

G I Sデータと気象データを用いた

橋脚表面付着塩化物イオン量の推定

Estimation of adherent chloride ion amount on concrete surface
of bridge pier by using GIS data and meteorological data

高知工科大学大学院
工学研究科基盤工学専攻
社会システム工学コース
高木研究室 1205097
小松 博英

指導教員 高木方隆
副指導教員 大内雅博
論文副審査 西内裕晶

2018年1月17日

論文要旨

コンクリート橋梁の劣化現象の一つである塩害は、沿岸部に建設をされた橋梁が多い日本では懸念すべき劣化現象である。塩害は海から飛来する塩化物イオンがコンクリート表面に付着することで始まる。コンクリートのひび割れは付着した塩化物イオンが内部へ浸透し鉄筋の腐食膨張を誘引することで発生し、塩分の供給が継続的に行われるような立地環境である場合、ひび割れがさらに進行しコンクリートの剥落など構造体の損傷につながる。日本における橋梁の多くは高度成長期に集中して建設され、建設後 50 年を超える橋梁は 2026 年には全体の 47% を占めると予想されている⁽¹⁾。そのため、橋梁の維持管理の効率化と劣化予測精度の向上が求められている。このような状況の中、現在橋梁の維持管理で行われている劣化予測にはコンクリート表面における塩化物イオン量が用いられており、その値は海岸からの距離により決定されている⁽²⁾。しかし、飛来塩化物イオン量は橋梁の位置や気象条件など立地環境により大きく異なることから、コンクリート表面の付着量においても橋梁の立地環境を考慮する必要がある。

本研究室では、橋本⁽³⁾が塩害による橋梁劣化予測の為の立地環境の指標化を行い、塩害による劣化状況との比較を行った。距離、標高差、土地被覆、降水量の各指標が劣化にどの程度影響を与えているかを判断するには至っていないが、今後の課題としてこれらの指標を飛来塩分量と比較する必要性が指摘されている。

本研究はGIS、気象・波浪データを使用し、橋梁周辺の立地環境から橋脚のコンクリート表面に付着する塩化物イオン量を推定するシステムの構築を目的とする。飛来塩分量の推定には小窪⁽⁵⁾らが提案したモデルを使用した。この算定モデルは精度検証より課題として、入力値である気象データや波浪データの精度向上が指摘されている。日本には気象庁や国土交通省により気象海象の観測網が整備されているが、観測点間が長距離である。そのため、任意地点における気象海象データを推定するため、5kmメッシュの数値予報モデルであるMSMやCWMを使用した。入力データとして使用するGISデータは最短距離、標高、海底勾配、海岸形状、海岸線方位、橋軸方位、土地被覆である。気象データは風速風向と降水量であり、海象データは有義波高、周期、波向である。また、2016年の1年間を対象に、塩化物イオンの付着が起こりやすい場所の抽出を付着塩化物イオン量の分布図から推定した。

実測値との比較より、MSMを用いた風速の相関係数は0.5から0.7の範囲となり、標準偏差は最大で1.5m/sとなった。風向については方位誤差が0から±2の範囲が全体の7割程度である。降水量については相関係数が0.4から0.9の範囲となり、降水量の標準偏差は最大で3.1mm/hとなった。また、MSMから推定した気象観測点での降水の有無を比較した結果、各月において適中率は8割を超えた。波浪データである有義波高、周期、波向の推定はCWMの使用を検討したが、周期と波向において高い相関が得られなかった。そのため国土交通省港湾局の波浪データを使用し、砕波波高と砕波水深を推定した。付着塩化物イオン量の比較より、推定値は測定値に対して過大評価となった。原因として降水による付着塩化物イオンの洗い流しの影響を考慮できていないこと、海塩粒子の発生過程において対象海岸での有義波高、周期、波向の値を使用できなかったことが挙げられ、今後の課題である。

付着塩化物イオン密度の分布図より、塩化物イオンが付着しやすい場所の推察を行った。対象範囲には河川が二本あり、その河口部の海岸形状は海浜である。砕波により海浜で発生する海塩粒子は飛沫直径が小さいため、消波ブロックが設置された人工海岸に比べ内陸への輸送量が多くなる。また河川上は地表面粗度の影響が比較的小さく、風速が低下しないことより塩化物イオンの付着量が多くなる傾向があると推察される。

Abstract

Salt damage is one of the deterioration phenomenon of concrete bridge, and it is worrisome phenomenon because lots of bridges were constructed at coastal area in Japan. Salt damage is resulting from the chloride ion adhering to the concrete surface. Cracks in a concrete is happened by the rebar's corrosion and expansion, which is wreaked by the chloride ion seeping into concrete. In addition, cracks in a concrete of the bridges is progressed in case they are located in an area of high sea salt, and as a result the bridges are damaged. Lots of bridges in Japan were constructed during the period of rapid economic growth, and 50-year-old bridges are expected to go up to 47% of the total in 2026 ⁽¹⁾. Therefore, efficient maintenance and improvement in prediction accuracy of deterioration phenomenon are necessary. In these circumstances, the prediction of deterioration phenomenon for the current bridge maintenance used the assumed amount of the chloride ion adhering to the concrete surface, and it is constant value depending on the distance from the coast ⁽²⁾. However, it is considered that the degree of actual chloride ion adhered differs depending on the environment around the bridge such as coastal distance, elevation of ground, wind speed, and wind direction. Therefore, it is necessary to consider the environment around the bridge for estimating the amount of the chloride ion adhering to the concrete surface.

Hashimoto ⁽³⁾ proposed the index around the bridges for prediction of deterioration phenomenon, and compared the condition of bridge deterioration and those indexes. The clear relationship between those indexes and the condition of bridge deterioration was not shown, and it was pointed out the necessity for comparing those indexes to the flying chloride ion amount.

This research aims at developing a system to estimate the chloride ion amount adhering to the concrete surface from the location environment around the bridge, which is evaluated by GIS data and meteorological data. The flying chloride ion amount was estimated from the existing calculation model of chloride ion amount. The accuracy verification of this calculation model pointed out the necessity to improvement in accuracy input data, such as meteorological data and wave data. While the network of weather and wave observation is constructed in Japan by Japan Meteorological Agency and Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, the distance between observations points is so long. Therefore, the weather and wave factors at arbitrary point were estimated by using MSM GPV data and CWM GPV data, which are the numerical prediction model data and are 5 km interval gridded data. GIS data set as input data are the following: the shortest distance, the elevation of ground, the sea-bottom slope, coastal shape, azimuth direction of coastal line, azimuth direction of bridge axis and land cover. Meteorological data set as input data are wind speed, wind direction and rainfall amount, and the wave data set as input data are significant wave height, wave period and wave direction. In addition, we inferred places within study area where chloride ions are easily adhering by using distribution map of adherent chloride ion amount.

As a verification result, estimation result of wind speed by using MSM was within the range of between 0.5 and 0.7 on correlation coefficient. Error of wind direction within the range of between 0 and plus or minus 2 were account for 70% of the total. Estimation result of rainfall amount by using MSM was within the range of between 0.4 and 0.9 on correlation coefficient. In addition, the predictive value of presence or absence of rainfall was more likely than 80%. The wave data set as input data are significant wave height, wave period and wave direction are estimated by using CWM. However, the correlation values of wave period and wave direction was not good. Therefore, data of significant wave height and wave period was estimated using observation values of Kochi port in every month, and breaker height and breaker depth are calculated by computational software.

As a verification result, estimated adherent chloride ion amount showed overestimate to measured value. The cause of overestimation was considered that estimated value was resulting from the lack of influenced of wash out by rainfall. In addition, the reason of overestimation was considered that the wave data at study area was not able to use during the course of seawater aerosol production process.

The places where chloride ions are easily adhering were inferred by using distribution map of adherent chloride ion amount. There are two rivers at study area, and coastal shapes are sandy beach. Droplet diameter of seawater aerosols that is occurred in the sandy beach is small. Therefore, lots of seawater aerosols are transported to inland compared to artificial coast. In addition, wind speed does not decrease on a river because influence of ground roughness is relatively small. In the result, it is considered that adherent chloride ion amount is increasing compared to the surrounding land.

目次

論文要旨	i
Abstract	ii
1 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	1
2 付着塩化物イオン量の分布推定手法	2
2.1 対象橋梁	2
2.2 コンクリート表面に付着する塩化物イオン量の測定	3
2.2.1 コンクリート表面の試料採取	3
2.2.2 付着塩化物イオン量の測定	4
2.3 GISデータによる橋梁周辺の立地環境評価	5
2.3.1 海岸線から橋梁までの最短距離	5
2.3.2 標高と水深	6
2.3.3 土地被覆	7
2.4 気象データによる橋梁周辺の立地環境評価	8
2.4.1 波浪データ	9
2.4.2 メソ数値予報モデル	10
2.4.3 風速風向データの抽出	11
2.4.4 地形効果による風速補正	11
2.4.5 地表面粗度による風速変換	12
2.4.6 1時間降水量の推定	13
2.5 付着塩化物イオン量の推定モデル	14
2.5.1 海塩粒子発生過程	15
2.5.2 輸送過程	15
2.5.3 付着過程	16
2.5.4 計算過程	16
3 結果と比較	17
3.1 付着塩化物イオン量の測定結果	17
3.2 GISデータによる橋梁周辺の立地環境	18
3.3 波浪データによる対象海岸の立地環境	18
3.4 風速風向の比較結果	19
3.5 降水量の比較結果	25
3.6 気象データによる橋梁周辺の立地環境	26

3.7	付着塩化物イオン密度の比較	27
3.8	付着塩化物イオン密度の分布推定	28
4	結論	36
	参考文献	37
5	謝辞	38
6	付録	39
6.1	ソルメイトによる測定方法	39
6.2	使用したプログラム	39
6.3	MSMデータのダウンロード	40

図目次

図 2.1	対象とする範囲と橋梁	2
図 2.2	使用器械	3
図 2.3	試料採取位置	3
図 2.4	計測器械	4
図 2.5	最短距離の抽出	5
図 2.6	標高の抽出	6
図 2.7	海底勾配の抽出位置	6
図 2.8	土地被覆図	7
図 2.9	波浪計と気象観測計位置	8
図 2.10	高知港波浪計位置	9
図 2.11	アメダス観測計位置	10
図 2.12	風速風向データの抽出範囲	11
図 2.13	風向 180° による地形効果値の分布	11
図 2.14	風速変換のイメージ	12
図 2.15	降水データの抽出範囲	13
図 2.16	付着塩化物イオン量の推定モデル	14
図 2.17	付着塩化物イオン量の計算過程	16
図 3.1	風速の推定値と実測値の時系列データ	19
図 3.2	風向誤差の分布	23
図 3.3	分布図作成用の対象点	28
図 3.4	付着塩化物イオン密度の分布図	29
図 6.1	塩化物イオンの測定方法	39
図 6.2	Free Download Manager Portable	40
図 6.3	URL 作成	41
図 6.4	URL リストのインポート手順	42

表目次

表 2-1	橋梁一覧	2
表 2-2	計測器械の仕様	4
表 2-3	使用データ	5
表 2-4	土地被覆分類の画素値と対応する地表面粗度区分	7
表 2-5	使用データ	8
表 2-6	地表面粗度の区分	13
表 2-7	分割表	14
表 3-1	物部川大橋における付着塩化物イオン量と付着密度	17
表 3-2	物部大橋における付着塩化物イオン量と付着密度	17
表 3-3	G I S データによる橋梁周辺の立地環境データセット	18
表 3-4	波浪データによる対象海岸のデータセット	18
表 3-5	風速の比較結果	19
表 3-6	降水量の比較結果	25
表 3-7	分割表による降水有無の評価	26
表 3-8	気象データによる橋梁周辺のデータセット	26
表 3-9	物部川大橋における付着塩化物イオン密度の比較	27
表 3-10	物部大橋における付着塩化物イオン密度の比較	27
表 3-11	橋梁位置における付着塩化物密度の推定値	29
表 6-1	使用プログラム	39

1 序論

1.1 背景

コンクリート橋梁の劣化現象の一つである塩害は、沿岸部に建設をされた橋梁が多い日本では懸念すべき劣化現象である。塩害は海から飛来する塩化物イオンがコンクリート表面に付着することで始まる。コンクリートのひび割れは付着した塩化物イオンが内部へ浸透し鉄筋の腐食膨張を誘引することで発生し、塩分の供給が継続的に行われるような立地環境である場合、ひび割れがさらに進行しコンクリートの剥落など構造体の損傷につながる。

日本における橋梁の多くは高度成長期に集中して建設され、建設後 50 年を超える橋梁は 2026 年には全体の 47% を占めると予想されている⁽¹⁾。そのため、橋梁の維持管理の効率化と劣化予測精度の向上が求められている。このような状況の中、現在橋梁の維持管理で行われている劣化予測にはコンクリート表面における塩化物イオン量が用いられており、その値は海岸からの距離により決定されている⁽²⁾。しかし、飛来塩化物イオン量は橋梁の位置や気象条件など立地環境により大きく異なることから、コンクリート表面の付着量においても橋梁の立地環境を考慮する必要がある。本研究室では、橋本⁽³⁾が塩害による橋梁劣化予測の為に立地環境の指標化を行い、塩害による劣化状況との比較を行った。距離、標高差、土地被覆、降水量の各指標が劣化にどの程度影響を与えているかを判断するには至っていないが、今後の課題として飛来塩分量との比較が指摘されている。飛来塩分量の推定はこれまで数多く研究されており、昨今は数値シミュレーションによる推定が多くなされている⁽⁴⁾。小窪⁽⁵⁾らが提案した『海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量算定モデル』は、任意の地点と高度における飛来塩化物イオンの付着量を塩化物イオン流速として推定するモデルである。精度評価より課題として、入力値である気象データや波浪データの精度向上が指摘されている。日本には気象庁や国土交通省により気象海象の観測網が整備されているが、観測点間が離れているため任意地点における気象海象データの推定が困難である。そのため、任意地点における気象海象データとして、一定の精度を担保された数値予報モデルを使用することで、付着塩化物イオン量の推定をより高い精度で行えることが期待される。

1.2 目的

本研究はGIS、気象・波浪データを橋梁周辺の立地環境として使用し、橋脚表面に付着する塩化物イオン量の月間値を推定するシステムの構築を目的とする。また、付着分布図から付着が起りやすい場所の抽出を行う他、プログラミング処理による付着塩化物イオン量算出の自動化を図る。

