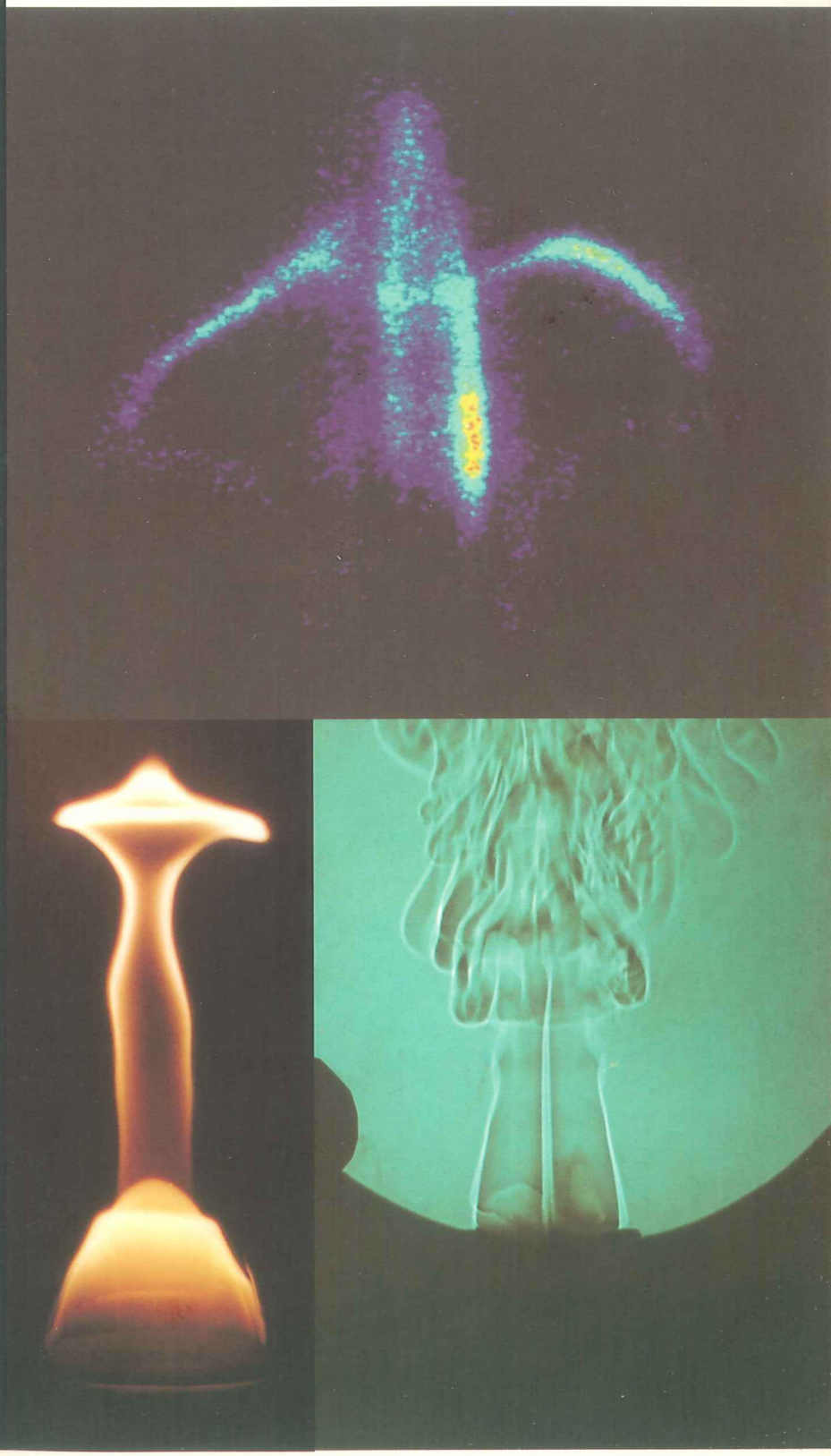
中華民國燃燒學會會刊
The Combustion Institute of R.O.C.

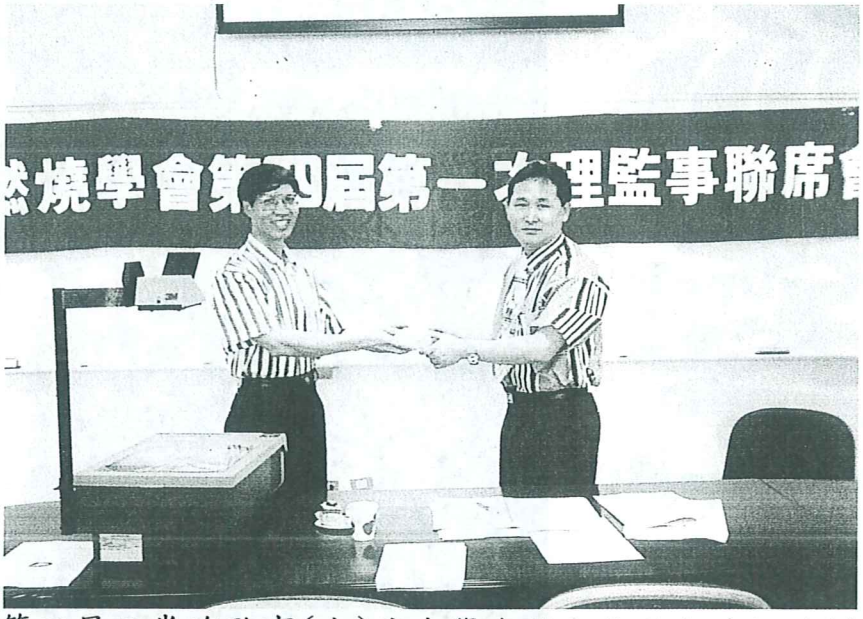
燃燒

23
中華民國87年6月



Vol.7 No.2

賀



第三屆王常務監事(左)代表學會將印信移交連任的劉理事長(右)

劉通敏教授・王覺寬教授

分別當選連任

本學會第四屆理事長、常務監事

第四屆全體理、監事暨秘書處全體同仁賀

目錄

◎ 會務活動記要

2 八十七年會〔會員大會〕會議記錄 學會秘書處

7 八十七年年會、第八屆燃燒科技應用研討會、第四屆熱流觀測圖片競賽暨國科會熱流學門研究成果發表會記要 趙怡欽教授

11 中華民國燃燒學會第八屆燃燒科技應用研討會產學研座談會記要 趙怡欽教授

15 第八屆燃燒科技研討會學生親自報告論文得獎名錄 學會秘書處

16 第四屆熱流觀測圖片競賽得獎名錄 學會秘書處

17 第四屆理監事第一次聯席會議會議記錄 學會秘書處

20 學會近期經費收支一覽表 財務委員會

◎ 專題報導與經驗交流園地

22 具震波之二維冷熱氣動流場之數值模擬 劉通敏、黃柏文、陳聰堅

28 Numerical Analyses for Downward Flame Spread over Thin and Thick Fuels in Gravitational Field 林佩勳、陳俊勳

◎ 會訊

37 封面的故事 出版委員會

38 燃燒學會入會申請書 會員委員會

39 會刊徵稿啟事 出版委員會

中華民國燃燒學會87年度會員大會會議記錄

一、時間：中華民國八十七年三月二十日

二、地點：台南市大學路一號國立成功大學航太所會議廳

三、出席：全體行權會員

四、主席：劉 理事長 通敏　　記錄：秘書處

五、主席報告：

1.感謝成功大學航太所，熱心承辦此次會員大會，以及學會之第八屆燃燒科技應用研討會，與第四屆熱流觀測圖片競賽活動(議程見第5頁)。

2.非常高興承辦單位能請到兩位世界著名學者：日本燃燒學會理事長 Prof. Niiko 主講「廿一世紀燃燒的挑戰」與德國哥廷根大學 Prof. Bohn 主講「生質能與汽電共生」，希望藉此落實學會所推動的「國際合作與交流」。

3.學會自民國八十一成立以來，已有近500位個人會員，及涵蓋產官學研各界及民間企業等近百團體會員，是一個非常年青與充滿活力的學會。通敏自接受推舉爲理事長以來，除繼續學會優良傳統外，亦全力推動下列各項工作：

●積極擔任業界與學研界之合作觸媒

在這方面特別要感謝：產業委員會黃重裕主委，主辦「燃煤技術與實務講習會」「工廠火災與消防講習會」；學術委員會林大惠主委，主辦「燃燒診斷技術研討會」「第一銅鐵工業服務案」。

●促進經驗交流與推廣全民燃燒通識

在這方面特別要感謝：出版委員會紀慶嘉主委與周重石副主委，負責編印「燃燒會刊雜誌」這是本屆理監事所推動的一大特色工作，藉由強化會刊內容，除使其成爲燃燒科技經驗交流的園地外，亦著眼於燃燒教育的「本土化」與「通識化」。在做法上特別邀專家學者撰寫與防火、焚化、能源開發，污染防治、燃燒通識等系列專文，登載於每季出版的會刊上，並廣寄國內外主要圖書館與縣市立文化中心，以推廣全民燃燒科技通識，這在國內眾多學會中可謂少數之一，甚有圖書館來函要求寄送以前各期以利典藏，書店要求代售等令人振奮之事。

●推動燃燒人力與大型裝備的資訊化

在這方面特別要感謝：台大馬小康教授完成「國內大專院校具燃燒專長師資資源庫」調查供業界參考使用，促成「提昇國家競爭力」大型計劃建案。此外，出版委員會亦持續將「國內大型熱流燃燒設備」分期於會刊介紹，以享各界讀者與業界。

●推動學會國際化以提昇我國能見度

在這方面感謝：國際委員會邱輝煌主委率隊出席各項國際會議，爲我國會籍權益奮戰，特別是對岸的許多不合理阻撓，並已爭取到1999年「第二屆亞太燃燒會議」及2001年「環太平洋流場可視化與影像處理會議」主辦權，尚希望會員們全力支持，以提昇我國燃燒科技界的國際能見度。有關國際宣傳方面，特別感謝中正理工學院周重石教授，將學會資訊建於全球資訊網**(http://cc04.ccit.edu.tw/~combust)**，在世界燃燒總會下數十個會員國中，本學會屬前幾名創建首頁的會員國。

●有關學會財務管理及會員資料管理

在這方面感謝：會員委員會顏瑞和主委，設計「會員資料登錄電腦軟體」使會籍整理工作邁入制度化財務委員會張枝成主委，細心經管學會之收支，使得本屆理監事會的財務能收支平衡。

4.本屆理監事會的任期將滿，感謝所有會員的支持與工作同仁的協助，特別是由中正理工學院熱流中心所組成的秘書處團隊。最後，通敏除謹祝本次大會與各項活動圓滿成功，各位來賓及全體會員事業順利外，同時也希望在本次年會中所舉辦的「第四屆理監事改選」時，全体會員能踴躍投下神聖一票，選出心目中適當人選，讓我們共同攜手推展會務的成長與卓壯，以迎接跨世紀的到來。

六、頒發「年度服務績優獎」：

台大機械系顏瑞和教授（設計會籍管理軟體及承辦第七屆研討會各項活動績效卓著）
中鋼研發處黃重裕處長（承辦燃煤技術與實務、工廠火災與消防二講習會績效卓著）
成大機械系林大惠教授（承辦燃燒診斷技術研討會與第一銅鐵工業服務案績效卓著）
成大航太系王覺寬教授（負責督導學會各項業務協辦第一銅鐵工業服務案績效卓著）
成大航太系張克勤教授（承辦國際合作交流事宜協辦第一銅鐵工業服務案績效卓著）
中鋼研發處何燦穎博士（協辦燃煤與工廠消防講習、第一銅鐵工業服務案績效卓著）

七、頒發「熱心贊助學會活動感謝狀」：

計有中鋼公司新材料研發處、中山科學研究院第二研究所、工業技術研究院能源及資源研究所、工業技術研究院機械研究所、工業技術研究院航太中心、上儀公司等六單位。

八、會務報告：

1.八十六年度工作報告－計含會員服務、社會服務、產官學研活動、出版服務、出席國際交流活動、經費收募管理等六大部份四十項（詳見年會手冊第8頁）。

2.八十六年度財務報告－計含年度經費收支決算、年度現金出納情形、學會資產負債情形等三大部份（詳見年會手冊第9、10、11頁）。

3.八十七年度工作計劃報告－計含推動燃燒科技生根及本土化、舉辦研討會、圖片競賽、國際會議交流、維修學會全球資訊網、舉辦工業講習會、舉辦產官學研各界座談會、辦理會員升級、會籍資料異動普查、會刊編印、燃燒人才庫修訂、會費收繳、經費勸募等十三項（詳見年會手冊第12頁）。

4.八十七年度經費預算報告－（詳見年會手冊第13頁）。

九、提案討論：

1.請大會通過本學會八十六年度財務決算(一致鼓掌通過)。

2.請大會通過本學會八十七年度預定工作計劃與財務預算(一致鼓掌通過)。

十、公佈第四屆理事、監事當選人名單(名列見第6頁)。

十一、散會

燃燒學會87年度會員大會
暨第八屆燃燒科技應用研討會

中華民國燃燒學會87年度會員大會議程

日　期	起　迄　時　間	活　動　項　目
3月20日	09:30-10:00	報到、註冊、行權會員領取選票
	10:00-10:10	開幕典禮
	10:10-10:20	主席與學會理事長致詞
	10:20-10:30	貴賓致詞-中山科學研究院 陶超敬所長
	10:30-10:50	頒發「年度服務績優獎」、會務報告、提案討論 (投票選舉第四屆理、監事)
	10:50-11:00	休息(選舉計票)
	11:00-11:50	專題演講(一)-日本燃燒學會理事長Niioka教授
	11:50-13:20	午餐及產學研座談會(公佈第四屆理、監事當選名單)
	13:20-15:40	論文發表與圖片競賽報告(I)
	15:40-16:00	休息
	16:00-18:20	論文發表與圖片競賽報告(II)
	18:30-20:30	晚宴及致贈贊助單位感謝狀
3月21日	09:00-09:50	專題演講(二)-德國德國哥廷根大學Bohn教授
	09:50-10:10	休息
	10:10-12:30	論文發表與圖片競賽報告(III)
	12:30-13:30	午餐(會議結束)

中華民國燃燒學會第四屆理事與監事當選人名錄

當選職稱	姓 名	服務單位現職	通訊聯絡處	電話 / 電傳
理事長	劉通敏	清華大學動機系教授	新竹市光復路二段101號清大動機系	Tel：(03)5742607 Fax：(03)5729716
理　事	黃重裕	中鋼新材料研發處處長	高雄小港中鋼路一號中鋼新材料研發處	Tel：(07)8051201 Fax：(07)8022511
理　事	方良吉	工研院能資所副所長	新竹縣竹東鎮中興路四段195號能資所	Tel：(03)5916301 Fax：(03)5916310
理　事	顏瑞和	臺灣大學機械系教授	台北市羅斯福路四段1號台大機械系	Tel：(02)23632137 Fax：(02)23637585
理　事	張克勤	成功大學航太所教授	台南市大學路一號成大航太所	Tel：(06)2757575-63679 Fax：(06)2389940
理　事	蘇玉本	中科院第二研究所副所長	桃園龍潭中科院第二研究所	Tel：(03)4712201-352002 Fax：(03)4711057
理　事	趙怡欽	成功大學航太所教授	台南市大學路1號成大航太所	Tel：(06)2757575-63690 Fax：(06)2389940
理　事	林大惠	成功大學機械系教授	台南市大學路一號成大機械系	Tel：(06)2757575-62167 Fax：(06)2352973
理　事	馬小康	臺灣大學機械系教授	台北市羅斯福路四段1號台大機械系	Tel：(02)23629976 Fax：(02)23632644
理　事	張瑞進	工研院能資所燃燒組組長	新竹縣竹東鎮中興路四段195號能資所	Tel：(03)5916421 Fax：(03)5820230
理　事	夏筱明	中正理工學院航空系主任	桃園大溪員樹林中正理工學院航空系	Tel：(03)3906751 Fax：(03)3800960
候補理事	吳北春	正熊機械公司董事長	高雄縣大寮鄉大發工業區裕民街16號	Tel：(07)7872601 Fax：(07)7873282
候補理事	洪福亮	中鋼公司公用設施處副處長	高雄市小港中鋼路一號中鋼公用設施處	Tel：(07)8051200 Fax：(07)8051160
候補理事	施聖洋	中央大學機械系教授	中壢市五權里三十八號中央大學機械系	Tel：(03)4267327 Fax：(03)4254501
常務監事	王覺寬	成功大學航太所教授	台南市大學路1號成大航太所	Tel：(06)2757575-63686 Fax：(06)2389940
監　事	邱輝煌	成功大學航太所教授	台南市大學路一號成大航太所	Tel：(06)2757575-63695 Fax：(06)2389940
監　事	楊日昌	工業技術研究院副院長	新竹縣竹東鎮中興路四段195號工研院	Tel：(03)5916203 Fax：(03)5820212
候補監事	李聰盛	成功航太中心執行長	台南市大學路1號成大航太中心	Tel：(06)2392811 Fax：(06)2389940

