

工学博士辻 廣君の「火炎の構造および基礎的特性の研究」 に対する授賞審査要旨

燃焼学は、新しい推進機関の発達に伴い急速に発展した学問であり、化学、物理学、熱力学、ガス力学など多くの分野に関係する境界領域の学問である。火炎の構造や、燃焼速度、消炎限界のような火炎の基礎的特性の解明は、燃焼学発展の鍵をにぎるものとして、多大の関心を集め、実験的手法、理論解析、数値解析などによる研究が活発に行われてきた。

火炎は形成される流れの場の影響を強く受けるが、辻君は、一様な気流中に置かれた円筒の前方よどみ領域は、流れの場がよく確立されており、かつ流れが極めて安定である点に着目し、ガスの均一吹出しが可能な多孔質円筒の前方よどみ領域に形成される対向流火炎を用いて、火炎の構造や基礎的特性を調べるといふ斬新な方法を導入した。

火炎は、燃料と酸化剤が予混合された気流中に形成される予混合火炎と、燃料流と酸化剤流の境界領域に形成される拡散火炎とに大別される。辻君はまず、焼結金属製の多孔質円筒を一樣な空気流中に置き、その表面から燃料ガスを一樣に吹出した場合に形成される対向流拡散火炎についての研究に着手した。辻君は、この火炎が、化学反応速度の有限性に起因する消炎限界や、固体炭素粒子の生成に基づく黄色輝炎の発生限界の定量的評価に極めて適していることを示すとともに、詳細に測定した火炎構造（速度、温度や各化学成分濃度の分布）をもとに構造解析を行い、拡

散火炎の反応帯における熱発生率分布と各化学成分の正味の反応速度分布をはじめて明らかにし、大きな注目を集めた。これらの研究成果は、以後の拡散火炎の研究の原点として位置づけられており、また一九八三年、この火炎を対象にした「拡散火炎構造の数値解析」の国際研究集会が開催され、その際、この実験結果が、多くの研究者によって個々に行われた数値解析の妥当性の検証に用いられている。その後、辻君は、燃料や空気を不活性ガスで希釈した拡散火炎の研究を行い、拡散火炎が絶対に形成されなくなる限界燃料濃度や限界酸素濃度、黄色輝炎発生を完全に抑制できる燃料と酸素の限界濃度を精度よく求めているが、これら燃焼の基礎的特性の値は、安全工学、エネルギーの有効利用、汚染物質の排出抑制などについて極めて有用な指針を与えるものとなっている。

速度勾配のある流れ場に形成される、伸長を受けた予混合火炎の研究は、可燃限界や乱流燃焼を解明する上で極めて重要である。速度勾配のある最も単純な流れ場は、予混合気流を壁面に衝突させてできるよどみ点流れであるが、この場合形成される火炎背後の壁面は一般に触媒性をもち、かつ断熱でないため、火炎の基礎的研究には適していない。この欠点は、同じ混合比をもつ対向する予混合気流の、衝突面をはさんで形成される一对の対向流予混合火炎を利用することによって除去される。辻君はいち早くこの点に着目し、予混合気の一様気流中に置かれた多孔質円筒から、同じ混合比の予混合気を吹出すことによって、円筒の前方よどみ領域に、流速、混合比の広い範囲にわたり、安定な、一对の予混合火炎を形成させることに成功した。ついでこの型の火炎を用いて、伸長を受けた火炎の構造やふるまいに及ぼす熱伝導や拡散のような輸送特性の影響を明らかにした。すなわち、選択拡散の効果を解明するとともに、化学量論的に不足な反応体（希薄混合気では燃料、過濃混合気では酸素）の拡散係数が混合気の温度伝導率より

小なるときは、火炎温度の低下に起因して熱的消炎が発生し、逆に大なるときは、火炎がよどみ面に接近し、反応未完了に起因して化学的消炎が発生するという、熱的消炎と化学的消炎の二つの異なる消炎機構が存在することをほじめて実験的に検証し、極めて高い評価を受けた。

