

一様流中での LES を用いた正方形角柱まわりの塩分粒子飛散解析

京都大学 学生員 ○津田 悠希
京都大学 学生員 坪倉 佑太

京都大学 正会員 野口 恭平
京都大学 正会員 八木 知己

1. はじめに 腐食による損傷が頻発する鋼橋の維持管理においては、鋼材を腐食させる海塩粒子の橋梁部位別付着量の定量的評価が重要である。橋梁部位別の付着塩分量評価は主に現地観測によるが、コスト低減のために、風洞実験や数値解析による評価手法が検討されている。しかし、依然として時間的・経済的に負担が大きく、より簡便な評価手法の考案が求められている。そこで本研究では、橋梁の部位別付着塩分量を簡便に評価する手法として、代表地点の風速と大気中塩分濃度の積により求まる海塩粒子の質量フラックスに、橋梁部位別の定数 γ を乗ずることで、部位別に付着塩分量を算出する手法を提案する。任意形状への提案手法の適用に向けた知見を得ることを最終的な目的とし、本研究では基礎的な検討として、数値流体解析 (CFD) によって正方形角柱まわりの非定常流れ場を算出し、得られた流れ場に基づいて粒子飛散解析を行うことで、正方形角柱における部位別付着量を算出した。これに基づき、 γ の値に影響を与える因子を検討する。

2. 正方形角柱まわりの非定常流れ場計算手法 正方形角柱まわりの粒子の挙動の解明と、正方形角柱に対する部位別付着分布特性を検討するため、断面辺長比 $B/D=1$ の正方形角柱まわりの非定常流れ場を OpenFOAM による LES で算出した。乱流モデルは Smagorinsky モデル (Smagorinsky 定数: 0.12) を使用した。図 1 に解析領域を示す。レイノルズ数は $Re=10^4$ (流入風速 1.5 m/s) とした。

3. 正方形角柱まわりの粒子飛散解析手法 正方形角柱まわりの流れ場において粒子を投入し、角柱への粒子の部位別付着量の算出を行った。粒子は、角柱前方 $9D$ の位置に一辺 D の立方体を考え、その内部に主流方向に 1.5 m/s の初速を与えた粒子を 10^6 個配置した。流れの非定常性の影響を勘案するため、カルマン渦周期 T に基づき $T/4$ ごとに 8 回 (計 800 万個) 投入した。完全な球形を仮定し、非定常流れ場中における粒子に働く力として抗力のみを考えた。なお、海塩粒子の移流の効果が支配的であると仮定し、拡散の効果は無視した。また、壁面近傍に到達した粒子の付着は、慣性による壁面への衝突によって判断し、壁面での粒子の反発等は考慮しない。このとき、無次元化された流体中での粒子の運動方程式は次式で表される。

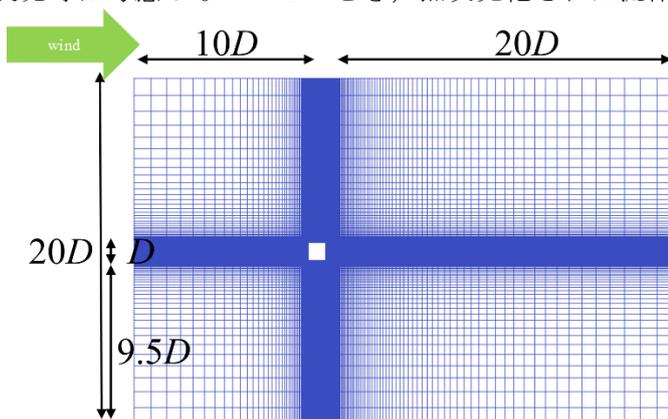


図 1 $B/D=1$ の正方形角柱まわりの解析格子

$$S_{tk} \frac{d^2 \mathbf{r}^*}{dt^{*2}} + \frac{C_d}{24} Re_p \left(\frac{d\mathbf{r}^*}{dt^*} - \mathbf{U}_f \right) = 0 \quad (1)$$

Re_p : 粒子レイノルズ数, C_d : 抗力係数. S_{tk} はストークス数という無次元数で、粒子の流れに対する追従性を表す(式(2)). $S_{tk} \ll 1$ のとき粒子の流れに対する追従性がよい¹⁾とされる。

$$S_{tk} = \frac{\rho_p d_p^2 U}{18 \rho_f \nu D} \quad (2)$$

ρ_p : 粒子の質量密度 [kg/m^3], d_p : 粒径 [m], ρ_f : 流体の密度 [kg/m^3], ν : 動粘性係数 [m^2/s], U : 代表速度 [m/s], D : 代表長さ [m]. ストークス数は、粒径を 10, 20, 30, 50, 60, 80, 100 μm と定め変化させた。

4. 粒子飛散解析結果 粒子の付着数について面どうしを比較すると、粒径によらず、粒子付着数は前面、背面、上下面の順に多いことが明らかになった。粒子に作用する慣性の働きで、粒子が角柱前面に容易に衝突するため前面で多くなり、前面に付着することなく気流に追随し流下した粒子が、流れの剥離により形成される渦によって上下面及び背面に付着する。より具体的には、前面に付着しない粒子は、剥離流れの作る

キーワード 飛来塩分, LES, 付着塩分量, 正方形角柱, ストークス数

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂キャンパス C1 棟 457 TEL 075-383-3170

