

爆発シミュレーションの 技術動向について

2013年3月7日(木)開催
連成解析の技術動向セミナー
アドバンスソフト株式会社



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

1

Contents

1. 爆発現象について
 - 火薬と気相爆発の現象と相違点
 - 爆轟現象と爆燃現象
2. 爆轟シミュレーションの
解析手法と解析事例
3. 爆燃シミュレーションの
解析手法と解析事例



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

2

爆発現象について

-火薬と気相爆発の現象と相違点



火薬による爆発

火薬とは・・・

□火薬類取締法の分類

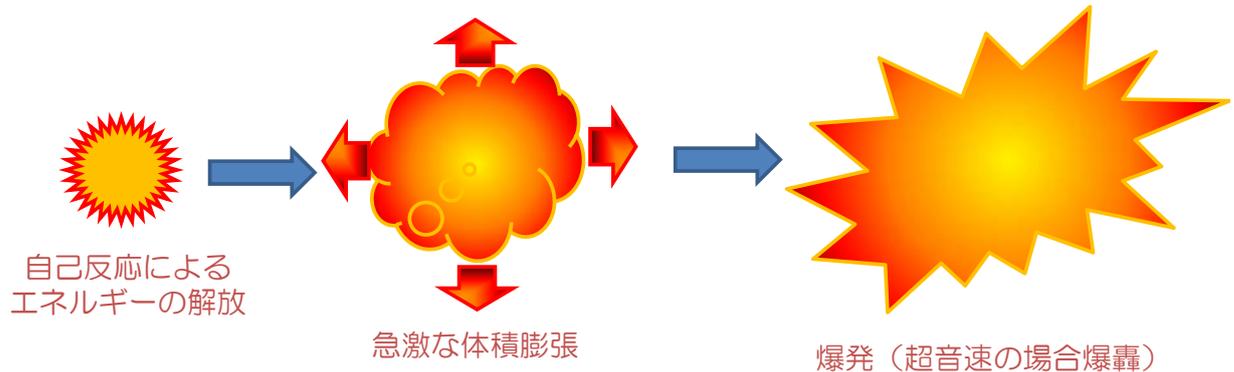
- 火薬：推進的爆発の用途に使用され、爆燃を生じ、音速以下の速度で伝播する急速燃焼をする。黒色火薬、無煙火薬、コンポジット推進薬、コンクリート破碎薬などがあり、銃砲の推進薬やロケット推進薬として使用される。
- 爆薬：発破など、破壊的用途に使用するもので爆轟（detonation）を生じ、超音速で爆薬内を衝撃波が伝播し、破壊力は極めて大きい。
- 火工品：火薬または爆薬を利用して、爆発反応の生起、伝達等の目的に適合するものをいい、工業雷管、電気雷管、砲爆弾、導火線、伝爆線、コンクリート破碎器、煙火等がある。



火薬による爆発

特徴

- 熱や衝撃などにより急激な燃焼反応をおこす
- 空気中の酸素を必要としない(酸化剤が含まれている)
- 自己反応性物質は外部の酸素を必要としないため、二酸化炭素消火器のような酸素遮断による消火が不可能



火薬による爆発

□火薬

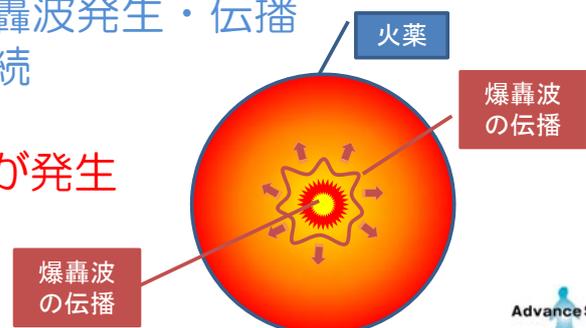
- 加熱より火薬がガス化
- ガスが燃焼
- 燃焼熱により内部を加熱し、ガス化を促進する

