

水中壁面移動ロボットのための非接触吸着機構の研究

吉富 秀樹*

A Study on a Non-Contact Adhesive Mechanism for Underwater Wall-mobile Robot

Hideki YOSHITOMI

The investigation described in this paper was undertaken to clarify the feasibility of a non-contact adhesive mechanism for underwater wall-mobile robot. This non-contact adhesive mechanism consists of a vortex cup with tangential nozzle and a wall. Water flows into the vortex cup through the tangential nozzle, and swirling flow occurs inside the cup to create a vacuum pressure at the central area of cup. This vacuum pressure causes the adhesive force. And non-contact adhesion is realized, because the water is delivered to the surrounding through a gap between the cup and wall. In this paper, the author clarifies that the non-contact adhesive mechanism can be applied to the underwater wall-mobile robot. And the author also discusses the relationship between the adhesive force and the gap.

Key Words: Non-contact adhesive mechanism, Underwater wall-mobile robot, Adhesive force, Vortex cup, Gap

1. はじめに

船舶外面や各種タンク壁面、原子力発電所機器貯蔵プール、および水族館の水槽壁面などは定期的に清掃や検査等の作業が必要である。しかし、水中での作業は危険を伴うし、原子力発電所では放射能汚染も懸念される。また、清掃作業では粉塵や汚泥なども発生するため、作業員の健康上の問題もある。そこで、近年、このような作業をロボットに代行させるため、壁面に吸着して移動する壁面吸着移動ロボットの研究開発が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。このようなロボットの吸着機構は、多くの場合、真空ポンプなどによる負圧を利用した吸盤機構を用いている。この吸盤機構では、安定した吸着のためには吸着力を高める必要があるが、反面、走行時には吸盤が大きな抵抗となって安定な走行を妨げる。また、吸盤が壁面に直接接触するため壁面が傷つくことが懸念されるし、壁面が粗い場合は吸盤シールの摩耗なども問題となる。特に、壁面が傷つくことは、水族館の観賞用アクリル水槽などで問題となる。そこで、壁面に非接触で吸着し移動できる水中ロボットが開発できれば、アクリル材などの比較的柔らかな壁面の損傷などの問題が解決できるものと期待できる。

非接触で物体を吸着する技術として、半導体ウエーハーやガラス基板などの搬送を行うエンドエフェ

クタとして空気の旋回流を用いた非接触搬送装置が開発されている⁽³⁾。これは、旋回流の遠心力効果によって中心付近の圧力が低下するという現象を利用して物体を吸着するものである。この吸着機構を水中ロボットに取り入れれば、非接触で壁面に吸着するロボットが実現できる可能性がある。しかし、既に開発されている空気の旋回流を用いた非接触搬送装置でさえまだ特性が十分解明されてなく最近研究が開始された状況である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本報で提案している水の旋回流を利用した非接触吸着機構については研究の例が見当たらないし、その可能性についても未知である。そこで、本研究では、水族館などのアクリル壁面の清掃ロボットを開発することを目標として、水中壁面への非接触吸着機構の基礎研究を行い、特性を明らかにすると共に水中壁面移動ロボットへの適用性について検討する。

2. 非接触吸着機構

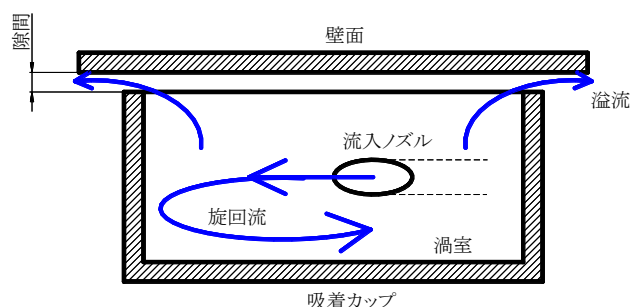


Fig.1 Non-contact adhesive mechanism

原稿受付 平成22年8月31日

* 機械工学科

旋回流を利用した非接触吸着機構の概念図を Fig.1 に示す。吸着カップは円筒状をしている。吸着カップの側壁に接線方向に取り付けられた流入ノズルから水噴流を供給すれば、吸着カップ内で旋回流が発生する。この旋回流が発生する部分を渦室と呼ぶ。渦室内では、旋回流の遠心力効果によって中心付近の圧力が低下し、吸着カップ外面に作用する水压と渦室内圧力との差圧によって吸着力が発生する。一方、渦室内に供給された水は、吸着カップと壁面との間に生じた隙間を通して流れ出ることになる。このように、本システムでは必然的に吸着カップと壁面との間に隙間が生じることになり、吸着カップと壁面は非接触状態となるのである。

