

振動平衡を考慮した衝撃波反射過程における非定常空力加熱現象の数値計算

麻生 茂* 大山 健一** 藤原 俊隆*** 林 正徳****

Numerical Simulations of Unsteady Aerodynamic Heating Phenomena
on Shock Wave Reflection Including Vibrational Equilibrium

Shigeru ASO, Ken-ichi OHYAMA, Toshi FUJIWARA and Masanori HAYASHI

ABSTRACT

Thin-layer Navier-Stokes equations have been solved in order to investigate unsteady aerodynamic heating phenomena induced by the shock impingement on a ramp surface with emphasis on high temperature effects. Especially the effect of energy transfer between translational energy and vibrational energy is investigated carefully. The results show that the vibrational energy has a quite important role in unsteady aerodynamic heating phenomena at high temperature.

1. 序論

近年有翼飛翔体やスペースプレーンの開発が盛んになっているが、その開発においては、超音速流及び極超音速流における衝撃波を伴う種々の流れにおける諸問題を解決する必要がある。特に、高速で飛行する物体に衝撃波が入射した場合、物体表面に高い圧力上昇と空力加熱が生じることが知られており、さらにこの衝撃波が物体に非定常に入射する際にも、非定常な圧力上昇と非定常空力加熱が生じることが著者らの研究においても明らかになってきている¹⁾。

特に斜面へ入射した衝撃波の反射過程におけるさまざまな現象はたいへん興味深く、これを数値計算より捉えることはたいへん興味ある問題である。衝撃波が斜面に入射して高い空力加熱を引き起こす現象において、その空力加熱の様子は衝撃波の反射形態によって大きく変化し、特にその形態が衝撃波マッハ数が高い複合マッハ反射と二重マッハ反射のとき、マッハステムによる高い空力

加熱の発生以外に、滑り面の入射により高い空力加熱が生じることが著者らの実験結果により明らかになっている。今回は、この現象が高温気体中で生じた場合に、振動エネルギー(振動平衡)を考慮した場合とそれを考慮しなかった場合について計算を行ったところ顕著な違いが明らかとなり、衝撃波反射過程における非定常空力加熱現象におよぼす高温効果を明らかにした。

2. 計算方法

一般座標系における二次元Navier-Stokes方程式において y 方向の粘性項を無視してThin-Layer近似を行ないThin-Layer Navier-Stokes方程式を得る。²⁾

ここでは、高温効果として、気体分子の内部エネルギーに振動エネルギーも考慮している。振動平衡を考え、至るところで $T = T_v$ とする。単位体積あたりの全エネルギーは、以下のようにかける。

$$E = \rho c_v T + E_v(T) + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2)$$

ここで、

$$E_v = \frac{\rho R \theta_v}{\exp(\theta_v/T) - 1}$$

* 九州大学工学部航空工学科

** 九州大学工学部 修士課程

*** 名古屋大学工学部航空学科

**** 西日本工業大学工学部機械工学科

また、熱流束は温度勾配に比例し、デカルト座標系では、

$$q_x = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + q_{vx}, \quad q_y = -\kappa \frac{\partial T}{\partial y} + q_{vy}.$$

ここで、振動熱流束は、

$$q_{vx} = -\kappa_v \frac{\partial e_v}{\partial x}, \quad q_{vy} = -\kappa_v \frac{\partial e_v}{\partial y}.$$

ここで、 κ と κ_v は各々分子熱伝導率と分子振動熱伝導率である。分子粘性はサザランドの法則により得られる。分子熱伝導率は、プラントル数一定の仮定により粘性と関係づけられる。分子振動熱伝導率は、Vincenti and Kruger²⁾ の論議により分子粘性から近似される。

ここでは、酸素分子を仮定して、振動特性温度 θ_v は、2273 K とする。尚、計算にあたっては自由流温度を種々に変化させて行ったが、その際並進エネルギーから振動エネルギーへのエネルギー移動のみに焦点をおいたため、現実的には生じ得る解離などは、ここでは考慮していない。