➤ 燃焼速度は音速を超えず、衝撃波は発生しない

□爆薬

- 加熱や衝撃により反応→爆轟波発生・伝播
- 爆轟による火薬の反応が継続

➤ 衝撃波をともなう爆発が発生



気相爆発

気相爆発とは

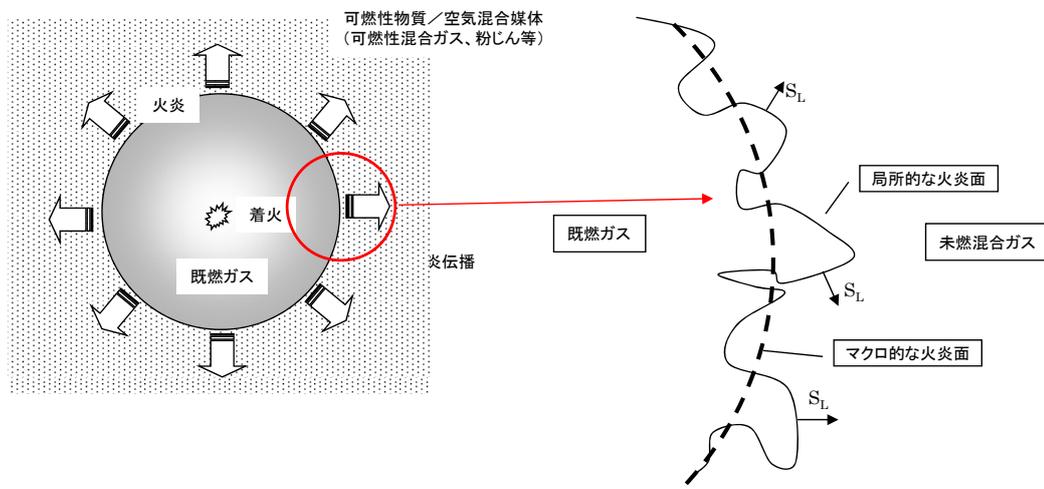
□ 気相（燃焼の直前の形態が気体）における燃焼現象

- ガス爆発
- 噴霧爆発
 - ガソリンなどの可燃性液体の噴霧されたものによる燃焼爆発
- 粉塵爆発
 - 炭の粉、小麦粉、鉄粉などの浮遊粉塵の燃焼爆発

□ 燃焼の起こるときの周囲の条件や粉じんの性質などにより、火炎が伝播するだけで燃焼が終わるか、圧力上昇を伴う爆発を起こすかが異なる

予混合燃焼

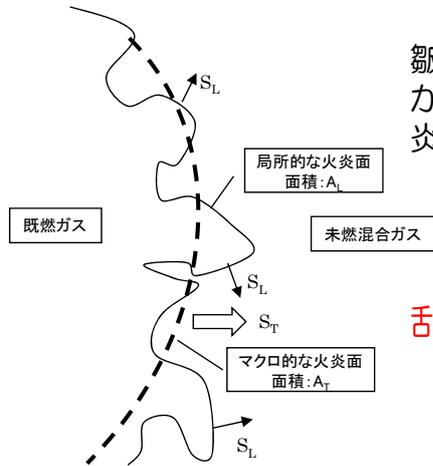
可燃性ガスの爆発現象ー➔予混合燃焼



火炎面は伝播と共に乱れ始め、火炎面積が増大➔燃焼速度の増大

乱流燃焼

空気と可燃性ガスの混合状態（予混合気体）中での火炎は初期において層流燃焼速度で進行するが、**いくつかの乱れの要因**から火炎面形状に凹凸が発生する



皺状層流火炎モデルによると層流火炎面群（面積 A_L ）が層流燃焼速度 S_L で伝播するが、マクロ的には乱流火炎伝播面（面積 A_T ）が乱流燃焼速度 S_T で伝播する

$$A_L \cdot S_L = A_T \cdot S_T$$

乱流燃焼速度 S_T は皺の増加とともに加速する

※富塚、数値シミュレーションによる可燃性ガスの爆発危険性解析、博士論文、東京大学

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

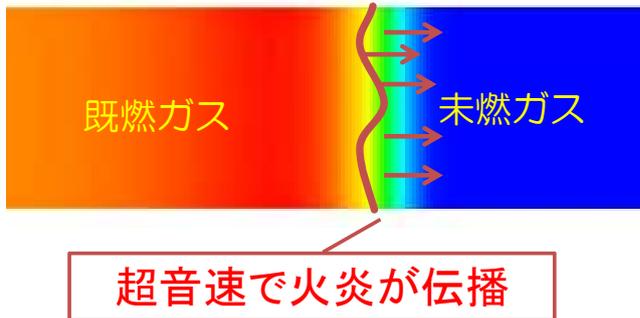
爆発現象について

—爆轟現象と爆燃現象

爆轟 — Detonation —

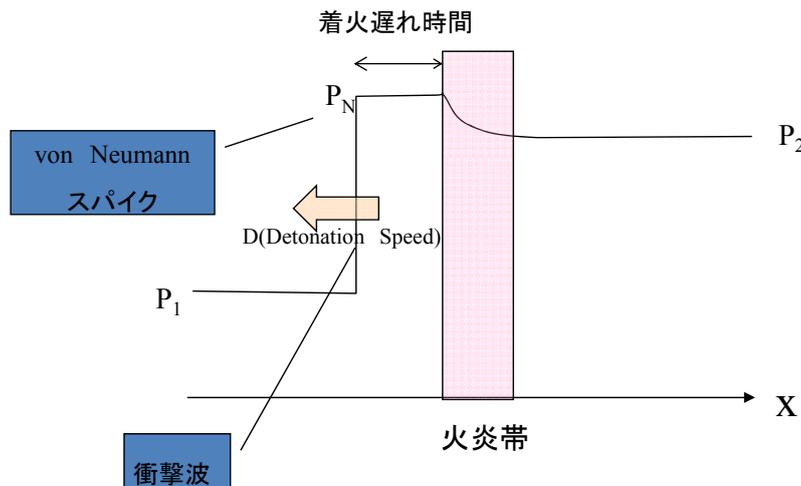
爆轟とは

- 高速で起こる燃焼からエネルギーを供給されつつ、
超高速で伝播する衝撃波
- 爆轟は、細長い管のような空間では起こりやすく、
球や立方体などの形状の空間では起こりにくい
- 爆風圧による破壊力が大きい



