

熱流体解析による箱桁内の腐食環境シミュレーション Analysis of corrosion environment in box-girders by CFD

小畑 誠*, 安田 大樹**, 永田 和寿*** 後藤 芳顕****
Makoto OBATA, Daiki YASUDA, Kazutoshi NAGATA and Yoshiaki GOTO

*Ph.D. 名古屋工業大学教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

**農林水産省 (〒100-8950 東京都千代田区霞が関 1-2-1)

***工博. 名古屋工業大学助教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

****工博. 名古屋工業大学教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

It is important to estimate corrosion environment of steel bridges for an appropriate corrosion prevention and maintenance program. Estimation of environment has heavily depended on *insitu* observation and many data have been collected. However, versatile numerical approaches to this problem have not fully been pursued yet. The objective of this work is to apply the method of computational fluid dynamics(CFD) to estimate the corrosion environment in a box-girder, where the boundary conditions are relatively well-defined and therefore numerical simulation is easily applicable. In the present analysis, water condensation on a girder-surface is considered by a simple but reasonable droplet modeling. The present CFD analyses rationally explain the relation between the inside and outside temperature and humidity, the location of condensation.

Keywords: corrosion environment, computational fluid dynamics, maintenance of bridges

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。塗装管理は鋼橋の維持管理コストの中で大きな比重を占めており、この費用を低減できれば維持管理のための費用を圧縮することができる。そのため、適切な維持管理の手法も視野にいたった多くの腐食環境調査、腐食鋼材の力学挙動に関する研究がなされてきている。

箱桁について考えると、桁内はほぼ閉じた空間であり、内部への塩分等の侵入は少なく、腐食環境は比較的良好であるとされている¹⁾²⁾。しかし、ボルト継手やマンホール部から水分が浸潤するので³⁾、内部も塗装するのが一般的である。箱桁においては内部の塗装は作業に困難をとまなうこと、直接風雨にさらされる外部と異なり比較的簡易に湿度などの腐食環境を制御しうることから、防錆対策として除湿剤や除湿器等の設置も行われている²⁾。

箱桁内の腐食促進要因は主として湿度であるが、単に湿

度の高低にとどまらず、結露の有無が大きな影響を及ぼしている。一般に箱桁内部はダイヤフラムによりいくつも仕切られた空間となっており、日照等の箱桁外部の環境により内部の温度分布が大きく変わる結果、局所的に結露が生じることが考えられる。そこで、効果的な防食対策をするためには結露現象を含めた箱桁内の腐食環境を把握する必要がある。しかし現在のところ、箱桁内の結露状況については、温湿度をもとにしたいくつかの間接的な観測データはあるものの、数値解析による予測技術は十分に確立されているわけではない。この点につき加藤ら⁴⁾は箱桁内に設置された除湿器の効果を数値流体解析(Computational Fluid Dynamics; CFD)により解析しているが、湿度の空間的分布についての検討であり、結露現象を含めるまでにはいたっていない。そこで本論文では結露も含めた熱流体解析を行い、より精度の高い箱桁内の腐食環境のシミュレーションを試みる。そして、実測データと比較し、解析法の適用性について検討する。

2 結露現象を含む数値流体解析

2.1 概要

結露現象とは一般に温度の低い物体の表面に空気中の水分が凝結することである。物体表面近傍の飽和水蒸気圧が、そのまわりの空気の水蒸気圧よりも低いと生じる(図1)。空気中の温湿度の分布を解析するときには、限定された環境でない限り、気相から液相等の相変態を考慮したものでなければならない。実際に、数値流体解析(CFD)を用いた温湿度の解析は、住宅内の環境解析等に積極的に適用されており^{5),6)}、そこでは種々の手法で相変態や物質内の水分や化学物質の移動も含めた現象を扱っている。

2.2 結露現象

本論文では、数値流体解析の手段として汎用解析プログラム STAR-CD Ver. 3.15⁷⁾を用いる。STAR-CDは有限体積法による非構造格子対応の流体解析プログラムであり、乱流を含む流れにともなう質量および熱輸送、相変態の連成問題等も扱うことができる。しかし、結露による水滴と壁面との間の熱流を適切に考慮しにくいという意味で物体表面での結露現象を解析する機能を標準では備えていない。そこで STAR-CD の拡張機能のひとつであるユーザーサブルーチンを用いて、結露現象を近似的に解析する。以下にその概要を示す。

結露現象において考慮しなければならないことは、①物体の表面において気相から液相あるいはその逆の相変態が生じることによる物質の移動と相変態にともなう潜熱による熱のやりとり、②壁面と水滴との間、および③気体と水滴との間の熱移動である。まったく液相のない状態から液相を発生させることは数値解析を行ううえでは困難なので、結露の生じる場所に微小な水滴核(本研究では droplet と呼ぶ)を配置する。そしてその droplet の拡大と

縮小をもって、結露・蒸発という現象に対応させることにする。実際の現象でも結露は微小な不純物等の何らかの核を起点に生じており、この仮定自体は妥当である。

ここでは壁面上での結露を考えるので、droplet はあらかじめ壁面上に固定して配置する。このとき droplet の挙動を考えるには次の方程式を連成して解くことになる。

$$\frac{dm_d}{dt} = A_s K_g \quad (\text{質量移動式}) \quad (1)$$

$$m_d \frac{d(c_{p,d} T_d)}{dt} = Q \quad (\text{熱移動の方程式}) \quad (2)$$

m_d : droplet の質量, A_s : droplet が気体に接する表面積, K_g : 質量移動に関する係数(詳細は補遺に示す), $c_{p,d}$: droplet の比熱, T_d : droplet の温度, Q : droplet に関わる熱流

ここに式(1), (2)はそれぞれ droplet の蒸発・凝結の相変態にともなう質量変化式, および, 蒸発・凝結を通じての熱移動の方程式である。壁面と droplet との間の熱流を考えると、物理的考察により式(2)の右辺は次のように表すことができる。

$$Q = Q_a + Q_w + Q_{fg} \quad (3)$$

Q_a , Q_w , Q_{fg} はそれぞれ droplet と気体との間, droplet と壁面との間の熱流, droplet の蒸発・凝結にともなう単位時間あたりの潜熱である(図2)。ここでは droplet を微小な水滴とみなしているため、これらの項は以下のように考えることができる。

