここではウエハと誘電体には隙間が存在しない（完全密着）と仮定して考える．誘電体として使用する Al_2O_3 セラミックの物性値および寸法を文献 [21)23)] から参照して比誘電率 ε_s=9.0，厚み d_s=300 μm と仮定し，内部電極への印加電圧に対する吸着面圧 P を算出した結果を図 8 に示す．印加電圧の増加に伴って吸着面圧 P も高くなり，印加電圧次第で吸着面圧 P を任意に制御できる．ただし，Al_2O_3 セラミックの絶縁破壊強さは 16kV/mm であり [21)]，厚さ d_s=300 μm 時の絶縁破壊電圧は 5000V と換算できる．このため，内部電極への印加電圧は±5000V よりも低い値で運用する必要があり，この場合の吸着面圧 P は最大でも約 11kPa となる．なお，Al_2O_3 セラミックの厚さ d_s を例えば 400 μm に増やせば絶縁破壊電圧は 6400V まで増加するものの，単位印加電圧あたりの吸着面圧は低下するため，図 8 の破線で示す通り，最大吸着面圧を大幅に向上させることは難しい．また，J-R（Johnsen-Rahbek）方式などの吸着方式の異なる静電チャックを用いても最大吸着面圧は数十 kPa 程度である [23)]．故に，ドライエッチング装置のステージにおいてウエハを静電吸着する際の吸着面圧 P は数 kPa から数十 kPa 程度であることがわかる．このため，本論文では 6.7kPa から 50kPa の接触面圧範囲で接触熱コンダクタンスを評価することにした．なお，6.7kPa は実験装置における上部試料および押付機構直動部の自重により発生する面圧である．

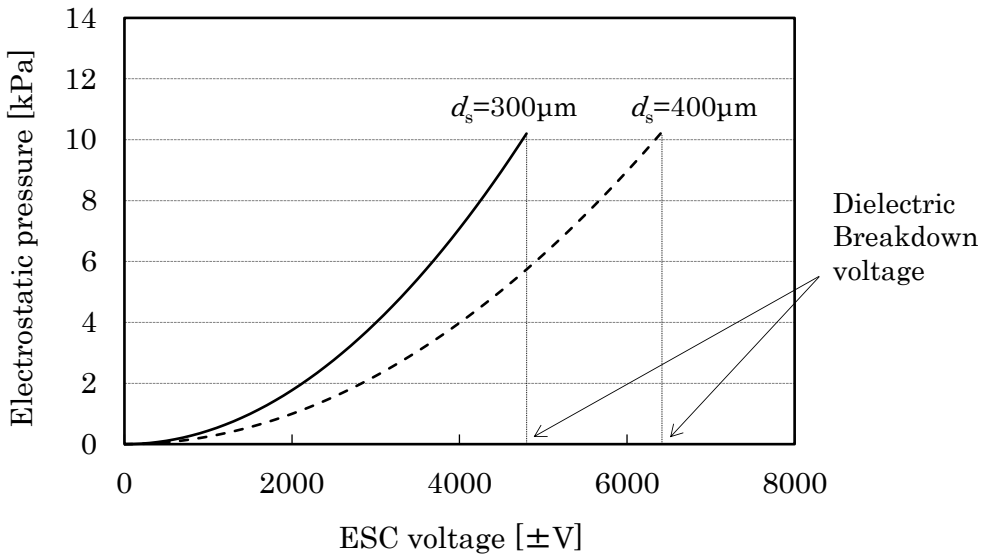


Fig.8 Relationship between Electrostatic pressure and ESC voltage

3.4　実験結果と考察

3.4.1　分子流領域における接触熱コンダクタンスの測定結果

接触面圧 6.7kPa，チャンバー内圧力 100Pa 時における試料内温度勾配の測定結果を図 9 に示す．縦軸は試料の温度，横軸は接触面からの距離を示し，熱は左方向から右方向に流れている．つまり，図 6 の縦方向を図 9 では横軸としている．図中のプロットは実測値であり，熱の流れ方向に対して各試料内で直線的な温度勾配が確認できる．実測値の近似直線から各試料の接触面における温度を外挿すると，上部試料は 44.6℃，下部試料は 26.3℃であり，試料間の温度差 ΔT_s は 18.3℃であった．また，上下試料の熱伝導率と試料内の温度勾配から熱流束 q を算出した結果 2102W/m^2 であった. これより，式(3.1)を用いて接触熱コンダクタンスを算出すると 115.0W/m^{2}K となる．なお，実験の再現性を確認するために，同様の測定を 10 日後に再度行った結果，接触熱コンダクタンスは 115.1W/m^{2}K となり，本実験の高い再現性を確認した.

上記と同様の測定方法を用いて，チャンバー内圧力を 1Pa および 100Pa の 2 条件として，接触面圧を 6.7kPa から 50kPa まで変化させた際の接触熱コンダクタンスを測定した．結果を図 10 に示す．接触熱コンダクタンスはチャンバー内圧力に関わらず接触面圧に対して同様の変化を示した．接触面圧が 10kPa 以上の領域においては，接触面圧の増加に伴って接触熱コンダクタンスが線形増加した．この結果は過去の報告例[10)~13)]と同様の傾向を示している．接触面圧を 10kPa から 50kPa まで増加させた際の接触熱コンダクタンスの増加量はチャンバー内圧力 1Pa，100Pa 時でそれぞれ 10.6W/m^{2}K，10.4W/m^{2}K であり，増加量は両圧力条件においてほぼ同じであった．一方，接触面圧が 6.7kPa から 10kPa 未満の領域では，10kPa 以上の領域に比べて接触面圧の変化量に対する接触熱コンダクタンスの変化量が大きかった.

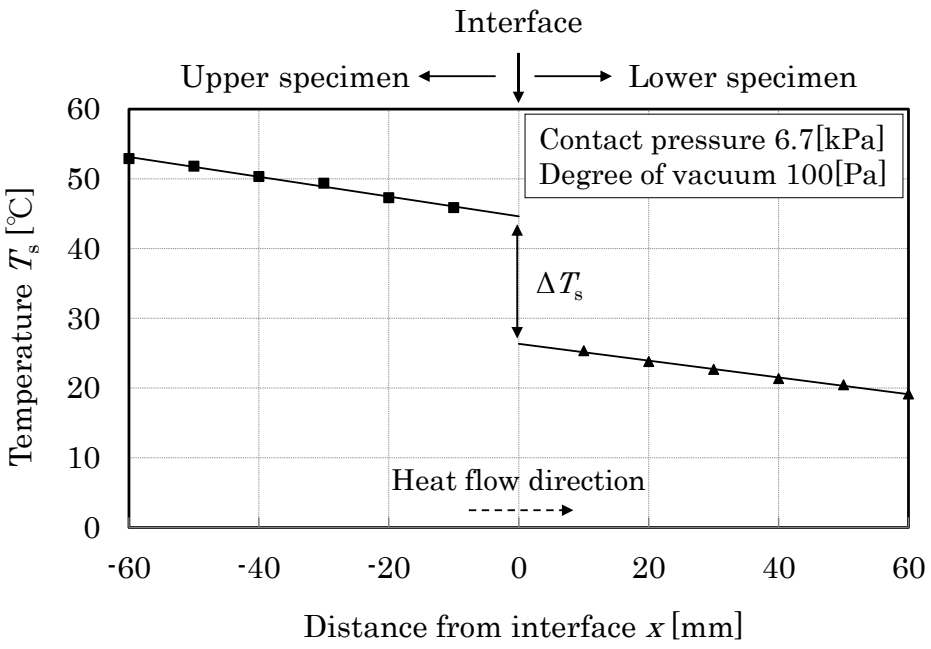


Fig.9 Temperature distribution around the interface (p=100[Pa])

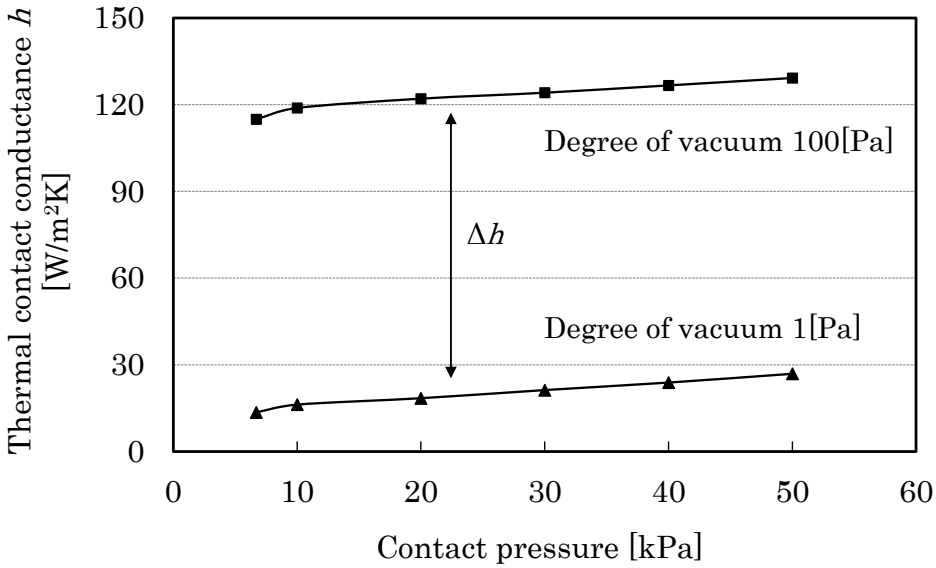


Fig.10 Dependence of thermal contact conductance and contact pressure

以上の結果について考察する．まず接触熱コンダクタンスは，①接触部における接触成分，②微小隙間に介在するガス成分，③試料間の温度差による放射成分，から成ると考える[7]．③については，試料の放射率と試料間の温度差から，2 面間の放射伝熱量を簡易的に見積もることができる[8]．試料（SUS304）の放射率を 0.3 として，図 9 で示した試料間の温度差 18.3℃から放射伝熱量を算出した結果，21.6W/m^2 であった．図 9 の実験条件における熱流束は 2102 W/m^2 であるため，放射による伝熱量はこのうちの 1%程度であることがわかる．つまり，試料間の温度差が小さい本実験においては，接触熱コンダクタンスにおける③の効果は除外して考えてよい．故に，接触熱コンダクタンスは接触成分とガス成分から成るものと考え，以下検討を進める．

チャンバー内圧力に関わらず，接触面圧の増加に伴って接触熱コンダクタンスが増加した理由は，接触成分の増加によるものと考える．接触成分は接触面における微小凹凸形状の真実接触面積と相関があることが知られており[11]，接触面圧の増加に伴って上記凹凸が変形して真実接触面積が増加し，その結果として接触成分が増加したものと考える．6.7kPa から 10kPa の低接触面圧領域における接触熱コンダクタンスの急激な変化は，初期摩耗高さ[24]などの接触面における微小凹凸の形状特性に起因するものと推察される．

次に，ガス成分を検討するために，チャンバー内圧力 1Pa 時の接触熱コンダクタンスを基準として，そこからチャンバー内圧力を増加させた際の接触熱コンダクタンスの増加量を Δh と定義した．Δh は接触熱コンダクタンスのガス成分の増加量を意味する．Δh と接触面圧の関係を図 11 に示す．Δh の値は約 100W/m^{2}K であり，図 10 で示したチャンバー内圧力 1Pa 時の接触熱コンダクタンスの値よりも 3 倍以上高く，チャンバー内圧力が 100Pa の時には接触熱コンダクタンスはガス成分が支配的になっていることがわかる．半導体製造装置においては数百 Pa～数千 Pa で伝熱用ガスの圧力を制御する運用例が最も多いと考えられ，この場合にはガス成分を主体とした伝熱が生じるものと考える．また，Δh は接触面圧の増減に関わらずほぼ一定であった．接触面圧が変化した場合には，接触面における真実接触部以外の微小隙間量（壁面間距離）も変化しているはずであるが，Δh は影響を受けていない．この理由は，接触面に介在するガスの流れの形態が自由分子流であるためと考える．壁面間に存在する伝熱用ガスが自由分子流である場合には，接触熱コンダクタンスのガス成分は圧力に比例する一方，伝熱試料間の距離には影響を受けないことが知られている[6]．これを確かめるために，基準圧力（1Pa）からのチャンバー内圧力の増加量を ΔP，その際の接触熱コンダクタンスの増加量を Δh として，接触面圧 6.7kPa 時の ΔP に対する Δh を測定した．結果を図 12 に示す．ΔP が 749Pa までの領域では Δh が線形増加し，自由分子流の条件を満たしていることが確認できる．一方，ΔP が 999Pa 以上では Δh の増加特性が非線形となり，ガス流れの形態が自由分子流から遷移流または連続流に移行していることが確認できる．

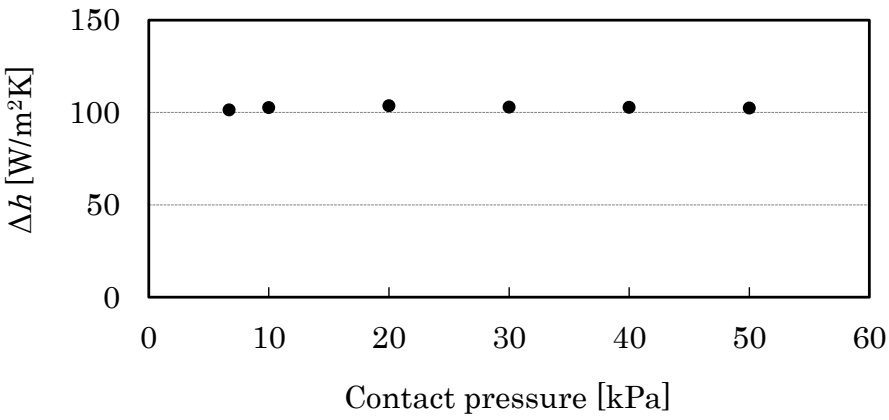


Fig.11 Dependence of Δh and contact pressure

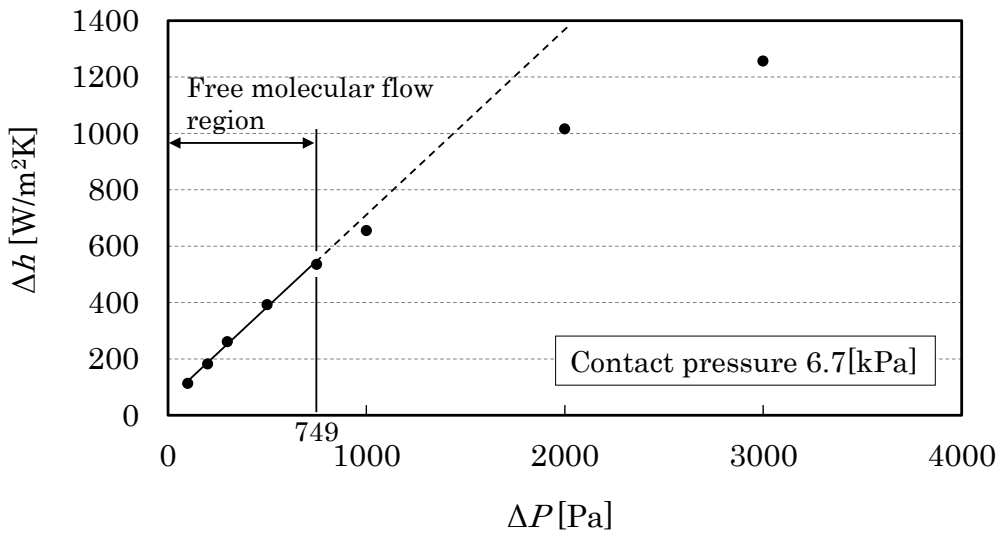


Fig.12 Dependence of Δh and ΔP

ガスの流れの形態を表すために，ガスの希薄化の程度を示す尺度としてクヌッセン数（Knudsen Number）K_nがある．K_nは以下の式で算出できる[25)26)].

$$K_n = \frac{\lambda}{D} \tag{3.3}$$

ここで，λは平均自由行程 m，Dは平均隙間距離 m である．λの詳細な算出方法および考え方は第 5 章の 5.3 項で説明する．H.S.Tsien らは自由分子流条件を K_n>10 と分類している[25)26)]．本実験における伝熱用ガスは空気であるため，組成の主成分である窒素の物性を用いて分子直径は 0.37nm と仮定し[27)]，ガス温度は 300K として平均自由行程を考えた．壁面間距離は接触面における真実接触部以外の隙間の平均距離と考え，まずは想定しうる最大の距離で検討した．表 4 の表面粗さ(R_y)の測定結果から壁面間距離が最大となるのは測定位置①の条件であり，上部試料 R_y=1.35μm，下部試料 R_y=2.64μm の結果から，壁面間で想定しうる最大距離は 4μm となる．上記の平均自由工程と壁面間距離を用いて，チャンバー内圧力に対するクヌッセン数を計算した結果を図 13 に示す．壁面間距離を 4μm と仮定すると K_nはチャンバー内圧力が 180Pa 以上で遷移流または連続流（K_n≦10）となり，図 12 の実験結果を再現できていない．図 12 ではΔPが 749Pa までは自由分子流（K_n>10），ΔPが 999Pa 以上で遷移流または連続流（K_n≦10）であったことから，この条件を満たすように壁面間距離を考えると図 13 の破線で示すように 0.8μm 程度となる．故に，本実験における接触面圧 6.7kPa 時の壁面間距離は 0.8μm 程度であったと考える．壁面間距離の概念図を図 14 に示す．

なお，接触面圧が 6.7kPa よりも高い条件においては，接触面の壁面間距離は更に小さくなり，K_nは増加する．つまり，ΔPが 749Pa 以下では接触面圧 6.7kPa～50kPa の全領域において自由分子流の条件を満たすことになり，図 11 において接触面圧によりΔhが変化しなかった理由が説明できる．

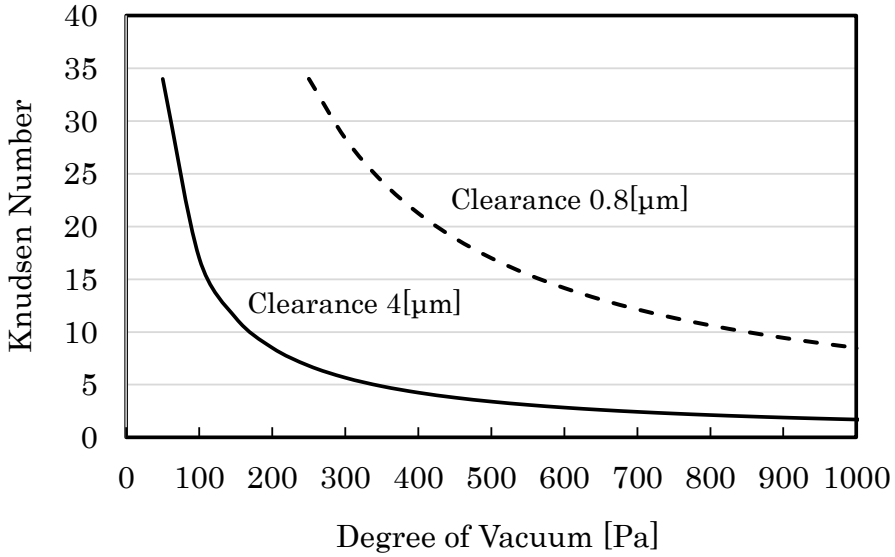


Fig.13 Relationship between K_n and Degree of Vacuum

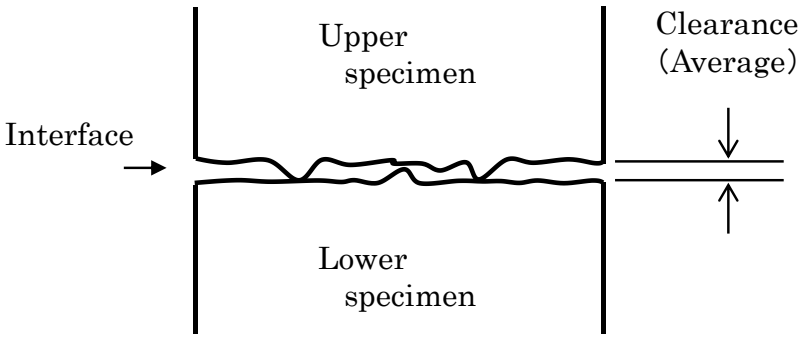


Fig.14 Clearance in Interface

3.4.2　伝熱性能の検討

接触熱コンダクタンスがドライエッチング装置におけるウエハの温度制御に与える影響を検討した．図 1 のステージ構成において，各構成要素に表 5 の物性値 [28]および寸法を適用し，ウエハとステージの接触面に図 10 の接触熱コンダクタンスが発生し，台座の底面が 0℃に冷却されていると仮定して一次元の合成平面板の伝熱モデル [8]を用いてウエハ温度 T_w K を算出した．なお，ここではプラズマからの入熱がウエハに入射し，ステージを介してステージ底面の冷媒に流れるケースを想定している．

ウエハとステージ間の接触熱コンダクタンスを h W/m²K，ステージ表面の温度を T_c K，ウエハからステージに流れる熱流束を q_1 W/m² とすれば，

$$q_1 = h(T_w - T_c) \tag{3.4}$$

となり，ステージ底面の温度を T_p K，ステージ全体の熱伝導率を κ_a W/mK，ステージ全体の厚さを l_a m，ステージ内を流れる熱流束を q_2 W/m² とすれば，

$$q_2 = \frac{\kappa_a}{l_a}(T_c - T_p) \tag{3.5}$$

となる．また上記の式(3.4)，(3.5)より，

$$(T_w - T_c) = \frac{q_1}{h} \tag{3.6}$$

$$(T_c - T_p) = \frac{l_a}{\kappa_a} q_2 \tag{3.7}$$

となる．定常状態では，q_1=q_2=q となるため，これらの式から T_w は，

$$T_w = q \cdot \left(\frac{1}{h} + \frac{l_a}{\kappa_a}\right) + T_p \tag{3.8}$$

となることがわかる．なお，図 1 に示すように，ステージは表面の誘電体と台座によって構成されるため，それぞれの熱伝導率 κ と厚さ l を考慮すれば，以下の式となる．

$$T_w = q \cdot \left(\frac{1}{h} + \sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{\kappa_i} \right) + T_p \tag{3.9}$$

本論文では一次元の合成平面板伝熱モデルとして，以降，式(3.9)を使用する．

ウエハへの入熱量 Q_w とチャンバー内圧力を変化させた際の接触面圧とウエハ温度の関係を図 15 に示す．チャンバー内圧力 1Pa 時において入熱量を 50W，100W とした場合，接触面圧を 6.7kPa から 50kPa まで変化させた際のウエハ温度の変化量 δT_w はそれぞれ 25.9℃，51.8℃となる．つまり，何らかの理由によって接触面圧が変化する外乱が生じた際にはウエハ温度が大きく変化してしまうことがわかる．また，入熱量が高いプロセスほど，その傾向が顕著に現れることもわかる．次に，入熱 100W 条件において，チャンバー内圧力を 100Pa とした場合には δT_w は 1.4℃となる．3.4.1 項で述べた通り，チャンバー内圧力が 100Pa の時には接触熱コンダクタンスはガス成分が支配的になっており，また，ガス成分は接触面圧の影響を受けないため，接触面圧が変化する外乱が生じた場合においてもウエハ温度 T_w の変化を抑制することができる．

Table 5 Physical properties and dimensions for calculation

	Thermal conductivity κ [W/mK]	Thickness l [mm]
Wafer (Si)	148	0.8
Electrostatic chuck (Al_2O_3)	16	0.3
Pedestal (A5052)	137	10

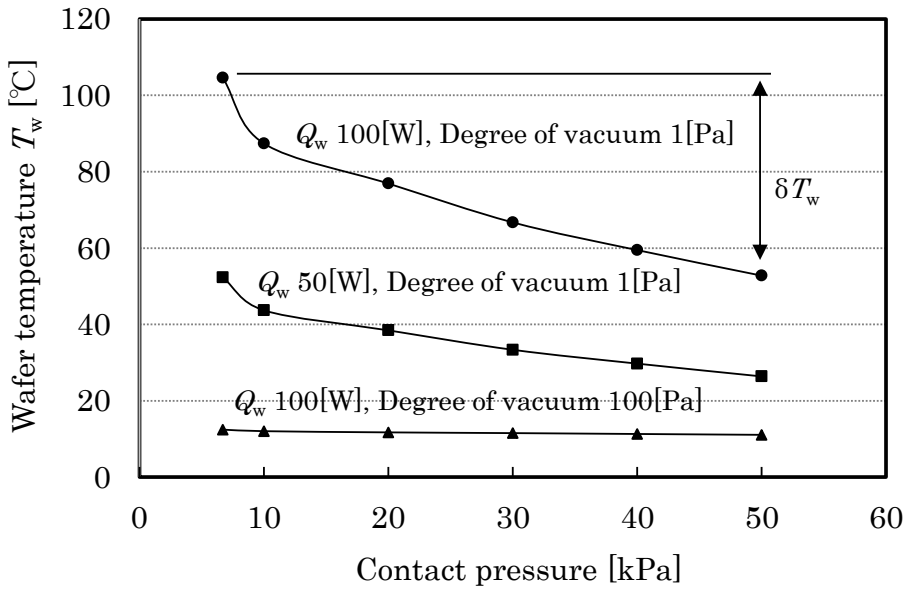


Fig.15 Relationship between Wafer temperature and Contact pressure

3.5　第 3 章のまとめ

本章では半導体製造装置におけるウエハとステージの接触状態を模擬した実験系を構築した．また，真空中における接触熱コンダクタンスの構成成分とその基本特性を検討し，以下の結果を得た．

