高クヌッセン数流れへの適用を通じた
感圧塗料の測定原理についての一考察*山口 浩 樹^{*1}, 松 田 佑^{*1}
森 英 男^{*2}, 新 美 智 秀^{*3}Discussion on Mechanism of Pressure-Sensitive Paint
through Application to High Knudsen Number RegimeHiroki YAMAGUCHI^{*4}, Yu MATSUDA,
Hideo MORI and Tomohide NIIMI^{*4} Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

The pressure-sensitive paint (PSP) is very useful and easy way to obtain the pressure distribution on surfaces. Usually the pressure distribution by the paint shows good agreement with that obtained by other methods, like a pressure tap. Here, in this study, we discuss on the property that the paint really shows, especially in high Knudsen number regime. In this regime, it is well known that a pressure tap shows good agreement with surface pressure, and not gas pressure. Therefore, a PSP experimental result is examined with a DSMC numerical result, and shows good agreement with surface pressure. To argue against the suggestion that "PSP measures pressure, not density" [Bell, J. H. et al., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **33** (2001), 155-206.], a temperature sensitivity is investigated in detail. From these arguments, it is suggested that the PSP measures a number flux toward a surface.

Key Words: Pressure-Sensitive Paint, High Knudsen Number Flow, Surface Pressure, Number Flux

は じ め に

感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint: PSP) は表面上圧力二次元分布を容易に可視化できる手法として広く利用されている。高い空間分解能, 時間応答性により非定常測定にも適しており, プローブを用いない非接触計測であるため, その応用範囲は非常に広い。

PSP による圧力計測法では, 固体表面に塗布された PSP 内に存在する発光分子が酸素分子との相互作用によって消光される原理を利用している。この測定原理に関し, 消光現象そのものについての詳細な議論は広く行なわれており⁽¹⁾, 圧力と PSP 膜内で消光に寄与する酸素分子数の関係に関してはヘンリーの法則に依存すると解釈されている。実験的には PSP の示す圧力分布は圧力タップなどの結果と非常に良く一致することが知られているため⁽¹⁾, 特に問題なく, PSP は気体の静圧を示していると考えられている。

近年では広範囲の流れ場に対し PSP の利用が進められるようになってきた^{(2)~(6)}。たとえば, 半導体製

造過程や航空宇宙分野のような気体分子の平均自由行程が大きい系, あるいは MEMS/NEMS (Micro/Nano Electro-Mechanical Systems) といった代表長さが小さい系などがすでに研究対象となっている。このような流れ場においては, 系の代表長さ L に対する気体分子の平均自由行程 λ の比であるクヌッセン数 ($Kn = \lambda/L$) が大きい高クヌッセン数流れとなり, 連続体の仮定が成立しない。その結果, 分子の運動として流れを捉える必要があり, PSP が計測している物理量が気体の静圧であるかどうか重要な問題となる可能性は否定できない。また, 分子の運動という観点から PSP の測定原理を考察することにより, PSP が本来計測している物理量を明らかにすることができると考えられる。

そこで本研究では, 特に高クヌッセン数に適用する場合に着目して考察を行なった。まず, 既報⁽⁷⁾に従い, 高クヌッセン数流れにおける圧力測定に関する既知の問題を示し, 具体的に実験結果と比較することにより検証した。その結果を利用して PSP が測定している物理量について分子の運動の観点からさらに考察した。なお, PSP は高分子ポリマー中に発光色素を分散させた一般的なものを対象とし, PSP が測定しているのは境界層内であるという仮定の下, 流れは静止状態を想定している。

* 原稿受付 2008 年 8 月 1 日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 正員, 九州大学大学院工学研究院(☎ 819-0395 福岡市西区元岡 744)。^{*3} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: hiroki@nagoya-u.jp

1. PSP 膜内への酸素分子の浸透

PSP は発光色素がバインダーと呼ばれる高分子内に保持される構造をとっている。そして、膜内に浸透した酸素分子が、膜内を拡散する過程で励起した発光分子を消光する。膜に浸透する酸素分子量は平衡状態である場合、ヘンリーの法則を用いて説明される。ヘンリーの法則とは、気体の溶解度が小さい場合、一定の温度で一定量の液体に溶解する気体のモル分率 χ はその分圧 π に比例する、というものである。

$$\pi = H\chi \quad (1)$$

但し、 H は比例定数を表わし、ヘンリー定数と呼ばれる。PSP の場合、酸素分子の膜への溶解度は通常小さいので、このヘンリーの法則が成立すると考えられている。なお、ヘンリーの法則は温度一定の条件下で成立し、ヘンリー定数は温度依存性を示す⁽⁸⁾ことに注意が必要である。

