

平成21年 5月25日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18310112
 研究課題名（和文） エネルギー物質の非理想爆ごうモデルの確立と爆発リスク解析システムへの展開
 研究課題名（英文） Establishment of non-ideal detonation model of energetic materials and its development for explosion risk assessment system
 研究代表者
 三宅 淳巳（MIYAKE ATSUMI）
 横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授
 研究者番号：60174140

研究成果の概要：火薬類に代表されるエネルギー物質への衝撃エネルギーの付与による反応開始から、反応進行、定常爆轟に至る超高速のプロセスを、高分解能圧力素子を利用した計測システムにより実時間計測を行い、計測結果の現象解析と超高速カメラおよび高速度ビデオ撮影による凍結画像により確認した。それらを基に極限反応の機構に関する分子論的解釈と爆ごうモデルの確立を試み、その上で爆発リスクアセスメントシステムへの導入について検討を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2007年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム工学 社会システム工学・安全システム

キーワード：エネルギー物質、非理想爆轟、硝酸アンモニウム、爆発リスク

1. 研究開始当初の背景

技術システムにおける爆発リスクの算出においては、従来より、爆発の発生確率とそれによる威力の解析を行い、双方をF-N曲線やリスクマトリックス等で評価し、リスク低減策の検討が行われてきた。そこではたとえばTNT（トリニトロトルエン）を基準とした爆発発生確率や爆発威力の推定が行われてきた。しかし、近年では製品の高付加価値化の要求に基づいて、特殊化学品のような爆発特性未知な新規物質や起爆条件や取扱条件

等によって異なる反応性を示す物質の導入が多く、個々の物質特性に基づいた適切な評価を行うことが不可欠となっている。また昨今のテロ対策等を想定する場合、新たな基本概念、爆発理論に基づく爆発現象のリスクアセスメントへの導入が強く求められている。

一方、凝縮相エネルギー物質の爆発によって創成される高温、超高压場は10,000K、100GPaに達し、そこでは高密度なエネルギーが1マイクロ秒以下に発生、解放され、通常では考えられない極限反応が進行してい

る。これらの極限反応を工学的に活用することにより、新たな反応や物質の創成も試みられている。しかし、この極限反応が起こるメカニズムに関しては未解明な点が多く、古典的な理論によってマクロに解釈されているに過ぎない。

また、試験条件や環境条件によって爆ごうの挙動は変化するため、爆ごう特性値は古典理論で予測される値には達せず、多くの場合、非理想的な爆ごうとなる。これは、1次元爆ごう現象の大前提である、反応速度や起爆、伝爆のメカニズムが現実と合致しないためであり、特にその挙動が顕著に現れる産業爆薬類では、古典理論を補うべき新たな爆ごうモデルの構築が強く望まれており、これら非理想爆ごうモデルの確立と、これを導入した爆発リスク評価が強く求められている。

尚、本申請の研究課題については、米国の Los Alamos, Sandia, Lawrence Livermore といった国立研究所において研究企画段階または、研究の緒についた段階であり、国内での研究報告例はない。また分子論的なシミュレーションについては東京大学の越教授らのグループが取り組み始めているが、小規模実験による検証を準備中であり、その点でも本研究の意義は大きい。

2. 研究の目的

本研究では、外部からの衝撃エネルギーの付与から、反応開始、発展、爆ごうの発生にいたる衝撃起爆プロセスおよび定常爆ごう波の伝播プロセスのメカニズムを解明するために、種々の精密な爆発実験とあわせて実験結果の分子動力学の解釈を行い、より精密な起爆・伝爆モデルを構築することを目的とする。

まず、1次元衝撃波を仮定した古典理論では説明のできない爆ごう波の2次元、3次元構造の実験的確認ならびにピコ秒オーダーで進行する高温高压反応を精度よく計測するためのシステムの開発を行う。

一方、反応開始から定常爆ごうに至るまでの衝撃波および化学反応によるエネルギーを衝撃波に供給する燃焼波の形状について検討し、爆ごう波面の曲率の算出により爆ごう波進行に伴う衝撃波、希薄波の挙動について、圧力の実時間計測ならびに高速度ビデオによる視覚化を試みる。