Navier-Stokes方程式を解くにあたっては対流項に Harten と Yee の TVD スキームを適用し、粘性項を中心差分で近似した。計算格子は斜交格子を用いた。格子点は主流方向に161点、その垂直方向に81点である。境界条件は壁面上では滑りなし条件とした。上流、下流境界においては、壁面方向に沿って物理量の変化がないとした。上方境界は垂直な衝撃波が保たれるよう物理量の垂直方向の変化を0とし、一次後退差分の式により外挿した。また、壁面条件は定温壁とした。

3. 計算結果と考察

衝撃波マッハ数 $M_\infty = 3.0$ 、傾斜角 $\theta = 35^\circ$ 、 $Re = 1.0 \times 10^4$ 、での自由流温度を変化させた振動平衡モデルと比熱比 $\gamma = 1.4$ のモデルについての等温線と表面圧力分布、表面熱流束分布を示す。

図1は、自由流温度が300 Kの計算結果である。この場合、等温線、表面圧力分布、表面熱流束分布いずれも従来の $\gamma = 1.4$ のモデルの結果³⁾と同様の結果を示しており、この温度における振動エネルギーの流れ場に与える影響は無視してよ

いといえる。

図2は、自由流温度が540 Kの計算結果である。表面圧力分布では、弱い3番目のピークが明確に観察される。これは、斜面に到達した圧縮波の影響によるものと考えられる。表面熱流束分布図についても同様のことが言える。圧力、熱流束分布のこれら3つのピークは、いずれも同じ位置で対応している。

図3は、自由流温度が560 Kの計算結果である。衝撃波パターンは、540 Kの場合と同じである。表面圧力分布図では、3番目のピークが2番目のピークに近づき、その直後極小値を示す。これは、圧縮波の影響により3番目のピークが生じ、その後で流れが加速されて圧力の減少を生じたものと考えられる。この温度の場合、表面熱流束分布図では、圧力分布と傾向が異なり、圧力、熱流束分布の一番目と二番目のピークはいずれも同じ位置であるが、熱流束分布図の三番目のピークの位置は、圧力分布図のそれより上流側に生じ、かつこれまでと異なり、一番目、二番目のピークより高い値を示している。これは、二番目のピークの背後に生じた加速流により表面摩擦応力が増加し、空力加熱率が急増したものと考えられる。

図4は、自由流温度が700 Kの計算結果である。衝撃波のパターンは、540 K～560 Kの場合とは異なり全体的に縮退する。このため、表面圧力分布図では、540 K～560 Kと比べ二番目、三番目のピークが合体し、一つのピークを形成し、その直後の流れの加速によると考えられる緩やかな極小値を示す。また表面熱流束分布図においても、三重点近傍の衝撃波反射パターンの縮退により、540 K～560 Kと比べ、二番目、三番目のピークが合体し、一つのピークを形成し、その後ピーク背後に生じた加速流による空力加熱発生により、プラトー部を形成した後、減少している。

図5は、自由流温度が2000 Kの計算結果である。衝撃波のパターンは700 Kに比べ、全体的にやや大きくなっているが、300 Kの場合に比較すると小さい。表面圧力分布図は、ほぼ700 Kと同じだが、衝撃波パターンが700 Kと比べて

大きくなったため、マッハステムによる圧力上昇分だけ初めに急増し、その後更に増加しピークを示す。表面熱流束分布図でも、ほぼ700Kと同じだが、衝撃波パターンが700Kと比べて大きくなったため、マッハステムによる空力加熱率の上昇分が明確に分かるようになる。その後、高いピークを示し、なだらかに減少する。

