論 文

火攻法における油の改質と
エマルションの流動特性に関する研究

洪 承燮*・木下 睦*・渡部 孝行**・榎本 兵治*

(Received February 9, 1998; accepted September 21, 1998)

Studies on the qualitative change of oil
and flow properties of emulsion formed in in-situ combustion

Chengxie Hong, Atsushi Kishita, Takayuki Watanabe and Heiji Enomoto

Abstract: Our combustion tube experiments for in-situ combustion with many crude oils of various densities showed that produced oil became light and was emulsified in many cases. In the previous paper, formation mechanism of emulsion was discussed.

In field operations, emulsification may cause serious problems. Then, at the present study, it was aimed to clarify the influence of emulsification to the flow properties of oil phase. Experiments were carried out with three crude oils made by distillation of Yabase crude oil which was easily emulsified. One was the original Yabase crude oil, and other two oils were the heavier and lighter oils that were made by eliminating the light component from Yabase crude oil and by adding the light component to Yabase crude oil, respectively. Results may be summarized as follows.

- 1) Dependency of the viscosity of emulsion on the density of oil and temperature is similar to that of crude oil, but emulsification emphasizes the dependency.
- 2) The water content of emulsion is the index of the degree of emulsification and most strongly influences the viscosity. The viscosity of the emulsion of highest water content of 75% increased by several ten to hundred times.
- 3) The W/O emulsion formed in the in-situ combustion has the pseudoplasticity and its viscosity becomes strongly dependent on the flow speed as the water content increases.
- 4) Though the increase of water content of emulsion eventuates in the low oil content, the residual emulsion saturation drastically increases with water content, so that the residual oil saturation does not vary so much. Therefore, the fuel necessary for successful in-situ combustion is held in the oil bed.

Key words: in-situ combustion, combustion tube test, emulsion, viscosity, residual oil saturation

1. はじめに

著者らは、室内火攻法実験において、用いた原油により、油がエマルションとして産出する場合とエマルショ

ンを形成しない場合があるという結果を得た。この現象を解明するために行った一連の研究の第一報¹⁾において、火攻法において油層中でエマルション化が起こる可能性について検討し、その形成原因とメカニズムについて報告した。その結果をまとめると、①八橋原油を用いた室内における火攻法の実験では、油はほとんどエマルションとして産出する。②そのエマルションは安定性が極めてよく、通常産出後数か月放置しても分離しないW/O型である。③エマルションの粘度はそれを形成し

*東北大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Tohoku University

**東北大学大学院工学研究科学生 Graduate Student, Tohoku University

ている原油よりはるかに高い。④そのエマルションの形成機構は、油層中で気化した水（水蒸気）が乳化剤を含んでいる油中で凝縮する場合、極めて小さい水滴として油に取り囲まれて形成する、ということであった。

油層中でエマルションを形成する場合の火攻法における油層内の挙動解析と排油機構解析に関する一連の研究として、本研究では油層中での原油の改質とエマルションの流動特性について検討する。

2. 火攻法における油の改質

火攻法においては、温度が高い区域で油中の軽質分が気化して気相成分になり、気化しない重質分より速やかに下流側の低温区域に流れ込み、そこの液相の油と混合される。この気化・凝縮のプロセスにより、上流側（気化域）の油は軽質分を次第に失って重質化し、逆に下流側（凝縮域）の油には軽質分が次第に加わり軽質化する。また燃焼帯の進行により、気化・凝縮域の全体が生産井の方向へ移行する。

他方、燃焼帯のすぐ下流側に残された油は熱により固相のコークスと軽質分に分解され、コークスは燃料として残るが、軽質分は気相成分として下流側へ流れ込み、そこで凝縮して油に混合される。このプロセスが起こる区域も気化・凝縮と同様に生産井へと移行する。すなわち、火攻法においては、一連の物理的・化学的变化により、油層内の原油は常に組成が変化する。

このような油層内における油の組成の変化（改質）は、油がエマルション化するかなかを問わず常に起こり、ベースとなる原油の組成の変化がエマルションの流動特性にも影響をもたらす。したがって、エマルションの流動特性を検討するに当たり、油改質についても評価する必要がある。

油の改質を評価するために、本研究では各種原油（八橋、石坂、申川、南阿賀および新津原油）を用いて一連の燃焼管実験を行ったが、すべての実験において油の改質が起こっている。本文ではその一例としてエマルション化しやすい八橋原油を用いた珪砂充填模擬油層における実験結果について報告する。

