

地熱井、配管中のスケール予測シミュレーションの研究

三ヶ田 均*・武川順一**¹・亀井志織***

1. 研究の目的

地熱発電においては、生産する水蒸気に含まれる溶存シリカが、スケールとして熱水輸送管、生産井あるいは還元井を閉塞させる原因となり、スケール除去などの対策が必要である。地熱発電は、再生可能エネルギーのうち天候に左右されにくく安定的に発電可能なベースロード電源として今後更なる開発が期待されており、スケール障害対策は地熱発電システムの最重要課題となっている。

シリカスケール析出プロセスでは、シリカスケール析出における流速の不均質性の影響が報告されている。Garibaldi (1980) は、実験装置において流速の低い領域で析出量が増加することを確認した。また、実際の地熱井においても継手部分などの流れの滞り箇所において、析出量の増加が確認されている (Mercado et al., 1989)。これら流体の影響を考慮したスケールの析出シミュレーションもいくつか試みられているものの未だモデル化手法は確立されておらず、Mercado et al. (1989) などで観測されたような実際の地熱井でのスケール析出予測に関する詳細な検討が必要である。

シリカスケール析出のメカニズムに注目し、コロイダルシリカ粒子が流体によって運ばれ、壁面との相互作用力によって付着するという微視的なシリカスケール析出機構を流体物理学的に考察し、化学的な反応速度論ではない方法で説明可能であることを示すこととした。地熱発電の現場では、配管を流れる流体の運動を記述するため計算流体力学 (CFD) に基づく手法が適用されており、本研究の成果を取り込むことが可能であると考えられる。

2. 研究の方法

地熱流体中ではアモルファスシリカが粒径 10–100nm のコロイド粒子として存在する。コロイド粒子は、シリカ濃度、温度、pH、共存する塩類の種類およびその濃度などの条件の下、成長する。シリカモノマーが過飽和であるとき、コロイダルシリカは $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ を外側に向け、周辺のシリカモノマーと反応し、球状に成長していく。コロイダルシリカは流体によって運ばれ、その後、重力やファンデルワールス力、静電反発力といった外力の作用によって壁面に付着すると考えられる。本研究では、成長した球形のコロイダルシリカ粒子が流体中を運ばれ、壁面に付着する過程を物理学的に考慮する。

