固気2相流解析による飛来塩分の付着シミュレーション

Numerical simulation of sea salt particulate matter adhesion on bridge surfaces by two-phase flow analysis

小畑 誠*, 長谷川 高士**, 永田 和寿*** 後藤 芳顯**** Makoto Obata, Takashi Hasegawa, Kazutoshi Nagata and Yoshiaki Goto

*Ph.D. 名古屋工業大学教授 大学院社会工学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
**名古屋工業大学大学院 (466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
***博士(工学) 名古屋工業大学助教授 大学院社会工学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
****工博 名古屋工業大学教授 大学院社会工学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

It is important to estimate corrosion environment of steel bridges for a proper corrosion prevention and maintenance program. Sea salt particulate matter(SS-PM) plays a critical role in a corrosion process of steel bridges. Generated by wind on the ocean, it flies some distance over land and attached itself on the bridge surface. Although the generation and flyover of SS-PM have been observed intensively, adhesion of SS-PM on bridge surface is yet to be investicated both experimentally and numerically, as adhesion of SS-PM occurs in a highly non-uniform manner. The objective of this work is to simulate the behavior of SS-PM near a bridge using Lagrangeian type multi-phase flow analysis. The results show that the Lagrangian approach provides with a useful tool for the understandings of the adhesion behaviors, though many are still to be studied in physics and chemistry of adhesion.

Key Words: corrosion environment, computational fluid dynamics, maintenance of bridges キーワード: 腐食環境, 飛来塩分, 流体解析, 橋梁の維持管理

1 はじめに

腐食は鋼橋の寿命を左右する重要な因子であり,腐食を 防ぐためには設計段階での周辺環境に応じた適切な材料 の利用に加えて,供用中の塗装の管理等が必要となる.腐 食に寄与する因子としては,飛来塩分等の桁表面に付着す る微細浮遊粒子や水分があり,橋梁の建設においては建設 地点における飛来塩分等について配慮することになって いる¹⁾.

飛来塩分は主として海面上から供給されるので,各地点 の大域的な飛来塩分量については観測データにもとづい て与えられている.実際には,飛来塩分量は天候や地形の 影響を大きく受けるので,より精密な予測をする必要があ り,この点についても,流体解析を用いた数値シミュレー ションが数多く試みられている²⁵⁾.とくに最近では計算 機能力の向上とともに精緻なモデルが使われる傾向があ る.さらに飛来塩分にとどまらず微小粒子状の汚染物質の 飛来や拡散をより現実的な初期・境界条件のもとで求める ために、メソスケール気象解析プログラムに組み込んで予測する手法も近年は活発に行われている⁶⁻⁸⁾.

もっともこれらは橋梁の建設地点での飛来塩分の挙動 であって、構造物そのものに付着する塩分粒子については 別途考察が必要である.なぜなら、桁のまわりの空気の流 れは一様ではないから、付着量は桁の部位によって大きく 異なることが容易に予想されるし、いったん付着した粒子 もまた部位によっては雨水等によって洗い流されるから である.そして、合理的な鋼橋の点検や維持管理のために は付着粒子の集中する部位を把握しておく必要性は高い.

本研究は浮遊微小粒子としての飛来塩分の桁への付着 挙動について,数値流体解析を行うことによりシミュレー ションを行う.浮遊固体粒子の物体表面への付着挙動は古 くから幅広く興味を集めている問題であるが,これらのシ ミュレーションについては,近年になって大規模な乱流の 数値シミュレーションが可能になったことから急速にそ の適用対象が広がっている⁹.本研究では浮遊粒子をラグ ランジュ的に追跡する固気2相流の手法を用いて,風速や 濃度が付着挙動に及ぼす影響を詳細に検討し、ラグランジ ユ的な取扱についての問題点について明らかにすること を目的とする.そして、著者らがこれまでに行ってきてい る現場観測結果とも比較検討する.

2 飛来および付着塩分量の観測

2.1 概要

著者らは福井県県道の明治橋(2005 年 5 月竣工,図 1(a)(b))において温湿度,風向風速,付着塩分量および飛 来塩分量の現地観測を平成 2006 年より実施している.以 下に調査内容の概要を示す.明治橋は福井市内の日野川に かかる橋長 270m の三径間連続鋼箱桁橋である(図 1(a),(b)).海岸から直線距離でおよそ 11km,河口からおよ そ 15km に位置し橋軸は北に対して西におおよそ 60°の角 度をなしている.