(1)接触熱コンダクタンスは接触成分，ガス成分，放射成分で構成される．本実験における放射伝熱量は全伝熱量の 1%程度であり，無視できる程度であった．

(2)接触成分は接触面圧に伴って増加した．接触面圧に伴って真実接触面積が増加したためと考える．接触面圧が低い領域においては，接触面圧に対する接触成分の特異的な変化が見られた．接触面の微小凹凸の形状特性に起因するものと推察される．

(3) チャンバー内圧力 100Pa の実験において，接触熱コンダクタンスはガス成分が支配的であることがわかった．半導体製造装置においては数百 Pa～数千 Pa で伝熱用ガスの圧力を制御する運用例が最も多いと考えられ，この場合にはガス成分を主体とした伝熱が生じるものと考える．

(4)ガス成分は自由分子流となるガス圧力領域であれば，接触面圧に関わらずほぼ一定の値であった．

第 4 章

流れ状態を考慮したガス成分の特性評価と理論値の検討

第 4 章　流れ状態を考慮したガス成分の特性評価と理論値の検討

4.1　背景

第 3 章の結果より，接触熱コンダクタンスは接触成分，ガス成分，放射成分で構成され，またチャンバー内圧力 100Pa の実験において接触熱コンダクタンスはガス成分が支配的であることがわかった．このことから，半導体製造装置において最も多用される圧力領域である数百 Pa～数千 Pa で伝熱用ガスの圧力を制御した際には，ガス成分を主体とした伝熱が生じるものと考えられる．つまり，ステージとの伝熱によってウエハ温度を高精度に制御するためには，ガス成分が重要なパラメータであることがわかった．このことから，ガス成分の特性を詳細に検討する必要がある．また，第 3 章の結果より，ガス成分は自由分子流となるガス圧力領域であれば，接触面圧に関わらずほぼ一定の値であることもわかった．

本章では，ガス成分に着目し，分子流条件および遷移流以上の圧力条件における特性を詳細に評価することにした．これにより，ガスの流れ状態がガス成分に与える影響を明らかにする．また，自由分子流条件におけるガス成分の算出方法についても検討する．更に検討結果から得られた知見を基に，接触面圧が変動する外乱が生じた際にもロバストな伝熱性能を有する接触面の設計指針を考察する．

4.2　実験装置および実験方法

実験装置および上部試料，下部試料は，第 3 章と同様のものを使用した．また，接触熱コンダクタンスの測定方法も第 3 章と同様の手順で実施した．なお，チャンバー内圧力は 1Pa から 5000Pa の範囲で調整し，試料の接触面における流れ状態は自由分子流から遷移流以上の圧力領域で評価を実施した．

4.3　実験結果と考察

4.3.1　分子流および遷移流以上の圧力領域における接触熱コンダクタンスの測定結果

接触面圧 6.7kPa，チャンバー内圧力 5000Pa 時における試料内温度分布の測定結果を図 16 に示す．図 9 と同様に，縦軸は試料の温度，横軸は接触面からの距離を示し，熱は左方向から右方向に流れている．図中のプロットは実測値であり，熱の流れ方向に対して各試料内で直線的な温度勾配が確認できる．実測値の近似直線から各試料の接触面における温度を外挿すると，上部試料は 29.7℃，下部試料は 27.6℃であり，試料間の温度差 ΔT_S は 2.1℃であった．

接触熱コンダクタンスは 3.3.3 項の式(3.1)を用いて算出できる．図 16 の結果より，熱流束は 3287.2W/m^2，接触熱コンダクタンスは 1575.1W/m^{2}K であった．なお，本実験の熱流束は上部試料および下部試料でそれぞれ算出した熱流束の平均値を使用した．上記と同様の測定方法を用いて，接触面圧を 6.7kPa から 50kPa まで変化させた際の接触熱コンダクタンスの測定結果を図 17 に示す．ここでは，チャンバー内圧力は 1，100，750，5000Pa の 4 条件とし，各々のチャンバー内圧力時において接触面圧を変化させた．その結果，全てのチャンバー内圧力条件で接触面圧の増加に伴って接触熱コンダクタンスが増加した．また，接触面圧が 6.7kPa から 10kPa の領域では，10kPa 以降の領域に比べて接触面圧に対する接触熱コンダクタンスの変化量が大きかった．なお，接触面圧を 10kPa から 50kPa まで増加させた際の接触熱コンダクタンスの増加量はチャンバー内圧力が 1，100，750Pa の時にはそれぞれ 10.6，10.4，14.4W/m^{2}K であり，ほぼ同等であった．一方，チャンバー内圧力が 5000Pa の時には，同じ接触面圧の増加に対して接触熱コンダクタンスの増加量は 131.8W/m^{2}K であり，他のチャンバー内圧力条件に比べて増加量が大きかった．

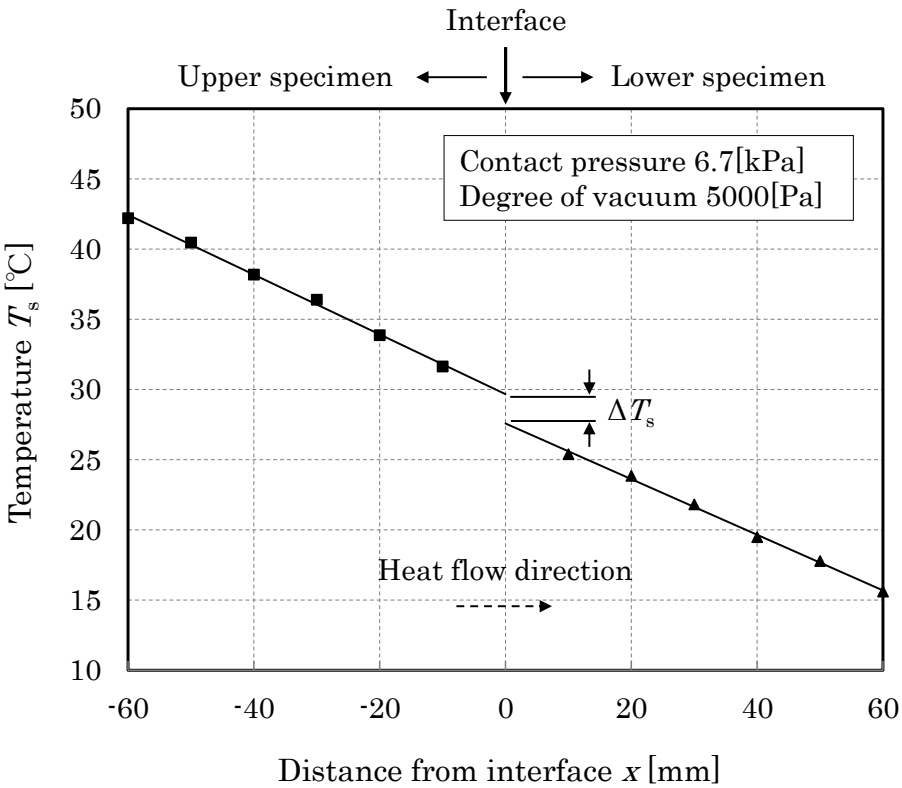


Fig.16 Temperature distribution around the interface (p=5000[Pa])

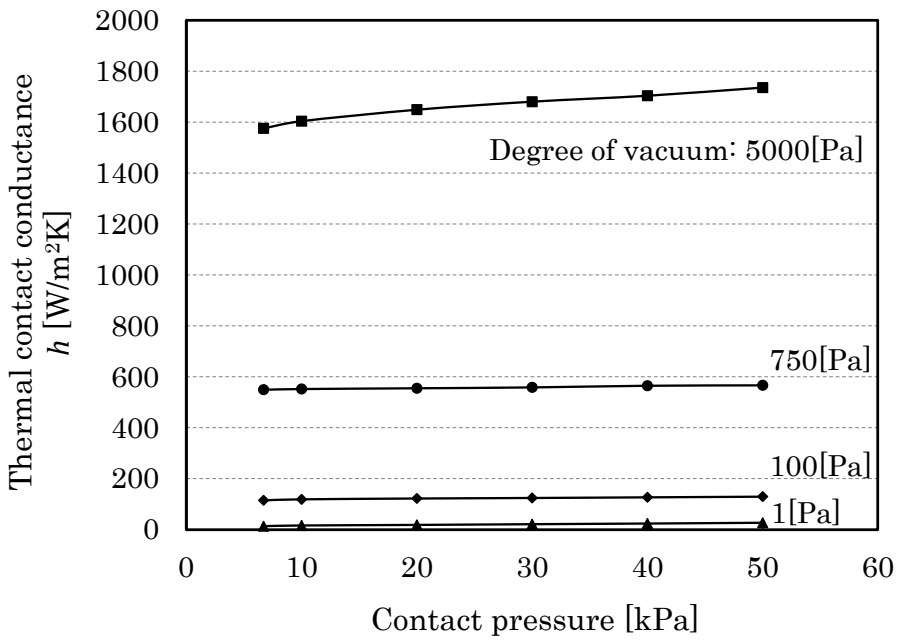


Fig.17 Dependence of h on contact pressure

以上の結果について考察する．まず 3.4.1 項と同様に，放射成分を試料の放射率と試料間の温度差から簡易的に見積る．試料（SUS304）の放射率を 0.3 として，図 16 で示した試料間の温度差から放射伝熱量を算出すると 2.3W/m^2 となる．図 16 の実験条件における熱流束は 3287.2W/m^2 であるため，放射による伝熱量はこのうちの 0.1%以下であることがわかる．故に，チャンバー内圧力を 5000Pa とした本実験においても，放射成分は無視できる程度であることがわかる．

3.4.1 項でも考察した通り，チャンバー内圧力が 750Pa 以下の時に接触面圧の増加に伴って接触熱コンダクタンスが増加した理由は，接触成分の増加によるものと考える．次に，ガス成分について検討する．真空中において伝熱壁面間における伝熱用ガスの流れの形態が自由分子流である場合には，接触熱コンダクタンスのガス成分はチャンバー内圧力に比例する一方，伝熱壁面間の距離には影響を受けないことが第 3 章（図 11，12）の結果からもわかっている．本実験におけるチャンバー内圧力とガス流れの形態の関係を確かめるために，接触面圧 6.7kPa 時におけるチャンバー内圧力に対する接触熱コンダクタンスの結果を図 18 に示す．チャンバー内圧力が 1Pa から 750Pa までの領域では接触熱コンダクタンスは線形増加を示し，自由分子流の条件を満たしていることが確認できる．一方，チャンバー内圧力が 1000Pa 以上では接触熱コンダクタンスの増加特性が変化し，ガス流れの形態が自由分子流から遷移流または連続流に移行したものと考える．遷移流以上の圧力領域では接触面における微小隙間量の変化に応じて接触熱コンダクタンスのガス成分も変化する．図 18 の結果から図 17 の結果を考察すると，接触面圧が変化した場合には接触面における真実接触部以外の微小隙間量も変化しているはずであるが，チャンバー内圧力が 750Pa 以下では自由分子流条件であるため接触成分のみが変化し，一方でチャンバー内圧力が 5000Pa の時は遷移流以上の圧力領域のために接触熱コンダクタンスの接触成分およびガス成分の両方が変化したと推察される．このため図 17 の結果のように，同じ接触面圧の変化に対してもチャンバー内圧力によって接触熱コンダクタンスの挙動が異なったものと考える．接触面圧が変動する外乱に対してロバストな伝熱性能を有する接触面を設計する観点からすれば，ガス圧力は自由分子流条件で運用することが有利であると言える．

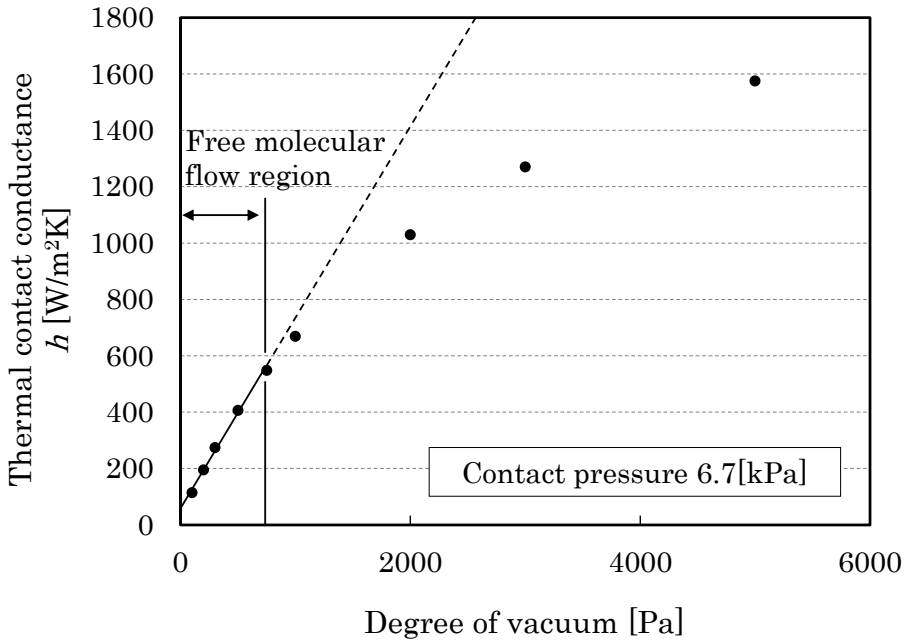


Fig.18 Dependence of *h* on degree of vacuum (Specimens: Group A)

次に，自由分子流条件における接触熱コンダクタンスのガス成分の値について検討する．図 18 におけるチャンバー内圧力 750Pa 以下の接触熱コンダクタンスの結果を図 19 に示す．自由分子流条件では接触熱コンダクタンスをチャンバー内圧力の一次関数として表すことができる．この際，チャンバー内圧力が絶対真空（0Pa）の時にはガス成分はゼロになるはずである．つまり，一次式の切片が接触成分を示すものと考える．ここではガス成分に注目するために，切片を除いたガス成分のみの結果を図 19 に併せて示す．図 19 では接触熱コンダクタンスのガス成分を h_g，接触成分を h_c と表記している．

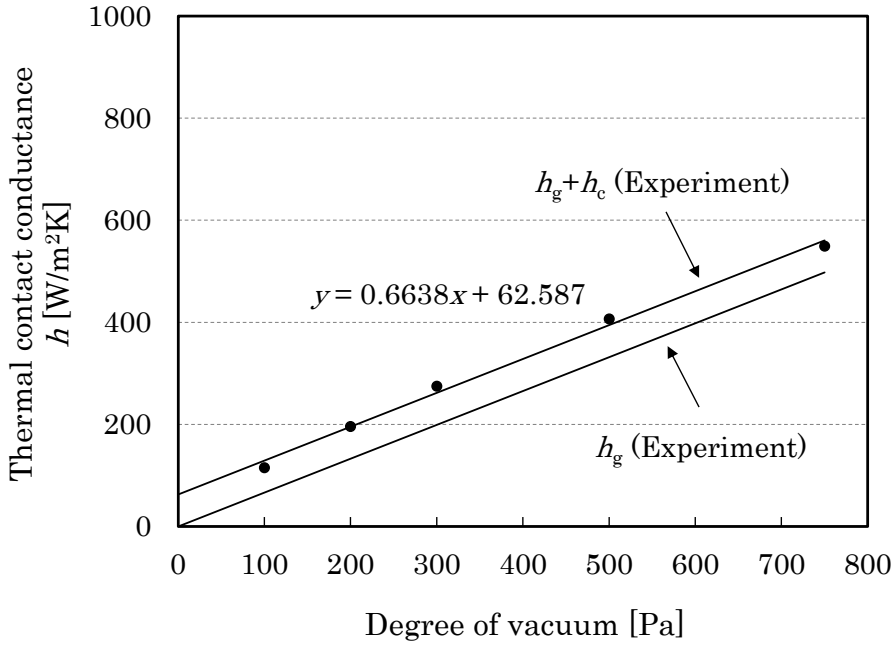


Fig.19 Components of h in free molecular flow region (Specimens: Group A)

以下に，自由分子流条件における h_g の伝熱メカニズムについて考える[6)29)]．h_g による伝熱の模式図を図 20 に示す．簡単のため，接触面は平行な 2 つの壁面 A，B が平均隙間距離 D で設置されているモデルを想定する．壁面 A，B の温度がそれぞれ T_{s1}，T_{s2} であり，$T_{s1}>T_{s2}$ であるとする．壁面間にガスが存在する場合，ガスを微視的に見れば熱運動によってガス分子が飛び回り，A，B 面に衝突している．壁面 A ではね返ったガス分子は途中で他のガス分子と衝突しなければそのまま壁面 B に衝突する．壁面 B から壁面 A に向かうガス分子も同様であると考える．隙間中のガス分子の密度を n とすると，その中のほぼ半数の n_1 は A から B 面に向かい，残りの n_2 が B から A 面に向かっている．密度 n_1 の A から B 面に向かう分子と，n_2 の B から A 面に向かう分子の速度分布は，ガス分子と壁面間のエネルギー交換効率が 100%であると仮定すれば，それぞれ温度 T_{s1}，T_{s2} に対応するマクスウェル分布であると考えられる．ただし，実際にはガス分子が A または B 面で反射されるときの平均エネルギーは壁面温度になりきっていないため，衝突によってエネルギーを交換する際の効率は熱適応係数 α として表す．熱エネルギーの流れは全体として A から B 面に向かっており，この流れを算出するには壁面 A と壁面 B の面積を考えて，そこを通過するエネルギーの総和を求めればよい．故に，A から B に向かう分子によって運ばれるエネルギー $Q_{A\to B}$ は，

$$Q_{A\to B} = \frac{1}{2} n_1 \overline{C_1} \overline{\varepsilon_1} S \tag{4.1}$$

となる．n_1 は A から B 面に向かうガス分子の密度，S は壁面 A，B 間の面積，$\overline{C_1}$ はガス分子の平均速さ（熱運動の平均速さ），$\overline{\varepsilon_1}$ は S を通って A から B 面に向かうガス分子の平均エネルギーである．$\overline{\varepsilon_1}$ は以下の式で算出できる．

$$\overline{\varepsilon_1} = \frac{f+1}{2} k T_{s1} \tag{4.2}$$

ここで，k はボルツマン定数，f はガス分子の内部構造（並進，回転，振動）の自由度である．故に，$Q_{A\to B}$ は，

$$Q_{A\to B} = \frac{1}{2} n_1 \overline{C_1} \frac{f+1}{2} k T_{s1} S \tag{4.3}$$

となる．同様に $Q_{B\to A}$ を考える場合には，T_{s1} を T_{s2} に置き換えて考えればよい．
更に $Q_{A\to B}$ と $Q_{B\to A}$ の差を計算すれば，A から B 面に向かう単位面積当たりの熱エネルギーが算出できる．

$$\frac{Q}{S}=\frac{1}{2}n_1\overline{C_1}\frac{f+1}{2}kT_{s1}-\frac{1}{2}n_2\overline{C_2}\frac{f+1}{2}kT_{s2} \tag{4.4}$$

ここで，巨視的に見たガス流れは静止状態であることを考えれば，S を通る分子数は全体でゼロでなければならず，

$$n_1\overline{C_1}=n_2\overline{C_2} \tag{4.5}$$

の関係にある．これを用いると式(4.4)は，

$$\frac{Q}{S}=\frac{1}{2}n_1\overline{C_1}\frac{f+1}{2}k(T_{s1}-T_{s2}) \tag{4.6}$$

となる．圧力を p として，ガスの分圧の和を用いれば，

$$p=k(n_1T_{s1}+n_2T_{s2}) \tag{4.7}$$

であり，またガス定数を R，ガス（分子）の質量を M とすると，

$$\bar{C}=\sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \tag{4.8}$$

であることから，$n_1\overline{C_1}$，$n_2\overline{C_2}$ を p，T_{s1}，T_{s2} で表すと，

$$\frac{Q}{S}=\frac{1}{2}(f+1)\sqrt{\frac{R}{2\pi M}}\frac{2}{\sqrt{T_{s1}}+\sqrt{T_{s2}}}p(T_{s1}-T_{s2}) \tag{4.9}$$

となる[6]．自由度 f の代わりにガスの比熱比 $\gamma(=(f+2)/f)$ を用い，
更にガスの温度 T を

$$T=\frac{n_1T_{s1}+n_2T_{s2}}{n_1+n_2} \tag{4.10}$$

と定義すれば，温度差($T_{s1}-T_{s2}$)が T_{s1} または T_{s2} に対して十分小さいときには，

$$\frac{2}{\sqrt{T_{s1}}+\sqrt{T_{s2}}}=\frac{1}{\sqrt{T}} \tag{4.11}$$

と書けることから[6]，A から B 面に向かう単位面積当たりの熱エネルギーは結局

$$\frac{Q}{S}=\frac{1}{2}\cdot\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\sqrt{\frac{R}{2\pi MT}}p(T_{s1}-T_{s2}) \tag{4.12}$$

となる．ここで，($T_{s1}-T_{s2}$)・p との比例定数は自由分子流熱伝導率 Λ と呼ばれる．

$$\Lambda=\frac{1}{2}\cdot\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\sqrt{\frac{R}{2\pi MT}} \tag{4.13}$$

なお，上述の通り，ガス分子が A または B 面で反射されるときの平均エネルギーは，一般にはそれぞれの壁面温度 T_{s1}，T_{s2} になりきっていない．このため，適応係数 α を用いて Λ を補正する必要がある． α は温度 T_{s1} の面に温度 T_2 の分子群が入射して，温度 T_1 の分子群となって反射するとき，以下のように定義できる．

$$\alpha = \frac{T_1 - T_2}{T_{s1} - T_2} \ (\leqq 1) \tag{4.14}$$

αは衝突によってエネルギーを交換する際の交換効率を表す指標である．α=1 であれば効率は 100%，α=0 であれば効率は 0%である．

αを用いて，式(4.13)を書き直すと次のようになる．すなわち，A および B 面の適応係数をそれぞれα_1，α_2とすると，

$$\Lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2} \sqrt{\frac{R}{2\pi M T}} \tag{4.15}$$

となる．ここで，γは比熱比，αは適応係数，Rはガス定数 J/kmol K，Mはガスの質量 kg/kmol，Tはガスの温度 K である．

自由分子流条件における接触熱コンダクタンスのガス成分 h_g W/m²K は式(4.15)で示した自由分子熱伝導率Λ W/m²K Pa とチャンバー内圧力 p Pa を用いて算出できる．

$$h_g = \Lambda \cdot p \tag{4.16}$$

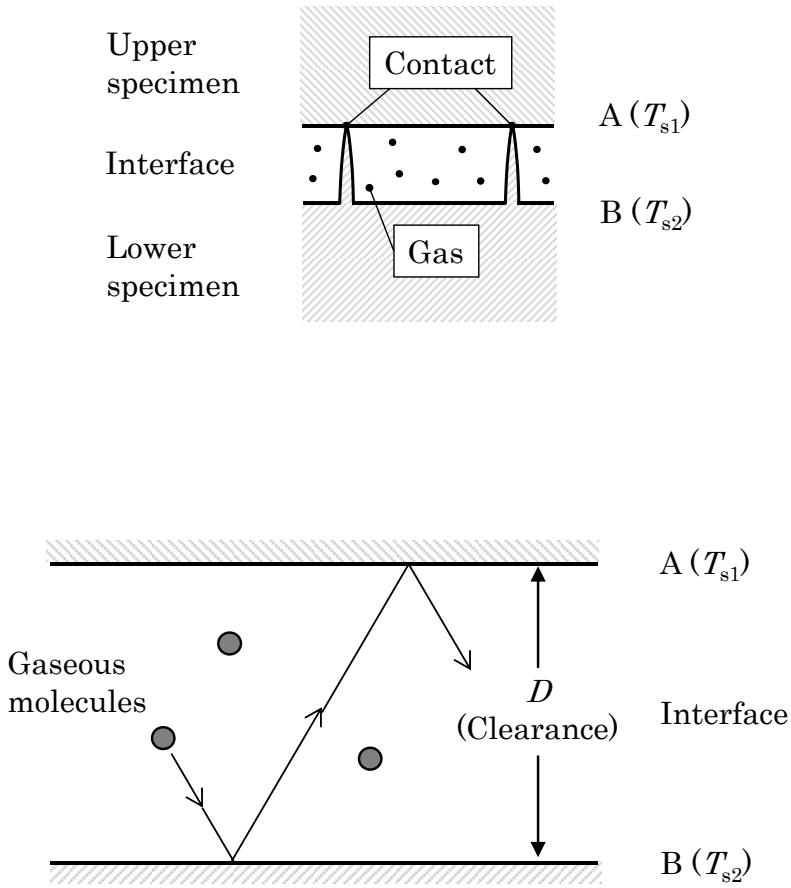


Fig.20 Heat transfer model by h_g under vacuum

次に，図 19 で検討したガス成分 h_g の結果と理論値の比較を図 21 に示す．h_g の理論値は図中において破線および点線で示している．理論値は式(4.15), (4.16)を用いて算出した．

