

講 演  
 Lecture

## 流れを見る—ダルシー則について思うこと—\*

佐々木 久 郎\*\*

(Received June 28, 2010 : accepted July 8, 2010)

### Observation and Visualization of Flows—What is Darcy's Law and its Meaning?

Kyuro Sasaki

**Abstract :** In this lecture, I present historical positioning of Darcy's Law in fluid mechanics. The classification of fluid flows is proposed by applicability of two common equations ; Bernoulli's equation and Darcy's law/Darcy-Weisbach equation. In these equations, pressure has a completely different meaning with conservation or loss. The sketches of separated turbulent flow were left by Leonardo da Vinci in the renaissance period. This kind of the flow observation has played a very important function to develop the fluid mechanics. I also introduce my original visualization photos on the separated turbulent flows. The Darcy's law has been the basic equation in reservoir engineering, however it includes extremely complicate micro flow structure because of mixing of internal and external flows in porous media. As one of interesting examples, visualization photos of SAGD method for producing bitumen from in-situ oil sand layers are presented to compare ours and Dr. Butler's results by scaled models. Finally, I introduce the technical problems of “Biogas” and “Vertical Veges. Garden” observed at slums in Nairobi, Kenya as one of actions related to the project “Education for Sustainable Development in Africa.” These may stimulate young researchers and engineers to make challenge on new visualizations and the sustainable development.

**Keywords :** Flows, Visualization, Darcy's law, SAGD, Steam chamber, Emulsion, Sustainable development

#### 1. はじめに

16 世紀のルネッサンス期に、レオナルド・ダビンチ (Leonardo da Vinci, 1452–1519) は、水路に立てられた杭の後ろの複雑な「はく離乱流」のスケッチを残しています (図 1)。それ以前では空気や水の動きを皮膚感覚でとらえていたのに対し、ごみの動きなどから流れの構造を観察・分析したもので、ヘリコプターなどの原理を考えていたことと同様に、ダビンチが画期的な視点を持っていたといえます。とくに、現代のコンピュータ数値シミュレーションでも予測が困難な「はく離乱流」に対して相当な関心をもっていたことや、現代の流れのサイエンスにも影響を与えていることに驚かされます。

本講演では、流体力学の歴史的側面を含めたダルシー則の位置付け、「流れを見る」ことについての研究遍歴、SAGD 法による重質油の生産に関わる可視化研究について解説することになります。広義の意味で「流れを見る」こと

は種々の複雑な流体のふるまいを理解し、数値的なモデルを生み出す原動力になると確信しています。私自身がこれまで携わった流れの研究にかかわる経験を紹介し、地下の多孔質体の流れを支配している「ダルシー則」についてもその歴史的な位置づけや私自身が SAGD 法の実験などで感じていたことを含めることにします。最後に、ケニア・ナイロビのスラム街を視察した際に見たバイオガス施設の



図 1 レオナルド・ダビンチが残した「はく離乱流」のスケッチ

出典 : Sketches by Leonardo, The Genius's Personal Notebook, The British Library Board より

\* 平成 22 年 6 月 8 日、平成 22 年度石油技術協会特別講演会にて講演  
 The special lecture was delivered at the 2010 JAPT annual meeting held in Fukuoka, Japan, on June 8, 2010.

\*\* 九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門・教授 Professor, Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University



課題やダルシー則が生かされた野菜栽培法などについても紹介し、併せてアフリカの持続的発展についての取り組みを紹介いたします。

## 2. “ダルシー則”の歴史的な位置づけ

一般には、渦の有無やニュートン流か否かで流れを分類することが正統な手法ですが、ここでは流れの式をベルヌーイの定理（流体のエネルギー保存則）とダルシー・ワイズバッハの式を含む広義のダルシー則（流体エネルギーの損失を算定する経験則）の適用可否によって簡潔に説明することにします（表1）。ただし、二式で用いられている圧力差は全く異なった物理的な意味を持っているので、流れの分類に使うことは極めて乱暴ですが、ダルシー則の位置づけを明確にする上では分かり易いと思われる。

ルネッサンス期以降に、欧州の貴族などの富裕層によって数学などのサイエンスが発展しました。その中で、ヤコブ・ベルヌーイ（Jakob Bernoulli, 1654–1705）から始まったヤコブ一門のヨハン・ベルヌーイ（Johann Bernoulli, 1667–1748, 弟）とダニエル・ベルヌーイ（Daniel Bernoulli, 1700–1782, 姪）の親子については、互いに憎しみ合いながらも流体力学を創始したことは良く知られています。その内容は数学をベースにしたもので、流れのエネルギー保存則がほぼ適用できる噴水の高さなどについては適切であったものの、長い水道管などの身近な生活における内部流の挙動は説明できないジレンマに陥っていたことが、1738年に出版された最初の流体力学の書籍 *Hydrodynamica* にも認められます。このような、圧損や流体抵抗が働かないという「ダランベールのパラドックス」に対し、数学的な循環渦の導入によって、その後の飛行理論やポンプ・ファンなどへの応用へとつながることになります。ただし、彼らの流体力学は身近な実用の流れ、例えばダビンチが描いた乱流や水道管の圧損などの説明には無力だったことになります。