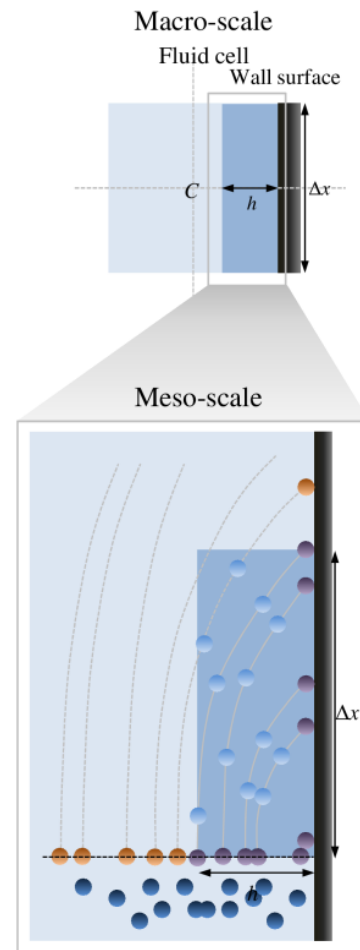


Fig.1: 析出量定式化の概念図

■部分に存在するシリカ粒子 ●が時間 T で壁面 Δx に付着する. h を超える高さを流れる粒子 ●は Δx には付着しない。

コロイダルシリカ粒子としてのシリカスケール析出は、マルチスケール性を有する現象である。粒子が流れに運ばれるプロセスは流れ場スケールでの解析であるのに対し、微粒子が壁面に付着するプロセスでは nm オーダーの現象である。この現象を扱うため、メソスケールシミュレーションでの単一コロイダルシリカ粒子の壁面付着挙動解析からマクロシミュレーションで用いるシリカスケール析出速度を導出する必要がある。メソスケールにおいて、 h は付着するまでに Δx 移動する粒子の初期状態における壁面からの高さに一致する。Fig.1 に示すようにメソスケールでは壁面近傍において無数のコロイダルシリカ粒子が存在しており、 Δx の領域には時間 T が経過すると壁面からの高さ h 以下に存在する粒子は、全て付着すると考えることができる。一方で、 h を超える高さを流れる粒子は領域 Δx には付着せずに流されてしまう。様々な条件下での Δx に付着するコロイダルシリカ粒子の壁面からの高さ h をメソシミュレーションにより求める。領域内の最大壁面せん断速度を基に計算された代表的な壁面からの高さ h からの粒子が付着するまでの時間をシリカスケール析出における代表時間 ΔT^0 として採用した。

3. 得られた成果

粒径 d で無次元化した粒子表面-壁面間距離 δ での各種粒子に作用する外力(重力 F_G 、流体抗力 F_D 、ファンデルワールス力 F_{VDW} 、静電反発力 F_{ELE} 、ブラウン揺動力 F_B)の大きさはFig.2のようになる。なお、図では流体抗力に関し、静止粒子に係る大きさが示されている。図から、コロイダルシリカの粒子サイズではブラウン運動が支配的に作用すること、粒子表面-壁面間距離が大きくなると ($10 < \delta / d$)、ブラウン運動の次に流体抗力及び重力が支配的となること、粒子表面-壁面間距離が小さくなるにつれ ($10 < \delta / d$)、ファンデルワールス力及び静電反発力といった相互作用力が支配的になることがわかる。壁面に近づくコロイダルシリカは、このような過程を経て、スケールとして析出すると考えられる。コロイダルシリカの析出は化学的プロセスであるが、格子ボルツマン法などのマクロスケールとなる流体力学的シミュレーションに取り込み、動力学のバランスで記述することが可能であることが明らかとなった。

4. 謝 辞

本研究は地熱技術開発株式会社からの委託研究として実施された。同社中田晴也社長および大里和己部長に篤く御礼申し上げる。

発 表 論 文

Mizushima, A., Mikada, H., Takekawa, J., The Importance of Hydrodynamic Conditions in Silicate Scale Growth Inferred From Numerical Simulation, Transactions - Geothermal Resources Council, 39, 489-494, 2015.

テキストスペース

参 考 文 献

- Garibaldi, F. (1980): The effect of some hydrodynamic parameters on silica deposition. Diploma Project, 80.11, Geothermal Institute, University of Auckland.
- Mercado, M., Bermejo, F., Hurtado, R., Terrazas, B. and Hernandez, L., 1989, Scale incidence of production pipes of Cerro Prieto geothermal wells, Geothermics, **18** (1/2), 225-232

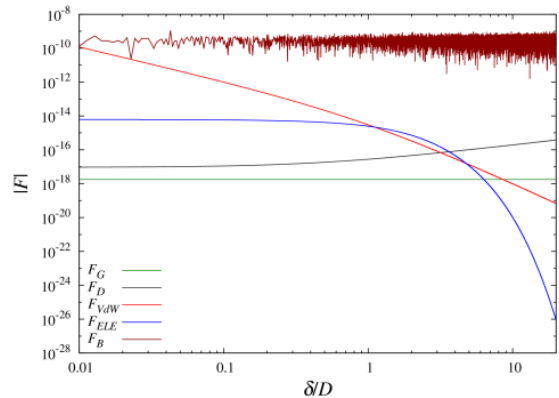


Fig. 2: 粒子表面 - 壁面間距離と微粒子に作用する外力の大きさ

—: 重力と浮力の合力, —: 流体抗力, —: ファンデルワールス力, —: 静電反発力, —: ブラウン揺動力をそれぞれ示す。