HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	社会インフラの健全性に対する海塩粒子の影響評価 ： 送電設備における塩雪害・大気腐食
Author(s)	大原, 信
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13799号
Issue Date	2019-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13799
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75889
Type	doctoral thesis
File Information	Shin_Ohara.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

博士論文

社会インフラの健全性に対する
海塩粒子の影響評価
―送電設備における塩雪害・大気腐食―

2019 年 9 月

北海道大学大学院
工学院　環境創生工学専攻

大原　信

目　　次

第 1 章　序論 …… 1
1.1　背景 …… 1
1.1.1　社会インフラの健全性を取り巻く状況 …… 1
1.1.2　社会インフラの健全性における海塩粒子の重要性 …… 8
1.1.3　送電設備の健全性に対する海塩粒子の影響に関する検討の位置づけ …… 9
1.1.4　送電用がいしの塩雪害に関する現象解明・対策の状況と課題 …… 9
1.1.5　送電用鉄塔の大気腐食に関する維持管理の状況と課題 …… 15
1.2　本研究の目的 …… 17
1.3　本論文の構成 …… 18
参考文献 …… 20

第 2 章　塩雪害を引き起こすような暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的動態の解明 …… 23
2.1　はじめに …… 23
2.2　新潟下越雪害発生時における気象状況 …… 28
2.3　現地観測による暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的動態の解明 … 36
2.3.1　大気中粒子状物質・降雪に関わる現地観測システムの構築 …… 37
2.3.2　冬季の新潟県下越地域での風況特性 …… 42
2.3.3　降水導電率データの特徴 …… 43
2.3.4　大気中粒子・降水の海塩／非海塩成分における風向・風速依存性の相違 … 54
2.3.5　高い降雪導電率時の風向・風速および化学組成 …… 69
2.3.6　内陸への海塩粒子流入における海塩湿性沈着の重要性 …… 84
2.4　まとめ …… 103
参考文献 …… 104

第 3 章　塩雪害の発生可能性を表す指標の提案 …… 108
3.1　はじめに …… 108
3.2　塩雪害の発生可能性を表す指標の基本的概念の整理 …… 109
3.3　海風着雪ポテンシャルの提案と適用性の確認 …… 111
3.4　まとめ …… 121
参考文献 …… 121

第 4 章　日本国内での鉄鋼や亜鉛の大気腐食性評価のためのドーズレスポンス関数の提案 …… 123
4.1　はじめに …… 123
4.2　DR 関数の評価・改良用国内大気曝露試験データ …… 125
4.3　日本国内評価向け DR 関数の選定 …… 128
4.4　選定した DR 関数の国内大気曝露試験データへの適用性評価 …… 132
4.5　国内大気曝露試験データにもとづく DR 関数の改良 …… 139
4.5.1　国内データにもとづき決定した係数の ISO9223DR 関数への適用 …… 139
4.5.2　改良 DR 関数と ISO9223DR 関数の推定精度の比較 …… 140
4.6　まとめ …… 146
参考文献 …… 146

第 5 章　結論 …… 149
参考文献 …… 152

謝辞 …… 153

第 1 章　序論

1.1　背景

1.1.1　社会インフラの健全性を取り巻く状況

近年，日本国内では高度経済成長期に集中的に整備された橋梁などの社会インフラ構造物の高経年化が社会的に深刻な問題となっている[1-2]。2012 年には中央自動車道笹子トンネルの天井板落下事故が発生し[3]，国内の社会インフラ維持管理のあり方に大きな変化が迫られた。海外でも，2018 年にイタリアにおいてモランディ橋が崩落する[4]など，高経年設備の設備改修の必要性が急激に増加していく状況下にある[5]。

一方で，2018 年には，大規模な自然災害が頻発し（平成 30 年 7 月豪雨，台風 20 号，21 号，24 号，北海道胆振東部地震），社会インフラも多大な損傷を被ったことから，自然災害に対する脆弱性という観点からも，社会インフラの健全性を維持する必要性が高まっている[6]。

