

平面凝縮相からの強い蒸発*

曾根 良夫**・杉元 宏**

(昭和62年12月24日 受理)

Strong Evaporation from a Plane Condensed Phase

Yoshio SONE and Hiroshi SUGIMOTO

(Department of Aeronautical Engineering, Kyoto University, Kyoto 606)

(Received December 24, 1987)

1. ま え お き

著者の一人(曾根)らは、さきに平面凝縮相への凝縮流について気体論を用いて解析を行った¹⁾。そこでは、平面凝縮相に境されてその蒸気が存する系について種々の初期状態から時間の経過に伴う系の状態変化の様子を追跡し、定常な状態へ移行していく様子を気体論の方程式を数値解析することによって詳しく調べた。さらにこれより定常な凝縮が起っている場合に凝縮相における諸量、凝縮相から遠く離れて平衡状態にある無限遠における諸量との関係および凝縮相から上流の一樣状態へ遷移していく場の様子(Knudsen層)を明らかにした。本研究は蒸発が起る場合について上記に対応することを調べる。

2. 問 題

単原子分子気体が、 $x_1=0$ (x_1 : 空間直交座標)においてその気体の凝縮相(温度 T_w , この温度における飽和蒸気圧 p_w)に境された半無限領域($x_1>0$)に在り、凝縮相から充分離れた所($x_1\rightarrow\infty$)においては、この気体は一樣な平衡状態で圧力 p_∞ , 温度 T_∞ , 流速 u_∞ (x_1 成分のみをもつとする)であるとする。この系において定常な蒸発が起っている場合に $T_w, p_w, p_\infty, T_\infty, u_\infty$ の間に成り立っている関係および凝縮相面から無限遠までの遷移領域(Knudsen層)における気体の振舞を調べる。

3. 仮 定

- i) 気体の振舞は Boltzmann-Krook-Welander 方程式(B-K-W 方程式)²⁾に従う。
- ii) 凝縮相から離れていく分子の速度分布はその圧力、温度として p_w, T_w をもつ静止 Maxwell 分布²⁾の対応する部分である。

4. 解 析

気体が任意の状態(例えば $p_\infty, T_\infty, u_\infty$ の一樣な状態)であればその状態は保たれず、時間と共に変化する。その時間発展の様子を種々の初期値・境界値に対して文献1と同じ差分法によって数値解析した。一樣状態を初期値として時間発展を追跡すると、まず凝縮相から衝撃波または膨張波および接触面に対応するものが発生し、それが無限遠へ伝播していく。その背後の凝縮相近くにはほとんど定常な領域が現れ、その領域が段々と拡がり定常な状態が形成されていく。これを基に定常状態としてどのようなものが実現されるかを詳しく調べた。

5. 結 果

本報告では紙数の都合で時間発展の途中経過は主目的でないので省略し、定常状態に対する結果のみを示す。問題は3個のパラメータ $p_\infty/p_w, T_\infty/T_w, M_\infty$ [$=u_\infty(5/3RT_\infty)^{-1/2}$, R は単位質量あたりの気体定数。従って M_∞ は無限遠の Mach 数]で整理できるが、定常な蒸発が起っているときこれら3個は独立ではなく、このうちの1個(例えば M_∞)から他の2個($p_\infty/p_w, T_\infty/T_w$)が一意的に定まる。この結果を Table 1 および Fig. 1, 2 に

* 昭和62年11月12日 第28回真空に関する連合講演会で講演(12Ap-7)

** 京都大学工学部航空工学教室(京都市左京区吉田本町)

Table 1 p_{∞}/p_W and T_{∞}/T_W versus M_{∞} .