3. 実験装置および実験方法

本研究の実験に使用した吸着カップの形状・寸法を Fig.2 に示す。吸着カップのボディーは実験装置に取り付けやすいように四角形にしてあるが、内部の渦室は円筒形状となっている。渦室直径 D_o は 120[mm] で、渦室深さ H は 40[mm] である。また、四角形のボディーと壁面との間隙は、渦室から流出する流れの抵抗となり吸着カップの特性に影響を及ぼすため、この間隙を拡大して流動抵抗を減らす目的で吸着カップの開口部には円筒状のつばを付けている。つばの厚みは 7[mm] で高さは 10[mm] である。流入ノズルは、直径 d_s が 13[mm] で、渦室の内壁に接線方向から取り付けている。流入ノズルの取り付け位置はカップ開口端から深さ 25[mm] の位置である。なお、この形状・寸法が吸着カップとして最適というわけではなく、今後の研究で最適化して行く必要がある。また、吸着カップの材料は、内部が観察で

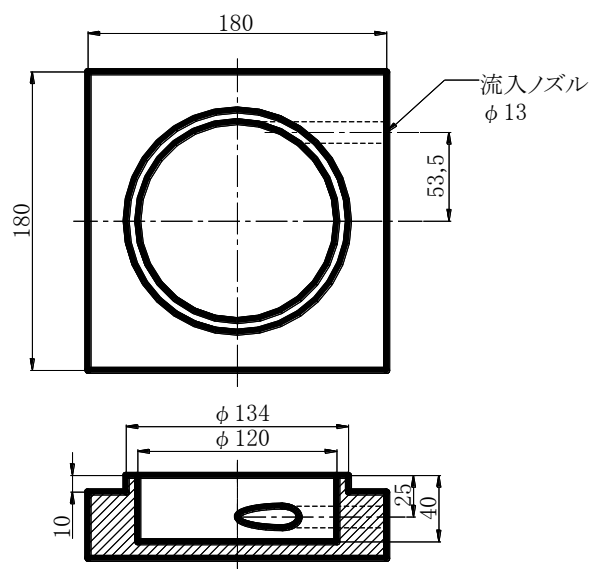


Fig.2 Adhesive cup

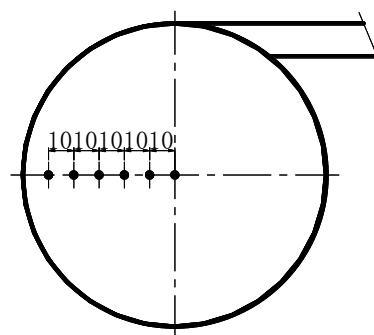


Fig.3 Pressure measurement holes

きるよう透明アクリル材を使用している。

次に、渦室内の静圧分布を計測するため、吸着カップの底面に直径 0.8[mm] の静圧孔を設けた。静圧孔の位置は、Fig.3 に示すように、流入ノズル取り付け位置から 90° 回った位置において半径方向に 10[mm] 間隔で 6 点設けている。

この実験用吸着カップの主要寸法を Table 1 にまとめて示す。

渦室直径 D_o	120[mm]
渦室深さ H	40 [mm]
流入ノズル直径 d_s	13[mm]
流入ノズル取り付け深さ	開口端より 25 [mm]

次に、隙間通路面積 A_o と流入ノズル断面積 A_s の面積比 χ は、吸着カップの特性を議論するためのパラメータとして重要であるので、これを Table 2 に示しておく。

隙間 δ	流入ノズル断面積 A_s	隙間の通路面積 A_o	面積比 $\chi = A_o/A_s$
0.5[mm]	1.33[cm ²]	1.88[cm ²]	1.4
1.0[mm]	1.33[cm ²]	3.77[cm ²]	2.8
3.0[mm]	1.33[cm ²]	11.30[cm ²]	8.5
5.0[mm]	1.33[cm ²]	18.84[cm ²]	14.2
7.0[mm]	1.33[cm ²]	26.38[cm ²]	19.8
10.0[mm]	1.33[cm ²]	37.68[cm ²]	28.4