さらに辻君は、最近注目されるようになった部分予混合拡散火炎にまで研究を進め、燃料に少量の酸化剤を予混合するか、あるいは酸化剤に少量の燃料を予混合することによって、拡散火炎は大きい伸長を受けても消炎しにくくなり、いわゆる火炎強さが著しく増大されることを明らかにするとともに、この火炎の構造と特性を解明した。近年、乱流拡散火炎は層流の部分予混合拡散火炎片の集合体として考察されるようになっており、この研究成果は、乱流燃焼の解明に対しても重要な手掛りを与えるものである。

多孔質円筒バーナのすぐれた一つの特徴は、ブンゼンバーナと同様に、純粹の拡散火炎から予混合火炎にいたる広い混合比範囲にわたり、連続的に火炎を変化できることにあり、さらに流れの場がよく確立されているので、ブンゼンバーナよりも本質的に精度よく、また詳細に火炎の基礎的特性や構造を調べることが可能な点にある。事実これまで、辻君は、燃焼速度を測定する新しい方法を提案し、混合比の広い範囲にわたって信頼できる値を求めることを可能にした。また可燃限界をはさんで、その混合比の前後にわたって火炎の構造解析を行い、火炎が自己伝播性をもちはじめるための内部構造を明らかにした上で、可燃限界を求めるための興味ある方法を提案している。

以上のように辻君の研究は、一様な気流中に置かれた多孔質円筒の前方よどみ領域に形成される火炎の利用という、燃焼学における斬新な研究方法を駆使して、火炎の構造と基礎的特性を解明したものである。その研究成果は、既に

燃焼学の専門書や教科書に採録されており、また近年、火炎の基礎的研究においてこの新しい型の火炎が広く用いられ、その有用性が確立されるなど、同君の研究は世界の学界で極めて高い評価を受け、燃焼学の発展に著しく貢献したものと見える。

なお、以上の述べられた研究業績に対し、一九八八年、The Combustion Institute より、燃焼研究者最高の榮譽たる、二年毎に一人づつ受賞者が推薦される The Bernard Lewis Gold Medal が授与されている。

燃焼に関する主な論文

1. H. Tsuji: "Ignition and flame stabilization of stream of combustible gaseous mixtures by hot jet", Aero. Res. Inst., Univ. Tokyo, Report No. 357 (1960).
2. K. Yamazaki and H. Tsuji: "An experimental investigation on the stability of turbulent burner flames", Eighth Intern. Symp. on Combustion, Williams & Wilkins, Baltimore (1962), 543-553.
3. H. Tsuji: "Ignition and flame stabilization in the laminar boundary layer on a porous flat plate with hot gas injection", Aero. Res. Inst., Univ. Tokyo, Report No. 365 (1961).
4. H. Tsuji and T. Okano: "Flame stabilization by a bluff-body flame holder with gas ejection", Aero. Res. Inst., Univ. Tokyo, Report No. 396 (1962).
5. H. Tsuji: "An aerothermochemical analysis of erosive burning of solid propellant", Ninth Intern. Symp. on Combustion, Academic Press, New York (1963), 384-393.
6. H. Tsuji and T. Takano: "Studies of high frequency combustion oscillations in a gaseous propellant

- rocket motor", Aero. Res. Inst., Univ. Tokyo, Report No. 391 (1964).
7. H. Tsuji and T. Takeno: "An experimental investigation on high-frequency combustion oscillations", Tenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1965), 1327-1335.
 8. H. Tsuji and I. Yamaoka: "A gasdynamic analysis of the counterflow diffusion flame in the forward stagnation region of a porous cylinder", Inst. Space and Aero. Sci., Univ. Tokyo, Report No. 404 (1966).
 9. H. Tsuji and I. Yamaoka: "The counterflow diffusion flame in the forward stagnation region of a porous cylinder", Eleventh Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1967), 979-984.
 10. H. Tsuji and T. Takeno: "Propagation of pressure waves in high-frequency combustion oscillation", AIAA Journ., Vol. 6, No. 4 (1968), 730-732.
 11. H. Tsuji and I. Yamaoka: "The structure of counterflow diffusion flame in the forward stagnation region of a porous cylinder", Twelfth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1969), 997-1005.
 12. H. Tsuji and T. Hirano: "Ion-current distributions in two-dimensional nozzle burner flames at atmospheric pressure", Combustion and Flame, Vol. 15, No. 1 (1970), 47-56.
 13. H. Tsuji and I. Yamaoka: "Structure analysis of counterflow diffusion flames in the forward stagnation region of a porous cylinder", Thirteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1971), 723-731.
 14. H. Tsuji and T. Hirano: "Ion-current distributions around an electrically conductive body in ionized