表1 流れの分類と適用法則

内部／外部流れ	外部流れ 飛行物体 ピトー管	内部流れ 管内流、粘性流 貯留層流
主要な提示式	ベルヌーイの定理  Daniel Bernoulli (1700–1782)	ダルシー則など  Henry P.G. Darcy (1803–1858)
圧力差の定義	保存される圧力 (保存エネルギー)	失なわれる圧力 (損失エネルギー)
アプローチの方法	数 学 (古典力学)	現場測定、 実 験 経験則
人物像	裕福な階層・ 大学教授	技術者 (政治家)

その約100年後に、フランスの有能な土木技術者ヘンリー・ダルシー（Henry P.G. Darcy, 1803–1858）が、ベルヌーイの定理と整合しない多孔質層中の流れのエネルギー損失（圧力損失）を表すダルシー則（Darcy's Law）を1856年に発表し、実用水理学の起点となっています。ご存知のように、ダルシー則は多孔質層中の「流量と圧力損失および粘性係数との関係」に比例定数を付けて表した経験式（実験式）で、現在も流れ易さを表す比例定数すなわち浸透率とともに数少ない「法則」が付く式として実用水理学に君臨しています。

2人の名前を冠したベルヌーイの式とダルシー則/ダルシー・ワイズバッハ式は、ほとんどの工学部の学生が学部段階で学ぶ基本式ですが、その中に示される「圧力」がまったく異なった意味であることは明確に理解されていないように感じるが多々あります。

なお、ジュリアス・ワイズバッハ（Julius Weisbach, 1806–1871）が1868年に完成させた流路の圧力損失式として用いられているダルシー・ワイズバッハの式にもダルシーは大きな貢献をしています。このように、ダルシーが現場を知る技術者として歴史に残る実用式の導出を行ったことと、裕福な階層の科学者たちの系譜の中でベルヌーイの定理が産みだされたこととは極めて対照的で、興味深いものがあります。ダルシー則とダルシー・ワイズバッハの式には、流れのエンジニアリングにおける核心があるようにすら思われます。石油開発技術者とお会いすると、Darcyのようなメンタリティーを有しているような方が多いと感じられるのは、ダルシーと同様に細かな構造には拘泥せず、地下の貯留層に対して直観的な感性を必要とする職業であるためかもしれません。この点で、最後は地下をこじ開けて自分の目で確認する機会を持つ鉱山技術者とは異なったキャラクターが形成されていくように感じられます。

ジョージ・ストークス（George G. Stokes, 1819–1903）は、ナビエの式を発展させてダルシー則より10年ほど早い1845年に粘性流体の運動方程式；ナビエ・ストークスの式（Navier-Stokes Equations, N-S式）を完成させています。その後、数多の天才（？）がこのN-S式に挑んだといわれていますが、一部の層流を除き、乱流を含む流れの直接的な厳密解や数値解が得られないまま現代に至っています。

流体力学における連続体概念に関し、流動領域や分子運動の大きさによる分類を図2に示します。とくに、18世

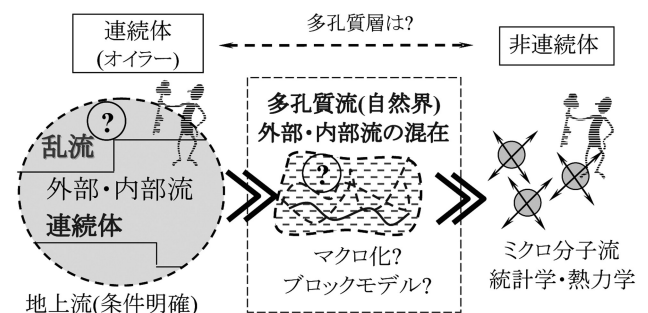


図2 対象領域の大きさによる解析手法の相違

紀最高の数学・天文学者レオンハルト・オイラー (Leonhard Euler, 1707–1783, ヤコブ一門) が展開した連続体概念を適用できる流れ場と分子の振る舞いを統計的・熱力学的に扱うことができる流れについては、「乱流」を除くと適用される数学的手法は明確です。しかしながら、貯留層工学が対象とする「多孔質体内部の流れ」は2つの中間領域であること、かつ外部流と内部流が複雑に入れ乱れる系を構成するため、その扱いは厄介です。もちろん、マクロ化された複雑な数値モデルに対してもコンピュータを駆使すれば「数値解」を得ることができます。ただし、私たちは多孔質体内部のいかなる流れも数値シミュレーターによって解析できるように思いがちですが、その解の正当性は無条件に保障されるものではありませんし、マクロ的なモデル化やその仮定が不適切であれば当然ながら現実とは異なった解となります。厄介なことに、その解の正否を判定する材料すらない場合もあり、惑わされます。とくに、多孔質層の流れに関して、「流れを見る」ことから新たな物理モデルや数値解の妥当性を裏付ける情報がもたらされることが期待されるわけです。