2. 高クヌッセン数流れにおける圧力測定の問題点

PSP を高クヌッセン数流れに適用して圧力測定を実施することを考える。高クヌッセン数流れにおいては、分子の平均自由行程 λ が系の代表長さ L に比べて無視できなくなってくる。この場合、物体表面に設置された圧力孔によって測定される圧力は表面近傍における状態方程式に基づく気体の圧力（以降、気体圧力） p ではなく、表面に入射する気体分子が衝突によって与えた力積（以降、表面圧力） F_n に基づいて算出する必要があることが既に知られており⁽⁹⁾、極超音速希薄流において圧力孔による実験結果と数値解析結果とを比較した場合、気体圧力ではなく表面圧力と良い一致を示すことが報告されている。

この理由については、分子運動論より状態方程式に基づく気体圧力 p と気体分子の表面に与える力積に基づく表面圧力 F_n を求めることによって説明できる。

気体圧力 p は状態方程式より

$$p = nkT$$

と求められる。但し、 n は数密度、 k はボルツマン定数、 T は温度である。

一方、気体分子が表面に与える力積 F_n は気体分子の入射と散乱における運動量流束の変化量を考えれば良い⁽⁷⁾。まず、入射してくる運動量流束は

$$F_z = \frac{1}{2}nkT \quad (2)$$

と求められ、散乱する運動量流束は、 z 方向の向きが反対になることに注意すると

$$F'_z = -\frac{1}{2}nkT \quad (3)$$

となる。ここで注意しなければならないのは、分子群が従う温度 T である。入射する分子群が従う温度は気体の温度 T_g であり、一方、表面から散乱する分子群が従うのは固体表面に完全適応すると考えれば表面温度 T_s である。よって、表面に与えられる力積、つまり表面圧力 F_n は

$$F_n = F_z - F'_z = \frac{1}{2}nkT_g + \frac{1}{2}nkT_s = nk\frac{T_g + T_s}{2} \quad (4)$$

と求められる。

平均自由行程 λ が小さく連続体の仮定が成立する場合には、表面近傍の気体温度と表面温度は等しくなる。この場合、 $T_g = T_s$ より

$$F_n = nk\frac{T_g + T_g}{2} = nkT_g = p \quad (5)$$

となり、表面圧力と気体圧力が等しくなることが分かる。一方、高クヌッセン数流れではこれらの温度が異なり、この現象は温度飛躍として知られている。その結果 $T_g \neq T_s$ となるため

$$F_n = nk\frac{T_g + T_s}{2} \neq nkT_g = p \quad (6)$$

の関係より、 $F_n \neq p$ となる。よって、高クヌッセン数流れにおいては気体圧力と表面圧力が一般に異なったものとなる。

温度飛躍は、適応係数 α 、比熱比 γ 、平均自由行程 λ 、プラントル数 Pr を用いて、表面法線方向 n に対して

$$T_g|_0 - T_s = \frac{2 - \alpha}{\alpha} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{Pr} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_0 \quad (7)$$

と表わすことができる⁽¹⁰⁾。温度飛躍は気体分子の平均自由行程と比例しており、一般に温度飛躍は $Kn > 0.01$ 程度において現われることが知られている⁽¹¹⁾ ため、 $Kn > 0.01$ 程度の高クヌッセン数流れになると気体圧力と表面圧力のずれが重要となってくることが分かる。

3. 高クヌッセン数流れへの PSP の適用

前節の議論に従うと、一般に PSP は圧力孔による測定と良く一致することが知られているため、高クヌッセン数流れでは気体圧力ではなく表面圧力を示すと考えられる。しかしその一方で、前述の通り PSP 膜内に浸透する酸素分子がヘンリーの法則に従うと考えると、原理的には気体圧力に従った結果を示すことも考えられる。そこで、実際に PSP を高クヌッセン数流れに適用した場合において実験結果及び数値解析結果を比較し、表面圧力と気体圧力のどちらに従うかを検証する。

