

数値流体解析による橋梁近傍での結露シミュレーションに関する研究

農林水産省 正会員 安田 大樹
名古屋工業大学 正会員 小畑 誠
名古屋工業大学 正会員 後藤芳顕

1. はじめに

近年では、土木構造物の適切な維持管理の必要性が広く認識されている。そのため鋼橋の維持管理においては、特に腐食環境を適正かつ合理的に評価することが重要である。鋼橋の腐食への影響因子として、海岸部では飛来塩分量や付着塩分量があげられこれについての調査は多い。一方、降雨や結露等による水分の補給も重要であり、こういった気象因子も含めた橋梁のおかれた環境の総合的な予測の必要性は高いと考えられるが、これについての定量的な検討を目指した解析的な研究は少ない。

そこで本研究では、環境因子の中の特に水分に注目し橋桁における結露および蒸発の様子を、橋梁近傍部での数値流体解析によりシミュレーションを行い、その腐食環境予測への適用性を検討した。

2. 結露および蒸発の表現

数値流体解析には汎用の流体解析プログラムである STAR-CD Ver.3.15¹⁾を用いる。STAR-CD は流れ、熱輸送、熱伝導、物質拡散等の連成問題を扱うことができ、数値解法としては有限体積法を用いるものである。しかし、厳密な意味での結露現象をシミュレーションする機能は十分ではないので、ここではユーザーサブルーチンによるカスタマイズ機能を用いて適用する。

結露現象とは、物体表面温度の飽和水蒸気圧が、近傍の空気の水蒸気圧よりも低いときに、水蒸気が凝縮し表面に水滴が付着するものである（図 1）。したがって、気相から液相あるいはその逆の変化を伴う物質の移動のみならず、水滴と物体および空気との間の熱のやりとりが問題となる。本解析において前者は、物体表面に微小な水滴核(droplet)を導入することに取り扱い、後者は次のように考える。すなわち、物体表面の凝縮した水滴は半球と仮定し、水滴の温度 T_d は重心の温度で代表させる。そして、空気、水滴、物体間の熱流を考えて次式を得る。

$$c_p m_d \frac{dT_d}{dt} = Q_d, \quad Q_d = Q_a + Q_w + Q_{fg} \quad (1),(2)$$

ここに c_p , m_d はそれぞれ水滴の比熱および質量であり Q_a, Q_w, Q_{fg} はそれぞれ、空気と水滴間、物体と水滴間の移動熱量、および水の潜熱（蒸発熱あるいは凝結熱）である。そして、 Q_a と Q_w は次のように与える。

$$Q_a = 2\pi r_d^2 h_a (T - T_d) \quad (3)$$

$$Q_w = \pi r_d^2 h_w (T_w - T_d) \quad (4)$$

r_d , T , T_d , T_w はそれぞれ水滴の半径、空気、水滴、物体表面の温度であり、 h_a , h_w はそれぞれ、空気-水滴間、物体表面-水滴間の熱伝達率である。熱伝達率の詳細については文献 1) および 2) を参照されたい。水滴の温度については式(1)を別途積分するユーザーサブルーチンで対応する。

