

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

稀薄氣體自由剪力層之動量與溫度脈動相關函數之探討

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2212-E-032-016

執行期間：89年8月31日至 90年7月31日

計畫主持人：洪 祖 昌

執行單位：淡江大學

中 華 民 國 90 年 8 月 4 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

稀薄氣體自由剪力層之動量與溫度脈動相關函數之探討

THE MOMENTUM FLUCTUATION CORRELATIONS IN RAREFIED GAS FREE SHEAR LAYER

計畫編號：NSC 89-2212-E-032-016

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：洪祖昌 私立淡江大學

一、中文摘要

以直接模擬蒙地卡羅 (Direct Simulation Monte Carlo) 法計算超極音速稀薄氣體中自由剪力流之流場性質以及速度脈動相關函數，並且藉速度脈動機率密度函數之分析以對自由剪力流混合之內在結構有所了解。首先觀察其流場特性以及自由流分別為不同速度比下自由剪力流混合結構之差異，接著以各種機率密度函數探討流場特性，最後並與連性紊流混合層之結果相比較，本計劃將進一步對聯合機率密度函數 $f(u',v')$ 及 $f(u',T')$, $f(v',T')$ 加以仔細計算。進一步瞭解高階相關函數所造成稀薄氣剪力層中類似連流“紊性”傳遞 (momentum and Heat transfer) 之統計性質與基本物理機制。

關鍵詞：蒙地卡羅法，稀薄氣體，自由剪力層

Abstract

The direct simulation of Monte Carlo method was employed to calculate the flow structure, such as mean velocity, temperature, pressure and mean quantities of various order of momentum fluctuations correlations of free shear layer at hypersonic speed.

The corresponding probability density function of velocity will also be investigated. In this study the detailed joint distribution function $f(u',v')$ will be emphasized.

To counter explain the basic in side physical structure of the higher order correlations such as $\overline{u'v'}$, $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$, $\overline{u'^2v'}$, $\overline{u'^3}$, $\overline{v'^3}$, $\overline{u'^4}$, $\overline{v'^4}$ etc.) Another important feature of this study is put on the momentum & temperature fluctuation correlations $\overline{u'T'}$, $\overline{v'T'}$ will be investigated for the first time. The corresponding pdf $f(T')$, $f(u',T')$, $f(v',T')$ will also be calculated in this study. Difficulties on the calculation of joint pdf, $f(u',v')$, $f(u',T')$ & $f(v',T')$ are expected, but we are confident that we will make it.

Keywords: DSMC, Rarefied gas, Free shear layer

二、緣由與目的

平行流之混合問題在工程上有其實用性，也一直引起工程師們的探討 如已經成為人類不可或

缺的交通工具 - 汽車的燃燒器內部的油、汽反應區或是飛行器的下游流場結構等。自從人類可以藉由航空器在天空遨翔以來，因為地球可用燃油愈來愈少及生活空間日趨狹小的雙重壓力，使得近年來科學家們對太空運輸系統的研究與發展日漸增加，一來飛行器在高空能作較有效率的飛行 (高空較稀薄的空氣對飛行體表面有較小的摩擦，可減少耗油)；二來太空梭在重返 (re-entry) 大氣層過程時，超極音速下 (hypersonic) 的流場結構亦值得研究 (其下游流場亦具有類似的混合特性)。故本計劃將對此類超極音速稀薄氣體平行混合流加以分析、討論。

本計劃採用的直接模擬蒙地卡羅法 (Direct Simulation Monte Carlo Method，簡稱 DSMC) 即是模擬稀薄氣體下之波茲曼方程式的一種方法。

“機率模擬” (probabilistic simulation) 的構想最早是由 Haviland 與 Lavin 於 1962 年提出(1)，稱為測試分子蒙地卡羅法。次年 Bird 以此法為基礎(2)，加入時間變數 (time variable) 及大量模擬分子後，稱之為直接模擬蒙地卡羅法，並首次將之應用於均勻 (homogeneous) 氣體平衡狀態的恢復現象 (relaxation) 上。隨後在 1965 年，Bird (3) 又成功地以直接模擬蒙地卡羅法解決了流場的震波結構問題 此後直到 1974 年，Larsen 與 Borgnakke (4) 的研究使得直接模擬蒙地卡羅法得以應用在多原子氣體，也因此有了更大的發展空間。1981 年以來，VHS(5)、VSS(6)、GHS(7) 等分子模型的建立，解決了傳統彈性碰撞模型常遇見的問題，也使得分子的模擬更能反應真實的情況。近年來隨著電腦硬體的發展，此方法已廣泛被用於解二維及三維各種複雜幾何外形的流場。雖然曾有學者利用此法計算均勻稀薄氣體中部分脈動相關函數(8)，但是對於稀薄氣體自由剪力層中之動量相關函數及其各種機率密度函數則未論及，且文獻中亦甚少出現。