### 3. はく離乱流の可視化研究

ダビンチがスケッチしたような角をもつ物体や構造物では、流れが角からはく離してその後方に再循環領域を含む

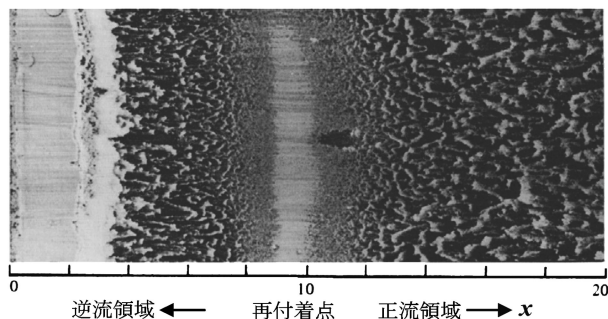


図3 剥離・再付着流れにおける壁面流の可視化 ( $2H$ : 板厚)

出典: *J. Fluid Mech.*, 120, p.234 より

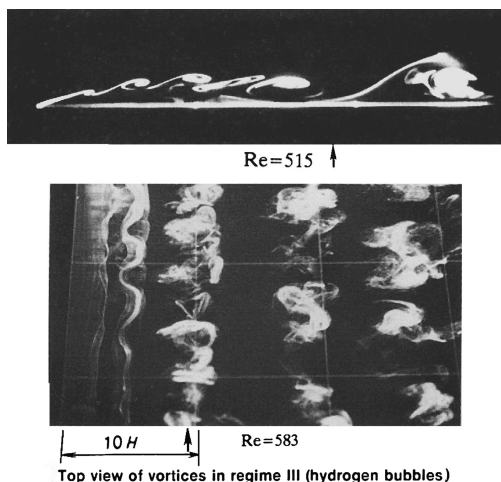


図4 はく離・再付着流れの三次元渦構造 (水素気泡法)

出典: *J. Fluids Eng.*, 113, 409 より

はく離乱流場が形成されます。私は、故有江幹男先生 (元 北大総長, 前北海道天然ガス利用促進協議会長) の研究室の大学院生として、はく離・再付着乱流の研究を昭和54年に始めました。有江先生は戦後第1期のフルブライト奨学金を得て、米国の流体力学を牽引していたアイオワ州立大学水理学研究所 (Institute of Hydraulic Research) の H. Rouse 教授のもとで、尾板を持つ垂直平板からはく離乱流の研究をされ、後に大倉山ジャンプ台の設計なども手がけられています。私も有江先生のはく離乱流の研究の流れを汲むことになりました。この当時は、乱流の渦構造はよくわからず、ましてや流れの反転が生ずる領域の速度や圧力変動の予測は難しいとされていた時期でした。最初の仕事が、角のある板の上面にオレイン酸と酸化チタンの粉などを混ぜた油膜を塗り、角から剥離した気流に晒して油膜の移動から再付着点などを把握するものでした。毎日、単純な油膜の塗布作業を繰り返していたのですが、満足のいくものが得られず悩んでいました。3ヶ月を過ぎて油膜の調合割合を偶然に見つけ、ようやく背景色に黒を塗って流れの繊細な強弱や構造を反映したコントラストのある写真 (図3) の撮影に成功し、飛び上がって喜んだ記憶があります。苦しみの中の喜びは格別でした。