なお、隙間距離を δ としたとき、 A_o と A_s 、および面積比 χ は次式で定義する。

$$A_o = \pi D_o \delta \text{ -----(1)}$$

$$A_s = \frac{\pi d_s^2}{4} \quad (2)$$

$$\chi = \frac{A_o}{A_s} \quad (3)$$

Table 2 より、隙間が 0.5[mm] のとき隙間通路面積は流入ノズル断面積の 1.4 倍、隙間が 1[mm] で 2.8 倍、隙間が 10[mm] では約 28 倍となることが分かる。

次に、渦室内静圧分布測定用実験装置の構成を Fig.4 に示す。吸着カップは開口部を上にして試験水槽内に水平に置かれている。開口部の上方にアクリル板材の壁面が設置され、吸着カップと壁面の隙間 δ は調整できるようになっている。また、水深は流入ノズルの位置で定義し、実験では 45[mm] にセットした。渦室に供給する水噴流は、水中ポンプによって供給され、面積式流量計および流量制御弁によって流量を調節し、ホースを介して吸着カップの流入ノズルに供給される。流入ノズルに供給された水噴流は、渦室で旋回流となった後、吸着カップと壁面の隙間を通る隙間流れとなって試験水槽に流出される。このため、水槽の水位は一定である。渦室内の静圧は、Fig.3 に示した静圧孔に導圧チューブを取り付け、これをデジタル圧力計につないで測った。なお、導圧チューブ内の気泡は実験前に取り除き、チューブ内は水で満たされている。また、実験では吸着カップと壁面の隙間 δ を 0.5、1、3、5、7、10[mm] の 6 通りに変化させて実験した。

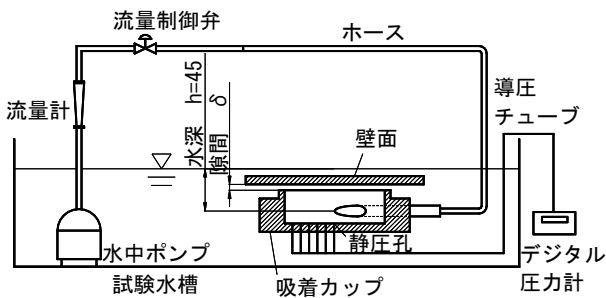


Fig.4 Experimental apparatus

実験方法は、まず吸着カップと壁面の隙間 δ を所定の値にセットした後、吸着カップを試験水槽に沈めた。このとき導圧チューブの中に気泡が入るが、別途設けた真空ポンプによって導圧チューブ内の水を吸引して気泡を取り除いた。次に、水中ポンプを運転して流量制御弁で流量を所定の値に調整した後、デジタル圧力計によって圧力を測定した。なお、流量 Q は、11.58[L/min]、16.16[L/min]、20.68[L/min] および 25.62[L/min] の 4 通りに変えたが、これらの流量は流入ノズルの断面平均流速 V_s に換算すると、

それぞれ 1.46[m/s]、2.03[m/s]、2.60[m/s]、3.22[m/s] に相当する。なお、実験ごとに水温と大気圧を記録した。

また、隙間を固定しないで吸着カップを壁面に自由に吸着させた状態における渦室内圧力分布も測定した。このような自由な吸着状態では隙間は吸着力と負荷（吸着カップの重量）との釣り合いによって決まるが、この実験装置では吸着状態での隙間を計測する装置は設けていないので隙間の実測はできない。しかし、後で考察するように、実験データを解析することにより、自由な吸着状態における隙間を推定することは可能である。

吸着カップの吸着力を直接測るため吸着力測定実験も行った。その装置の構成を Fig.5 に示す。壁面となっているアクリル板をバネばかりで上に引っ張り、吸着カップから引き離すときの力を測定した。このときの流量は、比較的強い吸着力が得られる流量である 20.68[L/min] および 25.62[L/min] の 2 通りに変えたが、これらの流量は流入ノズルの断面平均流速 V_s に換算すると、それぞれ 2.60[m/s] および 3.22[m/s] に相当する。