まず、単位時間あたりの潜熱 Q_{fg} は次のようになる。

$$Q_{fg} = h_{fg} \frac{dm_d}{dt} \quad (4)$$

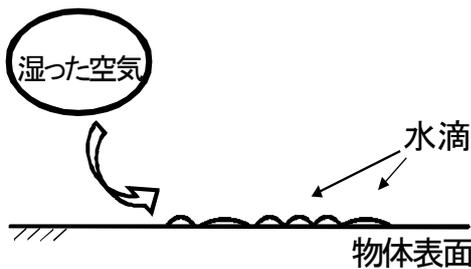


図1 結露現象

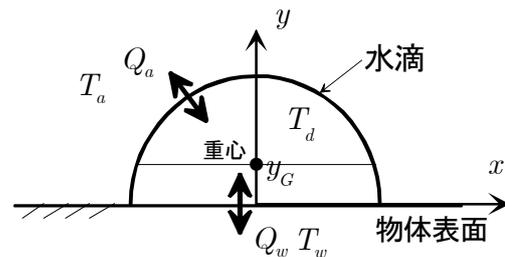


図2 水滴に関わる熱の移動

h_{fg} は液相と気相との間の相変態にともなう単位質量あたりの潜熱である。次に気体と droplet の界面を通じて生じる熱移動量について考える。これは次式で与えられるものとする⁸⁾。

$$Q_a = A_s h (T_a - T_d) \quad (5)$$

h , T_a , T_d はそれぞれ熱伝達率, 空気の温度, droplet の温度である。熱伝達率 h の詳細については補遺に示す。次に水滴と壁面間の熱のやりとりが問題となる。厳密に考えると, 壁面もまた熱伝導体なので結露・蒸発による壁面温度の変化を考えなければならない。この点別途, 物体について熱伝導方程式を解く, あるいは物体の熱伝導には準定常状態近似を導入することも考えられる。しかし, 本論文では箱桁を対象としており, 壁面の熱容量が結露水に比較して相当に大きいことから, ここでは壁面上を温度境界として扱うことにする。そして, 水滴の温度 T_d を水滴の重心での温度とし, 水滴内の温度分布を壁面からの距離 y のみの関数とすれば, 壁面と水滴の間の熱流 Q_w は以下のように表すことができる。

$$Q_w = -S(y) \lambda_d \frac{dT}{dy}, \quad 0 \leq y \leq y_G \quad (6)$$

表1 空気の物性

分子量	28.96
分子粘性 ($kg / (m \cdot sec)$)	1.81×10^{-5}
比熱 ($J / (kg \cdot K)$)	1.006×10^3
熱伝導率 ($W / (m \cdot K)$)	2.637×10^{-2}

ここに, $S(y)$, λ_d , y_G はそれぞれ y における水滴の y 軸に垂直な断面での断面積, 水滴の熱伝導係数, 水滴の重心の y 座標である。Droplet が図2のような半球状であれば式(6)を積分し, 壁面上および重心における水滴の温度の条件から次式を得る。

$$Q_w = \frac{1}{2} H_d \pi D_d \lambda_d (T_w - T_d) \quad (7)$$

T_w は壁の温度, D_d は droplet の直径, H_d は水滴の形状に依存する定数であり, 半球状の場合には $H_d = 2 / \log(11/5)$ となる。これは, 熱流の算定について過渡応答を無視することになるが, 水滴のスケールが小さいことを考慮すると, 不当な仮定ではない。式(3),(4),(5),(7)から壁面上の水滴についての熱移動の式(2)は次のようになる

$$m_d \frac{d(c_{p,d} T_d)}{dt} = A_s h (T_a - T_d) + \frac{1}{2} H_d \pi D_d \lambda_d (T_w - T_d) + h_{fg} \frac{dm_d}{dt} \quad (8)$$

これと式(1)を組み合わせることによって, 壁面上の水滴核の質量移動および熱移動を考慮することができる。そして, これらの式をユーザーサブルーチン機能によって

表2 水の物性

分子量	18
分子粘性 ($kg / (m \cdot sec)$)	8.89×10^{-4}
比熱 ($J / (kg \cdot K)$)	4.18×10^3
熱伝導率 ($W / (m \cdot K)$)	6.21×10^{-1}
密度 (kg / m^3)	9.98×10^2
表面張力 (N / m)	7.2×10^{-2}

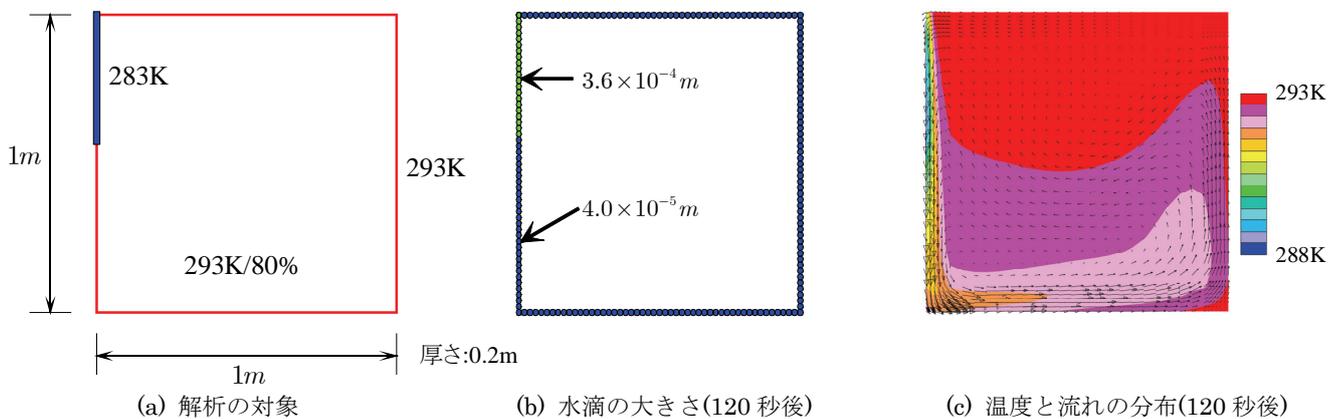


図3 結露のシミュレーション

STAR-CDVer.3.15 の中に組み込んだ。

2.4 基本的な数値解析例

上述した定式化にもとづいて、結露現象の解析の一例を示す。解析対象を図3(a)に示す。単純に四角に区切られた領域の内部に相対湿度 80%の空気において壁の一部を冷却し対流と結露を生じさせるものである。境界条件および初期条件を図3(a)に、空気および水の物性およびその他の定数を表1, 2にまとめる。そして壁面の全面に直径 $4 \times 10^{-6} m$ の微小な水滴核を配置し、120 秒間解析を行った。