式(4.15)において，適応係数 α はガス分子が壁面との衝突によってエネルギーを交換する際の交換効率を表す係数であり，上部試料側の接触面における効率を α_1，下部試料側の接触面における効率を α_2 と示した．ただし，本実験では上下試料共に同一部材（SUS304）であり，また試料間の温度差が小さいことから，計算時の適応係数 α は $\alpha_1 = \alpha_2$ として考えた．空気の質量 M は空気中の組成が N_2 : 78%，O_2 : 21%，Ar : 1% から成るものとして平均モル質量を算出し，ガス温度は各チャンバー圧力時における上部試料と下部試料の接触面の平均温度を用いた．理論計算時に用いた各パラメータの値を表 6 にまとめて示す．図 21 に示すように，適応係数 α=0.73 において理論値が実験値と一致した．なお，適応係数に関する文献[30)31)]において，伝熱用ガスに N_2 を用いた場合には適応係数 α は 0.7～0.8 程度になることが示されており，N_2 が主成分である空気を伝熱用ガスとして用いた本実験における適応係数が α=0.73 であったことは妥当と考える．これより，図 19 で検討したガス成分 h_g の算出方法および算出値も妥当であったと考える．なお，本論文では接触面に介在するガスが空気の場合について検討を実施したが，他のガス種においても式(4.15), (4.16)は適用が可能であり[6)]，同様の検討が実施できる．伝熱ガスを He とした場合の計算結果を図 21 に併せて示す．He も仮に適応係数 α=0.73 として計算した場合には，高い伝熱性能が得られることがわかる．ただし，ガス分子の質量が小さくなると適応係数も小さくなることが知られていることから[32)]，実際は本計算結果より He の伝熱性能は低下するものと予想するが，それでも高い伝熱性能が得やすく，また反応性の低い希ガスであることから仮にウエハとステージの接触面からチャンバー内に漏洩してもプラズマプロセスにおける処理性能への影響は小さい．これらのことから，半導体製造装置におけるステージの伝熱用ガスとして He が多用されている理由がわかる．

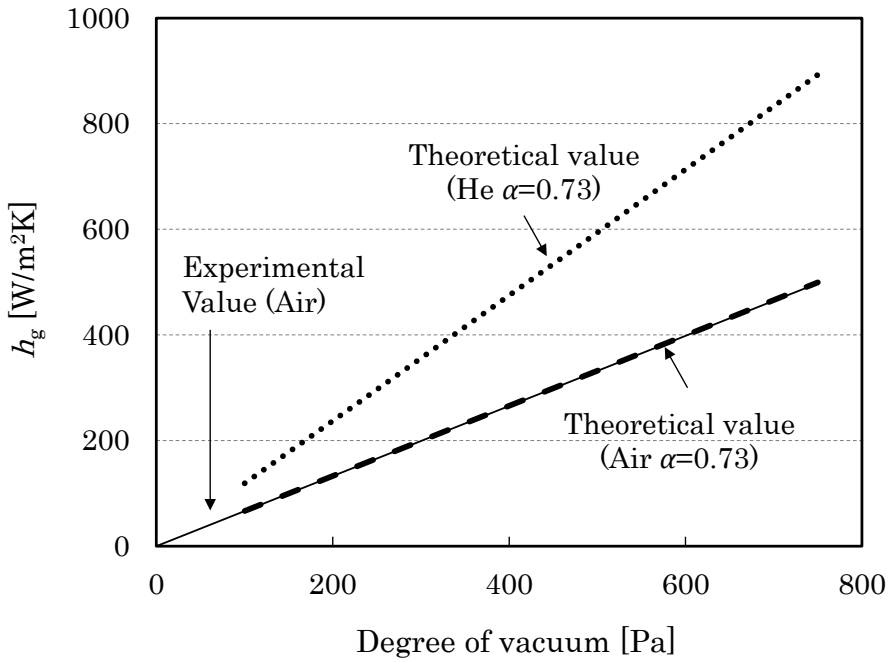


Fig.21 Comparison of experimental and theoretical values of h_g

Table 6 Parameters of heat transfer gas for calculating h_g

	Air	He
Heat capacity ratio γ	1.40	1.67
Molecular weight M [kg/kmol]	28.96	4.00
Gas constant R [J/kmol K]	8314	
Gas temperature T [K]	306.32 ～ 308.23	

4.3.2　温度制御性能の検討

接触熱コンダクタンスがウエハ温度制御に与える影響を検討するために，図 1 におけるステージ構成の各構成要素に 3.4.2 項の表 5 の物性値 [28]および寸法を適用し，ウエハとステージの接触面に図 18 および図 19 の接触熱コンダクタンスが発生している状態を考えた．この際，ウエハ温度 T_w は 3.4.2 項の式(3.9)で示した一次元の合成平面板伝熱モデルを用いて算出した [8]．

ウエハへの入熱量 Q_w=100W，台座の底面温度 T_p=0℃条件において，ウエハ温度を算出した結果を図 22 に示す．この際，ガス成分+接触成分（h_g+h_c）条件における接触熱コンダクタンスは図 18 の値を使用した．また，ガス成分のみ（h_g）条件における接触熱コンダクタンスは図 18 の値から接触成分 h_c=62.6W/m^{2}K を除いた値を使用した．接触成分 h_c の算出方法は図 19 で説明した通りであり，接触成分 h_c は接触面における実接触状態によって決定される値であることから，遷移流以上の圧力領域においても一定の値であると考えた．図 22 より，チャンバー内圧力の増加に伴って接触面の熱コンダクタンスが増加し，両条件共にウエハ温度が台座の底面温度（0℃）に近づいていくことがわかる．次に，ガス成分+接触成分（h_g+h_c）条件とガス成分のみ（h_g）条件でそれぞれ算出したウエハ温度の差 ΔT_w のチャンバー内圧力依存性を図 23 に示す．チャンバー内圧力の増加に伴って，ウエハ温度の差 ΔT_w が小さくなることがわかる．この理由は，チャンバー内圧力が高くなると，接触成分に比べてガス成分の値が大きくなり，結果として接触面における接触熱コンダクタンスはガス成分が支配的になったためであると考える．

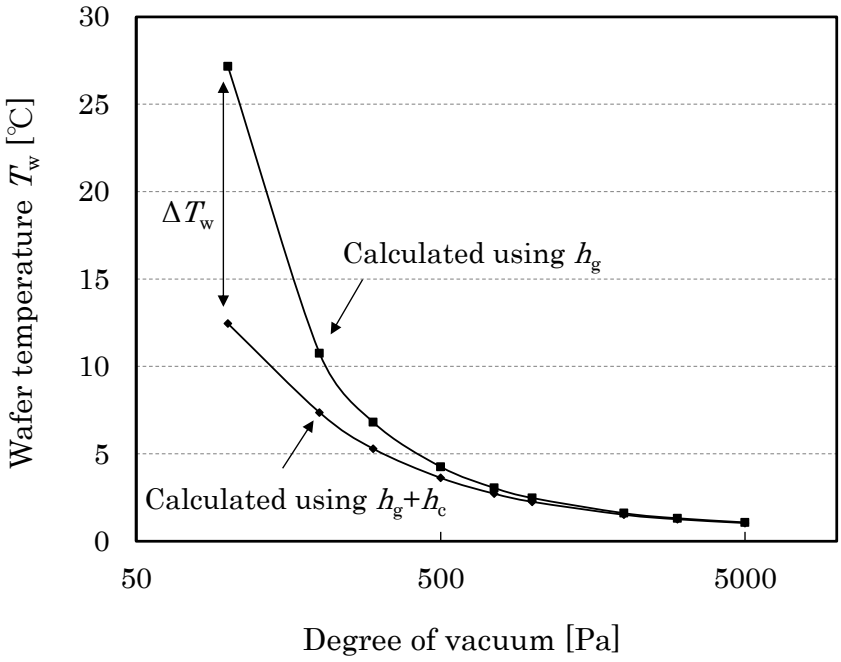


Fig.22 Comparison of h_g+h_c and h_g

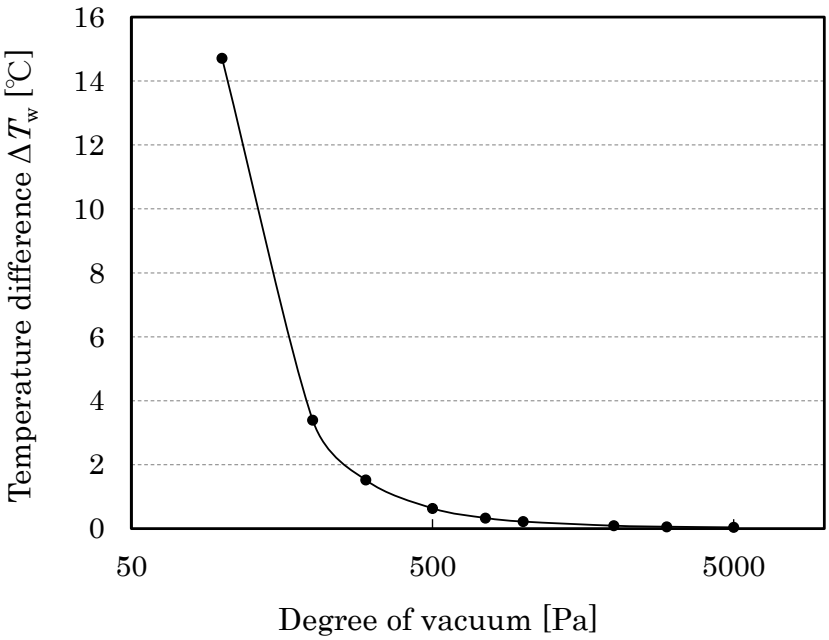


Fig.23 Dependence of ΔT_w on degree of vacuum

チャンバー内圧力 100, 750, 5000Pa 時におけるウエハ温度の差 ΔT_w はそれぞれ 14.7, 0.3，0.1℃であった．静電チャックでウエハを固定するような低接触面圧の条件では接触成分の値が小さいため，自由分子流条件のチャンバー内圧力（750Pa）においても，遷移流以上の圧力条件（1000Pa 以上）と同等の伝熱性能が得られた．なお，ウエハ温度の差 ΔT_w を更に小さくするために，自由分子流条件に保ちながらチャンバー内圧力を更に高く設定したい場合には, 接触面の微小隙間を更に小さくするように設計すればよい．自由分子流条件はクヌッセン数 K_n が 10 より大きい条件で成立し，3.4.1 項の式(3.3)で示した通りクヌッセン数 K_n はガスの平均自由行程を伝熱する壁面間距離で除することにより算出できる．つまり，チャンバー内圧力の上昇に伴い平均自由行程が小さくなっても，その分接触面の微小凹凸を小さくして微小隙間を縮めることにより，自由分子流条件を保つことができると考える．次に，接触面圧を変化させた際のウエハ温度の計算値 T_w を図 24 に示す．図 24 を算出する上での接触熱コンダクタンスは図 17 の値を使用した．また，ウエハへの入熱量 Q_w は 100W とした．結果より，接触面圧の増加に伴って接触熱コンダクタンスが増加することにより, ウエハ温度の低下が確認できる．接触面圧を 6.7kPa から 50kPa まで変化させた際のウエハ温度の変化量を δT_w と定義し, チャンバー内圧力に対する δT_w を図 25 に示す. チャンバー内圧力が高いほど, 接触面圧の変化量に対するウエハ温度の変化量が小さいことがわかる．この理由は，チャンバー内圧力が高くなると接触熱コンダクタンスはガス成分が支配的となるためである．ただし，チャンバー内圧力が 750，5000Pa の時のウエハ温度の変化量を比較するとそれぞれ 0.079, 0.083℃であり, 5000Pa 時の方がウエハ温度の変化量が増加した．この理由は, チャンバー内圧力が 5000Pa 時には接触面圧の変化に伴って接触熱コンダクタンスは接触成分のみならずガス成分も変化するため，自由分子流条件の 750Pa 時に比べてウエハ温度の変化量が大きくなった．故に，接触面圧が変動する外乱に対しては，ガス流れが自由分子流条件を満たし，かつその条件内で高いガス圧力となるように接触面を設計することでロバストな伝熱性能を確保できることがわかる．なお，ガス種を変更する場合にはガスの分子直径によって平均自由行程が変わるため，K_n>10 の条件を保つようにガス圧力を検討する必要がある．

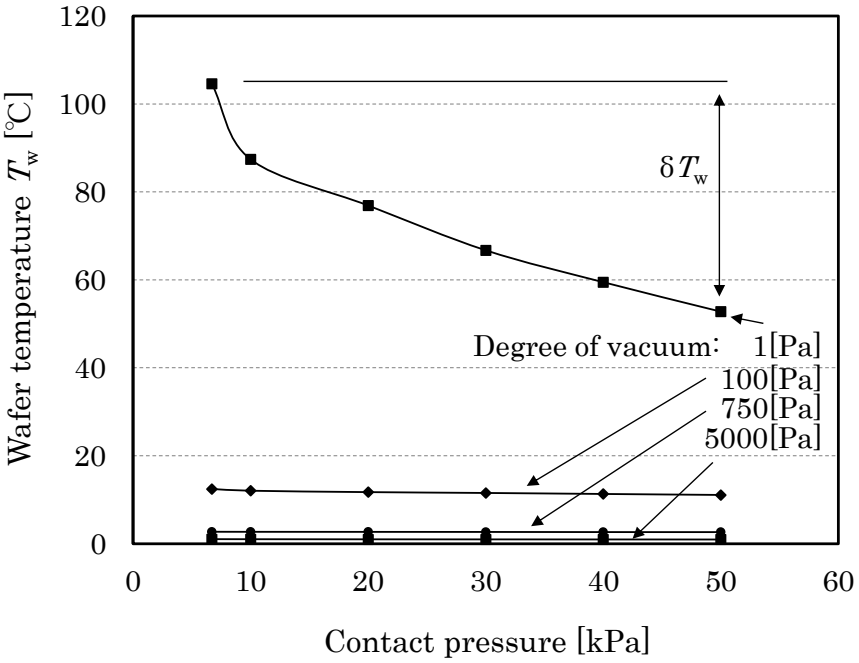


Fig.24 T_w under several conditions

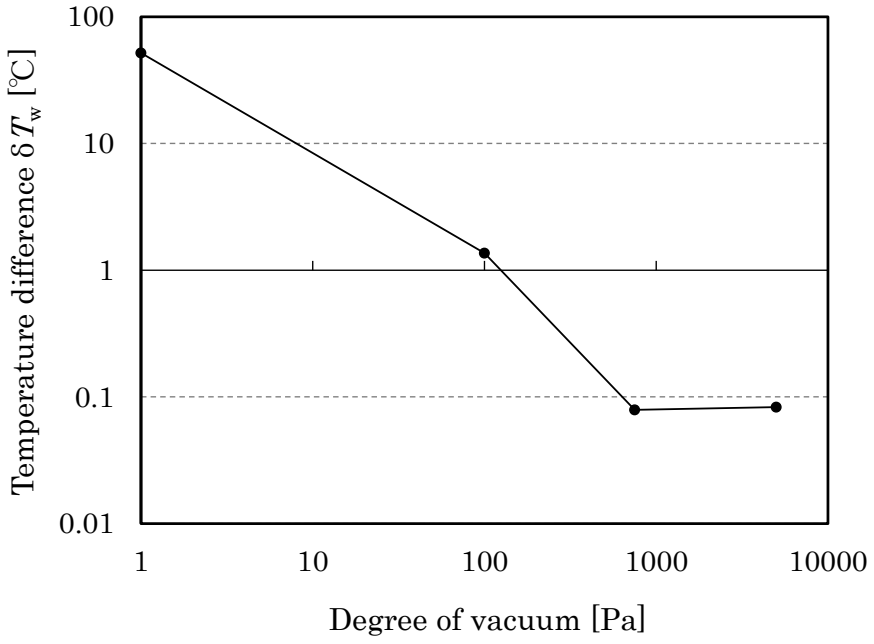


Fig.25 Dependence of δT_w and degree of vacuum

4.3.3　ウエハとステージ間の放電対策指針

図 1 に示す静電チャック構成では内部電極に高電圧を印加することにより，ウエハをステージ表面に吸着固定する[23]．つまり，内部電極とウエハの間には電界が発生する．ウエハ裏面とステージ表面の接触面には伝熱用ガスが供給されるため，伝熱用ガスに放電を発生させない接触面構造の検討が実用上必要となる．特に，ステージ表面の内部電極を覆う誘電体膜内に微小電流が流れる Johnsen-Rahbek 型の静電チャックでは[33]，伝熱用ガスの放電リスクが高くなる．放電が開始する瞬間の火花電圧はパッシェンの法則を用いて考えればよい[31]．

火花電圧はガスの圧力 p と電極間隔 d の積で決まり，極小値を持つ特性がある．ガスが空気の場合のパッシェン曲線を図 26 に示す．pd≒0.7Pa・m の時に最も低い電圧で火花放電が発生することがわかる．次に，ウエハステージの一般的な表面構造の概略図を図 27 に示す[5)23]．ステージの表面には伝熱用ガスを接触面全体に分配するためのガス溝が設置されている．ステージ表面の内部電極を覆う誘電体膜の厚さ d_s は一般的に 200～300 μm 程度である[23)33]．ガス溝深さ d_t は誘電体膜の厚み d_s の範囲内において，火花電圧の極小値条件を避けつつ，接触面内にガスの圧力勾配を発生させない深さで設計する必要がある．図 26 に，チャンバー内圧力を 750，5000Pa とした場合の d の値を併せて示した．チャンバー内圧力が 5000Pa の時には溝深さ d_t≒140 μm で火花電圧が極小値となる．一方，チャンバー内圧力が 750Pa の時には溝深さ d_t≒940 μm で火花電圧が極小値となり，誘電体の厚み d_s＝200～300 μm の範囲内において火花電圧は極小値にならない．つまり，接触面のガス流れは自由分子流条件に設計し，pd 値を小さく（クヌッセン数 K_n を大きく）することが，伝熱用ガスの放電防止の観点からも望ましいと考える．なお，本論文では接触面に介在するガスが空気の場合について検討を実施したが，他のガスを使用する場合においても最も低い電圧で火花放電が発生する pd 値が存在するため[31]，上記の指針に従って設計を実施するとよい．

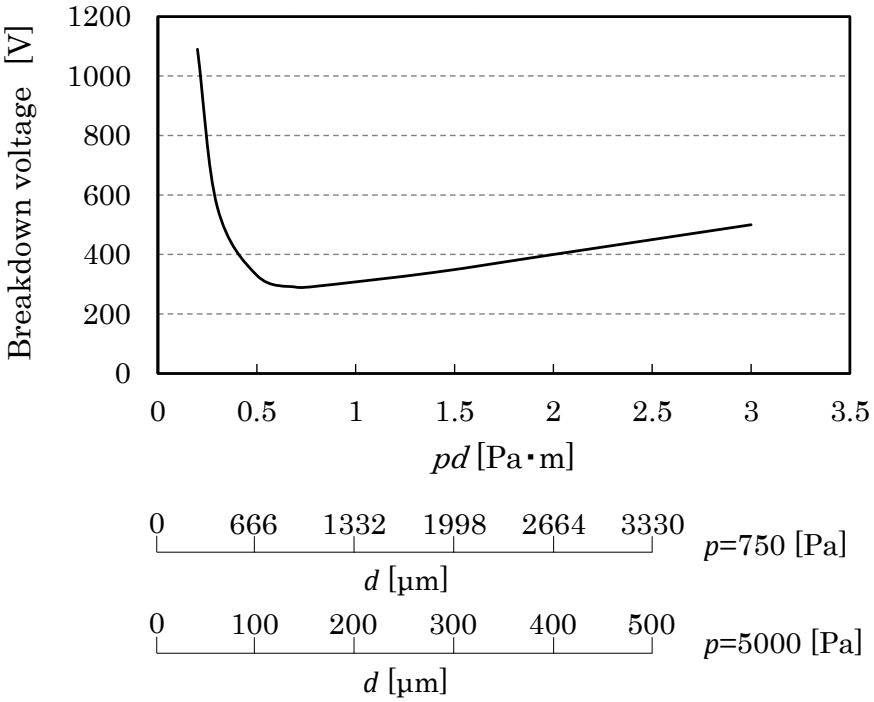


Fig.26 Dependence of Breakdown voltage and *pd*

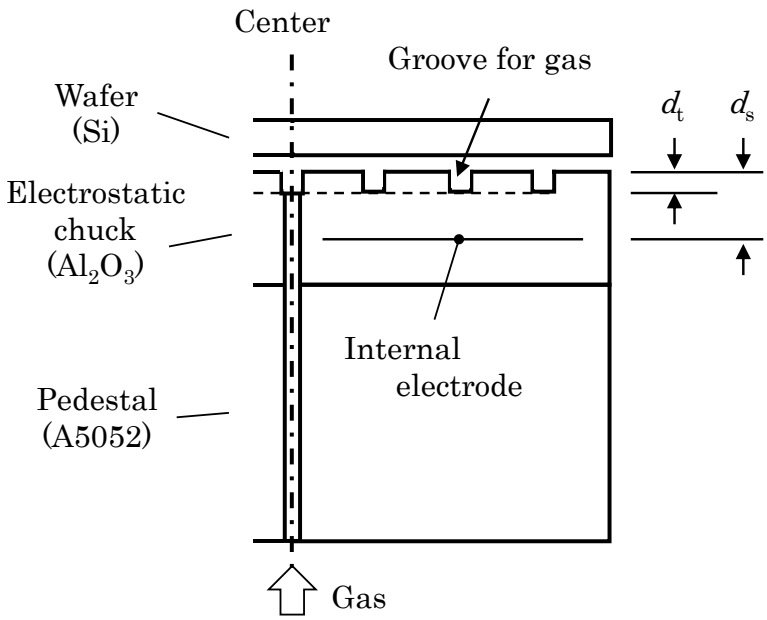


Fig.27 Schematic diagram of the wafer stage

4.4　第 4 章のまとめ

本章ではチャンバー内圧力 1 から 5000Pa の真空状態と 50kPa 以下の接触面圧印加に対する接触熱コンダクタンスを評価し，特にガス成分に着目してその挙動の把握と算出方法の検討を実施した．また，得られた知見を基に接触面圧の変動に対してロバストな伝熱性能を有する接触面の設計指針を検討し，以下の結果を得た．

（1）接触面圧が変化する真空中の接触面において，ガス圧力が自由分子流条件である場合には接触熱コンダクタンスの接触成分のみが変化し，ガス圧力が遷移流以上である場合には接触熱コンダクタンスの接触成分およびガス成分の両方が変化することを実験により明らかにした．これにより，接触面圧が変動する外乱を想定した場合には，ガスの平均自由行程と接触面の微小隙間の関係が自由分子流条件（K_n>10）を満たし，かつその条件内で高いガス圧力となるように接触面を設計することで，ロバストな伝熱性能が得られることを設計指針として示した．

（2）自由分子流条件における接触熱コンダクタンスの実験値をチャンバー内圧力の一次関数として表し，接触成分とガス成分のそれぞれの値を算出する方法を検討した．算出したガス成分は理論値（適応係数 0.73）と一致し，上記算出方法の妥当性を確認した．

（3）接触する試料間に電位差が発生する場合には，接触面は pd 値を小さくして自由分子流条件に設計することで，遷移流以上の圧力条件に比べて接触面隙間における放電リスクを低減することができる．

