

## 船用ディーゼル機関における水混合エマルジョン燃料 油滴の燃焼過程の基礎モデル

石田武志<sup>1†</sup>

### Cellular Automata Model to Calculate Combustion Process of Water Emulsified Fuel Used with Marine Diesel Engine

Takeshi Ishida<sup>1</sup>

**Abstract** : Previous models concerning diesel spray are impossible to calculate micro-explosion process and combustion process of water emulsified fuel. My study constructed mesoscale discrete particle models to simulate complex motion of emulsified fuel particles. Two models were constructed; micro-explosion process model and combustion process model of fuel droplet. These models based on cellular automata model which has a feature of both time and space discretization. Micro-explosion model simulates the microparticulated motion of vapor explosion. Furthermore combustion model can trace the combustion process of each microparticulated fuel droplet. My results show that emulsified fuel droplets burned rapidly rather than normal fuel droplets. Although these are simple models, it is thought that my models will be the base model to consider water emulsified fuel combustion theoretically.

**Key words** : Diesel engines, Diesel spray model, Water emulsified fuel, Cellular automata model, Micro-explosion

### 緒 言

船舶からの排気ガス規制は、IMO（国際海事機関）において1990年代から議論が進められ、船舶からの海洋汚染などを防止する国際条約である「海洋汚染防止条約（MARPOL条約）」に附属書VI〔大気汚染防止〕を追加する形で1次規制が設定された。窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）排出量の1次規制は2005年5月19日に発効され、その後2008年10月に採択された改正MARPOL条約附属書VIに2次規制が盛り込まれた。さらにNO<sub>x</sub>規制は2016年から3次規制が適用される予定であり、船用ディーゼル機関からのさらなるNO<sub>x</sub>低減が求められている状況である。

これらの規制に対応する技術としては、選択触媒還元方

式脱硝装置（SCR：Selective Catalytic Reduction）、排気再循環（EGR：Exhaust Gas Recirculation）システム、水エマルジョン燃料（Water emulsified fuel）などが検討されている。この中でも、水エマルジョン燃料は、NO<sub>x</sub>の低減に加えて、粒子状物質（PM）の低減、燃費改善効果も得られ、対策コストの面からも既存船において有望な対策と考えられている。

水エマルジョン燃料は、燃料油に水と界面活性剤（界面活性剤を使用しない場合もある）を添加し、機械的に攪拌して燃料中に微細粒子化した水を分散させたものである。水エマルジョン燃料には、油中に微小な水粒子が分布している「微小水粒型（water in oil; W/O型）」と、水中に微小な油粒子が分布している「微小油粒型（oil in water; O/W

<sup>1</sup> 水産大学校海洋機械工学科（Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University）

<sup>†</sup> 別刷り請求先（corresponding author）：ishida@fish-u.ac.jp

型)」がある。実用のエマルジョン燃料では、水の添加割合が20～30%のものも多く、この場合、油分が多いため微小水粒(W/O)型となる。

水エマルジョン燃料を船用エンジンに適用した事例は数多く報告<sup>1)</sup>などされている。これらの既往研究において、水エマルジョン燃料の船用ディーゼル機関への適用効果として、水の添加割合を増加させると直線的にNOxやPMが低減することが多く報告されている。例えば文献<sup>1)</sup>では、50%の水添加で30%のNOx低減が示されている。また燃料消費率に関しても、水の混合により燃費の改善が報告されており、改善効果は、0～1%程度である<sup>1)</sup>。また、文献<sup>2)</sup>では1～4%程度の燃費改善が報告されている。

このようなエマルジョン燃料によってNOx、PM、燃料消費率が改善される機構は、一般に以下のように考えられている。微小水粒(W/O)型の水エマルジョン燃料中においては、燃料の油滴中に数～数十 $\mu$ m程度の粒子化された水が存在するという形態となっている<sup>3)</sup>など。これをディーゼル機関において噴霧燃焼させた場合、シリンダ内に噴霧された燃料油滴中に水粒子が含まれた状態になる。シリンダ内の高温・高圧環境下において、まず水粒子が爆発的に蒸発・膨張し(マイクロ爆発過程)、その周囲の燃料油を飛散せて、燃料を微粒化させることにより、油粒子がすばやく蒸発し、可燃性の混合空気が形成され、燃焼効率が高くなり、燃料消費率が改善される。同時にエマルジョン燃料中の水分が蒸発するため燃焼温度が低く保たれるため、NOxの生成が抑制される。また燃焼効率が高くなることにより、未燃分の燃料が減り、PMが減少すると考えられている。

一方でシリンダ内における水エマルジョン燃料の挙動および燃料過程は複雑であり、水の添加割合と環境負荷低減効果、および燃費向上効果のメカニズムを定量的に予測するモデルが構築されていない状況である。本研究は、微粒化された水エマルジョン燃料油滴をモデル化し、その粒径分布や油の蒸発過程などをセルオートマトンモデルによりモデル化することで、燃費改善効果の定量的な考察の可能性を示すことを目的としたものである。

ディーゼル機関の噴霧燃焼過程のシミュレーションモデルは数多く報告されている<sup>4)~7)</sup>など。これらのモデルは、シリンダ内の流れについては、ナビエストークス方程式を数値的に解く方法が用いられ、乱流成分については様々な乱流モデル(LES等)が用いられている。シリンダ内に噴霧された燃料油の挙動については、燃料ノズル出口から微粒化された油滴群が流れによって拡散していく過程を離散

油滴モデル(Discrete Droplet Model)によりモデル化している。噴霧内に存在する油滴数は $10^{14}$ ～ $10^{16}$ 個のオーダーといわれているが、この全ての粒子の運動を解くことは計算機の性能上困難であり、一般に1,000～10,000個程度のパーセルに分割し、個々のパーセルの動きを解いていく。また、油滴は拡散する過程で分裂し微細化していく。この過程のモデル化は、TABモデル<sup>7)</sup>や、WAVEモデル<sup>9),10)</sup>が標準的に用いられている。TABモデルは、噴孔径と同じサイズの液滴を噴霧し、空気抵抗による液滴のねじれと振動をばね系として計算し、表面張力との関係により液滴を分裂させるものである。WAVEモデルは、噴孔からシリンダ内に入った燃料油の液柱表面に発生する波動によって、表面の不安定性を求め、液柱の分裂時間と分裂後の粒子径を求めるものである。さらに燃焼反応においては、Schreiberらの5段階準総括反応モデル<sup>11)</sup>などの燃焼モデルを用いて、計算格子ごとに各種成分の濃度変化を反応速度モデルから計算し、生成物などの見積もりが行われる。ススの形成には、スス形成モデルがいくつか提案されている。以上のようなディーゼル噴霧・燃焼過程のモデル式には、多くの未知の係数が含まれ、様々な実験によりパラメータが調整され、実験データとの整合性が高くなってきており、エンジン開発の現場でも用いられるようになってきている。

一方で、エマルジョン燃料を用いた場合の噴霧・燃焼過程に対しては以上で述べたモデルをそのまま用いることができず、これらの計算を行った報告もみられない。エマルジョン燃料のマイクロ爆発過程をモデル化するためには、モデル式の構築と、パラメータ調整のための多くの実験データが必要であるが、マイクロ爆発過程を詳細にデータ化することは一般に困難である。

マイクロ爆発・燃焼過程は、気液2相の物質が化学変化を伴い急速に変化する複雑な現象であり、一般的な熱や流体の数値シミュレーション(ナビエストークス方程式などの流体支配方程式を数値的に解く方法)を単純に適用することが困難である。マイクロ爆発過程を流体力学的な手法により解いた事例<sup>12)</sup>などがあるが、計算が複雑なため油滴内部の水粒子の数に限界があると考えられる。このような複雑な化学変化を伴う現象をシミュレーションする方法として、粒子法、格子ボルツマン法などがある。そのきわめて単純なモデルとしてセルオートマトン法がある。セルオートマトンモデルは、空間と時間の両方を離散化したモデルであり、空間をセルという区分に分割し、隣接するセル間の状態の遷移でマクロな現象を再現するものである。セル