風向風速については橋脚上の欄干に取り付けた(図1(c)) 超音波式風向風速計(SE-8352US6M, SENECOM 社製)に よって測定している.測定間隔は1秒である.飛来塩分に ついては土研式タンクを橋脚上に下流側(北東側)に開口 部を向けて設置することによって測定した(図1(d)).測 定期間は2006年2月末~2007年2月末までの約1年間で ある.また付着塩分については橋桁表面に ACM 腐食セン サーを設置し間接的に付着塩分量を測定した.ACM セン サーは厚さFe基盤上に絶縁層を介してAg層を印刷したも のであり,腐食環境下で Fe 基盤と Ag 層との間に電流 (0.1nA~1mA)が流れることを利用して,腐食環境の 強度を計測するものである.直接的には鋼材の腐食環境を 計測するセンサーであるが,腐食電流量と付着塩分量の相 関関係が知られている.測定期間は 2006 年 2 月から観測 を開始しており現在も継続中である.観測間隔は 10 分と している.

2.2 観測結果

観測結果は図 2~4 にまとめる. 図 2 は土研式タンクに よる観測結果である. これからわかるように冬季の季節風 により飛来塩分が多くなるという日本海側の特徴を示し ている. 観測結果は事前の観測結果とほぼ同様となってい た. 図 4 に ACM センサーの観測結果を示す. ACM セン サーの出力結果は観測された電流量を次式¹⁰⁾で普通鋼の 年間腐食速度 CR(*mm*/*year*)に変換したものを月別に表 したものである.

$$\log CR(Fe) = 0.379 \log Q - 0.723 \tag{1}$$



図1 明治橋と計測機器の配置



図4 鋼材腐食速速度

ここに Q(C/day)は日平均電気量である.腐食電流量と付着 塩分量および相対湿度には相関関係があることが知られ ており¹¹⁾,相対湿度が同じであれば付着塩分量と腐食電流 量は正の相関関係がある.

図4からわかるように、箱桁という比較的単純な断面形 状を持つ橋であっても,桁の部位による腐食の進行速度は 大きく異なっている.一般的傾向と同様に全般的には桁の 内側の腐食電流量が外側に比べて大きくなっている. 桁1 と桁2については、冬季を通じて下流側の桁2の方が腐食 電流量がわずかに大きい傾向が見て取れる. 観測によれば 月別平均湿度がほぼ70~80%と安定していることから、付 着塩分量は桁内側の方が多いことになる.また、時系列を 追うと11月から3月にかけて腐食電流量が明確に大きな 値を示している.これは冬季の季節風のためであろう.そ して,これは土研式タンクによって計測した飛来塩分量の 月別変動傾向とも一致している. なお, ACM センサーは 2006年2月に設置したので、初期は出力が安定せず、その ため 2007 年 2 月の出力に比べ小さい. また, 平野部に位 置する最寄りの福井気象台での冬季の最多風向は南風で あるが,現地は山が近接しており橋桁に設置した風向風速 計によれば最多風向はほぼ南西方向すなわちほぼ川上方 向に近い,ついで北東すなわち下流方向からの風となる. 一例として 2007 年 1 月の現地での風の観測結果を図 3 示 す.これからわかるように,アメダス観測点の密度は高く ないため風については特に現地観測や局所的な気象条件 の予測の必要性は高い.

3 海塩粒子付着のシミュレーション

3.1 概要

すでに述べたように、鋼橋の腐食環境には橋梁に付着す る海塩粒子等の汚染物質は重要な因子となっている.そこ で、事前の環境調査でも飛来塩分が重視されている¹⁾.橋 梁への付着塩分量を評価するためには、①飛来塩分の主な 供給元である海面からの現地への移流、②飛来塩分による 橋梁に対する付着、③付着した塩分のはく離または雨水等 による洗い流し、のそれぞれについて検討する必要があ る.これらの数値シミュレーションについて考えると、ど れも流体解析に大きく依存しているが、扱うスケールの大 きさは異なる.