●編按：本名錄中「理事長」與「常務監事」當選人係根據學會於87年4月24日在台灣大學機械系，召開之第四屆第一次理監事聯席會議選舉結果。

中華民國燃燒學會八十七年年會
第八屆燃燒科技應用研討會、第四屆熱流觀測圖片競賽
暨國科會熱流學門研究成果發表會記要

趙怡欽教授

中華民國燃燒學會八十七年年會、中華民國第八屆燃燒科技應用研討會、第四屆熱流觀測圖片競賽暨國科會熱流學門研究成果發表會，於民國八十七年三月二十、二十一日兩天在國立成功大學航空太空館舉辦。大會由成功大學航空太空系與中華民國燃燒學會主辦，國科會、教育部、經濟部工研院、國防部中科院、中鋼公司協辦。本次大會由燃燒學會理事長，國立清華大學動力機械系劉通敏教授主持，籌備委員會由成大工學院歐善惠院長與航太系邱輝煌教授分任正副主任委員，論文委員會由成大機械系林大惠教授召集。與會者共計249人，其中學生(含大學部與研究生)113人，其他各界人士136人。

此次研討會來稿經審查通過於會上發表的論文，計有燃燒科技應用論文69篇，熱流觀測圖片競賽18篇，其中由國科會專題研究計畫補助之研究成果有42篇。本次研討會論文發表共分爲八組十一場次，圖片競賽分三場次進行，內容涵蓋：內燃機、焚化與污染防治、燃燒診斷技術、工業燃燒、噴射推進、基礎燃燒與燃燒化學、燃燒理論與模擬及霧化與噴霧燃燒等不同領域。在質與量上都非常豐碩，尤其在基礎燃燒、工業燃燒、燃燒理論與模擬等主題上發表的論文數量特別多，可反映出國內燃燒研究近年的趨勢在基礎與應用上並進，而且相輔相成，相信對促進國內有關燃燒科技與應用研究風氣及對工業升級，有莫大的幫助。

時序推展二十世紀已進入尾聲，回顧過去近百年的人類文明進展，經由燃燒產生的能源，無疑是人類現代文明的主要支撐力量，燃燒科技的進展與有效的燃燒控制技術更是現代高速交通與清潔環保的關鍵。展望二十一世紀，燃燒科技的挑戰不但沒有因過去幾十年的研究而稍有減緩，反而因爲大量使用石化燃燒產生更迫切而更嚴重壓力，尤其是環保的壓力，例如氮氧化物(Nox)與二氧化碳(CO2)減量的全球公約的壓力，更使得目前燃燒科技顯得窮於應付，同時也顯現燃燒科技研究的學術交流的重要性。除全球性的環保問題外，能源問題這顆不定時炸彈的壓力，更是隨時潛藏顛覆全球經濟文明的可能，而國內近年因邁入工業社會，舊有的馬虎陋習，反映在工業安全上，所造成的衝擊，也有賴我輩燃燒專業人員共同合作應用智慧，並尋求國外先進國家與前輩的經驗，以有效助我國度過此轉型的陣痛。鑑於上述的需求，本次第八屆燃燒科技研討會特別以『二

十一世紀燃燒科技之挑戰 — 環保、能源、與工業安全』爲主題，企圖爲我國的燃燒研究在此千禧年前留下歷史見證。並配合此次研討會主題將以往與研究機構與產業界之交流活動，更進一步擴展到國際交流，象徵學會走出去加強國際化的決心，今年特別邀請日本燃燒學會理事長，東北大學Prof. T. Niioka與德國阿亨(Aachen)科技大學氣渦輪研究中心主任Prof. D. Bohn及其助手Dr. Kruger與會，作兩場專題演講，並參加產學座談提供他們的經驗與先進的作法工我們產學研各界參考。

日本燃燒學會理事長Niioka教授，係國際知名的燃燒科技專家，因其理事長身份對日本燃燒方面的研究、產業發展現況、及他自己在燃燒領域多年的經驗，由他來主講「Current Combustion Research Activities in Japan」自是最爲恰當的，他的演講明顯的提到，京都二氧化碳減量公約對燃燒科技的挑戰，唯有從更嚴格的效率要求及更嚴格的減少非效率的浪費，已經無法像以前的其他環保公約，還可以犧牲些效率來降低污染的目的，因此低污染的高效率燃燒變成一項迫切的挑戰，他也詳細說明日本現正積極研發的高溫預熱再生式燃燒(High temperature preheating regenerative combustion)科技與燃燒爐的發展近況，更提到日本整體研發推動此項科技的整體架構，我國工研院也積極參與以取得第一手資料同時同步發展令人印象深刻。

第二天上午也安排一場精彩的專題演講，由德國阿亨(Aachen)科技大學氣渦輪研究中心主任Bohn教授主講「Research and Development Activities of Combustion Technolgy for Advanced Gas Turbines」。Bohn教授在氣渦輪研究方面學有專精而且國際聞名，此次特別針對本研討會主題，針對二十一世紀先進的燃燒要求、能源多樣化的需求與環保減量，這些對未來氣渦輪燃燒系統的衝擊與目前的研發方向與活動，作了詳細的分析介紹，同時對汽電共生及各種複循環系統等各種節省能源的系統，及各種能源多樣化的燃燒方式如升值能燃燒與煤炭氣化燃燒，及其在低熱值氣渦輪燃燒系統（low heating value gas turbine system）的研發現況與活動，也有精彩的介紹，是一場相當有啓發性的演講。

除了專題演講外，第一天中午更利用午餐時間舉行產官學研座談會，與會人士共同參與交換意見集思廣益，以凝聚共識達成交流的目的，對提昇本土燃燒產業技術與燃燒科技研發提出建言。座談會由學會劉通敏理事長、中國鋼鐵公司新材料研發處處長黃重裕先生與成大航太所邱輝煌教授共同主持，針對三項主題：(一)燃燒學會國際合作交流與產業會務推展，(二)清潔燃料複循環發電技術展望，(三)先進汽電共生推廣，分別由貴賓日本Niioka教授擔任第一主題引言人，工研院能資所燃燒組張瑞進組長爲第二主題

引言人，第三主題由德國Bohn教授與Kruger博士共同擔任引言人。由於第二主題的討論可以涵蓋部份第一與第三主題的內容，所以主席特別徵得大家同意，先由引言人張瑞進博士利用投影片與書面資料，進行工研院能資所有關煤炭氣化聯合循環發電系統技術引進與規畫，以及工研院參與日本高溫再生式燃燒整合計畫引進技術的背景說明。由於討論主題切合我國邁進開發國家產業對提高能源效率、能源多樣化與環保意識抬頭的實際需求，又呼應國際對提高能源效率與環保減量的意識，三位引言人又是學術與實務俱佳，所以帶動熱烈討論氣氛，雖然語言隔閡(虧航太係邱輝煌教授以國、英、日語交叉翻譯解釋)，但大家興致很高而且都有利用此難得機會達到交流目的的共識與熱誠，所以討論到將近下午兩點，比原訂時間超出近40分鐘，因影響到下午的論文發表場次的進行，主席才不得不結束。

此次座談會達到下列幾點結論與後續工作項目：(一)中日雙方燃燒學會將以互相邀請及互相刊登研討會資料方式，鼓勵會員互相參與研討會發表論文，促進實質交流，(二)藉由工研院參與日本高溫再生式燃燒計畫的機會，擬委託學會舉辦多次講習班與研討會，並參與日本的專題研討會，目前開始籌劃預計今年11月開始第一場講習研討會，(三)利用明年第二屆亞太燃燒會議(ASPACC)在我國舉辦的機會，中日雙方代表團共同討論雙方有興趣的研究主題，以進行國際合作，(四)工研院利用煤炭氣化聯合循環發電計畫，推動整合國內在低熱值氣渦輪、二氧化碳減量、生質能燃燒等方面的研究，開放邀請學研各界共同參與，(五)加強與德國在氣渦輪與汽電共生方面的合作，不妨以召開會議開始對話方式開始。

和以往一樣此次研討會仍然有兩項競賽，開放給學生與研究者參與，一爲熱流觀測圖片競賽，一爲學生論文報告比賽。熱流觀測圖片競賽爲研討會最具特色之活動，由第一、二屆的燃燒攝影與電腦模擬圖片競賽，範圍擴展到本次第四屆涵蓋熱傳、流力、化工與防火等方面的熱流觀測圖片競賽。燃燒學會本著促進本土熱流技術提昇及經驗交流之宗旨，爲使參賽圖片之內容與技術困難度被充分瞭解，以及爲提高評審的客觀性，特將此競賽納入在本屆研討會活動中，作品分成書面與口頭審查兩項進行，計有18篇通過審查參加競賽，作品均有深度且口頭報告準備充分，可見此項競賽已深受國內相關研究人員重視。爲鼓勵學生利用研討會機會培養上台演講氣度，以及與相關學者面對面討論，增加研究的廣度與深度，學會每屆研討會均辦理學生論文報告比賽，擇優給獎，參加學生日益增多，本屆有將近35位同學參加，超過論文的半數，可見其深受重視。

一天半的研討會，從籌備聯絡、募款、論文審查、出版、現場展示、論文發表競賽、

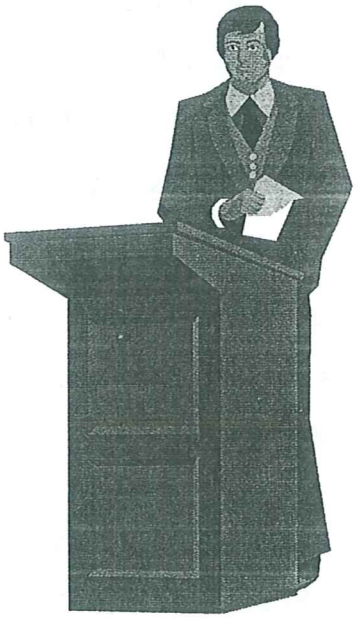
到燃燒學會年會，這一連串相當複雜的工作動員了相當多的人力，也是所有參與工作與論文發表人員的團隊合作與對燃燒學會與燃燒研究的向心力表現，在此謹向各位致上最高的敬意，我們共同在「燃燒界」歷史上留下一頁有意義的足跡。在此也特別感謝劉理事長、夏筱明教授與學會秘書處、林大惠教授與論文委員會、張克勤教授與圖片審查委員、謝文馨教授與論文競賽審查委員、籌備會副召集人邱輝煌教授、副總幹事賴維祥、李聰盛、袁曉峰等教授與韓若明秘書及各工作人員的貢獻心力與犧牲奉獻。顏瑞和教授去年主辦燃燒研討會留下完整的電腦檔案與資料，使本屆文書與管理工作進行相當順利特此致謝。

編按：讓我們再次感謝

趙怡欽教授詳盡的報導

以及

成大航太所同仁們
籌備此次盛會的辛勞！



明年等你鬥陣來喲！

中華民國燃燒學會第八屆燃燒科技應用研討會
產學研座談會記要

趙怡欽教授

時　間：民國八十七年三月二十日11：50～13：20

地　點：成大航太館5832會議室

主席團：劉理事長通敏、黃主委重裕(產業委員會)、邱主委輝煌(國際合作委員會)

引言人：日本燃燒學會理事長Niioka教授(第一主題)

工研院能資所燃燒組張瑞進組長(第二主題)

德國阿亨科技大學Bohn教授(第三主題)

討論主題：一、燃燒學會在國際雙邊合作具體方案

二、 清潔燃料複循環發電技術之展望

---煤炭氣化發電(IGCC)技術現況與推動學界參與研究

三、 先進汽電共生技術之現況與引進

主辦單位：中華民國燃燒學會、成大航空太空工程學系

聯絡人：趙怡欽、李聰盛(成大航太系)
Tel：(06)2757575-63690, Fax：(06)2389940

※此次產學座談會因有外賓參加，所以是以國、英語同時進行，爲使座談記錄內容一致，英語部份將以摘要翻譯方式記錄。

●邱主委輝煌：理事長、研討會貴賓Niioka教授、Bohn教授各位先進、各位教授、各位同學大家好！歡迎大家來參加中華民國燃燒學會所舉辦的產學研座談會，我們現在開始座談會(由於第二主題的討論可以涵蓋部份第一與第三主題的內容，所以主席特別徵得大家同意，先由引言人張瑞進博士利用投影片與書面資料，進行工研院能資所有關煤炭氣化聯合循環發電系統技術引進與規畫，以及工研院參與日本高溫再生式燃燒整合計畫引進技術的背景說明。)

●張組長瑞進：報告『煤炭氣化聯合循環發電技術引進與示範規畫—降低我國CO_2排放量策略之一』與『高溫再生式燃燒技術整合計畫』的相關背景說明。

●劉理事長通敏：張組長提到工研院執行的計畫，將來預計在北中南舉辦6場研討講習座談會，希望學會下一屆產業技術委員會主任委員能與張組長多多聯絡，

研擬如何經由學會與工研院合作來舉辦這些座談，並盼藉此使燃燒學會與工研院能資所將來能更緊密合作，共同推動國內燃燒研究與相關產學計畫的建案。此外，是否除舉辦workshop外，尚可更進一步的將一些相關計劃透過學會轉委託給最適任的教授組成團隊去執行，這在落實學會服務產業的宗旨上將更顯成效。(劉理事長同時利用此機會，宣佈新當選的第四屆理事與監事名單)

●張瑞近組長：我們也希望能subcontract計畫給燃燒學會，本人更希望能做到像剛才投影片所示國外(日本)那樣產學研有效的整合在一起，定期開會互相討論互相支援的合作情形。

●邱主委輝煌：國際合作與國際間燃燒學會的交流是我們今天座談的主題之一，除了加強各國燃燒學會開會時的相互邀訪與相互組團參加會議，以及加強刊登各國燃燒會議徵文啓事與消息外，張組長提到的產學研合作及與國外合作，可供我們思考應如何利用機會，討論出學研界均有興趣且有價值的題目與方向，並進一步訂出可行的研發題目，利用座談或國際合作機會，與國外單位就雙方需求進行國際合作與雙邊交流。趁現場有國外學者在此可否請他們講評一下。

●德國Bohn教授：首先感謝主辦單位讓我有機會參加此次深具水準的研討會，以及此一有意義的座談會，雖然我無法完全瞭解您們的談話，但從張博士的投影片資料，我可以知道你們對IGCC相當有興趣，IGCC或複循環汽電共生，配合蒸汽渦輪是相當具有未來競爭力的科技，從早上所聽到的演講與論文資料中可發現，有些國家對此科技的基礎研究相當有興趣，如貴國或日本；也有些國家在系統與應用方面有相當的成就，如美國與歐洲的德國等。因此，如果進行國際合作將會是一個相當有意義的思考方向，也比較會使合作的雙方共蒙其利。此外，若由政府當局針對能源消耗與利用以及環保問題來整合各個研究團隊，同時出面促成國際合作，例如歐洲各國的合作方式，這才是最有效的方式。

