

水蒸気発生のための水素-酸素水中燃焼特性

熊倉 孝尚

船舶技術研究所機関動力部
181-0004 三鷹市新川 6-38-1

Characteristics of Stoichiometric H₂-O₂ Combustion in Water for Generating Steam

Takanao KUMAKURA
Ship Research Institute
6-38-1 Shinkawa, Mitaka181

The stoichiometric H₂-O₂ combustion in liquid water and that in steam are to be used for generation of superheated steam, in turn to drive an internal combustion steam turbine. The purpose of this work is to investigate the fundamental characteristics of the stoichiometric H₂-O₂ combustion in liquid water for generating steam. Experiments both with a premixing and with a diffusion burner were carried out in a water tank under the atmospheric pressure. The temperature of the water was changed from room temperature to saturated temperature. In the water at the room temperature, the premixing burner obtained a high level(99.86%) of the combustion efficiency at stoichiometry of the supplied gas, but showed occasional flashbacks. In contrast the diffusion burner maintained stable combustion, but the combustion efficiency was lowed. By using partially premixing gases, the efficiency was improved to the level of the premixing burner, while the flames were kept stable. The influence of temperature of the water on the combustion characteristics is also presented.

Key words: combustion in water, premixed combustion, diffusion combustion, flame stability

1. はじめに

水素はポスト化石燃料のエネルギー源として注目され、水素エネルギーの熱機関への利用については各方面で検討されている[1], [2]。当研究所では水素の利用の一つとして内燃式蒸気タービンサイクルを提案した[3]。このサイクルでは酸水素の量論比燃焼による蒸気発生を基本にしている。その蒸気発生は酸水素燃焼を直接水雰囲気あるいは蒸気雰囲気中で行う方式をとっており、その際の燃焼特性を把握するための基礎技術の研究を行った。本稿は、大気圧下の中燃焼試験を通して、水素の安定燃焼と完全燃焼へのアプローチを行い、その結果をまとめたものである[4], [5]。

2. 酸水素内燃式蒸気タービンサイクルの特徴

本機関は作動流体（水/水蒸気）中で化学量論比の酸素と水素を燃焼させて発生した熱を直接作動流体に与えて蒸気を得、燃焼生成物に相当する量の水を復水して系外に放出することを基本条件とする密閉サイクル機関である（図1）。化学量論比の酸素水素燃焼反応は環境汚染物質を伴わず常温で液体にできるため、圧縮仕事あるいは燃焼生成物の貯留の面で有利である。

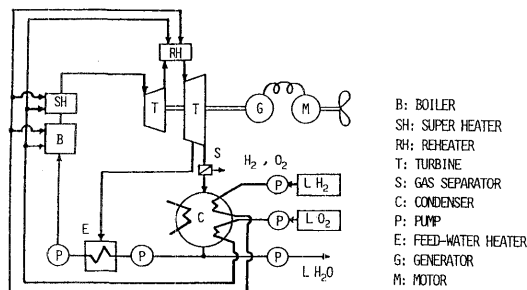


図1 酸水素内燃式蒸気タービンサイクル

3. 酸素水中燃焼の基礎実験

図1中のBで、復水器から送られた水を加熱するために、水霧用気中で酸素水を燃焼させることを基本としている。ここでは化学量論比の酸素水素ガスが安定にかつ完全に燃焼反応することが必須である。実験では、直径600mm、高さ900mmの円筒形の水タンクを用いて水中で燃焼を行った。

4. 実験方法

水中での燃焼の安定性および燃焼特性を求めるために使用したバーナは単孔ノズル方式で、予混合および拡散燃焼が可能な流路構成をしている(図2)。予混合の場合、6本に分流した予混合ガスを合流した。拡散燃焼の場合、同軸噴流で中央ノズルから水素、周囲から酸素を流した。本実験では予め空気中でガスに着火後、条件を設定してバーナを水中に没するという方法をとった。従ってノズルから形成される火炎は下向きである。また、水中での失火防止に円筒形のフードが必要なことを予備実験で確認した。即ち、水中燃焼には火炎保持のために一定の空間が必要である。本実験ではフードがその役割を果たしている。なお、ノズルおよびフードの材質は銅で、大気中の着火時には外面を水冷している。