第 5 章

接触熱コンダクタンスに対する接触面粗さの影響評価

第 5 章　接触熱コンダクタンスに対する接触面粗さの影響評価

5.1　背景

第 3 章および第 4 章において，①接触成分は接触面圧に伴って増加し，その理由は真実接触面積の増加によること，②ガス成分は自由分子流条件を満たす圧力領域であれば，接触面圧に関わらずほぼ一定の値であること，を確認した．これにより，真空中における接触面に面圧が付加された際の伝熱特性を明らかにした．第 5 章では，接触面の表面粗さが接触熱コンダクタンスの接触成分とガス成分のそれぞれに与える影響を詳細に検討することを目的とした．このため，表面粗さが異なる 3 種類の試料を準備し，各々の接触状態における接触熱コンダクタンスの特性を評価した．また，得られた知見を基に，接触面の表面粗さが経時変化する外乱が発生した場合においても接触熱コンダクタンスの変動が少なく，高い伝熱性能を有する接触面の設計指針を考察した．

5.2　実験装置および実験方法

実験装置は，第 3 章と同様のものを使用した．また，接触熱コンダクタンスの測定方法も第 3 章と同様である．なお，チャンバー内圧力は 100Pa から 5000Pa の範囲で調整し，試料の接触面における流れ状態は自由分子流から遷移流以上の圧力領域で評価を実施した．

接触面の表面粗さが接触熱コンダクタンスに与える影響を検討するために，上部試料は 3 種類準備し，接触面を研磨（サンドペーパー）加工，研削加工，切削加工でそれぞれ仕上げた．下部試料の接触面は研削加工で仕上げた．これらの試料はグループ B と表記する．グループ B の写真を図 28 に示す．なお，グループ B も外形寸法および物性値はグループ A と同様であり，仕様は表 2，表 3 の通りである．グループ B の各試料の接触面における表面粗さの測定結果を表 7 に示す．表面粗さの測定方法については，3.3.2 項と同様に加工の筋目を横切る方向で測定を行った．本実験で使用した試料のうち，切削加工で仕上げた接触面には明らかな周方向の切削痕が存在する．このため，表面粗さ計の触針は径方向に移動させて測定を行った．測定は面内 4 か所，90°間隔で行い，条件はカットオフ値 0.8mm，基準長さ 0.8mm，評価長さ 4mm とした．また，研削加工，研磨加工で仕上げた接触面には顕著な加工の筋目は確認されなかったため，切削加工と条件を揃えて測定を実施した．なお，本章においても以下，上部試料を単に「試料」と表記する．

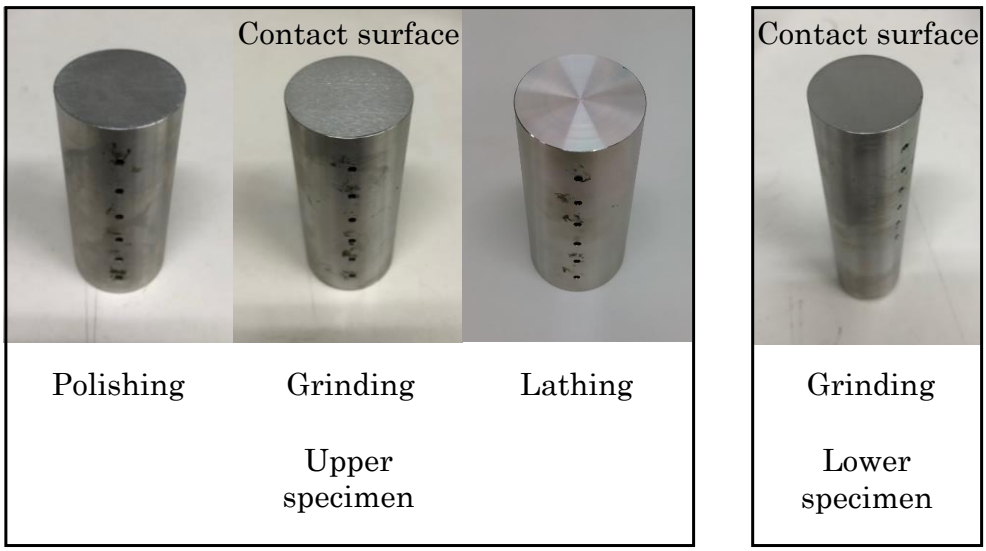


Fig.28 Picture of the specimens (Group B)

Table 7 Surface roughness on contact surface (Group B)

Surface finish of interface	Upper specimen		Lower specimen	
	R_a [μm]	R_y [μm]	R_a [μm]	R_y [μm]
Polishing	0.10	0.91	-	
Grinding	0.30	2.47	0.20	1.58
Lathing	0.81	4.81	-	

5.3　実験結果と考察

接触面圧 6.7kPa 時におけるチャンバー内圧力に対する各試料の接触熱コンダクタンスの測定結果を図 29 に示す．測定方法は 3.3.3 項と同様に，まず試料内の温度勾配から熱流束を求め，熱流束と上下試料間の温度差から接触熱コンダクタンスを算出した．なお接触面圧の 6.7kPa は，試料および押付機構直動部の自重により発生する面圧である．チャンバー内圧力は 100Pa から 5000Pa の範囲で調整した．その結果，全チャンバー内圧力領域において，R_a が小さい試料ほど接触熱コンダクタンスは高い値を示した．また，全試料において，チャンバー内圧力が低い領域では接触熱コンダクタンスがチャンバー内圧力に対して線形増加を示し，一定以上の圧力領域に達すると増加特性が変化した．線形増加を示した圧力領域は切削加工，研削加工，研磨加工の試料でそれぞれ 300Pa，750Pa，1000Pa までであった．研磨加工の試料を用いた実験結果を抽出して図 30 に示す．図 30 において，チャンバー内圧力が 1000Pa までは接触熱コンダクタンスがチャンバー内圧力に対して線形増加を示していることが確認できる．第 3 章および第 4 章で述べた通り，真空中の接触面間において伝熱用ガスの流れの形態が自由分子流である場合には接触熱コンダクタンスのガス成分は伝熱壁面間の距離の影響は受けない一方，ガス圧力に比例することを考えれば，接触熱コンダクタンスがチャンバー内圧力に対して線形増加を示した領域は自由分子流の条件を満たしており，増加特性が変化した高圧領域は遷移流以上の圧力条件になったものと考えることができる．

次に，自由分子流条件において接触熱コンダクタンスを構成する成分を図 31 に示す．まず接触熱コンダクタンスは主に接触成分およびガス成分から成るものと考える．接触熱コンダクタンスの接触成分は h_c ，ガス成分は h_g と表記している．なお，本来は放射成分も考慮すべきであるが，上下試料間の温度差が小さい本研究においては無視できる程度の大きさである．具体的に本実験結果の場合では，図 29 の全実験の中で試料間の温度差 ΔT_s が最大となったのは切削加工の試料を用いたチャンバー内圧力 100Pa 条件であり，この時 ΔT_s は 23.5℃であった．試料（SUS304）の放射率を 0.3 として ΔT_s から 2 面間の放射伝熱量を算出すると 30W/m^2 となる [8]．一方，同実験条件における熱流束は 2408W/m^2 であった．熱流束と比較すると放射伝熱量は約 1%程度であることから，本実験においても無視できる程度であることがわかる．

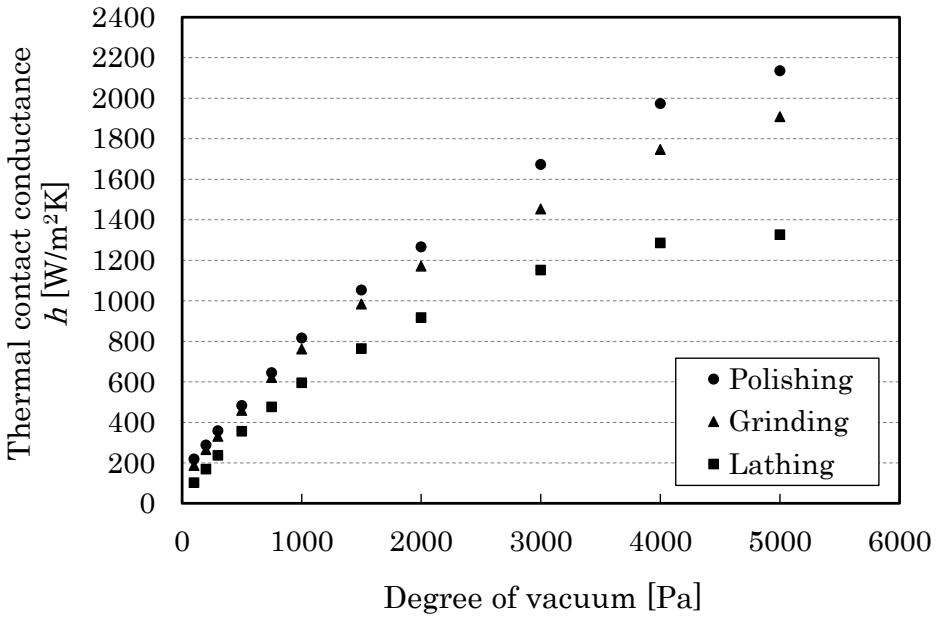


Fig.29 Dependence of *h* on degree of vacuum (Specimens: Group B)

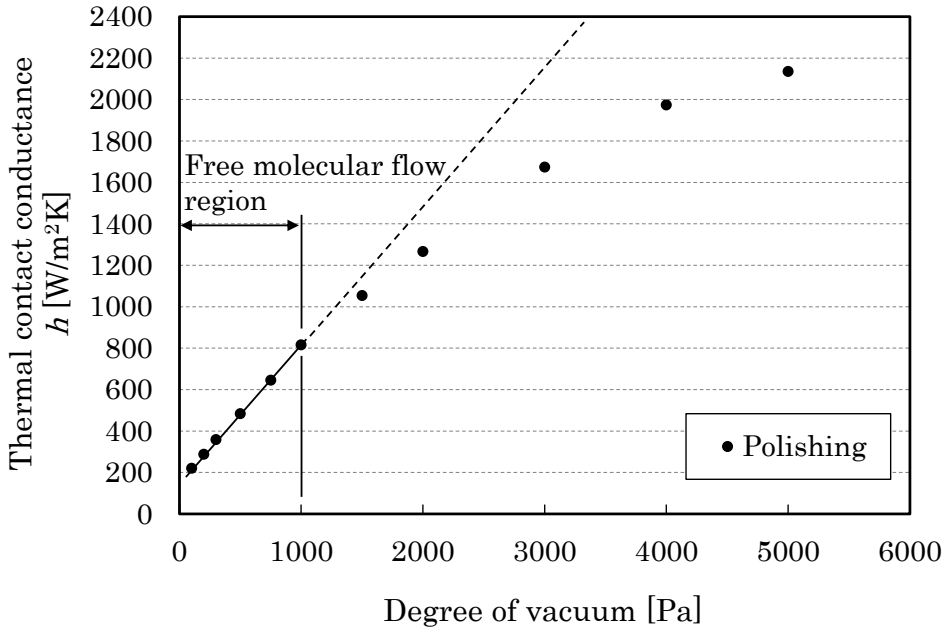


Fig.30 Free molecular flow region with polished surface

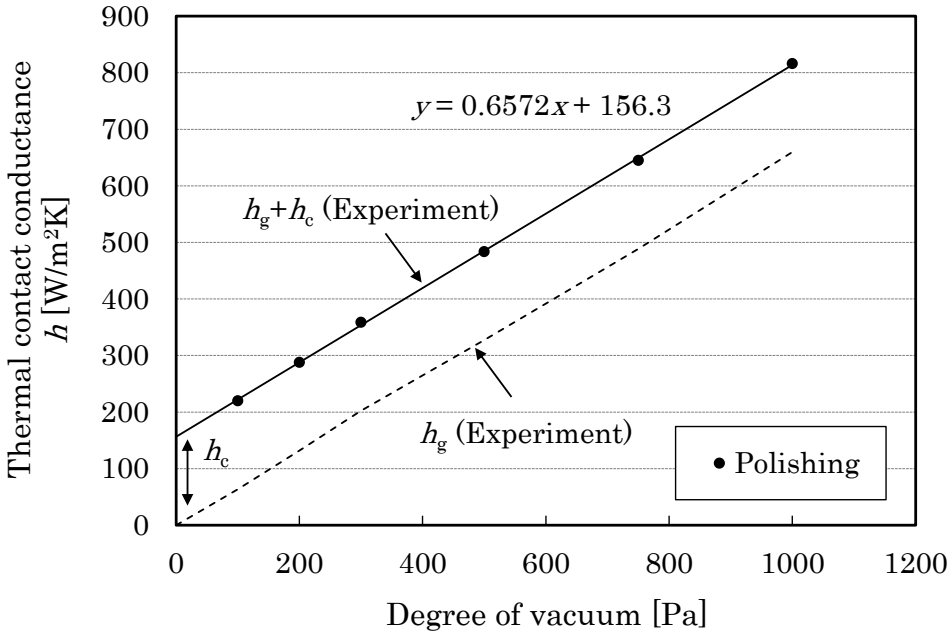


Fig.31 Components of h in free molecular flow region (Specimens: Group B)

次に，4.3.1 項で考え方を示した通り，図 31 の自由分子流条件では接触熱コンダクタンスはチャンバー内圧力の一次関数として表すことができる．この際，チャンバー内圧力が絶対真空（0Pa）の時にはガス成分 h_g はゼロになるはずであり，一次式の切片は接触成分 h_c を示すものと考える．このため，接触熱コンダクタンスの実験値（h_g+h_c）から h_c の値を除くことで，h_g を算出することができる．図 31 において，h_g の算出結果は破線で記している．同様の方法で，3 種類の試料についてそれぞれの h_c を算出した結果を図 32 に示す．R_a が小さい試料ほど h_c は大きな値を示した．これは，R_a が小さい試料ほど接触面における真実接触面積が増加したためと考える [11]．なお，過去の報告例 [9)10)11)15)]においても真空中の接触面における熱抵抗の検討は実施されてきたが，ガス成分を完全に除外した評価ではなかった．図 32 は絶対真空における h_c の算出結果を示している．

次に，各試料の h_g の算出結果を図 33 に示す．図中には自由分子流条件における算出結果がプロットされている．図 29 で示した通り，切削加工，研削加工，研磨加工の試料で自由分子流条件となる圧力領域はそれぞれ 300Pa，750Pa，1000Pa までである．R_a が小さい試料ほど，高いチャンバー内圧力でも自由分子流条件を維持していることがわかる．また，R_a に関わらず全試料の h_g はほぼ同じ値を示した．

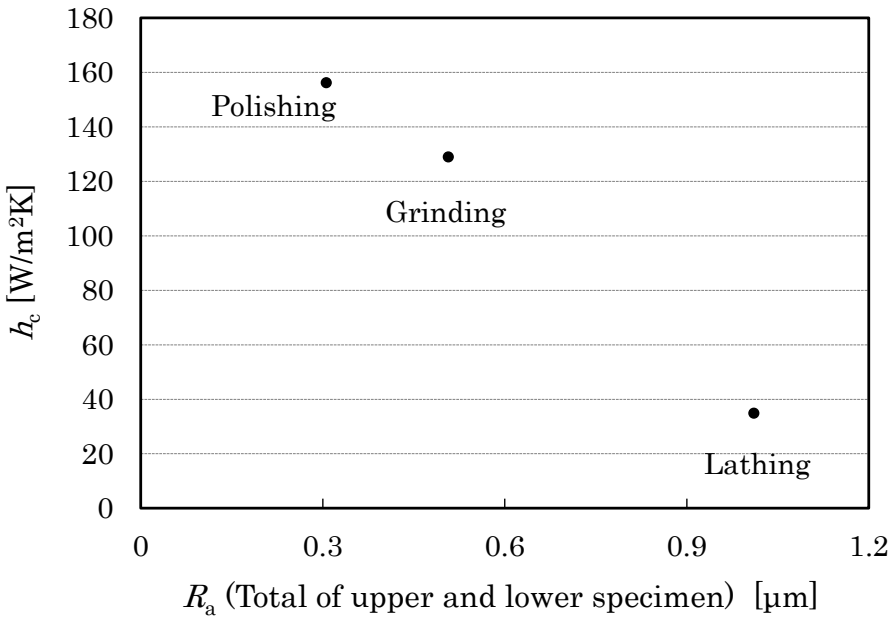


Fig.32 Relationship between h_c and R_a

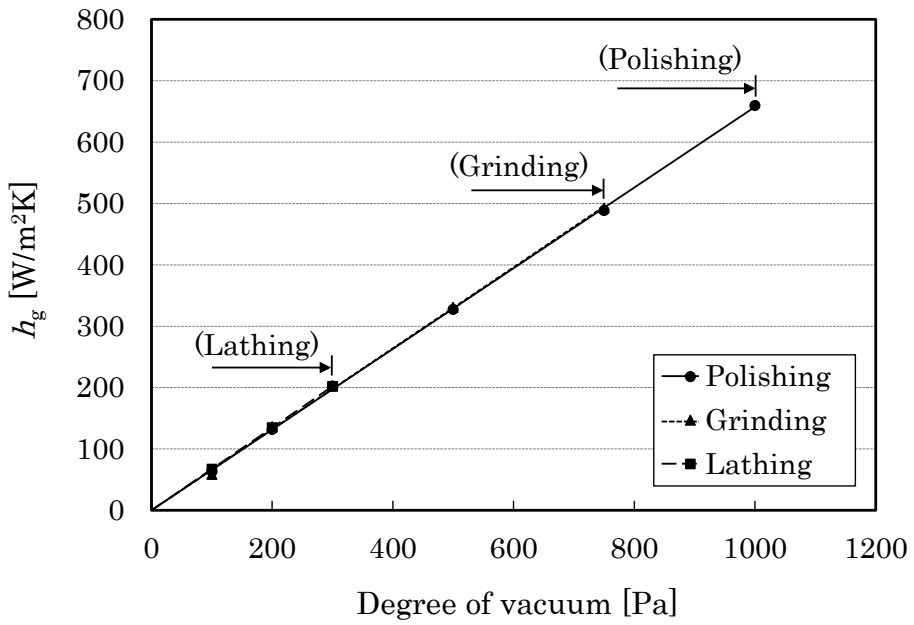


Fig.33 Dependence of h_g on degree of vacuum

本実験において R_a に関わらず全試料の h_g がほぼ同じ値を示した理由は，3.4.1 項および 4.3.1 項でも述べた通り，ガスの流れの形態が自由分子流条件である場合には，接触面の平均隙間距離 D が仮に変化しても通過するエネルギー量が変化しないためと考える．この現象を理論的に考えるためには，まず平均自由工程を理解する必要がある．平均自由工程は，ある一つのガス分子の飛行に注目して最初のガス分子同士の衝突から次のガス分子との衝突までに飛行する距離の平均値と定義される．平均自由行程とその考え方を以下に示す[26]．

ある体積の容器の中に多数の分子が一様に存在しており，熱運動で自由に飛び回っている場合，すべての分子の速さは一定ではなく速い分子も遅い分子も存在し，それらの割合は温度によって決まる．平衡状態におけるガス分子の熱運動の速さに関する分布関数 f($\boldsymbol{C}$)はマクスウェル分布則として知られている．f($\boldsymbol{C}$)は速さを表すスカラーで正の値を持つ．ここで，マクスウェル分布をベクトルで表した f($\boldsymbol{C}$)は

$$f(\boldsymbol{C}) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} exp\left(-\frac{m\boldsymbol{C}^2}{2kT}\right) \tag{5.1}$$

で与えられる．また，熱運動の速さ C は次式の関係がある．

$$\boldsymbol{C}^2 = C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 \tag{5.2}$$

故に，式(5.1)，(5.2)より，

$$f(\boldsymbol{C})d\boldsymbol{C} = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} exp\left\{-\frac{m\left(C_x^2 + C_y^2 + C_z^2\right)}{2kT}\right\} dC_x dC_y dC_z \tag{5.3}$$

となる．

次にガス A とガス B の 2 種類のガス分子が容器内をマクスウェル分布則に従って熱運動しているときの衝突頻度を考える．A 分子のうち速度が C_A と C_A+dC_A の間の値をもつ単位体積当たりの分子数 dn_A，および B 分子のうち速度が C_B と C_B+dC_B の間の値をもつ単位体積あたりの分子数 dn_B はそれぞれ

$$dn_A = n_A\left(\frac{m_A}{2\pi kT}\right)^{3/2} exp\left\{-\frac{m_A\left({C_{Ax}}^2 + {C_{Ay}}^2 + {C_{Az}}^2\right)}{2kT}\right\} dC_{Ax}dC_{Ay}dC_{Az} \tag{5.4}$$

$$dn_B = n_B\left(\frac{m_B}{2\pi kT}\right)^{3/2} exp\left\{-\frac{m_B\left({C_{Bx}}^2 + {C_{By}}^2 + {C_{Bz}}^2\right)}{2kT}\right\} dC_{Bx}dC_{By}dC_{Bz} \tag{5.5}$$

となる．n_A と n_B はそれぞれ A 分子と B 分子の分子数密度である．ここで，A 分子と B 分子に対する相対速度 C_{AB} を

$$C_{AB} = \left\{(C_{Ax} - C_{Bx})^2 + \left(C_{Ay} - C_{By}\right)^2 + (C_{Az} - C_{Bz})^2\right\} \tag{5.6}$$

と定義すると，この相対速度 C_{AB} をもって単位時間あたりに衝突する回数（衝突頻度）d ϕ_{AB} は，

$$d\psi_{AB} = dn_A dn_B \pi {d_{gAB}}^2 C_{AB} \tag{5.7}$$

と表すことができる． πd_{gAB}^2 は衝突断面積である．これより，全衝突頻度 ϕ_{AB} は，

$$\psi_{AB} = n_B \pi {d_{gAB}}^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_{AB}}} \tag{5.8}$$

となる．更に，分子 1 個が同一の分子と衝突する場合には，

$$\psi_1 = \sqrt{2} n \pi {d_g}^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{2} n \pi {d_g}^2 \bar{C} \tag{5.9}$$

となる．$\bar{C}$は熱運動の平均速さである．平均自由行程 λ m は衝突間に進む距離であることから，

$$\lambda = \frac{\bar{C}}{\psi_1} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi {d_g}^2 n} \tag{5.10}$$

と求められる．ここで，

$$p = nkT \tag{5.11}$$

であることから，結局 λ は

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi {d_g}^2 p} \tag{5.12}$$

となることがわかる．k はボルツマン定数 J/K，T はガス温度 K，d_g はガスの分子直径 m，p はガス圧力 Pa である．

3.4.1 項の式(3.3)で示した通り，λ を用いて K_n が算出できる．H.S.Tsien らは，K_n>10 となる領域を自由分子流条件と定義している [25)26)]．換言すれば，自由分子流条件である場合には平均自由行程が長いことを示す．これは式(5.1)から(5.12)の説明の通り，接触面隙間で熱運動をしているガス分子同士の衝突する頻度が非常に少ないことを意味し，これにより接触面の平均隙間距離 D が仮に変化しても（仮に D が拡大しても）ガス分子同士の衝突が発生し難いために通過するエネルギー量は変化しないものと考察できる．図 33 の実験結果より，R_a が異なる（=接触面の D が異なる）3 種類の試料について h_g がほぼ同等の値を示した結果は，上記のような自由分子流条件における伝熱モデルによるものと考える．

一方，遷移流，または粘性流以上の圧力領域では，ガス分子が壁面間を移動する際に他のガス分子との衝突頻度が高くなり，この衝突がガス分子による壁面間のエネルギー移動の阻害要因となる．このため，ガス圧力を増加しても h_g が線形増加しなくなり，更に D によって伝熱性能が変化するものと考える．

以上の考察より，本実験においては，切削加工，研削加工，研磨加工の試料で K_n>10 の条件を満たす圧力領域がそれぞれ 300Pa, 750Pa, 1000Pa までであることがわかる．なお，K_n>10 の条件を満たす圧力領域がわかっていれば，その結果を用いて式(5.12), (3.3)より接触面の D を推定することができる．研磨加工の試料の接触面の D を算出した結果を図 34 に示す．本論文では伝熱用ガスとして空気を使用したため，図中の計算は表 8 に示す空気の物性値を用いて算出した．研磨加工の試料で K_n>10 の条件を満たす圧力領域は 1000Pa までであることから，式(5.12)，(3.3)より，チャンバー内圧力が 1000Pa の時に K_n が 10 となるように D を算出すると 0.67 μm となり，接触面における理論上の D が推定できる．なお，研磨加工試料の接触面の R_a は表 7 より 0.1 μm であり，また下部試料の R_a は 0.2 μm であることから，合計値の 0.3 μm を D と仮定して算出した結果を図 34 に併記している．この場合には，チャンバー内圧力が 1500Pa 時に K_n は約 14 となり，1500Pa 時でも自由分子流条件（K_n>10）となることから，図 30 の実験結果を再現しない．一方，研磨加工試料の接触面の R_y は 0.91 μm であり，下部試料の R_y は 1.58 μm であることから R_y の合計は 2.49 μm であるが，D を 0.67 μm よりも大きいと考えるとチャンバー内圧力 1000Pa 時に K_n は 10 より小さくなってしまう．つまり，図 34 で推定した実験結果を説明可能な D（0.67 μm）は R_a 合計値と R_y 合計値の間の値になっていることがわかる．