●日本Niioka教授：我個人對IGCC在日本的研究詳情並不很清楚，但若各位有興趣，我可以帶回向有關單位轉告。就我個人所知，高溫再生燃燒技術目前發展是相當成功的，但對其火焰結構與關鍵機制卻仍不甚清楚，希望能就此與貴國燃燒科技專家合作。就目前而言，研究經費流出國界有相當的困難，除非經由像NATO這樣的國際組織，但目前因我個人是NATO的審查員所以無法申請，但是保持對話是目前較可行的方法，所以就高溫燃燒舉行講習座談與研討會是最重要與最迫切可行的交流。

●德國Bohn教授：經費流動在國際合作中確是相當困難的問題，就個人經驗而言，若一個好的計畫題目且雙方都有高度興趣，則可各自從雙方政府機構尋求經費補助以負擔各自的研究，如此合作將會比較容易。在德國，我們有科技部專門負責科技合作與交流，但還是須要雙方具有共同興趣的題目，才是推動合作成功的關鍵。通常以一個Workshop開始將雙方有興趣學者集合在一處，展開討論並找出共同興趣，再各自向政府機構尋求經費以進行研究。以氣渦輪爲例，你們提到煤炭氣化發電，故可先向貴國政府部門提出你們的看法與預期成果。但對亞洲許多國家甚至歐洲國家，他們研究生質能(biomass)燃燒，因爲未來的能源取得需考慮CO_2減量問題，所以使用適當燃料以產生動力是值得考慮的課題，所以生質能燃燒的氣渦輪或汽渦輪是另一個值得考慮合作的題目。不管如何，未來高效率低污染的燃燒必定是氣渦輪加上使用清潔燃料，不管是IGCC或其他系統，將來的發電系統應是採用高效率系統，以達到節省燃料的目的。

●德國Kruger博士：我想補充一點，另一有效的交流方式是交換學生或博士後研究員，在座許多人有在外國唸書的經驗，或參加外國研究的經驗，所以交換學生是達到學習與交流的有效方法之一。

●劉理事長通敏：我補充說明一下，請各位有興趣的同仁會後可到各單位研發處或系所主任處查詢有關國內產學合作計劃的專題資料與計劃申請說明。雖然今年開始，並不非常強調計劃的整合而只強調計劃本身的有價值性，但過去幾年來大家共同推動整合的信念並沒有白廢。過去我們有一股趨勢即團結起來互補專長，今天正好可以將此合作關係應用到申請國營事業提撥的專案研究上，經由相互間的專長整合互補長短，自然可接手一些較大型的計劃，也比較能長期的獲得補助。

●邱主委輝煌：針對剛才劉理事長、張組長、Niioka教授、Bohn教授、Kruger博士的主題發言，本人試著就此提出本次座談的結論與後續工作的可行項目如下。

(一)中日雙方燃燒學會將以互相邀請及互相刊登研討會資料方式，鼓勵會員互相參與研討會發表論文，以促進實質交流。

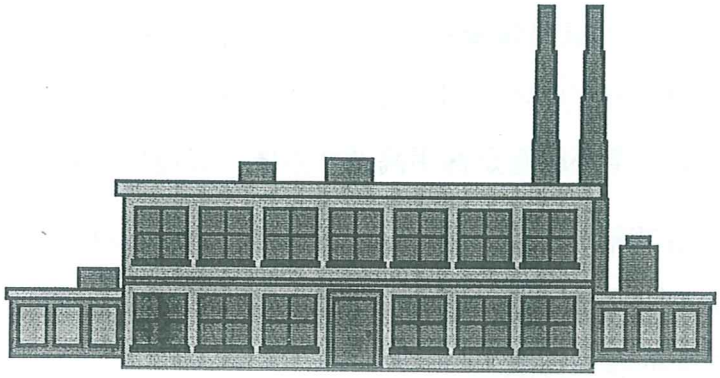
(二)藉由工研院參與日本高溫再生式燃燒計畫的機會，將委託本學會舉辦多次講習班與研討會，並參與日本的專題研討會，目前開始籌畫並預計今年11月開始第一場講習研討會。

(三)利用明年第二屆亞太燃燒會議(ASPACC)在我國舉辦的機會，中日雙方代表團共同討論雙方有興趣的研究主題，以進行國際合作。

(四)工研院利用煤炭氣化聯合循環發電計畫，推動整合國內在低熱值氣渦輪、二氧化碳減量、生質能燃燒等方面研究，並開放邀請學研界共同參與。

(五)加強與德國在氣渦輪與汽電共生方面的合作，不妨以召開會議開始對話方式開始。

最後，感謝Niioka教授、Bohn教授、Kruge博士遠道而來，提供寶貴意見，以及劉理事長和各位同仁撥空參加此次座談，本產學座談到此結束，謝謝！



中華民國燃燒學會第八屆燃燒科技應用研討會
學生親自報告論文競賽得獎名單

學會秘書處

陳聰堅	清大動機系
林佩勳	交大機研所
許紘偉	成大航太所
康裕昌	成大航太所
謝連德	成大環工所
黃祖宏	成大航太所
曾華裕	中原機械系
馬萬鈞	清大動機系
鄭兆凱	成大航太所
萬皓鵬	中原化工系
陳世輝	清大動機系
柯子星	成大環工所

以上每人獲得獎狀乙紙及獎金2,000元

(獎狀與獎金另擇期頒發)

中華民國燃燒學會第四屆熱流觀測圖片競賽
評審結果與得獎名單

學會秘書處

名次	編號	主題	作者	獎金
第一名	z-09	Flame Flickering in Nonpremixed Combustion behind a Bluff-Body Burner.	潘國隆、楊鏡堂 (清大動機系)	壹萬元
第二名	z-07	Visualization and Characteristics Studies on the Spray Pattern of Like-Doublet Impinging Jets.	黃文榮、賴維祥 江滄柳 (成大航太所)	捌仟元
第三名	z-15	Application of the Color Schlieren Technique to Supersonic Jet Flow.	尤芳忞、王必昌 (成大航太所)	陸仟元
佳作	z-13	錐型燃燒器之三維渦流火焰結構	王覺寬、劉文豪 黃建銘、楊舒然 (成大航太所)	肆仟元
佳作	z-17	雙層噴霧火焰結構觀測	龔偉揚、林大惠 (成大機械系) 侯順雄 (崑山機械系)	肆仟元

評審薦請劉理事長通敏推薦轉投稿於
Journal of Flow Visualization and Image Processing
者計有以下四篇：

1.液滴衝擊熱板及其流體動力行為之實驗觀測 (z-01)，
王建忠、張枝成(中正理工學院機械系)、宋齊有(中正理工學院航空系)。

2.Visualization and Characteristics Studies on the Spray pattern of Like-Doublet Impinging Jets (z-07)，黃文榮、賴維祥、江滄柳(成大航太所)。

3.Flame Flickering in Nonpremixed Combustion behind a Bluff-Body Burner (z-09)，
潘國隆、楊鏡堂(清大動機系)。

4.Observation of the Dense Core Region of Transient Diesel Spray Jets (z-12)，
劉中堅(成大工科系)。

中華民國燃燒學會第四屆第一次理監事聯席會議會議記錄

學會秘書處

一、時間：民國八十七年四月二十四日下午 2:00 -- 5:00 p.m.

二、地點：台灣大學工綜大樓 742 會議室

三、出席理監事：劉通敏、張克勤(王覺寬代)、黃重裕、方良吉、馬小康
趙怡欽(王覺寬代)、夏筱明、施聖洋、洪福亮、王覺寬
李聰盛(王覺寬代)、蘇玉本(梁治國代)

秘書處：夏筱明 暫代　　紀錄：蕭若蕙

四、主席致詞：第三屆劉理事長通敏

1.由於稍後議程中將選出第四屆理事長與常務監事，故本人以上屆理事長身份暫代本次會議主席，首先對各位新任理、監事的踴躍出席會議敬表歡迎，同時也藉此感謝夏秘書長這兩年來對會務的協助，特別是本次會議的籌備與暫代秘書處報告。

2.新任理、監事已於今年三月年會中改選完成(編按：名錄請參看本期會刊內頁)，其中包括：工研院能資所方良吉副所長、成大航太所趙怡欽教授、台大機械系馬小康教授、工研院能資所燃燒組張瑞進組長、中正理工學院航空系夏筱明主任、中鋼公司公用設施處洪福亮副處長、中央大學機械系施聖洋教授等新任理事，以及成大航太所邱輝煌教授、工研院楊日昌副院長、成大航太中心李聰盛執行長等新任監事。

3.對卸任的蘇評揮理事、邱遠揚理事、葉玉清理事、廖豐雄理事，以及此次中油公司與環保署的候選代表，本人建請能敦聘爲學會各工作委員會委員，同時亦盼各位理、監事能多推薦業界人士進入各委員會，使學會在產、學、研各界均有代表。

五、選舉第四屆理事長及常務監事(依照學會章程第十六條與第十八條規定，採無記名投票方式，由理、監事相互推選之，並以得票最高者當選)

選舉結果:劉通敏理事以最高票 8 票(理事總數 11 人)當選連任第四屆理事長。

王覺寬監事當選連任第四屆常務監事(與邱輝煌監事同票經抽籤決定)。

六、理事長當選感言與官防移交(略)

七、會務報告：

●秘書處

1.向新任理、監事會報告學會八十六年度工作成果。

2.向新任理監事會報告學會 86 年度資產負債與財務狀況，經與第二屆移交數額比較，除收支平衡外尚增加結餘約二萬多元，感謝各界贊助使學會得以持續成長。

●學術委員會

1.第八屆燃燒科技應用研討會，學生親自報告論文獎暨熱流觀測圖片競賽獎評審結果報告；其中熱流觀測圖片競賽獎前三名分別爲：編號 z-09,z-07,z-15 的作品，佳作兩名則爲：編號 z-13 與 z-17 的作品。

2.另依評審委員過半數推薦編號：z-01,z-07,z-09,z12 等四篇文章邀請轉投 Journal of Flow Visualization and Image Processing。

3.至於研討會學生報告論文獎則取陳聰堅等十二位。

以上得獎者詳細名錄請參閱本期會刊內頁，獎金與獎狀將由秘書處專函通知頒發。

●產業技術委員會

1.報告第八屆燃燒科技應用研討會之產官學研座談會結果與建議事項。

2.建議將本次研討會報告內容刊登於會刊中。

●國際合作委員會

1.第二屆亞太燃燒會議籌備已持續進行中，第二次 Call For Paper 正在擬稿將於近期內完成。

建議事項：(1)建議國際合作委員會設副主任委員兩名，分別由學會之北部與南部同仁中邀聘，以利各項工作之推展，特別是本學會主辦之第二屆亞太燃燒會議即將到來之際。

(2)請施聖洋理事統計今年八月將參加第 27 屆國際燃燒會議之國內各界同仁，並於組團前往時攜帶第二屆亞太燃燒會議之第二次 Call For Paper 啓事，至大會現場發放以廣參與。

●財務委員會

1.學會近期經費收支情形報告(詳見本期會刊內頁)。

2.八十七年度經費收支預算報告。

●出版委員會

1.報告預定於六月份出版之第二十三期燃燒會刊的暫定內容。

2.請各位理、監事協助持續邀稿，以維會刊水準與內容的充實。

八、提案討論：

1.案由:請討論本屆理監事會各工作委員會之組成與主委人選。

決議:理事長將於近期內徵詢各工作委員會主任委員續任意願，並授權各主委決定委員名單，於下次理監事聯席會議中提報確認。並建議各委員會設副主任委員 2~3 人以利會務推動。

2.案由:請討論本屆理監事會年度工作綱要。

決議:經第四屆理、監事會追認與修訂後，交由新任秘書長執行之。若有細節待補充時，可於本屆第二次理、監事聯席會議中報告修訂之。

九、臨時動議：

決議事項如下：

1.下次理、監事聯席會議召開時間，建議於開會當月之第三個星期五爲宜。

2.下次理、監事聯席會議建議於成大航太所開會。

3.下次理、監事聯席會議將討論第七屆年會與第九屆燃燒研討會主辦單位。

4.下次理、監事聯席會議將討論是否將第九屆研討會與亞太燃燒會議合併舉辦。

十、散會

中華民國燃燒學會經費收支一覽表

(87.02.26~87.04.24)　　財務委員會

科目摘要	金額	小計	備考
●上期結餘			
承上期結餘款	504,884		
		$504,844	
●收入			
研討會活動收入(一)	5,345		第一屆引擎性能提昇發表會結餘收入(86年12月30日前收5,000元已於上季結報，另收5,345元於本季結報)
研討會活動收入(二)	55,200		第八屆燃燒科技應用研討會年費(見次頁名錄)，報名費及超頁費收入
研討會活動贊助費	150,000		第八屆燃燒科技應用研討會工研院能資所贊助100,000元，工研院航太所贊助50,000元
零用金退還	163		蕭秘書文具零用金結餘
		$210,708	
●支出			
印製費	116,500		印製第21期與第22期會刊、學會收費收據本
郵費	133		函件、通知之寄發
事務雜支費	4,990		已領選票橡皮章乙只、理監事會議底片相片沖洗
劃撥手續費	115		各項繳費劃撥入
交通費	280		秘書處開會
		$122,018	
●本期結存		**$593,534**	

繳費徵信名錄：

林久雄	3200	劉泰康	300	張行直	300	百盈機械	300
趙怡欽	3000	劉建惟	300	張百禹	300	江滄柳	300
張一屏	3000	趙樑	300	張永利	300	朱啓生	300
周重石	3000	廖秀正	300	張文振	300	王建忠	300
林清山	600	葉建良	300	康煜昌	300	王必昌	300
鍾先民	500	葉俊賢	300	崔華祥	300	尤芳恣	300
謝長良	500	葉金龍	300	高天冀	300	大穎企業	300
蕭耀榮	500	溫昀哲	300	馬萬鈞	300	大展爐業	300
鄭景亮	500	楊其偉	300	馬小康	300	陳維新	200
蔡榮峰	500	黃耀緯	300	航承公司	300	簡聰文	100
游明輝	500	黃鎮江	300	翁凌家	300	蔡秋宏	100
陳明輝	500	黃祖宏	300	柴興生	300	蔡明達	100
張家騏	500	黃光治	300	徐挺生	300	蔡志翔	100
張子和	500	黃文榮	300	苗志銘	300	潘國隆	100
翁文炯	500	黃大松	300	范治平	300	劉昭忠	100
苗明遠	500	曾華裕	300	胡恆毓	300	葉永富	100
洪光成	500	陶超敬	300	洪銘正	300	楊禮嘉	100
李怡宣	500	陳鏡沼	300	柯旭勛	300	楊進成	100
王厚傳	500	陳聰堅	300	建成機械	300	楊宗祐	100
中鋼公司	500	陳漢錤	300	姚天鄰	300	黃柏文	100
蘭真	300	陳榮洪	300	侯順雄	300	曾庭科	100
饒勇我	300	陳瑞仁	300	邱義豐	300	陸志忠	100
羅偉誠	300	陳殷緒	300	邱瑞基	300	陳相甫	100
魏欽益	300	陳省三	300	林榮輝	300	陳冠邦	100
顏瑞和	300	陳炯曉	300	林雄發	300	陳世輝	100
闕振庚	300	陳爲銘	300	林朝輝	300	許紘瑋	100
鍾一郎	300	陳建邦	300	林佩勳	300	許安國	100
謝連德	300	陳俊達	300	林廷堯	300	柯永章	100
謝文吉	300	陳門拳	300	林存國	300	柯子星	100
薛興成	300	陳志遠	300	林正乾	300	林順華	100
戴昌賢	300	陳利強	300	沈孟燊	300	林春宏	100
賴榮傑	300	陳伸竹	300	李聰盛	300	林政學	100
蕭康寧	300	陳吉良	300	李衍德	300	林文榮	100
盧昭輝	300	陳大達	300	李明蒼	300	李新立	100
鄭兆凱	300	郭伯翔	300	李志遠	300	李峻溪	100
蔡健忠	300	梁治國	300	何燦穎	300	宋尙德	100
蔡重仁	300	張嘉淵	300	何無忌	300	吳得群	100
蔡欣倫	300	張進龍	300	何忠根	300	吳志勇	100
劉啓琳	300	張西龍	300	何宜達	300		

