

第I部門

LES による矩形断面まわりの塩分粒子飛散解析

京都大学工学部 学生員 ○津田 悠希
 京都大学大学院工学研究科 学生員 坪倉 佑太

京都大学大学院工学研究科 正会員 野口 恭平
 京都大学大学院工学研究科 正会員 八木 知己

1. はじめに 鋼橋の経済的な維持管理を実現する為には、鋼材の腐食因子である海塩粒子の橋梁部位別付着量を定量的に評価することが重要である。橋梁部位別の付着塩分量評価の手法としては現地観測が主流であり、観測に代わる手法として風洞実験や数値解析が検討されている。しかし、依然としてこれらの方法は、時間的・経済的な負担が大きく、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かつ正確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。本手法の確立に向けて、基礎的な検討として、矩形断面を対象に検討を行い、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目的とした。具体的には、数値流体解析(CFD)によって矩形断面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、矩形断面における部位別付着量を算出した。これに基づき、式(1)中の γ を部位別に定めるとともに、 γ に影響を与える因子を検討する。

$$dQ = \gamma C U dt \quad (1)$$

Q : 部位別付着量, C : 大気中塩分濃度, U : 接近風速.

2. 矩形断面まわりの非定常流れ場計算手法 矩形断面まわりの粒子の挙動の解明と、矩形断面に対する部位別付着分布特性を検討するため、矩形断面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。解析対象の矩形断面は、断面辺長比 B/D の異なる 3 ケース ($B/D=0.1, 1, 2.5$)とし、一例として図1に示すように解析領域を設定した。レイノルズ数は $Re=10^4$ (流入風速 1.5 m/s)とした。

3. 矩形断面まわりの粒子飛散解析手法 得られた矩形断面まわりの流れ場において、断面上流より粒子を投入し、角柱への粒子の部位別付着量の算出を行った。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。

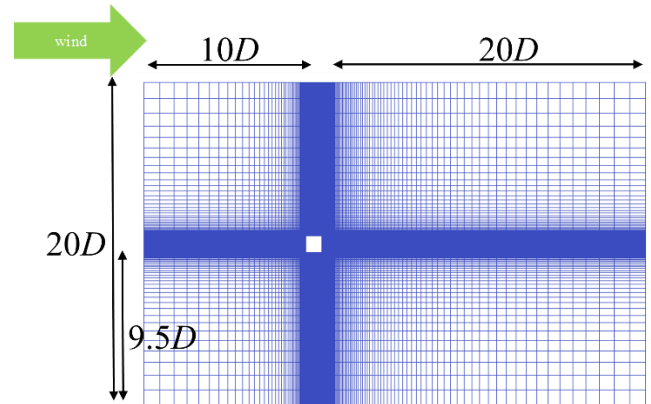


図1 $B/D=1$ の矩形断面まわりの解析格子

矩形断面前方 $9D$ の位置に一边 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。また、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、矩形断面での部位別付着量を得た。本研究における粒子と流体の相互作用は、流体が粒子に与える効果のみを考える one way coupling とした。飛来塩分を模した粒子は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。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の式で表される。

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

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(3)). $S_{tk} \ll 1$ のとき粒子の流れに対する追従性がよい¹⁾とされる。

$$S_{tk} = \frac{\rho_p d_p^2 U}{18 \rho_f \nu D} \quad (3)$$

ρ_p : 粒子の質量密度[kg/m³], d_p : 粒径[m], ρ_f : 流体の密度[kg/m³], ν : 動粘性係数[m²/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 図3・図4に $B/D=1$ の角柱への粒子の部位別付着量の一例を示す。角柱表面に幅 $D/10$ ほどの帯状

Yuki TSUDA, Kyohei NOGUCHI, Yuta TSUBOKURA and Tomomi YAGI

tsuda.yuki.43s@st.kyoto-u.ac.jp

の領域を設定し、これらの領域に付着した粒子の数を投入粒子数(=800 万個)により正規化している。面どうしを比較すると、粒径や断面辺長比によらず、粒子付着量は前面、背面、上下面の順に多いことが明らかになった。前面で最も付着量が多くなるのは、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為である。一方で、側背面に粒子が付着するのは、角柱前面に付着することなく気流に追従し流下した粒子が、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輸送される為である。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明らかになった。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多い傾向にある。また、図 5 に示す S_k と各面の付着に対する寄与の関係が示すとおり、 S_k が大きくなると、つまり粒子の流れに対する追従性が低下すると、背面では慣性の増大により付着量が増加するが、 S_k 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 4 のように付着しなくなることが判明した。