それから2年を経て、はく離した渦に微細な水素気泡の

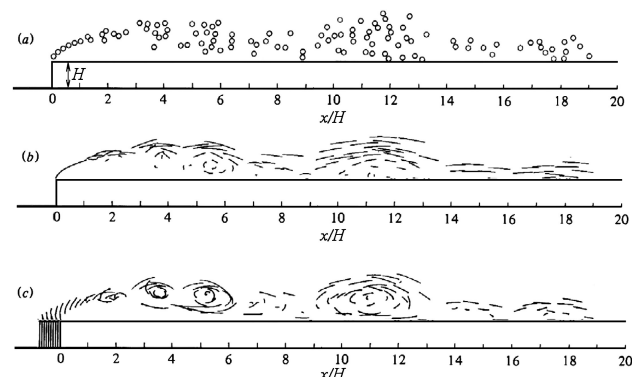


図5 ラグランジェ法によるはく離乱流の数値シミュレーション

出典: *J. Fluid Mech.*, 120, 234 より

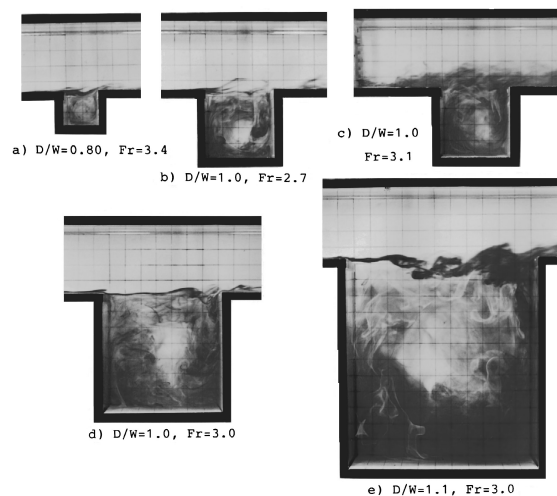


図6 流路面した凹部における拡散状況の可視化

出典: 空調衛生工学論文集 .58, 86 より



シートを取り込ませることで渦の変形を示す可視化写真(図4)の撮影にも成功しました。このときも微細で一般的な水素気泡のシートを発生させるのに数ヶ月を要し、再び「流れを見る」難しさと喜びを味わうことになりました。これらの可視化作業は、ただただ油や水にまみれ、床面に這うようにして撮影するものでしたが、この写真を含む論文が流体力学の権威ある論文誌 *Journal of Fluid Mechanics* に収録され、その後も多く引用されてきたことから、「見る」ことの時間を超えた普遍的価値を感じます。また、同時に図5に示したラグランジェ法の1つである「うず点法(Discrete Vortex Model)」を使った二次元数値モデル計算結果と実験結果との比較を行って博士論文を執筆しました。これが、その後の私の研究スタイルを決定するものになりました。その後も、図6に示すような、凹部のはく離乱流中の拡散についての可視化などを行なっています(佐々木ら, 1995)。

#### 4. 貯留層工学におけるダルシー則と可視化研究

貯留層工学は、ダルシー則を基礎として発展したものと思います。粒径が一定の場合に対しては Kozeny-Carman の式なども知られていますが、図2でも説明したように内部の粒径や形の分布が不規則である場合、ミクロ孔隙内の流れを詳細に捕らえようとすると極めて複雑な問題として立ちどころです。地上の構造物を扱う技術者は、自身でそ

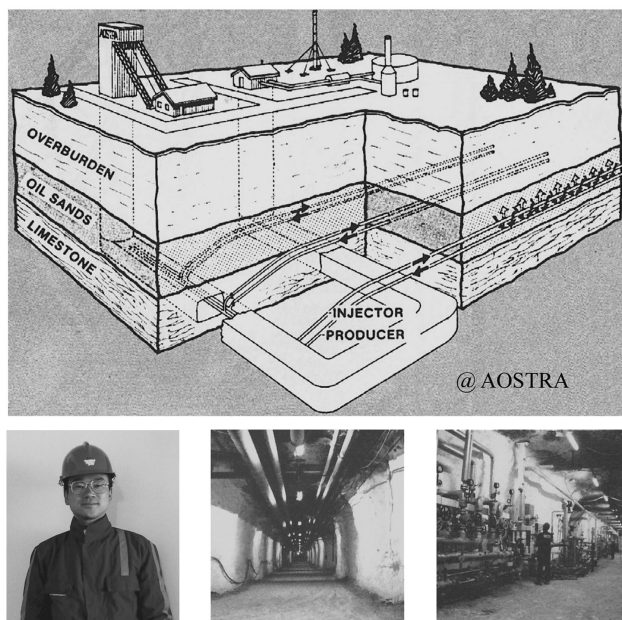


図7 AOSTRA 地下実験施設 (UTF, Underground Test Facility)

上 図: Fort McMurray に建設された深度 160 m の鉱山指定の地下実験施設で、1990 年当時のフェーズ A における構内と全体の概略図である。1988 年のフェーズ A では長さ 50 m の水平坑井、1990 年からのフェーズ B では長さ 500 m の水平坑井が地下坑道から掘削された。1995 年からは、地表から水平坑井を掘削した“Surface SAGD”法が実施された。  
出典: 1990 年の AOSTRA・UTF パンフレットから

左下図: カナダ・アルバータ州鉱山保安官のユニフォーム姿の著者 (1990)