水素爆轟による配管破断
JAERI-Tech 2001-094(2001年12月)、P.14

爆轟 — Detonation —



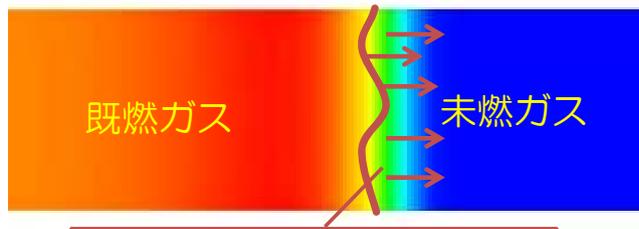
デトネーション波は衝撃波が先行し、これにより高温、高圧状態を火炎帯の初期条件を形成する (von Neumann スパイク)

Reyleig線、Hugoniot曲線、等エントロピー線 ($P/\rho r = \text{一定}$) の3線が接する点は C-J (Chapman-Jouguet) 点と呼ばれ最も安定した定常Detonationが実現→C-J速度

爆燃 — Deflagration —

爆燃とは

- 燃烧速度が音速よりも遅い爆発現象
- 空気と可燃性ガスが混合している中を音速未満の速度で燃烧が広がっていく
- 例：球状や広い空間でのメタン、プロパンやガソリン蒸気による爆発



火炎の伝播速度が音速を超えない



DME 爆発実験
※AIST Today 2004.1 Vol.4 No.1

爆轟シミュレーション

—解析手法と解析事例

一次元計算 (ZND理論)

ZND理論による数値計算

$$\frac{d(\rho u)}{dz} = 0$$

— 質量保存則

$$\frac{d}{dz}(p + \rho u^2) = \frac{4\sigma}{d} \equiv f$$

— 運動量保存則

$$\rho u \frac{d}{dz} \left(h + \frac{u^2}{2} \right) = \frac{4\sigma}{d} D - \frac{4\theta}{d} \equiv g$$

— エネルギー保存則

$$\sigma = \xi \rho (D - u)^2 / 2,$$

$$\theta = \frac{1}{2} \xi \rho (D - u) \left[c_p (T - T_0) + \frac{(D - u)^2}{2} \right]$$

熱及び摩擦損失

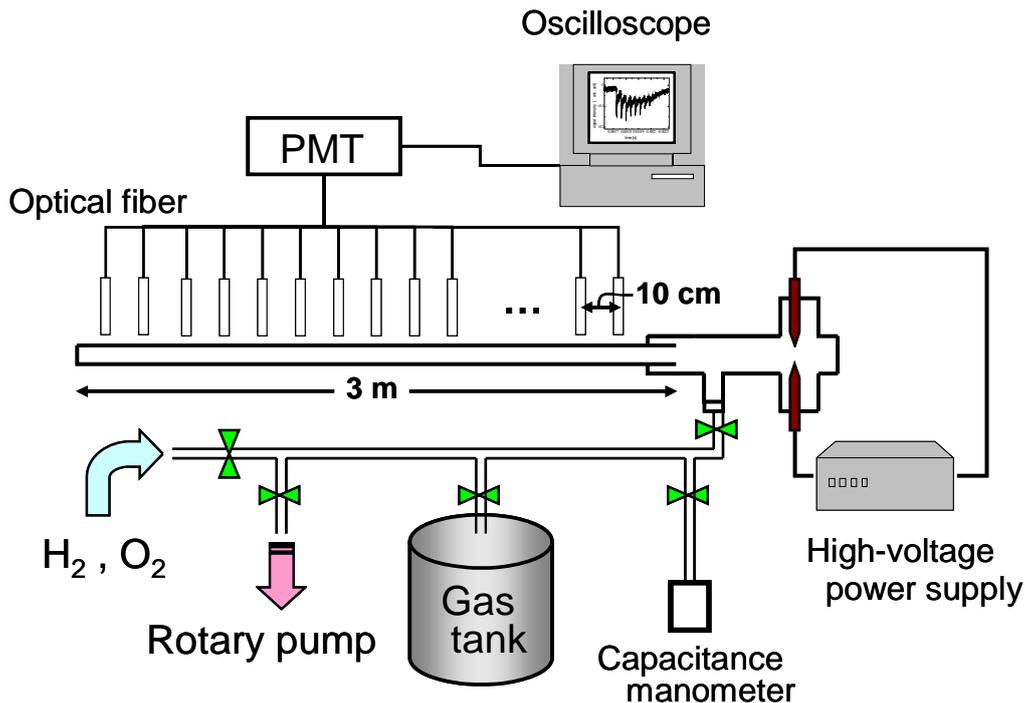
$$\xi = 0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$$