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、前面の中ほどで流れがよどみ、角柱端部周辺で風速が上昇することや、気流を追従し壁面を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。一方背面では、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や渦の非定常性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を回り込んでくる為と考えられる。なお、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、上下面への付着量が増大し、異なる付着量分布を示すと考えられるため、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 は部位別に定めることが必要であり、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。また、 γ の大小は流れ場に影響を受けることが判明した。

5. まとめと今後の展開 非定常流れ場中における粒子飛散解析の結果、粒子の付着量は部位別に異なり、粒子の流れに対する追従性によって変化することが明らかになった。これにより、部位別付着量を与える γ は、流れ場構造や粒子の流

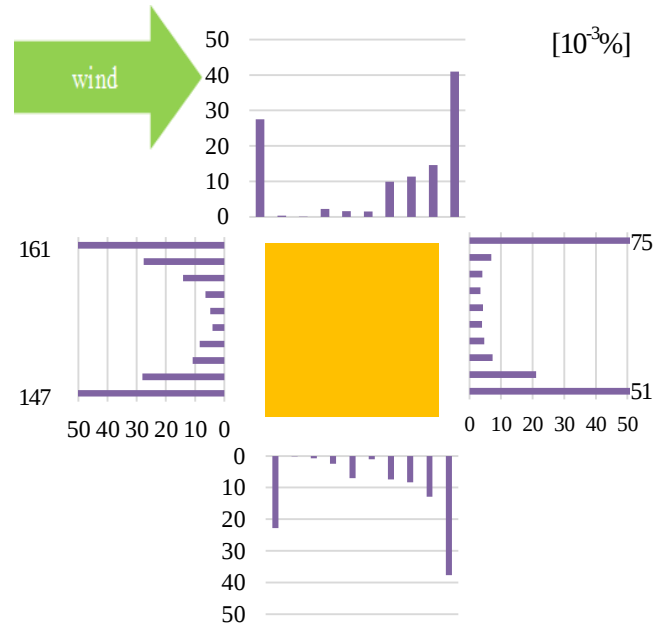


図3 $B/D=1$, $S_k=0.0247(d_p=20 \mu\text{m})$ の部位別付着量

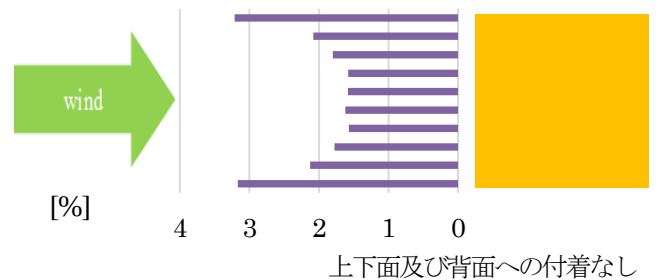


図4 $B/D=1$, $S_k=0.395(d_p=80 \mu\text{m})$ の部位別付着量

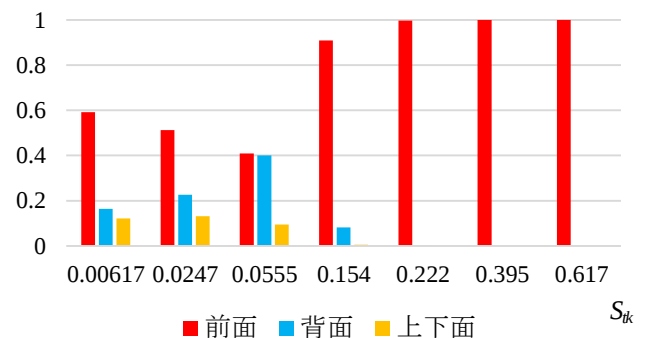


図5 $B/D=1$ における S_k と各面の付着に対する寄与 (矩形断面全体への付着量を1としている)

れに対する追従性により変化することが明らかになった。

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。