①は数 10km の範囲の大気の流れが問題となるのであ り、地形や土地の利用状態ないし天候も影響するので、現 実的にはメソスケールの気象解析の一環として行うのが 妥当と考える.実際に排気ガスや浮遊粒子状物質の地域レ ベルでの拡散状況については地球規模だけでなく地域レ ベルでもメソスケール気象解析の一環として行うことが 可能になっている 6-8). 次に, ②については①の解析で与 えられた初期境界条件をのもとで橋の各部の空気の流れ を考慮し、浮遊する海塩粒子の挙動を検討することにな る.ここでは、浮游する粉体の壁面への付着がシミュレー ションの主たる目的となる.次に、③については今のとこ ろ具体的な数値シミュレーションは少ない. ただし, 雨水 による塩分の洗い流しの効果は大きいので、腐食に対する 付着塩分の影響の評価にはこの論点を避けることはでき ない.この部分のシミュレーションの可能性については現 在検討中である.

本研究では主として上記の②の点についての検討を行 う.一般的に浮遊微粒子の輸送および付着現象は,輸送や フィルターなど幅広く工学の重要な問題として認識され 古くから精力的な研究が行われている^{9,12)}.そして橋梁の まわりの飛来塩分の挙動についての研究も多い²⁴⁾.しか し,微小粒子の付着挙動に直接注目したものは多くなくい まだ解明すべき問題は多い.

流体解析を基本として浮遊微小粒子の付着挙動を解析 する方法としては、固相と気相をあえて区別せず微小粒子 全体を一つの気相として浮遊粒子の局所性を濃度で表す いわゆるオイラー法と、微小粒子を固相として扱い粒子に 関する運動方程式を解いてその移動を追跡していくラグ ランジュ法がある.オイラー法はラグランジュ法に比べて 計算量は少ないが、付着挙動と濃度との関係などは現象学 的手法で考慮せざるを得ず、本問題への適用は困難と考え る.一方ラグランジュ法はモデルが明解である一方で計算 量が多いのが難点であるが、計算機能力の向上により計算 コストの壁は今もなおさがってきているため、近年ではも っぱらラグランジュ法による研究が行われている.本研究 でもラグランジュ法を用いる.

3.2 浮遊粒子の運動方程式

空気中の浮遊する微小粒子に作用する力としては,空気 と粒子の相互作用と粒子と粒子の相互作用(衝突)がある. 粒子密度が非常に小さければ粒子間の衝突は無視してよ い.本研究で扱う飛来塩分の密度は体積密度も質量密度も 非常に小さいので衝突による影響は無視する.さらに粒子 と空気の相互作用も前述の密度が非常に小さければ,粒子 から空気への影響はほとんど無視できる.そうすると粒子 の運動を考えるには,流体についてのみ流れの解析を行っ たうえで次の運動方程式を解けばよいことになる.したが って,粒子の運動方程式は次のようになる.

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_{dr} + \vec{F}_p + \vec{F}_{vm} + \vec{F}_b$$
 (2)

ここに m_p は微小粒子の質量であり \vec{u}_p は微小粒子の速度 ベクトルである. 左辺は第1項から順に,空気抵抗項,圧 力項,仮想質量項,体積力項である. 具体的表現について は補遺に示す. 以上のようにラグランジュ的な扱いはする ものの,すべての粒子をすべて個別に扱うことは負担が大 きいので数値計算においては,一定の数の粒子をひとつの 集合として扱っている.

3.3 壁付近の乱流と付着

自然環境において橋梁のまわりの空気の流れは通常は 乱流を形成していると思われるので,乱流解析を行う必要 がある.本研究では基礎方程式であるナビエ=ストークス の方程式を乱流モデルのひとつである標準 $k - \varepsilon$ モデル によって数値的に解く.乱流モデルとしてはラージエディ シミュレーション(LES)を使うことも考えられるが,乱流 モデルの選択の適否は解析対象や解析目的に依存する.本 研究では浮遊粒子の壁面への付着が対象であることから, LES のような比較的大きな渦の非定常性を強調する必要 はないと考えて標準 $k - \varepsilon$ モデルとした.一方で乱流の問 題では固定境界近傍での流れを適切に表現する必要があ る.このため一般に境界付近で非常に細かいセル分割が要 求されることになる.そこで,壁付近のセル分割節約を目 的として壁付近の流れを対数関数を含む標準的な壁関数 を用いて表した.