結果を図3(b), (c)に示す。温度の低い壁面付近の空気が冷却され、領域内で対流が生じているのがわかる。そして水滴核は温度の低い壁面上のみで大きく成長しており、そこで結露が生じていることになる。さらに水滴の温度も壁面の温度とほぼ等しくなっている。結露のシミュレーションについては適切なレファレンスとなるものがなく、具体的な比較はできなかったが、他の例も含めて一応矛盾のない結果が得られていることを確認した。

3 箱桁内の腐食環境観測とシミュレーション

3.1 腐食環境調査⁹⁾

著者らは名古屋高速道路5号線万場大橋（三径間連続鋼箱桁橋、図4(a)(b)）において箱桁内の腐食環境の部位による依存性を把握するための調査を平成15年より継続して行っている。以下に調査の内容の概要を示す。調査範囲は川下側の箱桁内（図4(c)）である。箱桁内はダイヤフラムで区切られておりP47からP48に向けての4室を対象とした。第1, 4室の下部には小さい排水孔が設置され、第2室の川上側の腹板には点検用のマンホール(大きさ600φ)がある。マンホールは観測期間中原則として半開放してある。これは、マンホールを開放することによる腐食環境への得失を見るためである。

測定には4個の温湿度センサと16個のACM型腐食センサ¹⁰⁾（図5右側）を用いた。温湿度センサ（図5左側）は高分子湿度センサと白金測温体を附合せたものであり、測定範囲は温度が0~50℃、相対湿度が20~90%であり、公称精度はそれぞれ0.5℃、3%である。ACMセンサは厚さ0.8mmの64mm四方の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。これらのセンサ配置を表3に示す。第2室ではマンホールの影響を確認するために5個のACMセンサを配置している。測定間隔

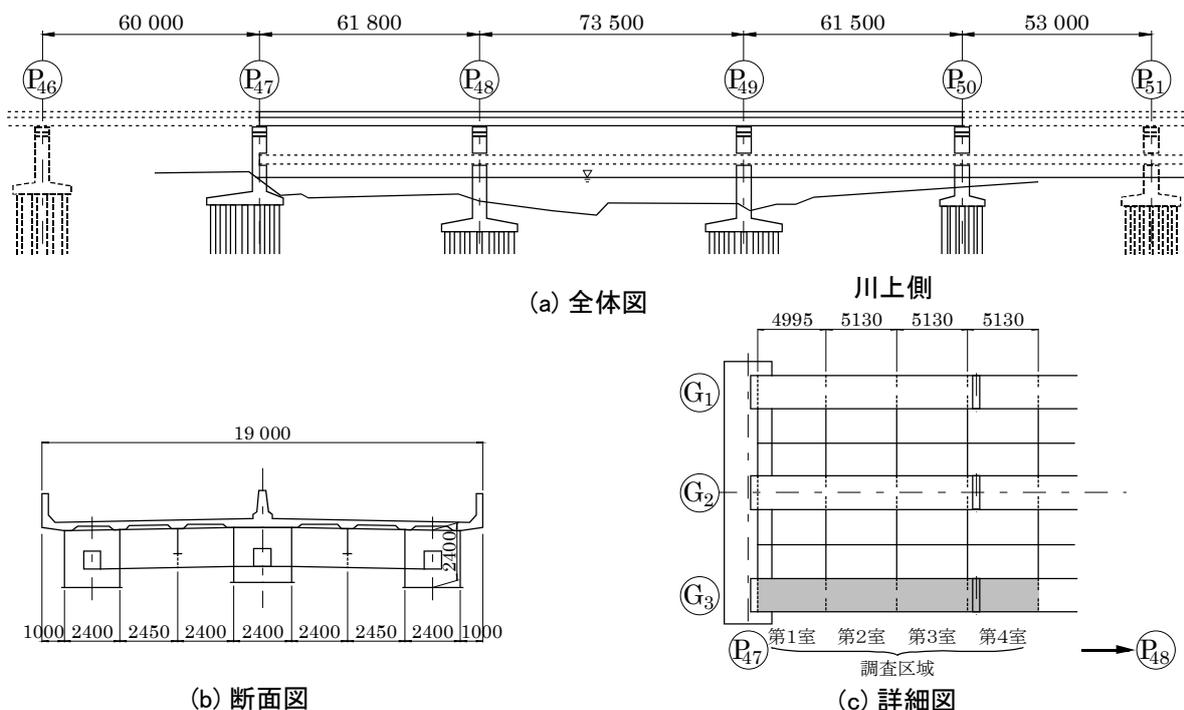


図4 観測点

は10分とした。

観測結果の一部を図6,7に示す。図6は月別平均気温をプロットしている。わずかではあるが桁内の方が桁外よりも温度が高い。マンホールのある第2室の下部では桁外よりも約1℃高く、上部では下部より1℃高い。そしてこれは第4室の上部と同じであった。平成16年10月～11月のみ気温差が小さいが、これは、この期間中に限りマンホールを閉じて、温湿度センサを桁内部に移動させたためである。ほぼ密閉された空間なので上下部に温度差はほとんど無いと見なすことができる。

月別相対湿度を図7に示す。桁内の湿度は桁外より約5%低い。また、桁内の分布を見ると上部が下部より約3%程度低い。ただし、これは気温の変化にともなう飽和水蒸気圧の変化で説明できる程度のものである。このように、比較的長い時間の尺度で考えると箱桁内の空気の場所的な変化は少なく、かつ箱桁内といえども外部の環境とそれほど大きな差はない。他の観測例で箱桁内の相対湿度が外部より低いものがあるが^{1),11)}、本観測地点ではマンホールを半開放していることによることから上述の結果が得られたものと思われる。一方、より短い時間の尺度では外部と内部の時間的な遅れや場所的な変化がより大きく見られ