感圧塗料を低密度気体流やマイクロ流に適用した希少な例である文献⁽¹²⁾に示されたマイクロ円錐体周りの超音速流を解析対象とした。先端が半頂角 15° となっている直径 2mm のマイクロ円錐体を、マッハ数 1.89, 全圧 $p_0 = 100\text{kPa}$, 全温 $T_0 = 293.15\text{K}$ の一様流中に置いた系であり、円錐体表面に塗布した PSP による圧力分布が CFD 解析結果と比較検証されている⁽¹²⁾。上記の条件における平均自由行程は $0.2\mu\text{m}$ 程度であるため、マイクロ円錐体の直径を系の代表長さとして、 $Kn = 0.0001$ である。そのため、高クヌッセン数流れとは呼べないが、円錐体の形状により先端部では直径が小さくなること、超音速流れであるため下流の影響が小さいことなどから、先端部近傍では高クヌッセン数流れが実現されていると考えることができる。マイクロ円錐体表面上の圧力分布を図 1 に、文献⁽¹²⁾に示された結果を PSP を適用した実験による結果 $p(\text{PSP})$ 、CFD による結果 $p(\text{CFD})$ として示す。CFD 解析結果は、実験結果と比べて軸部分においては概ね良好な一致を示すものの、マイクロ円錐体先端部において圧力が徐々に立ち上がり $x < 200\mu\text{m}$ で鋭く立ち上がる傾向を捉えることができていない。この流れ場においてはマイクロ円錐体の半径が系の代表長さと考えられるため、マイクロ円錐体の先端に向かってクヌッセン数が大きくなっているとみなすことができ、マイクロ円錐体先端部での実験結果と CFD 解析結果の相違はクヌッセン数が大きくなったためと考えることができる。

そこで、高クヌッセン数流れに広く用いられている直接シミュレーションモンテカルロ (DSMC) 法により解析を行なった。流れ場は軸対称二次元を仮定し解析を実施した。流入条件は実験と揃え、軸外縁境界では平衡条件、下流境界では完全流出条件、物体表面での散乱は拡散反射とした。物体表面近傍において境界条件の影響が現われていないことを密度分布などより確認した。なお、実験においてマイクロ円錐体先端部およそ $10\mu\text{m}$ 程度の領域は完全な形状となっていないものの先端は鋭利な形状であるため、ここでは完全な円錐体として扱った。

DSMC 法による気体圧力 $p(\text{DSMC})$ 及び表面圧力 $F_n(\text{DSMC})$ も含めてマイクロ円錐体表面上の圧力分布を図 1 に示す。この図より、気体圧力 p は CFD, DSMC 法ともにマイクロ円錐体先端部における立ち上がりを捉えることができず、一方で DSMC 法による表面圧力 F_n が PSP の実験結果に見られる立ち上がりを再現できていることが分かる。若干のずれは先端部の丸まりや軸対称境界条件の設定などの影響であると考えら

Fig. 1 Pressure profiles on single sharp-nose cone surface. $p(\text{PSP})$ and $p(\text{CFD})$ are experimental and numerical profiles from Ref.⁽¹²⁾. $p(\text{DSMC})$ and $F_n(\text{DSMC})$ are gas and surface pressures obtained by DSMC method, respectively.

れる。この結果より、PSP で測定した場合も高クヌッセン数流れにおいては前述の通りの圧力測定における問題が現われ、少なくとも連続体領域において考えられているような気体の静圧を表している訳ではなく、仮に圧力を表現しているとしても表面圧力であることが明らかとなった。なお、前述の通り圧力孔による測定でも同様に表面圧力が測定されることから、どちらの手法を用いても結果に差異は生じないことになる。この結果は、膜内へ浸透する酸素分子量がヘンリーの法則より気体圧力に比例しているという説明とは矛盾するものである。

なお、この結果は思考実験として超高真空中で速さと方向のそろった分子線が PSP に入射している状況を考えても理解できる。超高真空中であるために背圧は非常に低く、散乱した気体分子は入射してくる分子線を妨げることはない。この場合、測定している量は気体分子が表面に与える力積、表面圧力 F_n となることは容易に想像できる。一方、状態方程式から求めた気体圧力 p では、分子線の持つ大きな並進運動の方向が変化することによる圧力への寄与が反映されないことは明らかである。