次に粒子の付着について述べる.微小粒子の壁面近傍で の挙動を記述するには、厳密には壁一粒子間の静電気力や 特に粒径が小さい場合には粒子のブラウン運動力等も考 慮しなければならず、その解明を困難なものにしている. したがって合理的な付着判定についてはまだ実験的な検 討を待たなければならないが,既往の研究では単純に粒子の壁面への衝突をもって付着としているものが多い¹²⁾.この点について著者らは十分な実験データを持ち合わせていないので,詳細に入ることを避け,付着条件の影響を見るために次のような簡単な判定を用いた.

$$v'_{n} = \begin{cases} -ev_{n} & 0 \le v_{n} < v_{c} : {ar
mathcal{B}} \\ 0 & v_{c} \le v_{n} & : {ar
mathcal{H}} \end{cases}$$
 (3)

ここに v_n は粒子の壁面に鉛直な成分であり,壁向きを正 としている.すなわち,粒子の壁面に対する衝突速度の鉛 直成分が v_c よりも大きくなければ粒子は壁面に付着しな い.付着しなければ粒子は反撥係数 e で反射することにな る. v_c が 0 であれば衝突した粒子はすべて付着する.これ は付着現象を一種の化学反応とみなし,衝突速度の大きい ほど付着する確率が大きくなるとの予想にもとづくもの である.壁面が湿潤状態にある場合には粒子はすべて補足 されるので,上式のような判定は妥当ではないであろう が,湿潤状態にある場合には同時に洗い流しの効果も考慮 しなければならないので,そもそもここで考慮している範 囲外の問題である.

3.4 解析対象および解析条件

解析対象は現地観測を行っている明治橋を想定したも のとした.解析領域およびセル分割を図5に示す.本来は 3次元解析を行うことが望ましいが,橋桁のように一方向 に細長い構造物では代表的な断面をもって2次元的な解 析を行ってもある程度,現象の概要はとらえうると考えら れること,および数値計算上の過大な負担をさけるために 2次元的な解析を行った.セル分割は桁面上での流れが重 要なことから桁面付近で特に細かくしている.

初期境界条件をいたずらに複雑にすることをさけるた め,境界条件として図5のAC間では流入速度を一定とし, 流出境界BDでは各流線上での圧力勾配がないことと全体 として連続性の条件を満足するものとした.さらに境界 AB は摩擦なし,水面を想定した境界CD は固定境界とし た.橋桁表面はすべて固定境界である.そして,数値解析 は特にことわらないかぎり原則として80秒間の非定常解 析を行った.空気の流れが安定する約20秒後から1秒間



図 6 桁付近での空気の流れ(流入風速 10m/s)

表1 空気の物性

分子量	28.96	
分子粘性($kg/(m \cdot sec$))	$1.81 imes 10^{-5}$	
密度 (kg/m^3)	$1.205\!\times\!10^3$	
温度(K)	293	
相対湿度	0%	

表2 海塩粒子の物性

密度(kg/m^3)	$2.20 imes 10^3$
直径(μm)	2, 5, 10

隔で微小粒子をAC境界面に一様に配置した噴出点から噴 出させた.空気および微小粒子の物性を表1および2にま とめる.なお,微小粒子の付着挙動を知るのが目的なので 湿度は考慮していない.また実際に数値計算上は湿度の影 響は認められなかった.粒子の大きさは海塩粒子の大きさ を参考に2,5,10µmの3つの場合を考え,流入境界におい て1秒間隔で100個の単位粒子を一様に噴出させた.具体 的な数値計算には汎用熱流体解析プログラムである STAR-CDVer.3.26¹³⁾をユーザーサブルーチン機能によりカ スタマイズしたうえで用いた.