具震波之二維冷熱氣動流場之數值模擬

劉通敏** 黃柏文* 陳聰堅*
國立清華大學動力機械工程學系
E-mail: tmliou@tmp.nthu.edu.tw

摘要 - 本文以數值模擬的方式，計算一維震波管流場、具前向階梯之二維超音速流場及剪層之冷、熱流場。本研究採用有限體積法，配合修正型 Godunov 數值法，來求解二維守恆 Euler 及 Navier-Stokes 方程組。透過數值實驗的方式，顯示文中所採用之數值法具有捕捉氣動流場中震波、膨脹波及不連續面的能力，且能解析此些波動間交互作用下之流場結構。在剪層之冷、熱流場研究當中發現，燃燒效應會降低渦流結構之渦度，而流場中無論是膨脹波或震波之衝擊，均會造成渦流結構之增長。由熱流場之瞬時溫度場及各組成之質量分率分佈顯示，化學反應多發生於渦流結構當中。

關鍵詞：Godunov 數值法、震波管、前向階梯、剪層、渦流結構

*研究生 **指導教授

前言

近年來，由於電子計算機及數值方法之高度發展，有關高速推進系統(high-speed propulsion system)的設計，如超音速燃燒衝壓引擎(supersonic combustion ramjet)推進系統，有越來越仰賴計算流體動力學(computational fluid dynamics, CFD)之趨勢。而CFD在此等流場之應用中，則需處理極複雜的可壓縮流場，如強、弱震波(shock wave)、膨脹波(expansion wave)及不連續面(contact discontinuity)間的交互作用，甚至必須能預測當考慮燃燒效應時流場之劇烈變化。

Liou et al. [1]曾以二階準度之線性外差的方式來決定Godunov [2]數值法中，網格間原始變數(ρ、u、v、p)之初值，並配合限制技巧(limiting technique)將原本只具有一階空間準度之Godunov數值法提升為具二階空間準度之修正型Godunov數值法。

在本文中，將延續過去之研究，利用所發展之修正型Godunov數值法，針對高速推進系統所可能遭遇之具震波之冷、熱氣動流場做一探討。在本研究中，首先計算具正解(exact solution)之一維震波管流場，以驗證本數值法之時間準度及對於震波、膨脹波及不連續面的捕捉能力，然後計算具前向階梯(forward step)之二維超音速流場，以驗證本數值法對於震波、膨脹波及不連續面間交互作用下流場結構的解析能力。最後本文將研究具超音速/次音速流體組合之剪層流場中，燃燒效應對其流場結構之影響。

統御方程式及數值方法

統御方程式

二維守恆型式之 Navier-Stokes 方程組，可表示如下

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y}=0 \qquad (1)$$

其中 **Q**、**F**、**G** 為向量矩陣，對於冷流場而言 **Q**、**F**、**G** 表示如下

$$\mathbf{Q}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ e\end{bmatrix},\ \mathbf{F}=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho u^2-\tau_{xx}\\ \rho uv-\tau_{yx}\\ (e+\tau_{xx})u-\tau_{yx}v-\kappa\partial T/\partial x\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv-\tau_{xy}\\ \rho v^2-\tau_{yy}\\ (e+\tau_{yy})v-\tau_{xy}u-\kappa\partial T/\partial y\end{bmatrix} \qquad (2)$$

其中τ_{ij}為剪應力，定義為

$$\tau_{xx}=-p+2\mu\left[\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]$$

$$\tau_{yy}=-p+2\mu\left[\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right] \qquad (3)$$

$$\tau_{xy}=\tau_{yx}=\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

在理想氣體的假設下，壓力(p)與總能(e)、軸向速度(u)及橫向速度(v)有以下的關係式

$$p=(\gamma-1)\left[e-0.5\rho(u^2+v^2)\right] \qquad (4)$$

本研究在計算一維震波管及具前向階梯之二維超音速流場時將不考慮黏滯效應及熱傳效應，而在燃燒流場方面，**Q**、**F**、**G**則表示如下

$$\mathbf{Q}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho f\end{bmatrix},\ \mathbf{F}=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho u^2-\tau_{xx}\\ \rho uv-\tau_{yx}\\ \rho uf-\Gamma\partial f/\partial x\end{bmatrix}$$

*編按轉載自第八屆燒科技研討會論文集，本文為學生親自報告競賽得獎論文

$$G=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv-\tau_{xy}\\ \rho v^2-\tau_{yy}\\ \rho vf-\Gamma\partial f/\partial y\end{bmatrix} \quad (5)$$

在本研究中，燃燒模式採用無限快、單步驟(infinitely, one step)之化學反應，其混合分率定義如下

$$f=(\Phi-\Phi_a)/(\Phi_{fu}-\Phi_a) \quad (6)$$

式中變數Φ代表任何不具源項(source)或沉項(sink)的保守量，對絕熱流場而言，總焓(H)可直接由下式算得

$$H=H_a+f(H_{fu}-H_a) \quad (7)$$

而總焓的定義為

$$H=Y_{fu}H^o_{fu}+\sum_i\int_{T_0}^{\tilde{T}}Y_iCp_i dT+\frac{1}{2}(u^2+v^2) \quad (8)$$

上式中H^o_{fu}代表燃料的反應熱。首先由方程式(1)及(5)求解ρ、u、v及f，其後由方程式(7)及(8)算得溫度(T)。最後，由已知的溫度、密度(ρ)和化學組成質量分率(Y_i)，經由狀態方程式可求得壓力(p)

$$p=\rho R_u T\sum_{i=1}^{n}Y_i/W_i \quad (9)$$

數值方法

本研究所使用之方程式，係採用控制體積法，流場變數（密度、速度、總能、混合分率）均於網格中心計算，而在網格邊界（cell edge）的數值通量（numerical flux），則由修正型 Godunov 數值法來決定。Godunov 方法的基本概念乃在於將兩相鄰網格視為一震波管(shock tube)的型態，來求取 Riemann 問題的解，並以此方式架構整個差分方程式。由於採用 Riemann 問題的解，使得 Godunov 方法具有特徵線法之一般形式；Godunov 利用保守形式下之特徵線訊息，使得 Riemann 問題能伴隨時間的演進來求解，而求得之解則可用來計算網格邊界的數值通量。其中有關修正型 Godunov 數值法與原始 Godunov 數值法之細節請參考 Liou et al. [1]。

邊界條件及初始條件

於固體或滑動邊界上，設定切線速度梯度、正向速度、正向壓力及密度梯度為零。而在進口及出口的邊界條件處理上，則利用依特徵線的觀念導出之微分方程式來給定適當的ρ、u、v及p的值。在次音速進口處，有三個往下游傳遞及一個往上游傳遞的特徵量，因此給定流向、質量通量及能量通量。而超音速進口處，因有四個往下游傳遞的特徵量，因此直接給定ρ、u、v、及p之值。在次音速出口處，有一個往上游傳遞及三個往游下傳遞的特徵量，因此給定一壓力值。而在超音速出口處，有四個往下游傳遞的特徵量，因此將ρ、ρu、ρv及p的值直接外差。

在本研究中，不具化學反應之超/次音速剪層流場之初始條件係依據Elliott & Samimy [3]的實驗狀況而定，而在燃燒流場中則固定高低速流體間之密度比(ρ_2/ρ_1=0.64)、速度比(u_2/u_1=0.36)及進口壓力(1.1MPa)，並將低速側流體由空氣改為甲烷(CH_4)。而一維震波管及具前向階梯之二維超音速流場之初始條件則分別依據Sod [4]及Woodvard v& Colella [5]之數值實驗而定。

結果與討論

一維震波管流場

為驗證本數值法之時間準度及對於震波、膨脹波及不連續面之捕捉能力，在本研究中依據 Sod (1978)之數值實驗給定以下之初始條件

$$Q(x,0)=\begin{cases}Q_L, & 0\le x\le 5\\ Q_R, & 5<x\le 10\end{cases}$$

其中 Q_L=[1, 0, 2.5×10^5]，Q_R=[0.125, 0, 2.5×10^4]。

在此算例中，流場之初始密度比 R_ρ=8，壓力比 R_p=10。x=0 及 x=10 處為固體邊界，在本計算中使用 200 個均勻網格，其網格間距 Δx=0.05。圖 1 為 t=6.1×10^{-3} 時，計算所得之馬赫數(mach number)分佈，其中實線為正解，空心圓則為數值解。由圖中可以發現流場中存在著膨脹波、不連續面及震波，經由計算結果與正解之比較可以發現本數值法對於震波管內之物理現象可以合理地解析出來，亦可精確地顯現出此些波動的所在位置。

當增加震波管內流場之初始密度比(R_ρ=100)及壓力比(R_p=100)，即 Q_L=[1, 0, 2.5×10^5]，Q_R=[1×10^{-2}, 0, 2.5×10^3]時，震波管內馬赫數之最大值會提升 2.5 倍。圖 2 顯示當 t=3.9×10^{-3} 時，計算所得之馬赫數分佈，由圖中顯示當膨脹波、不連續面及震波的強度增加時，本數值法仍可合理地預測出震波管內流場之動態。

具前向階梯之二維超音速流場

為驗證本數值法對於震波、膨脹波及不連續面交互作用下流場之解析能力，在本研究中依據 Woodward & Colella [5]之數值實驗給定以下之初始條件及幾何形狀：ρ (x, y, 0)=1.4、u (x, y, 0)=3、v(x, y, 0)=0、p (x, y, 0)=1，流場的長度為 3，寬度為 1，前向階梯之高度為 0.2，距離進口處 0.6(圖 3)。在本研究中使用 240×80 之均勻網格(Δx=Δy=1/80)來計算此流場。圖 3(a)-(f)顯示 t=0.5-3(Δt=0.5)時，流場之瞬時密度場，由圖中可以發現，當流體接近前向階梯時為滿足 u=0 之邊界條件，流體之速度必須由超音速(M_a=3)減速成為次音速(M_a<1)並急速轉向，因此在階梯前緣會產生一弓形震波(bow shock)，而在階梯的尖角處則產生膨脹波，如圖 3(a)，隨著時間的演進，此弓形震波會與上壁面接觸並形成反射震波(reflected shock)，如圖 3(b)，而此反射震波會與階梯上緣接觸並形成第二個反射震波，如圖 3(c)-(e)，最後此反射震波與上壁面接觸，形成第三個反射震波(圖 3(f))。由圖 3 中可以發現此些震波之位置隨著時間的進行會自行調整，而膨脹波與反射震波間亦

會交互作用，當 t>1.5 時(圖 3(d)-(g))，為了保持流向能與上壁面平行，於上壁面處形成一垂直壁面之正震波(normal shock)，此現象稱為馬赫反射(Mach reflection)[6]，而此正震波的位置會逐漸往上游移動，當 t=4 時，剛好位於前向階梯尖角的正上方，此些暫態的物理現象，無論是震波的位置或長度均與 Woodward & Colella [5] 之數值實驗結果相符，顯示本數值法具有相當高的可靠度。圖 3(g)-(j)顯示 t=4 時流場之瞬時密度、壓力、軸向速度及橫向速度之分佈狀況，比較密度場(圖 3(g))及壓力場(圖 3(h))之分佈，可以發現流場中存在有滑動線(slip line)(x>0.6、y≈0.8，密度等位線扭曲而壓力等位線平滑之區域)，即滑動線的兩側壓力及流向相同，但是其密度、速度則並不相同(圖 3(g)-(j))。

經由本計算結果顯示，本數值法確實能精確地解析震波、膨脹波及不連續面間交互作用下之流場結構。

超音速/次音速流體組合之冷、熱剪層流場

經由以上數值實驗之驗證，證實了本研究所使用之數值法的可靠度，在此一章節中將利用本數值法來計算具震波之剪層冷、熱流場，以期瞭解高速推進系統所可能遭遇之流場結構。

圖 4 為剪層流場之示意圖，圖 5 為 t^*=4 時冷、熱剪層流場之壓力及渦度分佈狀況，其中 $t^*=t/(L/u_a)$，$u_a=0.5(u_1+u_2)$，L 為計算流場之長度。由圖中可以發現由於次音速入口處(x=0、y≤0)之壓力會隨時間變化，因而造成高、低速流體之交界面處(x=0、y=0)會有膨脹波(冷流場，圖 5(a))或震波(熱流場，圖 5(c))的出現，而此些波動則會影響流場之結構(圖 5(b)、5(d))。在冷流場中，入口處之膨脹波會由上滑動邊界反射而於 x=25 cm 附近衝擊剪層，因而造成渦流結構之增長(圖 5(b))，相對地，在熱流場中，入口處之斜震波亦會由上滑動界面反射而於 x=15 cm 附近衝擊剪層，同樣地造成渦流結構之增長(圖 5(d))。雖然冷、熱流場中，渦流結構都因波動的衝擊而有所增長，但大致而言，熱流場之渦流結構仍不如冷流場來得顯著，且其外圍輪廓亦較不規則。

圖 6 為熱剪層流場中 t^*=4 時，流場之瞬時溫度場、火焰面及各化學組成質量分率之分佈狀況。由圖 6(b)可以看出火焰面從入口處沿剪層呈波狀分佈，而流場中高溫區之分佈則相似於同一瞬時之渦流結構分佈(圖 5(d))，顯示渦流結構在流場中扮演著相當重要的角色。圖 6(c)為燃料(CH_4)之質量分率分佈，由圖中顯示燃料會被渦流結構捲入而呈舌狀分佈。圖 6(d)為氧氣(O_2)之質量分率分佈，比較同一瞬時之燃料質量分率分佈(圖 6(c))，顯示在渦流結構中氧氣與燃料間之混合並不完全。圖 6(e)-(f)為化學反應過程中，產物(二氧化碳及水蒸氣)之分佈狀況，由其分佈狀況顯示化學反應多發生在渦流結構中。

結論

本研究採用有限體積法，配合修正型Godunov數值法，來求解二維的Euler及Navier-Stokes方程組，以模擬一維震波管流場、二維具前向階梯之超音速流場及剪層之冷、熱流場。由其計算結果，可得以下結論:

1、經由數值實驗顯示，本文所採用之數值法無論是在時間準度或氣動流場結構之捕捉上均有相當高的可靠度。

2、在剪層流場中，無論是膨脹波或震波之衝擊均會造成渦流結構之增長。

3、在具化學反應之剪層流場中，渦流結構扮演著使空氣與燃料相互混合之角色，因此當熱釋放造成渦流結構之引入能力減弱時，其流體間混合之效率則隨之降低。此外，觀察反應流場中由瞬時溫度場及質量分率之分佈顯示，化學反應多發生在渦流結構中。

參考文獻

1. Liou, T. M., Lien, W. Y. and Hwang, P. W., "A Modified Godunov's Scheme for Shock Tube Flows and Turbulent Combustion Flows," *4th National Conference on Combustion Science and Technology*, The Combustion Inst. of ROC, Hsinchu, Taiwan, ROC, 1994, pp. 242-247.
2. Godunov, S. K., "A Finite Difference Method for the Numerical Computation of Discontinuous Solutions of the Equations of Fluid Dynamics," *Mat. Sbornik*, Vol. 47, 1959, pp. 271-290.
3. Elliott, G. S., and Samimy, M., "Compressibility Effects in Free Shear Layers," *Physics of Fluids A*, Vol. 2, No. 7, 1990, pp. 1231-1240.
4. Sod, G. A., "A Survey of Several Finite Difference Methods for Systems of Nonlinear Hyperbolic Conservation Laws," *Journal of Computational Physics*, Vol.27, 1978, pp. 1-31.
5. Woodward, P. and Colella, P., "The Numerical Simulation of Two-Dimensional Fluid Flow with Strong Shocks," *Journal of Computational Physics*, Vol.54, 1984, pp.115-173.
6. Saad, M. A., "Compressible Fluid Flow," pp. 339, Prentice-Hall, Inc. (1993).