4. PSP が測定している物理量

4.1 分子運動に基づく微視的な視点 PSP は励起している発光分子が酸素分子によって消光される作用を利用して圧力を測定しており、消光量が多いということは酸素分子数が多いことから圧力が高く、消光量が少ない場合は圧力が低いということになる。消光に寄与する酸素分子は、流れ場から膜へと溶解し、膜内で拡散しながら消光させ、膜から離脱する、という

プロセスを経ていると考えられる。よって、消光量は膜内に存在する酸素分子数と比例しており、PSP が直接的に表現しているものは膜内の酸素分子数であると考えるのが自然である。

では、膜内の酸素分子数はどのような物理量に支配されているのだろうか。膜へ溶解する分子数は、一般にはヘンリーの法則に従って気体圧力に比例すると考えられている。しかし、低クヌッセン数流れでは気体圧力と表面圧力は一致することから、全てのクヌッセン数領域に対して実際には前節の通り表面圧力に比例していると考えることができる。PSP で用いられる高分子膜は酸素透過性の非常に良いものが多く、酸素分子は比較的自由に膜に溶解することができると考えられる。そのため、分子運動から考えると、膜へ溶解する分子数が“運動量”ないし“力”によって決定されるという解釈は適切とはいえない。例えば、分子質量 m と最確速さ c_{mp} から代表的な運動量を求めると

$$mc_{mp} = m\sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{2mkT} \quad (8)$$

となることから、温度が一定の場合は質量の大きい気体ほど良く溶けることになってしまうが、現実にはそうではない⁽⁸⁾。溶解する分子数は膜内外の濃度が平衡になるように決まっていると考えの方が自然である。次に、膜内に溶存した酸素分子の運動を考えると、この運動は膜の温度、つまり表面温度 T_s に依存する。励起した発光分子を消光するのは三重項酸素であり、消光によって励起された酸素分子は一重項状態へと遷移する。一重項状態の寿命は約 $40\mu s$ と報告されている⁽¹³⁾。酸素分子の膜内滞在時間にも依存するが、PSP で用いられる高分子膜は酸素透過性が非常に高いため、一つの酸素分子が膜内滞在中に消光を起こす回数は多くないと考えられる。最後に、膜から離脱する酸素分子数は溶解の逆反応としてとらえることができる。

以上から、膜内の酸素分子数は膜内外の濃度平衡によって決定されており、膜外の濃度を決定づけるのは膜へ到達する分子数であると考えられる。膜へ到達する酸素分子数は気体分子運動論より分子数流束 N として次のように求めることができる。

$$N = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT_g}} \quad (9)$$

PSP は圧力孔の実験値と良い一致を示すことから、もし分子数流束を測定しているならば、分子数流束と表面圧力が比例関係にあることになる。この関係性について検証した。式 (9) と式 (4) を比較すると、

$$F_n = \sqrt{2\pi mk} \frac{T_g + T_s}{\sqrt{T_g}} N \quad (10)$$

Fig. 2 Comparison between number flux N and surface pressure F_n on surface obtained by DSMC method.

と書け、 $T_g \simeq T_s$ であることを用いると

$$F_n \propto \sqrt{T_g} N \quad (11)$$

となることから、両者は厳密には比例関係にないことが分かる。しかし、実用上は PSP によって測定している領域内で温度が PSP の測定誤差を超えて大きく変化していることは多くないと考えられる。また、PSP の温度依存性が問題視されていることから、実験においては温度分布が極力生じない様に工夫することが多いことも指摘できる。そのため、PSP が現在利用されている流れ場では温度は大きく変化せず、両者は比較的良好な比例関係にあると考えられる。実際に前節の系において DSMC 法によって求められた分子数流束 N と表面圧力 F_n を最大値を用いて規格化して比較すると、図 2 のようにほとんど差は見られない。よって、仮に PSP が分子数流束 N を測定していても、実用上は表面圧力が測定できていると考えても問題ないと考えられる。