図 34 と同じ算出方法で，研削加工および切削加工の試料についても D を算出した．各試料の D を図 35 にまとめて示す．表 7 より，R_a，R_y 共に，切削加工>研削加工>研磨加工の関係となっている．これと同様に，算出した D も研磨加工の試料が一番小さく，切削加工の試料が最も大きい結果となった．なお，研削加工の（上部試料と下部試料の）R_a，R_y の合計値はそれぞれ 0.5 μm，4.05 μm であり，これに対して算出した D は 0.9 μm であった．また，切削加工の R_a，R_y の合計値はそれぞれ 1.01 μm，6.39 μm であり，算出した D は 2.23 μm であった．つまり，研削加工，切削加工の試料についても，算出した D は R_a 合計値と R_y 合計値の間の値であった．なお，D を算出する際のガス温度は, 各試料が自由分子流から遷移流以上の圧力領域に移行する直前のチャンバー内圧力時における上部試料と下部試料の接触面の平均温度を使用した．つまり，研磨加工，研削加工，切削加工の試料でそれぞれ，1000Pa 時の 31.8℃，750Pa 時の 32.5℃，300Pa 時の 32.2℃を用いて算出を行った．

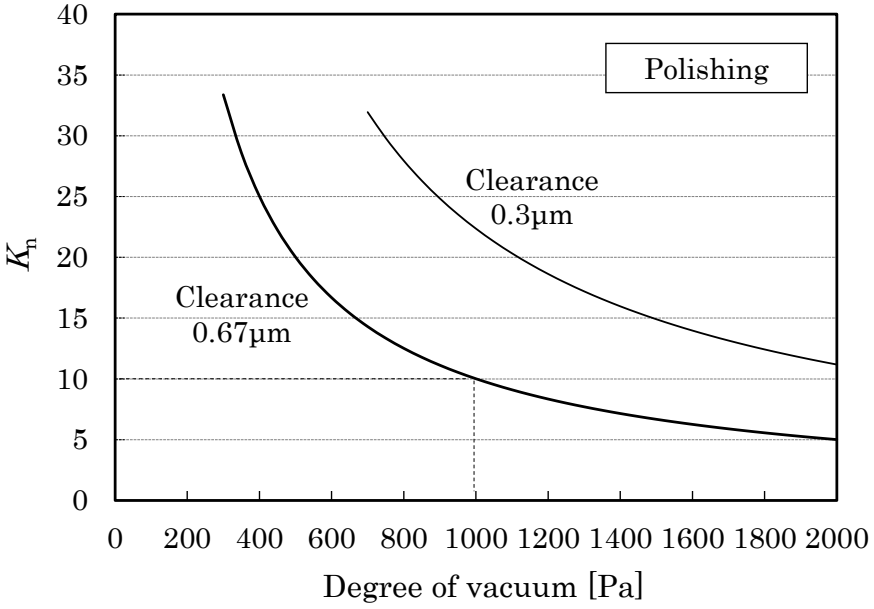


Fig.34 Clearance with polished surface

Table 8 Parameters of heat transfer gas for calculating D

	Air	He
Molecular diameter d [nm]	0.376	0.218
Heat capacity ratio γ	1.40	1.67
Molecular weight M [kg/kmol]	28.96	4.00
Gas constant R [J/kmol K]	8314	
Gas temperature T [K]	303.82 ～ 307.31	

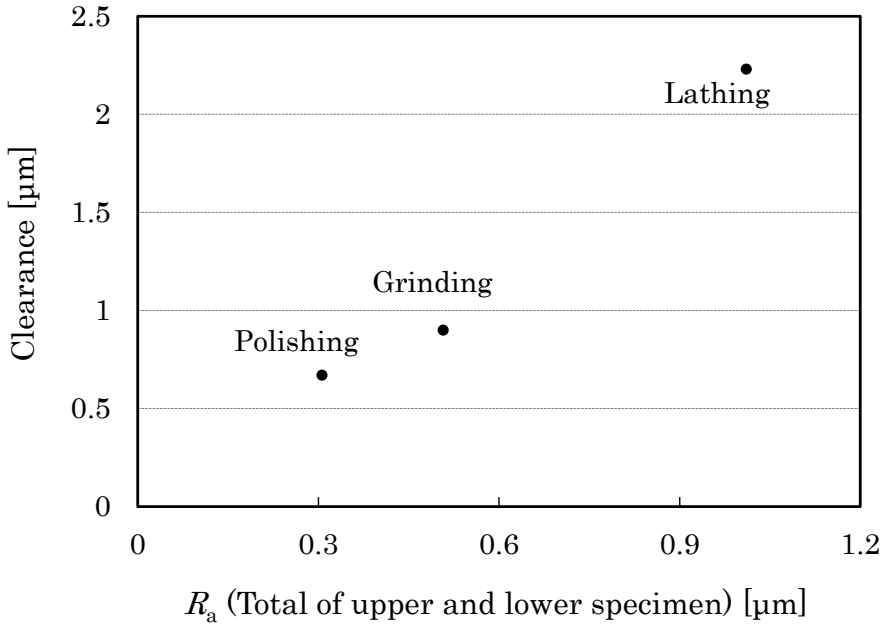


Fig.35 Relationship between clearance and R_a

次に，一般的な半導体製造装置ではウエハとステージ間の伝熱用のガスとして，He が多用される．このため，本論文においても伝熱用ガスに He を用いた場合を仮定し，図 34 と同様に研磨加工の試料の接触面における K_n を算出した結果を図 36 に示す．図中において，He の算出結果は破線で記している．また，計算に用いた He の物性値は表 8 に示す通りであり，ガス温度は研磨加工試料時の実験値（31.8℃）を用いた．その結果，He においてチャンバー内圧力が 1000Pa の時に K_n が 10 となる D は 2.0 μm であった．つまり，空気よりも He の方が自由分子流条件を維持できる D が大きいことがわかる．伝熱用ガスを空気から He に変更することで，自由分子流を維持できる D は約 3 倍となる．空気に比べて He はガスの分子直径が小さいため，平均自由工程が長くなり，その結果として自由分子流を維持できる D も大きくなる．半導体製造装置におけるウエハ用ステージでは，チャンバー内のプラズマクリーニングなどにより，ステージ表面の R_a に経時変化が起こることが知られている[34]．仮にステージ表面の R_a が変化することでウエハとステージ間の接触面における D が拡大したとしても，分子直径が小さい伝熱用ガスを選択することで，自由分子流条件を維持しやすいことがわかる．なお接触面のガス圧力は，接触面圧が使用上の最小値の状態で自由分子流となるように設定しておけば，その後接触面圧が増加した場合でも接触面の D は減少する方向であるため，自由分子流条件から外れることはない．

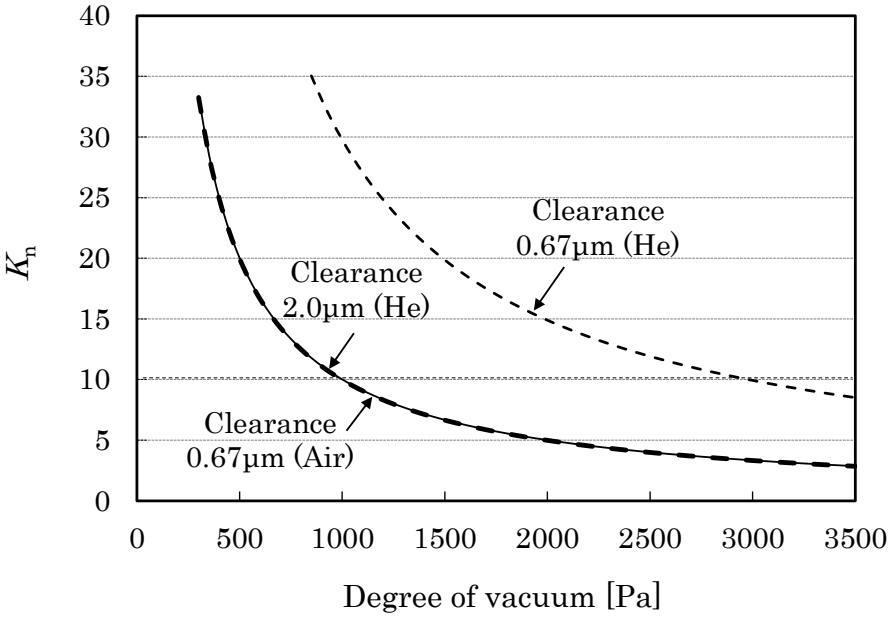


Fig.36 Comparison of Air and He with clearance

伝熱用ガスとして空気または He を使用した時の h_g の比較結果を図 37 に示す．ここでは研磨加工の試料を用いた場合の接触条件（D は 0.67 μm）で考え，物性値は表 8 の値を使用する．図中において理論値は破線で記している．図 30 より，伝熱用ガスとして空気を使用した際には自由分子流条件となるのはチャンバー内圧力が 1000Pa 以下であり，1000Pa 時の h_g の実験値は 660W/m²K である．自由分子流条件における h_g は理論値の算出が可能であり，4.3.1 項において算出方法を示した．熱適応係数 α を 0.73 とすることで，1000Pa 時の h_g の理論値は 668W/m²K となり，実験値と理論値がほぼ一致することがわかる．空気の α=0.73 は文献値 [30)31)] とほぼ一致しており，妥当な結果であると考える．次に，同様の理論計算を用いて He を使用する場合について検討する．図 36 より，He の場合には自由分子流条件となるのはチャンバー内圧力が 3000Pa 以下であり，3000Pa 時の h_g の理論値は 1556W/m²K となる．この際，He の α は文献値 [31)] より 0.4 として算出した．以上より，同じ D で考えた場合でも，自由分子流条件を維持しながら，He は空気に比べて圧力を約 3 倍高くすることができ，これにより h_g を約 2.3 倍高くすることができる．また，He は不活性な希ガスであることから，仮にウエハとステージの接触面から半導体製造装置の真空チャンバー内に漏洩してもプラズマプロセスへの影響が少ないという利点もある．これらの理由により，半導体製造装置の伝熱用ガスとして He が多用されている理由がわかる．なお，研磨加工の試料の接触面の h_c は図 30 より 156 W/m²K，チャンバー内圧力 1000Pa 時の h_g の実験値は図 37 より 660W/m²K であり，本実験条件における接触熱コンダクタンスは接触成分よりもガス成分の方が大きい．また，伝熱用ガスを空気から He に変更すれば更にガス成分が支配的になることがわかる．

以上より，接触面の表面粗さが経時変化する外乱が発生した場合においても接触熱コンダクタンスの変動が少なく，高い伝熱性能を有する接触面の設計指針として，伝熱用ガスとしては分子直径が小さい He などの不活性ガスを選定し，また接触時の D が小さくなるように試料の接触面の R_a を小さく仕上げることで，自由分子流条件を維持する圧力領域を拡大させ，ガス圧力は自由分子流条件を保つ領域内で高めに設定することが有効であると考える．これにより，表面粗さの経時変化が発生しても，自由分子流条件を満たしている間は h_g の変動を抑制し，ひいては接触熱コンダクタンスの変動を低減できる．

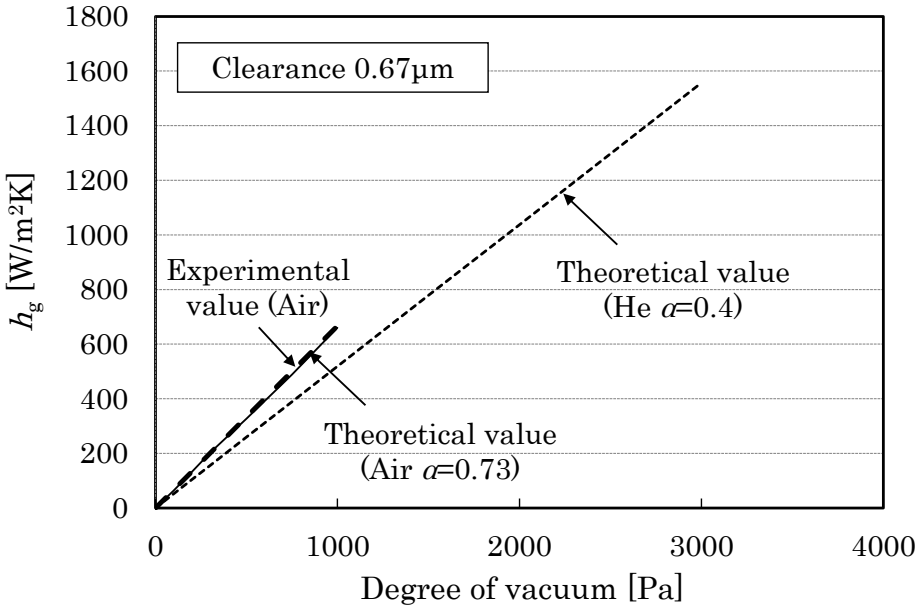


Fig.37 Comparison of Air and He with h_g

5.4　第 5 章のまとめ

本章では真空中のウエハとステージの接触面を対象として，接触熱コンダクタンスへの表面粗さの影響を検討し，以下の結果を得た．

(1)接触熱コンダクタンスの実験値から絶対真空（0Pa）時の接触成分を算出した結果，接触面の R_a が小さい試料ほど大きな値を示した．R_a が小さい接触面ほど真実接触面積が増加したためと考えられる．

(2)ガス成分は，自由分子流条件を満たす圧力領域においては接触面の R_a に関わらず，ほぼ同じ値を示した．また，接触面の R_a が小さい試料ほど，高いチャンバー内圧力でも自由分子流条件を維持した．R_a が小さい試料ほど，接触面における平均隙間距離が縮小したためと推察される．

(3)接触面の表面粗さが経時変化する外乱が発生した場合においても，接触熱コンダクタンスの変動が少なく，高い伝熱性能を有する接触面の設計指針として，伝熱用ガスとして分子直径が小さい He などのガスを選定し，接触時の平均隙間距離が小さくなるように試料の接触面の R_a を小さく仕上げ，ガス圧力は自由分子流条件を保つ領域内で高めに設定することが有効であると考える．

第 6 章

結　論

第 6 章　結論

本章ではこれまでに述べた研究成果を総括し，本研究の結論ならびに今後の課題について述べる．

第 1 章では，まず背景として本研究では特に半導体製造装置に注目し，真空中におけるウエハとステージの伝熱特性の評価・検討を実施することを説明した．

次に，本研究の目的は主に，

①接触熱コンダクタンスの各成分の基本特性の把握，

②ガス成分の特性解明と算出方法の検討，

③解明した伝熱メカニズムおよび得られた知見を基にして，半導体製造装置を設計・運用する上で課題となる接触面圧の変動，接触面粗さの経時変化などの外乱に対して，ロバストな接触面の設計指針を提案すること，

であることを示した．また，本研究の研究対象（条件）は半導体製造装置の実使用条件を想定して接触面圧 50kPa 以下，ガス圧力 1～5000Pa であることを説明し，過去の報告例との研究対象の差異を説明した．

第 2 章では，半導体製造装置におけるウエハ温度制御の重要性，一般的なステージ構成と温度制御方法，温度制御の課題について述べた．本章の内容のまとめを以下に示す．

(1) 半導体製造装置では，処理中のウエハ温度を最適に制御することで，加工形状の制御やウエハ面内における加工均一性の確保が可能であり，ウエハ温度制御は加工性能を左右する重要な技術となっている．

(2) ウエハを載置するステージには温度制御機構が内蔵されており，ステージからの加熱または冷却，更にプラズマからの入熱によってウエハの温度が決定される．

この構成においては，ウエハとステージの接触面における伝熱の状態，いわゆる接触熱コンダクタンスがウエハ温度を決める重要なパラメータとなる．

(3) 接触熱コンダクタンスに関する過去の報告例は，接触面圧やガス圧力の領域が半導体製造装置の実使用条件から外れているため，過去において報告されている検討結果を設計データとしてそのまま使用することができない．このため，半導体製造装置における実使用条件を想定した評価を実施することが必要である．

(4) 半導体製造装置においてはウエハとステージ間の接触熱コンダクタンスが長期に亘って安定していることが望ましい．しかしその安定性の阻害要因として，接触面圧の変化や接触面の状態（表面粗さ）の変化などの外乱が想定される．接触熱コンダクタンスは接触成分，ガス成分，放射成分で構成されるものと考えられ，各種外乱に対する各成分の特性や挙動を把握し，対策を考察することで最適な設計指針を構築できるものと考える．

第 3 章では，半導体製造装置におけるウエハとステージの接触状態を模擬した実験系を構築した．また，真空中における接触熱コンダクタンスの構成成分とその基本特性を検討し，以下の結果を得た．

(1)接触熱コンダクタンスは接触成分，ガス成分，放射成分で構成される．本実験における放射伝熱量は全伝熱量の 1%程度であり，無視できる程度であった．

(2)接触成分は接触面圧に伴って増加した．接触面圧に伴って真実接触面積が増加したためと考える．接触面圧が低い領域においては，接触面圧に対する接触成分の特異的な変化が見られた．接触面の微小凹凸の形状特性に起因するものと推察される．

(3) チャンバー内圧力 100Pa の実験において，接触熱コンダクタンスはガス成分が支配的であることがわかった．半導体製造装置においては数百 Pa～数千 Pa で伝熱用ガスの圧力を制御する運用例が最も多いと考えられ，この場合にはガス成分を主体とした伝熱が生じるものと考える．

(4)ガス成分は自由分子流となるガス圧力領域であれば，接触面圧に関わらずほぼ一定の値であった．

第 4 章では，チャンバー内圧力 1 から 5000Pa の真空状態と 50kPa 以下の接触面圧印加に対する接触熱コンダクタンスを評価し，特にガス成分に着目してその挙動の把握と算出方法の検討を実施した．また，得られた知見を基に接触面圧の変動に対してロバストな伝熱性能を有する接触面の設計指針を検討し，以下の結果を得た．

(1)接触面圧が変化する真空中の接触面において，ガス圧力が自由分子流条件である場合には接触熱コンダクタンスの接触成分のみが変化し，ガス圧力が遷移流以上である場合には接触熱コンダクタンスの接触成分およびガス成分の両方が変化することを実験により明らかにした．これにより，接触面圧が変動する外乱を想定した場合には，ガスの平均自由行程と接触面の微小隙間の関係が自由分子流条件（K_n>10）を満たし，かつその条件内で高いガス圧力となるように接触面を設計することで，ロバストな伝熱性能が得られることを設計指針として示した．

(2)自由分子流条件における接触熱コンダクタンスの実験値をチャンバー内圧力の一次関数として表し，接触成分とガス成分のそれぞれの値を算出する方法を検討した．算出したガス成分は理論値（適応係数 0.73）と一致し，上記算出方法の妥当性を確認した．

(3)接触する試料間に電位差が発生する場合には，接触面は pd 値を小さくして自由分子流条件に設計することで，遷移流以上の圧力条件に比べて接触面隙間における放電リスクを低減することができる．

第 5 章では真空中のウエハとステージの接触面を対象として，接触熱コンダクタンスへの表面粗さの影響を検討し，以下の結果を得た．

(1)接触熱コンダクタンスの実験値から絶対真空（0Pa）時の接触成分を算出した結果，接触面の R_a が小さい試料ほど大きな値を示した．R_a が小さい接触面ほど真実接

触面積が増加したためと考えられる．
(2)ガス成分は，自由分子流条件を満たす圧力領域においては接触面の R_a に関わらず，ほぼ同じ値を示した．また，接触面の R_a が小さい試料ほど，高いチャンバー内圧力でも自由分子流条件を維持した．R_a が小さい試料ほど，接触面における平均隙間距離が縮小したためと推察される．
(3)接触面の表面粗さが経時変化する外乱が発生した場合においても，接触熱コンダクタンスの変動が少なく，高い伝熱性能を有する接触面の設計指針として，伝熱用ガスとして分子直径が小さい He などのガスを選定し，接触時の平均隙間距離が小さくなるように試料の接触面の R_a を小さく仕上げ，ガス圧力は自由分子流条件を保つ領域内で高めに設定することが有効であると考える．

以上の検討から，半導体製造装置で運用例の多い数百 Pa から数千 Pa の伝熱用ガスの圧力領域における接触面では，接触熱コンダクタンスは接触成分，ガス成分，放射成分の中のガス成分が支配的となり，ガス成分を主体とした伝熱が生じるものと考えられる．これにより，ステージとの伝熱によってウエハ温度を高精度に制御するためには，ガス成分が重要なパラメータであることがわかった．また，ガス成分は自由分子流となるガス圧力領域であれば，接触面圧に関わらずほぼ一定の値であることが実験により明らかになった．この特性を考慮して，伝熱用ガスとしては分子直径が小さい He などのガスを選定し，かつ接触時の平均隙間距離が小さくなるように試料の接触面の R_a を小さく仕上げ，更にガス圧力は自由分子流条件（K_n>10）を保つ領域内で高めに設定することで，接触面圧の変化や接触面の状態（表面粗さ）の変化などの外乱に対してもロバストな高い伝熱性能を有する伝熱面を実現できることがわかった．

なお，本研究では接触熱コンダクタンスの中でも主にガス成分に注目して評価・検討を実施した．一方で，今後更に接触熱コンダクタンスを詳細に検討していくためには，接触成分の更なる詳細な検討も必要となる．本研究において，接触面圧が低い領域においては接触面圧に対する接触成分の特異的な変化が生じることを実験的に確認した．この現象について接触面の微小凹凸の形状特性に起因するものと推察したが，現象の解明のためには真実接触面積の絶対値の測定や理論計算などが必要であり，これらが今後の課題として考えられる．

最後に，本審査学位論文の内容は著者が過去に執筆した学術論文[35)~37)]の内容をまとめたものであり，上記学術論文の図，表，および文章の一部を転載している．

参考文献

参考文献

1) 木ノ切恭治: おもしろサイエンス 真空の科学, 日刊工業新聞社, (2013).
2) H. Abe, M. Yoneda and N. Fujiwara: Developments of Plasma Etching Technology for Fabricating Semiconductor Devices, Jpn. J. Appl. Phys., 47, 3 (2008) 1435.
3) T. Tandou, S. Kubo, K. Yokogawa, N. Negishi and M. Izawa: Improving the etching performance of high-aspect-ratio contacts by wafer temperature control, Precision Engineering, 44, (2016) 87.
4) S. Kanno, G. Miya, J. Tanaka, T. Masuda, K. Kuwahara, M. Sakaguchi, A. Makino, T. Tsubone and T. Fujii: Controlling gate-CD uniformity by means of a CD prediction model and wafer-temperature distribution control, Thin Solid Films, 515, (2007) 4941.
5) K.C. Hsu, J.Y. Yang, J.Z. Chen, Y.H. Yu and Y.J. Chen: Modeling and Simulation of Heat Transfer Characteristics of 12-inch Wafer on Electrostatic Chuck, International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference, ISBN: 978-1-4673-8356-1, (2015).
6) 堀越源一: 真空技術 (第 3 版), 東京大学出版局, (2006).
7) C.V. Madhusudana: Thermal Contact Conductance, Springer-Verlag New York, (1996).
8) 一色尚次, 北山直方: 伝熱工学, 北山出版, (2016).
9) YU. P. SHLYKOV, YE. A. GANIN: THERMAL RESISTANCE OF METALLIC CONTACTS, Int. J. Heat Mass Transfer, 7, (1964) 921.
10) 柳和久, 塚田忠夫: 不規則微小突起をもつ機械加工面の接触伝熱機構(第 2 報), 精密機械, 47, 6 (1981) 68.
11) 清水伸二, 菊森一洋, 坂本治久, 玉置賢次: 真実接触面積を考慮した結合部接触熱抵抗の定量的測定法, 精密工学会誌, 71, 8, (2005) 1026.
12) 清水伸二: 工作機械における結合部とその真実接触面積を考慮に入れた基本特性の評価, 精密工学会春季大会講演論文集, (2014) 1287.
13) 福岡俊道, 野村昌孝, 山田章博: 異材界面における接触熱抵抗の評価,日本機械学会論文集(A 編), 76, 763 (2010) 88.
14) 福岡俊道, 野村昌孝: チタン材料の接触熱抵抗の測定とボルト締結体への応用, 日本機械学会論文集, 83, 851 (2017).