2 付着塩化物イオン量の分布推定手法

2.1 対象橋梁

本研究は高知県南国市および香南市の海岸から約 4km の範囲を対象に付着塩化物イオン量の推定を行う。図 2.1 に対象とする範囲と橋梁を示す。範囲内の橋梁位置は、高知県が管理する橋梁台帳データに記載された緯度経度から位置をプロットしたものである。表 2-1 に橋梁一覧を示す。



図 2.1 対象とする範囲と橋梁

(出典：国土地理院の全国最新写真に橋梁位置を追記して掲載)

表 2-1 橋梁一覧

ID	施設名	北緯度	東経度	年	月	交差物名称1	橋長	径間数	支間長
1	物部川大橋	33.537444	133.688611	1976	5	物部川	530.3	10	52.9
2	千鳥橋	33.538472	133.707722	1967	3	鳥川	20.5	1	20.5
3	境目大橋	33.532694	133.660250	1986	11	高知県管理地	121.5	7	9.5
4	物部川橋	33.562222	133.685556	1994	10	物部川	328.0	8	53.0
5	新秋田橋	33.534722	133.670750	1984	2	秋田川	28.9	1	28.9
6	岩田橋	33.564611	133.729500	1983	3	山北川	31.7	1	31.7
7	恵比寿橋	33.533139	133.682333	1983	3	後川	29.9	1	29.9
8	後川下橋	33.533139	133.684472	1983	3	後川	29.6	1	29.6
9	和田橋	33.560278	133.743333	1987	12	香宗川	45.3	2	21.9
10	地藏院橋	33.562778	133.751944	1988	5	香宗川	48.6	1	47.6
11	香宗川橋	33.555000	133.726667	1979	5	香宗川	68.0	2	32.6
12	前浜橋	33.533361	133.665361	1990	3	後川	22.8	1	22.8
13	大谷橋	33.563944	133.703111	1971	3	鳥川	20.0	1	20.0
14	東野橋	33.557833	133.705083	1928	4	鳥川	18.2	2	9.0

2.2 コンクリート表面に付着する塩化物イオン量の測定

2.2.1 コンクリート表面の試料採取

コンクリート表面の試料採取には図 2.2 に示すディスクグラインダーを用いた。採取位置は橋梁の橋軸と橋軸直角方向にある 4 面とし、それぞれ地上高 1.5~2m の高さにある 50cm 四方の範囲を表面切削する。図 2.3 に試料採取位置を示す。



図 2.2 使用器械

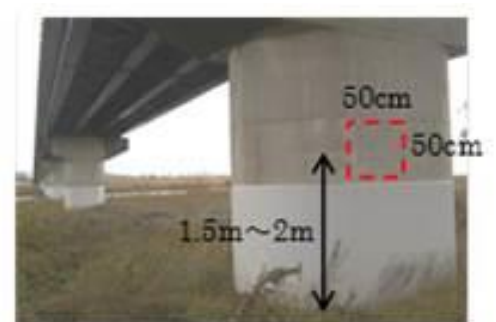


図 2.3 試料採取位置

試料採取位置における試料採取深さは、式 1.1 により推定した。

$$d = \frac{S_{total}}{2.3 \times A} \quad (1.1)$$

d : 試料採取深さ(mm)

S_{total} : 試料重量(g)

A : 試料採取面積(cm^2)

2.3 : コンクリートの単位体積重量(g/cm^3)

2.2.2 付着塩化物イオン量の測定

コンクリート表面に付着する塩化物イオン量の測定は、硬化コンクリート中の塩化物イオン濃度測定法（J I S A 1154）により行った。この方法は電量滴定から求めた塩素イオン濃度にコンクリートの単位体積重量 $2300\text{kg}/\text{m}^3$ を乗じた値を塩化物イオン量とするものである。また、測定値は単位体積重量であるため、単位面積重量へ変換するため測定値に試料採取深さを乗じている。図 2.4 に計測器械、表 2-2 に仕様を示す。



図 2.4 計測器械

表 2-2 計測器械の仕様

製品名	SALMAT100/H
メーカー	(株)中研コンサルタント
測定法	電量滴定法
測定範囲	0.001～3.000%
測定精度	±0.4%以内
重量	4.5kg

2.3 GISデータによる橋梁周辺の立地環境評価

付着塩化物イオン量の推定には海水飛沫の発生過程、輸送過程、付着過程に応じて橋梁周辺の立地環境を入力データとして組み込む必要がある。GISデータによる橋梁周辺の立地環境には、発生過程では海底勾配と海岸形状、輸送過程では海岸線から橋梁までの最短距離、海岸線方位と橋梁位置での標高、付着過程では風速補正に用いる土地被覆と橋梁の橋軸方位があり、これらの立地環境をQGIS（バージョン2.18.9）により評価した。表2-3に使用したGISデータを示す。

表 2-3 使用データ

データ名	作成者	概要
高知県橋梁台帳データ	高知県土木部道路課	橋梁名、所在地、位置情報(日本測地系による緯度経度)、構造形式など
海岸線データ	国土交通省国土政策局国土情報課	ラインデータで示された海岸線の位置
土地利用細分メッシュ(ラスター版)	国土交通省国土政策局国土情報課	100mメッシュ単位に地図記号や衛星画像の色調から判断される12種類の項目で表された土地利用の状況
数値標高モデル10mメッシュ	国土交通省国土地理院	10mメッシュの標高データ
500mメッシュ水深データ	日本海洋データセンター	ポイントデータ(世界測地系による緯度経度)で示された日本周辺の海底地形データ
全国最新写真(シームレス)	国土交通省国土地理院	背景図として使用 https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html
全国ランドサットモザイク画像	国土交通省国土地理院	背景図として使用 https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html

2.3.1 海岸線から橋梁までの最短距離

最短距離の算出は橋梁位置と海岸線データを使用し、ベクタ解析ツール (Distance to nearest hub) により行った。図2.5に最短距離の抽出位置を示す。ラインデータは海岸線に対する法線であり、法線方位角の算出にはプラグイン (Azimuth and Distance Calculator) を用いた。また、背景図として使用する国土地理院の全国最新写真より各ラインの海岸形状を目視で海浜と人工海岸に分類した。



図 2.5 最短距離の抽出

(出典：国土地理院の全国最新写真に最短距離を追記して掲載)

2.3.2 標高と水深

橋梁位置における標高抽出は橋梁位置と数値標高モデルを使用し、プラグイン（Point sampling tool）により行った。図 2.6 に標高の抽出結果を示す。海底勾配の推定は水深データと海岸線データを使用し、ベクタ解析ツール（Distance to nearest hub）により行った。500mメッシュのポイントデータである水深データは、ラスタ解析ツール（データ補完）によりセルサイズ 10 m の三角形分割補完を行い、ラスタ変換を行った。図 2.7 に海岸方位に応じた代表点における海底勾配を抽出する断面位置を示す。なお、海底勾配は抽出結果から対象海岸での平均値をとっている。



図 2.6 標高の抽出

(出典：国土地理院の全国最新写真に標高を追記して掲載)



図 2.7 海底勾配の抽出位置

(出典：国土地理院の全国最新写真に水深図を追記して掲載)

2.3.3 土地被覆

橋梁位置における土地被覆分類は橋軸方位の算出用に作図した橋梁中心線から半径 100mのバッファ内に最も多く含まれる分類項目を代表土地被覆とした。バッファ内に含まれる項目の抽出には、ラスタ解析ツール（地域統計）を使用した。図 2.8 に土地被覆図を示す。また、表 2-4 に分類項目の画素値を地表面粗度区分⁽¹⁾（日本建築学会，2004）に対応させたものを示す。



図 2.8 土地被覆図

表 2-4 土地被覆分類の画素値と対応する地表面粗度区分

項目	画素値	地表面粗度区分
田	10	Ⅱ
その他の農用地	20	Ⅱ
森林	50	Ⅲ
荒地	60	Ⅱ
建物用地	70	Ⅲ
道路	91	Ⅲ
鉄道	92	Ⅲ
その他の用地	100	Ⅱ
河川地及び湖沼	110	Ⅰ
海浜	140	Ⅰ
海水域	150	Ⅰ
ゴルフ場	160	Ⅱ
解析範囲外	255	

2.4 気象データによる橋梁周辺の立地環境評価

気象海象データによる橋梁周辺の立地環境には、発生過程では有義波高、周期、波向、輸送過程では海上における風速風向と降雨量の有無、付着過程では陸上における風速風向がある。これらのデータのうち、海上における風速と風向以外は気象観測点や波浪観測点において実測値が観測されているが、図 2.9 に示すように観測点の数が少ないため任意地点での値を推定することは困難である。そのため、本研究では数値予報モデルから任意地点の気象海象データを入力値として使用できるか検討した。表 2-5 に使用した気象海象データを示す。

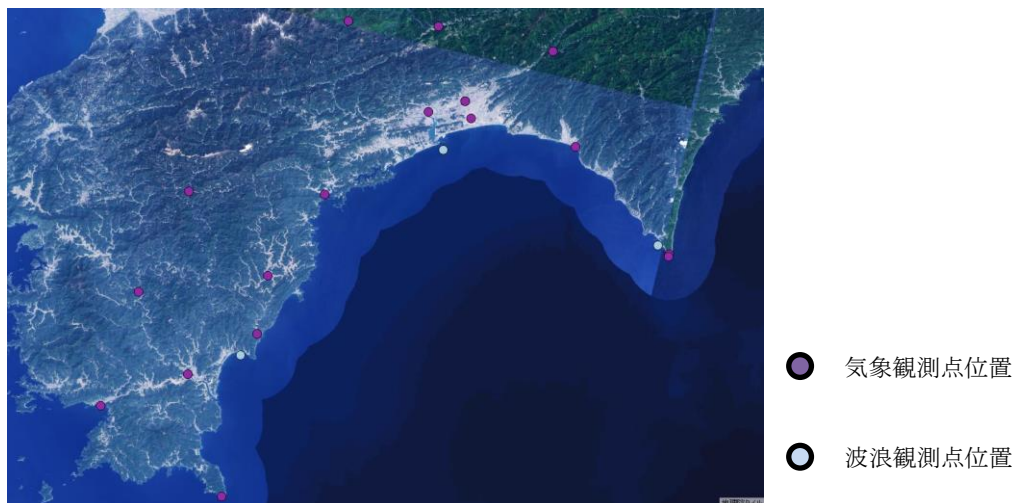


図 2.9 波浪計と気象観測計位置

(出典：国土地理院の全国ランドサットモザイク画像に観測点位置を追記して掲載)

データソース：Landsat8 画像 (GSI, TSIC, GEO Grid/AIST) ,
Landsat8 画像 (courtesy of the U.S. Geological Survey) ,
海底地形 (GEBCO)

表 2-5 使用データ

データ名	作成者	概要
沿岸波浪数値予報モデル(CWM)	国土交通省気象庁	GRIB2形式の5kmメッシュ波浪数値データで、格子点には波高、周期、波向などの予報データが付与されている
波浪データ	国土交通省港湾局	高知港における有義波高、周期、波向などの速報値データ
メソ数値予報モデル(MSM)	国土交通省気象庁	NetCDF形式の5kmメッシュ気象数値データで、格子点には東西風、南北風、1時間降水量などの予報データが付与されている

2.4.1 波浪データ

対象海岸における有義波高, 周期, 波向の推定にあたり, 気象庁の沿岸波浪数値予報モデル (CWM) の使用を検討した. 図 2.10 に比較を行った高知港波浪計位置を示す. CWMは 5kmメッシュの波浪数値データであり, 格子点には有義波高, 周期, 波向などの予報データが付与されている. 実測値と推定値の比較は 2016 年 4 月から 2017 年 3 月までの 1 年間において, 実測値である波浪計位置に最も近いCWMの格子点値を使用して行ったが, 周期と波向において高い相関が得られなかった. そのため, 本研究ではCWMを使用せず港湾局が公開している高知港での速報値を対象海岸における波浪データとして使用した. ただし, 欠測期間が多い月があるため, 港湾局の波浪データは月毎の平均値を用いている.

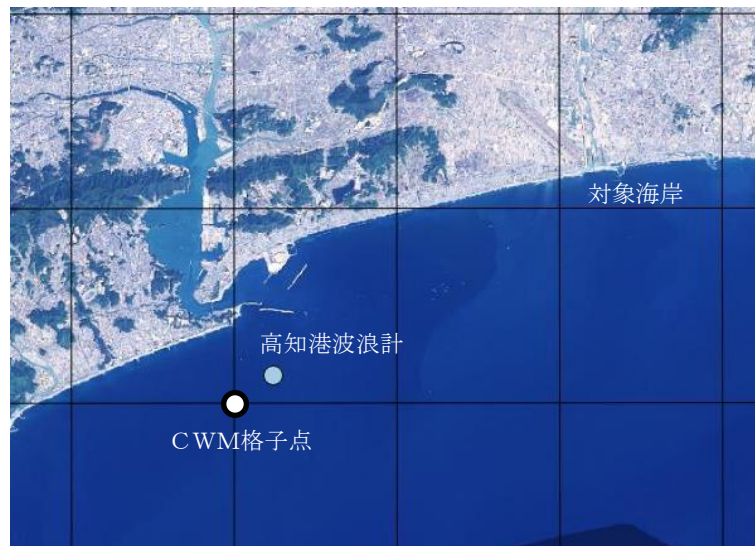


図 2.10 高知港波浪計位置

(出典 : 国土地理院の全国ランドサットモザイク画像に波浪計位置等を追記して掲載)

データソース : Landsat8 画像 (GSI, TSIG, GEO Grid/AIST) ,
Landsat8 画像 (courtesy of the U.S. Geological Survey) ,
海底地形 (GEBCO)

海水飛沫は砕波により発生し空気中へと打ち上げられる. 対象海岸における浅水係数と沖波波高の推定は, 合田が提案した砕波帯内の任意水深における砕波波高算定式⁽⁶⁾を用い, 式 2.1 より浅水係数 K_s を, 式 2.2 より有義波高 $H_{1/3}(m)$ を沖波波高 $H_o(m)$ へと変換した. なお, 沿岸係数 α は波の屈折係数と回折係数を乗じた値であり, 本研究では国土技術政策総合研究所資料⁽⁷⁾に記載された対象海岸付近の値を使用している.