間の状態の変化は予め定められた遷移ルールに従う。このセルオートマトンモデルにおいて、様々な物理現象や、生物の形態モデルなどが研究されている。

本研究は、2次元セルオートマトンを用いて油滴粒子の蒸発・燃焼過程をあらわす基礎的なモデルを構築したものである。燃焼過程は3次元空間での現象であり、2次元のセルオートマトンモデルでの検討では、3次元モデルと数値が変わってくると考えられるが、本法では、検討手順の有効性を考えるため、2次元で検討することとし、3次元モデルは今後の課題とした。2次元モデルにおいても、3次元と同様な定性的な傾向は見えてくると考えられる。

図1に示すように、既存のディーゼル噴霧モデルの流動過程の空間メッシュの細かさや、油滴パーセルの大きさは、

計算機性能の制約により mm オーダーであるが、油滴 1 つ 1 つの現象や PM の大きさは、 $\mu\text{m}$  のオーダーであり既往モデルで油滴の挙動や PM の生成過程を直接モデル化することは困難である。一方で近年、量子化学に基づき燃焼反応を理論的に導出する研究もおこなわれているが、これらの燃焼素過程の現象は nm オーダーの現象をとらえるものである。本研究のセルオートマトンモデルは、 $\mu\text{m}$  オーダーの現象をモデル化するもので、このモデルにより、既往の噴霧燃焼モデルと、量子化学による燃焼モデルの橋渡しをし、統合することが可能であると考えられる。このような統合モデルを進めることにより、将来は、PM の粒子数や粒径分布なども正確に算出できる可能性が高くなると考えられる。

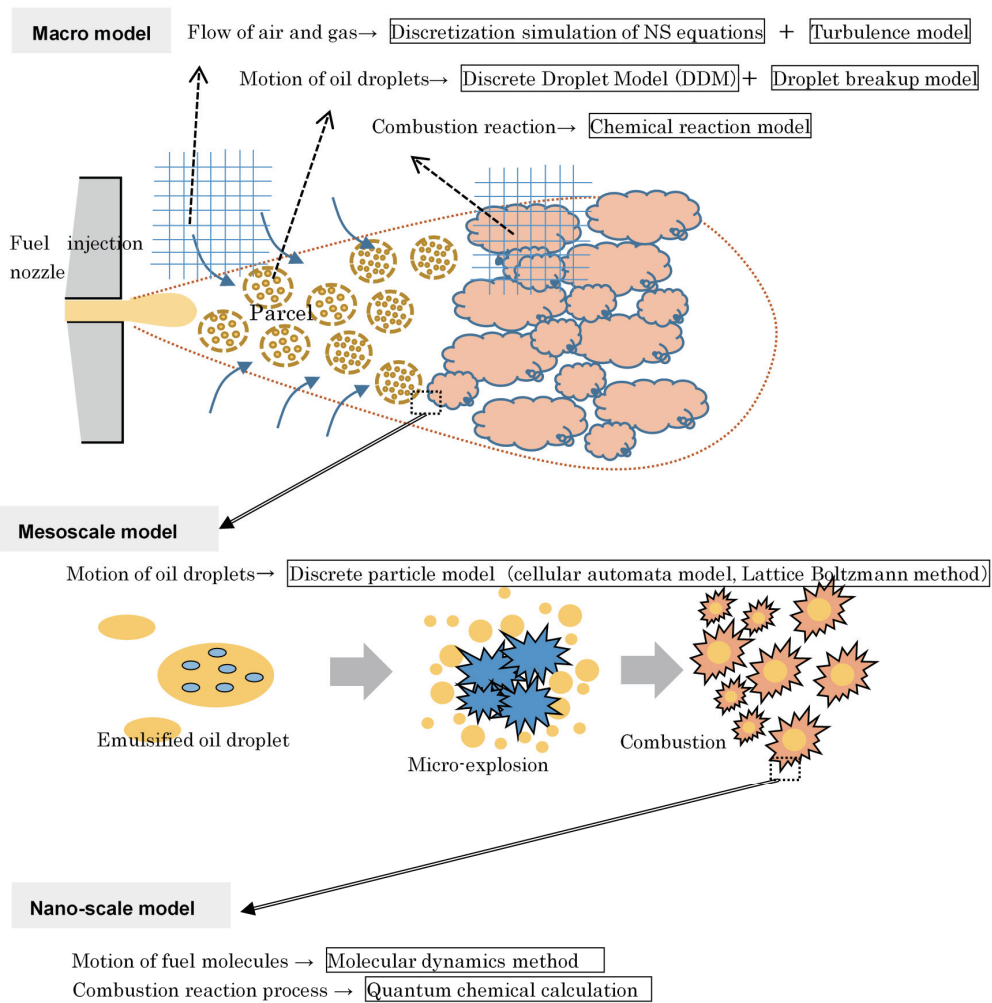


Fig. 1. Relations of my models of this study and other models.

## モデル構築

ディーゼルエンジンはピストンを用い圧縮加熱したシリンダ内の空気に、液体燃料を噴射することで着火させる圧縮着火機関である。噴霧された燃料は油滴となりシリンダ内に拡散・蒸発し、空気と混合され、発火点を越えた時点で自己発火する。通常燃料と水エマルジョン燃料（W/O型）では、噴霧燃焼過程には以下のような相違が生まれると考えられる。

- ①油滴の拡散過程において、油滴のみの場合と油滴中に水が含まれている場合とでは、分裂、微粒化過程が変化する可能性がある。
- ②エマルジョン燃料の油滴のマイクロ爆発過程により、油滴がさらに微小化される。
- ③油滴粒子の大きさの相違と空間分布の相違により、油粒子の蒸発、空気の混合、着火、火炎の伝搬過程の状況が変化する。

本研究では、この②と③について、それぞれセルオートマトンによるモデルを構築した。②と③は別々のモデルとした。これは、マイクロ爆発過程の時間スケールと、油滴の拡散燃焼過程の時間スケールが必ずしも同じでないため、

一定の時間ステップで時間を離散化しているセルオートマトンモデルにおいては、同一に取り扱わないほうがよいと考えたからである。

### エマルジョン燃料の油滴のマイクロ爆発過程のモデル化

#### a. セルオートマトン空間

図2に示すような2次元の正方格子（セル）による空間を考えて、エマルジョン油粒1つのマイクロ爆発過程をシミュレーションするモデルを作成した。セル数は $40 \times 40$ である。各セルは状態値として1つの数値を保持している。状態は、以下のように規定した。この状態量は膨張、移動過程で隣接セルにその一部が渡されるが、計算空間全体では、総量が保持されるとした。

- 0 : 空気
- 0より大きく5000未満 : 燃料油
- 5000以上 : 水蒸気

初期の状態としては、図2に示すように、油滴中に水滴が存在し、その水滴が高温下で蒸発した瞬間を想定した。油滴中の蒸気は膨張し、周囲の油を押し押しのけながら広がっていく過程を考察した。

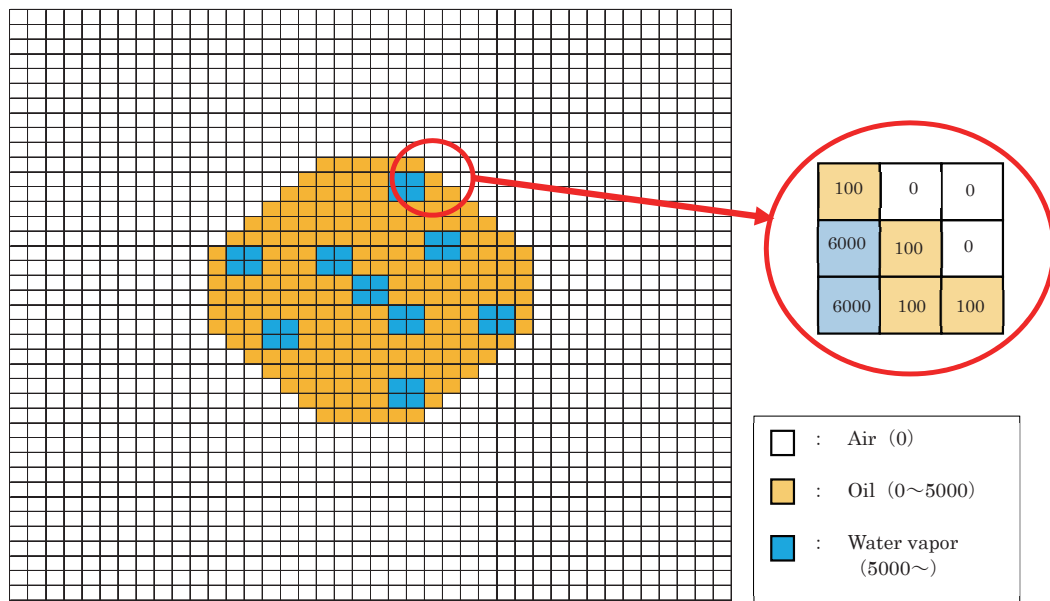


Fig. 2. Modeling of the micro-explosion process by the two dimensional grid and setting method of numerical grid state.