3. 箱桁モデルに対する蒸発および結露のシミュレーション

以上のカスタマイズを施したうえで、橋梁のモデルに対して、蒸発および結露のシミュレーションを行う。解析対象となる領域およ

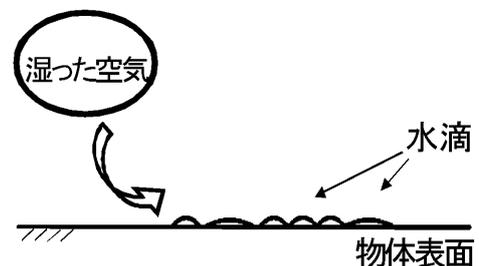


図 1 結露現象

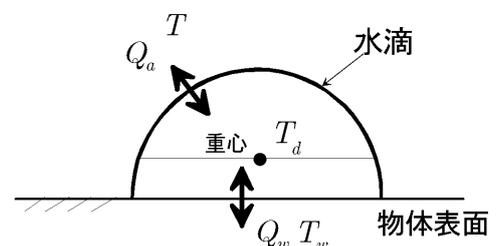


図 2 水滴に関する熱のやりとり

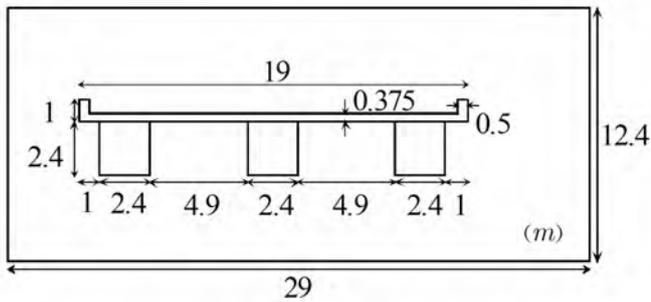


図3 箱桁モデルと解析領域

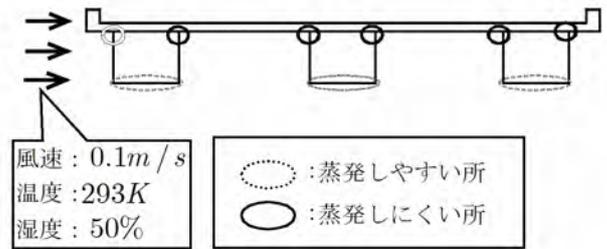


図4 箱桁における蒸発状況

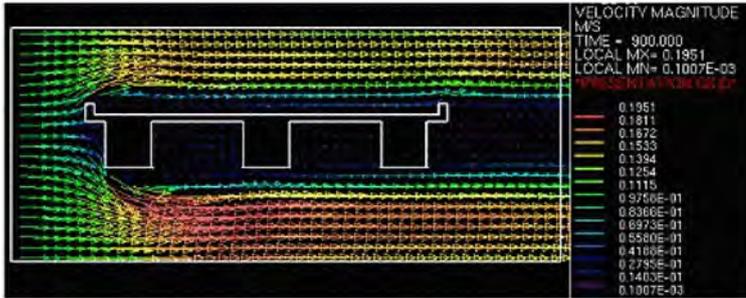


図5 空気の流れの分布

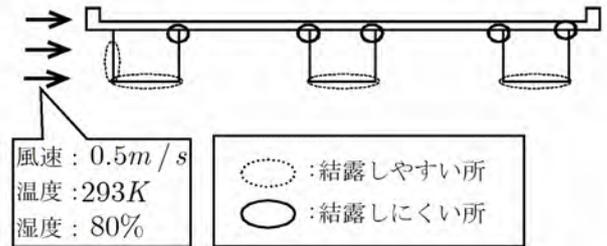


図6 箱桁における結露の状況

び橋梁の断面を図3に示す。

(1) 蒸発

桁の表面に水滴を付着させたうえで、図4に示すように比較的乾いた空気をモデルの左端から一様に流し、水分の乾燥状況を見る。このときの空気の流速分布の一例を図5に示す。

図4に示すように、桁表面の風速の比較的大きいところで乾燥が速く、空気のよどむ桁上部の角点での乾燥が最も遅くなった。もともと、桁全体で完全に水分が蒸発するまでの時間をみると、差は部位によりそれほど大きいわけではなく高々10%程度であった。また、3つのどの桁においても、蒸発の様子に大きな差はなかった。乾燥した空気の流れがわずかにでもあれば表面の水分はほぼ一定に蒸発していくことがわかる。

(2) 結露

蒸発の場合とは逆に、図6にあるように、湿度の高い空気を桁の左端から一様に流し、桁表面における結露の様子を見た。このときの桁の温度は288Kとした。図4と比較すると、蒸発と結露の起こりやすいところはほぼ一致していることがわかる。具体的に主桁の部位別に結露状況を見ると、空気の流れの速い図6の点線部分で示したウェブや下フランジ部分で水滴の成長が速く、逆に空気がよどみやすい実線で囲まれたウェブ上端での水滴の成長は遅かった。空気がよどむと水蒸気の供給が少なくなり、結果として結露の成長は少なくなることを示している。蒸発も結露も空気を媒介とする水分のやりとりであるから、空気の流れが速ければ、それを媒介とする水分の移動も大きくなるためである。

4 まとめ

橋梁の腐食環境の重要な因子である水分の供給について、熱の流れも考慮した、桁表面における結露・蒸発のシミュレーションを、汎用プログラム STAR-CD のユーザーサブルーチン機能を使うことにより実現した。解析結果の精度についての検討を残しているが、これは、橋梁近傍の腐食環境の定量的な評価のための重要な手段を提供するものと考えられる。

参考文献:

- 1) CDL, StarCD Version3.15, マニュアル, 2001
- 2) 安田大樹, 数値流体解析の橋梁近傍における腐食環境シミュレーションへの適用に関する研究, 名古屋工業大学修士論文, 2006