2.1 油の脱水と含水率の計算

改質された油の特性を測定するためには、まず油をエマルションから分離する必要があるが、すでに述べたように燃焼管実験から得られたエマルションは、数か月放置しても分離しないものである。そこで本研究では、超音波による1次脱水と脱水剤による2次脱水とにより、エマルションから油を分離した。すなわち、まず試料（エマルション）を超音波洗浄機に2時間かけ、水をある程度までエマルションから分離する。それから1次脱

水後の試料に無水硫酸ナトリウムを脱水剤として添加して、1日間放置して水分を固定する。最後にそれをろ過して脱水した油を得た。

また、エマルション中の含水率は、エマルション密度と脱水した油密度を測定して、その両者と水密度との関係により求めた。すなわち、「含水率＝（エマルション密度－油密度）／（水密度－油密度）」の計算式から、エマルション中の含水率が正確に計算される。

2.2 油の改質評価

改質の評価因子としては密度と分子量分布を取り上げ、それらの異なる産出時間帯における変化を検討した。

（1）密度変化による検討

図1に、燃焼管実験におけるエマルションの累計産出割合に対する油密度の変化を示す。これは前節で記した方法により脱水した油の密度を比重瓶により測定したものである。

図1より、以下のことが読みとれる。

①全体の傾向として、油密度はエマルション産出時間の経過（累計産出割合の増加）に伴い低下して、産出油が徐々に軽質化されている。

②より細かく考察すると、密度の低下は3段階に分けられる。すなわち、エマルションの累計産出割合が20%弱までは、油密度があまり変化しない。この原因の1つとして、この時点までは気化油の凝縮域がまだ産出端にまで到達していない、あるいはその影響がまだ十分に産出挙動に現れてないことが考えられる。もう1つの原因としては、着火前の空気圧入により、燃焼管中ではすで

図1 産出油密度の経時変化

に油の軽質分の気化が起り、かつ空気圧入側のほうが産出側よりも気化がより速く進行し、燃焼管中に油密度の勾配ができていている可能性も考えられる。その密度勾配による影響と火攻法開始初期に産出端に現れた微弱な気化・凝縮による軽質化の効果が相殺され、産出油の密度に変化があまり見られなかったことも推測される。

エマルジョンの累計産出量が20%弱から80%までは、油層中での気化油の凝縮による効果が産出挙動に現れている段階で、気化・凝縮過程の進行と燃焼帯の移行により油の軽質化が進み、密度が低下していく。

エマルジョンの累計産出量が80%を超えると産出油の密度がより著しく低下する。それは、この時点になると燃焼帯が徐々に産出端に近づき、産出する油の中で、産出端で気化・凝縮しながら産出する油の割合が増えていくからと考えられる。

③また、本実験に用いた八橋原油の密度は 0.870 g/cm^3 であるが、初期の段階で産出された油密度はそれより高くなっている。これは既述したように着火前の長時間の空気圧入により、空気に接触した油の軽質分が蒸発したためと考えられる。

なお、一連の実験結果から、石灰岩質の砂の場合（図1の破線）より、珪砂を充填したサンドバックによる火攻法実験の場合における産出油の密度のほうが高い傾向がみられている。その原因を解明するため、接触角の測定による両者の濡れ性を検討した結果、実験に用いた珪砂は親水性であるが、石灰岩質の砂は珪砂との比較において親油性であることが判明した。このことから、珪砂の場合は水が岩石の表面に、油は孔隙の中心部に分布し、着火前の空気圧入の際に空気に接触する機会がより多くなり、軽質分がより多く蒸発したと考えられる。

(2) 分子量分布の変化による検討

図2に、GPC (gel permeation chromatography) により測定した産出油の分子量分布の経時変化を示す。この分布は、右側ほど低分子であることを表しているが、分子構造の相違までは加味されていない。また、図には分子量の値を200, 500, 1,000, 3,000と示しているが、これはポリスチレン換算であり、あくまでも目安の分子量である。

図2では実線が元の八橋原油分子量分布を示しており、その他は曲線のピークの高さが低いほうから高いほうへの順に、エマルジョンの累計産出量がそれぞれ50%、75%および95%の時点における産出油の分子量分布を示す。すべての場合において分子量分布のピークは、RT (retention time) が36から40の間に集中しているが、エマルジョンの累計産出量の増加に伴いピークの左側の成分（比較的重質な成分）が減少するとともに