以上の検討により、エネルギー物質の衝撃起爆モデルおよび定常爆ごう伝播モデルを提案し、2次元シミュレーションを行う。さらに、周辺環境を入力することにより、爆発衝撃波や爆風、振動の伝播挙動が定量的に得られ、爆発リスク推定に有効な情報を提供しうるシステム開発が可能となる。

上記によって得られた実験的/解析的爆ごうパラメータは爆発の威力の指標となるも

のであり、これらと起爆の条件との比較検討により、爆発威力の制御と安全かつ有効な爆発エネルギーの創生が可能となる。具体的には、起爆、伝爆条件の決定により、周辺環境への被害低減や保安距離の詳細設計等に有効な知見と情報を与えるものとなる。

3. 研究の方法

本研究においては、エネルギー物質への衝撃エネルギーの付与による反応開始から、反応進行、定常爆轟に至る超高速のプロセスを、高分解能ピエゾ抵抗圧力素子を利用した計測システムにより爆轟速度、圧力に関する実時間計測を行い、計測結果の現象解析と超高速カメラおよび高速度ビデオ撮影による凍結画像により確認し、それらを基に極限反応の機構に関する分子論的解釈とモデルの確立を試みた。その上でリスクアセスメントシステムへの導入について検討し、その可能性と課題について検討を行った。

(1) 爆轟パラメータの計測

典型的な非理想爆轟挙動を呈する産業爆薬として、硝安油剤爆薬 (ANFO) および近い将来機能性爆発性混合組成物としての期待が高まる硝安/活性炭混合物を試料とし、起爆薬による点起爆と衝撃波レンズを用いた平面衝撃起爆を行い、エネルギー入射から起爆に至るまでの試料内圧力履歴および、衝撃波通過時間の実時間計測システムの開発を行った。

爆轟速度及び圧力の実測により、1次元のシミュレーションが可能となるので、これを基に入射衝撃圧力と爆轟誘導距離の関係 (Pop-Plot) を求めた。これにより実験結果の2次元モデルへの展開の可能性について検討した。

さらに、格子欠陥の存在、不均質部分のホットスポットへの成長が衝撃波の反射とローカルな高温部の発生が爆轟への転移に発展するモデルを構築し、実験により検証を行った。

以上により、精密な衝撃起爆モデルの構築を試み、固体物性を考慮した分子論的解釈ならびに反応進行を考慮した衝撃波/爆轟波伝播モデルに関する系統的考察を試みた。

(2) 非理想爆轟挙動の計測

ナノ秒オーダーでの計測が可能なマンガニンおよび PVDF 圧力センサーにより、定常爆轟伝播中の爆轟波面の圧力履歴を計測し、同時に実施する超高速カメラ (大学備品) および高速度ビデオによる爆轟波面の曲率に関する情報から、爆轟パラメータと反応率との相関について考察した。

一方、爆発威力に関しては、爆轟パラメータである爆轟速度、ピーク圧力の直接的計測

から、爆轟の非理想性を表現する「 γ 値」を決定し、1次元爆轟を仮定した理想爆轟計算結果との比較により、反応率を算出することを試みた。理想爆轟計算には、KHTコードおよびCHEETAHコードを用い、爆轟生成ガスの状態方程式の相違について検討した。さらに、推定された爆轟波面での反応率を基に爆轟パラメータを逆算して実験値との比較を行うことにより、その妥当性について検討を行った。

(3) 爆発物の爆発威力評価

用いる試料の装薬径を変化させることにより爆轟波面の反応率と爆轟パラメータの計測を行い、爆轟波面でのエネルギー損失と衝撃波進行支持のためのエネルギー分配について考察を行った。

(4) 非理想爆轟モデルの構築

定常爆轟波の幾何学形状と圧力履歴との関係に基づいて、より詳細な2次元爆轟モデルの構築を試みた。これにより、古典理論の不備を補い、現実的な非理想爆轟挙動に関する知見を得るとともに、硝安系エネルギー物質に関する最適な状態方程式の探索、提案および適切な威力評価手法への展開について検討した。