15) O. Takeyama, H. Sakamoto, M. Kikuchi, M. Ishikawa, M. Hashimoto, K. Tomizawa, N. Takahashi and B. Choi: Experimental measurement of heat transfer characteristics between contacting surfaces in loaded and vacuum atmosphere, International Conference on Precision Engineering, (2016).
16) 野尻一男: はじめての半導体ドライエッチング技術, 技術評論社, (2012).
17) EE Times Japan: TSMC がロードマップを発表, EUV 導入は 19 年前半, http://eetimes.jp/ee/articles/1805/10/news033.html, (2018 年 05 月 10 日公開)
18) 渡辺重佳, 廣島佑, 玉井翔人, 横田智広, 佐藤匠: ムーアの法則以降の新しい半導体メモリとトランジスタの技術動向, 湘南工科大学紀要, 50, 1.
19) 遠田豊, 古瀬宗雄, 高田和男, 堤貴志: Electron Cyclotron Resonance Plasma を用いたシリコン深掘り技術, J. Vac. Soc. Jpn., Vol. 53, No. 7, (2010) 435.
20) 前田和夫: 半導体と真空装置, 表面技術, 48, 11 (1997) 1043.
21) CHARACTERISTICS OF KYOCERA TECHNICAL CERAMICS (材料特性表), 京セラ株式会社, http://www.kyocera.co.jp
22) JIS B 0633: 2001 製品の幾何特性仕様 (GPS) - 表面形状: 輪郭曲線方式 - 表面性状評価の方法及び手順 (ISO 4288: 1996), 日本規格協会.
23) 井口忠士, 立川俊洋, 茅本隆司: 静電吸着装置の材料と方式, J. Vac. Soc. Jpn., 45, 8 (2002) 11.
24) 副島辰夫: 表面の三次元構造解析に関する研究, 佐賀県工業技術センター研究報告書, (1997).
25) H. S. Tsien: “Super-aerodynamics, Mechanics of Rarefied Gases”, J. Aeron. Sci, 13, 12 (1946) 653.
26) 日本機械学会: 原子・分子の流れ, 共立出版, (1998).
27) 千田裕彦: 粘性流領域における真空排気の理論計算とその応用, SEI テクニカルレビュー・第 176 号, (2010) 1.
28) 日本機械学会: 伝熱工学資料 (第 4 版), 丸善, (2003) 316.
29) 宗像健: 真空下の熱移動, 真空, 10, 11 (1967) 377.
30) 水野克俊, 宮崎佳樹, 小方正文, 長嶋賢: 希土類系高温超電導磁石の保冷特性評価試験, RTRI Report, 25, 3 (2011) 5.
31) 日本真空技術株式会社: 真空ハンドブック (第 1 版), オーム社, (1992), 122-175.
32) 福谷克之: 真空と表面, J. Vac. Soc. Jpn., 56, 6 (2013) 204.
33) S. Qina and A. McTeer: Wafer dependence of Johnsen–Rahbek type electrostatic chuck for semiconductor processes, J. Appl. Phys. 102, (2007) 064901.
34) 池田真義, 佐護康実: 絶縁膜ドライエッチング装置における静電チャックステージ, J. Vac. Soc. Jpn., 45, 8, (2002) 31.

35) 丹藤 匠, 御法川 学: 真空中における接触熱コンダクタンスに関する研究（自由分子流領域における低接触面圧時の評価結果), 精密工学会誌, 84, 3 (2018) 262.
36) 丹藤 匠, 御法川 学: 真空中における接触熱コンダクタンスに関する研究（ロバストな伝熱特性を有する接触面の設計指針), 設計工学会誌, 53, 11 (2018) 829.
37) 丹藤 匠, 御法川 学: 真空中における接触熱コンダクタンスに関する研究（接触面の表面粗さの影響), 精密工学会誌, 採択済・掲載待中

謝　辞

謝辞

本研究は法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻 御法川学教授のご指導の下実施されました．御法川教授には丁寧に且つ暖かくご指導いただきましたことに心より御礼申し上げます.

本論文の副査をお引き受け頂きました，法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻の平野元久教授，川上忠重教授には有益なご指導を頂戴致しました．厚く御礼申し上げます.

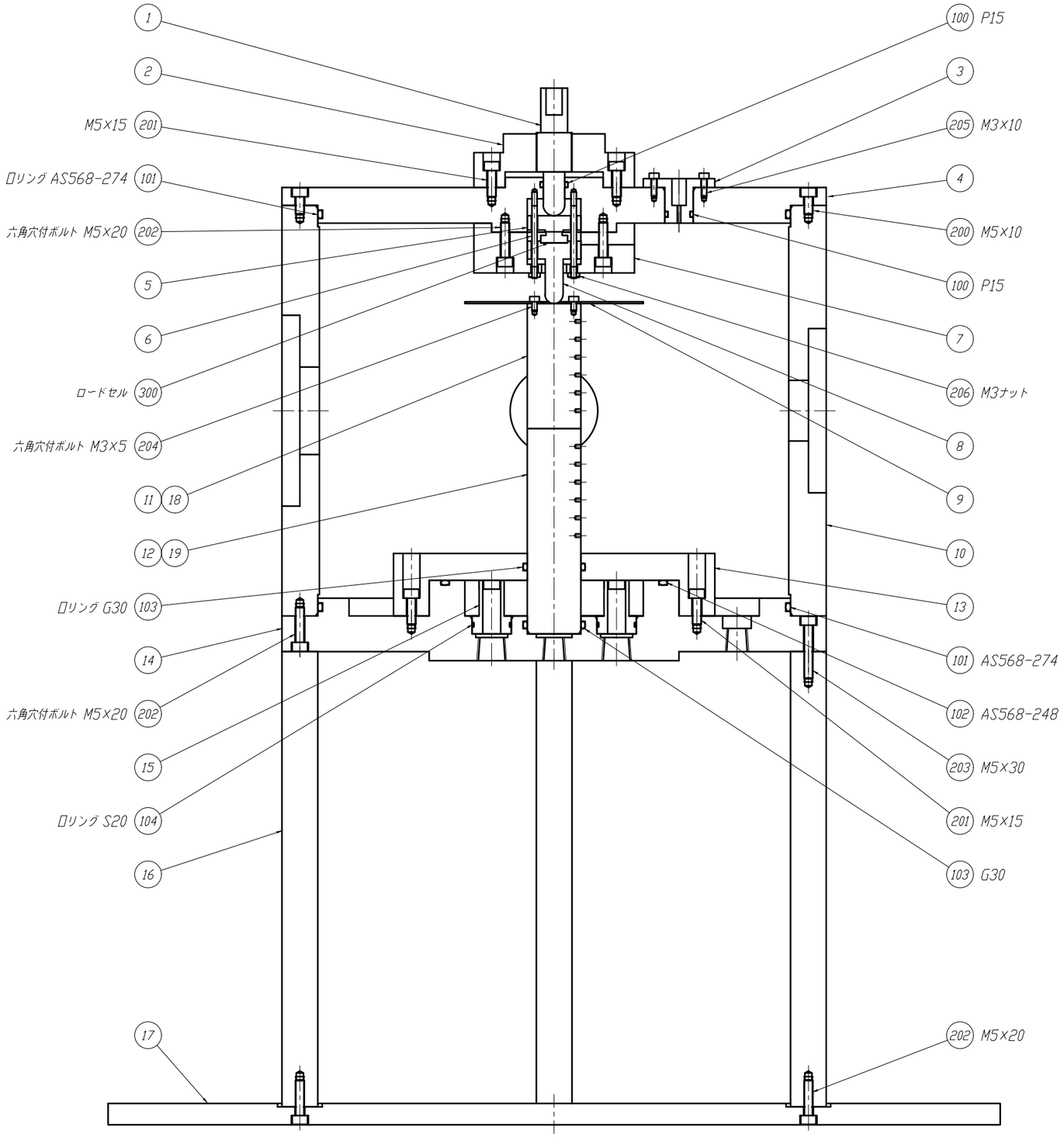
本研究の実験装置の製作にあたり，部品加工から装置の立ち上げまでを親身になってご支援下さった法政大学機械工学科橋本伸男先生に厚く御礼申し上げます.

2017 年度に御法川研究室の 4 年生であった武井宏平氏には実験データの取得に際して多大なご協力をいただきました．ありがとうございました.

最後に，社会人博士課程における研究活動を理解し，支えてくれた家族に感謝致します．ここに改めて皆様に感謝の意を表します.

付　録

（実験装置設計図）



照合番号	品　名	材　質	個数	重量	備考
300	ロードセル	MC10L	1		東洋測器
206	六角ナット M3	SUS304	2		
205	六角穴付ボルト M3×10	SUS304	4		
204	六角穴付ボルト M3×5	SUS304	4		
203	六角穴付ボルト M5×30	SUS304	4		
202	六角穴付ボルト M5×20	SUS304	20		
201	六角穴付ボルト M5×15	SUS304	16		
200	六角穴付ボルト M5×10	SUS304	8		
104	□リング S20	NBR-70	2		
103	□リング G30	NBR-70	2		
102	□リング AS568-248	NBR-70	1		
101	□リング AS568-274	NBR-70	2		
100	□リング P15	NBR-70	2		
19	下部テストピース(2)	SUS304	1		
18	上部テストピース(2)	SUS304	5		
17	台座	A5056	1		
16	シャフト	SUS304	4		
15	ボス	A5056	2		
14	ベース	SUS304	1		
13	固定材	A5056	1		
12	下部テストピース(1)	A5056	1		
11	上部テストピース(1)	A5056	5		
10	チャンバー	SUS304	1		
9	ヒーター台座	A5056	1		
8	押付け材	SUS304	1		
7	ガイドフランジ	A5056	1		
6	ガイドピン	SUS304	2		
5	回転止め	A5056	1		
4	上蓋	A5056	1		
3	フィードスルー	A5056	1		
2	めねじ	SUS304	1		
1	おねじ	SUS304	1		

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.

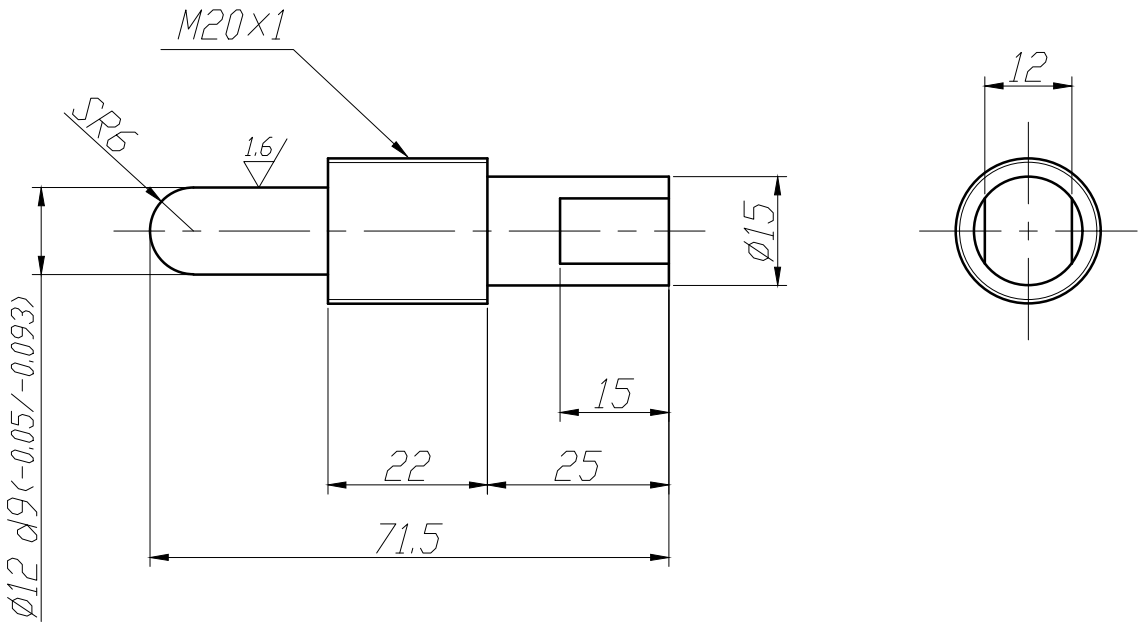
NAME: 熱抵抗測定装置（組立図）

DWG. NO.: 000

MATERIAL: | QTY.: 1 | SCALE: 1:2.5

1

6.3 (1.6)

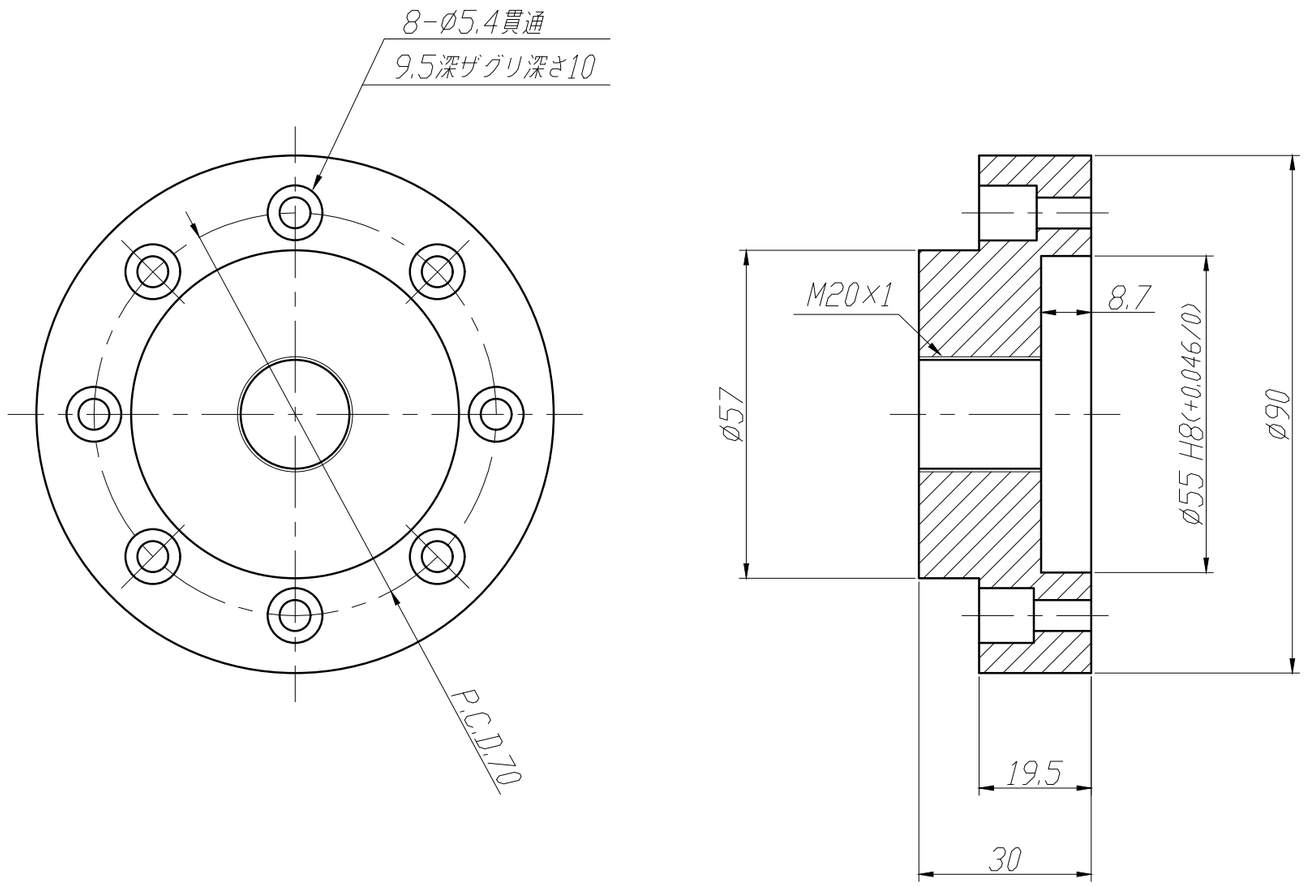


注記
1）指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2）普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	おねじ		
DWG. NO.	001		
MATERIAL SUS304		QTY. 1	SCALE 1:1

2

6.3

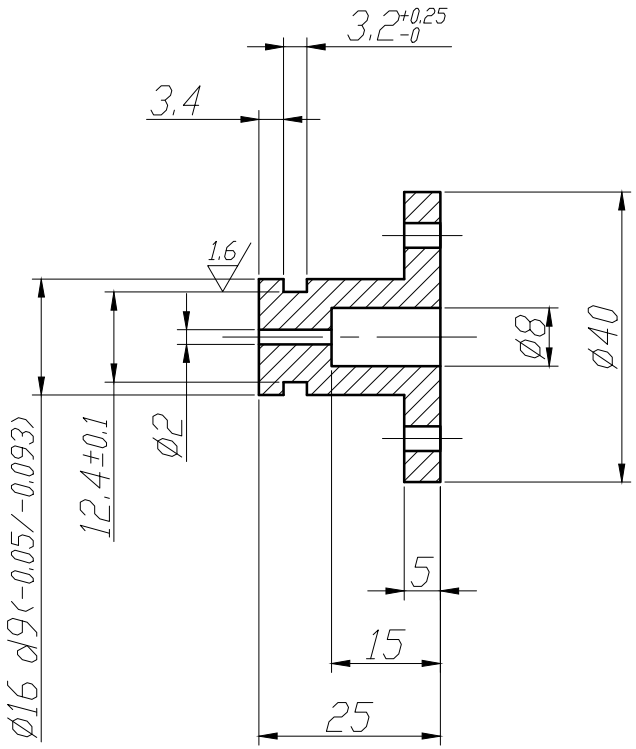


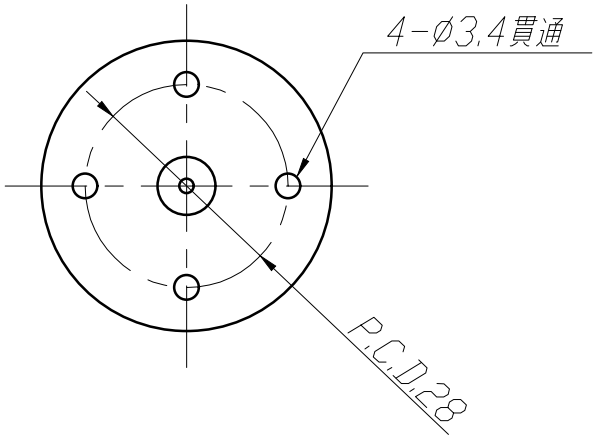
注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	めねじ		
DWG. NO.	002		
MATERIAL SUS304		QTY. 1	SCALE 1:1

③

6.3 (1.6)



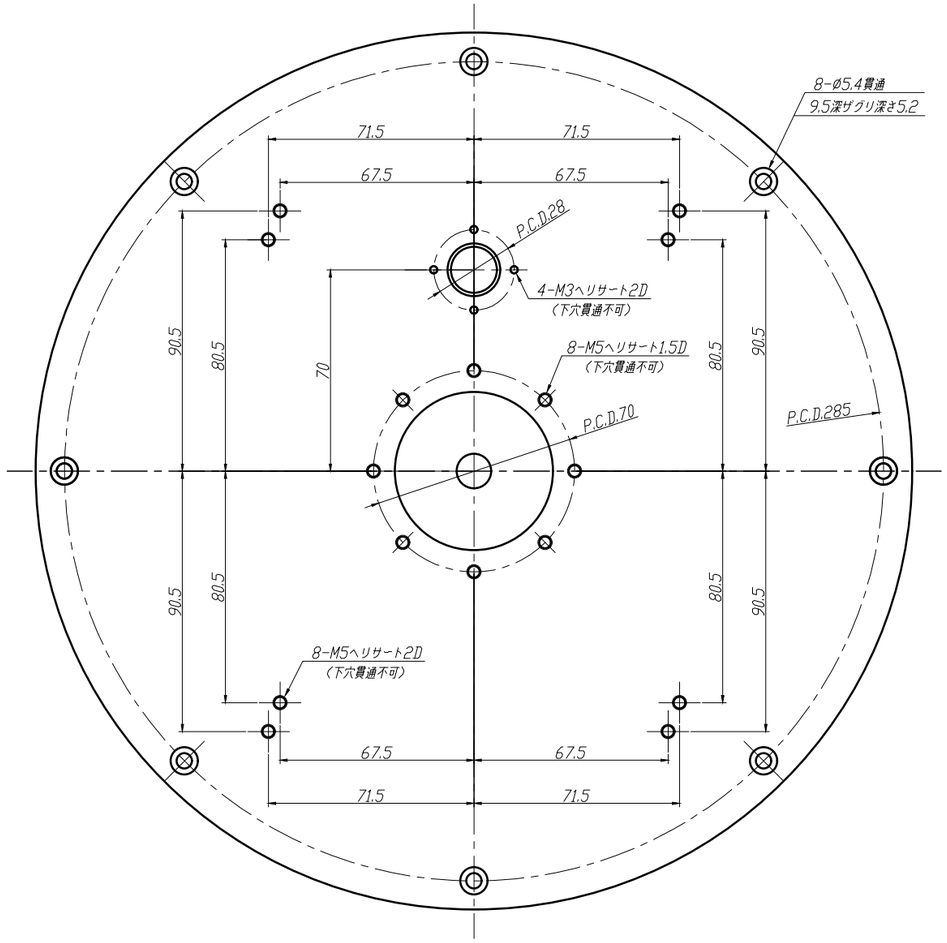


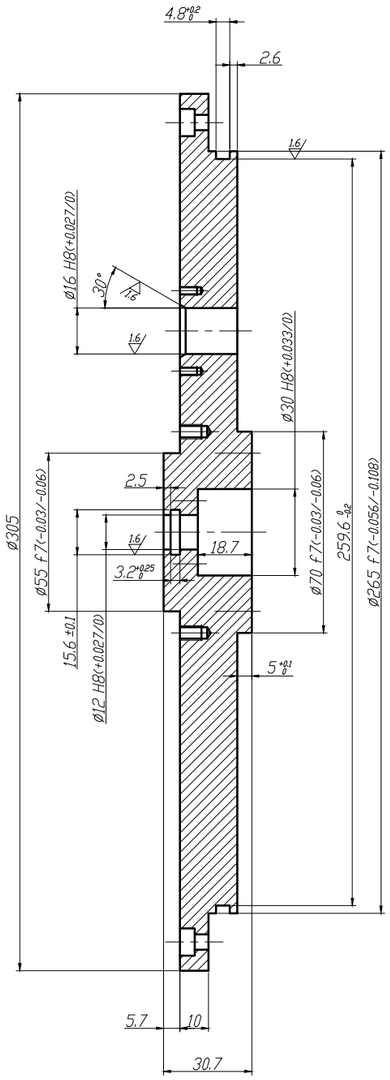
注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

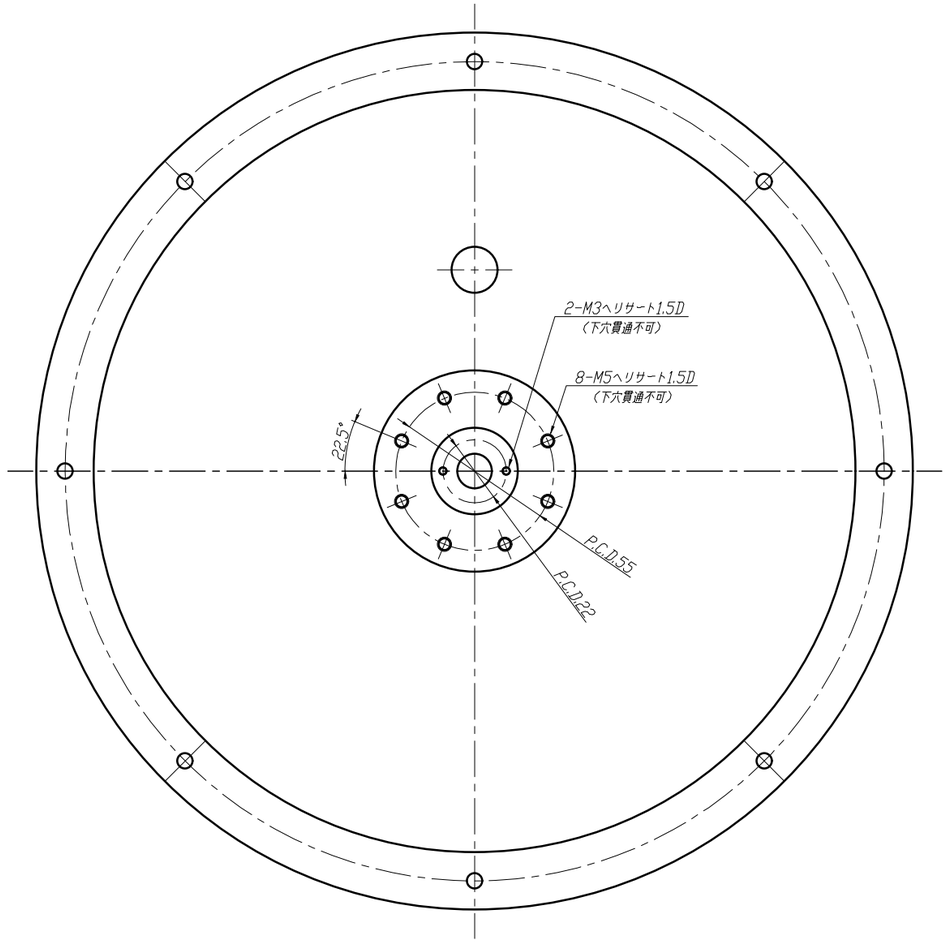
DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	フィードスルー		
DWG. NO.	003		
MATERIAL A5056		QTY. 1	SCALE 1:1