b. 遷移則の設定

与えられた初期状態において、セルごとに以下の遷移則を適用し、空間内の状態を変化させた。各セルの状態は、一つ前のタイムステップにおける自身のセルの状態量と隣接する8つのセルの状態から計算される。遷移ルール中を示す蒸発や油の流動域の概要を図3に示す。

- (遷移ルール)
- 1) 水蒸気膨張域の特定：状態が油のセルで、隣接に水蒸気のセルがある部分を抽出、隣接の水蒸気セルの数をカウント（ただし空気相に隣接する場合は除外）。
  - 2) 水蒸気膨張域への水蒸気状態量の受け渡し；状態が水蒸気のセルにおいて、水蒸気を周囲の水蒸気膨張領域に分割する分割数を求める（水蒸気セルの数も含める）。この分割数と水蒸気セルの状態量から隣接する水蒸気膨張域への水蒸気の受け渡し量を算定し、水蒸気膨張域に数値を受け渡す。

- 3) 油の流動域の特定と油状態量の受け渡し；油が水蒸気に押されて流動するセルを特定し、油セルの状態量を受け渡す。具体的にはまず空気相か油相のセルで、周囲に蒸発領域があるセルを特定する。そして、水蒸気膨張領域に元々ある油を、油流動領域で分割する分割数をもとめ、分割量を算出する。さらに油流動領域への状態量（油量）の受け渡しを行う。
- 4) 水蒸気が空気相に触れた場合（水蒸気相の隣接に空気相がある場合）は空気相内に水蒸気が拡散し圧力が低下するため、油を押しつける手順を除外する。水蒸気セルにおいて、隣接する空気セルの数から分割数を算定し、自身の水蒸気量を隣接空気相に分割していく。
- 5) 油相が空気相を押し広げる過程；空気相に接している油相で、油量が100以上の場合は、100を超える分を、空気セルに分配していく。

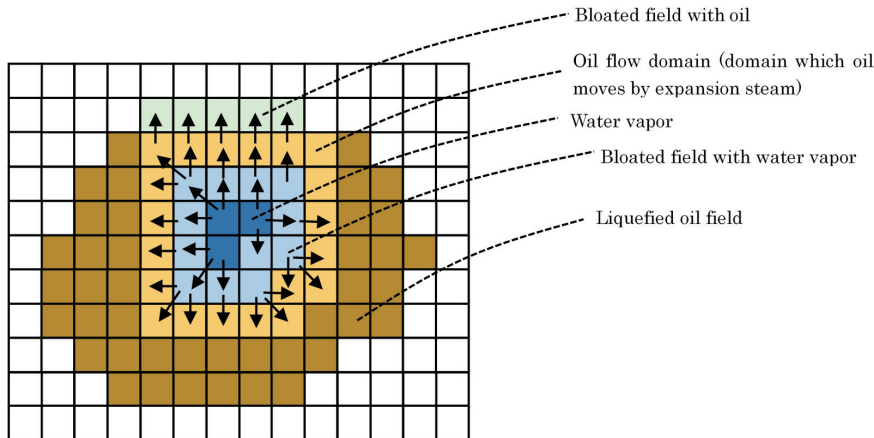


Fig. 3. Domain division of the micro-explosion model in the transition rules

以上のように遷移ルールは、基本的に物質の流動を状態量の受け渡しのみで表現している。実際は、油滴の表面張力、水蒸気の爆発力、油滴内のせん断力などを検討する必要があるが、初期モデルとして位置づけ、単純な流動モデルとした。

c. 初期状態

空間セル中の中央の240セル分を油滴領域として、油セルと水蒸気セルを設定した。油セルの初期値を100、水蒸気セルの状態量の初期値を6,000とした。油滴中の水粒子

の含有率として15%、30%、5%の場合と考え、さらに水粒子を一つのセルとした場合と2×2のセルであらわした場合を検討した。図4に初期値の状態を示す。本モデルは、遷移ルールと初期状態でのみ状態が規定されるため、その他のパラメータは存在しない。

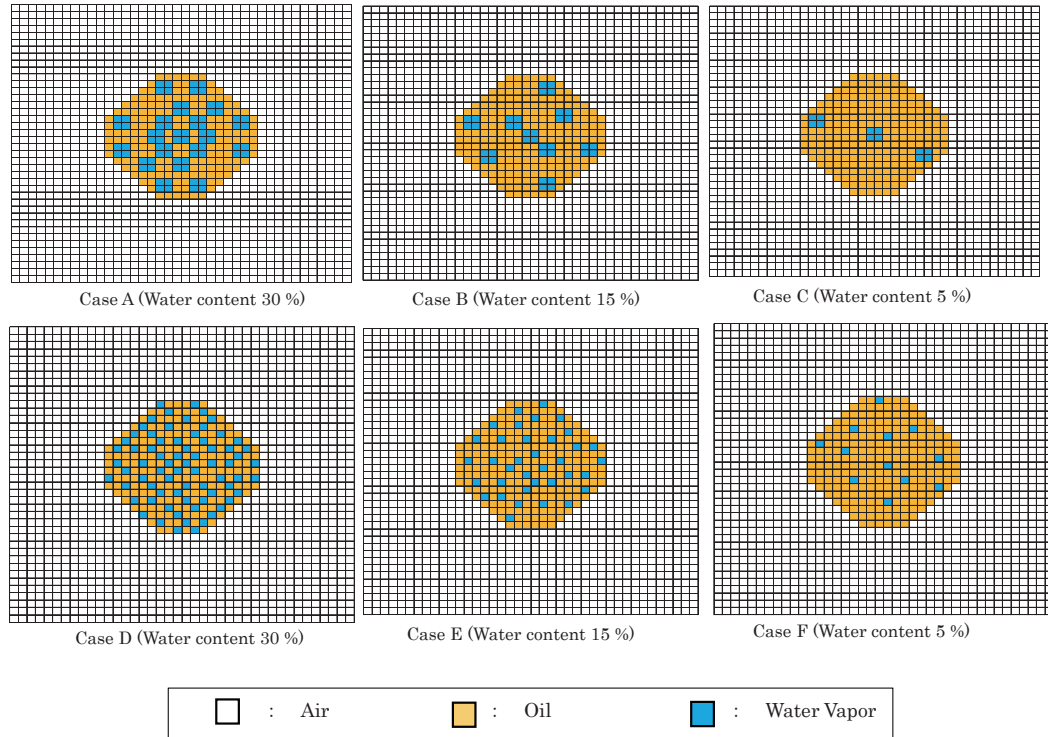


Fig. 4. Initial states of micro micro-explosion model

燃料油滴の燃焼過程のモデル化

a. セルオートマトン空間

図5に示すように、マイクロ爆発過程と同様に40×40の2次元の正方格子空間を考えて、油粒の蒸発、燃焼過程をシミュレーションする簡単なモデルを作成した。初期値と

して、空間内に油粒子を設定した。空気と接する油粒子は油蒸気になり、油蒸気は、隣接するセル間で平均操作により拡散していく。油粒子がある濃度以下になったら（空気と混合され）着火して火炎になる。火炎は、隣接する火炎・空気セル間で平均操作により拡散していく。