渦の働きによって、まず角柱背面に回り込み付着し、さらに角柱背面でも付着しなかった粒子が上下面に輸送され付着することが分かった。このため、上下面への付着量と背面への付着量を比較すると背面への付着量の方が高い傾向にある。また、図2に示すとおり、 S_{tk} が大きくなると、慣性の増大により背面での付着量が増加するが、 S_{tk} がさらに大きくなると粒子が後背部へ回り込みにくくなることで、背面及び上下面への粒子の付着が少なり、最終的には図3のように付着しなくなることが判明した。

図3・図4に粒子の部位別付着量の一例を示す。角柱表面の幅 $D/10$ ごとの帯状の領域への付着粒子数を、投入粒子数(=800 万個)により正規化している。粒子付着量の面内分布を見ると、前面では角部で付着量が多く、中ほどで付着量が少なくなった。これは、面の中ほどで流れがよどむことや、気流を追従し迂回する粒子が角部に集中することが原因と考えられる。背面及び上下面でもこの傾向は見られたが、背面では前面と異なり、面の中ほどで付着量が増加するケースが見られた。これは、粒子の流れに対する追従性の良し悪しと背面に粒子の付着を促す渦流れの大小によって、粒子の付着しやすい場所が異なることが原因と考えられる。上下面では、前縁側よりも後縁側に広く付着することが分かった。これは、上下面に付着する粒子が背面から回り込んでくる為と考えられる。 $B/D \leq 6$ の断面では同様の傾向になると考えられるが、剥離した流れが上下面で定常的に再付着する $B/D > 6$ の完全再付着断面では、背面より上下面への付着が増大すると考えられるため、今後このような断面について検討が必要である。以上の検討により γ を部位別に定めることが可能である。今後は対象形状を様々に変え、粒子の飛散特性および γ に与える影響を検討すること

とで、簡便な付着塩分量評価による効率的な維持管理を可能にすると考えられる。その際には、粒子の流れに対する追従性を考慮しなければならないことが明らかになった。

5. まとめ 非定常流れ場中における粒子飛散解析により、部位別に異なる付着量と粒子の流れに対する追従性による付着量の変化を明らかにした。これにより γ を部位とストークス数に応じて与えることで、簡便な付着塩分量評価による効率的な維持管理を可能にすると考えられる。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 15H02261, 一般社団法人日本鉄鋼連盟鋼構造研究・教育助成事業の助成を受けた。本研究の一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した。

参考文献 1) 高橋：エアロゾル学の基礎，森北出版，2003。

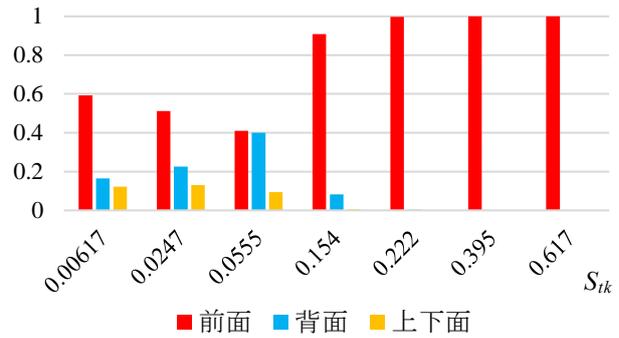


図2 S_{tk} と各面の付着に対する寄与 (正方形角柱全体への付着量を 1 としている)

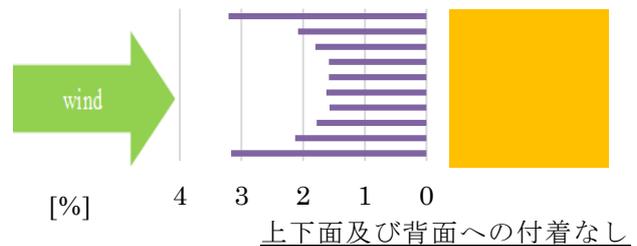


図3 $S_{tk}=0.395(d_p=80 \mu\text{m})$ の部位別付着量

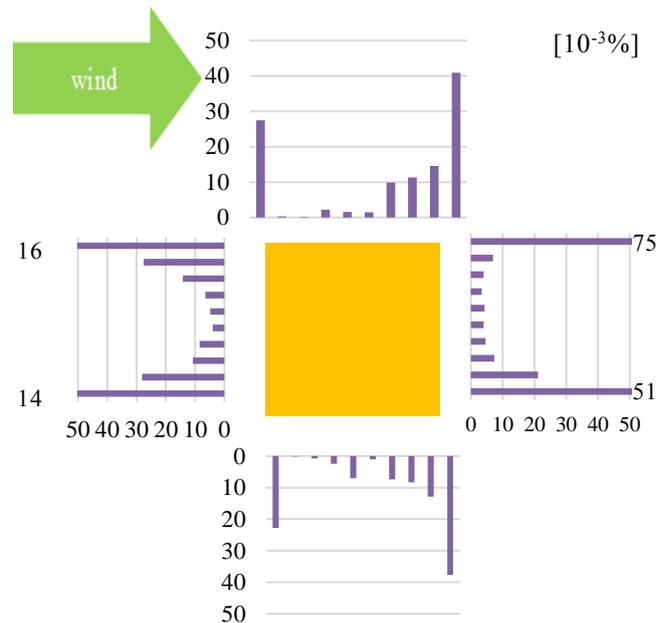


図4 $S_{tk}=0.0247(d_p=20 \mu\text{m})$ の部位別付着量