

# 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\*\*・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澱む箇所において、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。

昨年度までの受託研究において、格子ボルツマン法を用い、反応速度論に基づく化学的な沈殿プロセスだけではなく、流速の影響を考慮した物理的な沈殿プロセスの重要性を数値的に評価した。ケーシング継ぎ目などにおける流体運動に起因すると考えられるスケール成長の予測に成功しただけでなく、その成長における剪断流速の重要性を指摘する成果となった。今年度は、Mizushima et al. (2016) の物理学的シミュレーション手法では考慮されていなかった要因、すなわちブラウン運動および壁面に接触する溶存シリカ粒子の再離散を解析に取り入れ、さらに物理学的に完備した高精度シリカスケール析出予測のための基礎研究を行った。

## 2. 研究の方法

地熱流体中ではアモルファスシリカに働く重力やファンデルワールス力、静電反発力などの作用に加え、ブラウン運動及び流体から受けるストークス力を取り入れることで、壁面付着だけではなく、壁面からの再離散を扱うことができるようになる。アモルファスシリカ粒子を球形と仮定し、壁面における微粒子に作用する外力を図示すると図1のようになる。但し、粒子が比較的長い時間をかけて化学結合を構築するプロセスや粒子間の相互作用は無視する。図中、 $F_{ELE}$ は静電反発力、 $F_D$ は流体からの粘性抵抗力、 $F_{BG}$ は重力及び浮力の合力、 $F_{VdW}$ はファンデルワールス力、 $F_{ELE}$ は静電反発力、 $F_{Bx}$ 、 $F_{By}$ はブラウン揺動力の、それぞれ流れの下流方向及び壁に垂直な方向への成分である。粒子は壁面上の点Pを中心とする円運動で壁から再離脱する回転分離モデルを想定している。ファンデルワールス力については、粒子-壁面接触部での僅かな弾性変形に着目し、壁面上の粒子挙動を議論した。ブラウン運動に関しては、簡単のため、異方性が存在しないと仮定した。シミュレーションでは100,000個の粒子に関してこの回転分離モデルを適用し、壁面から剥がれる粒子数及び分離せずに壁に付着する粒子数をカウントし、粒子再離散率を推定した (図2)。

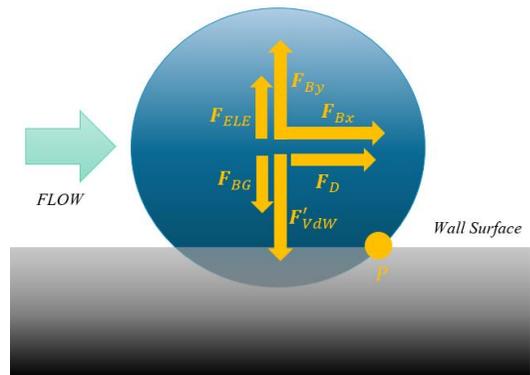


図1 壁面上の粒子に作用する力

シリカ粒子に働く力のうち、壁面からある程度離れた粒子に最も支配的で働くのはブラウン揺動力である。しかし、ブラウン運動は確率的要素を伴うため、粒子が壁面に吸着するまでの挙動を追う膨大な計算を行うアプローチは非現実的である。そこで本研究では、ブラウン運動の計算領域を空間的に限定し、その分割幅あたりの粒子拡散時間を推定するアプローチを採用した。粒子が壁面近傍まで移動し、ファンデルワールス力等により吸着した後、推定した粒子再離散率で再離脱する。壁面に付着したままの粒子を数終えることでスケール析出速度が決定される。

### 3. 得られた成果

ブラウン運動揺動力を近似的に定式化したところ、無視できない作用を示すことを確認できた。本研究により物理学的完備性の高いシミュレーション手法によるスケール析出速度を導出できた。得られた析出速度より算出された単位表面積当たりのスケール析出量は、細井・今井（1982）による実験値と良く一致した。地熱流体の壁面近傍における剪断流速が、シリカ粒子の壁面付着量を左右する非常に重要なパラメータの1つとなることも再確認された。これまで、反応速度論という化学的手法を中心とした解析が行われてきたスケール成長のメカニズムを、定性的・定量的に評価するために、さらに完備した物理学的過程を取り込む必要がある。

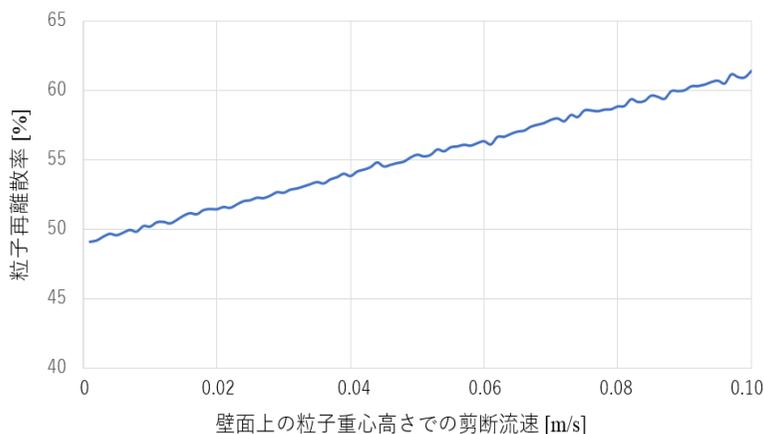


図2 ある計算条件の下で推定された粒子再離散率と剪断流速の関係

### 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ます。

### 発表論文

Iwata, M., Mikada, H., Takekawa, J., Quantitative simulation of silica scale deposition from physical kinematics perspectives, Proc. The 21<sup>st</sup> International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG 2017), doi: 10.3997/2352-8265.20140220.

### 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.
- 細井学・今井秀喜. (1982), 地熱熱水からのシリカスケール付着防止のための基礎研究, 日本地熱学会誌, Vol. 4 No.3, pp.127-142.
- 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
- Mizushima, A., Mikada, H. and Takekawa, J. (2016), The role of physical and chemical processes of silica scale growth in geothermal wells, Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG 2016). doi: 10.3997/2352-8265.20140209.