以上に基いて、適切なリスクアセスメントに資する爆発発生確率並びに爆発威力の詳細な評価を可能とするシステムの構築を行った。

4. 研究成果

(1) 爆発性物質の爆轟パラメータの計測

①爆轟パラメータ計測手法の確立

硝安を主剤とする爆発性組成物として、硝安油剤爆薬 (ANFO) および硝安系爆発混合物を試料とし、起爆薬による点起爆と衝撃波レンズを用いた平面衝撃起爆を行い、エネルギー入射から起爆に至るまでの試料内圧力履歴および衝撃波通過時間の実時間計測システムの開発を行った。まず、平面衝撃波発生装置である液体爆薬レンズより発生した衝撃波の平面性の確認実験を行った。60mm径の爆薬レンズを起爆し、その出力衝撃波をストリークカメラで撮影したところ、レンズ径に対する平面性の誤差は0.6%程度であった。過去に行われたエマルジョン爆薬での曲率が10%程度であったこと、ANFOはエマルジョン爆薬よりも曲率は大きくなると考えていることから、ANFO内を進行する衝撃波の曲率に対して本実験で用いた爆薬レンズの平面性は充分であると判断した。一方、ナノ秒オーダーでの計測が可能な高分解能を有する圧力センサーとして、ピエゾ抵抗素子、マンガニウムを用いた圧力センサー (Dynasen社製 MN4-50-EK) により、定常爆轟伝播中の

爆轟波面の圧力履歴を計測し、ANFO爆薬の爆轟伝播過程における衝撃波速度と圧力の実時間計測手法を確立した。

②衝撃起爆過程の追跡

電気雷管により点起爆した高性能爆薬によって発生した衝撃波がPMMA中を伝播する様子について、高速度カメラ写真と数値シミュレーションの比較を行った。その結果、点起爆では湾曲した衝撃波がPMMA中を伝播することが確認された。一方、爆薬レンズを用いた平面衝撃波による起爆装置により、十分な平面性を有する衝撃波の入射が可能となった。爆薬レンズを用いて高性能爆薬を起爆した際に、異なる厚さのPMMAを通過した衝撃波の圧力履歴を測定したところ、PMMAギャップ長が長くなるほどピーク圧力が小さくなることが確認できた。

③衝撃波圧力の制御

ペントライト爆薬の爆轟に伴う衝撃波をPMMAギャップに入射し、マンガニンゲージを用いてPMMAギャップ中を伝播する衝撃波圧力の距離減衰を測定した。これによりギャップ長(L)vs.衝撃波圧力(P)較正曲線として $P=10.9\exp(-0.057L)$ を得た。これをもとに、ANFO爆薬の衝撃起爆感度を測定したところ、ANFO爆薬の衝撃起爆に必要な最低衝撃波圧力はおよそ2.4GPaであることがわかった。

(2) 非理想爆轟挙動の計測

①定常爆轟挙動の計測

平面衝撃波によって起爆されたANFO中を伝播する衝撃波速度と衝撃波波面形状をストリークカメラによって測定し、ストリーク写真で得られた像を円弧の一部であると仮定してフィッティングを行った。PMMA管と鋼管では、希薄波の侵入に明らかな違いが観測された。PMMA管ではオーバードライブの段階ですでに希薄波は中心にまで達していた。しかし、鋼管では定常爆轟を呈している時でも中心部に平坦な部分が認められた。また、得られた波面曲率半径の値と、爆轟特性計算コードCHEETAHでの計算結果の値をWood-Kirkwoodの式に適用すると、反応帯長は他の爆薬に比べ大きな値となることが判った。一方、PMMA管での実験においては定常爆轟を観測することが出来なかった。

②鋼管試験による密閉効果の影響

ANFO爆薬を鋼管中に装填して試験した結果、爆轟速度・圧力ともにPMMA管を用いた場合と比較して高い値が測定された。これはANFO爆薬の爆轟特性が試験条件に依存することを表す結果である。また、鋼管試験において弱い衝撃波により起爆した場合、爆轟誘導距離が300mm以上であることが確認され、ANFO爆薬の爆轟誘導距離は定常爆轟速度の値に大きく関わりがあることが考えられた。