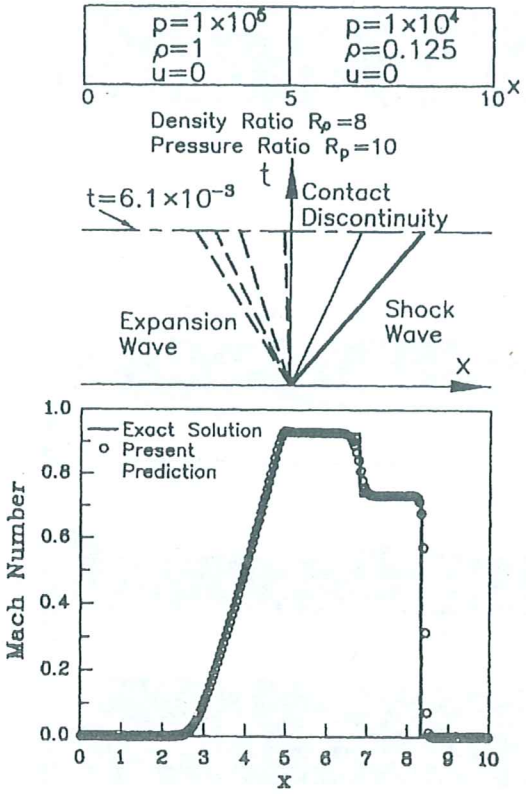


圖1　一維震波管流場之馬赫數分佈(R_ρ=8, R_p=10)

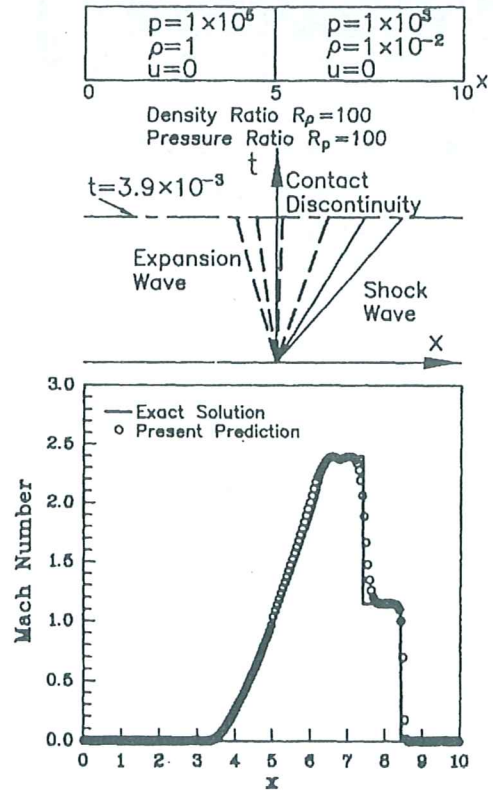


圖2　一維震波管流場之馬赫數分佈(R_ρ=100, R_p=100)

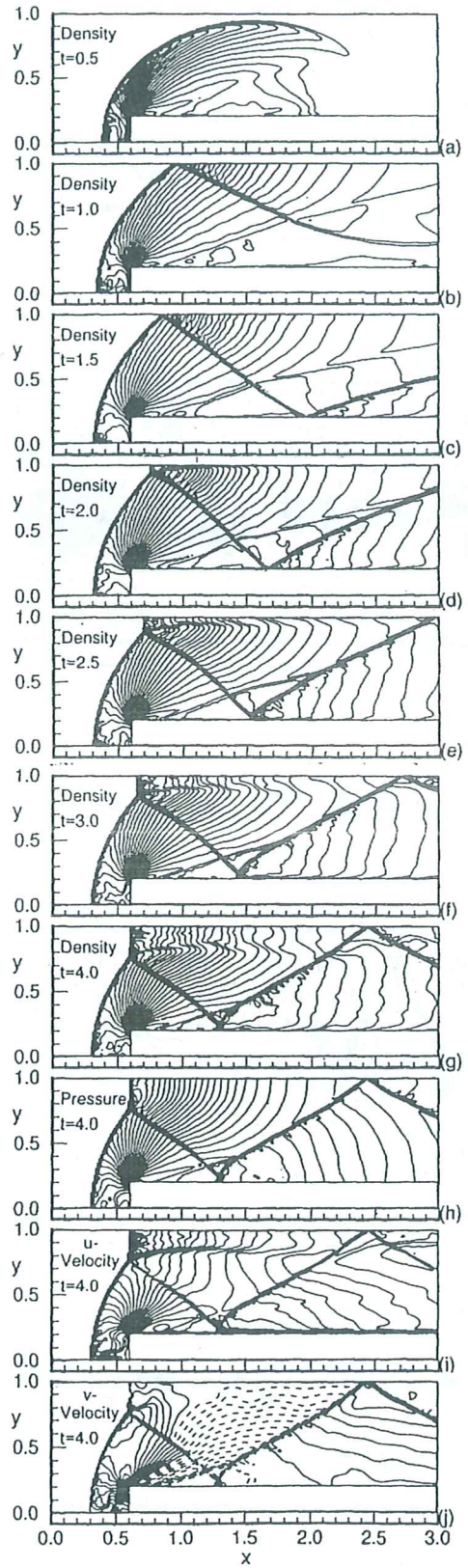


圖3　距前向階梯之二維超音速流場(a)-(f):不同時間間隔(t=0-3, Δt=0.5)之密度分佈; (g)-(j): t=4.0之密度、壓力、軸向速度橫及向速度分佈

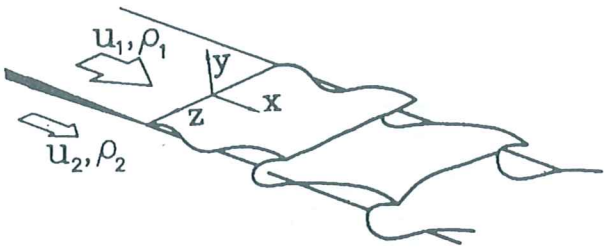


圖4　剪層流場之示意圖

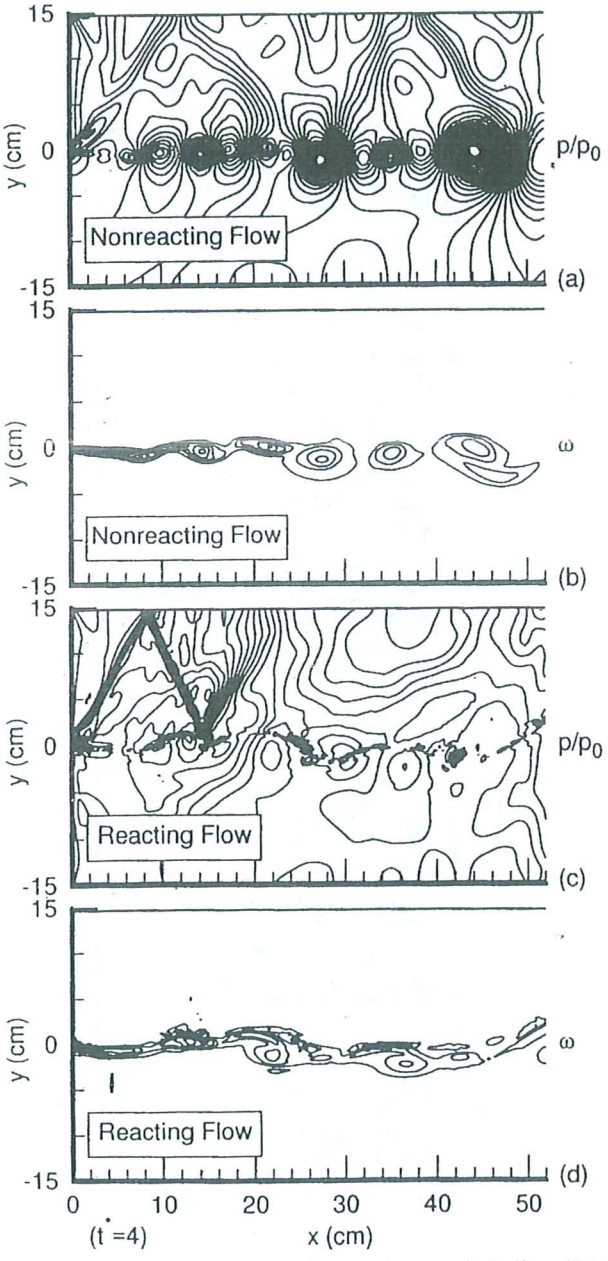


圖5　冷、熱剪層流場之壓力分佈及渦度分佈比較圖 (t^*=4)

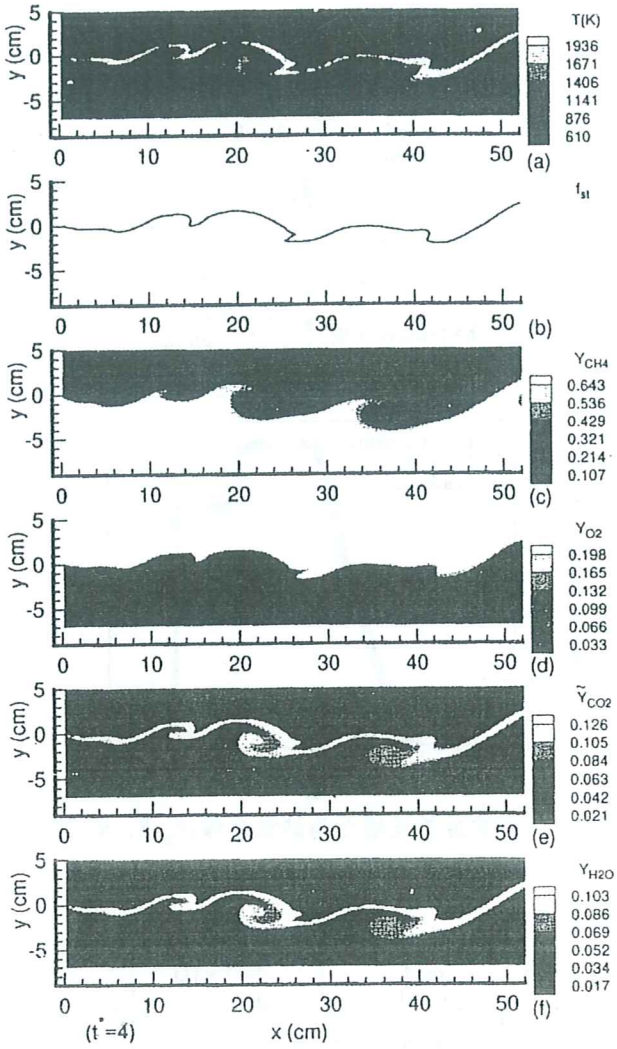


圖6　具化學反應之剪層流場性質分佈(a)溫度 (b)火焰面(c)甲烷質量分率(d)氧質量分率(e)二氧化碳質量分率 (f)水蒸汽質量分率

Numerical Simulation of Two-Dimensional Nonreacting and Reacting Gasdynamic Flows with Shocks

Tong-Miin Liou, Po-Wen Hwang
Tsung-Chein Chen
National Tsing Hua University, Hsinchu 30043, Taiwan, Republic of China

ABSTRACT

Numerical studies are presented of one-dimensional Riemann's shock tube problem, two-dimensional supersonic flow with a forward-facing step, and two-dimensional nonreacting and reacting shear flows. A finite-volume numerical technique was used to solve the Euler and Navier-Stokes equations in conservation form. Numerical fluxes across the cell edges were computed using the modified Godunov's scheme. From the results of the numerical experiments, it is shown that the numerical scheme used in the present study is capable of capturing the developments and interactions of various waves such as shock waves, expansion waves, and contact discontinuities. It is also found that the heat released from chemical reaction tends to reduce the vorticity of the vortex structures and that the impingement of the reflected shocks or expansion waves upon the shear layer enhances the growth of the roll-up vortex structures. A visualization of the instantaneous temperature and species mass fraction distributions in the reacting shear flow clearly reveals the prevalence of combustion in the growing large-scale vortices.

Numerical Analyses for Downward Flame Spread over Thin and Thick Fuels in Gravitational Field

PEI-HSUN LIN and CHIUN-HSUN CHEN

Department of Mechanical Engineering
National Chiao-Tung University
E-Mail: chchen@cc.nctu.edu.tw

Abstract

The behaviors of downward flame spread over the solid fuels of different thickness are analyzed numerically in this paper. A 2-D solid phase model is developed and coupled with the 2-D gas phase combustion model to investigate the thickness effects on flame spread characteristics and their respective controlling mechanisms under a natural convective condition. Accordingly, the parametric study is based on change of fuel thickness, varied from 1mm to 10mm. Excellent agreements are found between the numerical and related experimental results. The thickness can be categorized into four regions according to corresponding flame spread behaviors. Region (I) is the thermally-thin region (1.0mm $\leq \bar{\delta}_s <$ 1.5mm), whose flame spread rate is inversely proportional to fuel thickness. Region (II) is the transition region (1.5mm $\leq \bar{\delta}_s \leq$ 2.2mm), where the two-dimensional feature starts to become apparent. Region (III), is the thermally-thick region (2.2mm $< \bar{\delta}_s \leq$ 7mm), where the flame spread rate decreases as the fuel thickness increases but with a decreasing descendent rate. In this region, the preheat length in solid phase is found greater than that in gas phase, indicating that the solid conduction plays a crucial role for flame spread over thick fuel. We also find that the total heat flux across the half fuel thickness via solid conduction at flame leading edge is ranged from 18% to 36% of the one from gas phase ahead of the flame leading edge. In the previous two regions, this ratio is under 14%. The Region (IV) is an unstable region. ($\bar{\delta}_s \geq$ 7.5mm), where a sudden drop in flame spread rate comparing with region (III) is found. Finally, the detailed flame structures of $\bar{\delta}_s$ = 4mm in thermally-thick region are given to illustrate the interaction between the gas phase combustion and fuel pyrolysis

KEYWORDS: downward flame spread, thermally-thick , flame spread rate

Introduction

For the opposed flame spread problems, experiments[1,2] have indicated that gas phase conduction/convection heat transfer from the flame to the fuel is the main mechanism of heat transfer for downward flame spread over thermally thin cellulose fuels. As the solid fuel thickness becomes thicker, the conduction heat transfer through solid fuel to the virgin part plays a more important role[3]. However, few works are found to analyze such effect in detail. Therefore, this thesis is motivated to study the solid thickness effect on the downward flame spread characteristics.

Suzuki et al.[4] conducted a series of experiments studying the downward flame spread over different cellulose papers in a quiescent environment. The results show that the flame spreading flame behaviors as a function of fuel thickness can be divided into four types. They are thermally-thin, thermally-thick, unstable and extinction regions, respectively. An experimental study by Fernandez-Pello and Santoro[5] was made to identify the dominant mode of heat transfer in downward flame spread over the PMMA rods. The results showed that for thick fuels heat conduction through solid phase is the dominant mechanism of heat transfer, whereas gas phase heat conduction is of increasing importance as the thickness decreases. Di Blasi[3] constructed a mathematical model to simulate a downwrad flame spread phenomenon over the porous cellulose fuels. In the paper, three regimes of flame spread are established as solid fuel thickness is varied. For very thin solid ,the spread rate increases with the solid thickness. In thermally thin regime, the spread rate decreases with an increasing solid thickness. Finally, as the fuel thickness increases beyond a certain limit to reach the thermally thick regime , a constant spread rate is found. Rybanin[6] developed an analytical theory of opposed-flow flame spread over a solid fuel to discuss the relation between flame spread rate, Damköhler number and heat loss. In the article , he points out that for a sufficiently large Damköhler number in absence of heat loss, the flame spread rate does not depend on chemical kinetics. When the Damköhler Number becomes less than a given critical value , flame leading edge appears and the flame spread rate drops. When the flame leading edge is over the

*編按轉載自第八屆燒科技研討會論文集，本文為學生親自報告競賽得獎論文

pyrolysis zone, the spread rate begines to depend exponentially on the Damköhler number, and the spreading process ceases. When heat losses occur, flame can spread only for Damköhler number within a defined interval. When heat loss exceeds a given maximum value, flame spread becomes impossible. De Ris[7] developed an analytical theory and predicted that flame spread rate varies inversely with solid fuel thickness for thermally-thin fuel and is independent of solid fuel thickness for thermally-thick fuel.