4

6.3 (1.6)





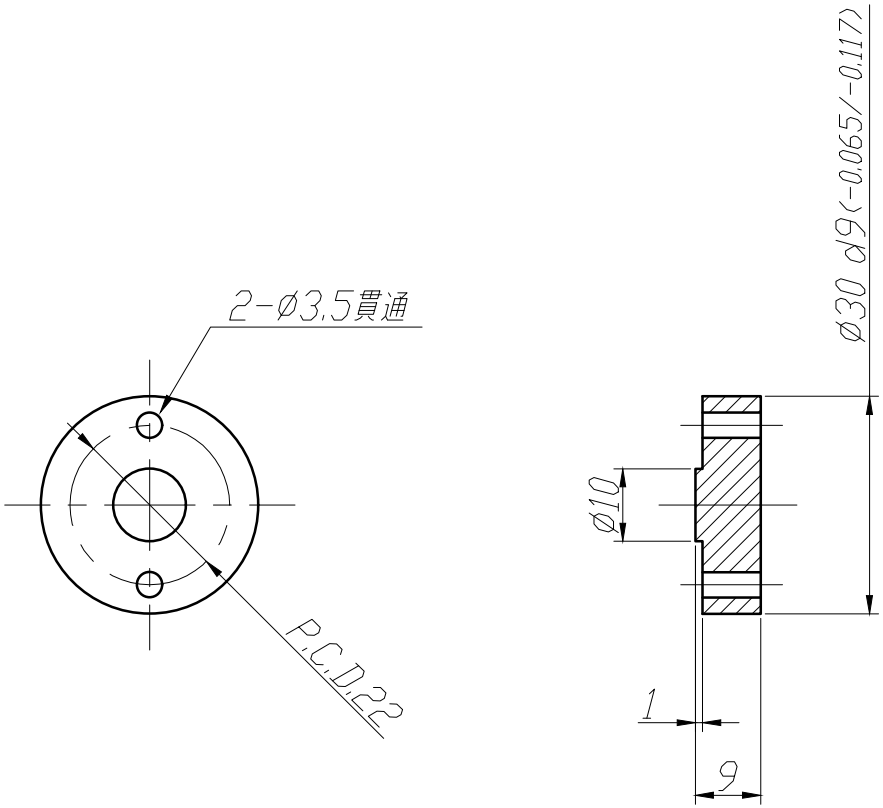


注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級(JIS B 0405)。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	上蓋		
DWG. NO.	004		
MATERIAL A5056		QTY. 1	SCALE 1:2

5

6.3

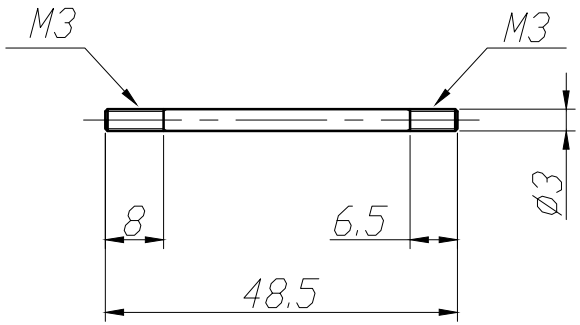


注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	回転止め		
DWG. NO.	005		
MATERIAL A5056		QTY. 1	SCALE 1:1

6

6.3

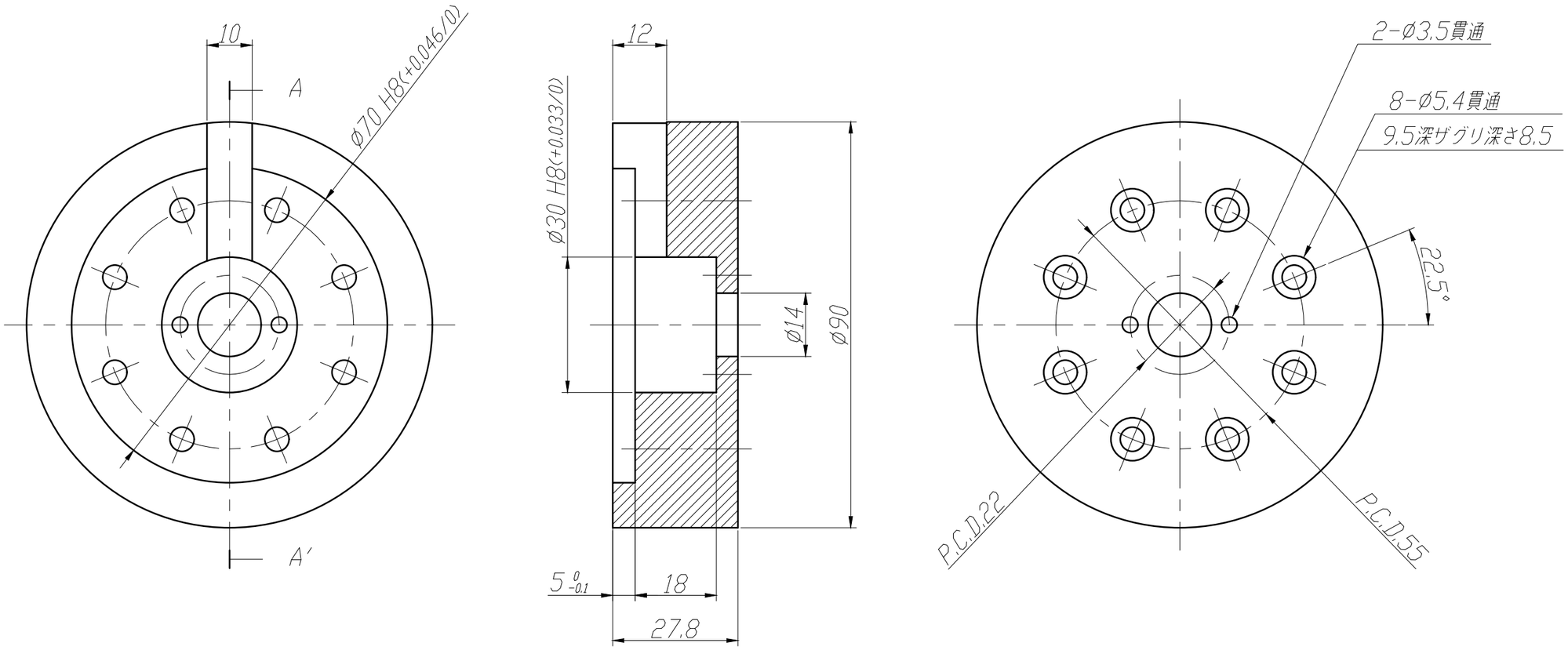


注記
1）指示なき角部は、C0.2の事。
2）普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	ガイドピン		
DWG. NO.	006		
MATERIAL SUS304		QTY. 2	SCALE 1:1

7

6.3



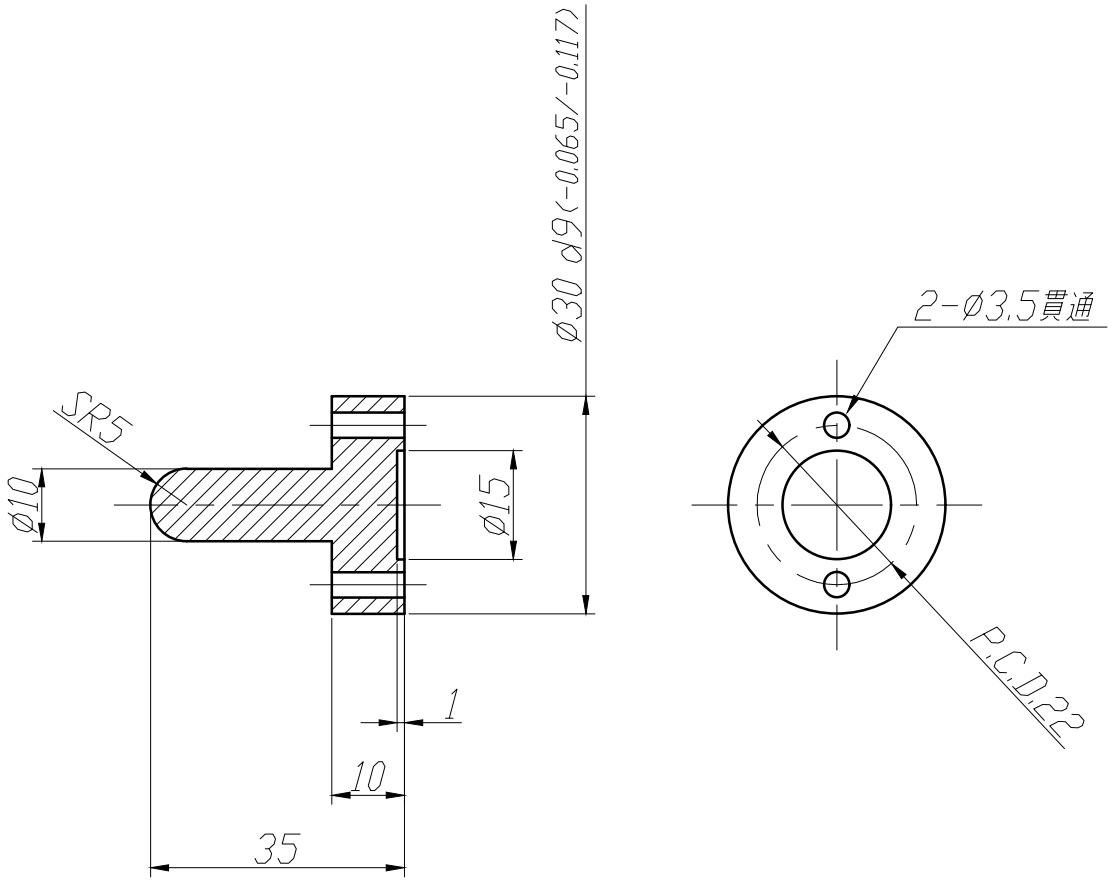
SECTION A-A′

注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	ガイドフランジ		
DWG. NO.	007		
MATERIAL A5056		QTY. 1	SCALE 1:1

8

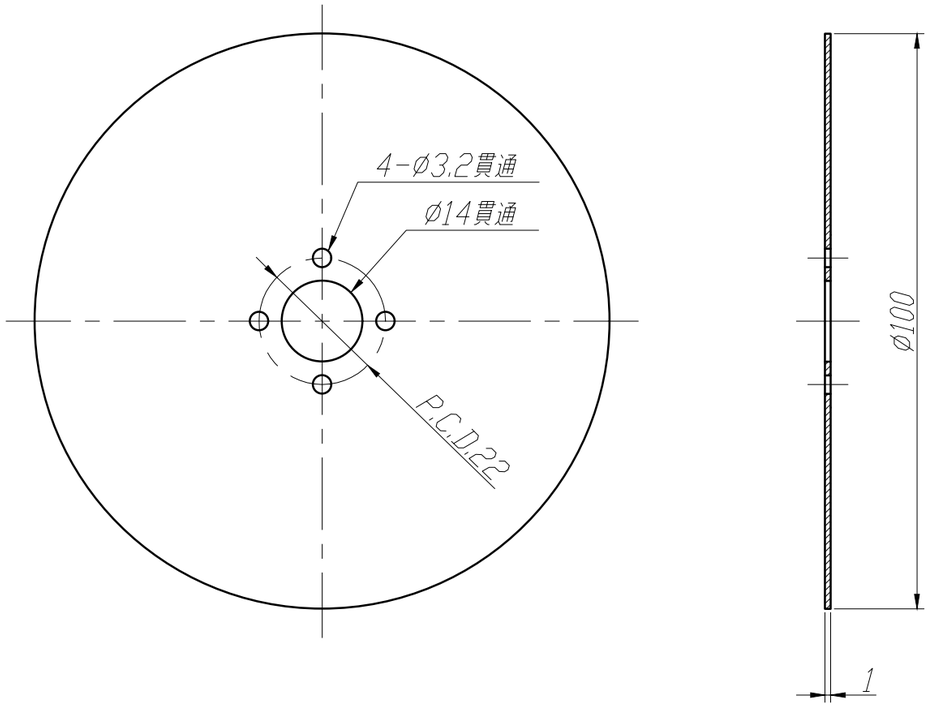
6.3



注記
1）指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2）普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	押付け材		
DWG. NO.	008		
MATERIAL SUS304		QTY. 1	SCALE 1:1

9

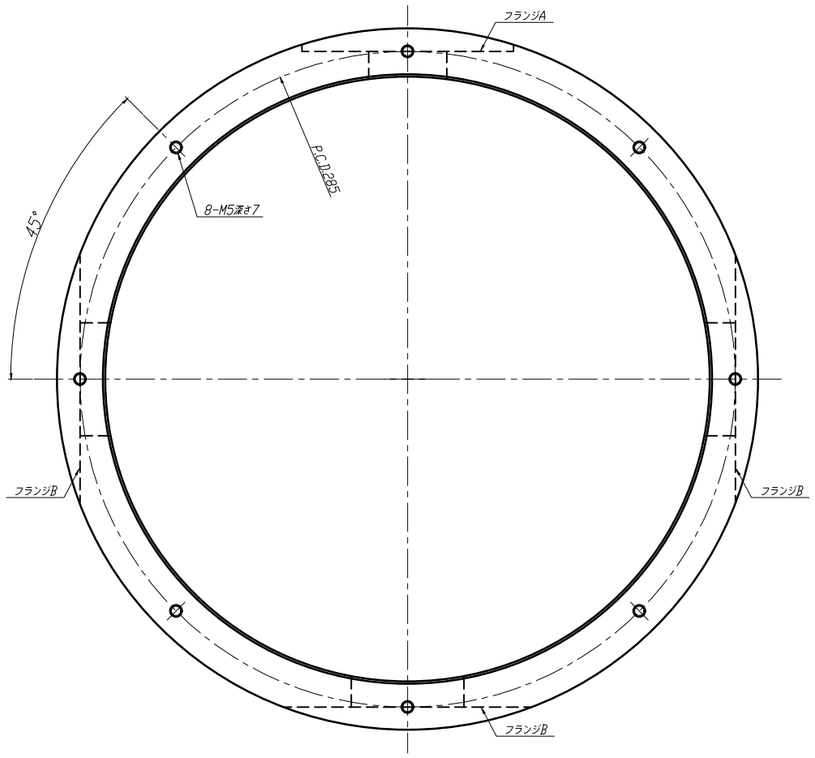


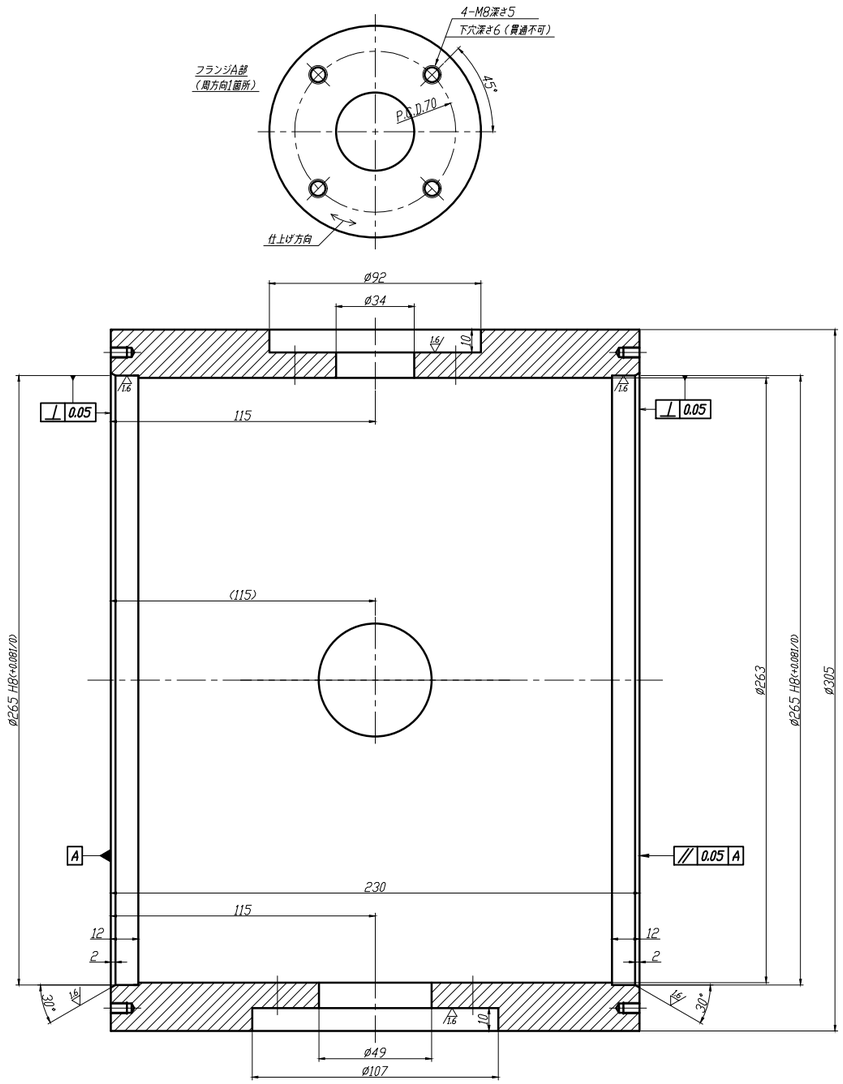
注記
1）指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2）普通公差：精級（JIS B 0405）。

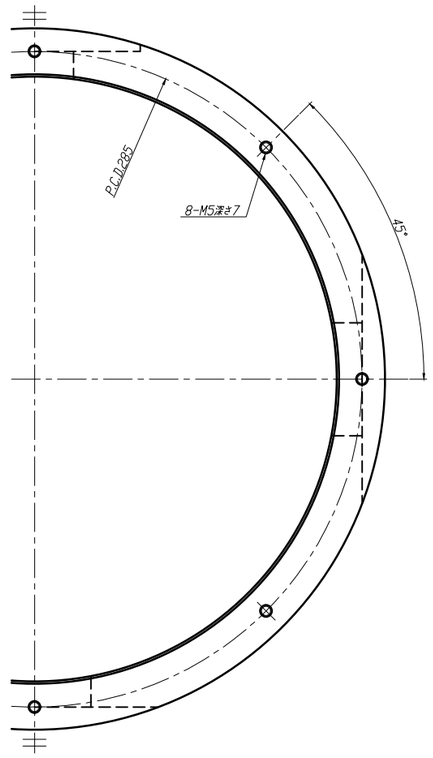
DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	ヒーター台座		
DWG. NO.	009		
MATERIAL A5056		QTY. 1	SCALE 1:1

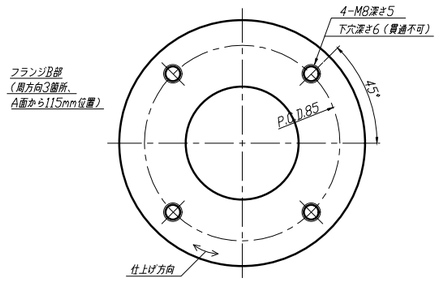
10

6.3 (1.6)







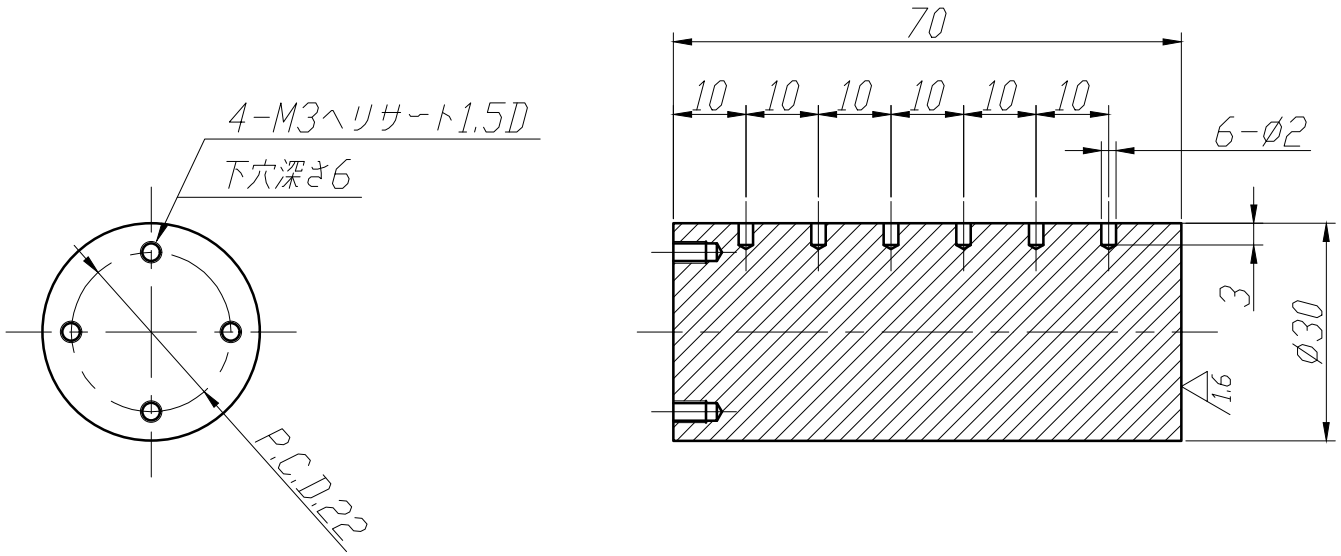


注記
1）指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2）普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	チャンバー		
DWG. NO.	0010		
MATERIAL SUS304		QTY. 1	SCALE 1:2.5

11

6.3 (1.6)

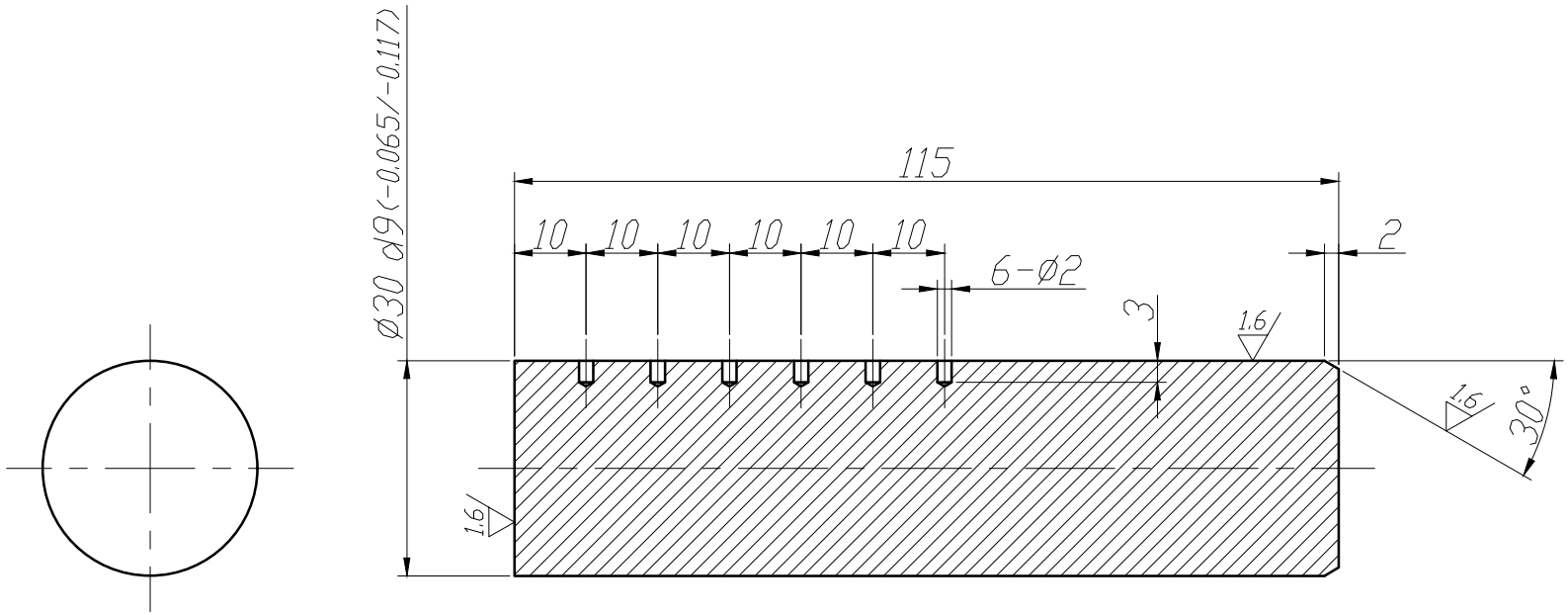


注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	上部テストピース(1)		
DWG. NO.	0011		
MATERIAL A5056		QTY. 5	SCALE 1:1