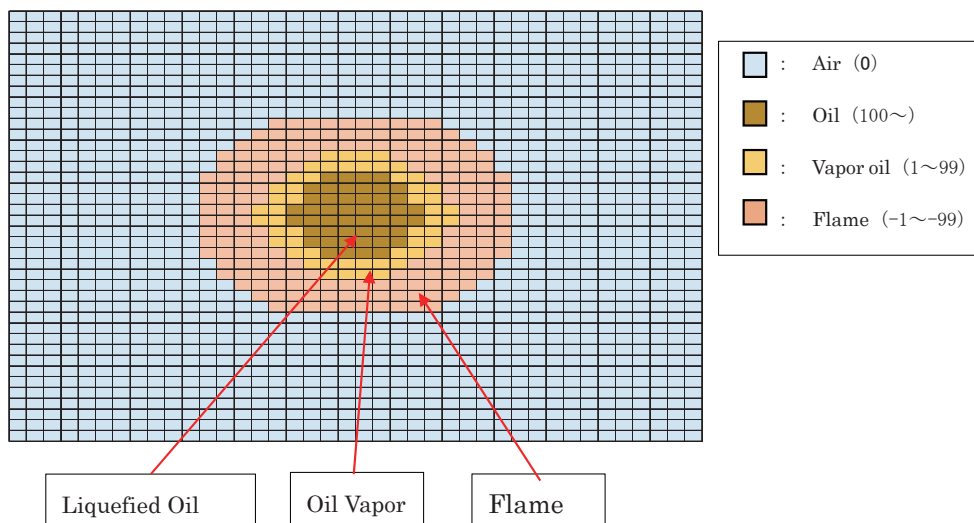


Fig. 5. Modeling of the combustion process model by the two dimensional grid and setting method of numerical grid state.

b. 遷移則の設定

与えられた初期状態において、セルごとに以下の遷移則を適用し、空間内の状態を変化させた。各セルの状態は、一つ前のタイムステップにおける自身のセルの状態量と隣接する8つのセルの状態から計算される。

(ルールの記述)

- 1) 燃料油滴が空気に接する部分が気化されていく。油セルで状態量が100（液体相）のものは、99に置換され、油蒸発相になる。ただし油相のうち周りに油相が7つ以上ある場合は、蒸発しない、それ以外は蒸発して油蒸気（99）になる。これは油の蒸発速度は粒子の表面積に比例して、蒸発量が決まるとの仮定に基づく。粒径が大きいほど全てが蒸発するのに時間がかかり、同じ量の燃料であれば、粒径が細かくなっているほど、蒸発が速い。
- 2) 油蒸気相は周囲の空気層との間で、状態量の平均操作で、拡散されていく。
- 3) 油の蒸気が空気と混合し、一定の濃度以下になると着火すると仮定した。具体的には、油蒸気の状態量が10以下になったら着火して火炎相（状態量×-10）になる。本モデルでは火炎相は負の数字であらわしている。既に火炎相の部分は数字が引き継がれる。

- 4) 火炎相も油蒸気相と同様に空気層に、隣接セルとの平均操作により拡散していく。
- 5) 火炎相の状態量が-1より大きくなる（-1と0の間）になった場合、燃え尽きたとする。

以上のように遷移ルールは、油滴の燃焼を直線的な蒸発、拡散燃焼過程のみで表現している。実際は、燃料噴霧の流動の中で、各油滴同士の間隔も広がっていくと考えられるが、噴霧の中のごく一部をモデル化し、噴霧全体が燃焼する時間スケールよりも小さい個々の油滴の燃焼をみているため、油滴同士の位置が相対的に大きくなっていく効果は検討していない。

c. 初期状態

空間セル中の中央の100セル分を油滴領域として、油セルを設定した。油セルのセル数と同等として、2, 4, 8分割した初期値を考えた（図6）。さらに、マイクロ爆発過程の結果から、油滴の飛散状態を初期値とした場合を計算した。マイクロ爆発過程の結果においては、計算結果をそのまま用いるため、油滴のセル数を正確に100にすることが困難であるが、次項の計算ケースの設定で示すようにおよそ100前後となっている。

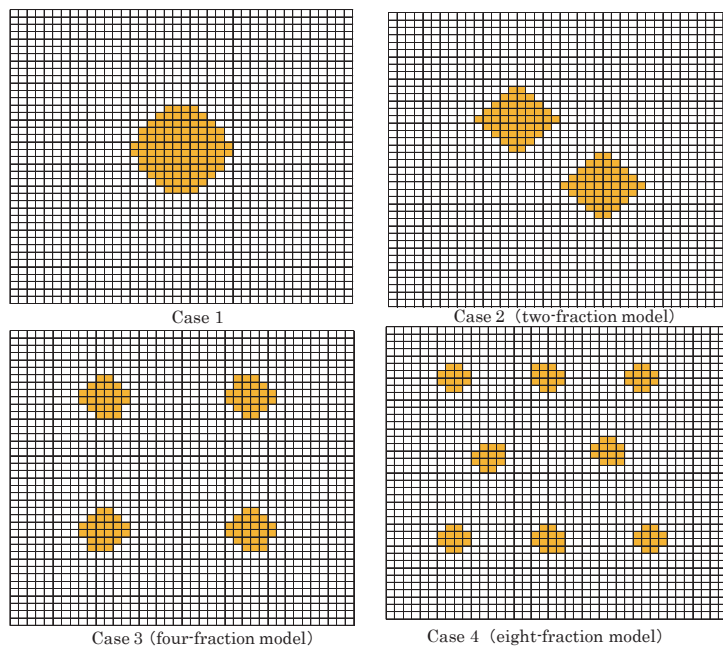


Fig. 6. Initial states of combustion process.

## 計算ケースの設定と評価方法

## a. 計算ケースの設定

遷移ルール中に数値を変更するパラメータ等がないため、計算ケースは、初期状態の設定ケースと一致する。本研究で計算をしたマイクロ爆発過程の計算ケース (Case A ~ F) は表 1 のようになる。さらに燃焼過程の計算ケース (Case 1 ~ 10) をまとめると表 2 のようになる。

## b. 評価方法

マイクロ爆発過程の結果は、爆発後の油滴の分布状態などから定性的な評価、考察を行った。また蒸発・燃焼モデルにおいては、あるタイムステップ間 (1 ~ 5 ステップ及び 1 ~ 10 ステップ) での火炎のセル数で評価した。これは、より短時間で、広い空間に燃焼した火炎が広がるほど、燃焼効率が良く、未燃成分やススが発生しにくいと考えたためである。

Table 1 Calculation cases of micro-explosion model.

Case	Water content	The ratio of number of cells; oil cell number : water vapor cell number
Case A	30% (water particle: 2 × 2 cells)	164 : 76
Case B	15% (water particle: 2 × 2 cells)	204 : 36
Case C	5% (water particle: 2 × 2 cells)	228 : 12
Case D	30% (water particle: 1 × 1 cell)	168 : 72
Case E	15% (water particle: 1 × 1 cell)	204 : 36
Case F	5% (water particle: 1 × 1 cell)	228 : 12

Table 2 Calculation cases of combustion process model

Case	Water content	Number of oil cell	Friction of oil droplet
Case 1	0%	100	1
Case 2	0%	100	2
Case 3	0%	100	4
Case 4	0%	100	8
Case 5	30% (water particle: 2 × 2 cells)	110 (Result of micro-explosion model: Case A)	—
Case 6	15% (water particle: 2 × 2 cells)	87 (Result of micro-explosion model: Case B)	—
Case 7	5% (water particle: 2 × 2 cells)	65 (Result of micro-explosion model: Case C)	—
Case 8	30% (water particle: 1 × 1 cell)	164 (Result of micro-explosion model: Case D)	—
Case 9	15% (water particle: 1 × 1 cell)	161 (Result of micro-explosion model: Case E)	—
Case 10	5% (water particle: 1 × 1 cell)	106 (Result of micro-explosion model: Case F)	—

In case 5-10, the initial number of the oil cells differs each case because these cases used the result of the micro-explosion model.