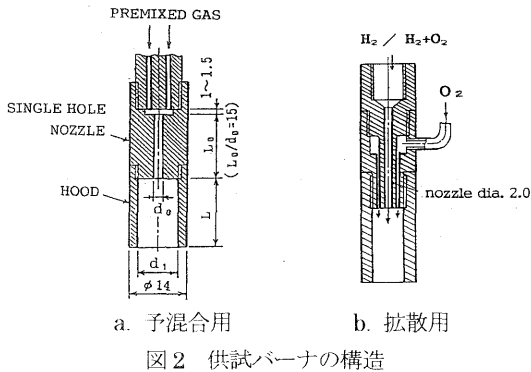


図2 供試バーナの構造

5. 水中燃焼の安定性

5.1 予混合燃焼時の場合

水素の燃焼速度が極めて速いため外乱がトリガーとなり逆火を起こしやすいことが予測される。そこで、ノズルとフード寸法および作動条件を変えて燃焼の安定性を調べた。なお、使用したバーナは空気中では逆火を起こ

さず安定に燃焼することを確認している。水中での燃焼場はフードと生成した蒸気泡に囲まれた狭い空間、しかもその空間は閉空間である。蒸気泡の発形成態は種々のタイプがあり、その形態(Type A,B,C)を図3に示す。タイプAは気泡の成長・離脱が規則的であり、Bはその規則的な周期に乱れがあるタイプ、Cは微細な気泡がジェット状に発生するタイプである。

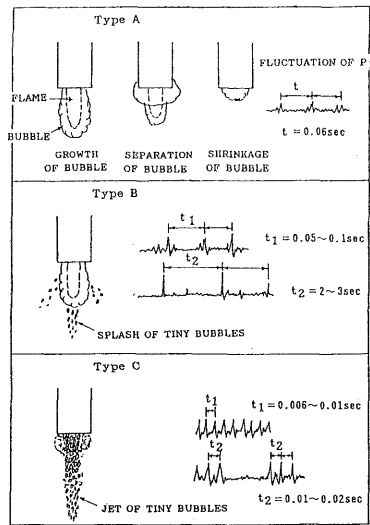


図3 気泡の発形成態と圧力変動周期

このような燃焼場では予混合の場合、逆火がしばしば観察された。逆火は燃焼中突然発生することが多く、その発生メカニズムは次のようである。水中燃焼で生成した蒸気は気泡となる。その気泡の生成形態はフードを含めたバーナノズルの幾何学的寸法とガス速度によって変わる。生成気泡のバブリングやパフィンングはその周期と大きさにより、ノズル出口の火炎前縁位置およびノズル内のガス圧力に変動を与えることがわかった。逆火時の代表的な逆火過程を図4に示す。この図でF2、F3は光ファイバーを通してフォトダイオードで逆火を検知したときの火炎強度を示し、ΔP1はノズル上流部のP1位置の圧力変化を示す。ここではF1まで火炎が遡ったときを逆火と定義した。逆火時にはP1位置の圧力が急増する。そのときノズル出口直後のF3位置の火炎強度が急に強くなる。これは火炎前縁がノズルに近づいたことを示している。その後ノズル内F2位置で火炎が検出された。ノズルに入った火炎が遡りF1に達する時間はノズル内壁の状態(酸化皮膜の汚れ等)でかなりばらつくことが観察された(壁面の汚れの少ないとき0.06~0.16ms、多いとき

0.99~4.43ms)。

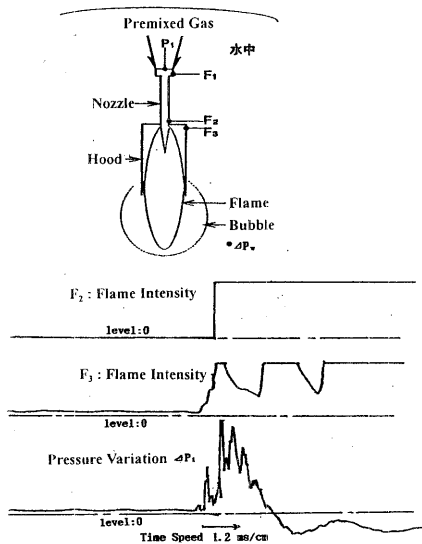


図4 逆火時のノズル内の圧力変動と火炎の動き

逆火の発生の仕方はガス流速、当量比、寸法や寸法比により異なり、また同一条件でも逆火の発生頻度が異なるため、統計的処理で燃焼の安定性を整理した。処理の方法の詳細はここでは述べないが、安定性を3つの領域に分けた。図5は当量比=1.02、水素流量 21 l/min に設定したときの安定域を示す。気泡の発生形態が図4に示したタイプAの場合に最も安定な燃焼をしている。この図からフードの長さとの内径比が 2.5 以下では安定な燃焼が保持されない。