4.2 気体圧力測定の主張 文献⁽¹³⁾は、“PSP は圧力を測定しており、密度の測定をしているわけではない”と主張している。その根拠として、発光の圧力感度と温度感度を理論的に求めた場合、通常はどちらも負となるはずであるのに、密度に比例すると仮定すると、状態方程式の関係より温度感度が正となることを挙げている。今までの議論において、気体圧力に依存すると考えるよりも分子数流束を測定していると考えた方が自然であることが明らかになった。流れ場のクヌッセン数によって PSP の測定原理が変わることは考えづらいため、連続体の仮定が成立する流れ場においても分子数流束を測定していると考えられるが、その仮定の下では温度感度の性質が説明できない可能性がある。ただし、文献⁽¹³⁾において否定されているのは気体流におけるバルクの数密度そのものを測定して

いるという考えであり、本研究の指摘は PSP 表面へ到達する分子数流束の測定であることに注意が必要である。

そこで、文献⁽¹³⁾の議論に従って、分子数流束を測定していると考えた場合の温度感度を以下に考察する。以下では、PSP が一般に使用されている連続体の仮定が成立する低クヌッセン数流れ ($Kn < 0.01$) を対象としている。そのため、温度飛躍は生じず、表面近傍の気体温度と表面温度は等しくなる ($T_g = T_s = T$)。まず Kinetic Model に従うと、発光量 e_p は、三重項の量子収率 Φ_T 、比例定数 a 、三重項寿命時間 τ_T を用いて

$$e_p = \Phi_T k_{ET} \tau_T a = \frac{\Phi_T k_{ET} a}{k_{ET} + k_{IT} + k_{QT}} \quad (12)$$

と表すことができる。下添え字はそれぞれ燐光 (ET)、項間交差 (IT)、失活 (QT) のプロセスを表し、 k は速度定数である。 Φ_T 、 a 、 k_{ET} は圧力にも温度にも依存せず、 k_{IT} は温度のみに次式のように依存する。

$$k_{IT} = A_{IT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{IT}}{RT}\right) \quad (13)$$

酸素濃度の依存性を示すのは失活に関する項 k_{QT} のみである。失活のプロセスは酸素分子の膜への浸透性と拡散性から決まり、二分子失活速度 κ_{QT} と膜内酸素濃度 $[O_2]$ の積によって表わされる。二分子失活速度を決定する浸透性と拡散性の積によって表現される透過係数はアレニウス型の温度依存性を示し、膜内酸素濃度はヘンリーの法則に従い酸素圧力 p に比例することをを用いると、

$$\begin{aligned} k_{QT} &= \kappa_{QT} [O_2] \\ &= A \exp\left(-\frac{\Delta E_{QT}}{RT}\right) H p \\ &= A_{QT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{QT}}{RT}\right) p \end{aligned} \quad (14)$$

と書ける。温度感度 S_T は次式で求められる。

$$S_T \equiv \frac{T}{e_p} \frac{\partial e_p}{\partial T} \bigg|_p \quad (15)$$

仮に $e_p \propto \frac{1}{p}$ であれば $\frac{\partial e_p}{\partial T} \bigg|_p$ は理想気体の状態方程式 $p/p = RT$ から温度依存性の符号が逆転して正になってしまうためにありえない。以上が、文献⁽¹³⁾における結論である。

圧力ではなく分子数流束 N を測定していると考えた場合にはどのようなになるだろうか。分子数流束 N は温度に対して $-\frac{1}{2}$ 乗の関係があるために、上述の議論に従うと、温度感度の符号が問題となる可能性が否定

できない。分子数流束 N が膜内酸素分子数に比例し、失活速度を決定しているとした場合、式 (9) を用いて

$$\begin{aligned} k_{QT} &= A_{QT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{QT}}{RT}\right) N \\ &= A'_{QT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{QT}}{RT}\right) \frac{p}{\sqrt{T}} \end{aligned} \quad (16)$$

と書けることから、温度感度は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} S_T &= -T \tau_T \frac{\partial}{\partial T} \left[A_{IT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{IT}}{RT}\right) \right. \\ &\quad \left. + A'_{QT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{QT}}{RT}\right) \frac{p}{\sqrt{T}} \right] \bigg|_p \\ &= -\tau_T \left[k_{IT} \frac{\Delta E_{IT}}{RT} + k_{QT} \left(\frac{\Delta E_{QT}}{RT} - \frac{1}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