の寸法を決定したり、測定できる幸運に恵まれています。地下の自然界が生成した多孔質層の多相流れを扱うときには相対浸透率曲線、不動飽和率などの理解も必要となります。私自身、その複雑な構造と未知の要因が多いため、これら貯留層流れの大まかな理解にもずいぶんと時間がかかりました。とくに、秋田大学に赴任して最初に手がけた石炭の流動孔隙あるいは亀裂構造の測定には随分苦勞をしました。そのことが、現在の私のバックボーンになっていて、最近もベトナムの留学生 P. Q. Huy 氏と石炭の亀裂構造に関する論文を発表しています (Huy ら, 2010)。

私と石油開発との最初の関りは、秋田大学に勤務していた 1989 年にカナダ・アルバータ大学にポスドクとして 6 ヶ月間オイルサンドの熱伝導率測定をテーマとして滞在したことから始まりました。このテーマは、アルバータ大学と姉妹校の関係にあつた北海道大学の恩師、故・関信弘先生(伝熱工学)にアドバイスをいただいたものでした。その当時、アルバータ大学では Farouq Ali 教授が活躍されており、Roger M. Butler 博士 (Esso Resources Canada LTD., 1983-1995: カルガリー大学教授) がオイルサンド層からビチューメンを原位置生産する画期的方法、水蒸気支援重力排油法 (SAGD 法) を提唱し、AOSTRA がフォートマクマレーの地下試験施設 (UTF, 図7) の地下坑道から掘削した水平坑井ペアを用いた実証試験を開始した直後の頃でした。UTF は地下鉱山として建設されたため、鉱山保安官の査察を受ける必要があったこともあり、エドモントンで偶然にも知合いになったアルバータ州鉱山保安官の G. Smith 氏に特に頼み込み、Syncrude 社、Suncor 社および UTF の現地査察と一緒に連れて行ってもらいました。鉱山保安官と一緒に、さらにユニフォームを借りて着て行ったためか、全ての事業所と施設で詳細な見学をすることが

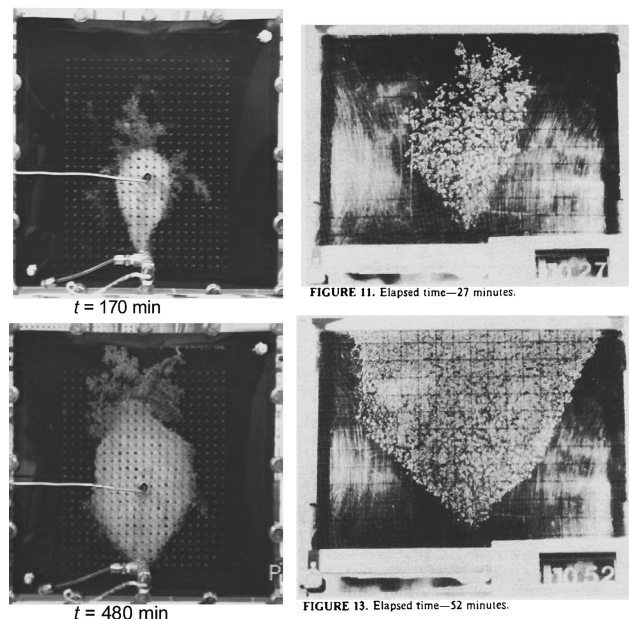


図8 SAGD 法の可視化写真、左: 講演者らの実験  
右: Butler 博士らの実験

出典: (左) *SPE Journal*, 2001-Mar., 194 より

出典: (右) *JCPT*, 1981-April-June, 94 より

できたことは大変幸運でした。とくに、UTF に常駐していた技術者から、SAGD 法についての説明を受け、オイルサンド層内の油、凝縮水、エマルジョン等の多成分流動と熱挙動などに興味をもつようになりました。1981 年に発表された Butler 博士らの JCPT 誌の論文は石油会社での研究の枠に収まらないアカデミックな内容をも含むもので、関心をもって読みました。

その後、秋林智先生（現秋田大学名誉教授）から「SAGD 法による重質油の生産」に関する石油公団 TRC との共同研究に誘っていただき、「SAGD 法による重質油の生産」についての研究を 1994 年から開始できました。このときには、Butler 博士が SAGD 法に関する数値解析などの成果を JCPT 誌などに着々と発表しており、UTF での実証試験にも成功を収めつつあった時期でしたので、「いまさら、二次元縮小モデル実験による後追いはどうか？」というアドバイスもいただいていたのですが、「見たい」という気持ちに衝き動かされるように、SAGD 法の可視化実験に突入しました。