D:爆轟速度 u:流速 ρ:密度 d:反応管の直径
 σ:反応器壁との外部摩擦と粘性による内部摩擦による損失項
 θ:熱伝導による損失項 ξ:Blasiusの摩擦係数

※G.L. Agafonov, S. M. Frolov, 1994, 30(1), 91-100

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

円管内爆轟波伝播実験



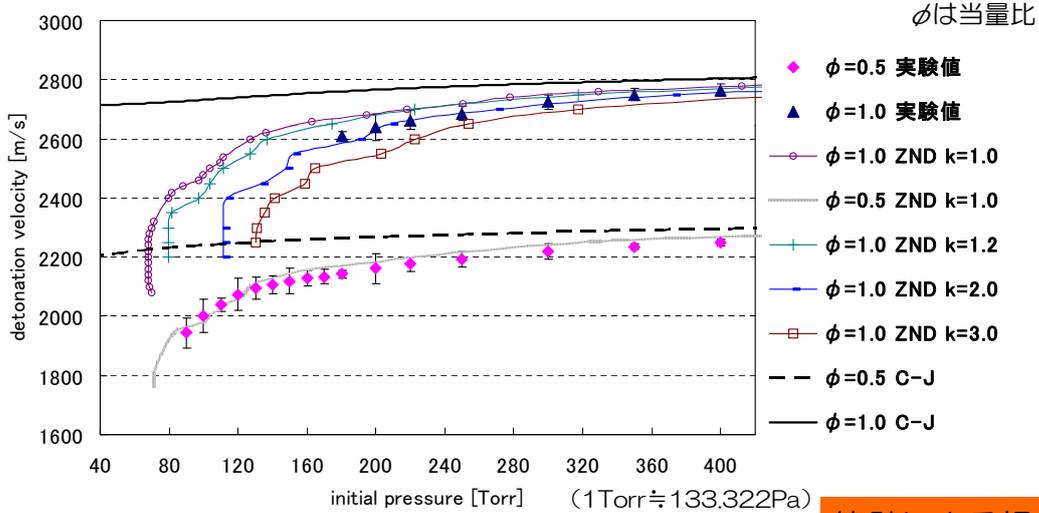
※深尾将士他, H2/O2燃料のデトネーションの伝播限界の測定, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, 2006

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

一次元爆轟シミュレーション

～ガラス管内爆轟実験とシミュレーションの比較～

ξ を定数倍し($\xi' = k\xi$),摩擦係数を補正することで損失項を再評価.



C-J速度理論計算値が実験値より大きく見積もられる

管壁による損失
(摩擦・熱)の影響

※深尾将士他, H2/O2燃料のデトネーションの伝播限界の測定, 第44回燃焼シンポジウム講演論文集, 2006年

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

2次元基礎方程式

圧縮性Euler方程式 (連続の式, 運動量の保存式, エネルギー保存式に加えて各化学種の保存式を考慮したもの)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial F_d}{\partial x} + \frac{\partial G_d}{\partial y} + S$$

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \\ \rho_i \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E + p)u \\ \rho_i u \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \\ \rho_i v \end{pmatrix}$$

$$F_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -q_x \\ \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \end{pmatrix} \quad G_d = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -q_y \\ \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial y} \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_i \end{pmatrix}$$

※清水博志, 坪井伸幸, 林光一, 水素/空気デトネーションにおける詳細化学反応が与える影響, 第14回数値流体シンポジウム 2000

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

計算スキーム

EULER方程式には以下のような計算スキームが用いられる

時間スキーム

- 一般的には陽解法が用いられる。陽解法としては、時間分割法もしくはルンゲクッタ法などがある。
- 陰解法の場合は、離散誤差による位相のずれを内部反復により補う方法もあるが、数値粘性の影響が大きくセル構造が出にくい。

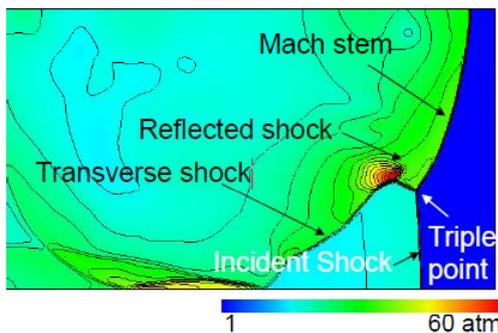
空間スキーム

- 物理量が空間的に急激に変化するので、Harten-YeeのTVD法に代表されるような対流項スキームが良く用いられる。

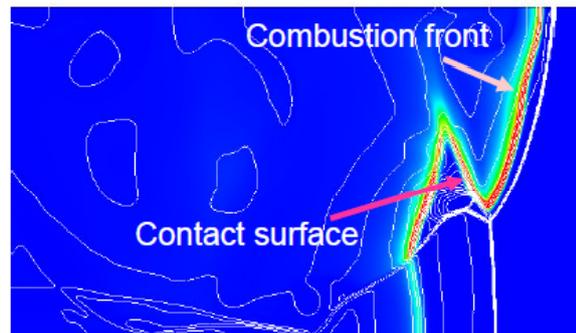
※富塚、毛利、吉田、越、気相デトネーション限界の数値シミュレーション、水素の燃焼と爆発のワークショップ、東京大学 2007.6.30