図6は、振動平衡を考慮せずに $\gamma = 1.4$ とした場合の自由流温度が2000Kの計算結果である。この場合、衝撃波パターン、表面圧力分布、表面熱流束分布は、自由流温度を変化させても、ほとんど変化はみられなかった。また、振動平衡を考慮した結果と比較すると、振動平衡を考慮した方がマッハステムが小さく、その背後の圧力上昇も小さい。これは、マッハステムの通過により増加したエネルギーが振動エネルギーへ吸収されたためと考えられる。また、振動平衡を考慮した場合、滑り線の斜面への入射により生じた二番目の熱流束のピークは、振動平衡を考慮しない場合に比べてはるかに大きい。これは、高い振動エネルギーを含む流れが斜面に入射し、壁面でそのエネルギーを放出するためだと考えられる。

以上により、振動平衡を考慮した場合とそれを考慮しなかった場合について顕著な違いが明らかとなり、衝撃波反射における非定常空力加熱現象に及ぼす高温効果が明らかになった。

また、振動平衡を考慮した場合について温度により現象が顕著に変化することも明らかとなった。

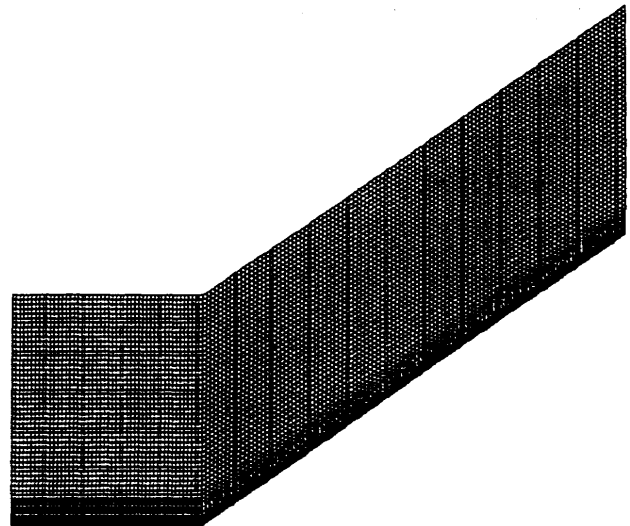
4. 結論

Thin-Layer Navier-Stokes方程式を用いて振動平衡を考慮した衝撃波反射における非定常空力加熱現象の数値計算をした。振動平衡を考慮しない場合、温度によって現象が大きく変化するということはなかったが、振動平衡を考慮した場合、温度によって現象が顕著に変化することが明らかとなった。振動平衡を考慮したものと考慮しないものとを比べると、衝撃波のパターン、表面圧力分布、表面熱流束分布に大きな違いがあることが分かった。このことにより、衝撃波の反射における非定常空力加熱現象の計算には、振動平衡を考慮す