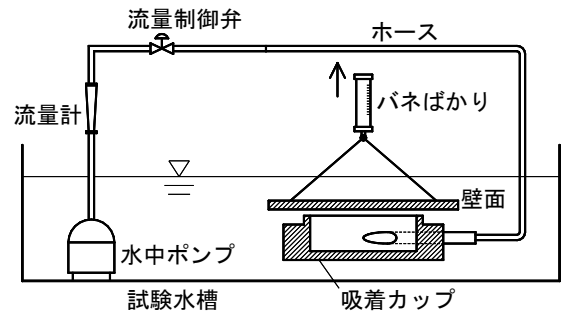


Fig.5 Experimental apparatus for adhesive force

4. 実験結果および考察

4. 1 吸着力

まず、Fig.5 に示した吸着力測定実験装置によって得られた吸着力の実測値を Fig.6 に示す。なお、こ

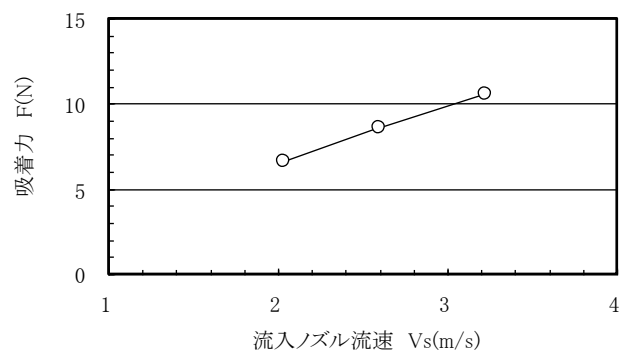


Fig.6 Adhesive force obtained by experiment

の値はバネばかりの指示値から、壁面となっているアクリル板の水中での重量（浮力を考慮）を、差し引いて求めた値である。Fig.6によると、吸着力 F は流入ノズルの流速 V_s によって変化しており、 $V_s=2.03[\text{m/s}]$ で $6.62[\text{N}]$ (0.68kgf)、 $V_s=2.60[\text{m/s}]$ で $8.58[\text{N}]$ (0.88kgf)、 $V_s=3.22[\text{m/s}]$ で $10.54[\text{N}]$ (1.08kgf) となっている。吸着カップの渦室の直径は $120[\text{mm}]$ であるから面積は $113[\text{cm}^2]$ であり、参考までに単位面積当たりの吸着力に換算してみると、例えば $V_s=3.22[\text{m/s}]$ のとき $0.0932[\text{N}/\text{cm}^2]$ となる。後述するが、吸着カップ内の圧力分布は比較的フラット（半径方向にほぼ一定）であるため、吸着力は面積に比例すると考えても大きな誤差はない。そこで、吸着カップ全体の吸着力は面積に単純比例するとして、吸着カップの渦室直径と吸着力の関係を計算してみると Fig.7 が得られる。

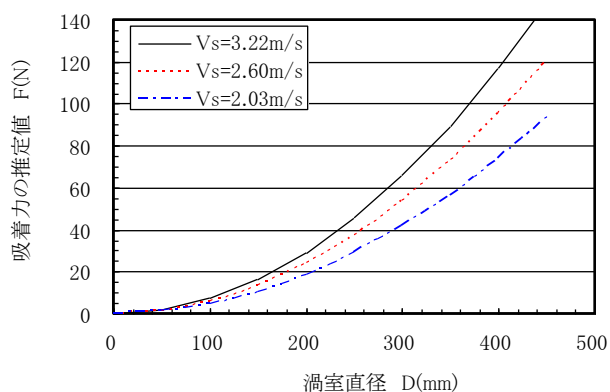


Fig.7 Adhesive force versus vortex chamber diameter

本研究の目的の一つが、このような吸着装置で実際に水中ロボットを吸着できる可能性があるのか検討することであった。そこで、水中ロボットの重量を $5[\text{kgf}]$ と仮定し、ノズル流速 V_s を $3.22[\text{m/s}]$ とすれば、Fig.7 より渦室直径 $200[\text{mm}]$ の吸着カップの吸着力は $29.3[\text{N}]$ なので、これを2個付ければ吸着力は合計で $58.6[\text{N}]$ すなわち $5.98[\text{kgf}]$ となり、ロボットの自重を少し上回る吸着力が得られることになる。このように、重量 $5[\text{kgf}]$ のロボットに直径 $200[\text{mm}]$ の吸着カップを2個付けることは実現性のある形態と考えられる。よって、壁に非接触で吸着する水中ロボットは、実現の可能性があると言える。なお、吸着カップを2個付ける理由は、1個では旋回流の反動によってロボット自体が回転してしまう恐れがあるので、逆方向に旋回する吸着カップを2個設置して反動力を打ち消すためである。