本論文では，二つの観点（高経年化，自然災害に対する脆弱性）から社会インフラの健全性を検討する。以下では，それぞれの観点について，具体的な事例を通じて社会インフラ損傷の実態，維持管理の動向・実践，課題を概観する。

(1) 社会インフラの高経年化対応の状況

a. インフラ損傷の実態

まず，社会インフラの高経年化に関するインフラ損傷の実態，維持管理の動向・実践，課題について，2012 年の中央自動車道笹子トンネルの天井板落下事故[3]を事例として述べる。

2012 年 12 月 2 日，中央自動車道笹子トンネル（1977 年供用開始，全長約 4.4 km）で，トンネル換気のために設置されている天井板および隔壁板等が約 140 m にわたり落下した。同区間を走行中の車両 3 台が天井板の下敷きになるなど巻き込まれ，死者 9 人，負傷者 2 人の多大な人的被害が発生した。図 1.1 に天井板の落下状況[3]を示す。天井板落下のメカニズムとしては，天井板を支える接着系ボルトにおいて，経年の荷重作用や材料劣化を原因とする引き抜き強度の低下・喪失が進行し，強度不足に陥ったためと推定された。施工や劣化において個々の要因はあるとしても，笹子トンネルを管理する中日本高速道路株式会社が，接着系ボルトの打音点検を 12 年未実施であったことから，不十分な点検内容や維持管理体制が重大な事故発生要因として指摘された。

b. 政策の動向

このトンネル事故以前には，2003 年頃から，国土交通省が，高度経済成長期に大量に建造された社会インフラが高経年化していることや，維持管理費用が増加していることを受け，これまでの対症療法的な修繕から予防的修繕への転換を図るようになっており[7]，2007

年には同省の主導で，インフラの長寿命化修繕計画策定がスタートしていた（2013 年 11 月にインフラ長寿命化基本計画として策定[8]）。2012 年のトンネル事故を受けて，道路設備の安全点検実施に関する法律が整備された（2013 年 6 月に点検基準をを法制化する道路法改正，2014 年 7 月に定期点検に関する省令・告示の施行）。これにより，2014 年 7 月から，道路管理者には，全国の橋梁やトンネルで 5 年に 1 回の近接目視による点検が義務付けられた。