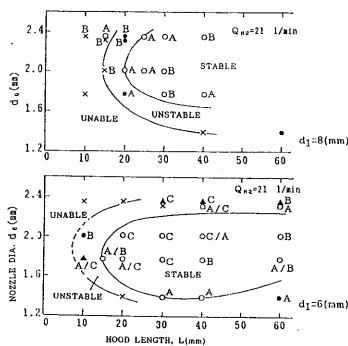


図5 予混合燃焼時の燃焼安定域

5. 2 拡散燃焼時の場合

拡散燃焼では本質的に逆火は起こらないが、フードの長さが 10mm 以下では失火することが分った。

6. ガス分析法による燃焼特性の整理

残存水素および酸素を採取し分析する場合、図6に示すように水タンク内のノズルを蓋うようにガス貯めをかぶせ、その中に一定流量の窒素を供給し一様混合して蒸気を含む混合ガスとして外部に放出するようにしている。その放出の途中でガスを採取した。採取したガスはそれに含まれる水蒸気を除湿器より約 3°C の露点まで除湿し、ドライガスとして分析計へ導入した。分析計はガスクロマトグラフを用いた。従って残存水素および酸素の濃度は窒素をベースとしたものとして表わすことができる。

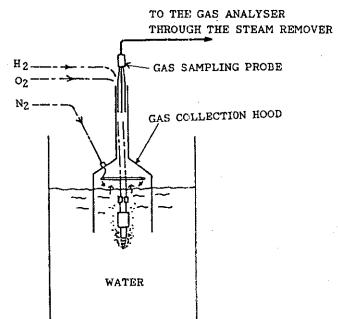


図6 ガス採取法

水素濃度を C_{H_2} 、酸素濃度を C_{O_2} (いずれもドライガスの体積濃度)、また供給した窒素を Q_{N_2} (標準状態の体積流量) とすると、水素 Q_{H_2} 、および酸素 Q_{O_2} (いずれも標準状態の体積流量) を供給して燃焼したときに生じた未燃水素量 Q_{H_2}' および残存酸素量 Q_{O_2}' (いずれも標準状態の体積流量) は次式で示される。

$$Q_{H_2}' = C_{H_2}(Q_{H_2}' + Q_{O_2}' + Q_{N_2}) \tag{1}$$

$$Q_{O_2}' = C_{O_2}(Q_{H_2}' + Q_{O_2}' + Q_{N_2}) \tag{2}$$

両式を整理すると

$$Q_{H_2}' = C_{H_2} Q_{N_2} / (1 - C_{H_2} - C_{O_2}) \tag{3}$$

$$Q_{O_2}' = C_{O_2} Q_{N_2} / (1 - C_{H_2} - C_{O_2}) \tag{4}$$

水素の燃焼効率 η_{H_2} を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \eta_{H_2} &= 1 - (\text{未燃水素量} / \text{供給水素量}) \\ &= 1 - (Q_{H_2}' / Q_{H_2}) \end{aligned} \tag{5}$$

上式(3)を使って整理すると

$$\eta_{H_2} = 1 - [C_{H_2} / (1 - C_{H_2} - C_{O_2})] (Q_{N_2} / Q_{H_2}) \tag{6}$$

なお、当量比 $\phi > 1$ では酸素不足のため燃焼効率は ϕ の増加と共に減少する。その理論的上限は次式となる。

$$\eta_{H2} = 1/\phi \quad (7)$$

ここで当量比 ϕ は次式で定義した。

$$\phi = Q_{H2} / 2 Q_{O2} \quad (8)$$

当量比の正確な設定は流量計の精度上不可能なので、当量比の算出は流量計の読み値のみで求めるよりも精度が 10 倍以上高く見こめる残存ガス分析法を導入して算出した。当量比 ϕ の算定式を式(9)に示す。

$$1/\phi = 1 - [(C_{H2} - 2 C_{O2}) / (1 - C_{H2} - C_{O2})] (Q_{N2} / Q_{H2}) \quad (9)$$