③ANFO 爆薬の爆轟波面解析

硝酸アンモニウムを主剤とする爆発性組成物は典型的な非理想爆轟挙動を呈することが知られている。これは定常爆轟波の2次元構造に起因しており、衝撃波の進行に伴う側面からの膨張波（希薄波）により管壁に近い部分でエネルギー損失が生じ、衝撃波面が湾曲するためであると考えられる。この衝撃波面の湾曲率を解析するため、PMMA 管中に装てんした硝安油剤爆薬（ANFO）を試料とし、爆薬レンズを用いた平面衝撃起爆を行い、超高速カメラを用いて定常爆轟波の波面曲率を測定した。その結果、本実験条件での爆轟誘導距離は約 200mm、定常爆轟速度は 1.70km/s と得られ、測定結果の解析により、爆轟波面を円弧に近似した場合の曲率として、 $r=36\text{mm}$ と得られた。

④硝安/活性炭系組成物の爆轟速度に及ぼす硝安の種類の影響

酸化剤である硝安に可燃剤を加えることで起爆・伝爆特性が飛躍的に向上することはよく知られているが、ここでは形状や物性の異なる各種の硝安と活性炭粉末を混合した組成物（99/1, 97/3, 95/5, 93/7, 90/10）について鋼管中に装てんした組成物の爆轟速度を測定し、硝安/活性炭混合系の爆速値に影響を与える因子及び硝安と活性炭の反応に関して検討した。用いた試料は工業用の粉状硝安、ANFO 爆薬用プリル硝安、相安定化硝安（PSAN）、粒状硝安（工業用）と和光純薬製粉末状活性炭（特級 037-02115）である。実験結果より、粉状硝安、相安定化硝安は活性炭をわずか 0.1wt% 混合した組成でも爆轟に至り、高い起爆感度が確認された。一方、粒状硝安ではどの組成でも定常爆轟には至らず、起爆感度に相違が見られた。不均質系爆薬の起爆においては、その空孔、細孔間の気体の断熱圧縮や粒子界面での衝撃波の反射等により局所的な高温・高圧のホットスポットを形成し、起爆時に有効に作用することが知られている。粒状硝安は粒子径が大きいため空孔が粉状硝安、相安定化硝安より少なく、硝安が密に詰まっておりプリル硝安のような細孔がないため、爆轟に至らなかったものと考えられた。

（3）爆発物の爆発威力評価

①粉状硝安/活性炭系組成物の爆轟速度に及ぼす活性炭量の影響

硝安と活性炭の反応についてより詳細な知見を得るため、粉状硝安-活性炭混合系に関して前項で用いた組成の他に、活性炭混合量 0.1, 0.3, 0.5, 1.5, 20% について同条件で爆速測定実験を行った。実験毎に試料の装填密度が異なるため実験値を直接比較の対象にすることはできないため、CHEETAH コードによる理論計算によって算出された爆速

計算値 D_{cal} と実験値 D_{obs} の比 $D_{\text{obs}}/D_{\text{cal}}$ を評価の指標として用いた。実験結果より、粉状硝安に活性炭をわずか 0.1wt% 混合しただけで定常爆轟に至ることが確認された。また、活性炭の混合量を増やしていくと爆速値は減少していくが、 $D_{\text{obs}}/D_{\text{cal}}$ の値は理論計算値よりも低い 0.7 前後で横ばいとなることから、一定以上の活性炭を加えると爆轟反応には寄与しなくなることが明らかとなった。

②硝安/活性炭系組成物の爆轟パラメータに及ぼす組成と装薬径の影響

異なる組成比の粉末状硝安/活性炭混合物について、様々な装薬径を有する鋼管中で爆発させた場合の組成物の爆轟パラメータを測定し、硝安/活性炭混合系の爆轟挙動に影響を与える組成比および装薬径の関係について検討した。実験の結果、全ての組成についてそれぞれ装薬径が大きくなるにしたがって爆轟速度は大きくなり、また活性炭混合量が 0, 0.1, 1, 7 wt.% と増加するにつれ限界薬径はそれぞれ 41.2, 35.5, 10.9, 7.8 mm と小さくなり、爆轟伝播性に及ぼす組成と装薬径の影響が得られた。

さらに、各組成に対して無限大薬径想定時の爆轟速度を熱力学計算により算出し、爆轟速度の測定結果より爆轟反応領域内での反応率を求めたところ、活性炭混合量 0, 0.1, 1, 7 wt.% ではそれぞれ 55, 57, 68, 91% となり、化学両論組成（活性炭 7 wt.%）では、1次元爆轟理論による計算値の 90% 程度の反応率であることが明らかとなった。これより、硝安/活性炭混合系では、爆轟伝播に寄与しない反応の割合は組成によって変化し、活性炭混合量が増加するに従って反応性が向上し、理論計算値に近づくことがわかった。