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\tanh kh + kh(1 - \tanh^2 kh)}} \quad (2.1)$$

k : 波数(m^{-1})

h : 水深(m)

$$H_{1/3} = K_s \cdot \alpha \cdot H_o \quad (2.2)$$

$H_{1/3}$: 有義波高(m)

K_s : 浅水係数

$\alpha = 1.096$: 沿岸係数

碎波計算は中村⁽⁸⁾の作成したプログラムを使用し、沖波波高、周期、波向、海底勾配の値を入力値として、対象海岸における碎波波高 $H_b(m)$ と碎波水深 $h_b(m)$ を求めた。

2.4.2 メソ数値予報モデル

対象橋梁における風速風向や 1 時間降水量の推定にあたり、気象庁のメソ数値予報モデル (MSM) の使用を検討した。MSMは 5kmメッシュの数値データであり、格子点には地上高 10mにおける東西風や南北風の他、1 時間降水量などの予報データが付与されている。実測値と推定値の比較は 2016 年 1 月から 12 月までの 1 年間において、風速風向はアメダス観測位置に最も近い格子点の値を補正変換した値を、降水量はアメダス観測位置を囲む 4 点の平均値を使用して行った。図 2.11 に比較を行ったアメダス観測位置と MSM 格子点位置を示す。

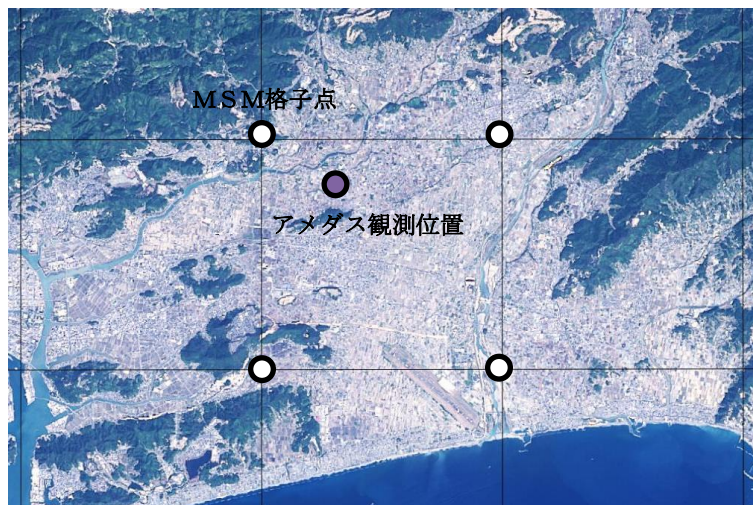


図 2.11 アメダス観測計位置

(出典 : 国土地理院の全国ランドサットモザイク画像にアメダス観測位置等を追記して掲載)

データソース : Landsat8 画像 (GSI, TSIC, GEO Grid/AIST) ,
 Landsat8 画像 (courtesy of the U.S. Geological Survey) ,
 海底地形 (GEBCO)

2.4.3 風速風向データの抽出

風速風向データの抽出は緯度 32.6~33.6° , 経度 132.4~134.35° の範囲で行い, 東西風と南北風から地上高 10 m における風速風向の算出を行った。海上風速は塩化物イオンの輸送量に, 陸上風速は付着量に影響を及ぼす。図 2.12 に風速風向データの抽出範囲を示す。

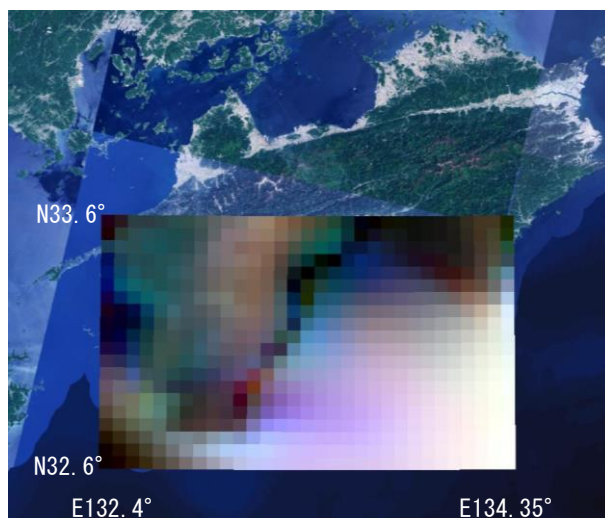


図 2.12 風速風向データの抽出範囲

(出典 : 国土地理院の全国ランドサットモザイク画像に風速風向データを追記して掲載)

データソース : Landsat8 画像 (GSI, TSIG, GEO Grid/AIST) ,
Landsat8 画像 (courtesy of the U.S. Geological Survey) ,
海底地形 (GEBCO)

2.4.4 地形効果による風速補正

風速補正は地形による影響を考慮した。地形効果は地形の起伏による風の当たりやすさ数値化したものであり, プロセッシングツール (SAGAGIS Wind effect⁽⁹⁾) を使用し 16 方位毎に影響値の抽出を行った。図 2.13 に南風による地形効果値の分布を示す。

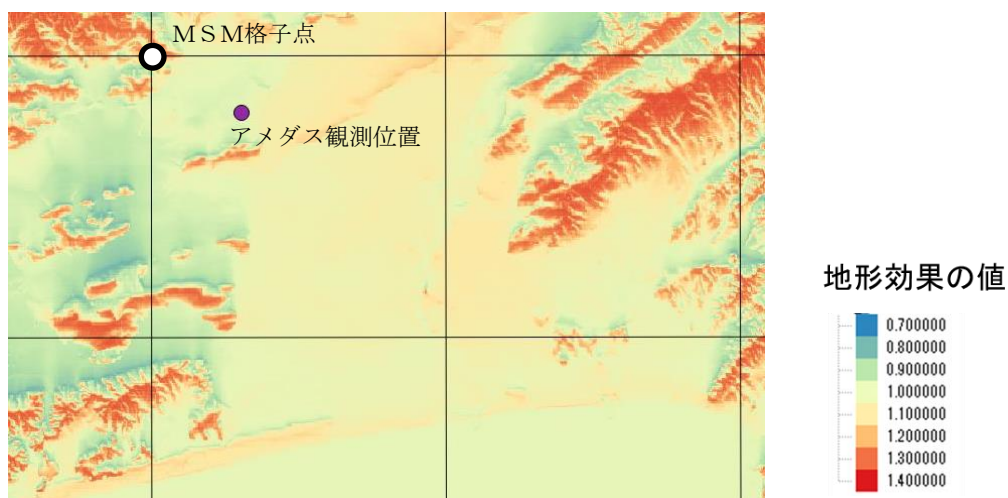


図 2.13 風向 180° による地形効果値の分布

地形効果による風速補正は, 式 2.3 よりアメダス観測位置に最も近いMSM格子点での地形効果値とアメダス観測位置での地形効果値の比をMSM格子点での風速に乘じることで行った.

$$V_T = V_{MSM} \cdot \frac{WE_{Target}}{WE_{MSM}} \quad (2.3)$$

V_T : 補正風速(m/s)

V_{MSM} : MSM の風速(m/s)

WE_{Target} : 目標点での地形効果値

WE_{MSM} : MSM での地形効果値

2.4.5 地表面粗度による風速変換

MSMの風速は地上高 10 mでの推定値であるため, 気象観測点における地上風速に変換する必要がある. 風速の変換は式 2.4, 2.5 の風速のべき乗則⁽¹⁰⁾により行った. 図 2.14 に風速変換のイメージを, 表 2-6 に日本建築学会が提案している地表面粗度の区分⁽¹¹⁾による境界層高さ $Z_i(m)$ とべき指数 α を示す.

$$V_{Z1} = V_{MSM} \cdot \left(\frac{Z_1}{10}\right)^\alpha \quad (2.4)$$

$$V_R = \frac{V_{Z1}}{\left(\frac{Z_2}{Z}\right)^\alpha} \quad (2.5)$$

V_R : 変換風速(m/s)

V_{Z1} : 境界層における風速(m/s)

Z_i : 境界層高さ(m)

α : べき指数

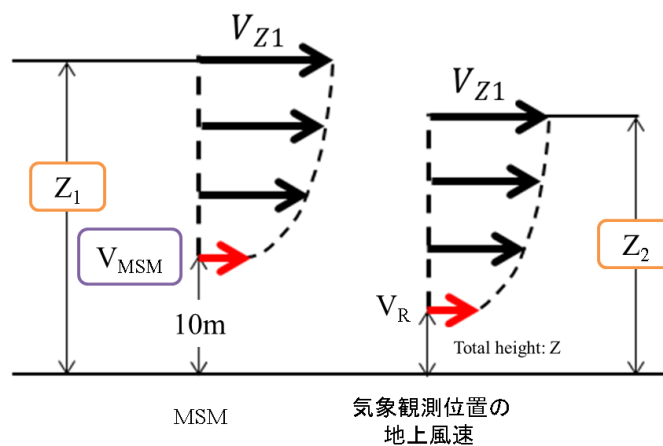


図 2.14 風速変換のイメージ

表 2-6 地表面粗度の区分⁽¹⁾ (日本建築学会, 2004)

地表面粗度区分	境界層高さ $Z_i(m)$	べき指数 α	地表面の状態
I	250	0.10	海岸・海上
II	350	0.15	田園地帯など
III	450	0.20	都市周辺の住宅地 工業地帯・森林地帯
IV	550	0.27	地方中心都市の市街地など
V	650	0.35	大都市の中心市街地

2.4.6 1時間降水量の推定

降水データの抽出は風速風向と同様に緯度 $32.6 \sim 33.6^\circ$, 経度 $132.4 \sim 134.35^\circ$ の範囲で行った。降水量は付着した塩化物イオンの洗い流しに影響を及ぼすデータである。図 2.15 に降水データの抽出範囲を示す。降水量の値はメッシュ内で均一であるとし、アメダス観測点の周囲にある 4 点のMSM格子点の平均値をとっている。なお、降水量の平均値が $0.5mm/h$ よりも少ない場合は 1 時間降水量を $0mm$ とした。

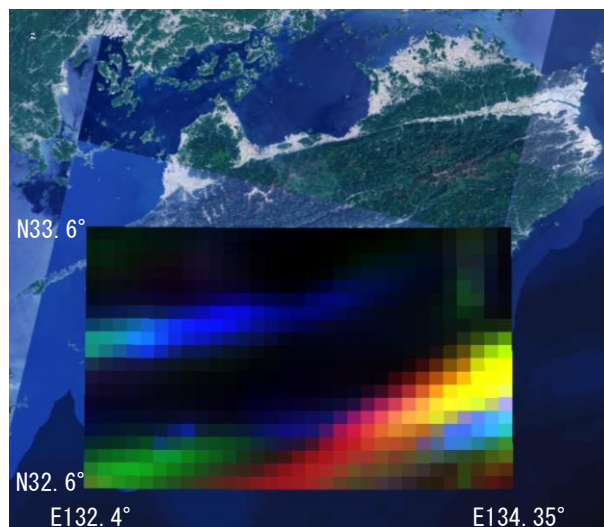


図 2.15 降水データの抽出範囲

(出典：国土地理院の全国ランドサットモザイク画像に降水データを追記して掲載)

データソース：Landsat8 画像 (GSI, TSIC, GEO Grid/AIST) ,
Landsat8 画像 (courtesy of the U.S. Geological Survey) ,
海底地形 (GEBCO)

また、表 2-7 に示す分割表より MSM から推定した気象観測点での降水の有無を比較した。本研究で使用する付着塩化物イオン量の推定モデルは、降雨の場合に塩化物イオンは陸上へ輸送されないと仮定しており、降雨の有無が輸送、付着量に影響を及ぼす。

表 2-7 分割表

		MSM	
		降水あり	降水なし
アメダス	降水あり	A	B
	降水なし	C	D

$$\text{全適中率} : (A + D) / N$$

$$\text{降水有り適中率} : A / (A + C)$$

$$\text{降水無し適中率} : B / (B + D)$$

$$\text{データ数} : N$$

2.5 付着塩化物イオン量の推定モデル

本研究で使用する付着塩化物イオン量の推定モデル⁽⁵⁾は、海塩粒子発生過程、輸送過程、付着過程のプロセスからなる。このモデルにおいて塩化物イオンは無降水時および海上および陸上での風向が海風範囲にある場合に輸送され付着することになる。なお、海風は海岸線方位に対して $\pm 11.25^\circ$ の風向範囲とした。図 2.16 に各過程における変数を示す。

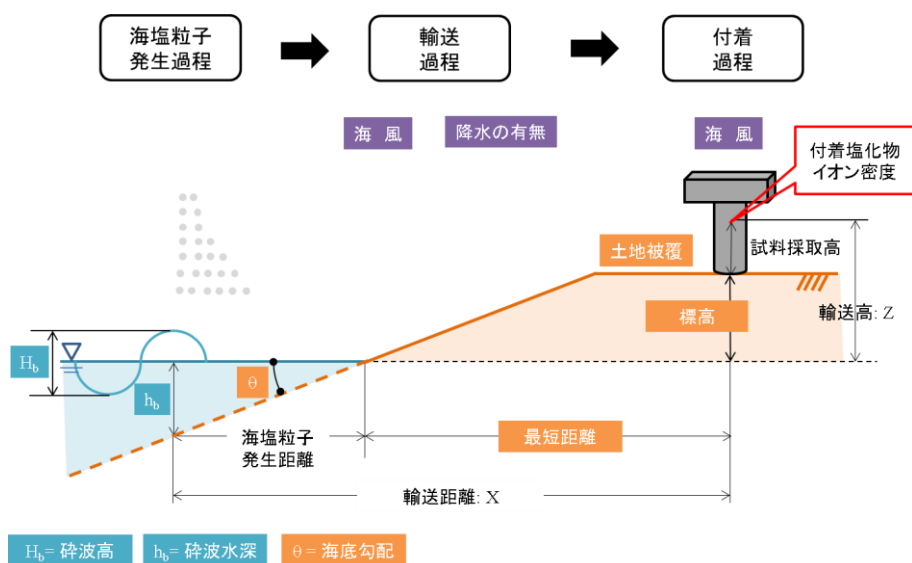


図 2.16 付着塩化物イオン量の推定モデル

2.5.1 海塩粒子発生過程

海塩粒子発生過程における総飛沫個数濃度 θ_{total} (個/m³/sec), 対象飛沫直径の発生飛沫個数濃度 $\theta_{d-total}$ (個/m³/sec)は式 2.6, 2.7 により求まる.