本計劃曾先單原子模型計算簡單外形的二維流場(9)，後改良以雙原子分子模型及適形 (body fitted) 網格探討二維圓頭鈍體的流場狀況(10)(11)，接著亦以雙原子分子模型計算鮮為人注意之二維極音速稀薄氣體自由剪力層中的各動量相關函數(12)(13)。接著為了更進一步瞭解動量脈動相關的內在結構，我們突破困難計算空間之機率密度函數 $f(u')$, $f(v')$, $f(u',v')$ ，其中 $f(u',v')$ 之計算非常困難，目前接受(14)(15)，目前計算結果尚可，但是不是很滿意。機率密度函數的計算有利進一步瞭

解流場動量混合的內在結構，從前面的經驗我們發現稀薄氣體剪力層動量脈動間之相關函數 (12)(13)，例如 $\overline{u^1 v^1}, \overline{u^2 v^1}, \overline{u^2 v^2}, \overline{u^3 v^1}, \dots$ 不但存在且借由 DSMC 法可以計算。在稀薄氣體動力學裡並無“Turbulence”(紊流)一詞，然其脈動量間的相關函數其物理象現與連流(continuum fluid flow)之紊流場中的紊性傳遞行為(turbulent transport)在物理量傳遞現象上應該是類似或相同的，本計劃將對稀薄體剪力層中動量脈動量及溫度脈動量間之相關函數加以探討，並求出相對應之聯合機率密度函數 $f(u', T'), f(v', T')$ 以相對應了解其“紊性熱傳現象之內在機制”。在連流場之紊流理論中有關 pdf model 只有速度機率密度函數(pdf in velocity space)之模式與描述從未涉及速度與溫度之機率密度函數，在稀薄氣體文獻中亦少見有計算瞭解稀薄氣體剪力層中類似“紊性”熱傳($\overline{u^1 T^1}, \overline{v^1 T^1}$)之探討，我們將對其聯合機率密度函數 $f(u', T'), f(v', T')$ 加以計算探討。這一部份的計算可能會遭遇一些困難，不過我們有信心可以克服，如時間許可將對稀薄氣體剪力層之動量、質量、與熱量等紊性傳遞做一綜合分析討論。

波茲曼方程式本身即為以統計分析方法推導出來的程式，其所要解的就是流場中之機率密度函數；而以直接模擬蒙地卡羅法模擬的稀薄流場，更能輕易地得到流場中速度分佈狀況和各階動量相關函數的平均值。尤其在高速飛行體重返大氣層的過程，由於是由極稀薄流場(愈高空則空氣愈稀薄)過渡到較濃密的流場，以直接模擬蒙地卡羅法的模擬特性，更能反應此類過渡性質，故本計劃亦欲藉由分析以此法求得之稀薄氣體平行混合流之混合特性，來和一般連性流體混合層二者間之異同作比較。

三、結果討論

我們發現相關函數強的地方其相對應 Joint pdf 比較偏離高斯分佈而混合比較均勻的區域其速度機率密度函數 $f(u'), f(v')$ 及 $f(v', v')$ 都比較平滑而接近高斯分佈。扭曲度(Skewness, $\overline{u^3}, \overline{v^3}$) 及扁平度(Flatness $\overline{u^4}, \overline{v^4}$) 的大小也與相對應 $f(u'), f(v')$ 之分佈(在速度空間中之位置及形狀)可以合理相對應解釋。