となる。発光分子と膜分子が PtTFPP/FIB の組み合わせの場合、文献⁽¹³⁾に示された値を代入すると $S_T = -0.26$ となるため、正負の傾向を再現できることが分かる。 $\Delta E_{QT}/RT$ が小さく S_T の正負が逆転する可能性のある RudpCl/Ethanol の場合でも $S_T = -0.14$ となり、問題はない。よって、少なくとも分子数流束に発光が依存していたとしても、否定できるものではないことが明らかである。なお、絶対値としては圧力と考えた場合と同様に、実験値より小さくなってしまう。しかし、温度依存性がほとんど知られていないために考慮できていない項があり、実験値とのずれはその影響によると考えられる。

お わ り に

高クヌッセン数領域に感圧塗料を適用した場合に起こる問題について、分子運動論的な見方から考察を行なった。

一般に、表面近傍ではヘンリーの法則によって膜内に浸透する酸素分子数が決まると考えられている。しかし、高クヌッセン数流れにおいては圧力孔によって測定した場合、気体の圧力ではなく気体分子の力積による表面圧力とよい一致をすることが知られている。そこで、高クヌッセン数流れに感圧塗料を適用した場合に対する考察より、感圧塗料の測定原理に対する新しい提案を行なった。

1. マイクロ円錐体の実験結果と直接シミュレーションモンテカルロ法の数値解析結果から、クヌッセン数の大きくなる先端近傍で感圧塗料の測定結果は気体の圧力ではなく表面圧力と同じ傾向を示すことが明らかとなった。
2. 分子運動に基づく考察より、感圧塗料の測定している物理量は分子数流束である可能性が高いことを示した。

3. 感圧塗料の測定している物理量が分子数流束に依存している場合、温度が変化すると気体圧力とも表面圧力とも比例しなくなるものの、実用上は感圧塗料の温度依存性を避けるために温度分布の変化量を小さくする工夫が施されていることが多く、問題にならないと考えられる。
4. 温度感度の解析から感圧塗料は圧力に従っており密度を測定しているわけではない、という主張もあるが、微視的な考察から導かれるように分子数流束に従っていると解釈しても傾向自体に関しては矛盾がないことを示した。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金の助成を受けて実施した。また、東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 浅井圭介教授ならびに永井大樹助教には実験及び CFD 解析結果を提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Liu, T. and Sullivan, J.P. *Pressure and temperature sensitive paints*, Berlin: Springer, (2005).
- (2) Niimi, T. et al., Application of pressure-sensitive paints to low pressure range, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **19** (2005), pp.9–16.
- (3) Mori, H. et al., Application of PSP to low density gas flows, *Journal of Visualization*, **7** (2004), pp.55–62.
- (4) Mori, H. et al., Molecular number flux detection using oxygen sensitive luminophore, *Physics of Fluids*, **17** (2005), pp.100610-1–100610-6.
- (5) Mori, H. et al., Pressure sensitive paint suitable to high Knudsen number regime, *Measurement Science and Technology*, **17** (2006), pp.1242–1246.
- (6) Matsuda, Y. et al., Development of Pressure Sensitive Molecular Film Suitable to Pressure Measurement of High Knudsen Number Flows, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, **72**–718 (2006), pp.1475–1482.
- (7) Yamaguchi, H. et al., Discussion on Mechanism of Pressure-Sensitive Paints, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, **73**–725 (2007), pp.112–117.
- (8) The Society for Chemical Engineers, Japan ed., *Handbook of Chemical Engineering* (in Japanese), Maruzen (1999), pp.80–81.
- (9) Lengrand, J.C. et al., Rarefied Hypersonic Flow over a Sharp Flat Plate: Numerical and Experimental Results, *18th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, **160** (1992), pp.276–284.
- (10) Schaaf, S.A. and Hornig, D.F., Flow of Rarefied Gases, *High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion*, **III** Sec.H, Princeton, (1958), p.687.
- (11) Bird, G.A., *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, New York: Oxford University Press, (1994).
- (12) Osafune, T. et al., Application of Molecular Sensors to Micro Objects in Supersonic Flow, (2004), AIAA Paper 2004-1048.
- (13) Bell, J.H. et al., Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **33** (2001), pp.155–206.