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

2次元爆轟シミュレーション



(a) 圧力分布



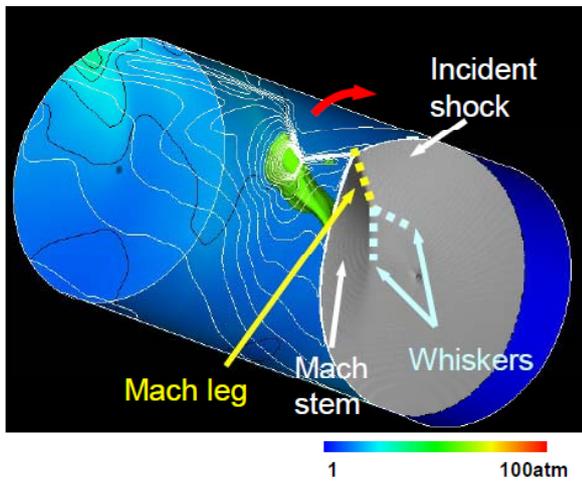
(b) heat release(color) と密度分布 (white) を重ねて書いた分布

対流項スキーム：Harten-Yee, non-MUSCL modified flux type TVD scheme
時間スキーム：Semi-implicit technique

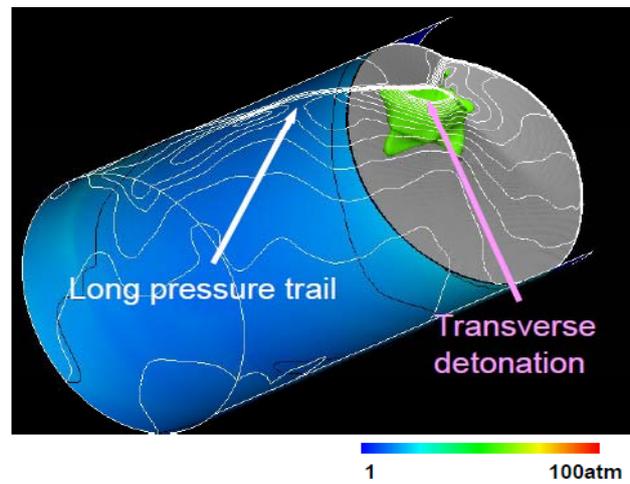
※坪井伸幸、林光一、3次元爆轟現象の数値解析、ながれ26(2007)183-192

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

3次元爆轟シミュレーション



(a) 前方視



(b) 後方視

円管内を伝播するスピンドトネーション圧力分布

※坪井伸幸、林光一、3次元爆轟現象の数値解析、ながれ26(2007)183-192

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

爆燃シミュレーション

-解析手法と解析事例

予混合燃焼シミュレーション

- 質量保存式

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot \rho\mathbf{v} = 0$$

- 運動量保存式

$$\partial\rho\mathbf{v}/\partial t + \nabla \cdot \rho\mathbf{v}\mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \sigma + \rho\mathbf{g}$$

- エネルギー保存式

$$\partial\rho E/\partial t + \nabla \cdot (\rho E + p)\mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{q} + m_0 E_f \dot{\rho}_B$$

- 状態方程式

$$p = \rho RT$$

- 乱流モデルに標準k-ε2方程式モデルを採用

予混合燃焼シミュレーション

- 未燃ガス質量保存式

$$\partial\rho m/\partial t + \nabla \cdot \rho m\mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{F} - m_0 \dot{\rho}_B$$