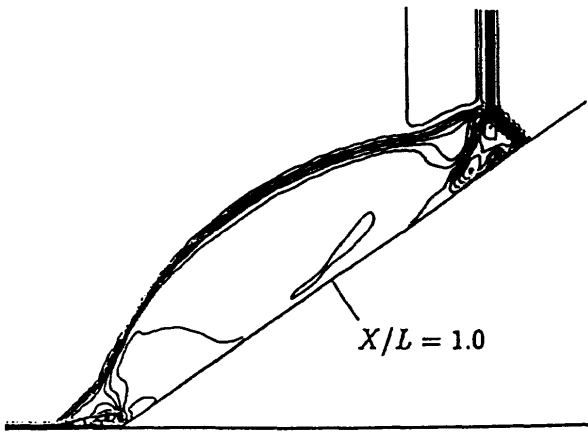
る必要があることが分かった。

参考文献

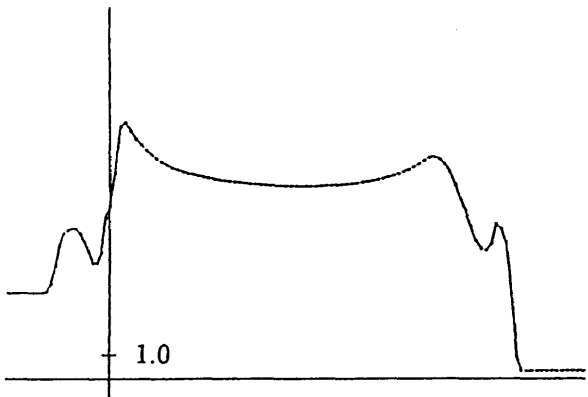
- 1) 麻生・譚・高野・棚橋・林：第20回流体力学講演会講演集(1988), pp. 98-101.
- 2) W.G. Vincenti and C.H. Kruger Jr.: Introduction to Physical Gas Dynamics, Krieger Publishing Co., Florida, 1965.
- 3) S. Aso et. al.: Numerical Simulation of Unsteady Aerodynamic Heating Induced by Shock Reflection, Proceedings of The Eighteenth International Symposium on Space Technology and Sciences, 1992, pp. 811-816.



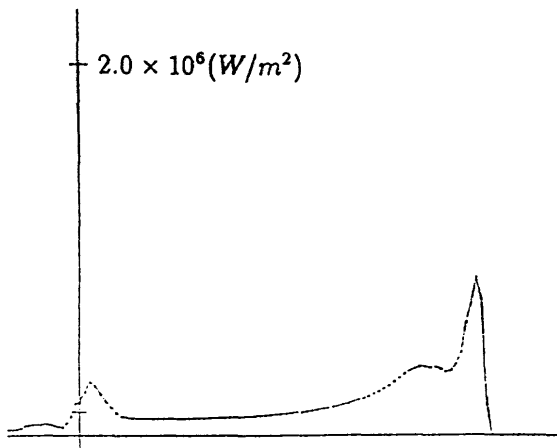
Mesh system used for the present calculations
(Ramp angle of 35 degrees; IJMAX=161, JMAX=81)



(a) Instantaneous isotherm

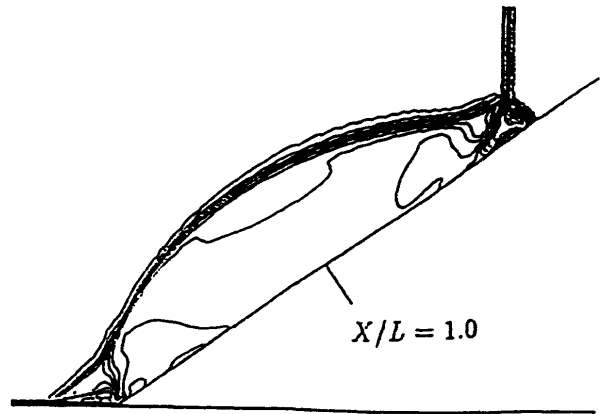


(b) Instantaneous surface pressure distribution

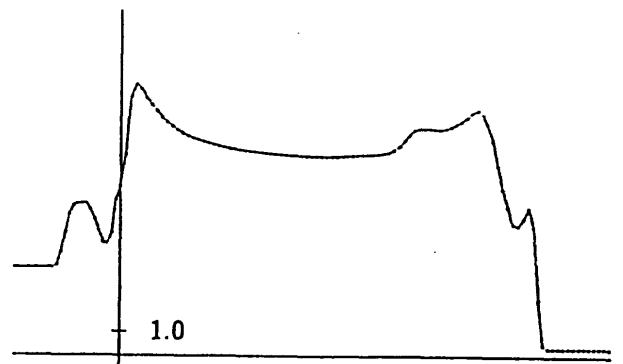


(c) Instantaneous surface heat flux distribution

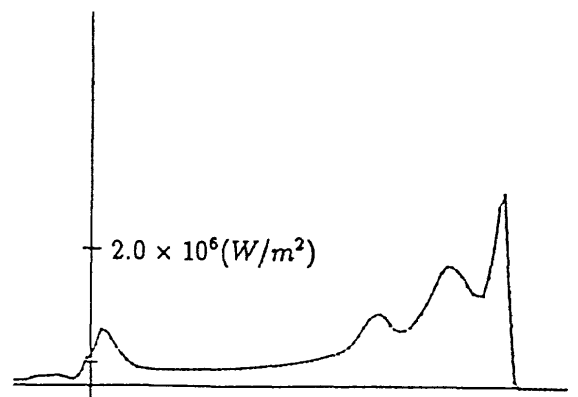
Fig. 1 Calculated results with vibrational equilibrium
 $(M_s = 3.0, R_c = 1.0 \times 10^4 \text{ and } T_\infty = 300 \text{ K})$