M_{∞}	p_{∞}/p_W	T_{∞}/T_W
0	1	1
0.05000	0.9083	0.9798
0.1000	0.8267	0.9599
0.2000	0.6891	0.9212
0.2999	0.5790	0.8836
0.4500	0.4520	0.8290
0.5498	0.3868	0.7939
0.6497	0.3332	0.7595
0.7995	0.2697	0.7090
0.9397	0.2240	0.6629
0.9892	0.2103	0.6468

示す。これらには $M_{\infty} > 1$ の場合がないが、これは種々の初期値に対して調べた結果、気体中に音速以上の点が現れてもそれは時間と共に無限遠に移動し、定常解としては $M_{\infty} > 1$ となることはないからである。Fig. 3 は p_{∞}/p_W と $\rho_{\infty} u_{\infty} (2\pi R T_W)^{1/2} p_W^{-1}$ [ここに $\rho_{\infty} (= \rho_{\infty} R^{-1} T_{\infty}^{-1})$ は無限遠の密度] の関係を示す。これは上記の結果より導けるものであるが、質量流量は興味ある量であるので特に示した。 $\rho_{\infty} u_{\infty} (2\pi R T_W)^{1/2} p_W^{-1} = 1$ は凝縮相に入射する分子が無いとした場合にあたる。従って、このグラフから凝縮相から出ていく分子の少なくとも16%は返って来ることがわかる。Fig. 1~3には、文献3, 4の方法による弱い蒸発の場合の解析結果を一点鎖線で、また、Ytrehus による Maxwell 分子に対するモーメント法の結果⁵⁾を点線で示す。Fig. 1 では Ytrehus の結果は M_{∞} の全範囲で、Fig. 2 では上の解析結果は $M_{\infty} < 0.25$ でそれぞれ数値結果と区別がつかない。Fig. 4, 5, 6, 7 はそれぞれ $M_{\infty} = 0.05000, 0.4500, 0.7995, 0.9892$ に対する Knudsen 層における $u_1 (2R T_W)^{-1/2}, p/p_W, T/T_W$ を示す。ここに p は気体の圧力、 T は温度、 u_1 は流速 (x_1 成分のみをもつ)、 l_w は凝縮相の温度 T_W における飽和平衡状態の平均自由行程である²⁾。図中の×印は $x_1 = 0$ における値を示す。Knudsen 層の厚さは M_{∞} が大きくなるにつれて厚くなり、 M_{∞} が1近くではその厚さは100 l_w 程度にもなる。定常状態では質量流量 ρu_1 ($\rho = p R^{-1} T^{-1}$: 密度) は x_1 には依らない定数である。このずれから見た本数値計算結果の誤差は上に示した全ての場合について0.04%以下である。

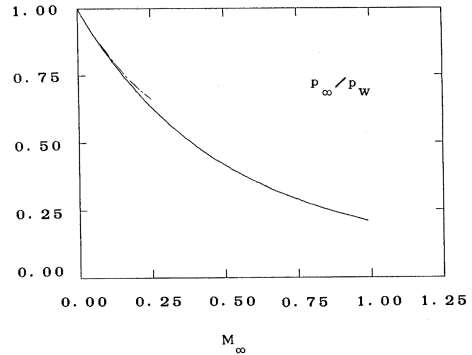


Fig. 1 p_{∞}/p_W versus M_{∞} .
(-----: Analytical result by slightly nonlinear theory^{3,4)})

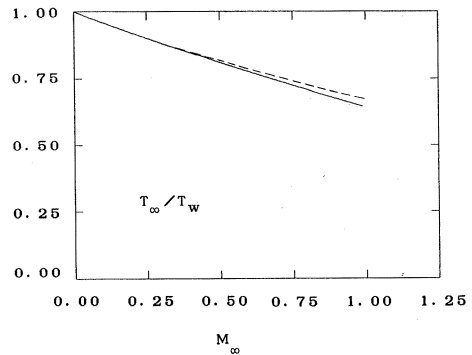


Fig. 2 T_{∞}/T_W versus M_{∞} .
(-----: Ytrehus's result⁵⁾)