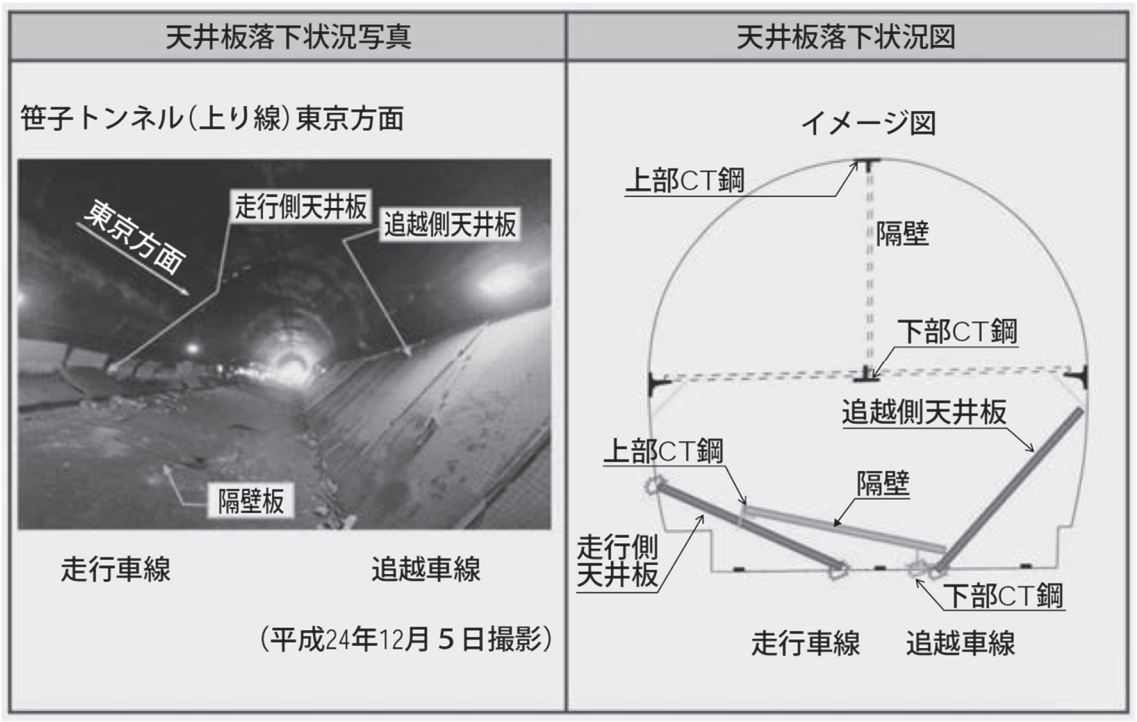


図 1.1　2012 年の中央自動車道笹子トンネルにおける天井板の落下状況[3]

c. 維持管理システムの動向

2013 年 11 月に策定されたインフラ長寿命化基本計画[8]においては，社会インフラ設備のライフサイクル期間である数十年から百年程度での運用を想定し，安全性や機能性を所定の水準以上に保持することを目指している[7]。これらを達成するために重要な考え方として位置づけられたのが，①予防保全を核とする維持管理の導入と②メンテナンスサイクルの構築である。

まず，予防保全を核とする維持管理の導入について述べる。表 1.1 に事後保全型維持管理と予防保全型維持管理の違いを示す[9]。従来の事後保全型（対症療法型）維持管理では，劣化が進行した設備のみ補修を行うため，1 回の補修が大規模になり，ライフサイクルコストは増大する[9]。また，その補修時期・予算は劣化進行状況に左右されるので，たとえば，一時期に集中的に建設された設備などでは，維持管理計画を策定するうえでの大きな支障となる。一方で，予防保全型維持管理では，損傷が軽微な早期段階でのこまめで計画的な補

修を行うため，1 回の補修は小規模になり，ライフサイクルコストは抑制される。さらに，補修時期・予算は平準化される。

表 1.1　事後保全型維持管理と予防保全型維持管理の違い（文献[9]に基づき作成）

項目	事後保全型維持管理	予防保全型維持管理
基本方針	劣化が進行した設備のみ補修（対症療法型）	損傷が軽微な早期段階でのこまめで計画的な補修
1 回の補修規模	大規模	小規模
ライフサイクルコスト	増大	抑制
補修時期・予算	劣化進行状況に左右される	平準化

次に，メンテナンスサイクルの構築について述べる。図 1.2 はメンテナンスサイクルの基本的な流れを示す[9]。メンテナンスサイクルにおいては，設備の点検・診断を行い，その結果に基づき設備の状態把握がなされる。そして，把握された各設備の状態のほかに，果たしている機能なども考慮し，修繕・更新の対象設備の優先順位付けがなされる。これらにもとづき，修繕・更新に関する費用・時期が計画され，設備の修繕・更新がなされるという流れである[8]。ここで注目したい点は，設備の状態を把握するためには，定期的な点検・診断が重要であり，予測・推定にもとづく劣化評価による設備状態の把握はメンテナンスサイクルの中には組み込まれていない点である。インフラ長寿命化基本計画[8]においては，「インフラは，利用状況，設置された自然環境等に応じ，劣化や損傷の進行は施設毎に異なり，その状態は時々刻々と変化する。現状では，これらの変化を正確に捉え，インフラの寿命を精緻に評価することは技術的に困難であるという共通認識に立ち，インフラを構成する各施設の特性を考慮した上で，定期的な点検・診断により施設の状態を正確に把握することが重要である。」と述べられている。