表3 ACM センサの位置

隔室	位置
第1室	側壁(2), 上部, 下部
第2室	側壁(3), 上部, 下部
第3室	側壁(2), 上部, 下部
第4室	側壁(2), 上部, 下部
桁外	第2室外側

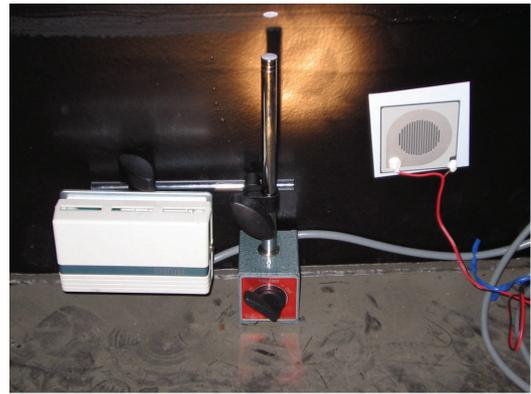


図5 温湿度センサーとACMセンサーの設置状況

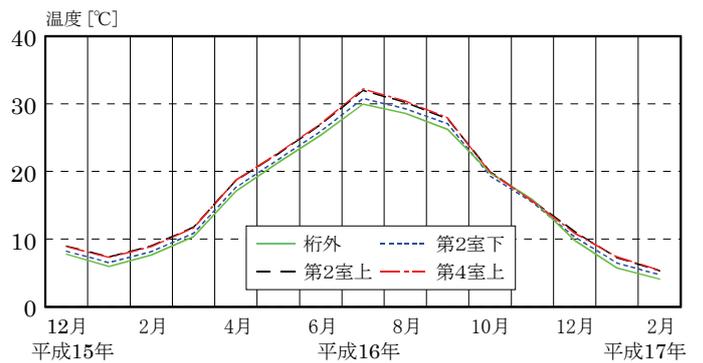


図6 月別平均気温

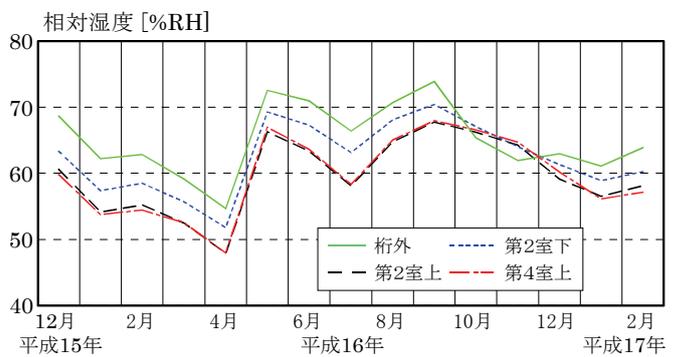
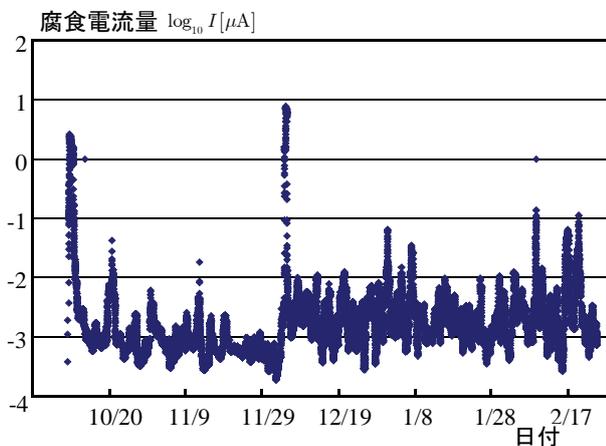
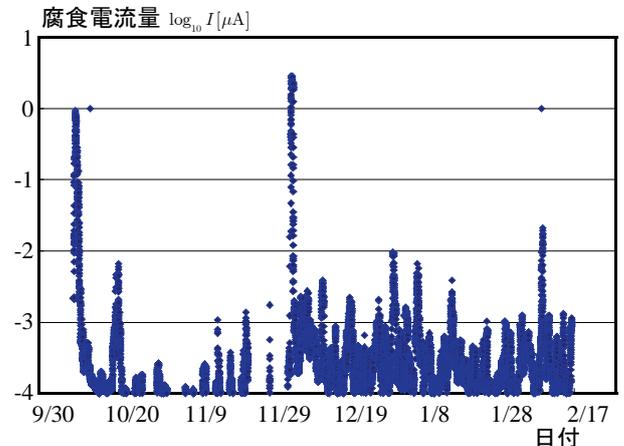


図7 月別平均相対湿度



(a) 第2室上



(b) 第4室上

図8 ACMセンサーの電流量

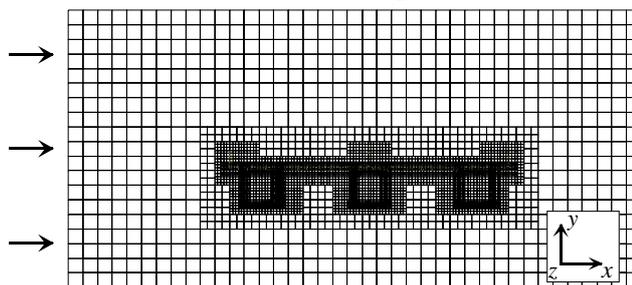
る。これについては次章でふれる。

図8に平成15年10月～平成16年3月までの間のACM腐食センサで計測された電流量を一例として示す。図示した2ヶ所で観測された電流値は通常時で1nA～100nA、台風・大雨等の異常気象時で最高10μAに達している。上記以外の位置でのACMセンサの有意な反応はほとんどなく、わずかに大雨等の異常気象時に電流が観測される程度であった。

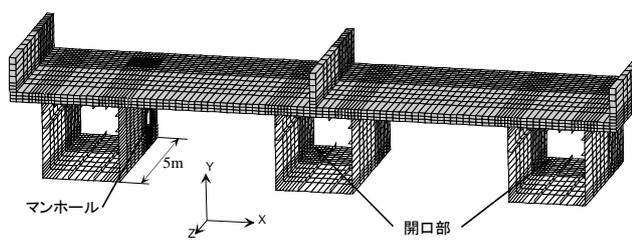
一般的に言えば、これまでの観測と同様に箱桁内の腐食環境は良好であるといえる。また特記すべき傾向として、図8(a)の第2室の上部の電流量が多いが、これは第2室でマンホールが半開放になっているので外部の気象条件の影響を受けやすいためである。また第4室でも反応が見られたのは、第4室にはボルト接合部があり、接合部からの水分の浸潤があったためと思われる。