(a) Instantaneous isotherm

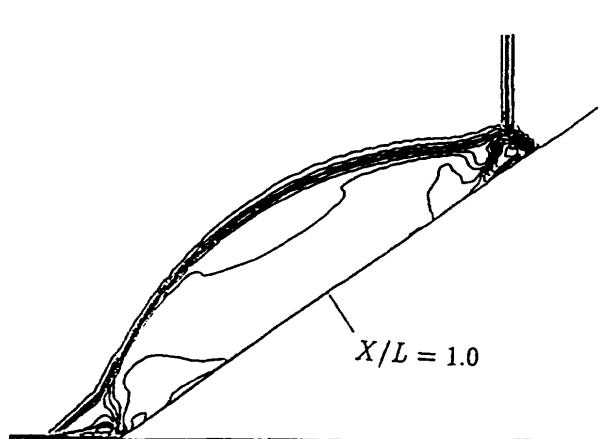


(b) Instantaneous surface pressure distribution

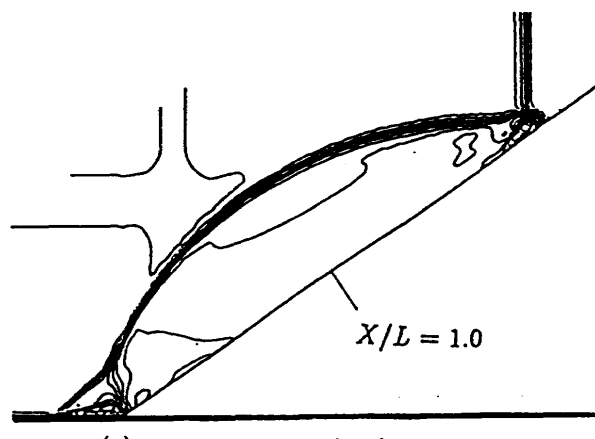


(c) Instantaneous surface heat flux distribution

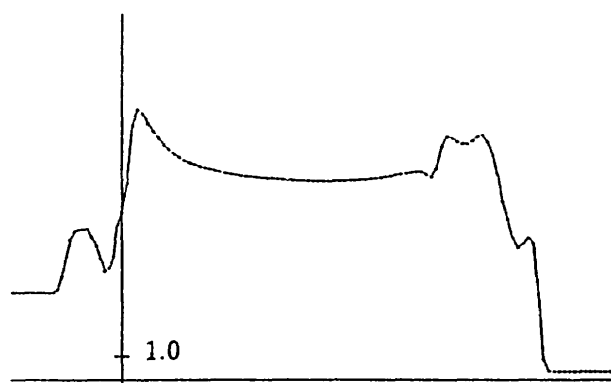
Fig. 2 Calculated results with vibrational equilibrium
 $(M_s = 3.0, R_c = 1.0 \times 10^4 \text{ and } T_\infty = 540 \text{ K})$



