

氏名	JAYAN SENTANUHADY
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 669 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Quenching and Re-Initiation Mechanism of Detonation Wave Passing through an Expansion Channel (膨張溝を過ぎるデトネーション波の消炎および再開始メカニズム)
論文審査委員	委員長 教授 大八木重治 委員 教授 川橋 正昭 委員 准教授 小原 哲郎 委員 准教授 平原 裕行

論文の内容の要旨

The study to investigate safety region of detonation wave and deflagration wave in several concentrations of fuel gas mixture is very important matter in term of safety engineering for industry using flammable gases in production process to prevent detonation accident which may occurred due to human factor, malfunction of safety devices and also imperfect in design of production system. Furthermore, mechanisms of quenching and re-initiation of the detonation wave passing through expansion channel, i.e. grooved-block, slit-plate or orifice plate, are of particular importance by considering safety devices to suppress the detonation wave in the industry. The detonation wave emerged from the expansion channel is disintegrated into a shock wave and a reaction wave, since expansion waves generated at a corner of the slit have effects to decrease a temperature and chemical reaction rate behind the shock wave. However, it is understood that the shock wave diffracted from the slit causes re-initiation and transits to detonation wave at downstream region of the tube, even though a diameter of channel is smaller than critical tube diameter.

The objective of this experiment is to investigate detonability and flammability limits of hydrogen air mixture diluted by inert gas and to elucidate the quenching and re-initiation mechanisms of the detonation wave by installing a grooved-block or a slit-plate into detonation tube filled with stoichiometric premixed gas of hydrogen and oxygen.

To obtain these goals, the experiment of detonability and flammability limits of common-used hydrogen-air mixture diluted by argon, nitrogen or carbon dioxide have been carried out by using rectangular cross-section of the detonation tube with dimension of 25 x 30 mm and total length of 3.0 meters. Concentrations of hydrogen, air and diluent gas were varied to acquire wide range of concentration of fuel gas mixture.

Furthermore, the experiment of quenching and re-initiation utilizing the grooved-block and the slit-plate have been performed by using rectangular cross-section of the detonation tube installed vertically with dimension of 50 x 50 mm and total length of 3.7 meters. Stoichiometric gas mixture of hydrogen-oxygen was chosen to be used as test gas for this study.

By addition an amount of diluent gas into fuel gas mixture could decay chemical reaction to be slower than reaction rate of fuel gas mixture without diluent gas. This phenomenon is occurred because diluent gas may able to increase

heat capacity of gas mixture especially at high temperature after gas mixture compressed by a shock wave.

Four patterns of relationship between a shock wave and a reaction wave propagated in driven section were observed in this experiment when fuel gas mixture was added by diluent gas. These patterns are un-reacted pattern, deflagration or flammability pattern, unstable detonation pattern and stable detonation pattern.

Comparing between argon, nitrogen and carbon dioxide as diluent gas, the fuel gas mixture diluted by carbon dioxide resulted higher heat capacity than that of diluted by nitrogen or argon. It could be shown by region of detonability of fuel gas mixture diluted by carbon dioxide was narrower than that of diluted by nitrogen or argon.

Since the limit of detonability relates with condition of spinning detonation wave, physical parameter such as dimension of tube cross-section and length of the tube influences region of unstable and stable detonation wave. The detonation tube having larger and longer dimension may result wider detonation region.

A detonation wave passing through an expansion channel is diffracted due to expansion wave generated at corner of the channel and it has an effect to reduce temperature behind diffracted shock wave. Reducing temperature behind the diffracted shock wave decreases chemical reaction rate of test gas and decouple it from the diffracted shock wave. This process is identified as quenching process of the detonation wave. The quenching process can be observed in all conditions and all configurations of the expansion channel.

Since the quenching of detonation wave is composed from a diffracted shock wave and a reaction wave propagated to downstream direction, two diffracted shock waves may interact each other in the center of tube and induce high temperature of hot-spot. If the temperature of hot-spot is high enough, the hot-spot may initiate a local explosion in the center of tube and a local explosion is indicated as source of detonation re-initiation. However, the diffracted shock wave propagated to downstream direction also interacts with surface of wall and it may be reflected to transversal direction. The temperature behind the reflected shock wave may increase to an auto-ignition temperature and re-initiate a detonation wave.

Generally, there are four patterns of re-initiation observed in this experiment, wherein the first shock-shock interaction (SS1), the first shock-wall interaction (SW1), the secondly shock-shock interaction (SS2) and the secondly shock-wall interaction (SW2). The first shock-shock re-initiation mechanism is mainly observed when cell number ($\frac{w}{\lambda}$) inside the channel is greater than 50 which can be obtained by increasing an initial pressure of test gas or increasing dimension of the channel. Reducing an initial pressure of test gas or reducing dimension of channel may decrease the cell number inside the channel and shift re-initiation mechanism.

Considering a relationship of ratio between width of channel with cell size (w/λ) and re-initiation mechanism for case of a detonation wave passing through double configuration of channel, the detonation wave is mainly re-initiated by mechanism of SS1 if the w/λ value is greater than unity. However, if the w/λ value is lower than unity, re-initiation of detonation wave is delayed by mechanism of SW1 or SS2 or SW2. Re-initiation by mechanism of SS1 is always characterized by an acceleration of local explosion shock wave up to higher than C-J propagation velocity.