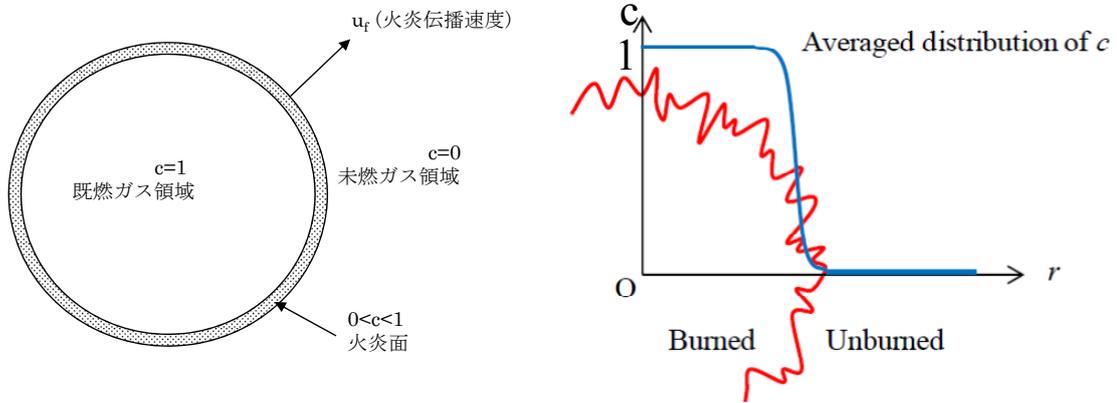
- 既燃ガス質量保存式

$$\partial\rho c/\partial t + \nabla \cdot \rho c\mathbf{v} = \dot{\rho}_B$$

不均一濃度
を考慮

乱流燃焼モデルー反応進行度モデル

Zimontらによる反応進行度モデルは反応進行度 c を導入することにより火炎面の存在確率密度を考え、 c の輸送方程式を解くものである。 c は0で未燃、1で既燃状態であり火炎面は $0 < c < 1$ の領域に存在することになる。



反応進行度モデル概念図

※富塚、清水、桑名、土橋、越、数値シミュレーションによるDMEの予混合火炎伝ば機構の解明、第47回燃焼シンポジウム 2009年

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

乱流燃焼速度

反応進行度の輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla(\rho v c) = \nabla\left(\frac{\mu_t}{Sc} \nabla c\right) + \rho S$$

$$\rho S = \rho_u S_T \nabla c$$



- V : 流速
- μ_t : 渦粘性係数
- Sc : 乱流シュミット数
- S : 反応進行度による生成項
- ρ_u : 未燃ガス密度
- S_T : 乱流燃焼速度

反応進行度モデルにおける生成項に乱流燃焼速度を導入

※富塚、清水、桑名、土橋、越、数値シミュレーションによるDMEの予混合火炎伝ば機構の解明、第47回燃焼シンポジウム 2009年

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

乱流燃焼速度モデル 例-1

乱流燃焼速度式

$$S_T = S_l \left\{ 1 + k_1 (u'/S_l)^n \right\}$$

k_1, n : モデル定数
 u' : 乱流強度

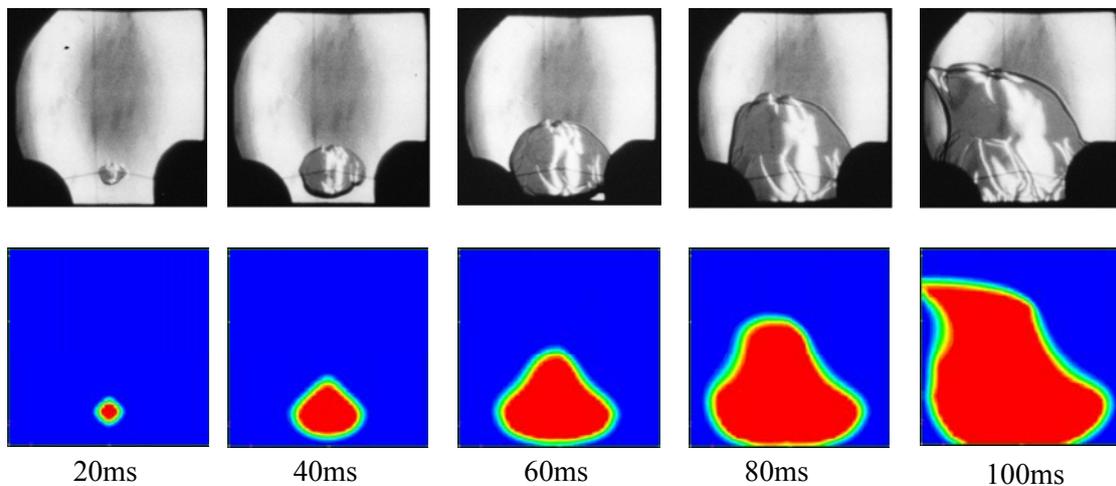
乱流燃焼速度 S_T は
 乱流強度を用いることで
 乱流の生成のみ考慮

乱流強度 u' は乱流エネルギー k を用いて

$$u' = \sqrt{\frac{2}{3}k}$$

※U.Bielert, M.Klug, and G.Adomeit: "Application of Front Tracking Techniques to the Turbulent Combustion Processes in a Single Stroke Device", COMBUSTION AND FLAME 106,pp.11-28 (1996).

