

農業水利施設における炭酸カルシウムスケールの生成予測手法の開発

Development of the predictive method of CaCO₃ scale within flow of irrigation systems

田中良和 向井章恵 中達雄
Yoshikazu TANAKA, Akie MUKAI, Tatsuo NAKA

1. はじめに

日本の南西諸島における隆起石灰岩で形成された島では河川がなく、地下ダムによって、地下水を灌漑用水として利用している地域がある。この地下水はカルシウムイオンを多く含むため、Fig.1のような炭酸カルシウムスケールが施設内に付着して、通水機能の低下を招くことが懸念される。長期間の安定的な水利用には、スケール生成量や生成箇所を予測診断し、対策を施すことが必要である。D.Hasson (1968) や S.H.Chan (1989) は、冷却器や熱交換器の流れの中で生じるスケール生成量を一次元のシミュレーションによって求めているが、改良の余地がある。本研究では、農業水利施設内の二次元および三次元的な流れ流体解析により、スケール生成量と箇所を予測する手法を開発し、スケール対策に資することを目的とした。

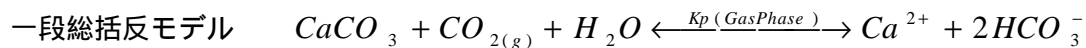
2. 既往の解析の問題点

D.Hasson や S.H.Chan のモデルは、Owen と Brinkley (1941) が指摘したイオン溶液中の溶質の平衡定数に対する圧力の効果を考慮していない。また、田中らによる現地調査 (1998) と室内実験 (2001) より自由水面と水中において不均一核形成が起きていることを確認したが、壁面においてのみスケールが析出すると限定されている。これらの問題点は、熱交換機や冷却塔の水理現象である細い管と薄膜流れをモデル化したため、三次元幾何学形状を持つ水利構造物のモデルに適さないと考えられる。

3. 本解析手法

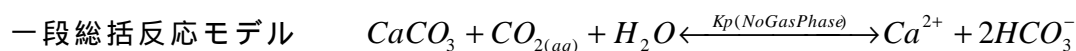
(1) スケール生成モデル 炭酸カルシウムの生成系は Fig.2 のとおりである。スケールが析出する主要因は、温度上昇による炭酸カルシウムの溶解度の低下と自由水面における遊離炭酸の大気拡散による溶質の濃度勾配の発生であると考えられる。Atkinson (1994) は、炭酸カルシウム溶液中の溶質の平衡定数に対する圧力の効果は気相が混在する場合にさらに顕著に表れることを指摘し、気相がある場合と無い場合の平衡定数を圧力の関数として表した。よって、計算点が自由水面に面する場合 (気相がある場合) と水中にある場合 (気相がない場合) に異なる結晶成長速度式を用いた。

自由水面に面する場合



$$\text{結晶成長速度式} \quad R = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \left[\frac{K}{K_H} \frac{C_{\text{Ca}} C_{\text{HCO}_3^-}^2}{C_{\text{CO}_2(g)}} - K_{P(\text{GasPhase})} \times \frac{K_2}{K_1} \times \frac{1}{K_H} \right]$$

水中にある場合



$$\text{結晶成長速度式} \quad R = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \left[K \frac{C_{\text{Ca}} C_{\text{HCO}_3^-}^2}{C_{\text{CO}_2(aq)}} - K_{P(\text{NoGasPhase})} \times \frac{K_2}{K_1} \right]$$

ここで、 A は頻度因子、 Ea は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度および K は平衡定数である。

(2) 流れ解析 支配方程式のラグランジュ的な記述は次式のとおりである。

$$\text{非圧縮性流体のナビエーストックス方程式} \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{m} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

$$\text{エネルギー保存式} \quad \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \mathbf{I} \Delta T + \frac{\partial P}{\partial t} + Q \quad \text{溶質の保存式} \quad \rho \frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{r}_i U_i) + w_i$$

ここで、 ρ は密度、 P は圧力、 \mathbf{m} は動粘性係数、 \mathbf{F} は外力、 c は比熱、 \mathbf{I} は熱伝導係数、 Q は発熱量、 C はモル濃度、 U は相対速度、および w は化学反応速度である。

支配方程式を越塚 (1996) が開発した MPS 法によって計算を行った。MPS 法は移動する流体粒子を計算点とするラグランジュ的な流体解析手法である。この手法は各項を粒子間相互作用に置き換えて計算するため、空間一階微分に起因する数値拡散を回避して溶質の移流の計算誤差を防ぐことが期待できる。また、格子を使わないため激しい水面揺動においても計算することができる。

解析例

分水調整施設 (深さ 3m × 幅 2m) の越流部分の計算を行った。境界条件は水面温度 30、壁面温度 25 とした。初期濃度は $\text{CO}_2(\text{g})$ 、 $\text{CO}_2(\text{aq})$ 、 $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$ および $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ をそれぞれ $1.0 \times 10^{-7}(\text{M})$ 、 $1.0 \times 10^{-7}(\text{M})$ 、 $3.24 \times 10^{-3}(\text{M})$ および $5.73 \times 10^{-3}(\text{M})$ とした。初期水温は 25 とした。

4. 結果と考察

計算結果を Fig.3 に示す。色の薄い粒子はカルシウムイオンの減少を表しており、水面において炭酸カルシウムの生成が多く発生し、壁面には見られなかった。この現象は、スケールの生成は開水路模型で見られ、クローズドパイプライン模型では見られないという実験結果(2001)と傾向が一致する。MPS 法は格子を使わないため、計算負荷が大きいことと計算結果の処理に負担がかかる等の問題があった。今後の研究において改良を行いたい。

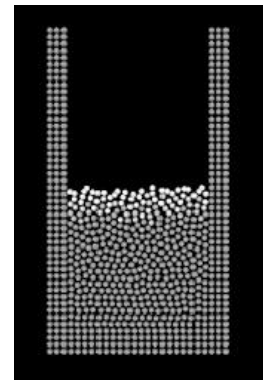
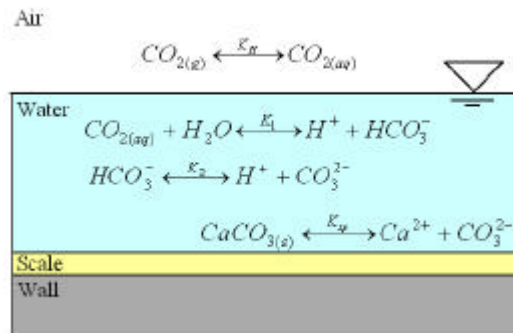


Fig.1 Deposition of CaCO_3

Fig.2 Chemical reaction formulas

Fig.3 Calculation Result

引用文献

- (1) Hasson D., Avriel M., Resnick W., Rozenman T. and Windreich S. (1968), 7(1), 59-65.
- (2) Chan S.H. and Ghassemi K.F. (1989), National heat transfer conference, 245-252.
- (3) Owen B.B. and Brinkley, Jr. S.R. (1941), Chem. Rev. 29, 461-474.
- (4) Atkinson G., Raju K.U.G. and Howell R.D. (1994), Corrosin94, 610, 1-15.
- (5) Koshizuka S. and Oka Y. (1996), Nuclear science and engineering, 123, 421-434.
- (6) 田中良和、島武男、相川泰夫、中達雄、加藤敬、島崎昌彦(1998)、農業土木学会大会講演会講演要旨集、72-73
- (7) 田中良和、島武男、中達雄 (2001) 農業土木学会大会講演会講演要旨集、546-547