In the present work, the detailed characteristics of vertically downward flame spread over a solid fuel in the gravitational field is studied numerically. The computation is carried out from thin to thick fuels under an assumption of constant flame spread rate. The computed results is compared with the experimental ones obtained from Suzuki et al.[4] first. Then, a detailed description of temperature profiles in solid-phase as a function of thickness is given to identify the respective controlling mechanism in different regions.

Mathematical Model

Since the heat-up time in solid fuel usually is much greater than the response time in gas phase, the flow field can be regarded as quasi-steady with respect to the solid pyrolysis process. Furthermore, suppose the flame spread rate, termed as $\overline{V}_f$, is constant. If the coordinate is set to travel with flame, then the flame leading edge sees a uniform flow as well as the solid-fuel bed moving toward itself with a velocity $\overline{V}_f$. Consequently, the original unsteady problem can be transferred into a steady one. Since the flame configuration is quite similar to that in Duh and Chen[8], except that both the thermally-thin and -thick solid fuels with charring part are considered in the present study. Therefore, the conservation equations and boundary conditions in gas phase used in the last reference are adopted here. They are coupled with the two-dimensional solid phase conservation equations developed in this work. The nondimensional forms of the latter equations and interface conditions are described as follows.

The assumptions for the two-dimensional solid phase model include: (1)The internal heat convection of volatiles occurs only in cross-stream (y) direction. (2)The decomposition process of material into volatiles and char is described by a Arrhenius-typed expression and it is an endothermic reaction. (3)Specific heat and thermal conductivity are assumed as constant. (4)The change in shape of the charring fuel is neglected. (5)Radiation effect is not considered.

Based on the above assumptions, the nondimensional solid phase conservation equations and boundary conditions are as follows:

Conservation of mass:

$$\frac{\partial m_s''}{\partial y} = -\left(\frac{V_f}{\tau}\right)\frac{\partial \rho_s}{\partial x}$$

$$\frac{-}{\tau}\left(\frac{A_s}{1-}\right)\left(\frac{\rho_s-\rho_{sf}}{\cdot\rho_{sf}}\right)\exp\left(-\frac{E_s}{T_s}\right) \qquad (1)$$

Conservation of energy:

$$\rho_s V_f \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{\partial m_s''}{\partial y}\cdot\tau\cdot\left[L+(1-C)(T_s-1)\right]$$

$$+\alpha_s\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}+\alpha_s\frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}-\left(C\cdot m_g''\cdot\tau\right)\frac{\partial T_s}{\partial y} \qquad (2)$$

Boundary conditions:

At $x = x_{min}$:

$$\rho_s = 1,\ T_s = 1 \qquad (3)$$

At $x = x_{max}$:

$$\rho_s = \rho_{sf},\ \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \qquad (4)$$

At the mid-plane of the solid fuel bed:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0,\ \frac{\partial T_s}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0 \qquad (5)$$

Interface condition:

$$K_s\frac{\partial T_s}{\partial y}\Big|_{y=\tau} = \mu\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=\tau} \qquad (6)$$

In addition, the flame spread rate (V_f) is obtained by the following equation:

$$V_f = \frac{-1}{1-\rho_{sf}}\int_{x_{max}}^{x_{min}}\int_0^{\tau}\frac{\partial m_s''}{\partial y}dxdy \qquad (7)$$

The numerical scheme adopts SIMPLE algorithm[9] and was presented in detail in Lin[10]. The selected optimal computational domain and grids are 170.5 x 51.0 and 125 x 60, respectively.

Results and Discussion

In the present study, the solid fuel is selected as a cellulose material. Its properties are given as follows. The solid fuel conductivity is $\overline{K}_s = 1.325 \times 10^{-3}$ W/cm K [11], the heat capacity $\overline{C}_s = 1.325$ J/g K [11], and the density $\rho_{s_\infty} = 0.28 g/cm^3$[4]. For pyrolysis reaction, the preexponential factor is $\overline{A}_s = 5 \times 10^{10}$ 1/sec [12], activation energy $\overline{E}_s = 1.396 \times 10^5$ J/mole [12], latent heat $\overline{L} = -795$ J/g [11], and the ceiling pyrolysis temperature is 700 K [3]. The properties in gas phase can be referred in references 8. The present work mainly aims at exploring the mechanism of vertically downward flame spread over the thermally-thick solid fuels. The parametric study is based on the change of solid fuel thickness, varied from 1 mm to 10 mm, and the other physical properties are fixed.

Figure 1 shows the relationship between flame spread rate and solid fuel thickness ($\overline{\delta}_s$). From Fig. 1,

we can see that the flame spread rate decreases with an increase of solid fuel thickness in general aspects. It is expected and confirmed by the experiments, such as Suzuki et al.[4]. Similar to this experimental work, depicted in Introduction section, we also classify the thickness into four regions according to each spreading flame behavior but with somewhat different definition. They are: (I) thermally-thin region, (II) transition region, (III) thermally-thick region, and (IV) unstable region.

In region (I), 1.0mm $\leq \bar{\delta}_s <$ 1.5mm, it shows that the flame spread rate is inversely proportional to the thickness, and the slope of the line passing these points is equal to -1. Consequently, the product of $\bar{\rho}_{s_\infty}$, $\bar{\delta}_s$ and $\bar{V}_f$ is nearly maintained a constant value, 1.921×10^{-4} g/mm s, obtained by averaging the values of A, B, C in Table I. It is named as the thermally-thin region, which the solid conduction heat transfer perpendicular to flame spread direction is usually assumed negligible in many numerical studies. However, the present simulation still retains this term in the 2-D solid phase model; see Eq. (2). A representing solid temperature distribution in this region can be seen in Fig. 2(a) for case A in Table I. Designate x = 0 as the location of the flame leading edge, where the fuel surface receives a maximum heat flux from gas phase. In this figure, the isothermal lines ahead of the flame leading edge are found almost invariant with y, implying that the assumption of temperature profile as a function of x only is a good approximation. Although the 2-D feature appears behind x = 0, it should not affect the flame spread behavior significantly because the controlling mechanism in such regime is forward heat transfer in gas phase[8]. The characteristics of thermally-thin fuel in the present simulation is almost coincident with the one found in the experiment of Suzuki et al.[4], which the product of $\bar{\rho}_{s_\infty}$, $\bar{\delta}_s$ and $\bar{V}_f$ is 1.9×10^{-4}g/mm s in region (1). Even for a thosition of lower bound, $\bar{\delta}_s$ = 1.5mm, for thermally-thin region, both studies are the same.

In the range of 1.5mm $\leq \bar{\delta}_s \leq$ 2.2mm (D, E, F in Table I), it is classified as region (II). The thick dashed line, corresponding to τ_c = 1.02, represents the dividing criterion of thermally-thin and thermally-thick fuels derived by Lastrina et al.[13] (it should be 1.0 in this definition). From Table I, the resultant criteria (τ_c) for each case although are still regarded as thermally-thin from the definition (less than 1.0), their flame spread rates are found to change slightly. In other words, the effect of solid fuel thickness on flame spread rate is not so apparent as that in region (I). Therefore, we define this region as a transition from thermally-thin to thermally-thick ones, because it can be seen from the solid phase temperature profiles in Figs. 2(b) and 2(c) that the two-dimensional feature starts to become obvious especially in the neighborhood of flame leading edge (x = 0).

Behind the transition region, we categorize region (III) as the thermally-thick region, complying with the criterion, $\tau_c > 1.0$, of Lastrina et al.[13]. This region covers the range of 2.2mm $< \delta_s \leq$ 7mm. In this region, the simulation results show that the flame spread rate decreases as the fuel thickness increases but with a decreasing descendent rate. Especially in the domain of 5.5mm $\leq \bar{\delta}_s \leq$ 7mm, the descendent rate reaches a minimum and the averaged value of flame spread rates of J, K, L and M in Table I is 0.19 mm/s. Check with Figs. 2(e) and 2(f), which are the solid temperature profiles for $\bar{\tau}$ = 2.75 (case J) and 3.5mm (case M), or 5.5mm $\leq \bar{\delta}_s \leq$ 7mm, we can find that the temperature profiles are quite similar each other near the flame leading edge area so that the resultant flame spread rates are expected to change slightly in this domain.

The region (2) (1.5mm $\leq \bar{\delta}_s <$ 7.5mm) defined in the work of Suzuki et al.[4] includes both region (II) and (III) in the present study. The above mentioned behaviors from simulation are observed experimentally as well in the their study. They also reported that the corresponding measurements of flame spread rate are reaching a constant value, equal to 0.2 mm/s, in the domain of 5mm $< \bar{\delta}_s <$ 7.5mm.

Region (IV) is classified as $\bar{\delta}_s \geq$ 7.5mm. Comparing with region (III), a sudden drop in flame spread rate is found between points labeled as M and N in Table I. On the other hand, Suzuki et al.[4] observed that in the range of 7.5mm $\leq \bar{\delta}_s <$ 8.4mm, defined as region (3) in their work, the flames spread becomes unstabe and the mean value of measured $\bar{V}_f$'s is 0.12 mm/s. After that, they classified a region (4) as the range of $\bar{\delta}_s >$ 8.4 mm, where the continual flame spread cannot progress any longer. In a word, the flame spread is found to take place for fuel thickness $\bar{\delta}_s$ < 8.4 mm under the natural convection environment.

The deviation between the region (IV) in the present study and the regions (3) and (4) in the experimental work of Suzuki et al.[4] are contributed to the following reasons. The first one is that the present simulation is based on a constant-flame-rate assumption, and the other is that the combustion model adopts one-step overall chemical reaction Both of them are applicable for situation away from the limiting conditions, such as ignition or extinction. Therefore, inconsistent prediction is expected as the spreading flame becomes unstable or extinction.

Figure 2 is the solid fuel temperature distributions for several specified thickness. Remind that T_s = 2.34 is the ceiling temperature for pyrolysis. Comparing with Fig. 3, which is the solid density distribution, isotherms T_s = 1.8 is more or less coincident with ρ_s = 0.99, and ρ_s = 0.10 is located between T_s = 2.30 and T_s = 2.40. Therefore, we can define the area between T_s = 1.8 and T_s = 1.1 as the

preheat zone, and charring zone starts from the mid-line between $T_s = 2.30$ and $T_s = 2.40$.

In Fig. 2, most of the isotherms are inclined from left toward right because the hot flame is propagating from right to left. For Figs. 2 (a) and 2 (b), where τ_c is less than and not close to 1.0, the major features has been discussed in the previous figure. The last isotherm $T_s = 2.40$ in Fig. 2 (a) inclines from right to left, indicating that the flame is quenched there and charring zone losses heat to the ambient. However, this phenomenon does not appear in the following cases, where the temperature increases continuous toward downstream although the pyrolysis reaction has been ceased. It indicates that the wake flame is still existed in the domain of presentation, and it keeps providing heat to the charring zone.

Figure 3 illustrates the density distributions corresponding to Fig. 2. From Fig. 3, we can classify solid fuel into three regions according to the density distribution. The pyrolysis zone is in the domain ranged from $\rho_s = 0.99$ to $\rho_s = 0.10$ (The actual char density is designed as $\rho_s = 0.07$). Similar to the definition of Suzuki et al.[4], the pyrolysis length ($\bar{i}_p$) is defined as the streamwise (x) distance between the points of $\rho_s = 0.99$ at interface and $\rho_s = 0.07$ at symmetry surface. From Table I, we can see that it increases with the increment of thickness until region IV is reached. In the meantime, the total mass flux or fuel burning rate ($\bar{\rho}_{s_\infty}\bar{\delta}_s\bar{v}_f$) has similar trend in general aspect, except the ones located on the two sides of boundary between region (II) and (III). Ahead of pyrolysis zone is the virgin fuel zone, including the preheat zone, whereas behind of it is the charring zone. In the pyrolysis zone, the energy exchange modes consist of conduction, convection, resulting from the movement of fuel bed and the fuel vapor transportation, and endothermicity due to gasification. For the other two zones, where no pyrolysis occurs, they only have conduction and convection due to fuel-bed movement.

Check with the iso-density line distributions of regions (I) and (II) in Figs. 3(a) and 3(b), we can see that part of them become more or less flat just ahead of x=0 near flame leading edge, indicating that the active burning of solid fuel seems to be laminarized locally. In front of this area, the iso-density lines, $\rho_s = 0.99$ to $\rho_s = 0.70$ appear to be somewhat perpendicular to the symmetry surface which shows the one-dimensional characteristics. As the lower bound of transition, $\bar{\tau}=1.1$mm ($\tau_c = 1.023$) in Fig. 3(c), is reached, the iso-density lines for $\rho_s \leq 0.50$ in the central part of the pyrolysis zone are initiated and ended simultaneously at the interface. In the meantime, no more one-dimensional feature appears.

Start from Fig. 3(d), the two-dimensional feature in solid fuel become more and more apparent. We can see that in thermally-thick region (III) and region (IV), $\bar{\delta}_s > 2.2$mm, all of the iso-density lines are initiated from interface and inclined toward symmetry surface. The concentration of iso-density lines at the interface near the flame leading edge (x=0) is the densest because the most active gasification occurs there. They gradually spread out inward, indicating that the pyrolysis of solid fuel becomes slower and slower away from the interface. However, it also implies that the solid fuel can be consumed completely which is quite different from the wood burning, which the pyrolysis usually is confined at a layer adjacent to the interface. The main reasons probably are that in the present study the pyrolysis kinetics is adopted from the one used for paper and the maximum half thickness used is 5mm.

Finally, a typical thermally-thick fuel is chosen to illustrate the detailed flame behaviors. Fig. 4 presents the flow field in gas phase, and the heat (q_i) and mass (m''_g) fluxes and temperature (T_s) profiles along the interface for case H ($\bar{\tau}$ = 2.0mm) in Table I. In the flow field, we can see that the flame except around the leading edge is somewhat flat because the pyrolyzed fuel is not burnt out but retained as a char. It shows a feature of premixed flame near flame leading edge served as the continuous ignition source for flame propagation, whereas the diffusion flame characteristics appears in downstream. The induced flow ahead of the flame leading edge is retarded due to the local high pressure plateau generated by thermal expansion resulting from the active combustion. After that the flow is accelerated toward downstream by this high pressure plateau.

Along the interface, the heat flux from x = -6 shows a very small negative value and it becomes zero at x = -2.63, indicating that the surface temperature is greater than the ambient one in the domain. Obviously, the preheat length in solid phase is greater than that in gas phase. This higher surface temperature is caused by energy transfer from downstream via the solid heat conduction, implying that it plays a very important role for flame spread over the thick fuel. It also can be confirmed by that the ratio of total heat flux integrated across the half thickness in solid at x= 0 to the one from gas phase integrated from x = 0 to far upstream is about 24% for this case. For region (III), this ratio is ranged from 18% ($\bar{\tau}$ = 1.5mm) to 36% ($\bar{\tau}$ = 3.5mm) in the thermally-thick region. The heat flux becomes positive after x = -2.63, and it increases quickly until reaches the maximum at x = 0. There seems a discontinuity in slope occurred around x = -1, where also is the upstream end point of mass flux. After the peak, the heat flux decreases gradually toward downstream and becomes zero at far downstream. The mass blowing initiates from x = -1, then increases sharply and reaches the maximum around x = 1.0. After that it decreases and

ceases at about x = 5, which is also the end point of ceiling pyrolysis temperature. The peak of mass flux, however, does not match the maximum one in heat flux at x =0, since the pyrolysis kinetics not only depends on temperature but also local density; see Eq. (1). From this profile, the surface pyrolysis length is ranged from x = -1 to x = 5 approximately. For surface temperature distribution, it gradually increases from far upstream until x = 0, where is flame leading edge. Then, between x = 0 and x = 5, the temperature is maintained at $T_s = 2.34$, defined as the ceiling pyrolysis temperature. This domain also corresponds to the high temperature region, T = 7, in gas phase. After that the surface temperature goes up toward the downstream but with a decreasing rate since the heat flux is decreased in the char region.