3.5 解析結果

まず、セル分割の妥当性については 10m/s の場合でもご く一部の面を除いて隣接するセル重心での無次元化壁面 距離は 100 以下となっていることを確認した. 解析領域の 空気の流れを流入境界での流速が 10m/s の場合について図 6 に示す. 図は風速の絶対値の分布を示したものである. 2本の箱桁の間と桁の風下側で大きな渦が生じており、そ



火 0 拉住Ch泪间效			
粒径 (μm)	2	5	10
付着個数	120	118	114

表3 粒径と付着個数

の領域が図 6 の低速の領域に対応している.風速 3m/s の 場合も流れが安定したのちの渦の場所についてはほぼ同 じであった.風速を 3m/s としたのは年間を通じた明治橋 における平均風速が 3m/s 程度であることと,大きいとき には一日平均の風速が 10m/s 程度であったためである.

まず流入境界での風速が 10m/s および 3m/s の場合の橋 桁面への付着の様子を図 7 に示す. 図中の点は微小粒子の 集合を表している. この計算例では $v_c = 0$ とし, 桁面上に 接触したすべての微粒子が桁面に捕捉されるとした. 図か らあきらかなように, 付着の位置および付着する粒子の量 はは 3m/s と 10m/s では大きな違いはない. つまりともに 2本の桁の風上側のウェブ面,橋面上,箱桁下面と風下側 の張り出し部に特に多い. ウェブの風下側への付着は少な いがまったくないわけではない.風速については類似の例 についてさらに大きい場合も試みたが,風速の付着性状に あたえる特段の影響は認めることができなかった. ただ し,この結果は風速によらず時間あたりに橋梁断面を通過 する塩分量を一定としたものなので解釈には注意が必要 である. すなわち,現実の塩分付着量が風速に依存しない ことを意味しているわけではない.実際には通過する塩分 の絶対量は風速が大きいほど多いと考えられるからであ る.

次に図8に風速を3m/sで粒子の粒径を直径2µmとした 場合の粒子の付着の様子を示した.表3に粒径を変化させ たときの橋梁面に付着した粒子の個数をまとめる.粒径が 小さくなるほど付着した粒子の数がわずかではあるが増 える傾向が見られる.ただし付着位置はほとんど変わらな い.粒径がこの範囲であるかぎり微小粒子の付着挙動にお よぼす影響はそれほど多くはないといえる.以上から,全 付着の条件のときには風速や飛来塩分粒子の大きさは通 常考えられる範囲であれば付着性状への影響は限定的で あることになる.

次に現地観測結果との関連性について検討する.図1に あるように観測結果は橋脚上の桁でのものであること,風 向きや風速についての状態が2次元解析のものとは異な ることから定量的な比較は困難なので、おおよその傾向に ついて述べるにとどめる.まず飛来塩分の多い12~2月で の値に注目する. ACM センサーによる観測結果では下流 側の桁の外側のウェブ面の付着推定量が最も大きく, 内側 のウェブでは上部の付着推定量が下部よりも小さい. これ に対し,上流側の桁では内側のウェブの付着推定量の方が 外側のウェブの上部よりも付着推定量が大きくなってい る. 最多方向の南西, すなわち上流からの風が飛来塩分を 含むとすれば, 上流側と下流側の推定付着塩分量について は図7に示された結果に反するものではないと考える.た だし、現地において南西からの風がどの程度の塩分量を含 むのかについては地形も考慮した大域的な解析をまたな ければならない.現状で定量的な評価にまでは踏み込めな いが,付着部位等の定性的な評価についてはある程度は可 能であろう.

次に付着条件の影響について考える. すでに述べたよう に粉体の物体への付着条件の詳細は未解明の部分が多く, 今後の研究を待たねばならない点が多い.本研究では付着 条件の妥当性については踏み込まず, 付着条件が結果にど のように影響しうるかということについて検討する. 付着 条件に最も影響するのは壁面に鉛直な速度成分の大きさ であると考え式(3)のような条件式を用いた. そして反撥係 数eを1とし、反撥衝突速度v。を変化させて付着性状の変 化を見た、結果の一例を図9に示す、容易に予想されるよ うに v. が大きければ全体の付着量は小さくなるが, それに 加えて付着位置にも変化が見られる.具体的には、図7(a) と9を比較すればわかるように箱桁下部表面への付着数は 大幅に減少する.このように桁表面での付着位置にも影響 がでる以上、本論文のようにラグランジュ的なアプローチ をする場合には付着条件には相応の考慮をすべきである. 少なくとも単純に全付着条件とするのは問題が残るであ ろう.