全ての組成についてそれぞれ薬径が大きくなるにしたがって爆轟速度測定値は大きくなり、また活性炭量が増えるにつれて限界薬径は小さくなる傾向が見られた。以上は爆轟圧力の測定結果についても同様の結果が得られた。CHEETAH コード（BKWC-EOS）にて、未反応部を不活性物質と仮定し反応率を任意に変化させて爆轟特性計算を行ない、実験値と一致した時、これを反応領域内での反応率とした。爆速、爆轟圧力各々について反応率を求めたところ反応率は 30%~80% の範囲であり、活性炭混合量が少ない時や薬径が小さい時には低反応率で爆轟が伝播していることが示された。

以上、硝安/活性炭混合系では爆轟速度、爆轟圧力の測定値は薬径、組成に大きく依存し、条件によっては 30% 程度の低反応率で爆轟伝播していることが確認された。これは ANFO 爆薬の 50~70% よりも小さく、爆轟の非理想性を示している。また高速度写真撮影により、今回の条件で硝安単体では発光部が消失し爆轟中断したが、活性炭を加えること

で発光部は管底部に到達し、起爆、伝爆特性が上昇することが確認された

(4) 非理想爆轟モデルの構築

①爆轟伝播の高速写真撮影

超高速カメラを用いて衝撃起爆時のANFO爆薬爆轟時の写真撮影を行い、定常爆轟波の伝播挙動の観察により、爆轟伝播2次元モデルの検討を行った。PMMA管中に装填し、電気雷管と産業用エマルジョン爆薬で起爆したANFO爆薬の爆轟時の高速写真を撮影した。左端より起爆し、右方に伝播する爆轟波の様子が鮮明に捉えられ、画像解析により先端衝撃波の位置、反応帯、空気中に放出する爆轟生成ガスの挙動が観察された。これにより、爆轟伝播の2次元構造を考察した。爆薬は、衝撃波の入射により高温高圧となって化学反応を開始し、反応に伴うエネルギーを放出し、C-J面において終了する。このエネルギーは衝撃波に供給され、衝撃波は減衰することなく未反応爆薬へと定常で伝播する。一方、空気中に放出された衝撃波の背後には圧力の低下した希薄波が侵入し、化学反応の速度を低下させるため、この部分で生成したエネルギーは衝撃波の伝播に有効に作用せず、衝撃波速度、すなわち爆轟速度の低下を招く。従って装薬径が小さい場合にはこのエネルギーロスが相対的に大きいため、爆轟速度をはじめとするパラメータは低下することになり、限界を超えると爆轟中断となる。以上、高速写真から、非理想爆轟に関する定性的解釈が可能となった。

②高速ビデオによる起爆・伝爆挙動の観察

硝安/活性炭混合系の爆轟伝播を検討するため、活性炭混合比0および7wt.%の組成物の起爆・伝爆挙動を高速ビデオにより観察した。試料は内径40mm、肉厚8mm、管長100mmのPMMA管に装填し、C4爆薬50gにより起爆し、爆発ドームに取り付けられた小窓を通して高速ビデオ(島津製HPV-1)にて4 μ s毎に撮影を行うとともに、爆轟速度の測定を行なった。高速撮影の結果より、硝安/活性炭(93/7wt.%)混合系では、約10mmの一定の長さをもった発光部が管底まで伝播していく様子が確認されたのに対し、硝安単体では、発光部分が試料とブースターとの境界面より70mm程度まで伝播したところで伝播が停止し、爆轟中断の様子が確認された。発光部の長さは20~30mm程度の長さがあり、化学反応によるエネルギー供給が不十分なため衝撃波の伝播を維持できず、爆轟中断に至ったと考えられた。以上、爆轟パラメータの計測と爆轟伝播挙動の観察ならびに反応生成物の確認により、活性炭混合量の減少とともに反応速度の低下、すなわち反応完了までの時間が増加し、側方からの希薄波の影響も相まって反応領域内での反応率の低下に

至るとする非理想爆轟の定性的なモデルを提案することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5件)