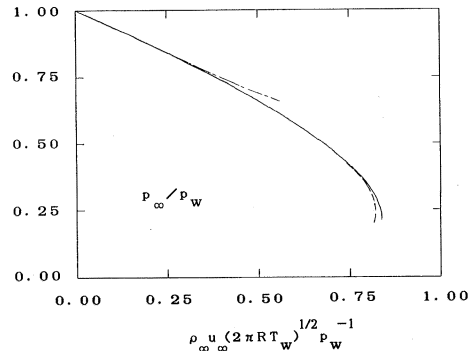
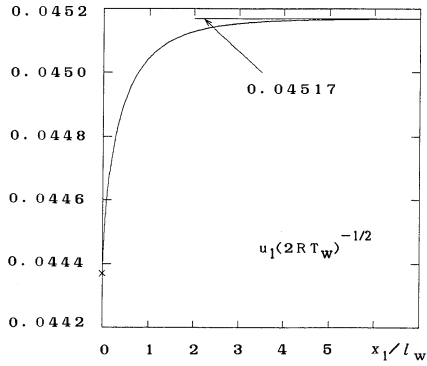
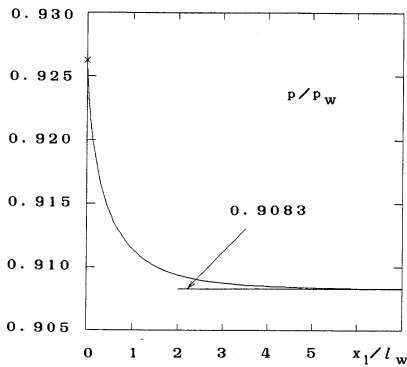


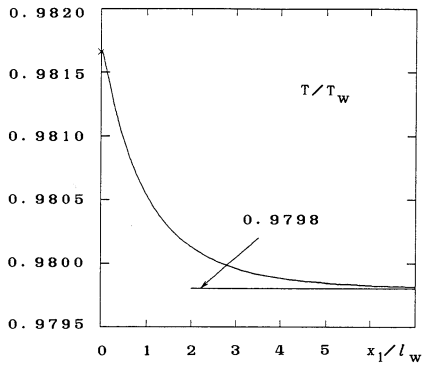
Fig. 3 p_{∞}/p_W versus $\rho_{\infty} u_{\infty} (2\pi R T_W)^{1/2} p_W^{-1}$.
(-----: Analytical result by slightly nonlinear theory^{3,4)}, -----: Ytrehus's result⁵⁾)



(a)

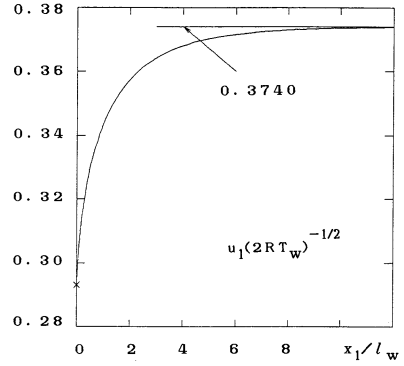


(b)

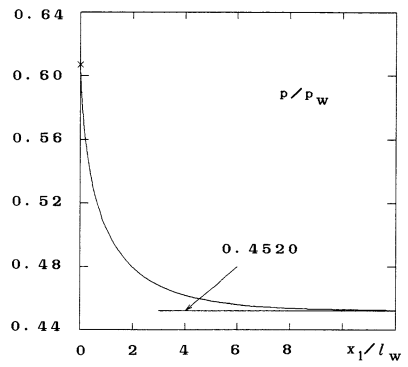


(c)

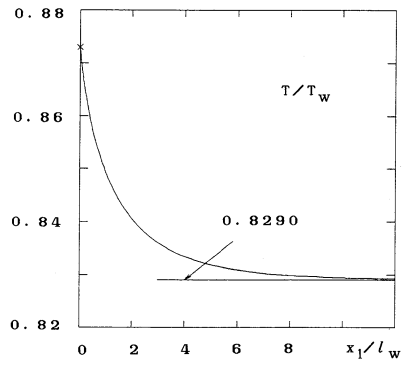
Fig. 4 The Knudsen layer for $M_\infty=0.05000$.
(\times : The value at origin)



(a)



(b)



(c)

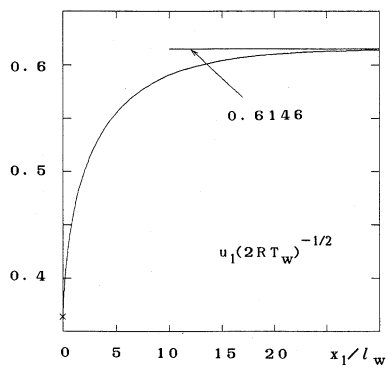
Fig. 5 The Knudsen layer for $M_\infty=0.4500$.