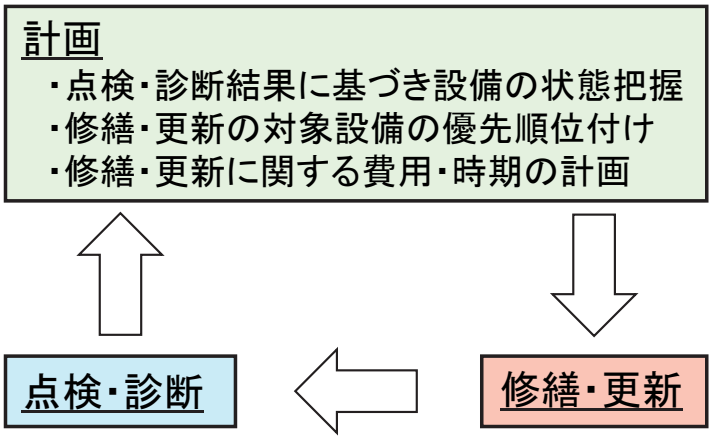


図 1.2　メンテナンスサイクルの基本的な流れ（文献[9]に基づき作成）

d. 維持管理システムの実践と課題

2014 年 7 月から道路管理者に義務付けられた全国の橋梁やトンネルでの 5 年に 1 回の近接目視による点検では，2014～2017 年度にかけておよそ 8 割の橋梁，トンネル等が点検され，各設備は状態に応じて 4 段階の区分で判定がなされた（I : 健全，II : 予防保全段階，III : 早期措置段階，IV : 緊急措置段階）。このうち判定区分 III，IV の割合は，橋梁で約 10%，トンネルで約 43%となった[10]。このような点検が全国規模で推進されることで，社会インフラ設備の劣化状態の把握が進んだ一方で，定期点検の負担が管理者である自治体に重くのしかかるという課題も見えてきた。たとえば，茨城県においては，財源確保が難しい市町村からは，「点検費が膨大で，修繕費を捻出する余裕がない」といった声が上がっている[11]。また，5 年に 1 度の点検は 2018 年度に 1 巡目が終わり，2019 年度からすぐ 2 巡目に入ることで，前回点検した橋梁等でも同じ点検が再度求められることから，5 年に 1 度の点検費用への予算措置の厳しさや，健全な橋梁等での点検間隔の延長などの意見も上がっている[11]。保田ら[7]は，近接目視の点検義務付けについて，「損傷の有無や進行の程度を確認する唯一の方法が点検であることを考えると妥当な施策であろうと思われるが，これで今以上の点検費用が今後発生されることが予想される」と述べており，設備の劣化状態を把握するための技術開発の必要性を指摘している。このような課題に対して，内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム」のインフラ維持管理・更新・マネジメント技術の一環として，効率的な点検技術（ドローン，センサー，ロボット，AI）の開発も進められている[12]が，コスト削減への効果は未知数である[11]。

図 1.2 に示したようなメンテナンスサイクル全体にあてられる費用の総額を一定とすると，定期的な点検・診断にかかる費用が増大すると，修繕・更新にあてる費用が圧迫されてしまう。このような課題に対する解決策としては，予測・推定にもとづく劣化状態の把握により点検・診断を補完し，修繕・更新の対象設備の優先順位付けにおける効率化を図ることが有効であると考えられる。これについては，1.1.5 において具体的に述べる。

(2) 社会インフラの自然災害に対する脆弱性への対応の状況

a. インフラ損傷の実態

次に，社会インフラの自然災害に対する脆弱性に関するインフラ損傷の実態，維持管理の動向・実践，課題について，2018 年台風 24 号上陸にともなう関東地方での塩害による鉄道の輸送障害[13-16]を事例として述べる。

2018 年 9 月 28 日から 10 月 1 日かけて，台風 24 号は非常に強い勢力で沖縄地方へ接近したのちに，和歌山県付近に上陸し，東日本から北日本を縦断した[17]。台風 24 号の接近・通過にともない，広い範囲で暴風，大雨，高波，高潮となった。風については，南西諸島および西日本・東日本の太平洋側を中心に猛烈な風を観測した。関東地方でも 9 月 30 日から 10 月 1 日にかけて千葉県などで最大風速が 20 m/s 超となり，このときの風向は関東地方に対して海からの風向きとなる南寄りであった。

この台風によって，全国で死者 4 名の人的被害が生じたほか，広い範囲で 10000 棟を超える住宅被害となった。また，海水の塩分を含んだ暴風により塩害が発生し，各地で農地の被害が生じたほか，関東地方では塩害による停電で鉄道の大規模な輸送障害が発生した。