- (1) Y.Izato and A.Miyake, Influence of carbon on thermal decomposition of ammonium nitrate, *Sci. Tech. Energetic Mat.*, 70, (2009) (印刷中) 【査読有】
- (2) A.Miyake, H.Kobayashi, H.Echigoya, T.Ogawa, K.Katoh, S.Kubota, Y.Wada and Y.Ogata, Non-ideal detonation properties of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, *Int'l J. Modern Physics B*, 22, 1319-1324 (2008) 【査読有】
- (3) A.Miyake, H.Echigoya, H.Kobayashi, K.Kato, S.Kubota, Y.Wada, Y.Ogata and T.Ogawa, Detonation velocity and pressure of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, *Materials Science Forum*, 566, 107-112 (2008) 【査読有】
- (4) A.Miyake, H.Kobayashi, H.Echigoya, K.Kato, S.Kubota, Y.Wada, Y.Ogata and T.Ogawa, Diameter effect on detonation velocity of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, *Materials Science Forum*, 566, 101-106 (2008) 【査読有】
- (5) A.Miyake, H.Kobayashi, H.Echigoya, S.Kubota, Y.Wada, Y.Ogata, H.Arai and T.Ogawa, Detonation characteristics of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, *J. Loss Prevention in the Process. Ind.*, 20, 584-588 (2007) 【査読有】

[学会発表] (計 8件)

- (1) A.Miyake, H.Echigoya, K.Katoh, S.Kubota, Y.Wada and Y.Ogata and T.Ogawa, Influence of physical properties of carbon on the detonation behaviour of ammonium nitrate and carbon mixtures, *Proc. 7th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, 255-259, St.Petersburg, 2008年7月5日 【査読有】
- (2) Y.Izato, A.Miyake, H.Echigoya and T.Ogawa, Influence of physical properties of carbon on the thermal decomposition behaviour of ammonium nitrate and carbon mixtures, *Abstracts 3rd Int'l Symposium on Energetic Materials and their applications (ISEM-2008)*, 94, Tokyo, 2008年4月24日
- (3) Y.Izato and A.Miyake, Influence of type of carbon on thermal decomposition mechanism of ammonium nitrate and carbon mixtures,

Abstracts 4th Int'l Symposium on the new frontiers of thermal studies of materials, 64, Yokohama, 2008 年

- (4) A.Miyake, H.Kobayashi, H.Echigoya, and T.Ogawa, Ignition and combustion properties of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, Proc. 7th Int'l Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion (7-ISICP), Kyoto, 2007 年
- (5) A.Miyake, H.Kobayashi, H.Echigoya, T.Ogawa, S.Kubota, Y.Wada and Y.Ogata, Non-ideal detonation properties of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, Proc. 6th Int'l Symposium on Impact Engineering, Daejeon, 2007 年 9 月 14 日 - 16 日【査読有】
- (6) A.Miyake, H.Kobayashi, H.Echigoya, K.Kato, S.Kubota, Y.Wada, Y.Ogata, H.Arai and T.Ogawa, Influence of physical properties of ammonium nitrate on the detonation behaviour of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, Proc. 12th Int'l Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries (CD-ROM), P11-1-11-4, Edinburgh, 2007 年 5 月 22 日 - 24 日
- (7) A.Miyake, H.Kobayashi, H.Echigoya, H.Arai, K.Kato, S.Kubota, Y.Wada, Y.Ogata and T.Ogawa, Combustion and detonation properties of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, Proc. 33rd Int'l Pyrotechnics Seminar, 413-421, Fort Collins, 2006 年
- (8) A.Miyake, H.Kobayashi, H.Echigoya, S.Kubota, Y.Wada, Y.Ogata, H.Arai, and T.Ogawa, Detonation characteristics of ammonium nitrate and activated carbon mixtures, Proc. 6th Int'l Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, 599-606, Halifax 2006 年【査読有】

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三宅 淳巳 (MIYAKE ATSUMI)
横浜国立大学・大学院環境情報研究院・
教授
研究者番号：6 0 1 7 4 1 4 0

(2) 研究分担者

小川 輝繁 (OGAWA TERUSHIGE)
横浜国立大学・大学院環境情報研究院・
教授
研究者番号：5 0 0 1 7 9 3 5

(3) 連携研究者