Conclusion

The effects of solid fuel thickness on flame spread characteristics under natural convection have been examined numerically. The combustion model includes both the two-dimensional gas and solid phase conservation equations and they are coupled together at the interface. The parametric study is based on the change of solid fuel thickness, varied from 1mm to 10 mm. According to the spreading flame behaviors, we categorize the thickness into four regions, which are thermally-thin, transition, thermally-thick, and unstable regions, respectively. In thermally-thin region, one dimensional feature is retained in solid fuel ahead of the flame leading edge. The flame spread rate is inversely proportion to thickness and the resultant fuel consumption rate is maintained constant. The two-dimensional characteristics starts to appear in solid and the flame spread rate changes slightly in the transition region, whose computed thickness criteria are still meet the thermally-thin one derived by Lastrina et al.[13]. In thermally-thick region, the flame spread rate decreases as fuel thickness increases but with a decreasing descendant rate. In the meantime, the solid preheat length is found greater than the gas preheat one. We also find that the total heat flux across the half fuel thickness via conduction at flame leading edge is ranged from 18% to 36% of the one from gas phase ahead of the flame leading edge in this region. In the previous two regions, this ratio is under 14%. These findings indicate that for flame spread over thick fuel the role of conduction heat transfer in solid phase becomes very important. Finally, in unstable region the flame spread rate drops dramatically from the former region. Due to the uses of constant flame spread rate and one-step overall chemical reaction assumptions, no unstable or extinction phenomena are found.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to express their appreciation for the financial support from the Engineering Division of National Research Council of Taiwan, R.O.C., under grant, NCHC-86-06-006.

Nomenclature

C	The specific heat ratio of gas mixture to solid fuel
α	Thermal diffusivity
μ	Dynamic viscosity
$\underline{\text{overhead}}$	Dimensional quantities
Subscript	
s	Solid phase
∞	Ambient condition
f	char
min	Location of upstream boundary
max	Location of downstream boundary

References

1. Hirano, T., Noreikis, S. E., and Waterman, T.E., "Postulations of flame spread mechanisms," Combust. Flame. Vol. 22, pp. 353-363 (1974)
2. Hirano, T., Noreikis, S. E., and Waterman, T.E., "Measured velocity and temperature profiles near flame spreading over a thin combustible solid," Combust. Flame. Vol. 23. pp. 83-96 (1974)
3. Di Blasi, C., "Processes of flames spreading over the surface of charring fuels: effects of the solid thickness," Combust. Flame. Vol.97, pp. 225-239 (1994)
4. Suzuki, M., Dobashi, R., and Hirano, T., "Behavior of fires spreading downward over thick paper, "Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1439-1446 (1994)
5. Fernandez-Pello, A. C.,. and Santoro, R. J., " On the dominant mode of heat transfer in downward flame spread," Seventeenth Symposium (International) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.1201-1209.(1978)
6. Sergey Rybanin, " The dependence of the flame spread rate over solid fuel on Damköhler number and heat loss," Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1487-1493.(1996)
7. De Ris, J. N., "Spread of a laminar diffusion flame," Twelfth Symposium (International) on Combustion ,The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.241-252.(1969)
8. Duh, F. C. and Chen C.H., " A theory for

downward flame spread over a thermally-thin fuel," Combust. Sci. Technol. Vol. 77, pp. 291-305 (1991)
9. Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, London, 1980.
10. Lin, Pei-Hsun, Proposal for Ph.D dissertation, Department of Mechanical Engineering, National Chiao-Tung University, Hsin Chu, Taiwan 300, 1997.
11. Di Blasi, C., "Near limit flame spread over thick fuels in a concurrent forced flow," Combust. Flame. Vol.72, pp. 205-215 (1988)
12. Jeff West and Subrata Bhattacharjee, "A comparison of the roles played by natural and forced convection in opposed-flow flame spreading," Combust. Sci. Technol. Vol. 83, pp. 233-244 (1992)
13. Lastrina, F.A., R.S., and McAlevy, R.F., III, "Flame spread over fuel beds: solid-phase energy considerations," Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.935-948 (1971)

中文摘要

本文係以數值計算解析沿熱厚型固體燃料垂直向下的火焰延燒行為。於本研究中吾人發展一二維之固相模式,並將之與過去數年針對熱薄型固體燃料向下火焰延燒所發展之氣相模式相耦合,藉以瞭解自然對流情況下,固態燃料厚度對火焰傳播特性之影響及其相關火焰延燒機制。此模式採用一隨火焰移動之相對座標,因此火焰傳播速度便成為一特徵值,並使固相方程式成為穩態。參數的變化則是針對不同固體燃料厚度(1mm 至 10mm)來作研究。研究結果顯示其與相關實驗趨勢相當吻合。

基本上向下火焰傳播速度有隨固態燃料厚度增加而減小之趨勢,就火焰傳播速度與固態燃料厚度之關係我們可以將其分為四個區域(一)熱薄型區域($1.0mm \le \bar{\delta}_s < 1.5mm$),在此區域火焰傳播速度與固態燃料厚度成反比。(二)過渡區域($1.5mm \le \bar{\delta}_s \le 2.2mm$),在此區域火焰傳播速度隨固態燃料厚度減小之關係並不如熱薄型區域般顯著,且火焰前端之二維溫度分佈逐漸形成。(三)熱厚型區域($2.2mm < \bar{\delta}_s \le 7mm$),在此區域中火焰傳播速度隨固態燃料厚度增加而減小,且其減小之比例隨固態燃料厚度增加而減小,除此之外,我們發現固相燃料之預熱區域在 y 方向較氣相為大,此結果顯示固相熱傳導在火焰傳播過程中扮演一個重要角色,另外,我們亦發現在熱厚型區域火焰前端由固相熱傳導傳遞之熱量與氣相傳給固相燃料之熱量比值介於 18%至 36%,在熱薄型區域及過渡區域則是小於 14%。(四)非穩定區域($\bar{\delta}_s \ge 7.5mm$),在此域區火焰傳播速度顯著下降,與實驗比較,此區域乃是火焰不穩定傳播的開始。最後我們針對固相燃料厚度 $\bar{\delta}_s = 4mm$ 之局部火焰結構作解析以便瞭解氣相燃燒與固相燃料裂解間之交互作用。

關鍵字:向下火焰傳播、熱厚型燃料、火焰傳播速度

Table I Parametric study

(Effect of changing solid fuel thickness)

NO.	$\bar{\tau}$ (mm)	τ_c	$\bar{V}_f$ (mm/s)	$\bar{l}_p$ (mm)	$\bar{\rho}_s\bar{\delta}_s\bar{V}_f$ (g/mm.s)	annotation
A	0.50	0.588	0.684	4.973	1.915×10^{-4}	
B	0.60	0.641	0.572	5.182	1.922×10^{-4}	Region I
C	0.70	0.697	0.491	5.182	1.925×10^{-4}	
D	0.75	0.731	0.470	5.399	1.974×10^{-4}	
E	1.00	0.961	0.457	5.626	2.559×10^{-4}	Region II
F	1.10	1.023	0.429	5.862	2.643×10^{-4}	
G	1.50	1.175	0.304	5.862	2.554×10^{-4}	
H	2.00	1.415	0.248	6.619	2.778×10^{-4}	
I	2.50	1.639	0.213	6.897	2.982×10^{-4}	
J	2.75	1.741	0.198	7.890	3.049×10^{-4}	Region III
K	3.00	1.858	0.190	8.221	3.192×10^{-4}	
L	3.25	1.989	0.185	8.843	3.367×10^{-4}	
M	3.50	2.116	0.181	8.843	3.548×10^{-4}	
N	3.75	1.816	0.116	8.567	2.436×10^{-4}	Region IV
O	5.00	2.055	0.084	8.221	2.352×10^{-4}	

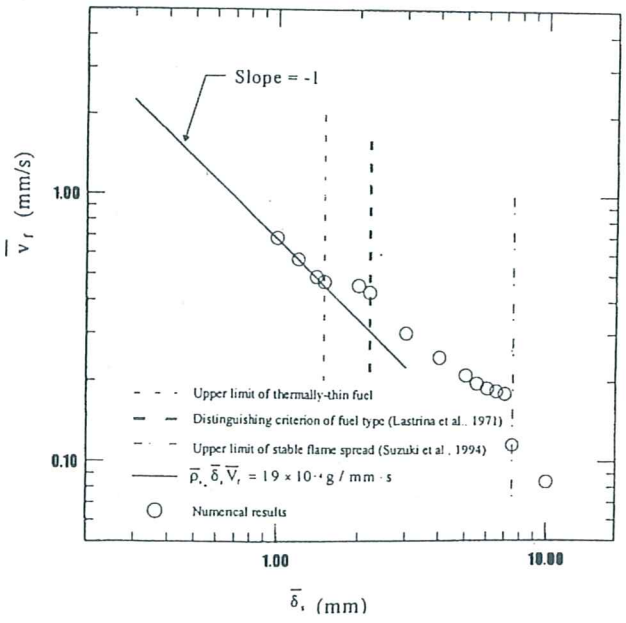
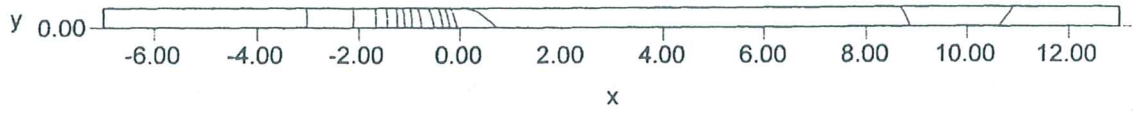
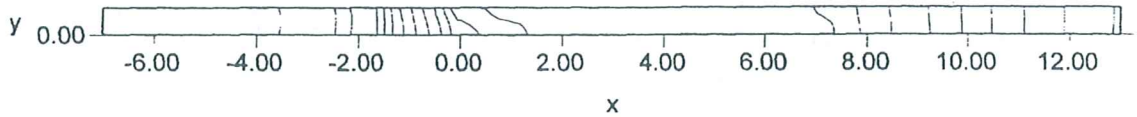


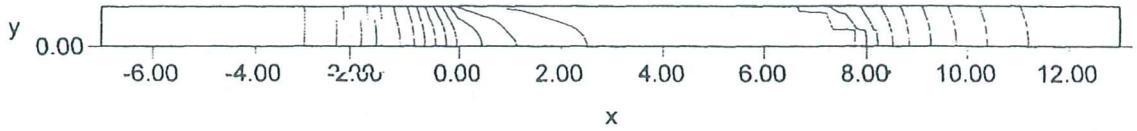
Figure 1 Flame spread rates as a function of solid fuel thickness



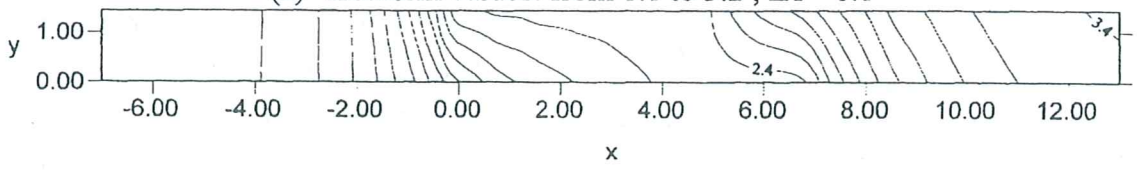
(a) Isotherm values: from 1.1 to 2.4 , ΔT= 0.1(last line :2.4)



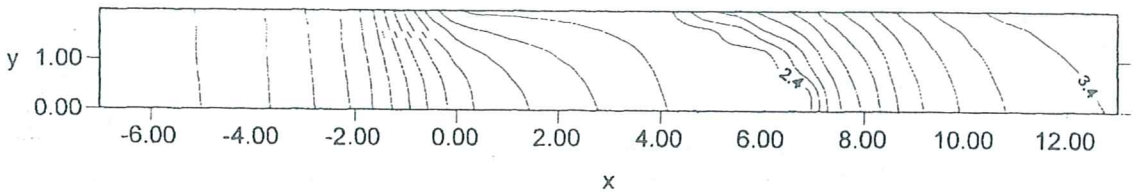
(b) Isotherm values: from 1.1 to 3.2 , ΔT= 0.1



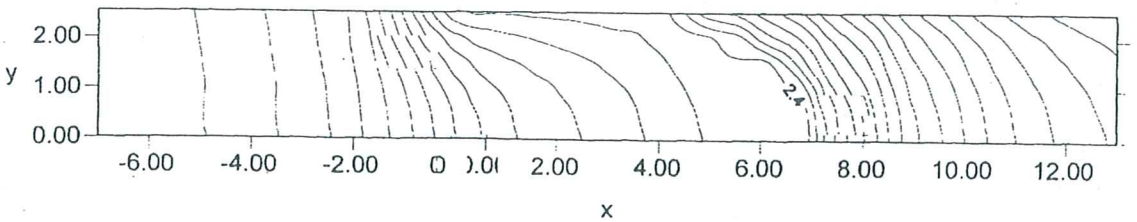
(c) Isotherm values: from 1.1 to 3.2 , ΔT= 0.1



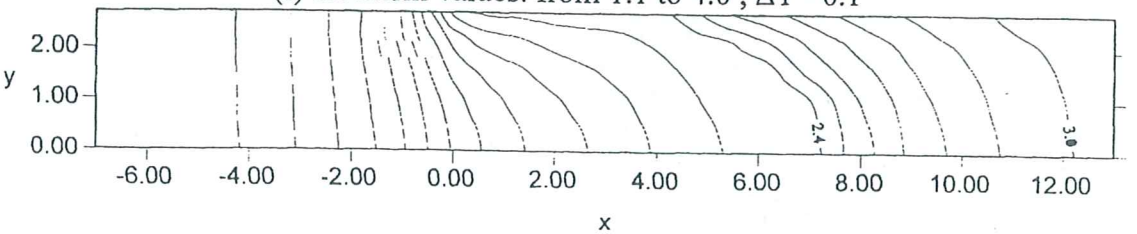
(d) Isotherm values: from 1.1 to 3.4 ,ΔT= 0.1



(e) Isotherm values: from 1.1 to 3.4 ,ΔT= 0.1

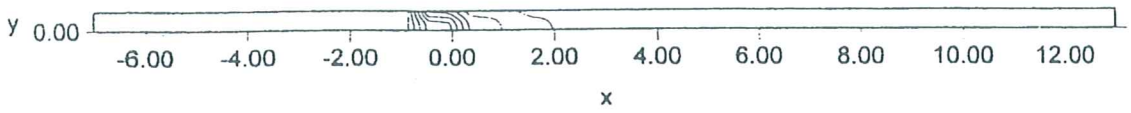


(f) Isotherm values: from 1.1 to 4.0 , ΔT= 0.1

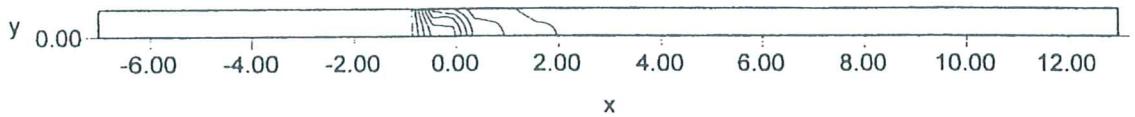


(g) Isotherm values: from 1.2 to 3.0 , ΔT= 0.1

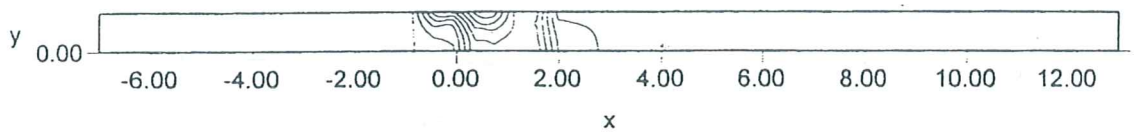
Figure 2 Solid fuel temperature distributions for (a) $\bar{\tau}$ =0.5mm, (b) $\bar{\tau}$ =0.75mm, (c) $\bar{\tau}$ =1.1mm, (d) $\bar{\tau}$ =2.0mm, (e) $\bar{\tau}$ =2.75mm, (f) $\bar{\tau}$ =3.5mm,(g) $\bar{\tau}$ =3.75mm