図2 産出油分子量分布の経時変化

ピークが徐々に高くなることが読みとれる。これは、時間の経過により平均分子量が低下していることを意味している。この平均分子量の低下が、産出油の物性の変化として現れたのが、上述した密度の低下である。

他方、さらに詳細にみると、分子量分布曲線のピークが時間の経過に伴い、わずかずつではあるが、左側（高分子量側）に移動していることがわかる。そしてエマルジョンの累計産出割合が95%の場合のピークが他の場合より左に偏って高くなっていることが読みとれる。これは、時間の経過に伴い気化・凝縮により移動する量が多くなると同時に、その成分が少しずつ重質化していることを意味している。その原因の1つとして、燃焼帯の産出端への接近により、比較的高い温度で気化する重質分の割合が増加してくることが考えられる。

3. エマルジョンの流動特性

本研究では、火攻法におけるエマルジョンの多孔質体内での流動特性を把握するために、数々の条件下での粘度の変化とその変化がもたらす残留油飽和率・不動水飽和率への影響について検討した。一般に、粘度ならびに残留油（エマルジョン）飽和率・不動水飽和率の変化（相対浸透率曲線の変化）が流体の流動に影響を及ぼし、油の回収率に深くかかわっているが、火攻法においては残留油飽和率の変化は特殊な意味を持っている。それは、流れにより取り残された油（残留油）がさらに気化と熱分解を受けて、その後残るもの（コークと気化残留分）が燃料となるからである。他の攻法においては残留油飽和率が低ければ低いほど置換効率がよく、油回収率が高い。ところが火攻法においては、残留油飽和率が低

表1 作成したエマルションの試料

油 試 料	重 質 油 (密度 0.886 g/cm ³)	八 橋 原 油 (密度 0.870 g/cm ³)	軽 質 油 (密度 0.830 g/cm ³)
含 水 率 %	0, 25, 50, 63, 74	0, 26, 53, 64, 74	0, 28, 52, 75

すぎると、安定した燃焼帯を保つための燃料が確保できない（軽質原油の場合）ので、火攻法が適用できなくなる。

3.1 試料の作成

既述のように、火攻法においては油層中で油が常に改質され、密度が変化する。その改質の効果がエマルションの流動性に影響を及ぼすと考えられるので、エマルションの粘度を評価するための試料を作成するに当たり、まず八橋原油（密度0.870 g/cm³）をベースとして、蒸留により軽質分を除去した重質油（密度0.886 g/cm³）および八橋原油にその軽質分を加えた軽質油（密度0.830 g/cm³）の密度が異なる3種類の油試料を作成した。

その後、これらの密度が異なる3種類の試料油を用い、エマルションの作成装置により水蒸気を油中に吹き込んで凝縮させる方法で、14種類の油密度と含水率が異なるエマルション試料を作成した。それらを表1に示す。

試料の作成では、エマルション含水率は作成装置（メスシリンダー）中の液体の容積変化を大まかな目標として制御した。それから作成後にエマルションの密度を測定して既述した計算方法により正確な値を求めた。このため、密度の異なる油で含水率が同一のエマルション試料を作成するのは事実上困難であり、操作によって設定値（25%、50%、65%および75%）と多少のずれが生じた。例えば、表1に示すように、含水率の50%の設定値に対して、油密度が0.870 g/cm³と0.830 g/cm³の場合において実際はそれぞれ53%と52%になっている。

なお、数学モデルを構築する際に必要となるエマルション含水率の最大値を求めるために、水蒸気を長時間油に圧入したが、その最大値はおおよそ75%であった。

3.2 エマルション粘度の変化

エマルションの粘度に影響を及ぼす因子としては、それを形成している油の密度、エマルション中の含水率、油層温度および流速が考えられる。これらの因子の影響を調べるために、E型回転粘度計を用い、作成した試料に対して測定温度と回転数を変化させながら粘度の測定を行った。

(1) 油密度による影響

図3に、測定温度が30℃、50℃および70℃の場合にお

ける、含水率が約50%のエマルション粘度の油密度による変化を示す。また、図4に、測定温度が50℃でかつエマルションの含水率（ i_{ew} ）がそれぞれ0%、約50%および約75%の場合における油密度によるエマルションの粘度変化を示す。