上述したように温湿度センサによる相対湿度は上部の方がわずかに小さいが、腐食電流は逆に桁上部の方が桁下部にくらべて有意に大きくなっている。温度の環境が桁内

風速 0.5, 2.0 m / sec



(a) 解析領域



(b) 橋梁部分
図9 解析対象

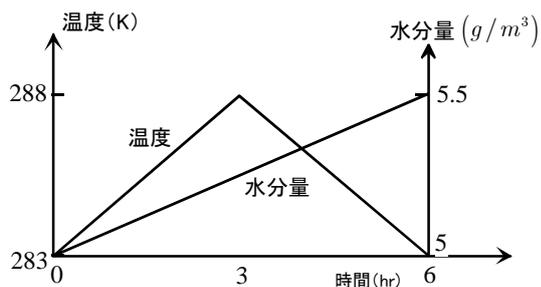


図10 外気の温度及び水分量の変化

ではほぼ同様であり、かつ桁上部の方が相対湿度が若干低い傾向がでているにもかかわらず、結露状況については逆の局所性が見られることは興味深い。これは、箱桁上部に位置する床版の熱容量が他の部分に比較して十分に大きいため、温度変化が緩慢であり結露が発生しやすい状況にあることが考えられる。この点については次のシミュレーションで考察する。

3.2 箱桁内の腐食環境についての数値シミュレーション

数値流体解析(CFD)に2章で示した結露解析手法を組み込んだシミュレーションによって、現実の観測結果をどの程度説明できるかについて検討する。

a) 箱桁内部の温度変化

まず、桁内の腐食環境を論じるうえで基本となる温湿度について、外部の空気に温湿度の変化が生じたときに、内部状態が受ける定性的な影響をCFDにより推定する。数値解析の対象とする領域および解析条件を図9に示す。箱桁の断面形状および大きさは、万場大橋の観測点付近のものであり、ダイヤフラムで区切られた箱桁の一室分を対象とした。桁部は鋼材で、床版部分はコンクリートでモデル化した。さらに図中に示したように桁の一部にマンホールを設けて、その開放状況も現地とほぼ同様にした。また、マンホールの無い桁も前述した現地観測結果からは気密性の高い空間とは推定できないので参照のために中央および右端の桁の桁下部面には開口部(10cm×20cm)を設けてその影響を見た。表4に桁鋼板および床版コンクリートの物性をまとめる。空気および水の基本的な物性は表1, 2と同じである。温度変化は図10にあるように3時間で5K上昇させその後3時間で5K下降させた。一般に外気の絶対湿度(水分量)の変化は緩やかなので、観測値を参考に当該時間内で一定に変化させた。なお、空気の流れは、図9(a)中左側境界において右側に向けて一様なものを与えた。左端の境界における風速は0.5m/secおよび2.0m/secの2種類である。また、解析領域の大きさは橋桁付近の流れに境界の影響がでない程度とした。yおよびz軸に垂直な境界は摩擦のない境界である。風速2.0m/secについては、付近の

表4 鋼とコンクリートの物性

物質	鋼	コンクリート
密度(kg/m^3)	7800	2400
比熱($J/(kg \cdot K)$)	473×10^2	1.005×10^3
熱伝導率 $W/(m \cdot K)$	43	1.2

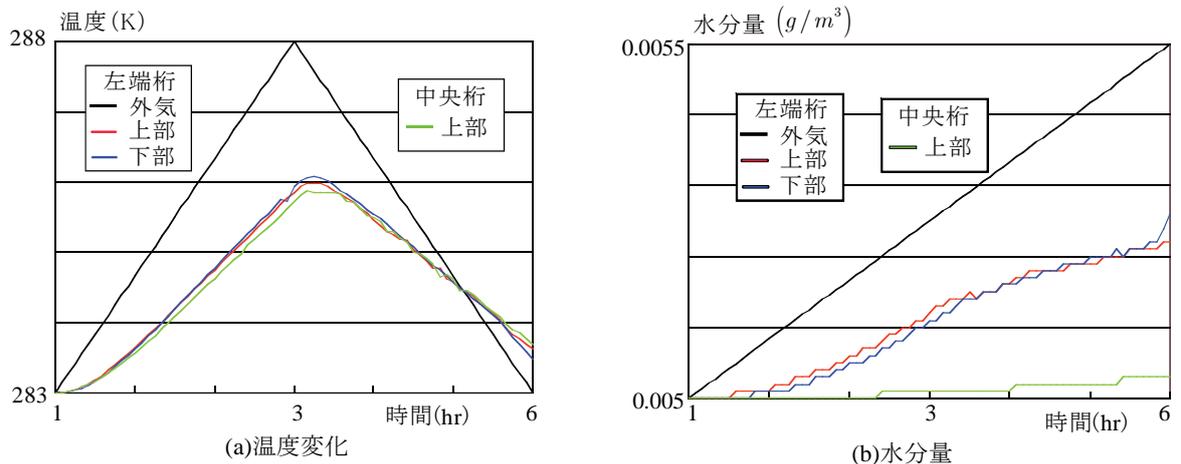


図 11 左端の桁の中央部断面における温度及び水分量の変化(0.5m/sec)