$$\theta_{total} = \delta \cdot \theta_0 \cdot f(H_b) \cdot (1/T) \quad (2.6)$$

δ : 飛沫発生個数決定係数

$\delta = 1$: 人工海岸

$\delta = 7$: 海浜

$\theta_0 = 2.0 \times 10^4$ (個/m²) : 基準発生飛沫個数

$f(H_b) = C \cdot H_b$

H_b : 碎波波高 $C = 1$

T : 周期(sec)

$$\theta_{d-total} = \theta_{total} \cdot \int_{d=d-\frac{\Delta d}{2}}^{d=d+\frac{\Delta d}{2}} \frac{1}{d_a} \exp\left(-\frac{1}{d_a} \cdot d\right) dd \quad (2.7)$$

d : 対象飛沫直径(m)

d_a : 平均飛沫直径(m)

$d_a = 400\mu\text{m}$: 人工海岸

$d_a = 50\mu\text{m}$: 海浜

$\Delta d = 10\mu\text{m}$: 微小直径

2.5.2 輸送過程

海塩粒子の輸送過程は, 海塩粒子が海風による水平移流と重力による自由落下を行いながら目標地点まで輸送されるとする. 目標地点高度に到達する対象飛沫直径の飛沫個数濃度 $\theta_{d,z,x}$ (個/m³/sec)は, 式 2.8 により求まる. なお, 式中の輸送距離は最短距離と海塩粒子発生距離との合算値であるが, 最短距離は海岸直角方位での距離であるため, 風向による距離の補正を行う.

$$\theta_{d,z,x} = \theta_{d-total} \cdot \frac{1}{Z_a} \exp\left[-\frac{1}{Z_a} \cdot \left\{Z + w_d \left(\frac{X}{U_{sea}}\right)\right\}\right] \quad (2.8)$$

Z_a : 飛沫鉛直分布平均高さ(m)

$Z_a = 3 \cdot H_b$: 人工海岸

$Z_a = 6 \cdot H_b$: 海浜

Z : 輸送高(m)

X : 輸送距離(m)

U_{sea} : 海上風速(m/s)

w_d : 対象飛沫直径の終末落下速度(m/s)

2.5.3 付着過程

海塩粒子の付着過程は、海塩粒子を含んだ空気塊が風の作用により橋脚表面に衝突することで付着が起これとする。まず、式 2.9 により飛沫個数濃度 $\theta_{d,z,x}$ が目標地点高度に到達した対象飛沫直径の塩化物イオン量 $M_{d,z,x}(\text{kg}/\text{m}^3/\text{sec})$ に変換される。次に、式 2.10 より $M_{d,z,x}$ に陸上風速における 1 秒あたりの移動量と解析時間間隔を乗じた値を算出し、これを目標地点高度に到達した対象飛沫直径の付着塩化物イオン量 $F_{d,z,x}(\text{kg}/\text{m}^2)$ とする。なお、 $F_{d,z,x}$ は橋軸直角方位からの風向による付着量であるため、式 2.11 により付着量の風向補正を行う。

$$M_{d,z,x} = \theta_{d,z,x} \cdot M_d \quad (2.9)$$

M_d : 対象飛沫直径に含まれる
塩化物イオン量(kg)

$$F_{d,z,x} = M_{d,z,x} \cdot U_{land} \cdot 3600 \quad (2.10)$$

U_{land} : 陸上風速における
1 秒あたりの移動距離(m)
3600 : 解析時間間隔(sec)

$$F_{d,z,x}' = F_{d,z,x} \cdot \cos \theta_2 + F_{d,z,x} \cdot \sin \theta_2 \quad (2.11)$$

θ_2 : 陸上風向と橋軸直角方位の差

2.5.4 計算過程

図 2.17 にデータセットを用いた付着塩化物イオン量算出の計算過程を示す。

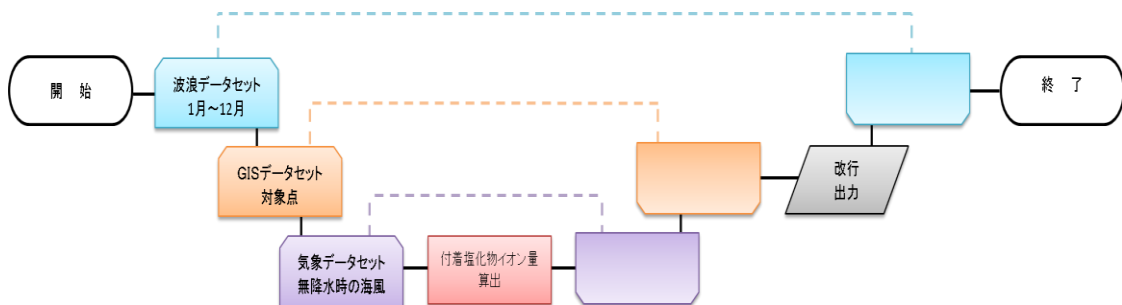


図 2.17 付着塩化物イオン量の計算過程

3 結果と比較

3.1 付着塩化物イオン量の測定結果

付着塩化物イオン量の測定結果と付着密度の推定結果を表 3-1, 3-2 に示す。物部川大橋では試料を採取する方位により付着量に大きな差が見られるが、物部大橋では方位による差は小さい結果となった。付着塩化物イオン密度の変化量は、2016年12月から2017年4月にかけて物部川大橋では -150 mg/m^2 、物部大橋では -75 mg/m^2 となった。また、2017年4月から5月にかけて物部川大橋では $+58 \text{ mg/m}^2$ となった。物部大橋における付着塩化物イオン密度は、物部川大橋に対して0.5~0.6倍の範囲にある。なお、本研究における付着密度の算出に用いた試料採取深さは $d = 0.3 \text{ mm}$ である。

表 3-1 物部川大橋における付着塩化物イオン量と付着密度

採取時期	方位	付着塩化物イオン量 (kg/m^3)				付着塩化物イオン密度 (mg/m^2)
		89°	179°	269°	平均	平均
2016年12月16日		0.23	0.92	1.15	0.76	228
2017年4月4日		0.26	0.38	0.16	0.26	78
2017年5月11日		0.30	0.81	0.21	0.44	132

表 3-2 物部大橋における付着塩化物イオン量と付着密度

採取時期	方位	付着塩化物イオン量 (kg/m^3)				付着塩化物イオン密度 (mg/m^2)
		105°	195°	285°	平均	平均
2016年12月16日		0.52	0.35	0.35	0.41	123
2017年4月4日		0.15	0.18	0.15	0.16	48

3.2 GISデータによる橋梁周辺の立地環境

表 3-3 にGISデータによる橋梁周辺の立地環境データセットを示す。

表 3-3 GISデータによる橋梁周辺の立地環境データセット

ID	X (m)	Y (m)	最短距離 (m)	標高 (m)	海岸形状 1:人工海岸 2:海浜	海岸方位角 (°)	橋軸方位角 (°)	土地被覆分類 (画素値)
1	17237.979	59984.176	650	4.4	2	80	89	110
2	19046.165	60104.209	556	4.9	1	83	94	70
3	14638.878	59455.662	608	4.9	1	80	61	10
4	16983.103	62733.966	3400	11.5	2	80	105	110
5	15613.608	59682.104	651	4.8	1	80	91	110
6	21052.383	63001.841	3270	8.3	2	89	54	10
7	16695.846	59506.683	280	4.6	2	80	142	20
8	16908.187	59489.339	224	4.6	2	80	39	100
9	22347.350	62529.493	2846	11	2	104	18	10
10	23146.099	62808.632	3265	15	2	104	109	10
11	20801.403	61940.701	2224	5.4	2	89	102	10
12	15113.402	59530.371	594	4.9	1	80	175	70
13	18612.450	62927.977	3388	24.2	1	83	25	70
14	18802.974	62259.855	2702	17.9	1	83	131	70

3.3 波浪データによる対象海岸の立地環境

表 3-4 に波浪データによる対象海岸の立地環境データセットを示す。

表 3-4 波浪データによる対象海岸のデータセット

推定時期	有義波高 (m)	浅水係数	沿岸係数	沖波波高 (m)	碎波高 (m)	碎波水深 (m)	周期 (sec)	波向 (°)
2016年12月	0.58	0.913	1.096	0.58	1.00	1.24	7.6	160
2017年1月	0.46	0.918		0.46	0.81	1.00	6.8	166
2017年2月	0.57	0.920		0.57	0.92	1.15	6.6	171
2017年3月	0.51	0.913		0.51	0.93	1.15	7.8	161
2017年4月	0.83	0.917		0.83	1.23	1.55	6.9	165
2017年5月	0.69	0.917		0.69	1.07	1.34	6.9	160

3.4 風速風向の比較結果

2016年の1月から12月における風速風向の比較結果を表3-5に示す。MSMから推定した風速と気象観測点の実測値は、相関係数が0.5から0.7の範囲となり、標準偏差は最大で1.5m/sとなった。風向における方位誤差は0から±2の範囲が全体の7割程度である。図3.1に風速の推定値と実測値の時系列データを、図3.2に風向誤差の分布を示す。MSMの推定値より気象観測点の風速風向は概ね再現できていると考える。

表 3-5 風速の比較結果

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
風速 相関係数	0.6	0.7	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6
風速 RMSE(m/s)	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.0	0.9	1.3	1.1	1.3	1.5	1.5
風向誤差 0,±2の割合 (%)	66	71	77	71	70	66	75	78	69	73	65	65

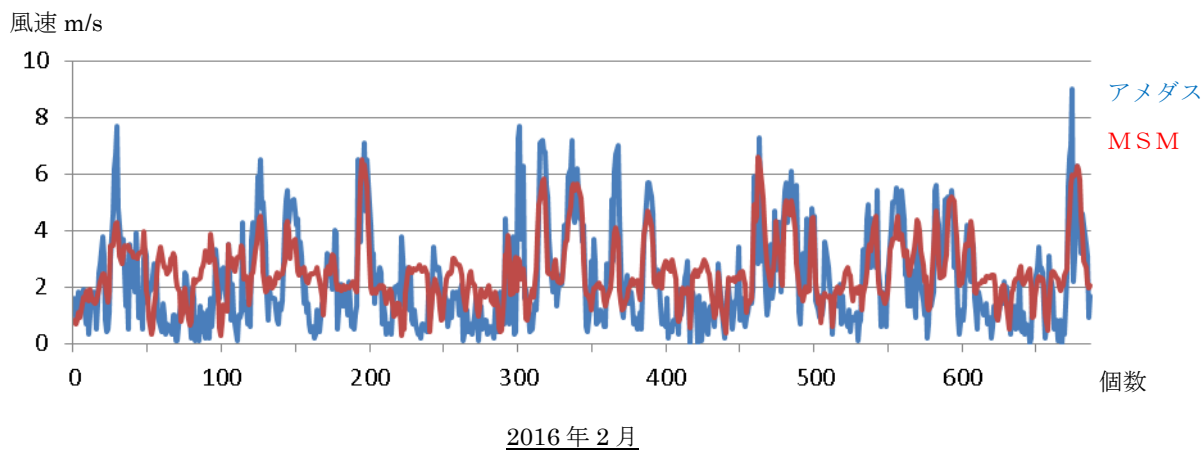
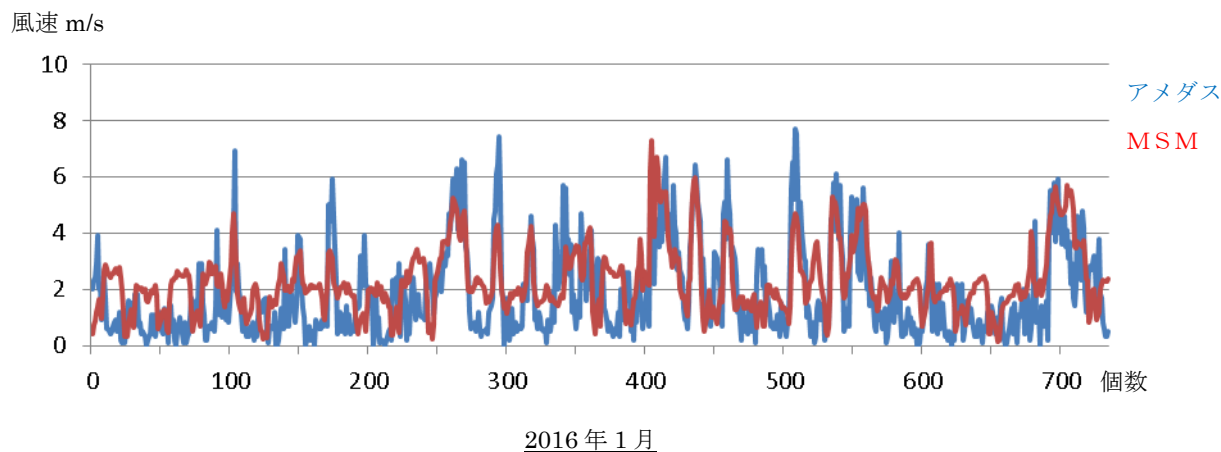