図3 エマルション粘度に及ぼす油密度の影響
(含水率約50%、温度が異なる場合)

図4 エマルション粘度に及ぼす油密度の影響
(温度50℃、含水率が異なる場合)

図3と図4から、いずれの温度と含水率においても、油密度の増加に伴いエマルジョンの粘度が上昇することがわかる。さらに、その上昇傾向は油密度が大きいほど著しくなることがわかる。例えば、図3の温度が50℃の場合において、油密度が0.830 g/cm³ から0.040 g/cm³ の増加に対してエマルジョン粘度は13.4 cP 上昇するが、0.870 g/cm³ からわずかに0.016 g/cm³ の増加には45.6 cP も上昇する。すなわち、後者の平均上昇率は前者の8.5倍にもなる。これは、他の条件が同一である場合、重質油からは軽質油より粘度が高いエマルジョンが形成され、流れに対しより大きい影響を及ぼすことを示唆している。逆に、火攻法においては、改質による油の軽質化は、エマルジョンを形成する場合においても、流動性の低下をある程度抑制することが期待されると考えられる。

また、対数値でプロットした異なる温度の3つの曲線と異なる含水率の3つの曲線とともに、おおむね同傾向（平行）をみせていることから、油層温度が低いほど、また含水率が高いほど、油密度のエマルジョン粘度に及ぼす影響が著しいことがわかる。

なお、油密度のエマルジョン粘度に対する影響は、エマルジョンになっていない油の場合と似た傾向を示している（図4を参照）。

(2) 温度による影響

温度がエマルジョン粘度に及ぼす影響を検討するため、表1に示した14種類の試料に対して温度を変化させながら粘度の測定を行った。その一例として図5に、八橋原油（密度0.870 g/cm³）について、含水率がそれぞれ0%、26%および64%の3つの場合におけるエマルジョン粘度と温度との関係を示す。また図6に、3つの試料油で作成した含水率が約75%の場合におけるエマルジョン粘度と温度との関係を示す。

図5および図6に示すように、エマルジョンの粘度に対する温度の影響は著しく、温度の上昇に伴い粘度は急速に低下する。さらに、低温域での温度依存性が高温域より大きいことがわかる。例えば図5において、エマルジョン含水率が26%の場合、温度が30℃から50℃まで20℃上昇する際、エマルジョンの粘度は8.1 cP 低下するが、50℃から70℃まで同じ20℃上昇する際には2.5 cP のみ低下して、平均低下率が前者の3分の1にも及ばない。これらは、傾向的にはエマルジョンになっていない原油の場合の「粘度—温度」関係と類似する（図5を参照）。

なお、図5からはエマルジョンの含水率が高いほど、図6からは油の密度が大きいほど、粘度の温度依存性が大きくなることがわかる。要するに、元のエマルジョン

図5 エマルジョン粘度に及ぼす温度の影響
(油密度0.870 g/cm³, 含水率が異なる場合)

図6 エマルジョン粘度に及ぼす温度の影響
(含水率約75%, 油密度が異なる場合)

粘度が高いほど、温度の影響が著しい。

(3) 含水率による影響

以上の油密度と温度がエマルジョン粘度に及ぼす影響についての検討から、密度と温度の依存性は傾向的に原油のそれと類似しているが、エマルジョン化によりその影響が拡大・強調され著しくなることがわかった。油がエマルジョン化すると、油が水と同一の流動相になることを意味しており、エマルジョン化の進行というのは、同一の流動相の含水率が増加することを意味する。したがって、含水率がエマルジョンの流動性（粘度）に及ぼす影響は、エマルジョンの特性の1つと考えられる。図7に密度が異なる油の場合、図8に温度が異なる場合における、含水率の変化に伴うエマルジョン粘度の変化を示す。

図7と図8に示されるように、油はエマルション化により粘度が大幅に上昇し、流動性が著しく低下する。油密度と温度を問わず、含水率が最大の75%になるまでエマルション化が進むと、粘度は数十倍ないし100倍にも上昇する。さらに、その影響の程度については含水率が高くなるほど上昇率が大きくなる。例えば、図7の油密度が 0.870 g/cm^3 の場合において、含水率が0%から26%まで増加する際には、含水率1%当たり粘度が平均0.48 cP 上昇するが、64%から74%まで増加する際には1%当たり平均55.5 cP も上昇して、上昇率が前者の115倍にもなる。