四、計畫成果自評

1. 繼續完成稀薄氣體剪力層 $f(u', v')$ 之計算並與相對應各高階(二階以上)動量與溫度脈動相關函數 $\overline{u^1 v^1}, \overline{u^2 v^1}, \overline{v^2 v^1}, \overline{u^2 v^2}, \overline{u^3 v^1}, \overline{v^3 v^1}, \overline{u^4 v^1}, \overline{v^4 v^1}, f(u'), f(v'), f(T')$ 間物理關係之詳細探討，企圖瞭解溫度脈動量相關函數的統計內涵。

2. 深入計算 $\overline{u^1 T^1}, \overline{v^1 T^1}$ 的“紊性”熱傳現象，及相關

之機率密度函數 $f(T'), f(u'), f(v'), f(u', T'), f(v', T')$ 。

3. 在國內建立稀薄氣體剪力流的基本應用計算能力。並在國際上首先探討稀薄流中溫度脈動與動量間相關函數所造成之類似連流中之“紊性”傳遞現象，特別是高階相關數與對應之 Joint distribution $f(u', v'), f(u', T'), f(v', T')$ 間之基本物理現象之探討，很有學術意義。

五、參考文獻

- [1] Haviland, J.K. and Lavin, M.L.(1962). Applications of the Monte Carlo method to heat transfer in a rarefied gas, Phys.Fluid 5,1399-1405.
- [2] BIRD, G.A. (1963). Approach to translational equilibrium in a rigid sphere gas, Phys. Fluids 6, 1518-1519.
- [3] BIRD, G.A. (1965). Shock wave structure in a rigid sphere gas, In Rarefied gas dynamics (ed.J.H. de Leeuw), Vol. 1, pp.216-222, Academic Press, New York.
- [4] LARSEN, P.S. and BORGNAKKE, C. (1974) In Rarefied gas dynamics (ed.M.Becker and M. Fiebig, 1, Paper A7, DFVLR Press, Porz-Wahn, Germany.
- [5] G. A. Bird, “Monte Carlo Simulation in an Engineering Context”, Progress in Astro.and Aero. 74.239 (1981).
- [6] Claus Borgnakke & Poul S.Larsen (1975), “Statistical Collision Model for Monte Carlo Simulation of Polyatomic Gas Mixture”, J. Comput. Phys. 18.
- [7] W.K.Melville (1972), “The Use of the Loaded-sphere Molecular Model for Computer Simulation of Diatomic Gases”, J. Fluid Mech., vol.51, part3, pp. 571-583.
- [8] G. A. Bird, “Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows”, London, Oxford Univ. Press (1994).
- [9] 歐陽堅, “二維極音速稀薄氣體流場分析”, 國立中央大學機械研究所碩士論文(1992).
- [10] 李威龍, “鈍體極音速稀薄氣體動力分析”, 國立中央大學機械研究所碩士論文(1994).
- [11] 洪祖昌, 1995/7, “飛行鈍體在超音速從連性到稀薄氣體動力分析及極超音速衝壓引擎中燃料噴人位置和震波結構對燃燒室特性影響分析”, 國家科學委員會專題研究計畫成果報告。計畫編號：NSC-83-0424-E-008-001, NSC-84-2212-E-008-022.
- [12] 傅維安 (1996), “稀薄氣體自由剪力層中動量相關函數之探討”, 國立中央大學機械研究所碩士論文。
- [13] 洪祖昌、傅維安和杜文謙, “稀薄氣體自由剪力層動量相關函數之探討”, 中國航空太空學會學刊, 第三十卷第一期第 77-86 頁, 1998.
- [14] 路聲偉 (1997), 『稀薄氣體自由剪力流之混合結構分析』, 國立中央大學機械研究所碩士

論文。

[15] 洪祖昌、路聲偉『稀薄氣體自由剪力流之混合結構分析』，第二屆<海峽兩岸計算流體力學學術研討會>論文集，四川綿陽，1999/9/21, pp. 228-243。

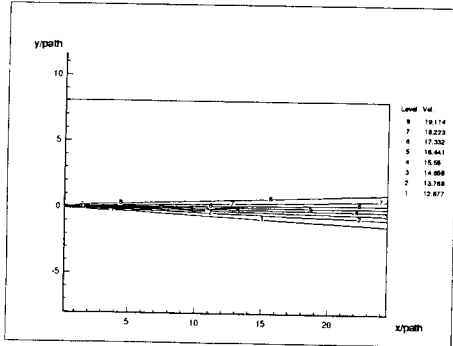


圖1 流場速度分佈圖(r=0.6)