図 3.1 風速の推定値と実測値の時系列データ

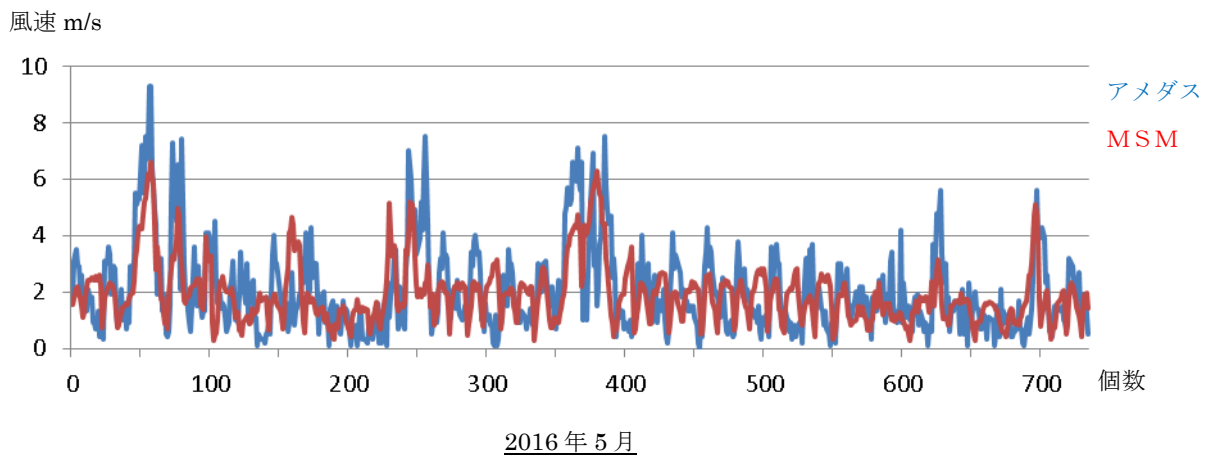
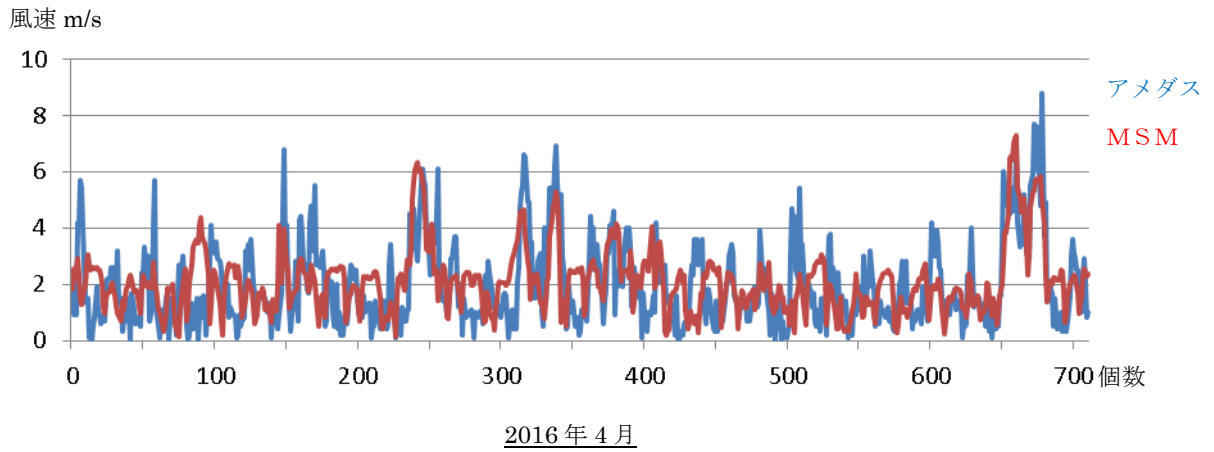
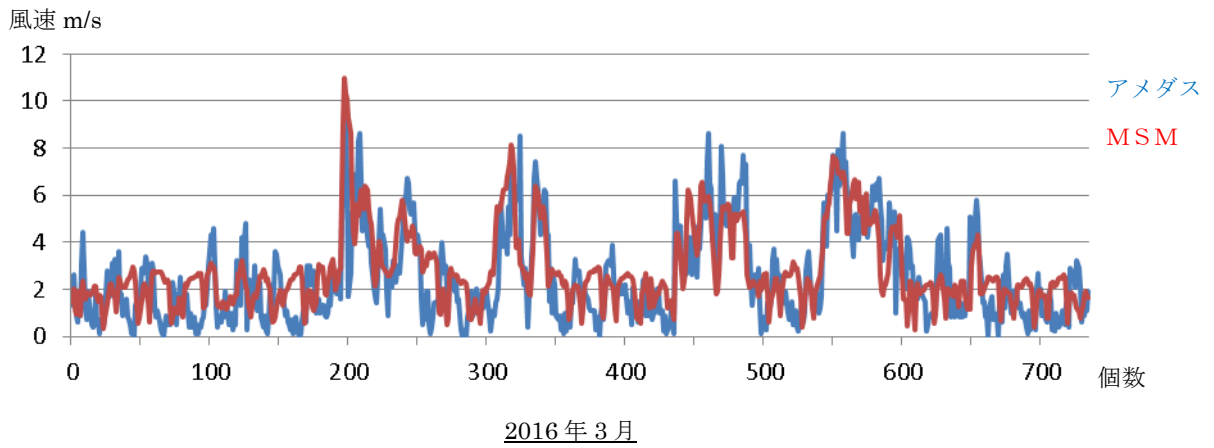


図 3.1 (続き) 風速の推定値と実測値の時系列データ

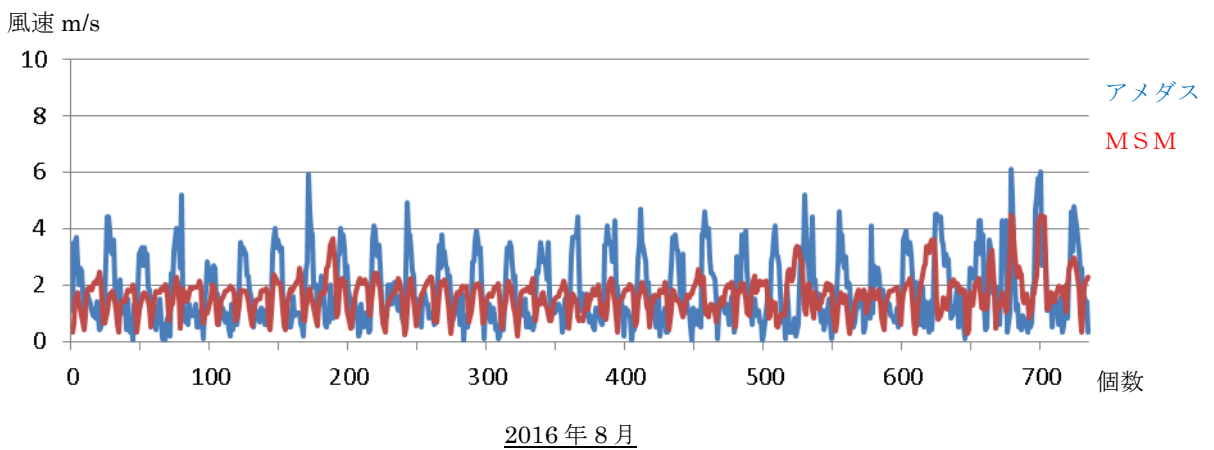
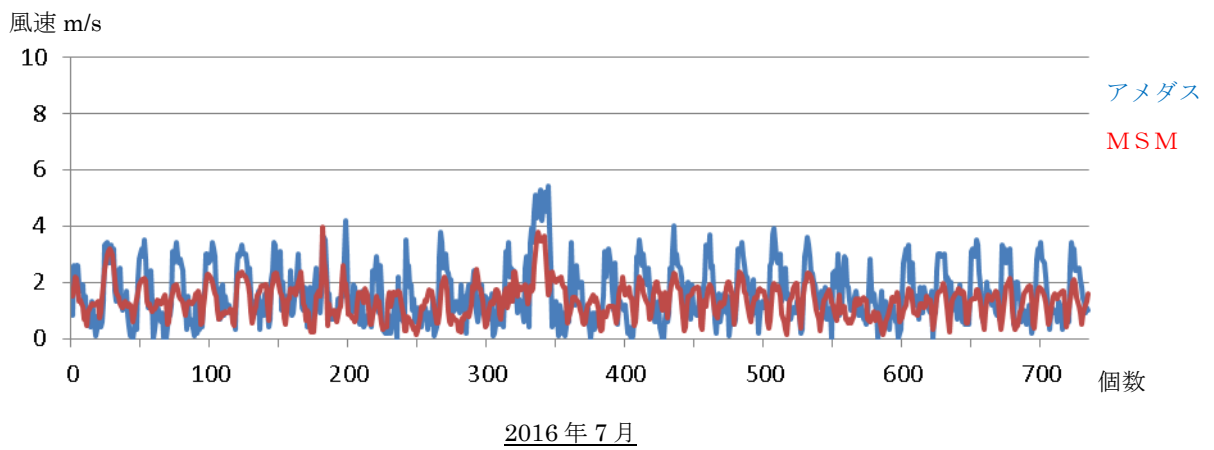
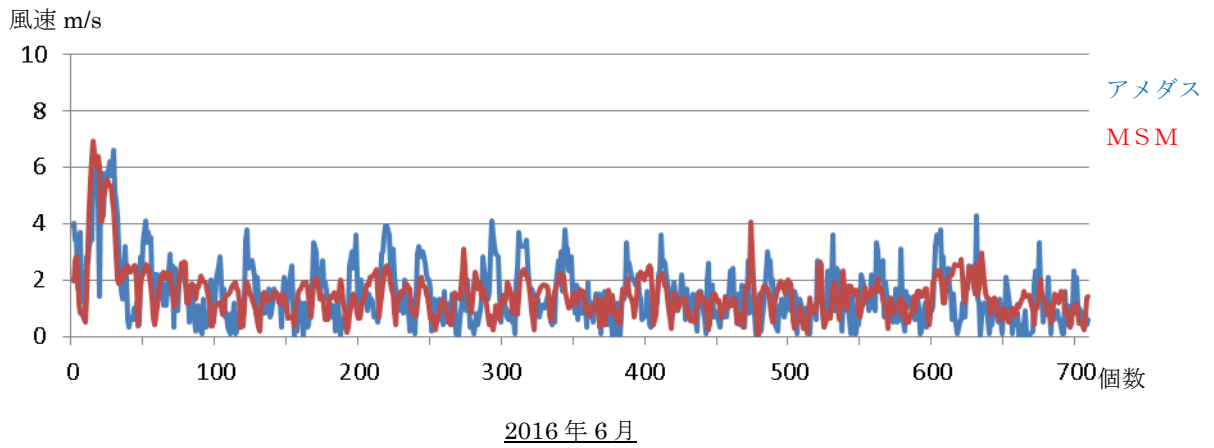


図 3.1 (続き) 風速の推定値と実測値の時系列データ

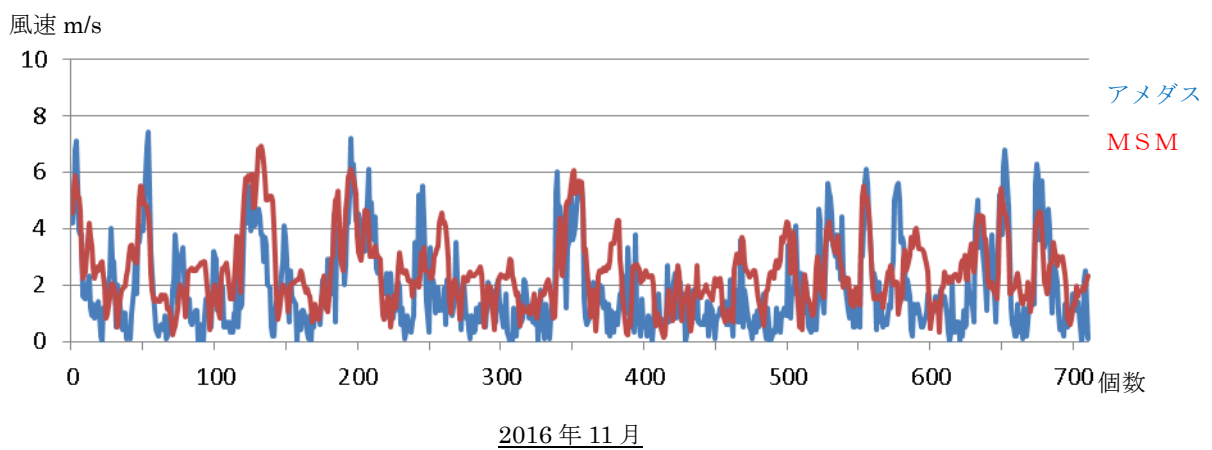
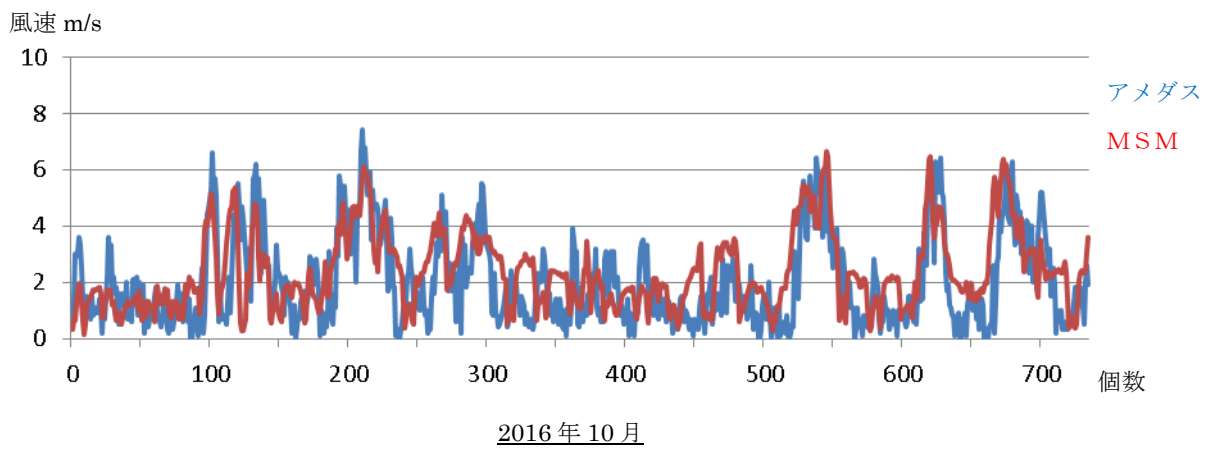
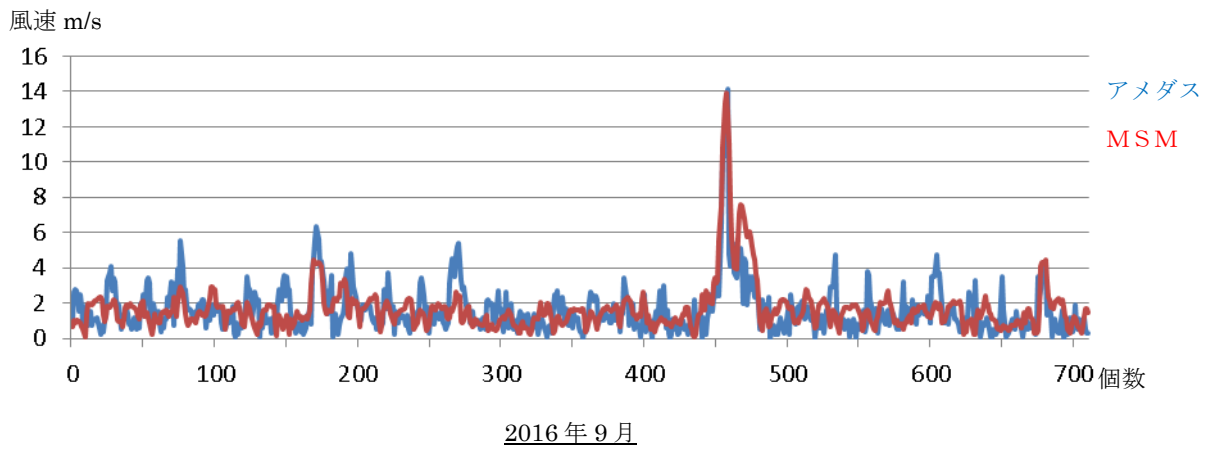