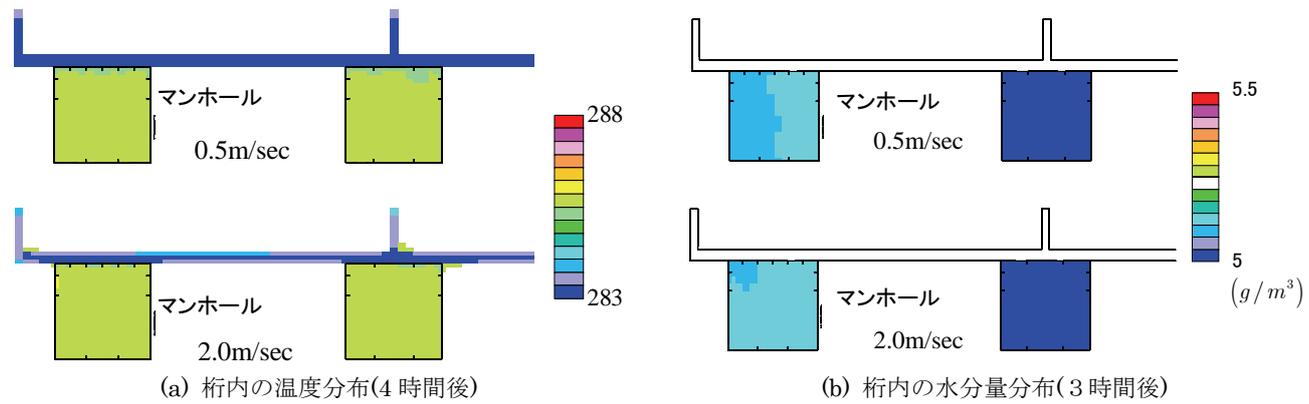


図 12 温度及び水分量の分布

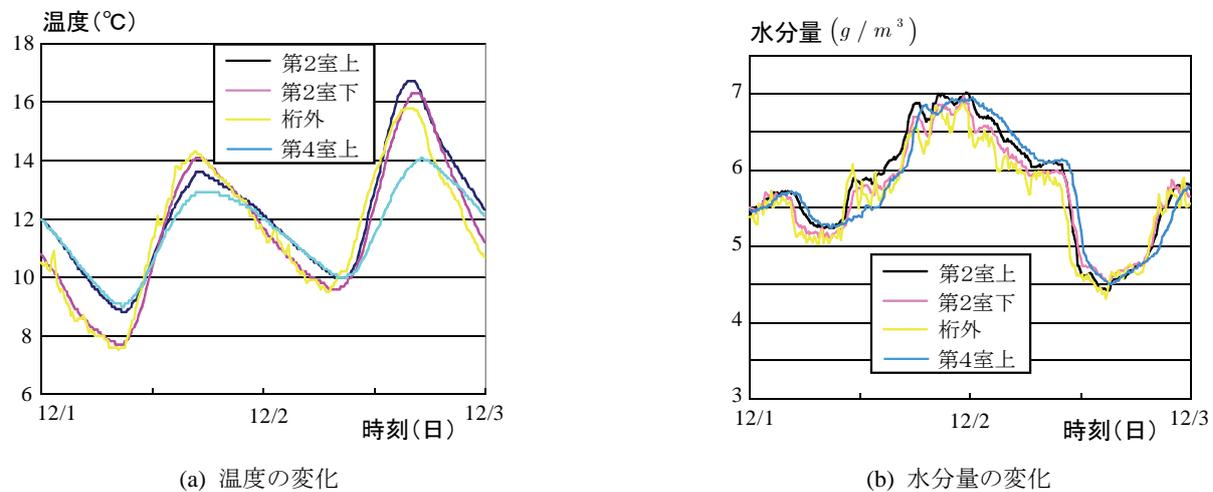


図 13 温度及び水分量の分布の実測

観測点の年間平均風速(2.7m/sec~2.0m/sec)を参考にして決めた。0.5m/sec は静穏率の基準値 0.4m/sec から微風状態を想定したものである。なお、現実の気象状態は変動を含むが、ここでは平均的な状況を念頭に置いている。

解析結果を図 11,12 に示す。図 11(a)は桁内外の温度変化を示したもので、図 12(a)は左端および中央の桁のマンホールを含む断面での温度分布を表したものである。図 11(a)に示した温度は現場計測で温湿度センサを設置した付近

のものに対応させている。また、温度の実測値の一例を図 13(a)に示す。風速 0.5m/sec の場合、マンホールのある左端の桁とマンホールの無い中央桁の内部の温度分布に大きな差はない。そして、上部に熱容量が大きく温度変化の緩慢な床版があるにもかかわらず、観測で得られたように桁内の空気温度の場所的变化はほとんど生じない。ただ左端の桁ではマンホールの存在により空気の流入があり、外部の温度変化に対する追随性がやや高い。これに対して、小