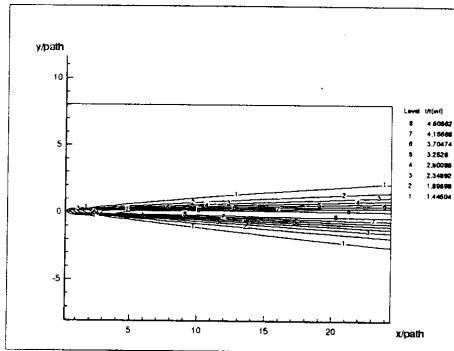


圖2 流場溫度分佈圖(r=0.6)

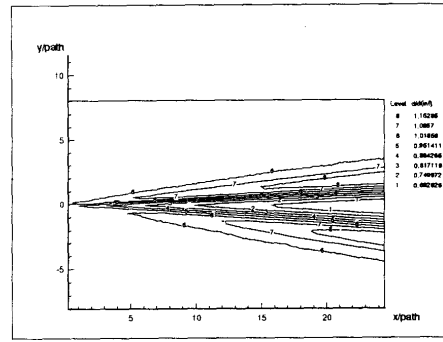


圖3 流場密度分佈圖(r=0.6)

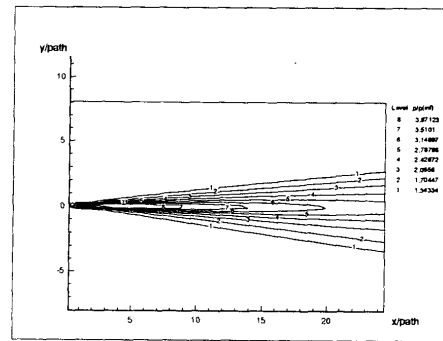


圖4 流場壓力分佈圖(r=0.6)

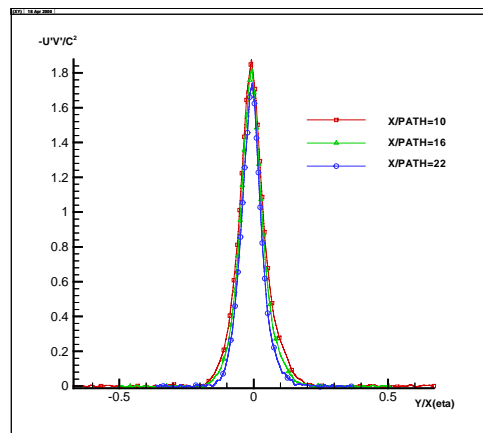


圖5. 流場各截面 $-\overline{u'v'}/c^2$ 平均分佈圖(r=0.6)

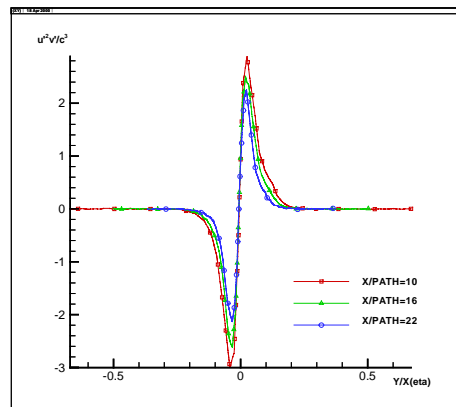


圖6 流場各截面 $\overline{u'^2 v'}/c^3$ 平均分佈圖(r=0.6)

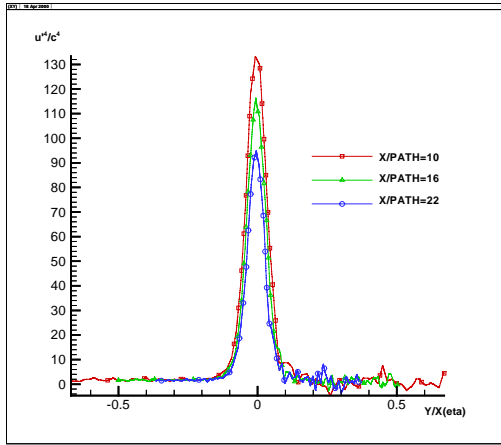


圖 7 流場各截面 $\overline{u^4/c^4}$ 平均分佈圖($r=0.6$)