図 3.1 (続き) 風速の推定値と実測値の時系列データ

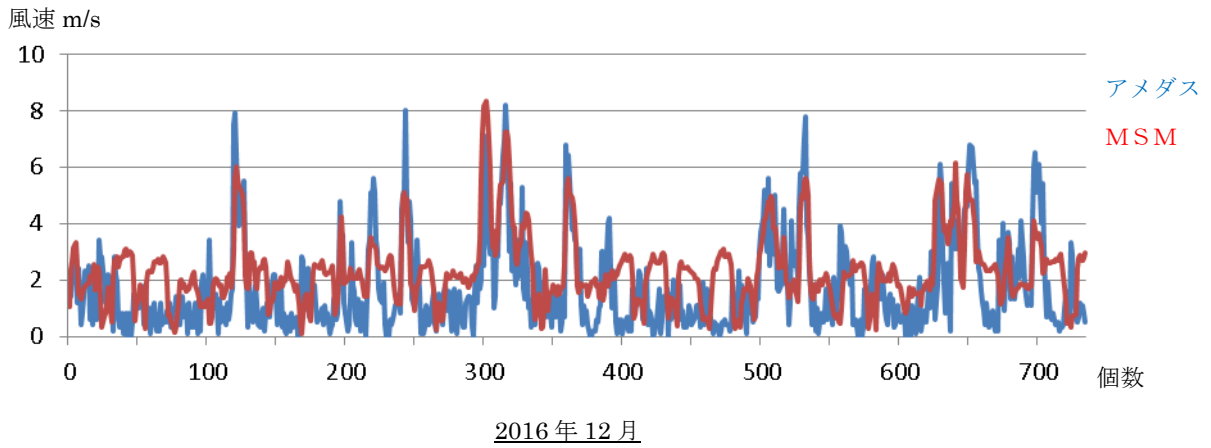
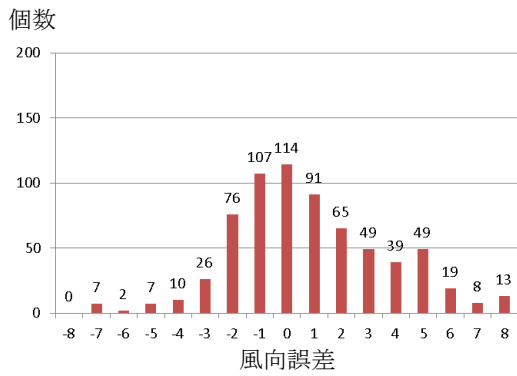
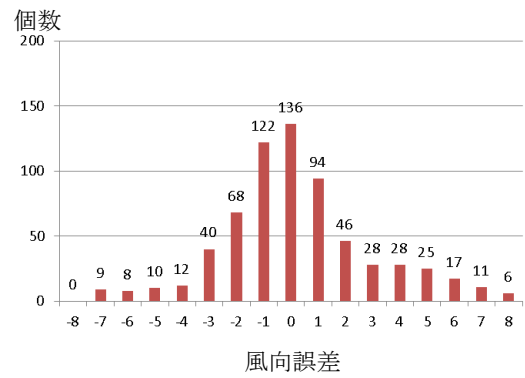


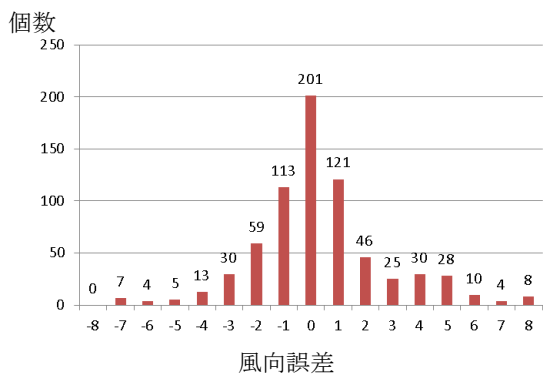
図 3.1 (続き) 風速の推定値と実測値の時系列データ



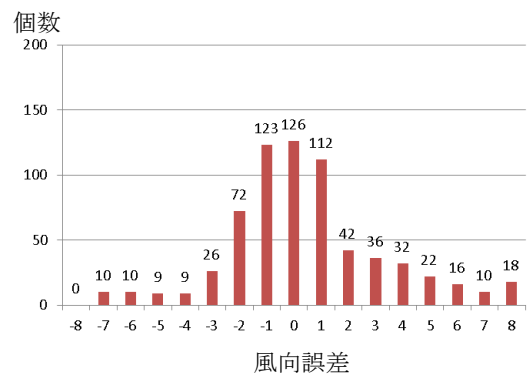
2016年1月



2016年2月

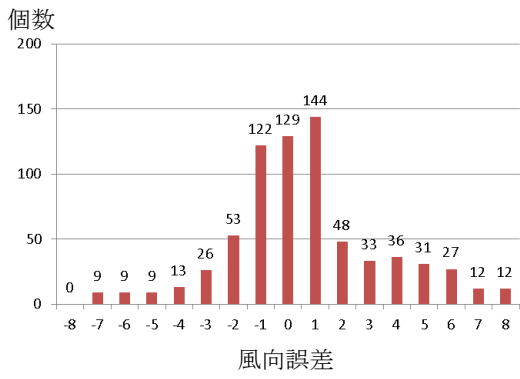


2016年3月

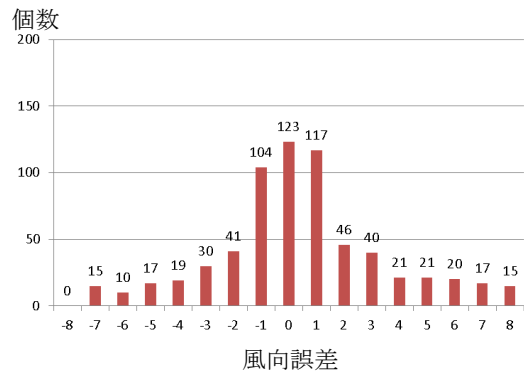


2016年4月

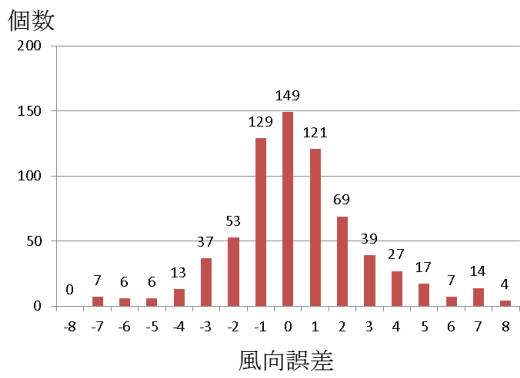
図 3.2 風向誤差の分布



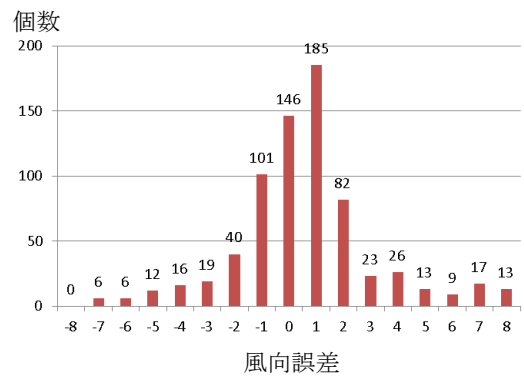
2016年5月



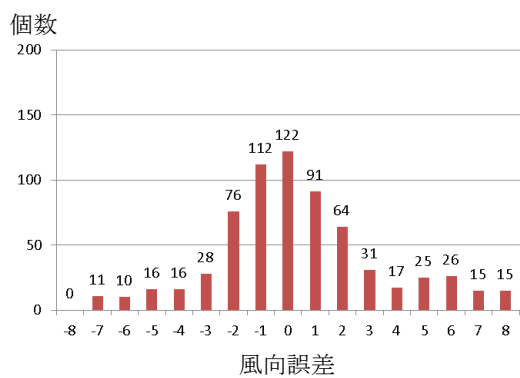
2016年6月



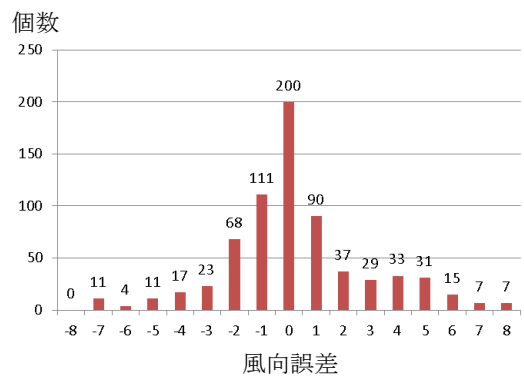
2016年7月



2016年8月

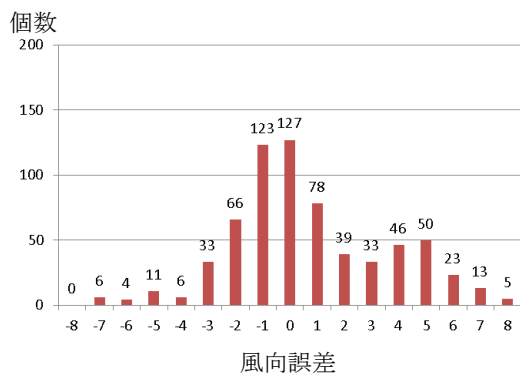


2016年9月

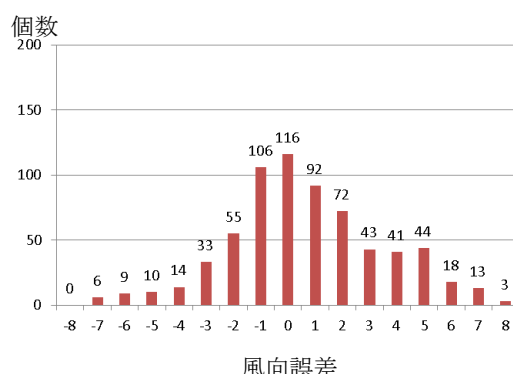


2016年10月

図 3.2 (続き) 風向誤差の分布



2016年11月



2016年12月

図 3.2 (続き) 風向誤差の分布

3.5 降水量の比較結果

2016年の1月から12月における降水量の実測値との比較結果を表3-6に示す。MSMから推定した降水量と気象観測点の実測値は、相関係数が0.4から0.9の範囲となり、降水量の標準偏差は最大で3.1mm/hとなった。降水量は付着した塩化物イオンの洗い流しに影響を及ぼすデータであるが、現状では推定結果にばらつきが見られるため、今後推定手法の改善が必要である。また、表3-7にMSMから推定した気象観測点での降水の有無を比較した結果を示す。本研究で使用する付着塩化物イオン量の推定モデルは、降雨の場合に塩化物イオンは陸上へ輸送されないと仮定しており、降雨の有無が輸送、付着量に影響を及ぼす。実測値との比較結果より各月において適中率は8割を超えており、降雨の有無を判断するには有効であると考えられる。ただし、8月の降水有り適中率が低い結果となった。降水有り適中率が低い場合、塩化物イオンの輸送と付着量が少なくなると考えられるが、8月におけるデータ数Nに対するCの割合が6%程度であるため大きな影響は出ないとし、この推定結果を付着量の算出に用いている。

表 3-6 降水量の比較結果

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
降水量 相関係数	0.9	0.7	0.8	0.7	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7
降水量 RMSE(mm/h)	0.3	1.6	0.4	1.0	1.0	2.0	1.5	2.8	3.1	1.1	0.5	0.8

表 3-7 分割表による降水有無の評価

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
適中率 (%)	98.1	98.6	96.6	94.7	92.9	87.2	93.8	92.7	82.3	92.4	95.4	95.4
降水有り適中率 (%)	92.3	85.0	67.3	75.0	75.0	73.8	43.6	15.4	50.0	52.9	70.7	76.0
降水無し適中率 (%)	98.3	99.4	99.0	97.0	95.5	90.2	97.8	98.5	90.9	96.4	96.9	96.8

3.6 気象データによる橋梁周辺の立地環境

表 3-8 に気象データによる橋梁周辺の立地環境データセットを示す。解析に使用する風速風向は、海上および陸上で
の風向が海岸線方位に対して±11.25° の範囲にあり、かつ無降水時であることを条件とした。なお、風速の補正係数は
地点毎に異なるため、GISデータによる橋梁周辺の立地環境データセットに追加する。

表 3-8 気象データによる橋梁周辺のデータセット

月	陸上風速 (m/s)	陸上風向 (°)	海上風速 (m/s)	海上風向 (°)	降水量 (mm/h)
12	6.7	168.0764	10.4	166.8288	0.5
12	7.5	165.6371	11.5	165.3560	1.1
12	7.9	169.6358	11.9	169.6634	0.0
12	7.7	182.1059	11.8	185.8348	1.7
12	8.3	180.6305	12.2	181.7505	0.8

SS

5	1.6	195.7290	2.1	202.6713	0.0
5	1.8	197.8726	2.5	216.4992	0.0
5	2.1	203.5052	2.7	219.9204	0.0
5	2.6	203.2702	3.1	216.6250	0.0
5	3.3	191.8118	4.1	200.2164	0.0

3.7 付着塩化物イオン密度の比較

付着塩化物イオン量の比較結果を表 3-9, 3-10 に示す。2 橋梁とも推定値は測定値に対して過大評価となった。原因として降水による付着塩化物イオンの洗い流しの影響を考慮できていないこと、海塩粒子の発生過程において対象海岸での有義波高、周期、波向の値を使用できなかったことが挙げられる。

表 3-9 物部川大橋における付着塩化物イオン密度の比較

検証期間	測定値(mg/m ²)	推定値(mg/m ²)
2016年12月16日 § 2017年4月3日	-150	+35
2017年4月4日 § 2017年5月11日	+54	+99