〔文 献〕

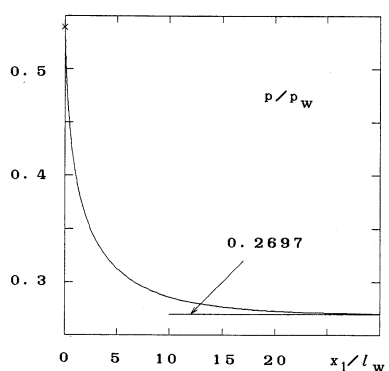
- 1) Y. Sone, K. Aoki, and I. Yamashita: *Rarefied Gas Dynamics*, ed. V. Boffi and C. Cercignani (Teubner, Stuttgart, 1986) Vol. II, p. 323.
- 2) 曾根良夫: 希薄気体力学 (分子気体力学) 流体力学ハンドブック, 日本流体力学会編 (丸善, 1987) 第14

章.

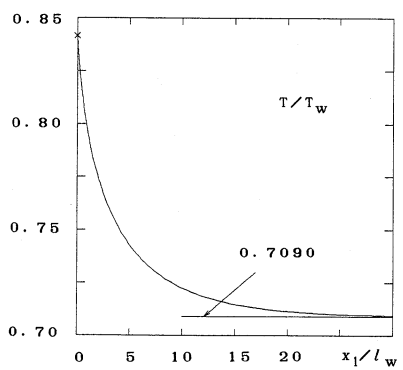
- 3) Y. Sone: *J. Phys. Soc. Japan* **45** (1978) 315.
- 4) Y. Onishi and Y. Sone: *J. Phys. Soc. Japan* **47** (1979) 1676.
- 5) T. Ytrehus: *Rarefied Gas Dynamics*, ed. J. L. Potter (AIAA, New York, 1977) Part II, p. 1197.



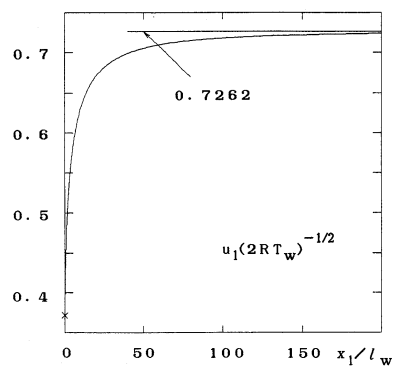
(a)



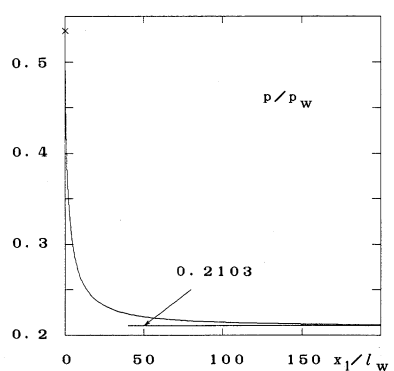
(b)



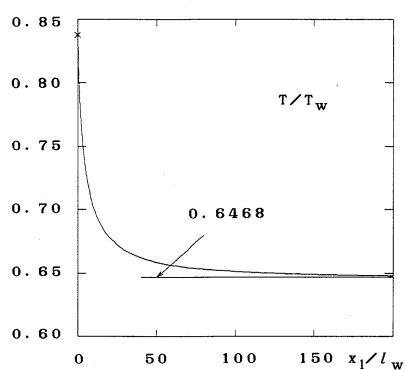
(c)

Fig. 6 The Knudsen layer for $M_\infty=0.7995$.

(a)



(b)



(c)

Fig. 7 The Knudsen layer for $M_\infty=0.9892$.