4. 2 渦室内静圧分布に及ぼす隙間の影響

前掲 Fig.4 に示した渦室内静圧分布測定用実験装

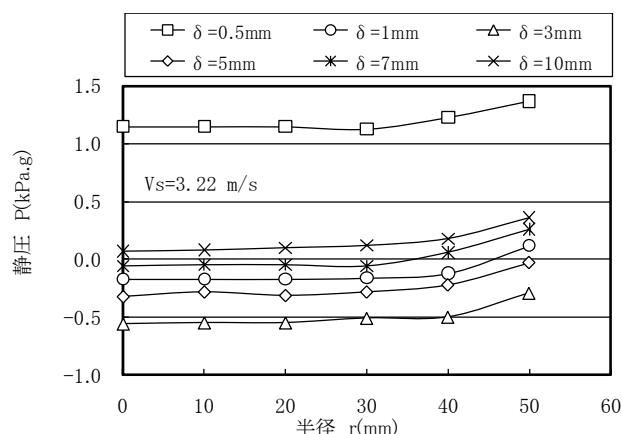


Fig.8 Static pressure distribution

置によって得られた渦室内の静圧分布を Fig.8 に示す。Fig.8 は、流入ノズル流速 V_s を $3.22[\text{m/s}]$ と一定にし、吸着カップと壁面との隙間 δ を $0.5[\text{mm}]$ 、 $1[\text{mm}]$ 、 $3[\text{mm}]$ 、 $5[\text{mm}]$ 、 $7[\text{mm}]$ 、および $10[\text{mm}]$ の6通りに変えて実験したものである。なお、この静圧の値はゲージ圧であり、デジタル圧力計の指示値を流入ノズルの高さの位置に補正した値となっている。

Fig.8 を見ると、半径方向の静圧分布は、半径 $50[\text{mm}]$ から内径側へ行くに従って半径 $40[\text{mm}]$ 付近までは圧力が低下しているが、半径 $40[\text{mm}]$ 付近より内径側では圧力はほぼ一定値となっている。この圧力分布は、明らかに自由渦の圧力分布ではなく、強制渦か、あるいは強制渦よりも内周部の流速が低下している渦の圧力分布に近い。飯尾ら⁽⁵⁾も PTV 法による流速測定結果として、渦室内の半径方向の周速度分布は放物線状になることを示しており、本研究の吸着カップでも同様の流速分布になっているものと考えられる。

また、Fig.8 より隙間 δ の影響を見ると、隙間が $0.5[\text{mm}]$ の時には、他のものより圧力レベルが高くなっている。これは、隙間が小さいため、隙間流れの流動抵抗が大きく、渦室内部の圧力が上がってしまったためと考えられる。このことは、Table 2 に示したように、隙間が $0.5[\text{mm}]$ では隙間通路面積 A_o と流入ノズル断面積 A_s の面積比 χ は 1.4 となっているが、この程度の面積比では隙間通路面積が小さすぎることを意味している。一方、隙間が $1[\text{mm}]$ になると圧力レベルは下がっており、半径 $40[\text{mm}]$ より内径側では負圧になっている。このときの面積比 χ は 2.8 であるので、隙間通路面積と流入ノズル断面積の面積比が 2.8 程度になれば渦室内圧力レベルを低下できることが分かる。また、隙間が $3[\text{mm}]$ になると、圧力レベルは更に低下しているが、隙間が $5[\text{mm}]$ になると、再び圧力レベルが上がってきており、隙間と

圧力レベルの関係は複雑であり興味深い。また、Fig.8の実験範囲では、隙間が3[mm]の時の圧力レベルが最も低い、つまり吸着力が最も大きい。なお、隙間が3[mm]の時の面積比 α は8.5となっている。