表 3-10 物部大橋における付着塩化物イオン密度の比較

検証期間	測定値(mg/m ²)	推定値(mg/m ²)
2016年12月16日 § 2017年4月3日	-75	±0

3.8 付着塩化物イオン密度の分布推定

2016年の1年間を対象に、付着塩化物イオン密度の分布図作成を行った。対象点は図3.3に示す橋梁位置および500mメッシュのポイントである。なお、MSMの格子中央に位置する対象点については格子点値を平均し、海上および陸上における風速風向値として使用している。表3-11に橋梁位置における付着塩化物イオン密度の推定値を、図3.4に付着塩化物イオン密度の分布図を示す。推定結果より、付着塩化物イオン密度は2月から5月と7月から9月にかけて上昇している。また、香宗川橋（ID:11）は海岸から最短距離で約2kmに位置にするが、年間の付着塩化物イオン密度は海岸から約600mに位置する橋梁と同程度となった。この理由として海岸形状による影響が考えられる。対象範囲には河川が二本あり、その河口部の海岸形状は海浜である。砕波により海浜で発生する海塩粒子は飛沫直径が小さいため、消波ブロックが設置された人工海岸に比べ内陸への輸送量が多くなる。また河川上は地表面粗度の影響が比較的小さく、風速が低下しないことより塩化物イオンの付着量が多くなる傾向があると推察される。

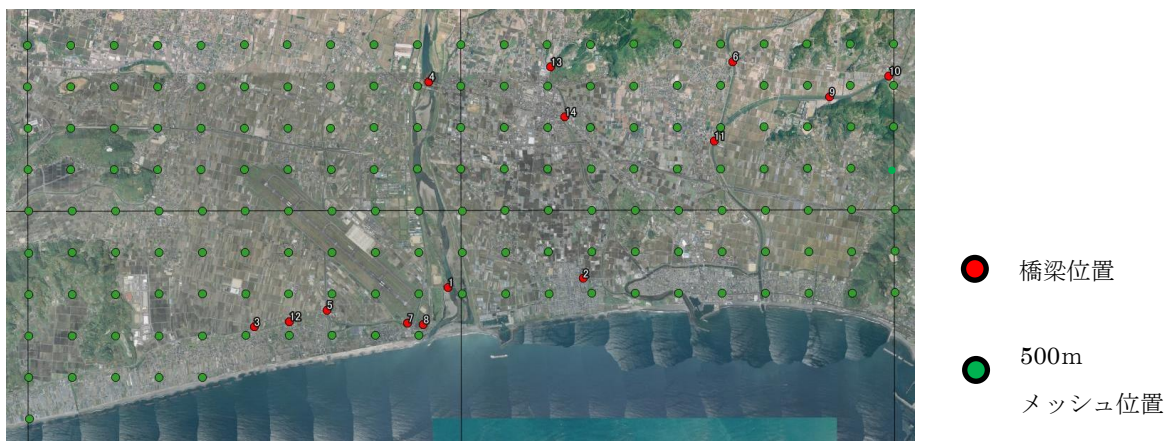
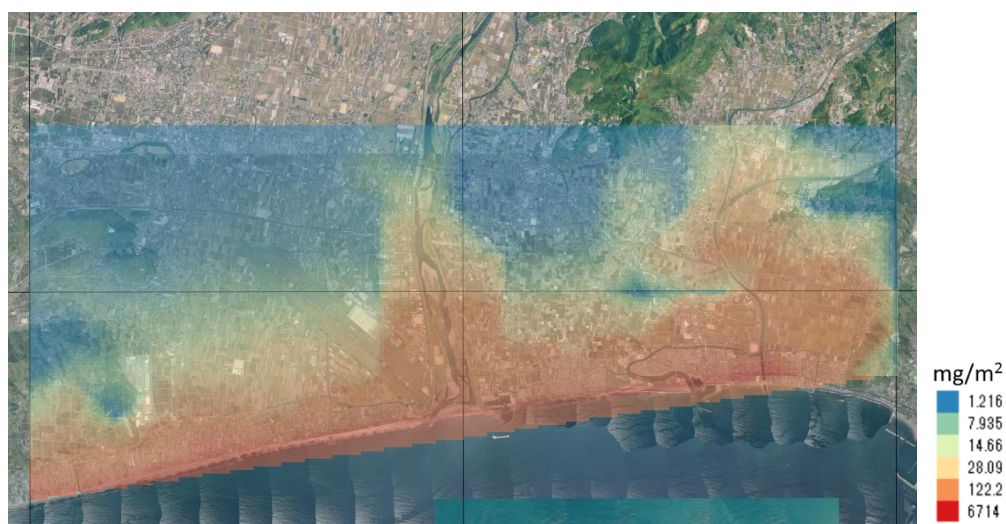


図 3.3 分布図作成用の対象点

(出典：国土地理院の全国最新写真に分布図作成用の対象点を追記して掲載)

表 3-11 橋梁位置における付着塩化物密度の推定値

ID	最短距離 (m)	付着塩化物イオン密度 (mg/m ²)												
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1年間
1	650	1.9	15.5	38.4	79.7	88.2	47.5	48.4	82.7	113.0	35.1	5.4	19.2	575.0
2	556	0.2	2.9	7.1	14.2	18.4	6.6	7.2	12.2	17.2	8.4	0.7	6.2	101.4
3	608	0.3	2.3	6.3	11.8	15.8	7.1	7.8	12.5	14.7	5.4	0.8	6.3	91.0
4	3400	0.0	0.1	0.4	1.2	0.9	0.5	0.4	1.3	2.9	0.5	0.0	0.2	8.3
5	651	0.3	3.1	7.9	14.9	20.5	7.7	8.2	13.6	19.3	6.3	0.9	6.9	109.4
6	3270	0.0	0.4	1.1	3.6	2.9	1.6	1.3	3.7	5.5	1.7	0.1	0.7	22.6
7	280	4.1	26.3	69.8	143.7	155.1	96.3	99.8	160.0	176.5	64.3	11.9	35.6	1043.4
8	224	4.8	33.1	86.7	170.9	184.6	114.9	119.1	188.3	208.9	74.3	14.4	42.1	1242.2
9	2846	0.0	0.2	0.4	1.5	1.2	0.6	0.5	1.8	2.4	0.7	0.0	0.2	9.6
10	3265	0.0	0.0	0.1	0.4	0.2	0.2	0.1	0.5	0.8	0.2	0.0	0.0	2.6
11	2224	0.1	1.7	4.1	10.9	10.8	5.1	4.6	10.4	14.9	5.4	0.5	2.7	71.3
12	594	0.2	2.2	5.7	10.9	14.9	5.7	6.1	10.0	14.1	4.7	0.6	5.0	80.2
13	3388	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4
14	2702	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.0	0.1	1.2



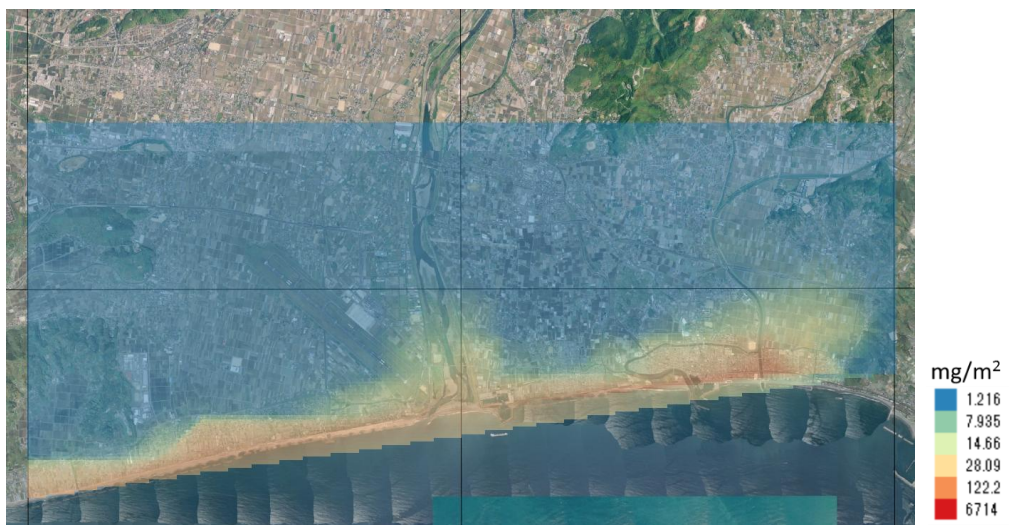
2016年1年間

図 3.4 付着塩化物イオン密度の分布図

(出典：国土地理院の全国最新写真に付着塩化物イオン密度量を追記して掲載)



2016年1月



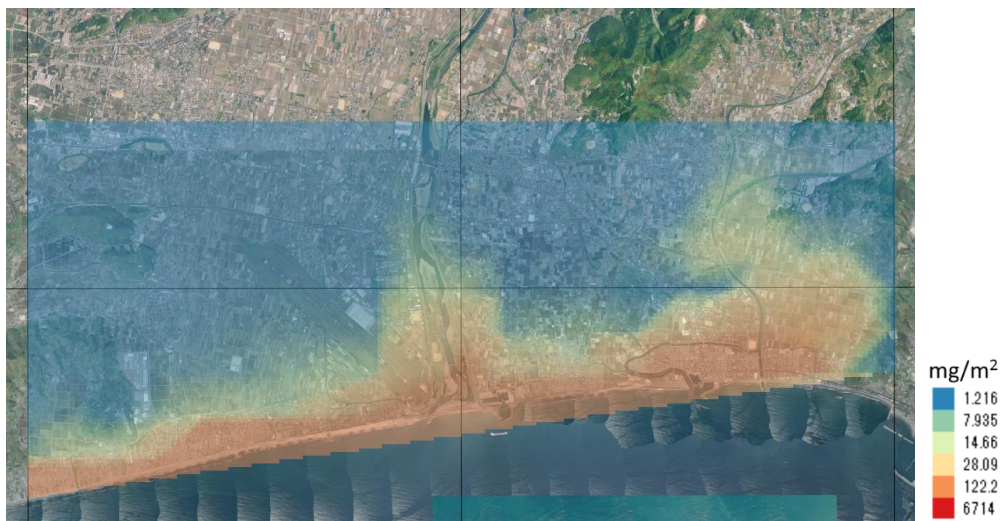
2016年2月

図 3.4 (続き) 付着塩化物イオン密度の分布図

(出典：国土地理院の全国最新写真に付着塩化物イオン密度量を追記して掲載)



2016年3月



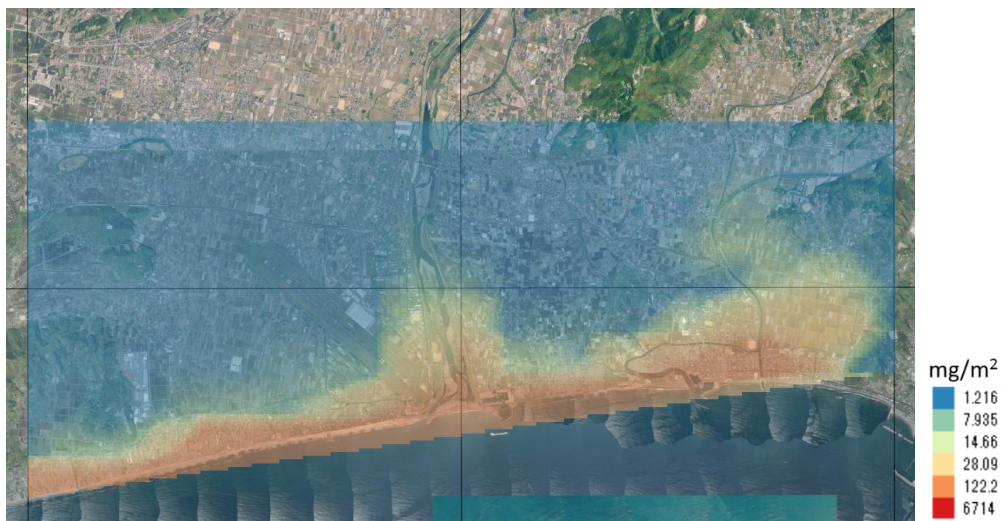
2016年4月

図 3.4 (続き) 付着塩化物イオン密度の分布図

(出典：国土地理院の全国最新写真に付着塩化物イオン密度量を追記して掲載)



2016年5月



2016年6月

図 3.4 (続き) 付着塩化物イオン密度の分布図

(出典：国土地理院の全国最新写真に付着塩化物イオン密度量を追記して掲載)



2016年7月



2016年8月

図 3.4 (続き) 付着塩化物イオン密度の分布図

(出典：国土地理院の全国最新写真に付着塩化物イオン密度量を追記して掲載)



2016年9月



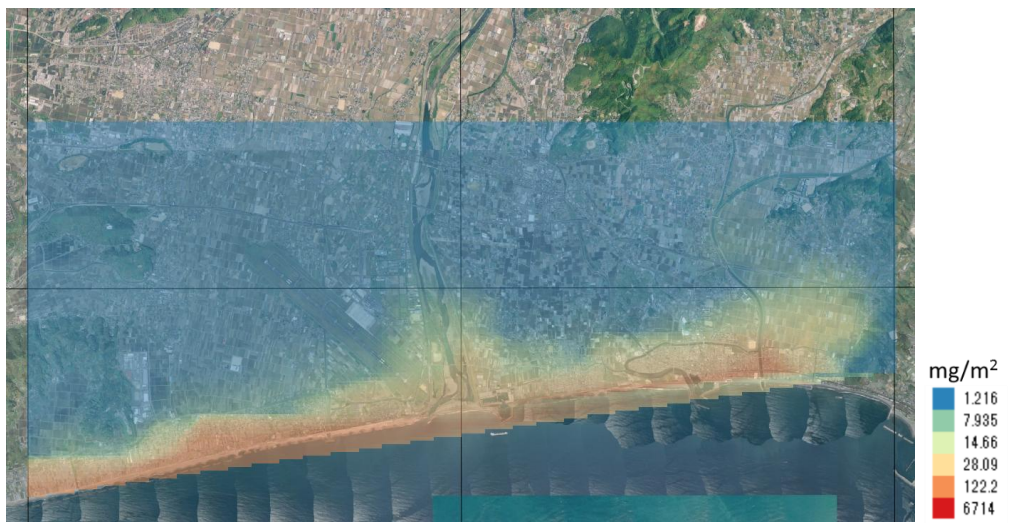
2016年10月

図 3.4 (続き) 付着塩化物イオン密度の分布図

(出典：国土地理院の全国最新写真に付着塩化物イオン密度量を追記して掲載)