## シミュレーション結果及び考察

## マイクロ爆発過程モデル

マイクロ爆発過程モデルの結果を図7～9に示す。図7は、ケースAの場合のタイムステップごとの結果である。油滴内の蒸気が膨張し、周囲の油滴を外側に押し出して飛散してく様子が計算できている。油滴内部の蒸気が外部の空気に接すると、膨張が止まるというルールにしているため、3ステップ以後で飛散がとまった状態になる。実際のシリンダ内の流れでは、噴霧の大きな流れや循環流により、この後も油粒子は広がっていくと考えられる。

図8は、初期状態を変えた場合の結果となる。計算ケースA, B, Cの比較では、水含有率が高いほど必ずしも油の微粒子がよく飛散するわけではないことを示唆してい

る。特に水含有率が高い場合は、油滴の中心部の水滴の蒸発爆発が、同時におきするため、相互に力が相殺され、油滴中央部の油が外側に飛散しない現象がみられる。また初期の水粒子の分布によって、油の飛散方向に若干のゆがみがある。

図9に示すように、さらに水粒子を細かくした場合においては、細かくすることで必ずしも飛散状態が良くなるわけではないことが分かる。これは、ケースAと同様に、油滴の細かい水滴同士の蒸発爆発の力が相殺され、油滴中央部が外側に飛散しないためである。実際のシリンダ内の流れでは、噴霧の大きな流れや循環流により、中央部の油粒子の集合体も周囲に広がっていくと考えられるが、これらの検討には更なるモデルの改良が必要である。

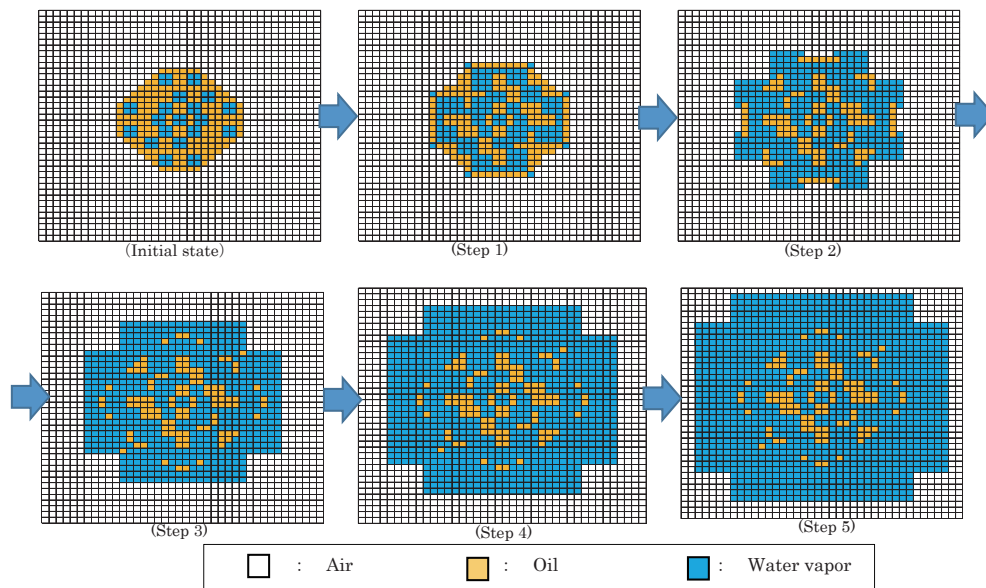


Fig. 7. Simulation results of micro-explosion model (Case E).

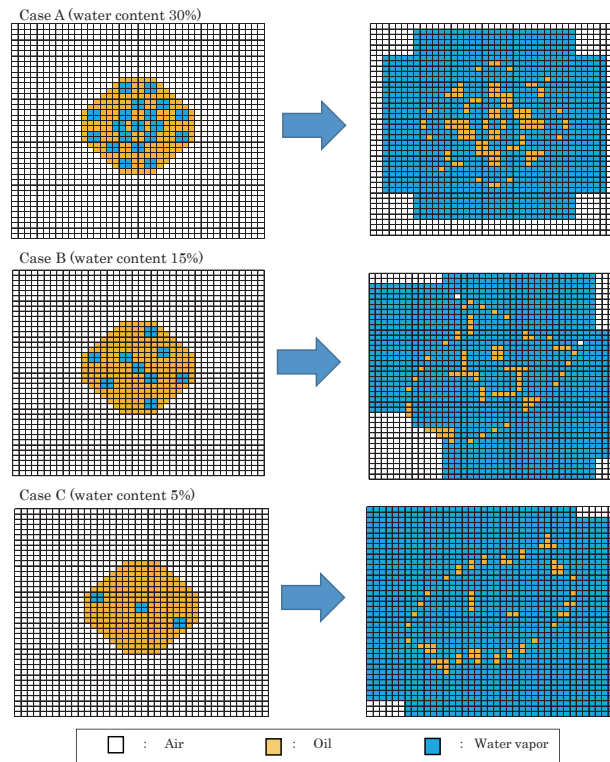


Fig. 8. Simulation results of micro-explosion model (Case D, E, F).

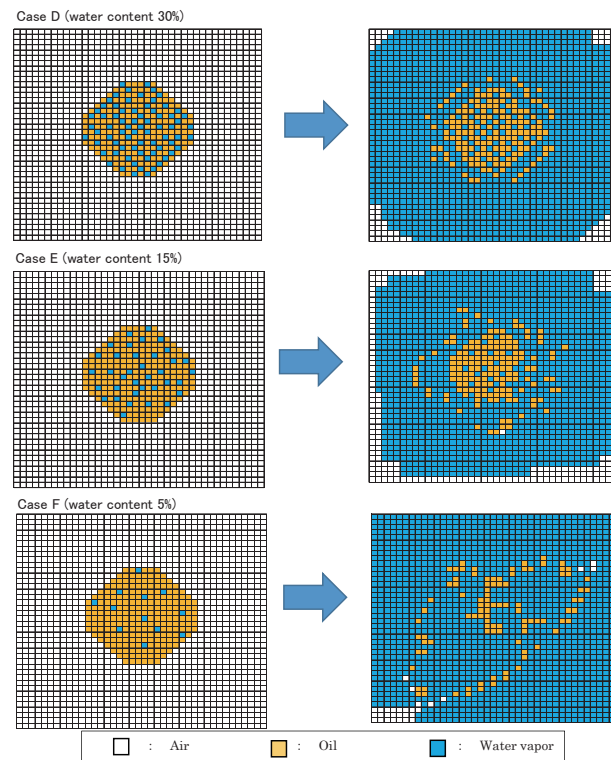


Fig. 9. Simulation results of micro-explosion model (Case A, B, C).

蒸発・燃焼過程モデル

油の油滴径が大きい場合（ケース 1）と、同じ油量で、粒径を半分以下にした場合（ケース 2, 3, 4）の蒸発・燃焼過程を比較すると図 10 のようになる。油粒子の径が小さいほど、拡散が速く、燃焼がすばやく進むことがわかる。

さらに図 11 にマイクロ爆発過程による油粒子分布を初期値として計算した場合を示す。水蒸気は、マイクロ爆発により空間に比較的一様に分布しているとみなして、燃焼過程では水蒸気の存在の影響は考慮せず、油粒の分布のみマイクロ爆発過程のモデルの結果を利用している。