秋田大学の小助川洋幸技官および修士課程学生であった、加藤正重君（現ジャパン石油開発）、金子文憲君（現石油資源開発）、山崎誠太郎君（現ペトロナス）、須貝圭一朗君（現アラビア石油）らに、実験モデルの組み立てや実験を実施してもらい、SAGD 法の核心的な領域である水蒸気チャンバーの成長についての可視化を行うことができました。図 8 が撮影された写真です。実際は、均一に充填したモデル貯留層の作成と実験に用いる水平圧入井の構造と強度をもたせることがなかなか難しく、何度も失敗を繰り返してやっと撮ることに成功したものでした。図 8 の右側に Butler 博士らの可視化写真を比較のため示しています。彼らの水蒸気チャンバーは典型的な SAGD 法の概念図として模式的によく描かれるもので、現在も SAGD 法の論文などにその影響を与え続けています（Sweeny, 2010）。SAGD 法というブレイクスルー技術に導いた Butler 博士らの功績が極めて大きいことはいうまでもありません。また、Butler 博士らが提示した、油の生産速度  $q$  ( $\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ ) および無次元数  $B_3$  = [生産による境界の移動速度 / 温度の水平方向の拡散速度]

$$q = \sqrt{\frac{2\phi S_o K g \alpha H}{m \nu_s}} \quad (\text{Butler and Stephens, 1981})$$

$$B_3 = \sqrt{\frac{Kg}{\alpha \phi \Delta S_o m \nu_s}}$$

ここで、

$g$  = 重力加速度,  $\text{m}/(\text{day})^2$

$H$  = 油層の高さ,  $\text{m}$

$K$  = 油層の浸透率,  $\text{m}^2$  ( $1 \text{ Darcy} = 9.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ )

$m$  = 重質油の粘性に依存する無次元定数, —

$q$  = 油の生産レート,  $\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ ・水平坑井

$\Delta S_o$  = 初期油飽和率と残油飽和率との差, —

$\alpha$  = 油層の温度拡散係数,  $\text{m}^2/\text{day}$

$\nu_s$  = 飽和水蒸気温度での油の動粘性係数,  $\text{m}^2/\text{day}$

$\phi$  = 油層の孔隙率, —

からは、生産と物理現象に対する深い理解を見出すことができます。

Butler 博士らの実験では、実際のオイルサンドから抽出した粘性が極めて高いピチューメンをそのまま使っていましたが、かなり粗いガラスビーズをガラス板に挟んでパックした 1000 Darcy オーダーの高浸透率多孔質層モデルを用いたものでした。私たちは、より細かい 0.2 mm 程度のガラスビーズ層を熱伝導率の低いアクリル板で挟んだ 14 Darcy 程度の比較的低浸透率に仕上げ、供試油はピチューメンの 1/10 程度の粘性をもつ潤滑油を用いて実験を行いました。私たちの実験でも、 $B_3$  の他にダルシー則を意識して [浸透率 / 粘性] の相似性などもフィールドと同一程度のレンジとなるように実験条件を設定しましたが、図 8 のように、水蒸気チャンバーの形状や上部への成長（枝状のフィンガリング）などが Butler 博士らと異なったものが表れていました。私たちの実験結果からは、水蒸気チャンバーが容易に上盤に到達しないのではないかという懸念が示されたので、Butler 博士と直接それについて議論しましたが、多くの数値シミュレーション結果も上部領域への早期の水蒸気チャンバーの成長を支持していたため、残念ながら私たちの実験はあまり注目されませんでした。その後、2002 年に、水蒸気チャンバー界面でどんな現象が生じているかを明らかにする目的で、ファイバースコープを挿入して 2 mm 程度の領域での現象の可視化撮影に成功しまし

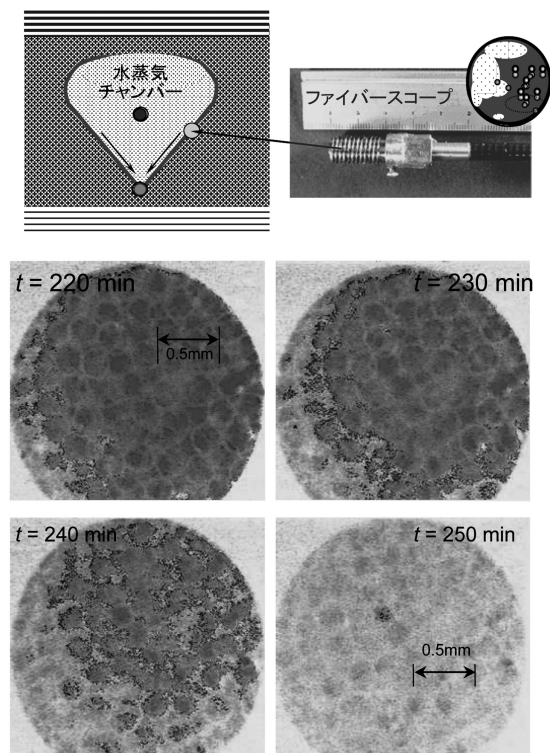


図 9 ファイバースコープ（上図）を使ったチャンバー界面の水蒸気および微細な水滴と油のエマルジョンの可視化写真（左側が水蒸気相）

出典：SPE/DOE 13th IOR, 2002, SPE 75241 より



た(図9)。近年、フィールドでのビチューメン生産量が2000年前後に実施された数値シミュレーション結果よりもかなり下回っていることが指摘されるようになり、再びチャンパー界面の現象に関心がもたれてきています。例えば、私たちの実験を含めてSAGD法に関してレビューしたAlbahlaniら(2008)によるSPEの論文は、One Petroでのダウンロード数が3413に達し、その感心の高さが窺えます。