The re-initiation of detonation wave behind an expansion channel is always started by an overdriven process of detonation wave appeared as very fine cellular structure of detonation wave on soot track record. The overdriven detonation is observed in all mechanism of detonation re-initiation.

Empirical equation could be obtained from this experiment to estimate re-initiation distance based on number of cell inside expansion channel.

論文の審査結果の要旨

デトネーション波は予混合気を超音速で伝ばする燃焼波の一種であり、デトネーション波背後の圧力および温度は著しく高くなる。例えば、酸素と水素の予混合気を大気圧状態で管内に充填した状態でデトネーション波が生成された場合、デトネーション波の伝ば速度は 2.8 km/s、デトネーション波背後の圧力は大気圧の約 20 倍、温度も 3,000 K を超える。したがって、デトネーション波が工業プラントや原子力発電所で発生すれば危険であり、周囲に甚大な被害をもたらす可能性がある。これより、デトネーション波を減衰し消炎させる技術を開発することが安全工学上の見地から重要となる。デトネーション波はセル構造を伴って伝ばすることが明らかにされている。すなわち、デトネーション波は入射衝撃波、反射衝撃波、マッハ軸衝撃波の三衝撃波が 1 点で交差することにより形成される三重点を伴って伝ばする。三重点において強い燃焼が生じることで発生する衝撃波が前方の衝撃波を補強し、衝撃波と燃焼波が一体化したデトネーション波が自走する。この三重点が管内を伝ばする過程ではセル模様が形成される。セルの大きさはデトネーション波が発生する予混合気に特有の値を示す。すなわち、予混合気の化学的な特性である化学反応速度のべき乗に反比例してセルサイズが変化することが知られている。例えば、予混合気の初期温度や初期圧力を高くすれば反応速度も高くなることからセルサイズは小さくなる。前述したようにデトネーション波が伝ばするにはセル構造を伴っていることが十分条件となることから、デトネーション波を消炎もしくは減衰させる方法は、2 つに大別される。第 1 の方法は化学的方法であり、予混合気を不活性気体で希釈し予混合気の反応速度自体を低下させる方法である。予混合気を希釈することでセルサイズが管内径よりも大きくなれば、デトネーション波は自走できずに消炎することになる。第 2 の方法は物理的方法である。デトネーション波が伝ばする管内にセルサイズよりも狭い流路を設け、その流路にデトネーション波を入射させればデトネーション波は伝ばできずに消炎する。デトネーション波が狭い流路から無限空間に回折した際、デトネーション波維持の有無を明らかにした研究が報告されており、円管の場合、狭い流路において 13 個以上のセルが存在すれば無限空間に回折した場合でもデトネーション波が維持されることが明らかにされている。しかしながら、狭い流路から回折したデトネーション波が密閉された空間に回折した場合、衝撃波が管壁と干渉することによりデトネーション波の再開始現象が生じる。デトネーション波の再開始過程については複雑であり十分に明らかにされていない。以上のような背景を踏まえ、本論文ではデトネーション波を消炎させるための方法を提案することを目的として実験を行ったものであり、論文全体として 4 章から構成される。

第 1 章は緒論であり、前述したデトネーション波を消炎もしくは減衰させることの意義、その方法論について述べている。

第 2 章では、前述した化学的方法に着目し、水素-空気予混合気をアルゴン、窒素および二酸化炭素で希釈するとともに希釈率を変化させ、デトネーション波が発生する限界について実験的に明らかにしている。すなわち、有限長さのデトネーション管の駆動管で発生したデトネーション波を被駆動管に入射させることによるデトネーション波の維持について述べている。実験結果より、水素-空気予混合気を二酸化炭素で希釈すればデトネーション波を消炎できる可能性が比較的高いことを明らかにしており、これは二酸化炭素の定圧比熱が他の希釈気体に比較して大きいことが原因であることを述べている。

第 3 章では、前述した物理的方法を応用しデトネーション管内に形状の異なる 2 種類の流路を挿入した実験を行っている。第 1 の流路は板に溝を設けたものであり、第 2 は 2 個のスリットを設けた板である。

溝を設けた板を用いた場合、溝の幅、長さによってデトネーション波が溝内部で消炎する過程、また消炎限界付近ではデトネーション波がスピンする挙動について明らかにしている。次に、スリット板を挿入した実験ではシュリーレン法および高速度ビデオカメラを駆使した可視化観察実験を行っており、デトネーション波の消炎過程、再開始過程を明らかにすることに成功している。特に、スリットからデトネーション波が回折することにより衝撃波と燃焼波に分離した後、衝撃波どうしが干渉したり衝撃波が壁面で反射することにより生じる三重点付近においてデトネーション波が再開始する過程を明らかにしたことは特筆に値する。さらに、デトネーション波の再開始距離を前述したセルサイズにより整理し、管内に挿入する流路幅により再開始距離を予測する実験式を明らかにしている。

第4章は結論であり、第2章と第3章の知見を総括している。

以上のように本論文では、デトネーション波を消炎させる方法について化学的方法と物理的方法の両側面から明らかにしたものであり、学術上及び工学技術上も有用であると判断される。このような理由から、当審査委員会は本論文が博士（工学）の学位を与えるに相応しいものであると判断した。