2016年11月



2016年12月

図 3.4 (続き) 付着塩化物イオン密度の分布図

(出典：国土地理院の全国最新写真に付着塩化物イオン密度量を追記して掲載)

4 結論

本研究は橋梁周辺の立地環境としてGIS, 気象・波浪データを使用し, 橋脚表面に付着する塩化物イオン量の月間値を小窪らの提案した算定モデルを使用し推定した。GISデータによる立地環境は最短距離, 標高, 海底勾配, 海岸形状, 海岸線方位, 橋軸方位, 土地被覆である。気象データによる立地環境は, 任意地点における風速風向, 降水量を推定するため, メソ数値予報モデルを使用した。風速風向, 降水量の実測値との比較は2016年の1年間で行った。結果は風速の相関係数が0.5から0.7の範囲となり, 標準偏差は最大で1.5m/sとなった。風向については方位誤差が0から±2の範囲が全体の7割程度である。降水量については相関係数が0.4から0.9の範囲となり, 降水量の標準偏差は最大で3.1mm/hとなった。また, MSMから推定した気象観測点での降水の有無を比較した結果, 各月において適中率は8割を超えた。波浪データによる立地環境として有義波高, 周期, 波向の推定は気象庁の沿岸波浪数値予報モデルの使用を検討したが, 周期と波向において高い相関が得られなかった。そのため国土交通省港湾局の波浪データを使用し, 砕波波高と砕波水深を推定した。付着塩化物イオン量の比較より, 推定値は測定値に対して過大評価となった。原因として降水による付着塩化物イオンの洗い流しの影響を考慮できていないこと, 海塩粒子の発生過程において対象海岸での有義波高, 周期, 波向の値を使用できなかったことが挙げられ, 今後の課題である。

付着塩化物イオン密度の分布図より, 塩化物イオンが付着しやすい場所の推察を行った。対象範囲には河川が二本あり, その河口部の海岸形状は海浜である。砕波により海浜で発生する海塩粒子は飛沫直径が小さいため, 消波ブロックが設置された人工海岸に比べ内陸への輸送量が多くなる。また河川上は地表面粗度の影響が比較的小さく, 風速が低下しないことより塩化物イオンの付着量が多くなる傾向があると推察される。

参考文献

- 1) 確実な点検と予防保全が今後のテーマ NIKKEI CONSTRUCTION, 2007. 12. 14
- 2) 土木学会コンクリート標準示方書 維持管理編, 2001
- 3) 橋本健史, 塩害による橋梁劣化予測の為の立地環境の指標化, 高知工科大学 2015 年度学士論文
- 4) 須藤仁・服部康夫・平口博丸, 海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究, 電力中央研究所, N07028, 2008
- 5) 小窪幸恵, 海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量算定モデル, 高知工科大学 2009 年度博士論文
- 6) 合田良寛, わかり易い土木講座 17 海岸・港湾, 土木学会編, 彰国社, 1998 (二訂版)
- 7) 高田悦子・諸星一信・平石哲也・永井紀彦・竹村慎治, 国土技術政策総合研究所資料 我が国沿岸の波浪外力の分布 (海象外力検討調査), 国土交通省国土技術政策総合研究所, 2003
- 8) 中村聡志, 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所,
<http://www.pari.go.jp/unit/edosy/member/nakamura/tips.html>
- 9) Boehner, J., Antonic, O , Land-surface parameters specific to topo-climatology, *Geomorphometry- Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science, Vol. 33, pp.195-226, 2009*
- 10) 小林壽太郎 , 気象をはかる, 日本規格協会 1988
- 11) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説第 4 版, 2004
- 12) 高木方隆, 国土を測る技術の基礎
- 13) 須藤仁・服部康夫・平口博丸: 海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究 (その 2) - 評価精度に及ぼす格子解像度の影響 -, 電力中央研究所, N08017, 2009
- 14) 須藤仁・服部康夫・平口博丸・木原直人, 海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究 (その 3) - 広域を対象とした飛来塩分量分布の推定手法の提案 -, 電力中央研究所, N09007, 2010
- 15) 須藤仁・服部康夫・平口博丸・木原直人, 海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究 (その 4) - 広域を対象とした海塩分布推定手法の関東地方への適用 -, 電力中央研究所, N10006, 2010
- 16) 須藤仁・木原直人・服部康夫・平口博丸, 海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究 (その 5) - 海域の広さを考慮した海上海塩濃度の設定手法の提案 -, 電力中央研究所, N10012, 2011
- 17) 須藤仁・木原直人・服部康夫・平口博丸, 海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究 (その 6) - 気中海塩濃度に関する NuWiCC-ST の推定精度 -, 電力中央研究所, N11012, 2012
- 18) 須藤仁・服部康夫・平口博丸・木原直人, 海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究 (その 7) - 日本域を対象とした飛来海塩空間分布の評価 -, 電力中央研究所, N15007, 2016
- 19) 株式会社中研コンサルタント, http://www.chuken.co.jp/business/img/pdf_sol100.pdf

5 謝辞

高知工科大学の高木方隆教授には本研究の機会を与えてくださり、海外での学会発表、佐岡プロジェクトに関わる諸調査、リモートセンシング合宿、UAVによる地滑り調査など様々な活動機会を与えてくださると共に、有益なご指導を頂きました。ここに深くお礼を申し上げます。また、副指導教員である大内雅博教授、副査である西内裕晶講師には研究に対し様々なアドバイスを頂きました。本当にありがとうございました。助教の赤塚慎先生には研究についての相談や英語の添削などをお忙しい中指導して頂きました。大変感謝しております。技術指導員の宮地日出夫先生には実験に関わるアドバイスを多く頂きました。ありがとうございました。研究室の皆さんにはとてもお世話になりました。特に修士1年の藤原匠君には生研フォーラムや学会発表に関わる活動を通し、研究に対する情熱に感嘆しました。学部4年の宮本森孫君には試料採取や測定試験など数多くのサポートをしていただきました。研究室は毎日笑いの絶えない場所で、楽しく過ごせたことに感謝いたします。最後に、高知工科大学大学院への進学を後押ししてくれた同僚、支えてくれた家族に深謝の意を表します。

6 付録

6.1 ソルメイトによる測定方法

ソルメイトによる塩化物イオン量の測定方法を図 6.1 に示す。

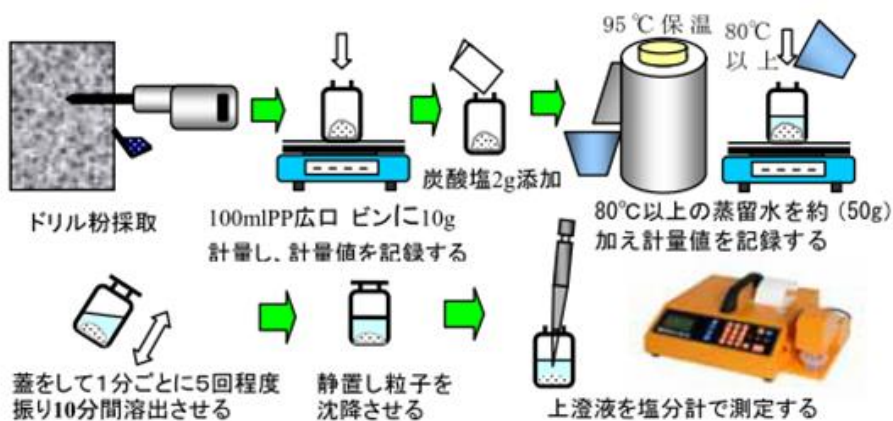


図 6.1 塩化物イオンの測定方法⁽¹⁹⁾

6.2 使用したプログラム

本研究で使用したプログラムを表 6-1 に示す。本研究では用途に応じて Shell Script と VBA の 2 種類のプログラムを使用した。

表 6-1 使用プログラム

プログラム名	用途
nc1_wind.bat	netcdfファイルから必要範囲の切り出しおよび投影変換を行ない、抽出した東西・南北風から風速風向の計算を行うプログラム 出力はジオティフ形式
nc2_wind.bat	指定した緯度経度の値を抽出するプログラム
nc1_rain.bat	netcdfファイルから必要範囲の切り出しおよび投影変換を行ない、降水量の抽出を行うプログラム 出力はジオティフ形式
nc2_rain.bat	指定した緯度経度の値を抽出するプログラム
amount.xlsx	付着塩分量を算出するプログラム GIS、気象、波浪のデータセットが必要

6.3 MSMデータのダウンロード

本研究で使用した風速、降水量の推定データは、京都大学生存圏研究所が公開している生存圏データベースから NetCDF 形式のデータをダウンロードし、使用した。このデータはMSMのオリジナルデータを初期値を中心に再構成したものであり、1ファイルに1日分のデータが1時間毎に推定され、まとめられている。1ファイルのデータ量は122MBである。1年間分のデータダウンロードには、フリーソフトである Free Download Manager Portable を使用した。以下に使用方法を示す。

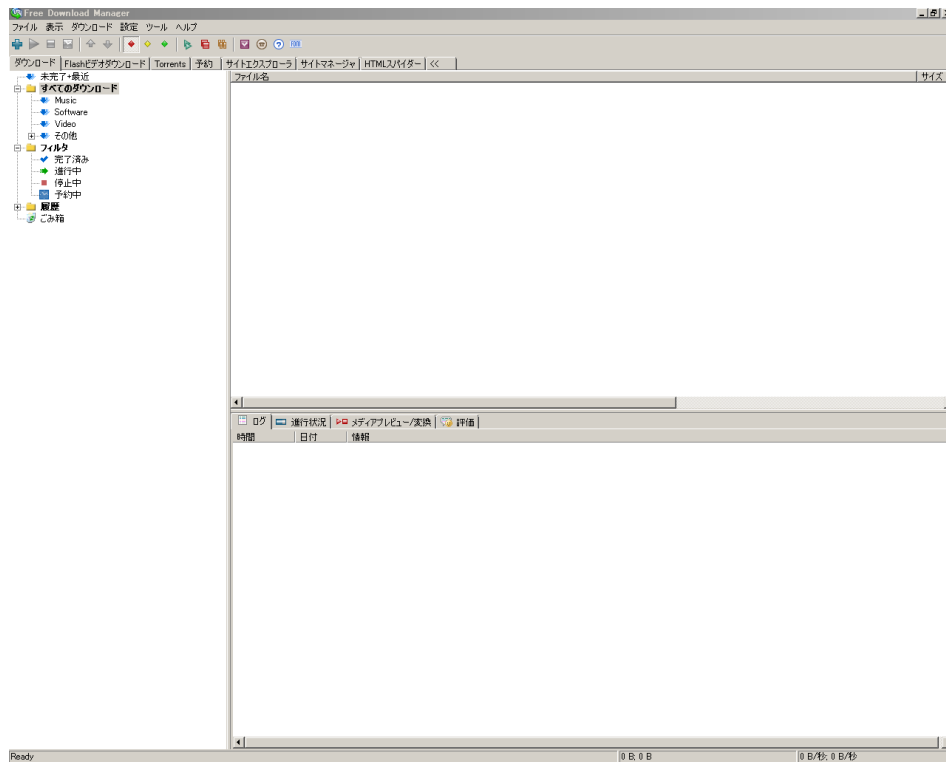
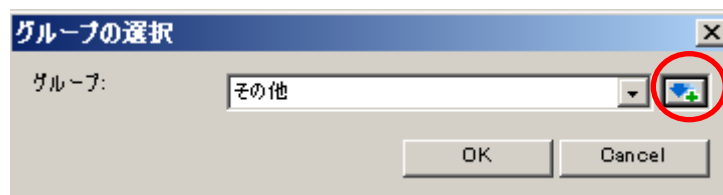


図 6.2 Free Download Manager Portable

図 6.2 は Free Download Manager Portable の起動画面である。NetCDF 形式のデータダウンロードは、生存圏データベースに公開されている対象日の URL をエクセルで作成し、Free Download Manager Portable にインポートすることで行った。図 6.3 に URL の一覧例を、図 6.4 にインポートの手順を示す。

	A	B	C	D	E	F	G
1		year	month				
2		2016	0	3			
3							
4							
5							
6	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	01	.nc	
7	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	02	.nc	
8	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	03	.nc	
9	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	04	.nc	
10	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	05	.nc	
11	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	06	.nc	
12	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	07	.nc	
13	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	08	.nc	
14	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	09	.nc	
15	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	10	.nc	
16	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	11	.nc	
17	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	12	.nc	
18	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	13	.nc	
19	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	14	.nc	
20	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	15	.nc	
21	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	16	.nc	
22	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	17	.nc	
23	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	18	.nc	
24	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	19	.nc	
25	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	20	.nc	
26	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	21	.nc	
27	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	22	.nc	
28	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	23	.nc	
29	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	24	.nc	
30	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	25	.nc	
31	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	26	.nc	
32	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	27	.nc	
33	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	28	.nc	
34	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	29	.nc	
35	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	30	.nc	
36	http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/netcdf/MSM-S,	2016 /	0	3	31	.nc	
37							

図 6.3 URL 作成



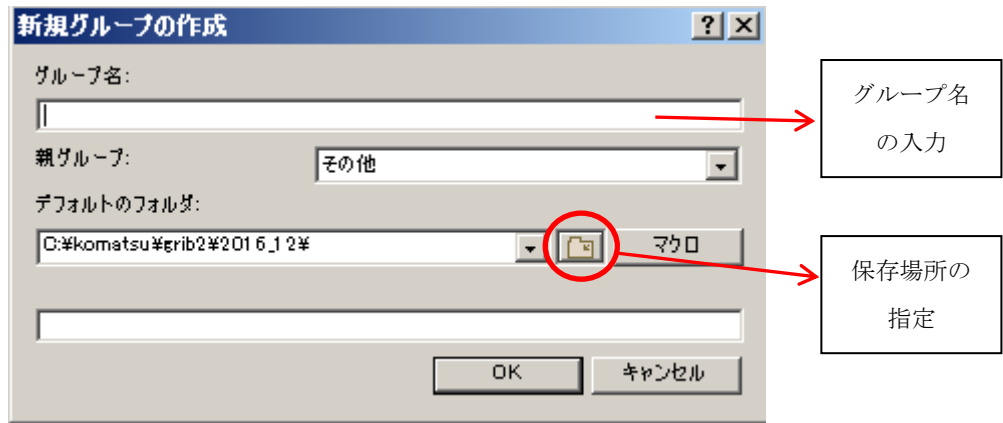


図 6.4 URL リストのインポート手順