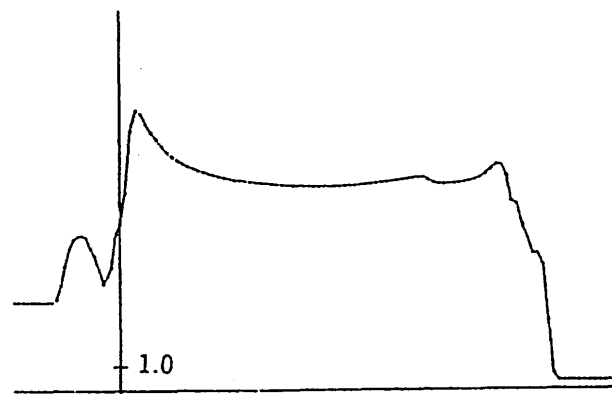
(a) Instantaneous isotherm



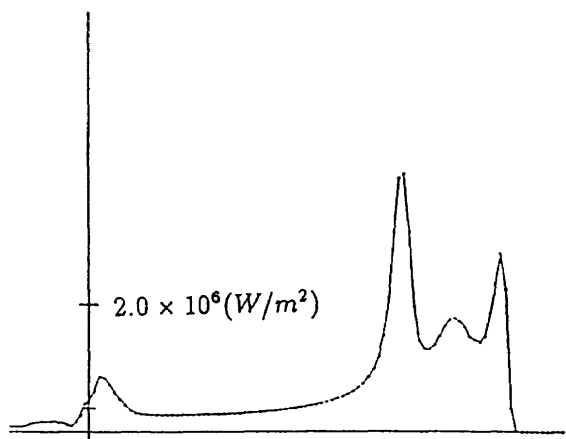
(a) Instantaneous isotherm



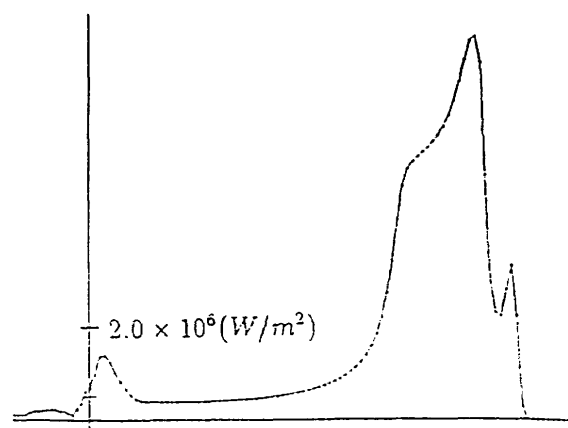
(b) Instantaneous surface pressure distribution



(b) Instantaneous surface pressure distribution



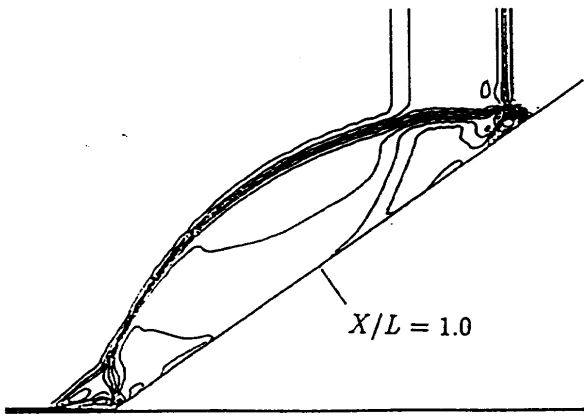
(c) Instantaneous surface heat flux distribution



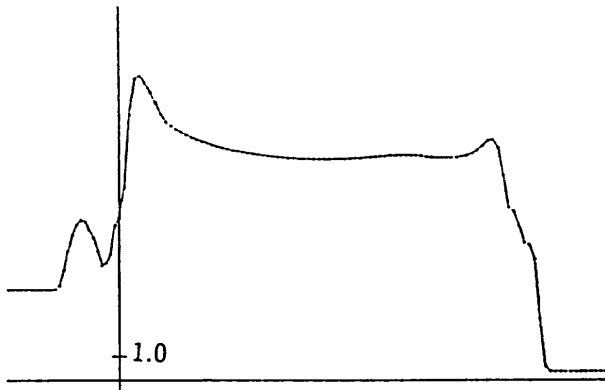
(c) Instantaneous surface heat flux distribution