4. 3 渦室内静圧分布に及ぼす流入ノズル流速の影響

前節の Fig.8 より渦室内静圧分布に及ぼす隙間の影響が分かったので、ここでは隙間を固定して流入ノズル流速を変化させ、渦室内静圧分布に及ぼす流入ノズル流速の影響を調べた。隙間 δ が0.5[mm]の場合と3[mm]の場合では特性が全く異なるので、それぞれの場合の静圧分布を Fig.9 に示す。この実験では流入ノズル流速 V_s を1.46[m/s]から3.22[m/s]まで段階的に変化させている。隙間が0.5[mm]の時は、4.2節でも述べたように、隙間が小さいため隙間流れの流動抵抗が大きく、渦室内部の圧力レベルが全体的に上がっている。また、流入ノズル流速が大きいほど圧力レベルも高くなっているが、これは隙間が小さいのに水をどんどん送り込めば当然ながら渦室内圧力が上がることを意味している。一方、隙間が3[mm]の場合は傾向が異なり、流入ノズル流速が高くなるほど圧力レベルは低くなっている。Fig.9の実験範囲では、 $V_s=3.22$ [m/s]の時の圧力レベルが最も低い、すなわち吸着力が最も大きい。ところで、隙間

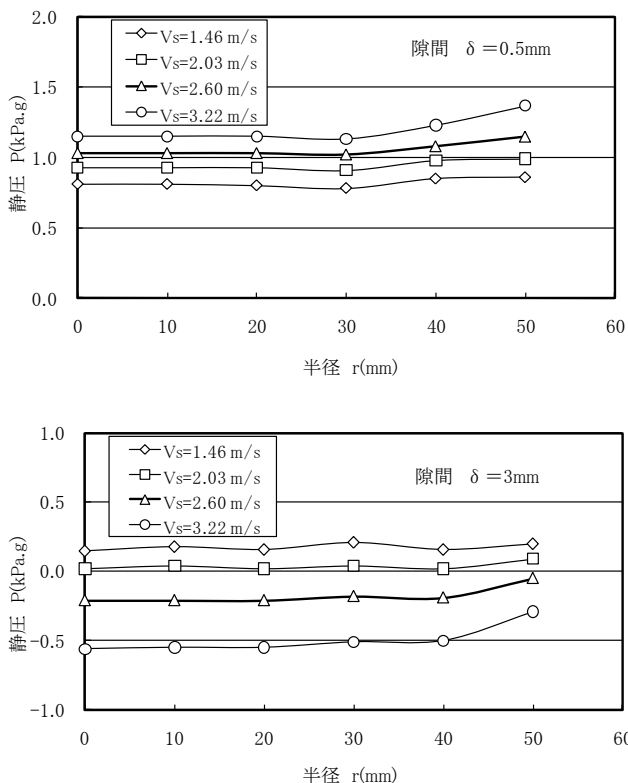


Fig.9 Static pressure distribution

が3[mm]の場合でも、流入ノズル流速を上げれば流量が増えるので、 $\delta=1$ [mm]の場合と同様に、隙間流れの流動抵抗が増える。その結果、流動抵抗に逆らって隙間流れを押し出すためには高い圧力が必要であり、渦室外周の半径60[mm]付近の圧力レベルは上がっているはずであるが、それにも拘わらず半径50[mm]より内径側の圧力レベルは下がっている。このことは、隙間が3[mm]の場合には、流入ノズル流速が高い方が強い渦（旋回速度が大きい渦）が形成されていることを示唆している。もちろん、流入ノズル流速をどんどん高めれば良いというわけではなく、隙間が3[mm]の場合にもおのずと限界があろう。

4. 4 水圧と渦室内静圧の差圧から求めた吸着力の計算値

測定した渦室内静圧と水圧との差圧 ΔP を求め、これに作用面積を乗じて渦室断面全体に積算することによって吸着力を計算してみよう。渦室内静圧を計測している位置は Fig.3 に示したように10[mm]間隔で半径方向に6ヶ所であるので、Fig.10のように静圧孔を含む幅10[mm]のドーナツ状の作用面積を考える。

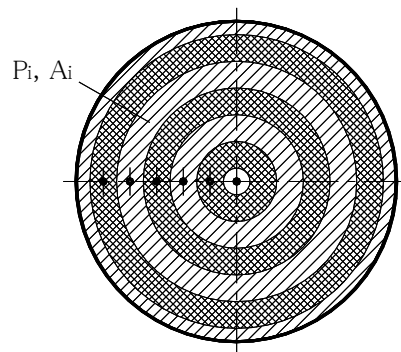


Fig.10 Adhesive force calculation model

なお、最外周部の半径55～60[mm]には静圧孔が無いので実測値が得られない。そこで、本報では示していないが、著者が別途開発した渦室内静圧計算法によって半径57.5[mm]の位置の静圧を計算し、この値を使った。そして、次式のように差圧と作用面積を掛け合わせ、これを積算して吸着力 F を求める。

$$F = \sum_{i=1}^7 (\rho g h - P_i) A_i = \sum_{i=1}^7 \Delta P_i \cdot A_i \quad \text{----- (4)}$$