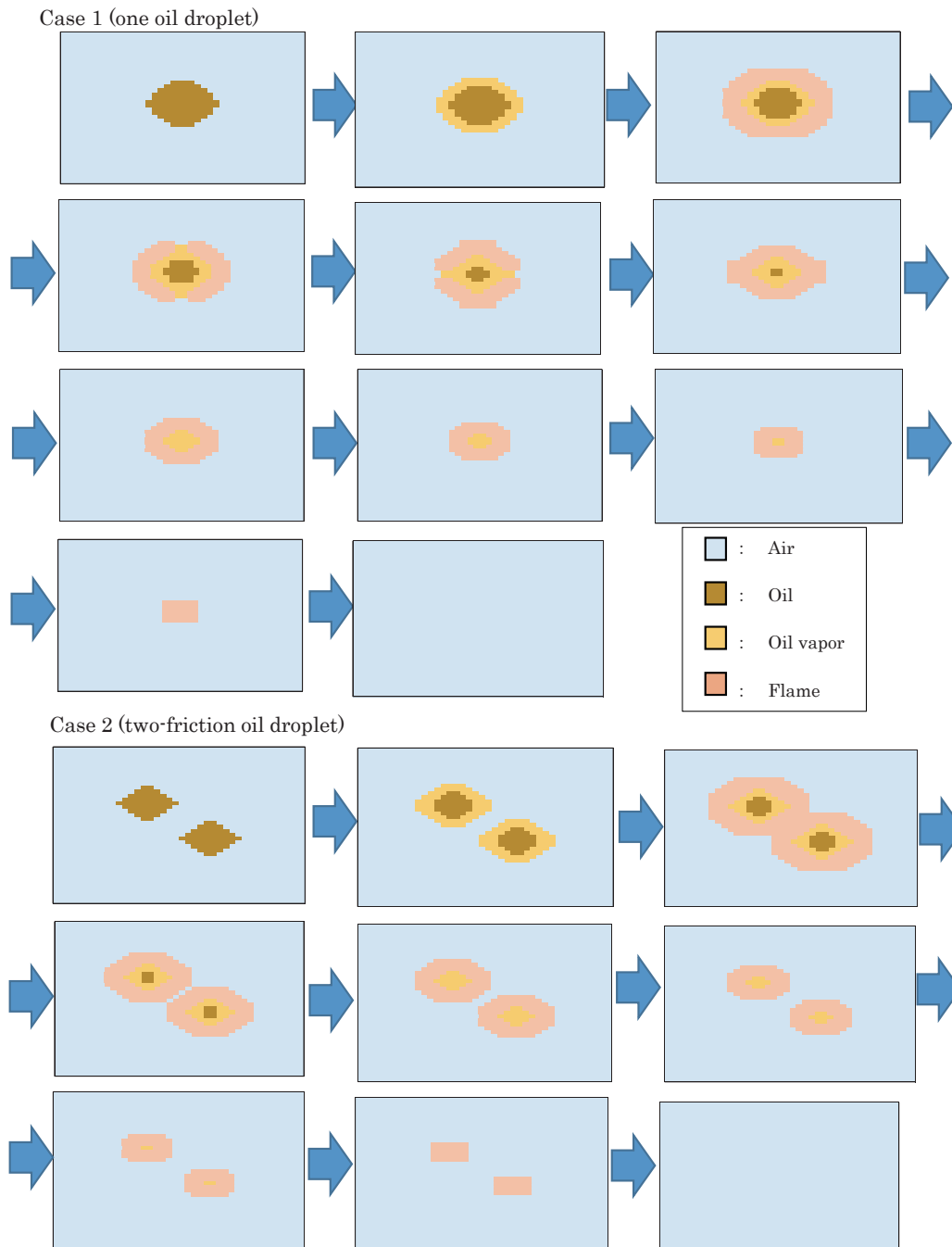


Fig. 10. Simulation results of combustion process model (Case 1-4, Comparison of the combustion process by the difference in oil droplet size)(1).

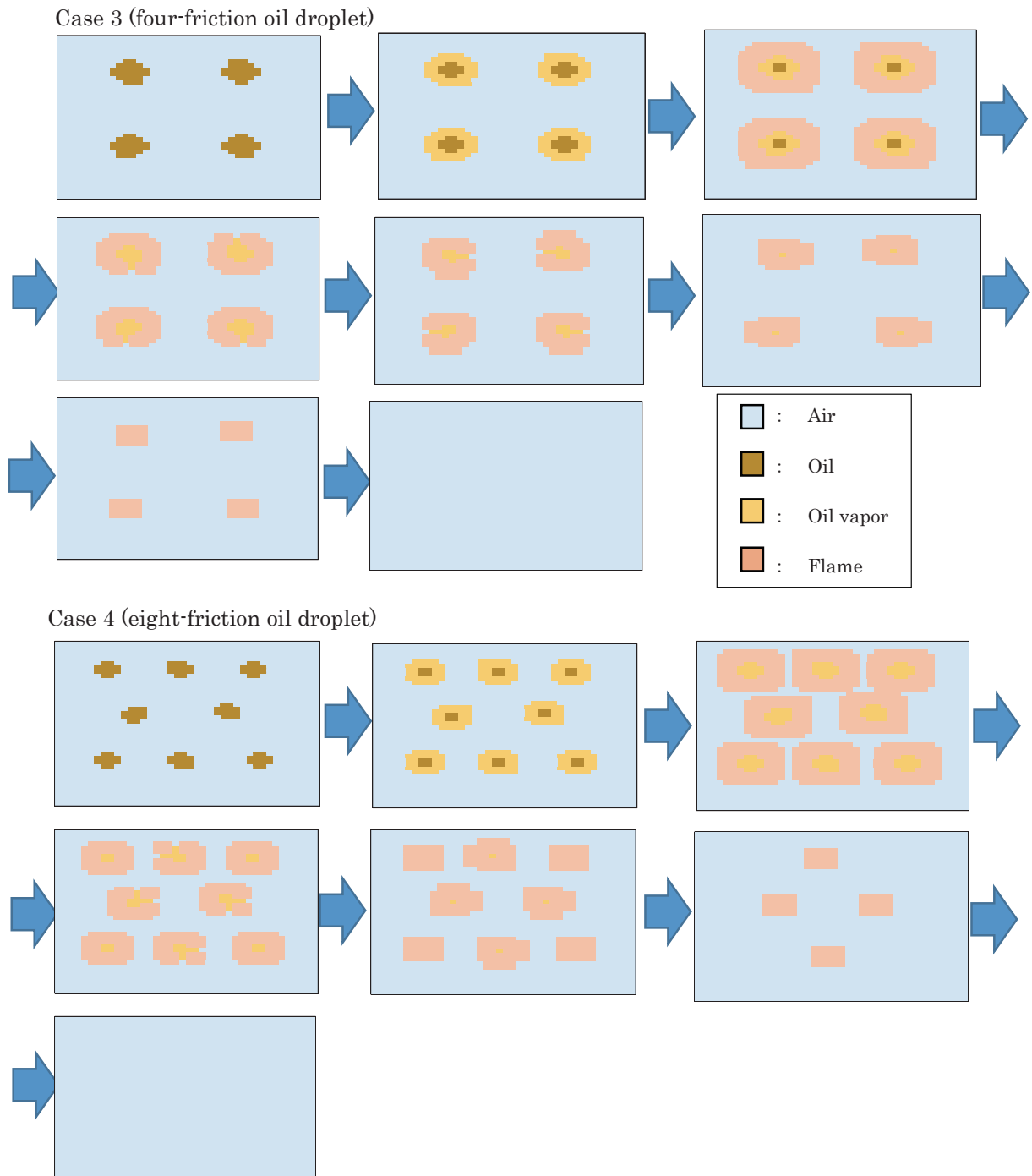


Fig. 10. Simulation results of combustion process model (Case 1-4, Comparison of the combustion process by the difference in oil droplet size) (2).