ここまでは、流入風速が一定であるとの条件の下で数値 計算を行っていた.しかし自然環境のもとでの風速・風向 は必然的に変動している.図10に明治橋での観測値で橋 軸に対して直角の成分について成分および風速のパワー スペクトル分布の一例を示す.風速は図のように細かく変 動しており、そして風速一般に言えることであるが変動周 波数が大きな成分は小さくなっている. このような風速の ゆらぎは大きくみれば乱流の渦によるものとも思えるが、 このゆらぎが空気の流れおよび微粒子の付着性状にどの ように影響するかについて検討した.図 11 は一例として 平均風速を 3m/s とし風速の変動幅を 1m/s 変動周期を 10 秒のサイン波で与えた場合の結果を示したものである.微 小粒子の噴出量等の他の計算条件はすべて同じである.こ こでは変動の影響を見るために変動量を実際のものに比 べてかなり大きくしている.図11と図7を比較すると橋 梁表面への海塩粒子の付着量はおおよそ 60%ほど増加し ている. そして桁間の空間への粒子の付着があきらかに増 加している. さらに、風速の変動の周期および変動量を変 化させて付着挙動に与える影響を検討したところ, 基本的 には変動幅が大きくなるほど,変動周期が短くなるほど付 着量が増加する傾向が見られた.

この結果はラグランジュ的手法で数値計算により付着



図 11 風速のゆらぎによる付着挙動への影響(3m/s, 変動 1m/s 周期 10s)

量を予測するうえでは大変興味深い結果である.これまで の数値計算結果の大半は一定風速における挙動を求めて いるが,それでは付着挙動を十分に把握できない可能性が あることを示唆しているからである.風速の乱れは大きく みれば乱流による空気の渦によっても引き起こされるこ とを考えると,このような現象を無理なく解明するには, 解析領域を橋梁の回りの地形の影響を評価できるまでに 広げ,大きな渦については数値的に直接解いていく LES を適用することも有意義であることを示している.しかし LES では非定常的な乱れを3次元的に再現できるものの, 解析領域をそこまで広げた場合に,正確な数値計算に必要 な計算機資源はまだ大きい.今のところ本研究で用いたよ うな平均的なアプローチが実際的であろう.ただし,風速 変動の影響については橋桁の形状との関係もあわせた検 討が必要と考える.

4 まとめ

本研究では, 飛来塩分粒子の橋梁表面への付着挙動の解 明を目的として, 固気2相流の数値解析を行った. そして, 固気2相流として浮遊粒子の付着をシミュレーションす る上での問題点等について, 現地観測結果と併せて考察を 加えた. あきらかになった事項は次の通りである.

- 固気2相流として浮遊粒子の付着を全付着条件で考えると、付着位置等に対しては10m/s程度までの風速であれば風速の影響は少ない。
- 浮遊粒子の粒径の付着性状への影響は大きくなく付着位置の分布に大きな変化はない.しかし粒径が細かい方が付着量はわずかに多くなる傾向がある.
- 風速に時間的な変動があると、一定風速に比べて付着 量が増加するとともに、付着位置も拡大する傾向がある.このため、一定の風速でのシミュレーションには 限界がある.
- 4) 付着条件の付着位置と付着量に対する影響は大きい. ただし、付着条件については表面付近の物理化学現象 とリンクしているので、より慎重に検討をつづける必 要がある.
- 数値観測結果と現地観測結果とを比較したが、現段階ではこの種の数値シミュレーションは、おおよその傾向を知るにとどまる。

飛来塩分粒子の付着の問題は基本的には,数値的な負担は 大きいが明解な物理モデルである固気2相流として扱う ことが妥当である.計算量については今後の計算機の能力 の動向を見れば,大きな障害とはならないと思われる.む しろ,適切な付着定着モデル,乱流モデル等の使用につい て指針を確立することが重要である.