ここに、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 h は水深、 P は渦室内静圧、 A は作用面積であり、添え字 i はドーナツ状の作用面積の番号を意味する。

式(4)によって求めた吸着力 F を前掲 Fig.6 の実測

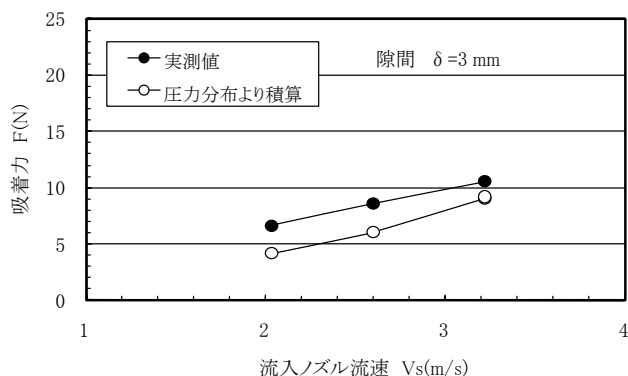


Fig.11 Adhesive force

値と比較したグラフを Fig.11 に示す。なお、実測値は、吸着カップを壁から引き離す時の最大吸着力を読み取ったものであるが、吸着力の計算値は隙間が 3[mm]の時の静圧データを使っているため、実測値の方が大きめの値となるはずである。このことを考慮して Fig.11 を見ると、吸着力の計算値と実測値の間に 1.5[N]～2[N]程度の差が認められるものの、比較的良く合っていると云えよう。

4. 5 吸着力と隙間の関係

前節で示したように、差圧 ΔP に作用面積を掛けて求めた吸着力は実測値に近い値を示すことが分かったので、隙間 δ を 0.5[mm]から 10[mm]まで変えて実験した静圧分布から吸着力を計算し、得られた結果を Fig.12 に示す。図中の○印は流入ノズル流速 V_s が 3.22[m/s]の時の吸着力の計算結果である。また、縦軸にして 2.95[N]の位置にある水平の実線が負荷(吸着カップの水中での重量)である。

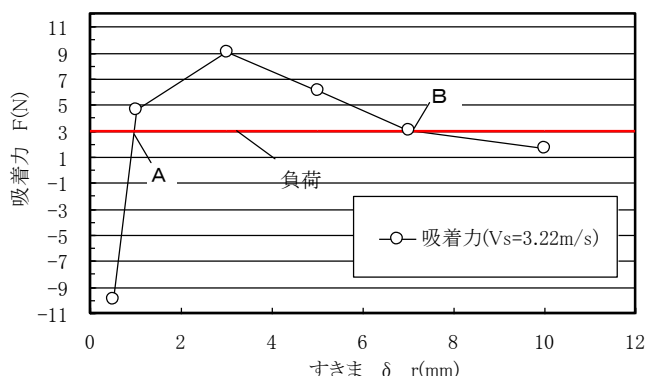


Fig.12 Relationship between adhesive force and gap

Fig.12 において、吸着力の計算値と負荷の交点が釣り合い点となるが、釣り合い点はA点とB点の2点が存在する。A点の近傍で考えると、隙間がA点より小さいと吸着力が負荷より小さいため吸着カップは壁から離れて行き、その結果、隙間は釣り合い

点のA点に向かう。また、隙間がA点より大きいと吸着力が負荷より大きいので吸着カップが壁に近づいて行き、この場合も隙間は釣り合い点のA点に向かう。つまり、A点近傍ではA点が安定吸着点であり、隙間がA点からずれても自動的にA点に復帰するのである。これは、A点からB点の範囲でも同様であり、結局、隙間がB点より小さい領域にあれば隙間はA点に向かい、A点で安定な釣り合い状態が実現できるのである。一方、隙間がB点より大きい領域では、吸着力が負荷より小さくB点へ復帰する力は作用しないため、もはや吸着は実現できないことになる。