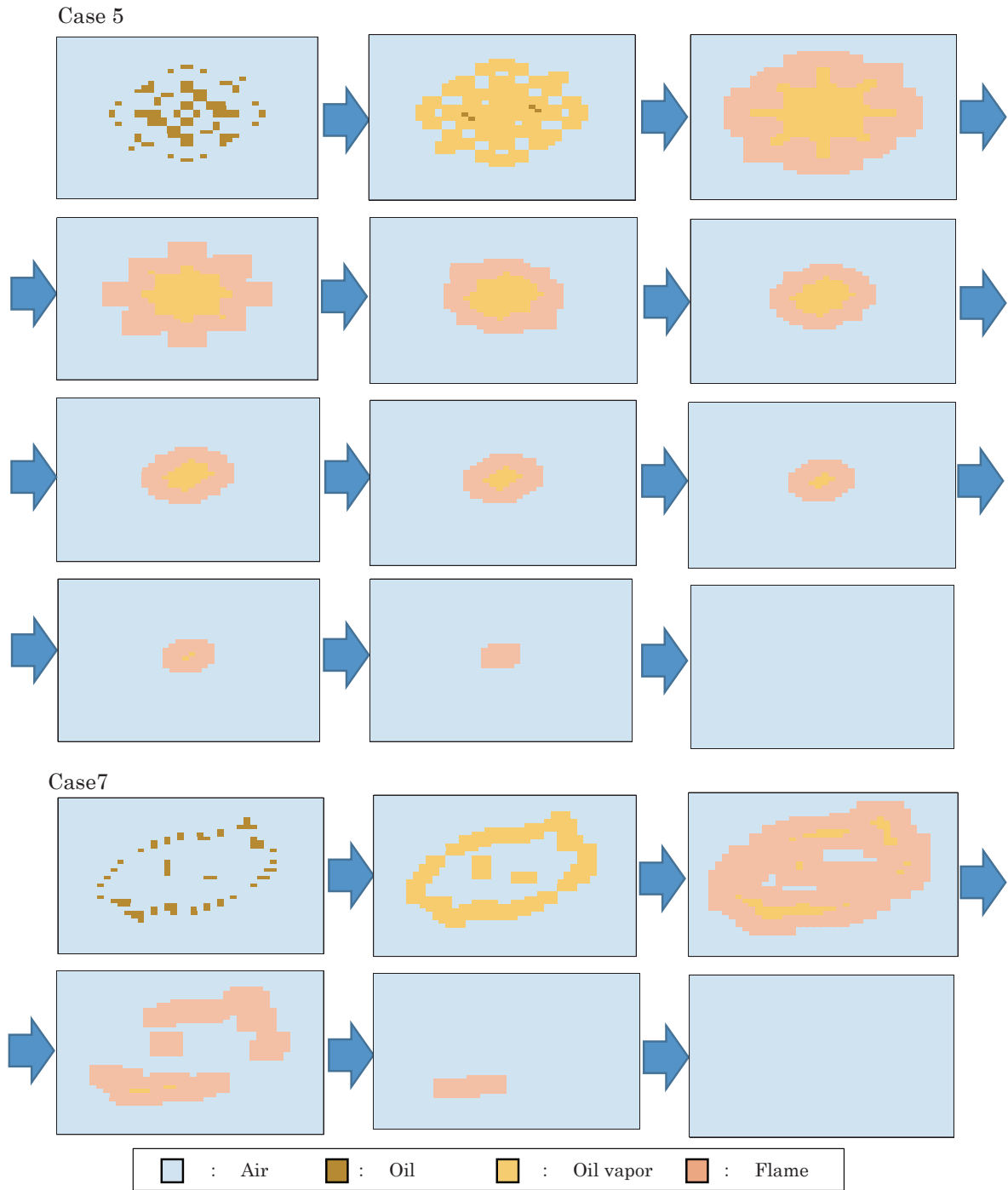


Fig. 11. Simulation results of combustion process model (Case 5, 7, Comparison of the combustion process using the results of micro-explosion model).

## 蒸発・燃焼過程モデルにおける火炎のセル数の推移

各ケースにおけるタイムステップごとの火炎数（火炎状態のセル数）をまとめると表3及び表4のようになり、これらの数値をグラフにまとめると図12～14のようになる。

Table 3 Number of the cells of flame state (Case 1-4).

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
	Oil droplet( one particle)	Oil droplet( two friction particles)	Oil droplet( four friction particles)	Oil droplet( eight friction particles)
Step 0	0	0	0	0
Step 1	0	0	0	0
Step 2	180	284	432	672
Step 3	124	220	292	428
Step 4	128	180	252	364
Step 5	128	140	200	100
Step 6	96	100	100	0
Step 7	76	60	0	0
Step 8	56	0	0	0
Step 9	36	0	0	0
Step 10	0	0	0	0
Step 11	0	0	0	0
Step 12	0	0	0	0
Step 13	0	0	0	0
Step 14	0	0	0	0
Step 15	0	0	0	0
Step 16	0	0	0	0
Total	824	984	1276	1564
(The ratio for case 1)		1.19	1.55	1.90
Total from 0 to 5 steps.	560	824	1176	1564
(The ratio for case 1)		1.47	2.10	2.79
Total from 0 to 10 steps.	824	984	1276	1564
(The ratio for case 1)		1.19	1.55	1.90

Table 3 Number of the cells of flame state (Case 1-4).

	Case 1	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10
	Oil droplet( one particle)	micro- explosion (Water content 30%)	micro- explosion (Water content 15%)	micro- explosion (Water content 5%)	micro- explosion (Water content 30%)	micro- explosion (Water content 15%)	micro- explosion (Water content 5%)
Step 0	0	0	0	0	0	0	0
Step 1	0	0	0	0	0	0	0
Step 2	180	470	742	695	316	425	753
Step 3	124	320	434	358	222	303	519
Step 4	128	182	170	57	183	201	235
Step 5	128	140	0	0	201	160	85
Step 6	96	118	0	0	161	160	61
Step 7	76	96	0	0	160	119	30
Step 8	56	74	0	0	129	146	0
Step 9	36	54	0	0	148	103	0
Step 10	0	34	0	0	114	125	0
Step 11	0	0	0	0	103	94	0
Step 12	0	0	0	0	90	75	0
Step 13	0	0	0	0	65	55	0
Step 14	0	0	0	0	45	35	0
Step 15	0	0	0	0	25	0	0
Step 16	0	0	0	0	0	0	0
Total	824	1488	1346	1110	1962	2001	1683
(The ratio for case 1)		1.81	1.63	1.35	2.38	2.43	2.04
Total from 0 to 5 steps.	560	1112	1346	1110	922	1089	1592
(The ratio for case 1)		1.99	2.40	1.98	1.65	1.94	2.84
Total from 0 to 10 steps.	824	1488	1346	1110	1634	1742	1683
(The ratio for case 1)		1.81	1.63	1.35	1.98	2.11	2.04

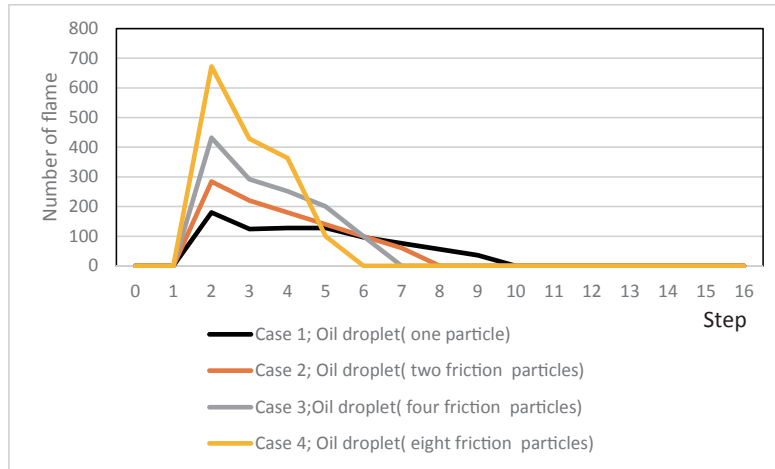


Fig. 12. Number of the cells of flame state (Case 1-4).

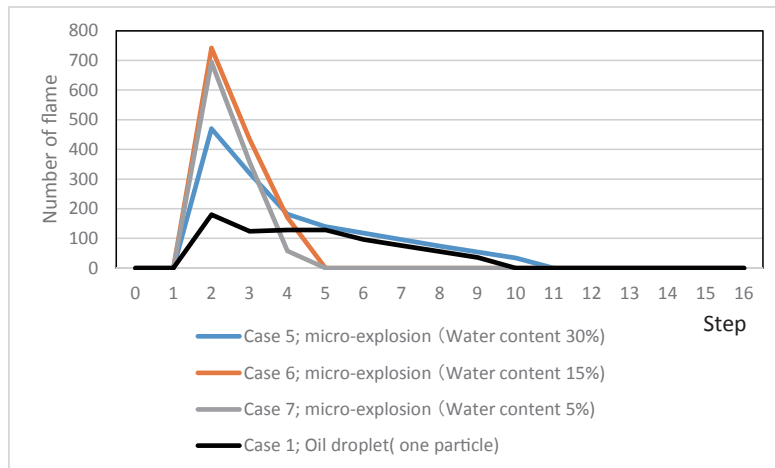


Fig. 13. Number of the cells of flame state (Case 1 and 5-7).