他方、含水率の影響は、油が重質なほど、また温度が低いほど大きくなる。油密度が 0.830 g/cm^3 の場合は含

図7 エマルション粘度に及ぼす含水率の影響
(温度 30°C 、油密度が異なる場合)

図8 エマルション粘度に及ぼす含水率の影響
(油密度 0.886 g/cm^3 、温度が異なる場合)

水率に対するエマルション粘度の平均上昇率が $6.3\text{ cP}/\%$ であるが、 0.886 g/cm^3 になると平均上昇率が $18.5\text{ cP}/\%$ まで上がる(図7)。これは温度が 30°C の場合であるが、 70°C になると油密度が 0.886 g/cm^3 の場合でも、粘度の平均上昇率が $2.8\text{ cP}/\%$ まで低下する(図8)。

(4) 流速による影響

原油はニュートン流体であるので流速により粘度は変化しないが、エマルションは非ニュートン流体(擬塑性流体)であり、流速により粘度が変化する。その影響が粘度の測定に当たり粘度計の回転数の変化により現れる。ここまでの検討に用いた粘度の値は粘度計の回転数を100 rpm に統一して測定したものである。

他方、粘度計の回転数を変化させることにより、異なる流速に対応したエマルション粘度が測定できる。図9にその測定結果(油密度が 0.870 g/cm^3 で、測定温度が 30°C の場合)を示すが、横軸のずり速度は粘度計の回転数から換算して求めたものである。

図9から明らかなように、エマルションの含水率の増加に伴いずり速度が粘度に及ぼす影響が顕著に現れ、曲線の勾配が大きくなる。原油(図9での $f_{ew}=0\%$)の粘度がずり速度の影響を受けないのは当然であるが、本測定精度範囲では含水率が26%の場合においても、擬塑性流体の性質が現れていない。ところが、含水率が74%になると流速の影響が著しく、ずり速度が 1.9 s^{-1} から 76.6 s^{-1} まで上昇するに伴いエマルション粘度は10,752

図9 エマルション粘度とずり速度の関係
(油密度 0.870 g/cm^3 、温度 30°C)

cP から1,280cP まで低下する。

なお、含水率が異なる場合に「粘度—ずり速度」関係曲線の勾配は異なるが、すべての場合においてよい片対数直線関係をみせている。

(5) エマルジョン粘度の計算式

以上の考察により、エマルジョンの粘度は油密度、温度、含水率ならびに流速に深く関係していることがわかった。また、測定結果よりエマルジョンの粘度はこれらの因子と明確な対応関係をもつことがわかり、統計学的に相関関係が成り立つと考えられる。

$\mu_e = f(\rho_o, T, f_{ew}, \nu)$ の仮定から、まず API の経験式 ($\mu_o = f(\rho_o, T)$) に基づき、油密度と温度の影響を油粘度の変化として求めると、 $\mu_e = f(\mu_o, f_{ew}, \nu)$ が得られる。

次に、因子の相互関係から $\mu_e = \mu_o \cdot f(f_{ew}) \cdot f(\nu, f_{ew})$ を仮定すると、回帰分析により上述のすべての因子を取り入れたエマルジョン粘度の計算式が得られる。すなわち、

$$\mu_e = \mu_o \cdot f(f_{ew}) \cdot f(\nu, f_{ew}) \quad (1)$$

$$\mu_o = 10^a - 1 \quad (2)$$

$$a = b \cdot T_F^{-7.05}$$

$$b = 10^c$$

$$c = 2.15 - 0.0251API$$

$$API = 141.5/\rho_o - 131.5$$

$$f(f_{ew}) = 10^{0.844d} \quad (3)$$

$$d = 1.016^{f_{ew}}$$

$$f(\nu, f_{ew}) = (383/\nu)^{0.000075e} \quad (4)$$

$$e = 1.128^{f_{ew}}$$

ここで、

μ_e : エマルジョン粘度, cP

μ_o : 油粘度, cP

T_F : 温度, °F

ρ_o : 油密度, g/cm³

f_{ew} : エマルジョン含水率, %

ν : ずり速度, s⁻¹

なお、ずり速度から流速への変換は、孔隙流路に Kozeny-Carman のモデル²⁾を適用すると、 $\nu = 911,300 v$ (v は見かけの流速, m/s) の近似式が得られ、換算できる。