- gas flow", *AIAA Journ.*, Vol. 11, No. 1 (1973), 100-102.
15. T. Hirano, H. Shiratori and H. Tsuji: "Ton current at the forward stagnation region of an electrically conducting body", *AIAA Journ.*, Vol. 11, No. 6 (1973), 887-888.
 16. H. Tsuji, T. Takeno and A. Yoshida: "A preliminary study of supersonic combustion in a vitiated air stream using transverse injection", *Inst. Space and Aero. Sci.*, Univ. Tokyo, Report No. 510 (1974).
 17. I. Yamaoka and H. Tsuji: "The structure of rich fuel-air flames in the forward stagnation region of a porous cylinder", *Fifteenth Intern. Symp. on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh (1975), 637-644.
 18. H. Tsuji and K. Matsui: "An aerothermochemical analysis of combustion of carbon in the stagnation flow", *Combustion and Flame*, Vol. 26, No. 3 (1976), 283-297.
 19. A. Yoshida and H. Tsuji: "Supersonic combustion of hydrogen in a vitiated airstream using transverse injection", *AIAA Journ.*, Vol. 15, No. 4 (1977), 463-464.
 20. A. Yoshida and H. Tsuji: "Interaction of inert and chemically reactive gaseous jets with hot supersonic flows", *Inst. Space and Aero. Sci.*, Univ. Tokyo, Report No. 548 (1977).
 21. H. Tsuji and Y. Sakai: "Studies of diffusion flame matrix burner", *Bull. JSME*, Vol. 20, No. 146 (1977), 1016-1025.
 22. I. Yamaoka and H. Tsuji: "Structure analysis of rich fuel-air flames in the forward stagnation region of a porous cylinder", *Sixteenth Intern. Symp. on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh (1977), 1145-1154.
 23. H. Tsuji and K. Matsui: "A diffusion flame formed in a low supersonic high-temperature vitiated

- oxidizer flow", *Combustion Science and Technology*, Vol. 16, Nos. 1/2 (1977), 1-10.
24. H. Tsuji, M. Hori, K. Asato and Y. Maekawa: "Mixing and NO_x formation in combustor", *Detection and Control of Environmental Pollution*, Vol. 2, *Fundamentals of Air Pollution Control Technologies*, The Ministry of Education, Science and Culture, Japan (1979), 95-100.
 25. T. Suzuki, M. Oba, T. Hirano and H. Tsuji: "An experimental study of turbulent premixed flames (Flame-structure study by measuring light-intensity distribution)", *Bull. JSME*, Vol. 22, No. 167 (1979), 848-856.
 26. T. Suzuki, T. Hirano and H. Tsuji: "Flame front movements of a turbulent premixed flame", *Seventeenth Intern. Symp. on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh (1979), 289-297.
 27. I. Yamaoka and H. Tsuji: "An experimental study of flammability limits using counterflow flames", *Seventeenth Intern. Symp. on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh (1979), 843-855.
 28. A. Yoshida and H. Tsuji: "Measurements of fluctuating temperature and velocity in a turbulent premixed flame", *Seventeenth Intern. Symp. on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh (1979), 948-956.
 29. H. Tsuji and I. Yamaoka: "Note on applicability of Fick's law for diffusion velocity in a multicomponent mixture", *Charles Kolling Research Lab.*, Department of Mechanical Engineering, Univ. Sydney, Technical Note F-92 (1979).
 30. H. Tsuji, K. Matsui and A. Makino: "Design and performance of a variably-humidified air flow supplying system", *Inst. Space and Aero. Sci.*, Univ. Tokyo, Report No. 578 (1980).
 31. S. Ishizuka and H. Tsuji: "An experimental study of effect of inert gases on extinction of laminar