当量比が 1 に近いほど残存ガス濃度が小さくなり式(9)の算出精度は高くなる。

なお、燃焼特性は化学量論比を挟んだ領域 (0.9~1.1) にわたって、当量比による影響をみることにした。

7. 実験結果

7. 1 室温水中における燃焼効率

1) 予混合燃焼時の燃焼効率

図 7 に予混合燃焼時の燃焼効率を示す。量論比で 99.86% となり、ほぼ完全燃焼している。同図で $\phi > 1$ に示されている点線は理論上得られる燃焼効率線である。予混合燃焼の場合、 ϕ に対する燃焼効率はノズルやフードの寸法、ガス流速に対する依存性がないといえる。即ち酸水素燃焼は反応律速であり、その反応速度は速く、本実験で採用した条件の影響は現れない。

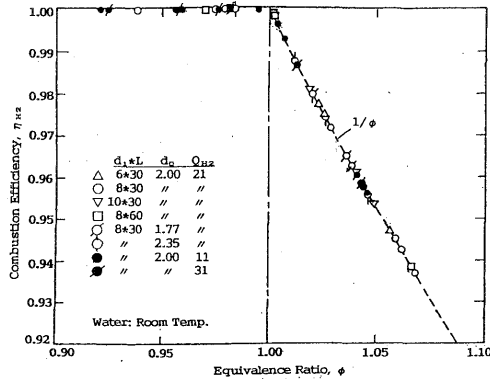


図 7 予混合時の燃焼効率

2) 拡散燃焼時の燃焼効率

拡散燃焼法ではその機構上逆火は起きないが、水素および酸素がノズルを出た後で混合しつつ燃焼するという形態であるため、この燃焼では混合が律速となり、しか

も水中ではフード内の空間と蒸気泡に包まれた狭い空間でしか燃焼場がないため、不完全燃焼しやすいことが予測される。拡散燃焼の燃焼効率はガス流速、フード寸法の依存性が強く、実験した範囲では量論比で 98~99% と予混合燃焼に比べ低く水素は完全に燃焼していない。図 8 はフード寸法による影響の例である。

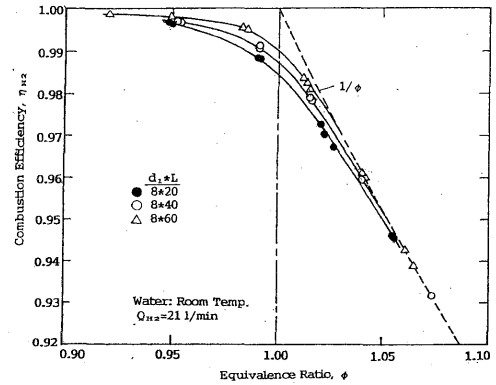


図 8 拡散燃焼時の燃焼効率

7. 2 安定燃焼と完全燃焼へのアプローチ

安定燃焼が保たれ、かつ完全燃焼に近い燃焼効率を得られる燃焼法として、拡散混合燃焼と予混合燃焼の利点を組み合わせる方法を試みた。即ち、拡散燃焼の安定性と予混合燃焼の完全燃焼の両立である。これは拡散燃焼用の酸素の一部を予混合に使うもので部分予混合燃焼とも称される燃焼法である。標準寸法としてノズル径 2mm、フード内径 8mm、長さ 60mm を用いた。中心ノズル出口のガス噴流速度は常温で最大約 100m/s である。