Butler博士らによる縮小モデル実験、数値モデル化、その後のフィールド試験の実施、商業化という一連のオイルサンド開発における展開は実に理想的な研究アプローチといえます。また、Butler博士らと私どものSAGD法のいずれの可視化写真に関しても、「見る」ことが何がしかの役割と貢献を果たしていることは嬉しい限りです。

### 5. バイオガスと“VERTICAL VEGES. GARDEN”

国連大学では、地球環境と人類社会の持続可能性と各種問題が相互に不可分の関係にあるという問題意識のもとで、融合型・俯瞰型の研究・教育開発が目標の1つとなっています。とくに、アフリカの持続発展教育(ESDA, プロジェクトリーダーは武内和彦・副学長)に関わり、アフリカにおける都市、地域(田舎)、鉱物資源の3つの課題とその解決を担う人材育成のための教育システムについての小委員会が設けられています。私は鉱物資源にかかわる委員会に所属し、2010年3月初旬に開催されたナイロビでのワークショップに参加しました。3つの課題に対応する小委員会合同でナイロビにある2箇所のスラム街の現地視察をしました(図10)。その1つであるキベラスラムの視察は雨天の後に行われたため、アフリカ特有の赤い粘土質の泥でぬかるんだ道を歩いての移動は大変でした。もちろん、アフリカはその発展のスピードを高めているのですが、「影」の部分として劣悪な環境下にある大都市のスラムで多くの人々が暮らしている現実があります。国際的なボランティア組織がスラムでの支援活動として取り組んでいる「バイオガス施設」(図10)を見学しました。スラムに有料トイレを設置し、発酵させたメタンガスをエネルギーとして利用するもので、衛生環境とエネルギー問題を同時に解決する方法として高く評価されていました。ボランティア組織の人たちからは、コストを掛けずにバイオガス中の炭酸ガス(約40%)を分離してメタンをボンベ詰めしたいという要望が出されていました。この技術的な解決策は、小規模CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)などへの広範な応用も考えられるものです。

他に、キベラスラムの中にある小学校での野菜栽培(図11)を視察をしました。小学校では、児童を学校に呼び込むため給食を出していますが、その給食用の野菜を自給するための工夫が“Vertical Veges. Garden”です。穀物袋に土を詰めるときに中心領域に子石を直径15cmぐらいに縦に入れ二重構造にした一種のプランターを作り、側面から苗を植えて野菜を「縦」に伸ばす工夫をしたものです(図

11下図)。小石の多孔質層から水を流し込むことで野菜の根に効率よく水を直接供給できるので野菜が短期間に栽培できると説明していました。浸透率が高い小石と低浸透率の赤土の二重多孔質層に“ダルシー則”の妙が見事に生かされていることに感心した次第です。

### 6. おわりに

本講演では、流体力学の歴史的側面を含めたダルシー則の位置付け、はく離乱流の研究、SAGD法による重質油の生産に関わる可視化研究などについて、私がこれまで感じてきたことを含めて説明を試みました。はく離乱流の研究では、「見る」ことから多くのことを明らかにできましたが、それを全て数値的に予測できないことも学びました。地下資源分野においても「見る」ことの重要性をさらに実感しています。その意義をお伝えできたこととすれば幸いです。

また、世界には貧しい環境に置かれている人々も多く、私たちがどのような形でともに歩むことができるのかについて大いに悩むところです。鉱物資源の開発はその地域の人々にも持続発展的な利益をもたらすことが理想ですが、例えば生活環境の改善であっても自立に向けた技術、資源、エネルギーの提供や地域リーダーの育成なども必要とされます。世界で石油資源開発に携わっている皆様に、これらの支援についてのご配慮をお願いする次第です。

