

バブル付着時における水晶振動子の共振特性のモデル化

Modeling the response of a quartz crystal microbalance to the adsorption of bubbles

同志社大¹, 千葉大², °下谷 遼資¹, 吉田 憲司^{1,2}, 渡辺 好章¹Doshisha Univ.¹, Chiba Univ.², °Ryosuke Shimoya¹, Kenji Yoshida^{1,2}, Yoshiaki Watanabe¹

E-mail: dun0351@mail4.doshisha.ac.jp

1. はじめに

標的指向性マイクロバブルの患部へ集積するという特性を利用した超音波分子イメージングや超音波ドラッグデリバリーシステムが注目されている。これらの技術では、バブルの“標的指向性能”すなわち標的部位への特異的付着量や付着速度を定量的に評価することが求められる。

本研究では、厚みすべりモードで振動する水晶振動子 (Quartz Crystal Microbalance; QCM) を用いた評価手法を提案する。我々はこれまでに、バブルの特異的付着により QCM の共振周波数が変化することを実験的に確認しているが、その機序の解明には至っていない。本報告では、バブル付着時の QCM の共振特性変化を再現する理論モデルを構築し、その計算結果と実験結果を比較する。

2. 理論モデルの構築

バブルは化学結合を介して QCM 表面に付着させた。Fig. 1 に模式図を示す。バブルが QCM 表面とともに並進運動をすると仮定した場合、付着バブルの運動方程式は以下のように記述できる。

$$ma = F_t - F_a - F_d \quad (1)$$

m はバブルの膜の質量、 a は加速度を表す。 F_a は質量付加効果による慣性、 F_d は抵抗力である。 F_t は化学結合による拘束力を想定し、この力の反作用が“せん断応力”として QCM 表面に働くと仮定する。

一方、QCM の振動特性は Mason の等価回路で表すことができる。バブルが加えるせん断応力は機械インピーダンス Z_s として考慮することができる。実際の状況では振動子表面に多数のバブルが吸着するため、バブルの粒径分布 (直径 1-5 μm) を考慮して Z_s を決定した。この等価回路からバブル付着時の QCM の振動特性変化量を算出し、実験値との比較を行った。

3. 実験値との比較

Fig. 2 に、QCM 上に滴下するバブルの個数に対する共振周波数変化量の実験値を示す。図よりバブル 4 万個以上では周波数変化量に大きな差は見られず、付着量が飽和していると考えられる。4 万個のバブルを滴下した際の周波数変化量を、前述の等価回路を用いて計算すると 200 Hz で、実験結果とある程度一致している。今後、検証実験を積み重ね、本理論モデルの妥当性を検討していく予定である。

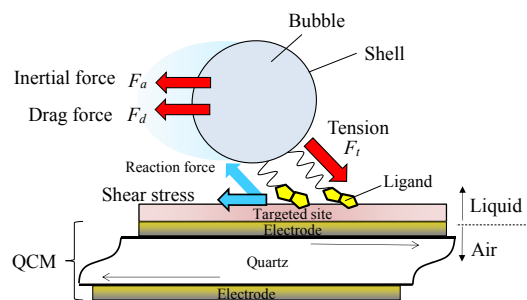


Fig. 1 Diagram of an attached bubble on the QCM surface. The ligand on a bubble binds to the targeted site formed on the top electrode of a QCM.

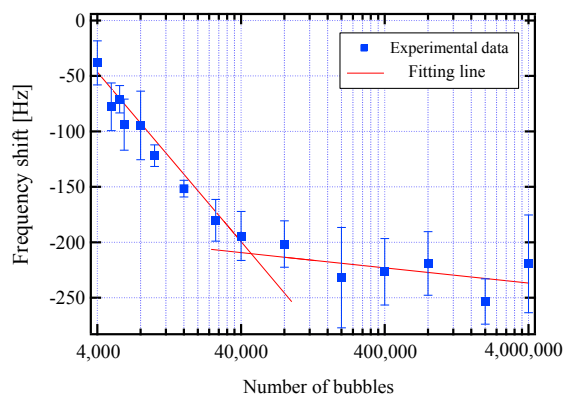


Fig. 2 Frequency shift caused by fixation of the different number of bubbles. “Number of bubbles” means the number contained in the suspension on a QCM.