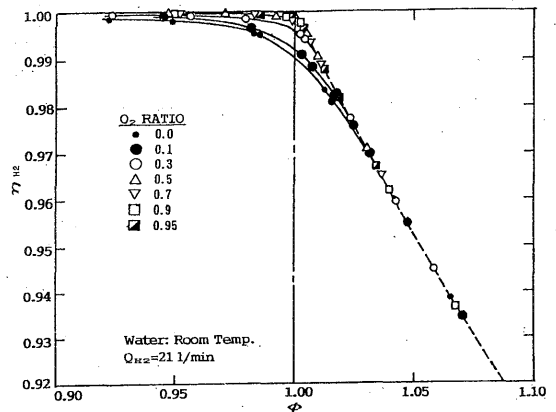


図 9 部分予混合燃焼時の燃焼効率

水温が室温の場合、予混合酸素比が 95% (拡散に使う酸素比は 5%) までは燃焼の安定性は保たれ、かつ予混合

比を50%以上にすれば燃焼効率は完全予混合燃焼と同等の値が得られた。図9にその結果を示す。

7. 3 燃焼効率に及ぼす水温の影響

予混合酸素比50%で、水温の影響を調べた。図10はその結果である。燃焼効率は水温の影響を受け、水温が上昇すると燃焼効率は低下する。飽和温度の100°Cで98.7%まで低下した。考えられる要因は生成する気泡中の水蒸気の凝縮速度があげられる。図11に室温と飽和温中の生成気泡の状態を示す。室温では、生成した水蒸気は急速に凝縮しながら微細化してノズルからすく離脱するため、燃焼反応の進行が阻害されないと考えられる。これに対し、水温が上昇すると生成蒸気の凝縮が遅れ蒸気分圧が高い状態となり、燃焼反応の進行が押さえられるものと考えられる。気泡の成長・離脱は間欠的であり、離脱した気泡内に存在する燃焼途中のガスがクエンチされ、反応が未完のままになると理解される。

燃焼効率が低下することは未反応で残るガスが増えることであり、水素、酸素それぞれの残存ガス量を供給ガス量に対する比で表わすと図12のようになる。

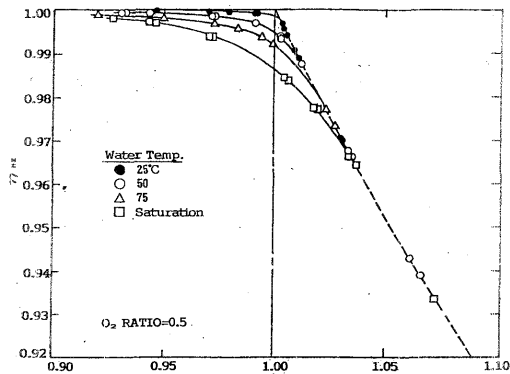


図10 水温の影響

8. まとめ

酸水素水中燃焼の基礎的特性を得るために、予混合燃焼法と拡散燃焼法について調べた。ノズル先端に失火を防ぐためフードが必要であり、予混合燃焼の場合逆火の起きにくい条件に限られる。比較的安定した条件で室温水中における燃焼効率を求めた結果99.86%という高い値が得られた。一方、拡散燃焼では燃焼は安定するが、高い燃焼効率が得られなかった。

部分予混合方式を採用して安定燃焼と高い燃焼効率を

得るといふ二つの要求を両立させることができた。

燃焼効率は水温の影響を受け、水温が高いほど燃焼効率が低下する。蒸気中に未反応ガスが多く残存することになり、燃焼を更に改善する工夫が必要となる。また、作動条件として生成蒸気圧力の影響について今後の課題として残っている。

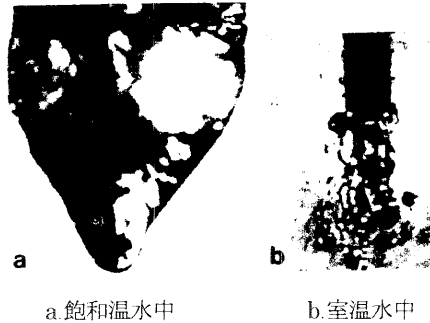


図11 火炎周囲の蒸気泡 (最大膨張時)

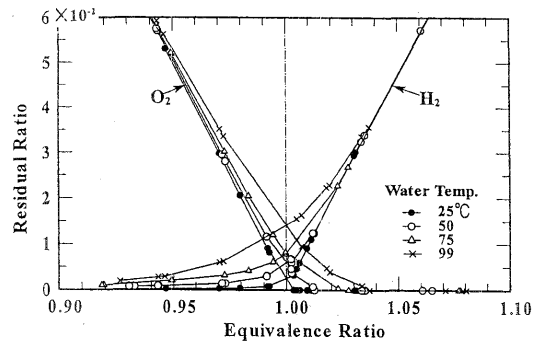


図12 水温による残存ガスの変化

参考文献

1. H. J. Sternfeld and P. Heinrich; Int. J. Hydrogen Energy, 14, 703-716 (1989)
2. NEDO-WE-NET-9882 平成10年度成果報告書
3. 井亀優, 他4名; 日本機械学会論文集B編, 56, 531, 350-355 (1991)
4. T. Kumakura, K. Hiraoka, M. Ikame, S. Kan and T. Morisita; Int. J. Hydrogen Energy, 77, 887-894 (1992)
5. T. Kumakura, S. Kan, K. Hiraoka and M. Ikame; Int. J. Hydrogen Energy, 21, 686-693 (1996)