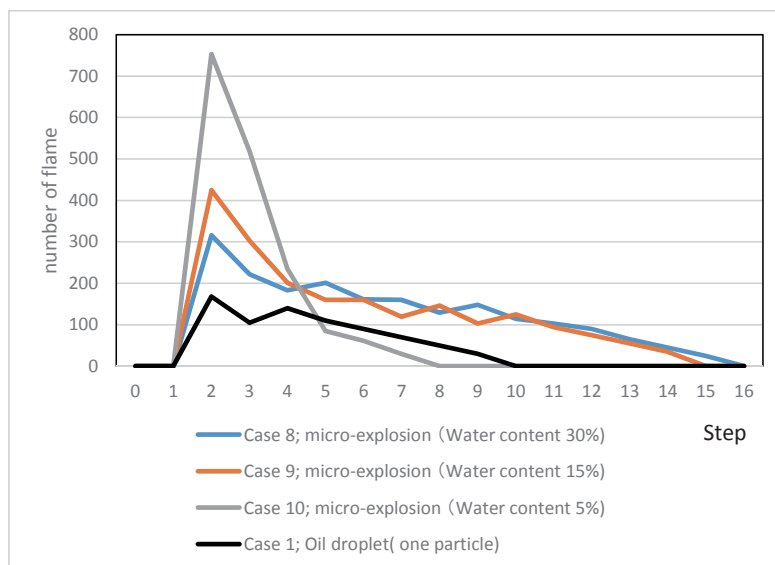


Fig. 14. Number of the cells of flame state (Case 1 and 8-10).

図 12 において、ケース 1 に対して、粒径を細かくした場合（ケース 2～4）は、蒸発・燃焼が速く進み、火炎も短時間で空間内に広がるため、火炎セル数の総数は、19%から 90%増加（表 3）する（≒燃焼効率がよい）ことがわかる。特に粒径を細かくした場合は、1～5 ステップに火炎が集中しており、短時間で燃焼が進んでいることがわかる。図 13 において、水を 3 割添加しマイクロ爆発させたケース 5～7 とケース 1 を比較した場合、燃料油量自体は 5～30% 少なくなるものの火炎数は多くなることがわかる。また油滴が蒸発する時点では、水粒子が完全に蒸気となって空間に広がっており（図 7～9 に示すように水蒸気が空間全体に広がっている）、NOx を生成する高温領域を少なくするプロセスも定性的ながら確認することができる。このように単純なモデルであるが、水エマルジョン燃料における大気汚染物質の低減と燃費向上の定量的な検討の可能性を示すことができたと考えられる。図 14 においてケース 8, 9 の場合は、10 ステップ以降も火炎が残った状態になる。これは、マイクロ爆発過程で、微粒化した油滴が中央部に集中しており、この部分の拡散燃焼に時間がかかったためである。

以上のように水エマルジョン燃料によりマイクロ爆発過程を経ることで、油が微細粒子化し、燃焼効率が高くなると考えられる。本研究のモデルは、2 次元モデルであり、シリンダ内の 3 次元空間では、水粒子や油粒子の蒸発面積などが異なるため、数値に言及した結論をこれ以上導くことは困難であるが、2 次元と 3 次元という相違があるものの、実験で報告されている燃費向上の機序を考察することが可能となった。今後、より詳細な 3 次元モデルを構築することにより、マイクロ爆発過程、蒸発・燃焼過程の挙動の可能性を明らかにすることが可能であると考えられる。

## 結 論

従来のディーゼル噴霧モデルでは、水エマルジョン燃料のマイクロ爆発過程、燃焼過程を表すことができない。これに対して本研究は、水エマルジョン燃料の油滴の挙動を表すため、メソスケールの離散粒子モデルを考案した。具体的には 2 次元セルオートマトンを用いて油滴粒子の蒸発・燃焼過程をあらわす基礎的なモデルを構築した。水粒子を含む油滴が、水の蒸発により飛散する過程をトレースするモデルを作り、油滴の微粒化を観察した。さらに、油滴の燃焼モデルを考案し、燃焼火炎の分布を計算した。水エマルジョン燃焼による燃焼は、従来の噴霧油滴よりも、短

時間に燃焼し、多くの火炎を短時間に集中させることができることが計算できた。これは、水エマルジョン燃焼による燃費改善効果を理論的に検討する基礎になると考えられる。非常に簡易なモデルであるが、今後は油の分布密度、粒径、蒸発・拡散スピードなどを評価することで、より詳細な検討が可能になると考えられる。

今後の課題としては、以下の点があげられる。

- ・ 3 次元での計算モデルを考える必要がある。
- ・ 水の蒸発・拡散も合わせたシミュレーションを行い、NOx 低減効果の評価ができるようにする（燃焼温度の分布も評価できるようにする）
- ・ 物理的な数値を実態と整合させていく（油滴粒子径、水粒子系、蒸発拡散速度、燃焼速度など）
- ・ シリンダ内の大きな流動の中で相対的に粒子間の広がっていく効果をモデルに含める。

## 引用文献

- 1) 東田正憲, 中村卓朗, 大西郁美, 吉澤克浩, 細野隆道: EGR と水エマルジョン燃料の組み合わせによる NOx 低減技術, マリンエンジニアリング, **48**(6), 747-752 (2013)
- 2) 広瀬弓夫, 豊田済, 松原勇二: エマルジョン燃料による燃費節減と波及効果について -- 船用大形ディーゼル機関の場合, 日本船用機関学会誌, **19**(1), 47-52 (1984)
- 3) 森本稚仁, 岩本匡弘, 廣川翼, 淵端学: エマルジョン燃料の分散水滴径分布がディーゼル燃焼排出ガスに及ぼす影響, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, **85**, 12-11 (2010)
- 4) Ithnin, A. M., et al., : Combustion performance and emission analysis of diesel engine fuelled with water-in-diesel emulsion fuel made from low-grade diesel fuel, Energy Conversion and Management **90**: 375-382 (2015)
- 5) 小島宏一, 川那辺洋, 石山拓二, 小島宏一: ディーゼル噴霧における混合気形成および着火の LES 解析, 日本機械学会論文集 B 編, **78**(787), 652-662 (2012).
- 6) 町田和也, 羽鳥, 総一, 堀司, 千田二郎: LES 解析を用いたディーゼル噴霧における分裂モデルの最適化, 微粒化, **20**(70), 87-95 (2011)
- 7) 入江恭亮, 町田和也, 堀司, 森吉泰生, 千田二郎, 藤本元: 燃焼形態を考慮した燃焼モデルによるディーゼル噴霧火炎の LES 解析, マリンエンジニアリング, **45**(3), 408-414 (2010)
- 8) O'Rourke, P.J and Amsden, A.A. : The TAB Method for



- Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup, SAE Paper 872089 (1987)
- 9) Reitz, R.D. and Bracco, F.V., Encyclopedia of Fluid Mechanics, ch.10, Gulf Publishing Company, Houston, (1986)
  - 10) Reitz, R.D., : Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays, Atomization and Spray Technology, **3**, 309-337, (1987)
  - 11) Schreiber, M., Sakak, A. S. and Lingen, A., : A Reduced Thermokinetic Model for the Autoignition of Fuels with Variable Octane Ratings, Proceedings of 25th International Symposium on Combustion, 933-940 (1994)
  - 12) Shinjo, J., Xia, J., Ganippa, L. C., Megaritis, A., : Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets, Physics of Fluids, **26**, 103302 (2014)