12

6.3 (1.6)

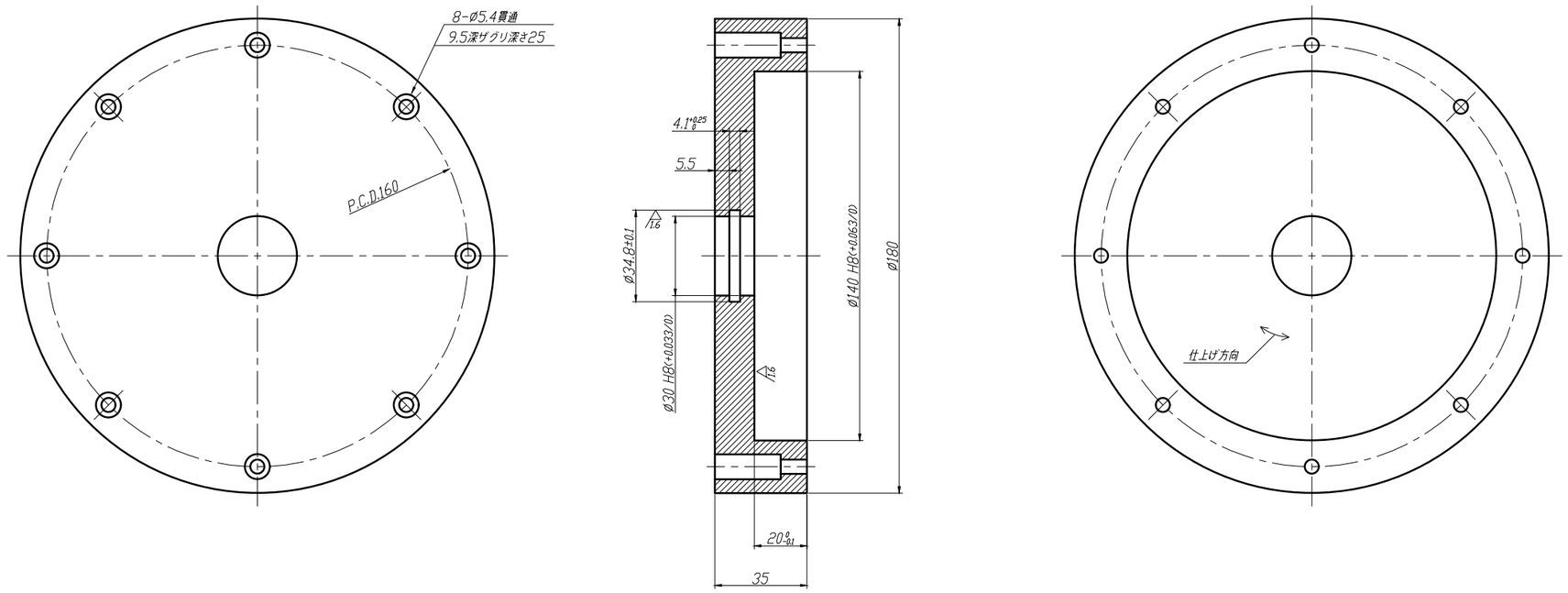


注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	下部テストピース(1)		
DWG. NO.	0012		
MATERIAL A5056		QTY. 1	SCALE 1:1

13

6.3 (1.6)

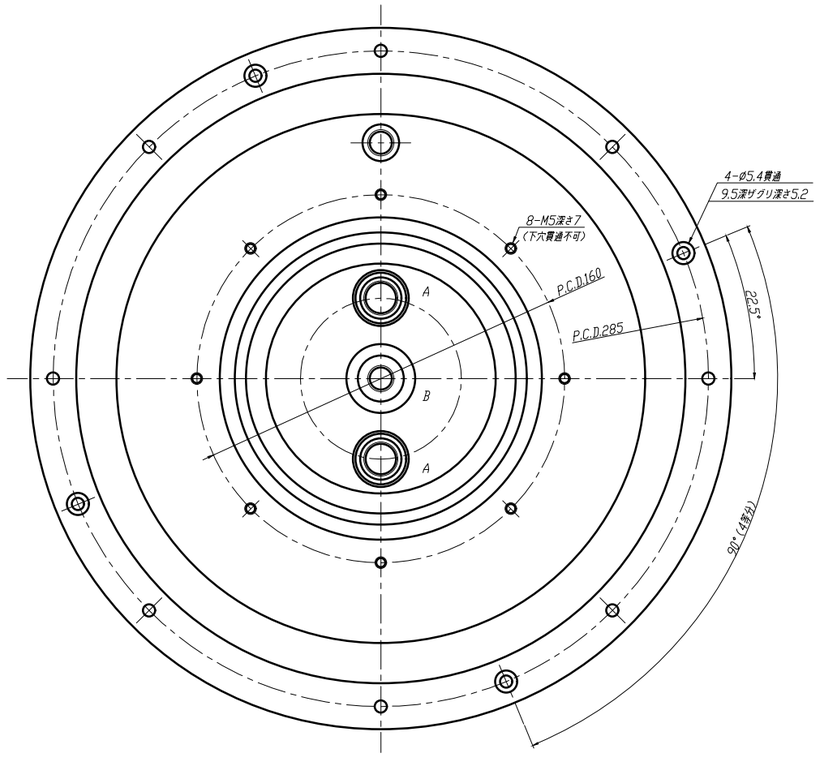


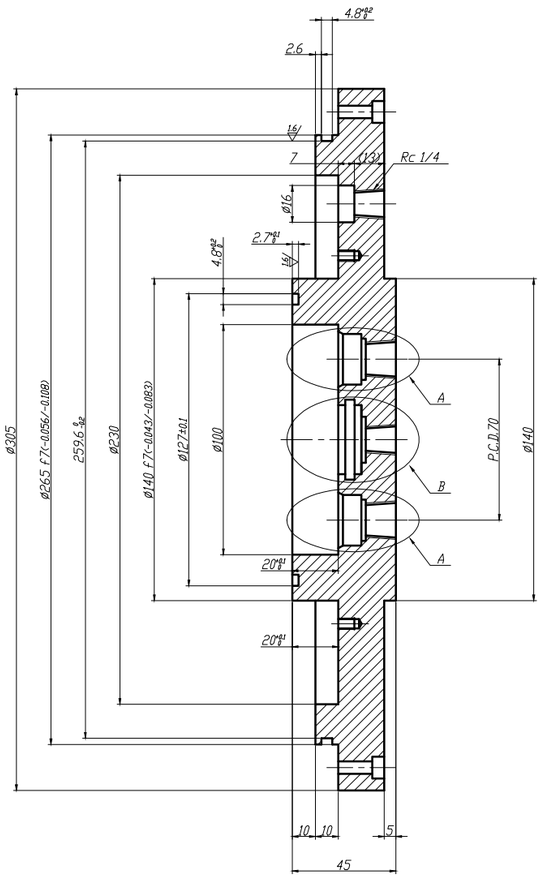
注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

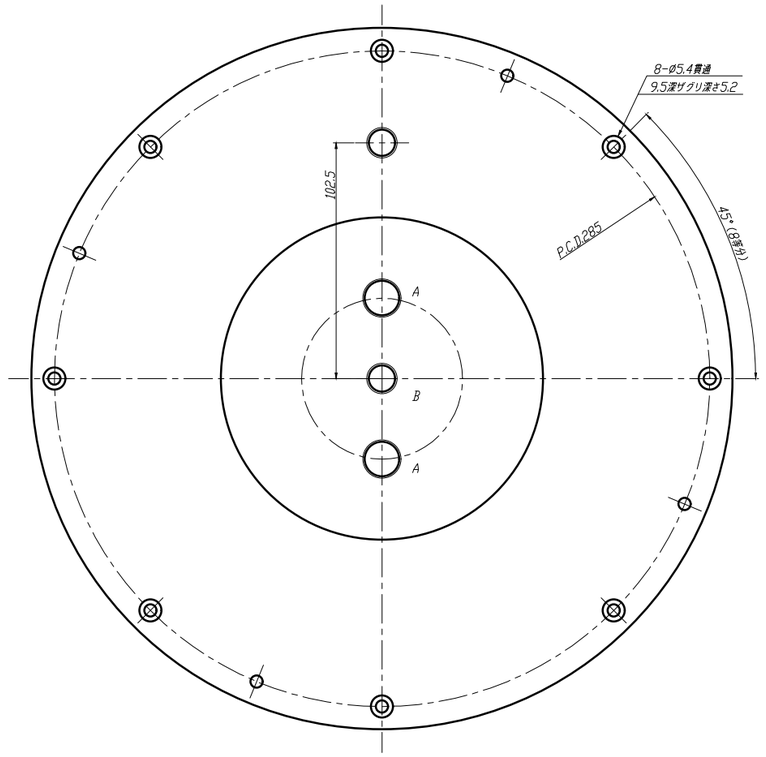
DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	固定材		
DWG. NO.	0013		
MATERIAL A5056		QTY. 1	SCALE 1:2

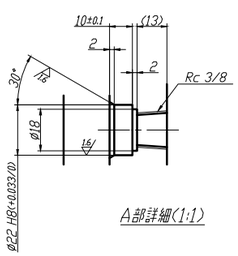
14

6.3 (1.6)

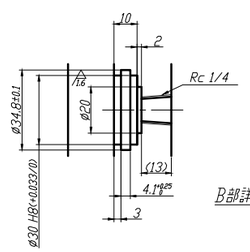








A部詳細(1:1)



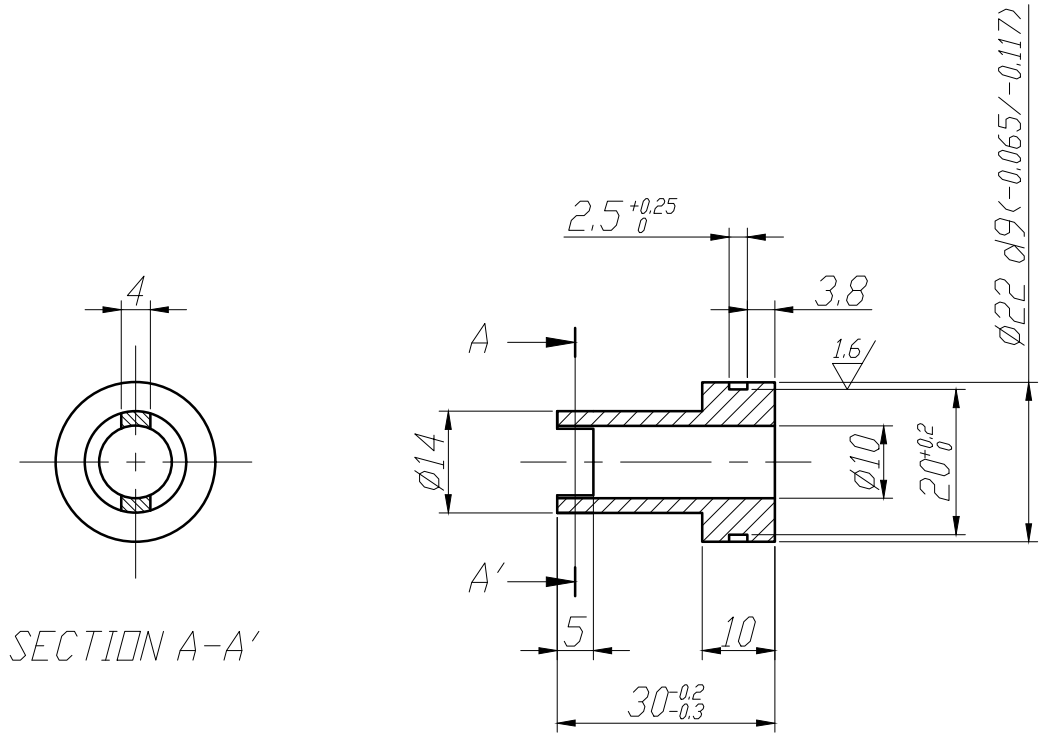
B部詳細(1:1)

注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	ベース		
DWG. NO.	0014		
MATERIAL SUS304		QTY. 1	SCALE 1:2.5

15

6.3 (1.6)

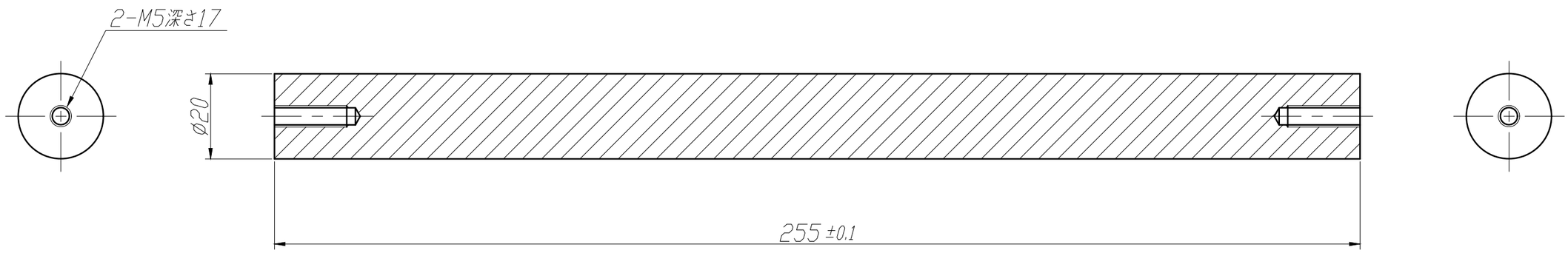


注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	ボス		
DWG. NO.	0015		
MATERIAL A5056		QTY. 2	SCALE 1:1

16

6.3

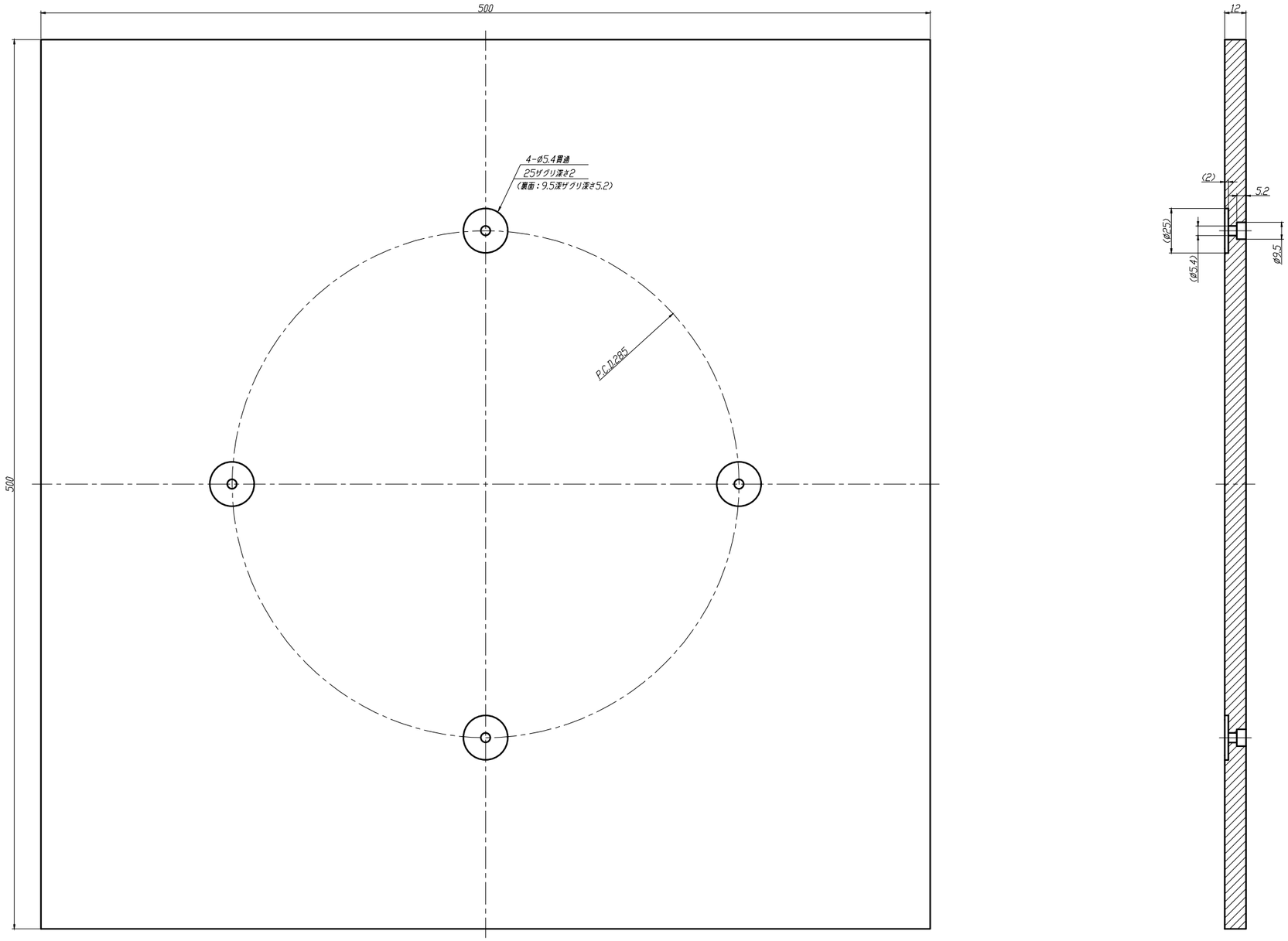


注記
1）指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2）普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	シャフト		
DWG. NO.	0016		
MATERIAL SUS304		QTY. 4	SCALE 1:1

17

6.3

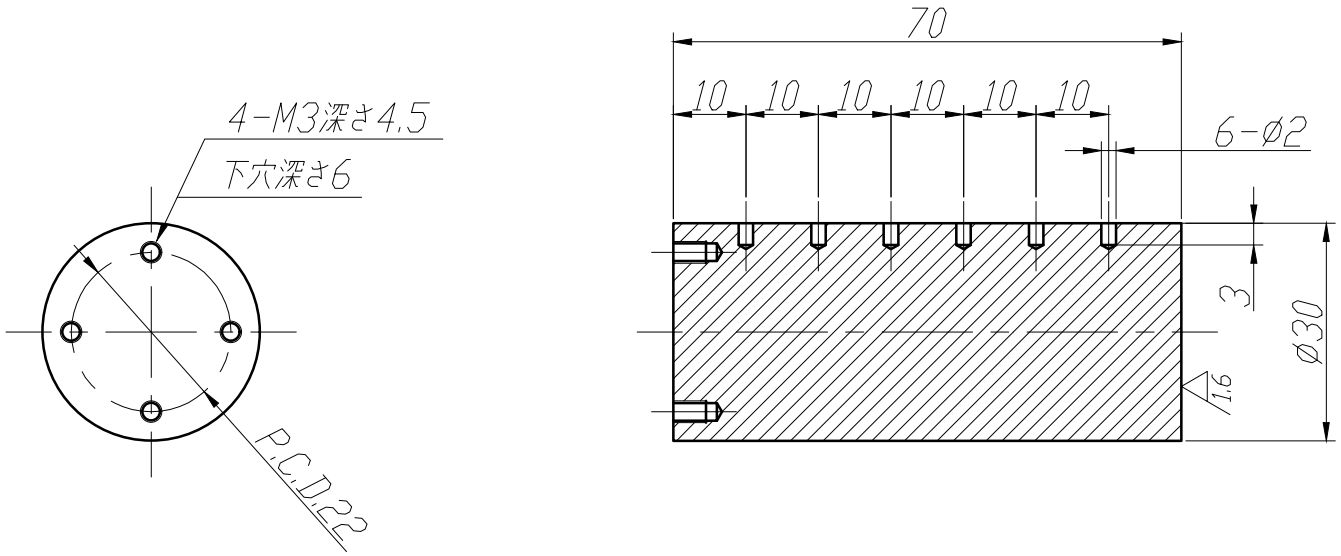


注記
1）指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2）普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	台座		
DWG. NO.	0017		
MATERIAL A5056		QTY. 1	SCALE 1:2.5

18

6.3 (1.6)

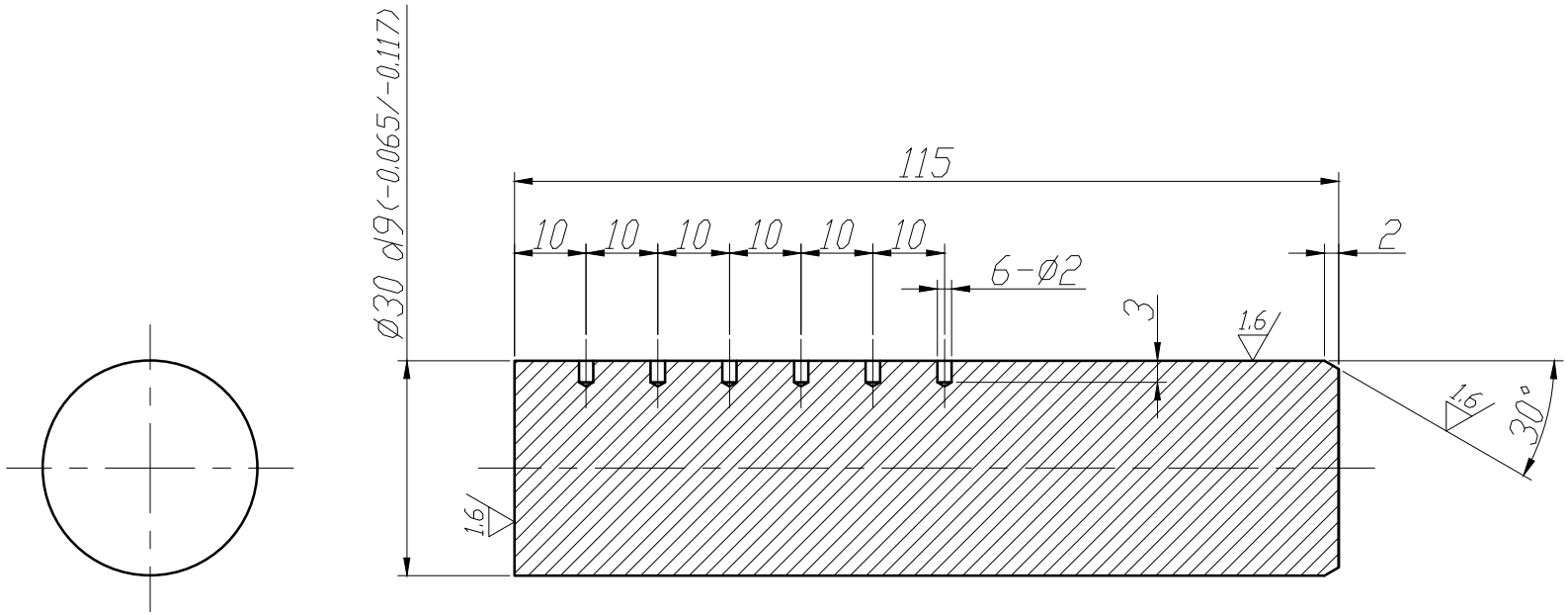


注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	上部テストピース(2)		
DWG. NO.	0018		
MATERIAL SUS304		QTY. 5	SCALE 1:1

19

6.3 (1.6)



注記
1) 指示なき角部は、C0.2、R0.2の事。
2) 普通公差：精級（JIS B 0405）。

DRAWING	DESIGN	CHECK OF DWG.	APPR.
NAME	下部テストピース(2)		
DWG. NO.	0019		
MATERIAL SUS304		QTY. 1	SCALE 1:1