最後に、本講演の機会を与えていただいた太田陽一前会

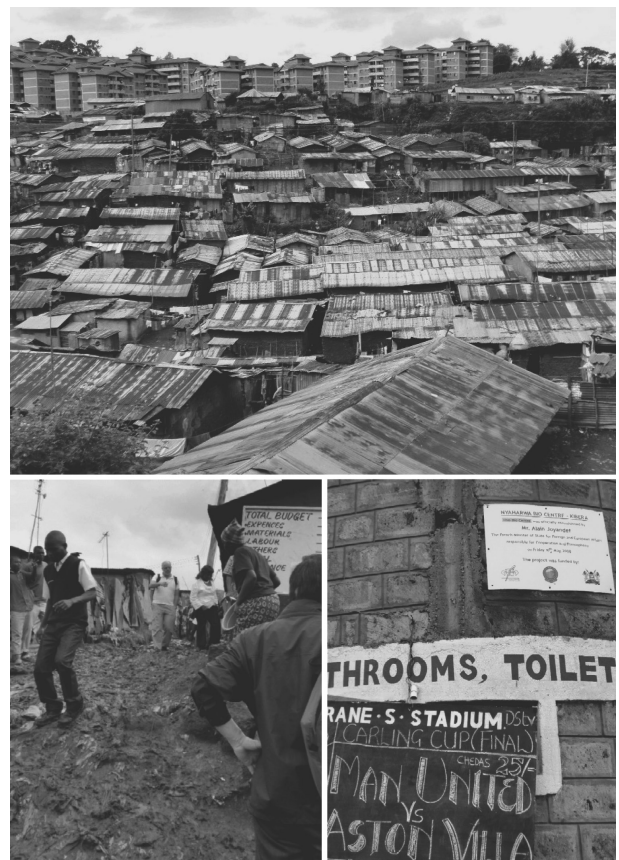


図10 左：キベラスラムの様子，中央：ぬかるんだ道，右：バイオセンター（有料公衆トイレ兼シャワー施設）

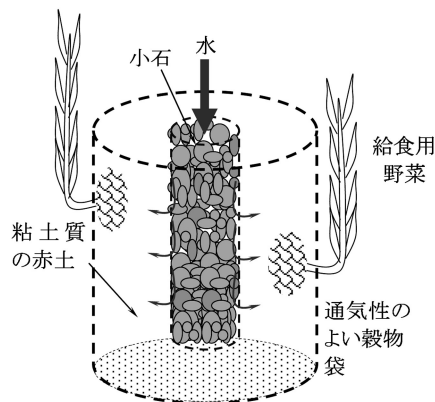


図 11 “VERTICAL VEGES GARDEN” と名づけられた畑（左）、栽培用プランターの作成（中央）とその構造（右）  
（ケニア・ナイロビ・キベラスラムの小学校で）

長始め、石油技術協会の皆様、講演の中で紹介した研究成果をもたらしていただいた秋林智先生および大学院学生に心から御礼申し上げます。

#### 引用文献

The British Library Board, 2010 : Leonardo da Vinci, Sketches by Leonardo, The Genius's Personal Notebook,

[http://www.bl.uk/collections/treasures/leonardo/leonardo\\_broadband.htm?middle](http://www.bl.uk/collections/treasures/leonardo/leonardo_broadband.htm?middle)

The Turner Collection, Keele University, 2010 : Daniel Bernoulli (Portrait)

G.O. Brown, 2002 : “Henry Darcy and the making of a law,” *Water Resources Research*, **38** (7), 1106–1117.

Marle, C. M., 2006 : “Henry Darcy et les écoulements de fluides en milieu poreux,” *Oil Gas Sci Technol*, **61** (5), 599–609.

Boback, P., 2006 : “Henry Darcy in his own words,” *Hydrogeology Journal*, **14** (6), 998–1004.

Kiya, M., Sasaki, K. and Arie, M., 1982 : *J. of Fluid Mechanics*, **120**, 219–244.

Sasaki K. and Kiya, M., 1991 : *J. of Fluids Engineering*, **113** (9), 405–410

佐々木ら, 空気調和・衛生工学会論文集 No.58, pp. 83-89 (1995)

Huy, P. Q., Sasaki, K., Sugai, Y. and Ichikawa, S., 2010 : *International Journal of Coal Geology* (Elsevier), 83-1, pp. 1-10

Sasaki, K., Akibayashi, S., Yazawa, N., Doan, Q., Farouq Ali, S. M., 2001 : *SPE Journal*, March, 189–197.

Butler R. M. and Stephens, D. J., 1981 : *JCPET*, April-June, 90-96.

Sweeny, A. (2010), *Black Bonanza : Canada's Oil Sands and the Race to Secure North America's Energy Future*, John Wiley and Sons.

Albahlani, A.M. and Babadagli, T., 2008 : SPE Paper # 113283-MS

Canadian Petroleum Hall of Fame, 2010 : Dr. Roger M. Butler, <http://www.canadianpetroleumhalloffame.ca/roger-butler.html>.

Sasaki, K., Akibayashi, S., Yazawa, N., Kaneko, F., 2002 : Proc. of the SPE/DOE 13th Symp. on Improved Oil Recovery (IOR2002) (Tulsa, USA), SPE-75241.