小規模爆発実験比較解析結果

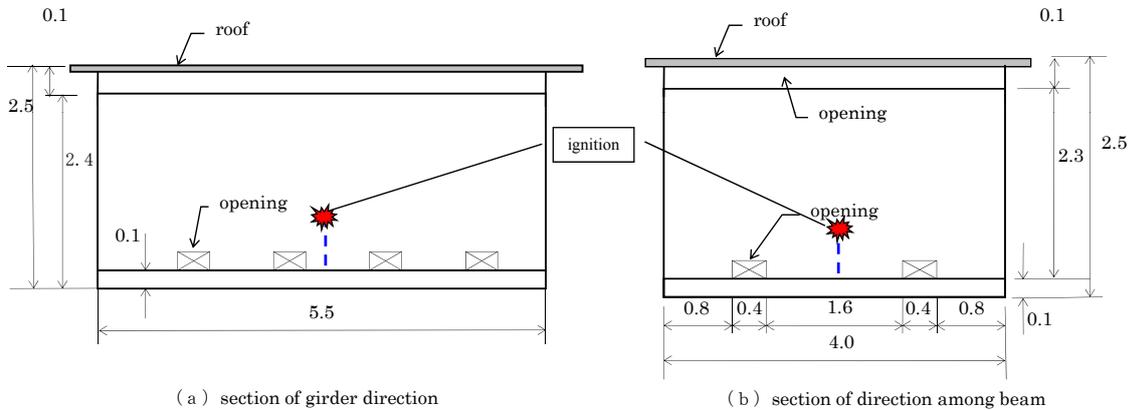


実験結果と計算結果の比較
 (上段: 実験結果[シュリーレン写真]、下段: 計算結果[反応進行度])

※高橋, 富塚, 永野, 高桑, 武井, 越, 土橋, 山鹿, 難波, 「実規模LPガス漏洩・爆発評価システムの開発」, Science and Technology of Energetic Materials, Vol.65, No.4, p.116-124 (2004)

大規模爆発実験比較解析結果

LPG容器置き場爆発実験



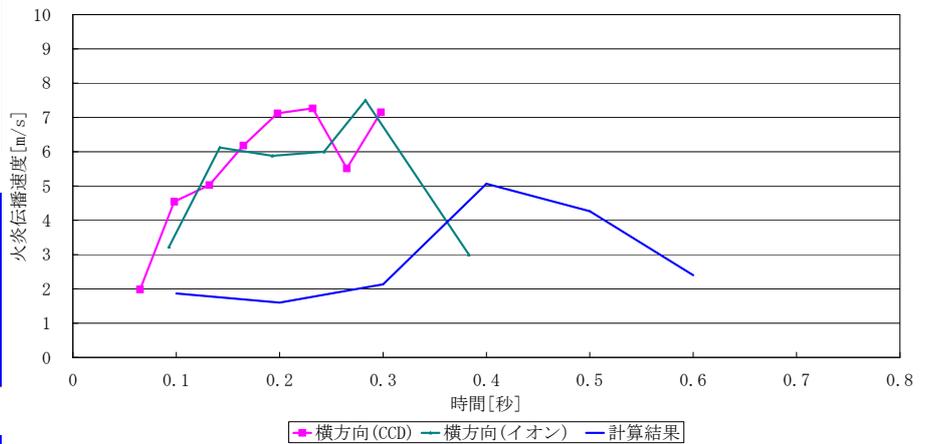
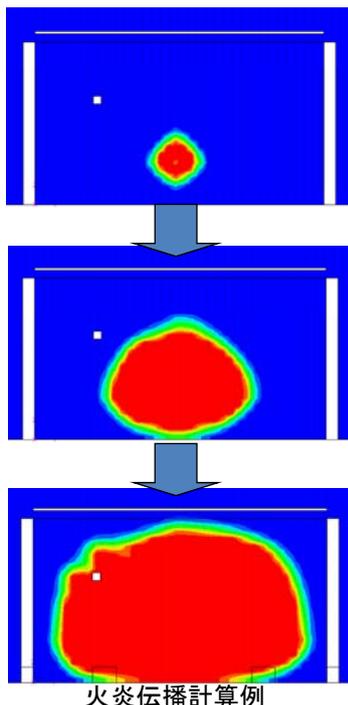
LPG容器置き場内爆発実験

壁面：コンクリートブロック、屋根：スレートのLPG容器置き場内にLPGを注入
室内中央、高さ50cmの点で着火・燃焼

※高橋、富塚、永野、高桑、武井、越、土橋、山鹿、難波、「実規模LPガス漏洩・爆発評価システムの開発」、Science and Technology of Energetic Materials, Vol.65, No.4, p.116-124 (2004)

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

大規模爆発実験比較解析結果



火炎伝播速度比較結果

火炎伝播速度が過小評価される

※高橋、富塚、永野、高桑、武井、越、土橋、山鹿、難波、「実規模LPガス漏洩・爆発評価システムの開発」、Science and Technology of Energetic Materials, Vol.65, No.4, p.116-124 (2004)