謝辞:

本研究は科学研究費萌芽研究「数値化環境技術を用いた鋼 構造物の長期間の力学性能評価シミュレーションに関す る研究」(代表:後藤芳顯)の援助を受けて実施しました. ここに記して感謝します.また,現地観測においては福井 県のご協力を得ました.特に福井県雪対策・建設技術研究 所の宮本重信氏には多大なご配慮をいただきました.ここ に記して謝意を表します.

補遺 13-15)

空気抵抗項:
$$\vec{F}_{dr} = \frac{1}{2}C_d\rho A_d \left| \vec{u} - \vec{u}_p \right| \left(\vec{u} - \vec{u}_p \right)$$
 (A.1)

空気抵抗係数:

$$C_{d} = \begin{cases} 24 \left(1 + 0.15 \operatorname{Re}_{p}^{0.687} \right) / \operatorname{Re}_{p} & \operatorname{Re}_{p} \le 10^{3} \\ 0.44 & \operatorname{Re}_{p} > 10^{3} \end{cases}$$
(A.2)

粒子レイノルズ数:
$$\operatorname{Re}_{p} = \frac{\rho \left| \vec{u} - \vec{u}_{p} \right|}{\mu} D_{p}$$
 (A.3)

圧力項:
$$\vec{F}_p = -V_p \nabla p$$
 (A.4)

仮想質量項:
$$\vec{F}_{vm} = -0.5\rho V_p \frac{d\left(\vec{u} - \vec{u}_p\right)}{dt}$$
 (A.5)

体積力項:
$$\vec{F}_b = m_p \vec{b}$$
 (A.6)

ここに m_p :質量, ρ :流体の密度, A_d :投影面積, D_p : 粒子の直径, V_p :粒子の体積, μ :粘性係数, \vec{b} :重力 等の体積力である.

参考文献

- 道路橋示方書・同解説,Ⅱ 鋼橋編,日本道路協会, 2002.
- 加藤真志, 武田勝昭: 飛来塩分の数値解析的評価技術

の橋梁への適用~耐候性鋼材適用地域拡大への試み ~,鋼構造論文集,第7巻,第28号,pp.45-54,2000.

- 岩崎英治,長井正嗣,橋梁断面周辺の飛来塩分の推定 に関する一検討,構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 739-746,2007.
- 小川彰一,江口信三: Lagrange 粒子モデルを用いた PC 橋への海塩粒子付着のシミュレーション,第 57 回年 次学術講演会,V-533, pp.1065-1066, 2002.9.
- 5) 紀平寛,田辺康児,楠隆,竹澤博,安波博道,田中睦 人,松岡和巳,原田佳幸:耐候性鋼の腐食減耗予測モ デルに関する研究,土木学会論文集,No.780/I-70, pp.71-86,2005.1.
- 6) http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/taikai/lab/cfors-j.html
- 7) http://www.cmaq-model.org/
- 8) http://www.wrf-model.org/index.php
- 9) 深潟康二,希薄固気二相乱流の数値シミュレーション,日本流体力学学会数値流体力学部門 Web 会誌, Vol. 11, pp. 127-135, 2003.
- 10) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原正, 兒島洋一, 辻川茂男,

押川渡, 糸村昌祐, 福島敏郎, 出雲茂人, 海洋大気環 境の腐食性評価のための ACM センサ, 材料と環境, 43, pp.550-556, 1994.

- 11) 森幸夫,大島大橋箱桁内腐食環境調查,本四技報, Vol.25, No.96, pp.25-30, 2001.
- 鈴木朗, Trisaksono Bags Priambodo,山本剛,青木秀之, 三浦隆利,数値計算によるダクト内固気二相流におけ る微粒子の壁面付着挙動の解明,日本機械学会論文集 B編, Vol. 67, pp.73-80, 2001
- Computational Dynamics Limited, STAR-CD Version 3.26,2004
- Milne-Thompson, L.M., Theoretical Hydrodynamics, 5th edition, McMillan & Co., New York, 1968.
- Yuen, M.C., and Chen, L.W. 1976. On drag of evaporating liquid droplets, *Combust. Sci. and Tech.*, 14, pp. 147–154, 1976.

(2007年9月18日受付)