Fig. 3 Calculated results with vibrational equilibrium ($M_s = 3.0$, $R_e = 1.0 \times 10^4$ and $T_\infty = 560$ K)

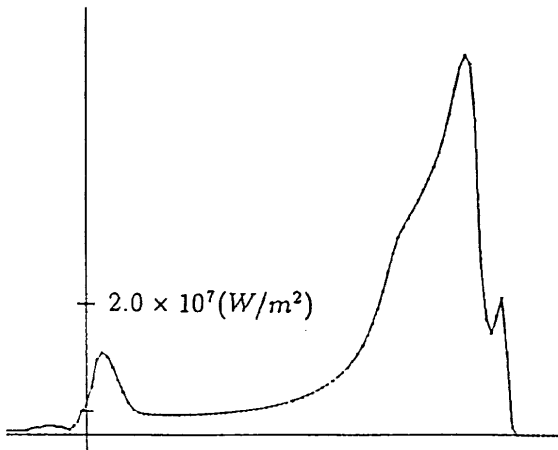
Fig. 4 Calculated results with vibrational equilibrium ($M_s = 3.0$, $R_e = 1.0 \times 10^4$ and $T_\infty = 700$ K)



(a) Instantaneous isotherm

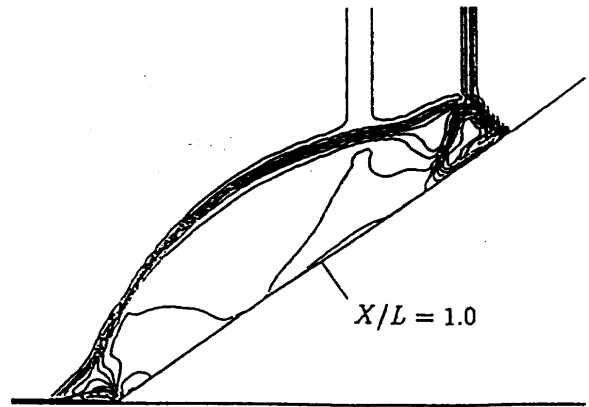


(b) Instantaneous surface pressure distribution

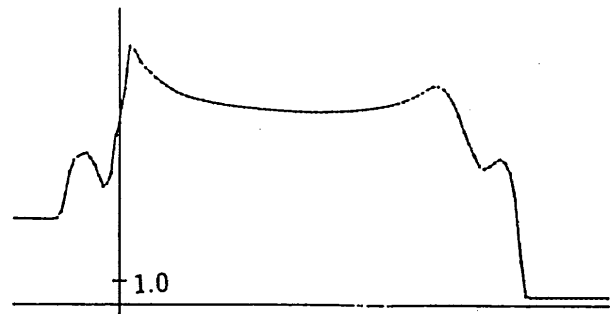


(c) Instantaneous surface heat flux distribution

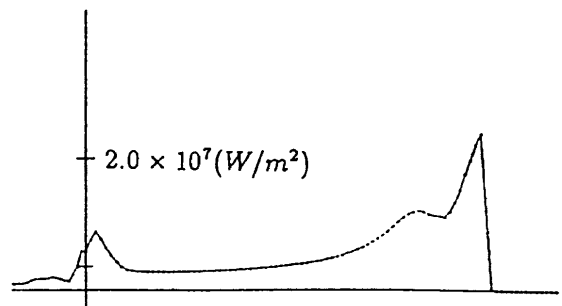
Fig. 5 Calculated results with vibrational equilibrium ($M_s = 3.0$, $R_e = 1.0 \times 10^4$ and $T_\infty = 2000$ K)



(a) Instantaneous isotherm



(b) Instantaneous surface pressure distribution



(c) Instantaneous surface heat flux distribution

Fig. 6 Calculated results with $\gamma = 1.4$ ($M_s = 3.0$, $R_e = 1.0 \times 10^4$ and $T_\infty = 2000$ K)