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

乱流燃焼速度モデル 例-2

爆発実験データとフラクタル理論から乱流燃焼速度式を構築
(自発的な火炎の乱れを考慮)

$$R = R_1 + At^{3/2} \quad \text{火炎半径}$$



漸近解析により導出

$$R = R^* + c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^2 \frac{S_L^2 (t - t^*)^{3/2}}{\sqrt{\kappa}}$$



火炎伝播速度式の導出

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{3}{2} c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^2 \frac{S_L^2}{\sqrt{\kappa}} t^{1/2}$$

ε: 膨張率
κ: 熱拡散率
c_g: モデル定数
ρ_u, ρ_b: 未燃・既燃ガスの密度
S_L: 層流燃焼速度

※ Yu. A. Gostintsev, et. al., 'Self-Similar Propagation of a Free Turbulent Flame in Mixed Gas Mixtures', Combust. Explosions and Shock Waves, 24, 563(1988)

乱流燃焼速度モデル 例-2

乱流燃焼速度S_Tと火炎伝ば速度 dR/dt

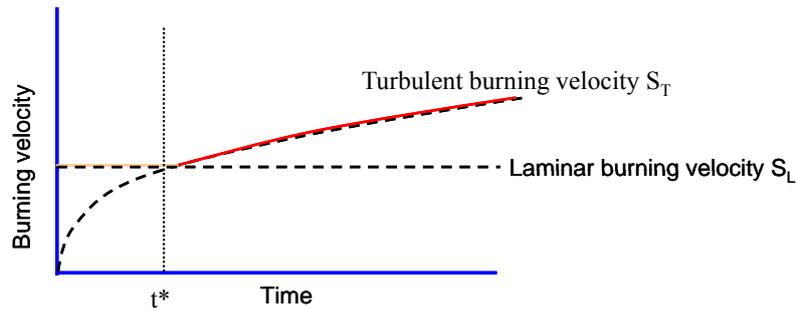
$$\frac{\partial R}{\partial t} = \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right) S_T$$



$$S_T = \frac{3}{2} c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right) \frac{S_L^2}{\sqrt{\kappa}} t^{1/2}$$

※Tomizuka T, Kuwana K, Shimizu K, Mogi T, Dobashi R, Koshi M. Estimation of turbulent flame speed during DME/air premixed gaseous explosions. J Loss Prevent Proc Ind 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.09.004>.

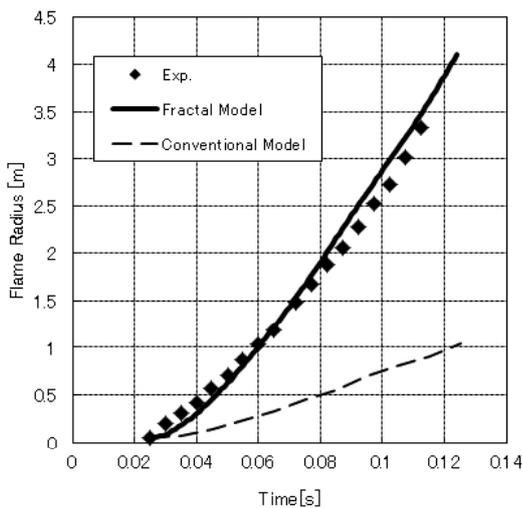
乱流燃焼速度モデル 例-2



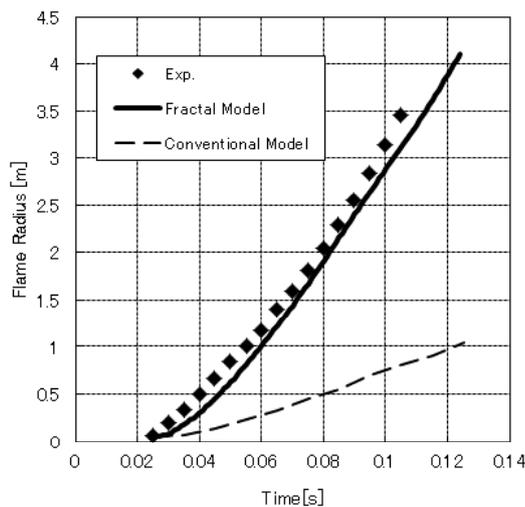
$$\rho S = \rho_u U_T \nabla c \quad \left\{ \begin{array}{ll} U_T = S_L & : t < t^* \\ U_T = \frac{3}{2} c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^2 \frac{S_L^2}{\sqrt{K}} t^{1/2} & : t \geq t^* \end{array} \right.$$

※Tomizuka T, Kuwana K, Shimizu K, Mogi T, Dobashi R, Koshi M. Estimation of turbulent flame speed during DME/air premixed gaseous explosions. J Loss Prevent Proc Ind 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.09.004>.

水素-空気大規模爆発解析～比較解析結果



初期水素濃度：30.7[vol%]



初期水素濃度：41.0[vol%]

火炎半径経時変化

※Tomizuka T, et al, A study of numerical hazard prediction method of gas explosion, International Journal of Hydrogen Energy (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.029>