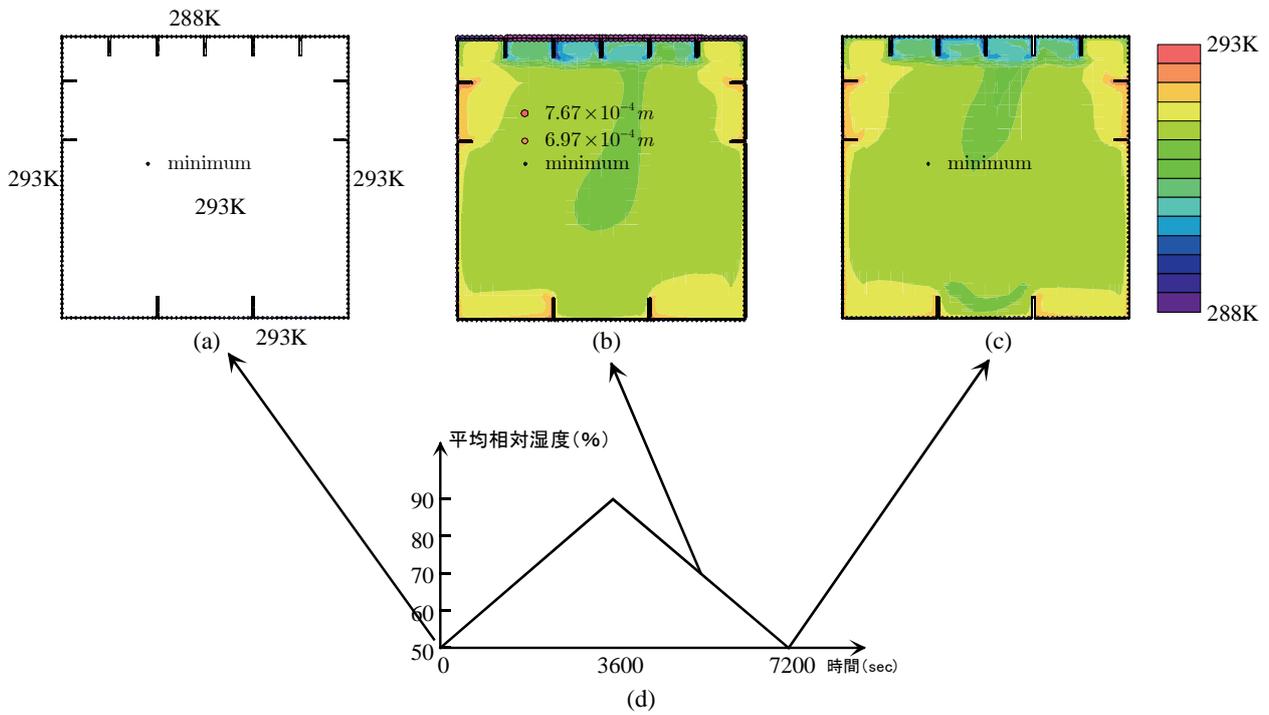


図 14 結露のシミュレーション

さい開口部以外には外部からの空気の流入のない中央の桁では、温度変化は主に箱桁鋼板を伝わる熱伝導による。したがって、左端の桁内の温度変化に比べてわずかではあるが緩やかな変化になっている。しかし鋼板は良好な熱伝導体であることから外部からの時間の遅れはともに約 20~30 分程度になっていることがわかる。そして実測値について日内温度の最大値付近を見ると、解析結果と同様に温度上昇の遅れには解析値と同様に 30 分程度の外部温度からの遅延傾向が見られる。一方、風速が大きい 2.0m/sec の場合を見ると、全般的傾向として、床版を含めた橋梁本体への熱移動量が大きくなっている。桁内部の温度変化はつまるところ外部との熱のやりとりによるから、熱移動量が大きくなる結果マンホールの無い中央の桁内部の温度も外部温度との追随性が高くなっている。なお、確認のために風向きを逆に設定した解析も行ったが、定性的にも定量的にも以上の傾向に大きな変化はなかった。

これらの結果から、桁内部の温度変化については、空気の流入によるものよりも桁の鋼材を通じての熱移動の方が圧倒的に優越しており、外部気温との追随性は高いと言える。そしてこれは従前の観測結果を支持するものである。

b) 箱桁内の湿度について

次に湿度について検討する。解析結果を図 11(b)、12(b) に示す。ここでは、箱桁内の水分量をとらえるために相対

湿度ではなく空気中の水分の絶対量をプロットしている。熱と異なり桁の内部と外部との間に物質の移動がなければ桁内部の水分量に変化はないはずである。しかし、当該橋梁ではマンホールが半開放されており、外気の流入は比較的容易と考えられる。ここに与えた条件のもとでは、外気の流入は限定的なものではあったが、桁内の水分量は外部の増加量の半分程度には達していた。6 時間でもこの程度の変化が生じること、外気団の水分量の変化は一般に緩慢であることから、数日単位で考えれば桁内の水分量はほぼ外部追随すると考えられる。これに対し、下部に開口部のみを設置した中央部の桁では、外気の流入は左端の桁に比較して、外気の流入はかなり少なく、図 11(b)に見るように、空気中の水分量の増加量は 6 時間後で左端の桁の 10 分の 1 程度であった。ただし、風速が 2.0m/sec になると流入量も増加するがマンホールのある桁に比較すれば増加量は 5 分の 1 程度にすぎない。

これに対して、図 13(b)に水分量の日内変化の実測値の一例を示す。これからわかるように、マンホールのある左端の桁では水分量の変化はほぼ外気と連動している。そして、外気との変化の遅れもほぼ温度の遅れと等しいかそれよりも小さめである。マンホールから遠い第 4 室では水分量の変化は第 2 室に比べてははっきりと遅れており、上記解析の中央桁の挙動に近い。これは、温度と異なり、水分の移動が空気という媒体を介するほかないため、半開放さ

れたマンホールとの空間的な位置関係が大きな影響を及ぼすためである。しかし、マンホールを閉じた観測期間でもマンホール半開放時と同様に相当の水分量変化は生じており、観測した箱桁内は少なくとも水分の観点からは密閉空間とは言い難いといえる。実際の箱桁には直径 3cm 程度の排水孔があるが、それはこの解析で設けた開口部の大きさに比べてはるかに小さい。観測される外部と内部の湿度の追随性は排水孔といった既知の開口部を通じた空気の媒体の移動だけでは説明がつかないレベルのものである。数値解析の精度を上げるためには、この点について検討の余地があるといえよう。

c) 箱桁内の結露について

次に箱桁内の結露について検討する。すでに述べたように、通常時は箱桁内において下部および側部の ACM センサの反応はほとんどなく、もっぱら箱桁上部のものが反応している。箱桁上部は桁に比べ熱容量の大きい床版と接触しており、図 12(a)の結果にも見るように床版の温度変化が外気に比べ緩慢なことから、上部の鋼板は外気温に比べて低温になっている場合がある。そこで、このような現象を検討するために、図 14(a),(d)のような設定の解析を行った。すなわち図 14(d)のように箱桁内で上部壁、側壁および下部壁の温度を一定として、隔室内の水蒸気量を比較的短時間で変化させた。具体的に 293K における相対湿度の変化として示したのが図 14(d)である。初期状態では、水滴核、空気ともに 293K とした。結露の直接的な観測データが不足していることもあり、この条件設定は具体的な観測データを想定したものではなくあくまで結露の傾向を知るためのものである。ただし、著者らの観測では大雨等の異常気象時に、ごく短期間に桁内の絶対湿度量が大きく増加することを確認している。この程度の変化もまれに生じると考えて良い。なお、図中の **minimum** とはこの計算で設定した最小の水滴核の大きさでありその直径は $5.0 \times 10^{-5} m$ である。

解析結果を図 14(b),(c)に示す。解析開始後 2000 秒付近（相対湿度は約 70%）において上部壁で結露が生じ、水滴の直径が増加し始める。そしてそれは約 5000 秒付近まで持続する（図 14(b)）。そして、その後は蒸発が始まり、約 7000 秒後には水滴の直径は最小値にまで縮小する。この間、側壁および下部壁には一切結露は生じない。この結果は桁内の空気の平均的な相対湿度が 100%に及ばない場合