- diffusion flames", Eighteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1981), 695-703.
32. H. Tsuji and I. Yamাকা: "An experimental study of extinction of near-limit flames in a stagnation flow", First Intern. Specialists Meeting of the Combustion Inst., Bordeaux, Tome I (1981), 111-116.
 33. H. Tsuji, S. Ishizuka, M. Suzuki and R. Furuta: "A study of the combustion techniques of hydrogen (limiting fuel concentrations and limiting oxygen concentrations for diffusion flames)", Research on Effective Use of Energy, Vol. 1, SPEY 1, The Ministry of Education, Science and Culture, Japan (1982), 259-266.
 34. Y. Sakai and H. Tsuji: "NO_x emission characteristics of a diffusion flame matrix burner", Bull. JSME, Vol. 25, No. 202 (1982), 606-611.
 35. H. Tsuji: "Counterflow diffusion flames", Progress in Energy and Combustion Science, Pergamon Press, Oxford, Vol. 8, No. 2 (1982), 93-119.
 36. Y. Sakai and H. Tsuji: "Studies of a diffusion flame matrix burner in a combustion chamber with heat exchanger", Bull. JSME, Vol. 26, No. 211 (1983), 102-108.
 37. K. Matsui, H. Tsuji and A. Makino: "The effects of water vapor concentration on the rate of combustion of artificial graphite in humid air flow", Combustion and Flame, Vol. 50, No. 1 (1983), 107-118.
 38. H. Tsuji: "Experimental studies of near-limit flames using counterflow flame techniques", ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Honolulu, Vol. 4 (1983), 11-19.
 39. A. Yoshida and H. Tsuji: "Characteristic scale of wrinkles in turbulent premixed flames", Nineteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1983), 401-411.

40. H. Tsuji and I. Yamaoka: "Structure and extinction of near-limit flames in a stagnation flow", Ninteenth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1983), 1533-1540.
41. K. Matsui, H. Tsuji and A. Makino: "Estimation of the relative rates of the C-O₂ and the C-H₂O reactions", CARBON, Vol. 21, No. 3 (1983), 320-321.
42. H. Tsuji: "Heat transfer in combustion", Heat Transfer in Energy Problems, Hemisphere Pub. Corp., New York (1983), 231-233.
43. J. Sato and H. Tsuji: "Extinction of premixed flames in a stagnation flow considering general Lewis number", Combustion Science and Technology, Vol. 33, Nos. 1/4 (1983), 193-205.
44. S. Ishizuka and H. Tsuji: "Effects of transport properties and flow non-uniformity on the temperature of counterflow diffusion flames", Combustion Science and Technology, Vol. 37, Nos. 3/4 (1984), 171-191.
45. H. Tsuji and I. Yamaoka: "Experimental studies of behavior and properties of near-limit flames using counterflow flame techniques", Research on Effective Use of Thermal Energy, SPEY 14, The Ministry of Education, Science and Culture, Japan (1985), 175-182.
46. A. Yoshida and H. Tsuji: "Mechanism of flame wrinkling in turbulent premixed flames", Twentieth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1985), 445-451.
47. I. Yamaoka and H. Tsuji: "Determination of burning velocity using counterflow flames", Twentieth Intern. Symp. on Combustion, The Combustion Inst., Pittsburgh (1985), 1883-1892.
48. K. Matsui, H. Tsuji and A. Makino: "A further study of the effects of water vapor concentration on the rate of combustion of artificial graphite in humid air flow", Combustion and Flame, Vol. 63, No.

- 3 (1986), 415-427.
49. H. Tsuji, I. Yamaoka and Y. Harigaya: "Use of very lean fuel-air mixtures as an oxidizer in the diffusion-flame type burning", *Research on Efficient Use of Thermal Energy*, SPEY 23, The Ministry of Education, Science and Culture, Japan (1987), 103-108.
 50. K. Matsui and H. Tsuji: "An aerothermochemical analysis of solid carbon combustion in the stagnation flow accompanied by homogeneous CO oxidation", *Combustion and Flame*, Vol. 70, No. 1 (1987), 79-99.
 51. I. Yamaoka, H. Tsuji and Y. Harigaya: "Extinction and structure of methane/very lean methane-air counterflow diffusion flames", *Twenty-first Intern. Symp. on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh (1988), 1837-1843.
 52. I. Yamaoka and H. Tsuji: "Extinction of near-stoichiometric flames diluted with nitrogen in a stagnation flow", *Twenty-second Intern. Symp. on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh (1989), 1565-1572.