4. 6 自由な吸着状態における隙間

隙間を固定することなく吸着カップが壁面に自由に吸着している状態において、隙間がどの程度の値になっているのかは興味深い。しかし、本研究の実験装置では吸着時の隙間を計測する装置は設置していないので、吸着時の隙間を直接測ることは出来ない。そこで本節では、実験データを解析することにより、自由な吸着状態における隙間の値を推定する。

まず、前節の Fig.12 の吸着力と負荷のバランス点から、吸着カップを壁面に自由に吸着させた時の隙間は 1[mm]程度になっているものと推測できる。そこで、隙間を 1[mm]に固定した場合の渦室内静圧分布と、自由に吸着させた吸着実験の静圧分布を比較してみると Fig.13 が得られる。

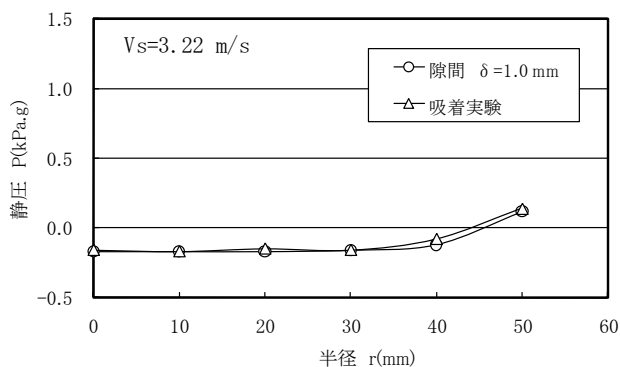


Fig.13 Static pressure distribution

隙間を固定した実験と自由な吸着実験の両者において、流入ノズル流速と隙間が同じであれば流動様式は等しいから静圧分布も同じになるはずである。したがって、静圧分布が同じであれば隙間も同じと判断できるのである。Fig.13 をみると、両者の静圧分布は極めて良く一致している。

結局、Fig.12 と Fig.13 の結果を総合して考えると、

流入ノズル流速 V_s が 3.22[m/s]において自由な吸着状態における隙間は 1[mm]程度になっているものと推測できる。

5. まとめ

本報では、水族館などの水槽壁面の清掃ロボットを開発することを目指として、水の旋回流を利用して壁面へ非接触で吸着する吸着機構の基礎研究を行った。得られた主な結果は以下である。

- 1) 実験の結果、例えば重量 5[kgf]の水中ロボットを吸着させるには、直径 200[mm]の吸着カップを2個設置すれば可能であることが分かった。このことは、水中ロボットの構成としても実現性のある形態である。
- 2) 吸着力は流入ノズル流速 V_s に依存するが、 $V_s=3.22\text{m/s}$ のとき、渦室の単位面積当たりの吸着力は $0.0822[\text{N}/\text{cm}^2]$ であった。
- 3) 本研究の実験範囲では、吸着カップと壁面の隙間が 3[mm]の時に吸着力が最も大きかった。
- 4) 水圧と渦室内静圧の差圧から計算した吸着力は、実測値とよく一致した。
- 5) 吸着力と吸着カップと壁面の隙間との関係が分かった。また、安定な吸着を実現できる隙

間値が存在することが分かった。

- 6) 吸着カップが自由に壁面に吸着しているときの隙間は、本実験では 1[mm]程度であることが実験データから推測された。

参考文献

- (1) (有)浦上技術研究所ホームページ
(<http://www.urakami.co.jp/ja/02/02c.html>)
- (2) 藤田恒昭、高橋剛史：原子力発電所における小型壁面除染ロボットシステムの開発、日本原子力学会和文論文誌、Vol.3、No.2(2004)、pp.68～74
- (3) 香川利春、黎 しん：旋回流を用いた非接触搬送装置、フルードパワーシステム、第39巻、第2号(2008)、pp.70～73
- (4) 黎、徳永、蔡、舩、川嶋、香川：旋回流を用いた非接触搬送系に関する研究（第1報 ボルテックス・チャックの基礎特性）、日本フルードパワーシステム学会論文集、Vol.38、No.1(2007)、pp.1～6
- (5) 飯尾、梅鉢、黎、香川、池田：旋回流を用いた非接触搬送装置に関する研究（カップとワーク間の隙間高さと旋回流特性との関係）、計測自動制御学会産業論文集、Vol.7、No.12(2008)、pp.79～84