以上の計算式は八橋原油に基づいた回帰式で、基礎研究として火攻法におけるエマルジョンの流動特性を検討するには、一定の汎用性をもつと考えられる。

3.3 残留油飽和率と不動水飽和率の変化

エマルジョン粘度が残留油飽和率と不動水飽和率に及ぼす影響を検討するため、室内の珪砂詰め模擬油層でフラッキング実験を行った。まず、蒸留水中で珪砂を円

管に充填して、油層が水により飽和されるようにする。それから表1に示したエマルジョン試料を模擬油層が不動水状態になるまで圧入して、試料ごとの不動水飽和率を求める。次に、不動水飽和率になっている油層に残留エマルジョン飽和率になるまで空気を圧入し、それぞれのエマルジョン試料について残留飽和率を求める。最後に、試料の含水率により対応する残留油飽和率を計算する。

測定結果を図10に示す。これから以下のことが判明した。

①残留エマルジョン飽和率は、含水率の増加に伴い急速に増加する。定量分析を行うと、以下の回帰式が求められる。

$$S_{er} = S_{er0} \cdot \exp(1.214f_{ew}) \quad (5)$$

ここで、 S_{er} は残留エマルジョン飽和率、 S_{er0} は含水率が0%における残留飽和率(残留油飽和率)である。

②エマルジョンの含水率の増加に伴い同時に生ずる残留エマルジョン量の増加とその中の油割合の減少が相殺され、残留油飽和率はやや低下の傾向にあるが、測定範囲においては常に25%以上を保っている。したがって、安定燃焼帯を維持するに必要な燃料が確保され、エマルジョンが形成する場合にも火攻法が適用可能であると考えられる。

③不動水飽和率は、エマルジョンの含水率の増加に伴い多少低下する。定量分析を行い回帰式を求めると次式が得られる。

$$S_{wi} = S_{wi0} \cdot (1 - 0.224f_{ew} - 0.6918f_{ew}^2) \quad (6)$$

図10 残留エマルジョン飽和率、残留油飽和率および不動水飽和率に及ぼすエマルジョン含水率の影響

ここで、 S_{wi} は不動水飽和率、 S_{wfo} はエマルション含水率が 0 % の場合の不動水飽和率である。

4. ま と め

本研究により以下のことが解明された。

- (1) エマルション粘度の油密度と温度に対する依存性は原油のそれと類似しており、エマルションを形成する油の密度が大きいほど、また温度が低いほど粘度が高くなるが、エマルション化によりその特性が拡大・強調される。また、密度に対するエマルション粘度の上昇率は油の密度が高い場合に大きく、温度に対する低下率は温度が低い場合に大きい。
- (2) 含水率は油のエマルション化の指標であり、エマルション粘度に最も影響を及ぼす。したがって、エマルションの流動特性は主に含水率により左右されると考えられる。本研究のすべての場合において、エマルションの含水率が最大の約 75 % になると、粘度が数十倍ないし 100 倍にも上昇する。
- (3) 火攻法において形成される W/O 型エマルションは擬塑性流体であり、エマルション中の含水率の増加に伴い粘弾性が強くなり、粘度の流速依存性が著

しくなる。

- (4) エマルションの含水率の増加に伴い、当然ながらその中の油の割合は低下するが、残留エマルション飽和率が含水率の増加に伴い急速に増加するため、両者が相殺され、エマルション化による残留油飽和率への影響はそれほど大きくない。このため、油層でエマルション化が起こる場合においても必要量の燃料が確保され、火攻法が適用可能であると考えられる。

SI 単位換算係数

$$\text{cP} \times 1.0 \text{E} - 03 = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$5/9 \times (^\circ\text{F} - 32) = ^\circ\text{C}$$

$$\text{rpm} = \text{min}^{-1}$$

引 用 文 献

- 1) 洪 承燮・木下 睦・渡部孝行・榎本兵治, 1998 : 火攻法におけるエマルションの形成機構と火攻法の物理モデル. 石技誌, **63** (3), 251-257.
- 2) 増田昌敬, 1992 : 粘弾性効果を考慮したポリマー攻法の挙動解析. 東京大学学位博士論文.