であっても、壁の温度によって結露が生じることを端的に示している¹⁾。実際には図 14(b),(c)の温度分布に見るように、上部壁の近傍では温度の低い薄い境界層が生じており、この部分の相対湿度が結露を支配している。このように結露に最も影響が大きいのは大きな空間での相対湿度ではなく、壁表面近傍の温度である。また、内部に生じる対流のためリブの有無も結露の性状に影響するようである。3.1 で示した観測結果によれば、桁内の相対湿度はわずかではあるが上部の方が低い傾向にあるにもかかわらず、結露と関係する ACM センサの出力はほぼ一貫して上部の方が大きい。これは上部壁の温度が相対的に低いことが多いからである。温湿度センサは壁と密着して設置されているわけではないので、うすい境界層を検知することは難しい。したがって、結露現象の観測をするためには、壁面温度を測定する方が望ましい。そして、結露を防止するのであれば、相対湿度だけでなく壁面温度について留意することも効果的であると思われる。

一方、相対湿度が減少し蒸発の要件が充足されると、比較的短時間に結露は蒸発するが、これは当該観測値における ACM センサの出力が総じてパルス的に現れていることと対応している。

4 まとめ

本研究では、箱桁内の結露現象を含めた腐食環境の定量的な予測を目指して、数値流体解析手法の適用性について検討した。あきらかになった事項は次の通りである。

- 1) 汎用の熱流体解析プログラムに簡易な形で結露現象を考える枠組みを示した。
- 2) 数値流体解析によれば箱桁内の温度については、外部環境との関係を合理的に関連づけた予測をすることができる。
- 3) 箱桁内の水分量の変化については既知の開口部からの空気の流入のみでは説明がつかない程度のものであり数値計算の精度を上げるうえで検討の余地がある。
- 4) 腐食環境にもっとも重要と思われる結露の現象に支配的なのは、箱桁内の平均的な湿度ではなく、むしろ壁面近傍の温度と相対湿度である。

本研究で示した例は限られたものであるが、橋梁の腐食環

境評価をするために数値熱流体解析 (CFD) は有効な手段となりうることを示した. 実際の橋梁をとりまく環境は複雑であり, とりわけ境界条件および初期条件に関わる外部の気象条件の評価が問題となりうるが, これについては気象解析プログラムとの結合等によることが一つの解決手段になるであろう.

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: 後藤芳顕) 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名古屋高速道路公社様のご協力を得ました. さらに, 計測において岩本政巳名古屋工業大学助教授, 数値解析において長谷川高士氏 (名古屋工業大学大学院生) のご協力を得ました. ここに記して謝意を表します.

補遺 ¹²⁾

A1. 質量移動の係数の詳細

$$K_g = S_h \rho_c \frac{M_v}{M_a p} (p_{A,\infty} - p_{A,s}) \quad (\text{A.1})$$

$$S_h = 2 \left(1 + 0.3 \text{Re}_d^{\frac{1}{2}} S_c^{\frac{1}{3}} \right), \quad S_c = \frac{\mu}{\rho_c D_v} \quad (\text{A.2,3})$$

S_h : シャーウッド数, ρ_c : 水滴近傍の気体密度, M_v : 水蒸気の分子量, M_m : 混合流体の分子量, $p_{A,\infty}$: T_d における飽和水蒸気圧, $p_{A,s}$: 水滴表面近傍における水蒸気圧, p : 水滴近傍での気圧, Re : レイノルズ数, S_c : シュミット数, μ : 粘性係数, D_v : 拡散係数

A2. 熱伝達率の詳細

$$h = \frac{k_m \text{Nu} Z}{(e^Z - 1) D_d} \quad (\text{A.4})$$

$$\text{Nu} = 2 \left(1 + 0.3 \text{Re}_d^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \right) \quad (\text{A.5})$$

$$Z = - \frac{c_p}{\pi D_d k_m \text{Nu}} \frac{dm_d}{dt} \quad (\text{A.6})$$

$$A_h = \frac{1}{2} \pi D_d^2, \quad \text{Re} = \frac{\rho \bar{v} D_d}{\mu}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k_m} \quad (\text{A.7,8,9})$$

h : 熱伝達率, Nu : ヌッセルト数, D_d : 水滴の直径, k_m :

水滴周りの流体の熱伝導率, Pr : プラントル数, Re : レイノルズ数, ρ : 水滴周りの気体の密度, \bar{v} : 水滴とその周りの気体の相対速度, μ : 気体の粘性係数, c_p : 気体の比熱

参考文献

- 1) 藤野陽三, 上田雅俊, 延藤遵(1990): 鋼ボックス内部の腐食環境と防錆について, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.1021-1033.
- 2) 森幸夫(2001): 大島大橋箱桁内腐食環境調査, 本四技報, Vol.25, No.96, pp.25-30.
- 3) 村越潤, 名取暢(1993): 鋼橋の腐食とその原因, 橋梁と基礎, Vol. 27, No. 6, pp.39-44.
- 4) 加藤真志, 安藤誠, 橋本光行(2004): 鋼箱桁橋の桁内除湿システムの防食効果検証に関する検討, JFE 技報, No.5, pp. 67-71
- 5) 加藤信介, 伊藤一秀, 村上周三, 朱清宇(2003): 各種吸着等温式を用いた吸着モデルによる室内化学物質濃度分布予測, 日本建築学会計画系論文集, No.563, pp.33-38.
- 6) 蔡耀賢, 大岡龍三, 加藤信介, 小金井真, 生田紀夫, 川本光一, 西田耕作(2005): CFD を用いた対流と建材内熱・水蒸気同時移動の連成解析による室内熱・湿気解析モデルの検討, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, C1-2
- 7) Computational Dynamics Limited(2001): STAR-CD Version 3.15
- 8) El Wakil, M.M., Ueyhara, O.A., and Myers, P.S.(1954): A theoretical investigation of the heating-up period of injected fuel droplets vaporizing in air, NACA Technical Note 3179.
- 9) 名古屋工業大学社会開発工学科(2004): 腐食による耐荷性能の低下機構解明に関する研究業務, 名古屋高速道路公社委託研究報告書.
- 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(1994): 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.
- 11) 内海靖(2002): 箱桁内は良環境, 川田技報, Vol.21, pp. 92-93.
- 12) Crowe, C.T., Sommerfield, M., Tsuji, Y.(1998): Multiphase flows with droplets and particles, CRCPress

(2006年9月11日受付)