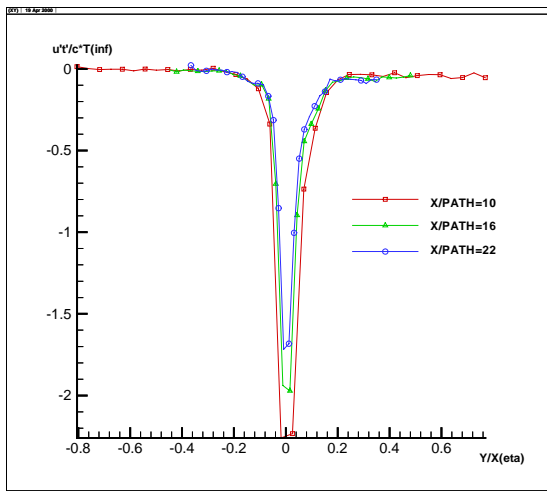


圖 8 流場各截面 $\overline{u^4/c^4 * T(inf)}$ 分佈圖($r=0.6$)

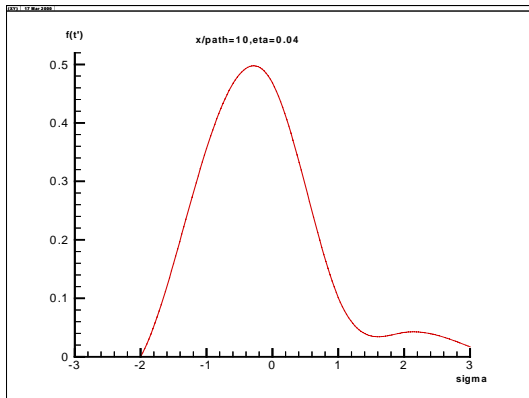


圖 9 $r=0.6, \eta=0.04$ 之 $f(t')$ 分佈圖

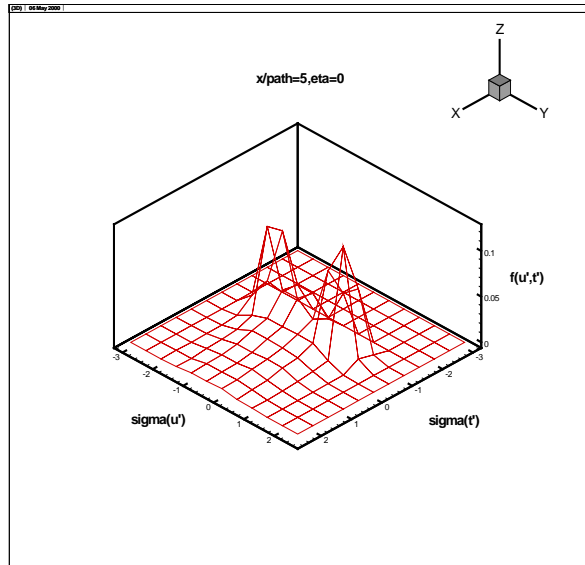


圖 10 $r=0.6, x/path=5, \eta=0$ 之 $f(u', t')$ 分佈圖

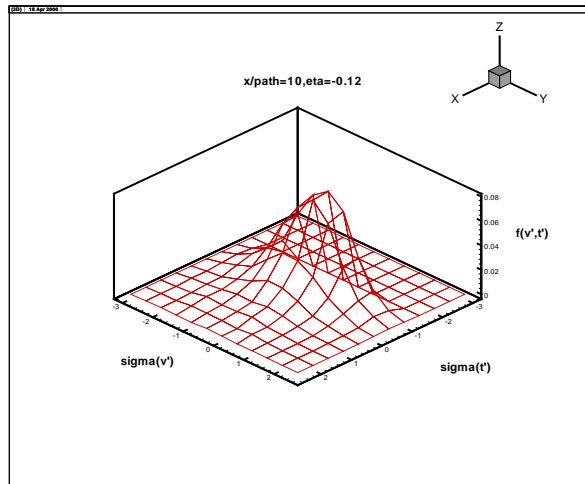


圖 11 $r=0.6, x/path=10, \eta=-0.12$ 之 $f(v', t')$ 分佈圖