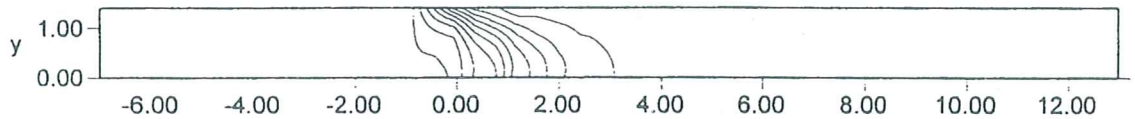
(a)Isotherm values: 0.99,0.9 to 0.1 , $\Delta\rho_s$= 0.1



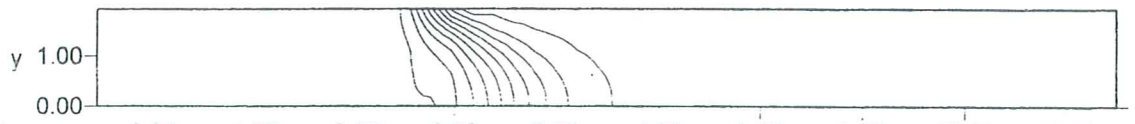
(b)Isotherm values: 0.99,0.9 to 0.1 , $\Delta\rho_s$= 0.1



(c)Isotherm values: 0.99,0.9 to 0.1 , $\Delta\rho_s$= 0.1



(d)Isotherm values: 0.99,0.9 to 0.1 , $\Delta\rho_s$= 0.1



(e)Isotherm values: 0.99,0.9 to 0.1 , $\Delta\rho_s$= 0.1

(f)Isotherm values: 0.99,0.9 to 0.1 , $\Delta\rho_s$= 0.1

(g)Isotherm values: 0.99,0.9 to 0.1 , $\Delta\rho_s$= 0.1

Figure 3 Solid fuel density distributions for (a) $\bar{\tau}$ =0.5mm, (b) $\bar{\tau}$ =0.75mm, (c) $\bar{\tau}$ =1.1mm, (d) $\bar{\tau}$ =2.0mm, (e) $\bar{\tau}$ =2.75mm, (f) $\bar{\tau}$ =3.5mm,(g) $\bar{\tau}$ =3.75mm

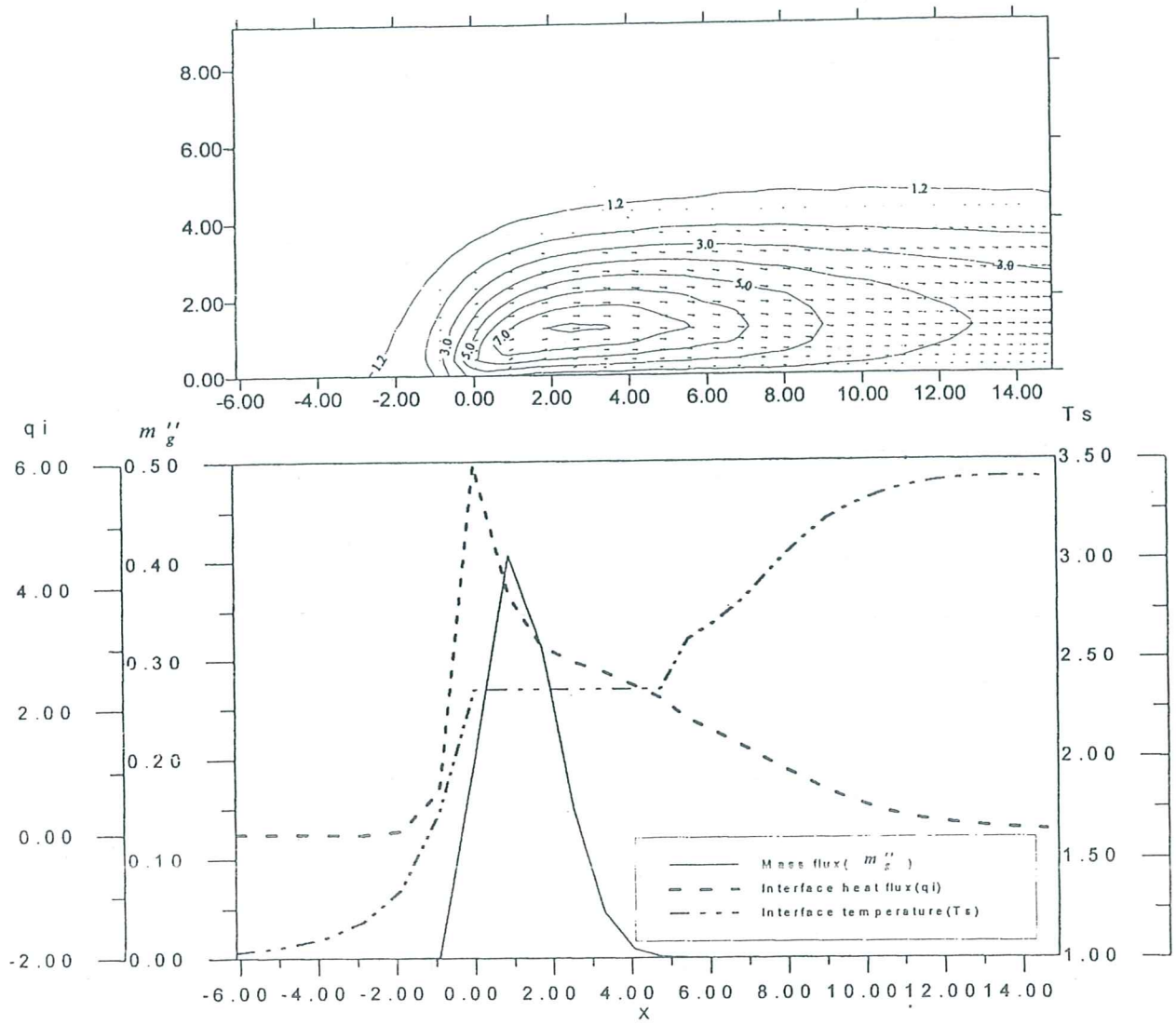
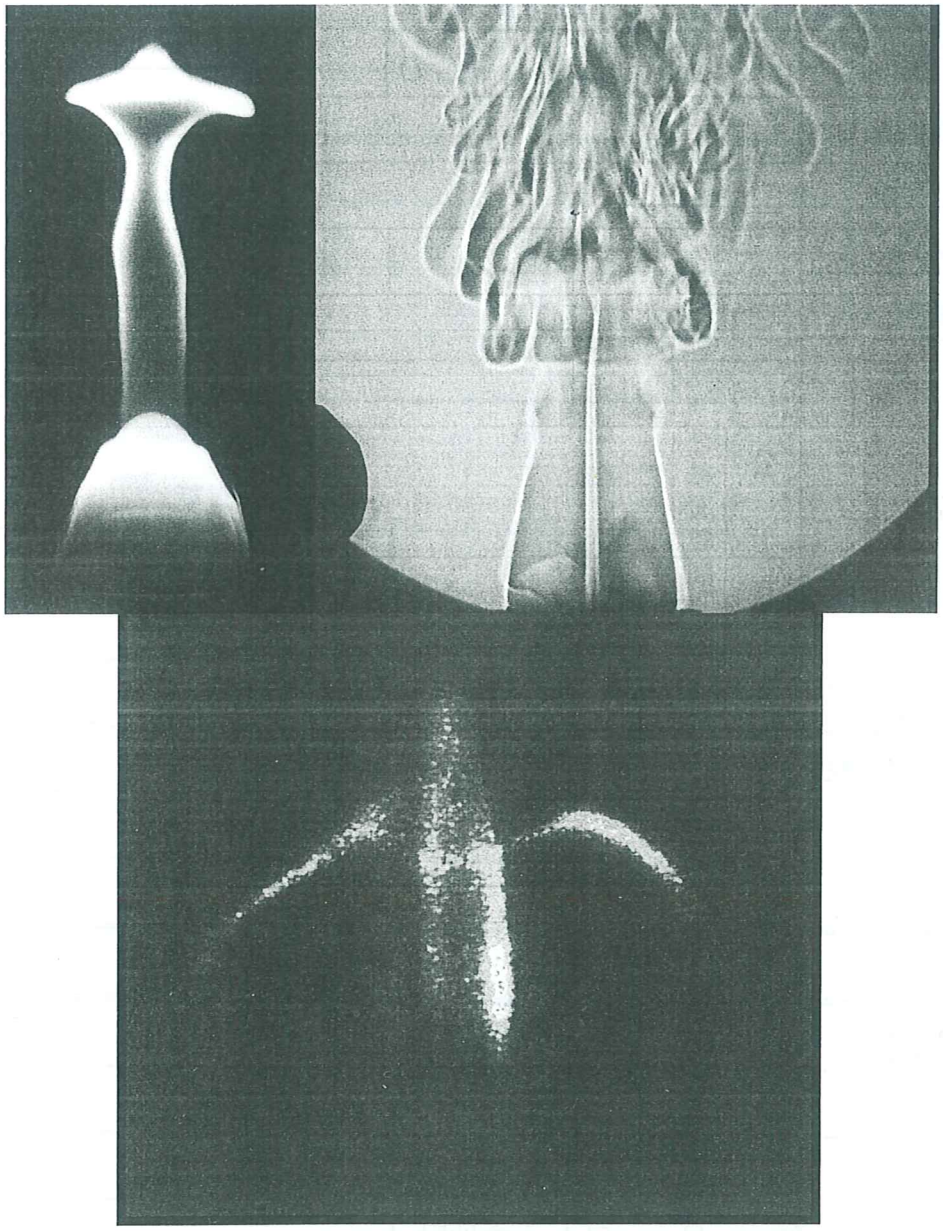


Figure 4 Flow field and interface conditions for $\bar{\tau}$ =2.0mm

封面的故事

出版委員會



編按：本學會會刊封面之圖片每年改版一次，依往例選用當年度學會舉辦之熱流觀測圖片競賽第一名作品，本年度競賽由清華大學動力機械系楊鏡堂教授與潘國隆同學之『雙噴流鈍體燃燒器的低頻火燄震盪』拔得頭籌，圖片分別由直接照相，陰影法(Shadowgraph)與平面雷射誘發螢光法(Planar Laser-Induced Fluorescence)攝得暫態火燄影像，詳細說明請參閱第八屆燃燒科技應用研討會論文集，中文摘要部份轉載如下：

Flame Flickering 是擴散火焰中常出現的一種低頻火焰震盪，這類週期現象來自於浮力效應所驅動的大尺度渦漩結構。本文所探討的測試主體，是一加入鈍體的雙噴流燃燒器，其在低速流場的燃燒行為也似純噴流火焰般會出現週期性的規則震盪，但頻率卻減小許多，且相對應的浮力引發之大尺度結構變的更加擴張。

中華民國燃燒學會個人會員入會申請表

申請日期：　年　月　日

姓名	中文： 英文：		身份證編號：
出生地	省(市)　縣(市)		
出生日期	民國　年　月　日		
性別	□男　□女		
最高學歷		畢業日期	年　月
服務單位			
職稱			
通訊處	公	電話：	
	私	電話：	
會員類別	□ 普通會員　□學生會員　□榮譽會員		
介紹人姓名	通訊處 / 電話		

以下欄位由本會填列

收表日期	年　月　日	收表編號	
通過日期	年　月　日 (第　屆第　次理事會)		
收表日期	年　月　日	收表編號	
入會日期	年　月　日	入會地點	
發證日期	年　月　日	會員證號	

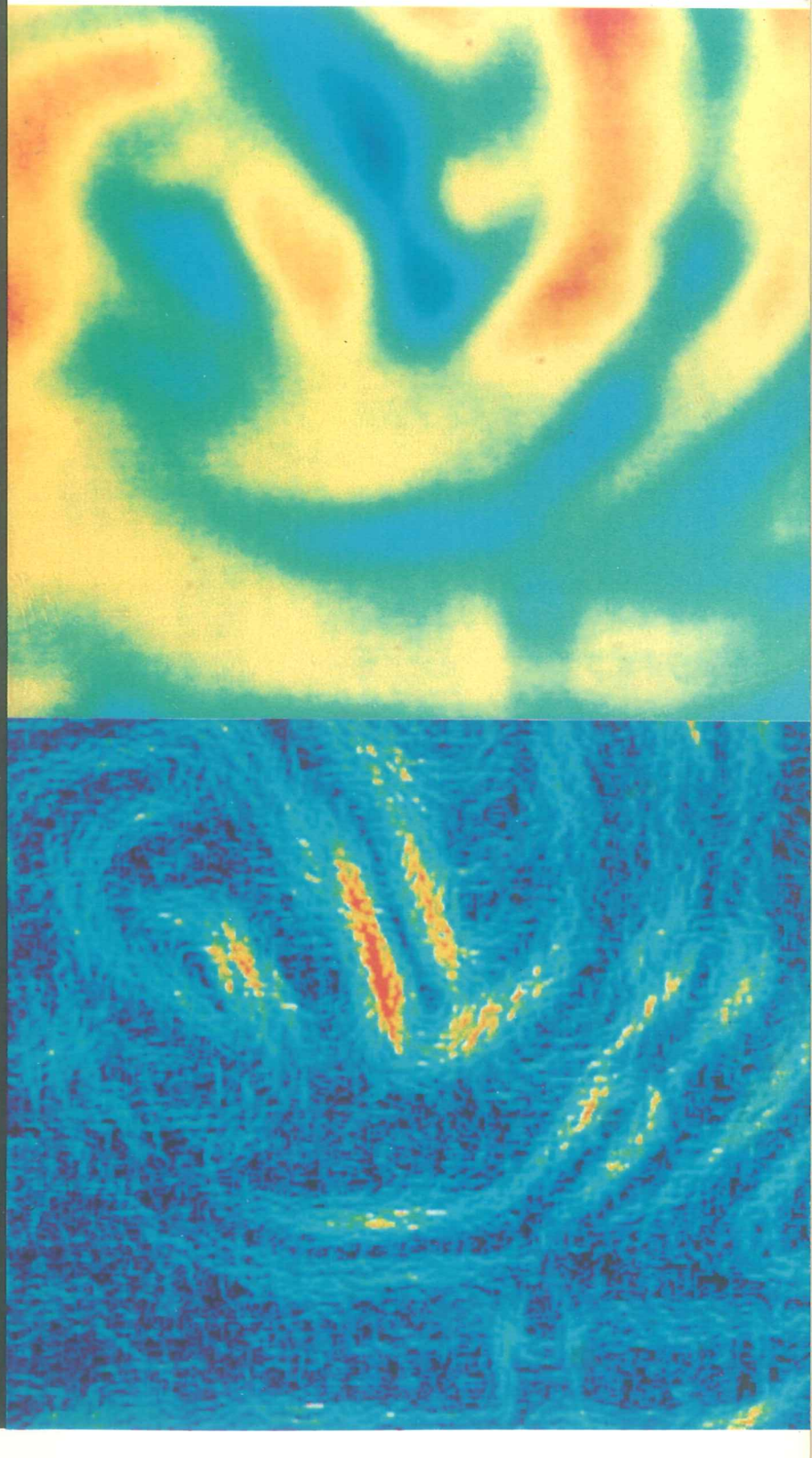
會費繳交記錄	入會費	常年會費					
		87年	88年	89年	90年	91年	92年

● 本表填妥後請逕寄：桃園大溪郵政五支第三十六號信箱「燃燒學會祕書處」收。

中華民國燃燒學會會刊
The Combustion Institute of R.O.C.

燃燒

22
中華民國 87 年 3 月



Vol.7 No.1