台風上陸から 2 日経った 2018 年 10 月 3 日午後 9 時頃，千葉県船橋市の京成線船橋競馬場駅で送電線から出火して停電が発生し，京成高砂駅 - 八千代台駅間と京成津田沼駅 - 千葉中央駅間で運転が見合わされた。翌 10 月 4 日早朝には停電は復旧したが，運行ダイヤが乱れ，計約 7 万 2 千人に影響した[13]。京成電鉄株式会社では停電の原因を塩害と判断し，設備点検と塩分除去のための電線清掃を進めたが，その翌日 10 月 5 日には，午前 7 時頃，千葉市中央区の西登戸駅で停電が発生し，京成津田沼 - ちはら台駅間の運行がストップした。その後，京成線内の送電設備 3 ヶ所（みどり台駅付近の踏切，東中山駅構内，国府台駅 - 江戸川駅間の江戸川橋梁）から火花が出ているのが確認され，運転の見合わせは全線に拡大した[14-15]。図 1.3 には，2018 年 10 月 3〜5 日にかけて京成電鉄で発生した台風 24 号にともなう塩害の発生位置を示す。運転の見合わせは 10 時間以上に及び 45 万 2000 人に影響を与えることになった[16]。大規模な輸送障害のメカニズムとしては，高圧配電線と地上設備等をつなぐ端末部品であるケーブルヘッドにおいて，台風にともなう塩分が付着し，絶縁性能が低下してショートし，送電が停止したためと推定された[18]。また，台風 24 号は風が猛烈に強かった一方，関東地方ではそれほど大雨とはならなかったため，通常の台風とは異なり，大雨が付着塩分を洗い流さなかったことも原因の一つとして考えられた。さらに，被害発生の地域に関しては，京成電鉄株式会社にとって想定していなかったエリアがあった。京成電鉄株式会社では，2012 年 6 月の台風 4 号にともなう塩害被害を契機に，耐塩型のケーブルヘッドへの交換に着手していたが，交換作業は海岸に近い線区（京成津田沼駅 - 千葉中央駅間）から開始しており，対象となる路線すべてでは完了していなかった[16]。しかし，2018 年台風 24 号では，海岸から 5 km 程度離れた国府台駅 - 江戸川駅間でも被害が生じ，このエリアでの塩害被害は京成電鉄株式会社にとって想定していなかったことであった。これについては，後述する。

b. 政策の動向

社会インフラの自然災害に対する脆弱性に関しては，2014 年に政府が国土強靭化基本計画[6]を策定し，「大規模自然災害等に強い国土及び地域を作るとともに，自らの生命及び生活を守ることができるような地域住民の力を向上させる」ため，ハード・ソフト両面での施策が推進されてきた。ここで，リスクとして大規模自然災害を想定したことについては，「国民生活・国民経済に影響を及ぼすリスクとしては，自然災害のほかに，原子力災害などの大規模事故やテロ等も含めたあらゆる事象が想定され得るが，南海トラフ地震，首都直下地震等が遠くない将来に発生する可能性が高まっていることや，気候変動の影響等により水災害，土砂災害が多発していること，一たび，大規模な自然災害が発生すれば，国土の広範囲に甚大な被害をもたらすものとなる」と説明されている[6]。その後に，先述のと

おり，2018 年には，大規模な自然災害が頻発し（平成 30 年 7 月豪雨，台風 20 号，21 号，24 号，北海道胆振東部地震），社会インフラも多大な損傷を被ったことから，2018 年 9 月～12 月に，重要インフラの緊急点検に関する関係閣僚会議[19]が開催され，国土強靭化基本計画[6]が見直された。その結果，2018 年～2020 年の 3 ヵ年に，防災のための重要インフラ等の機能維持や国民経済・生活を支える重要インフラ等の機能維持に関する緊急に実施すべきハード・ソフト対策が集中実施されることとなった。この 3 ヵ年緊急対策後も，国土強靭化基本計画は 5 カ年を目途に見直され，国土強靭化を推進することとされている。

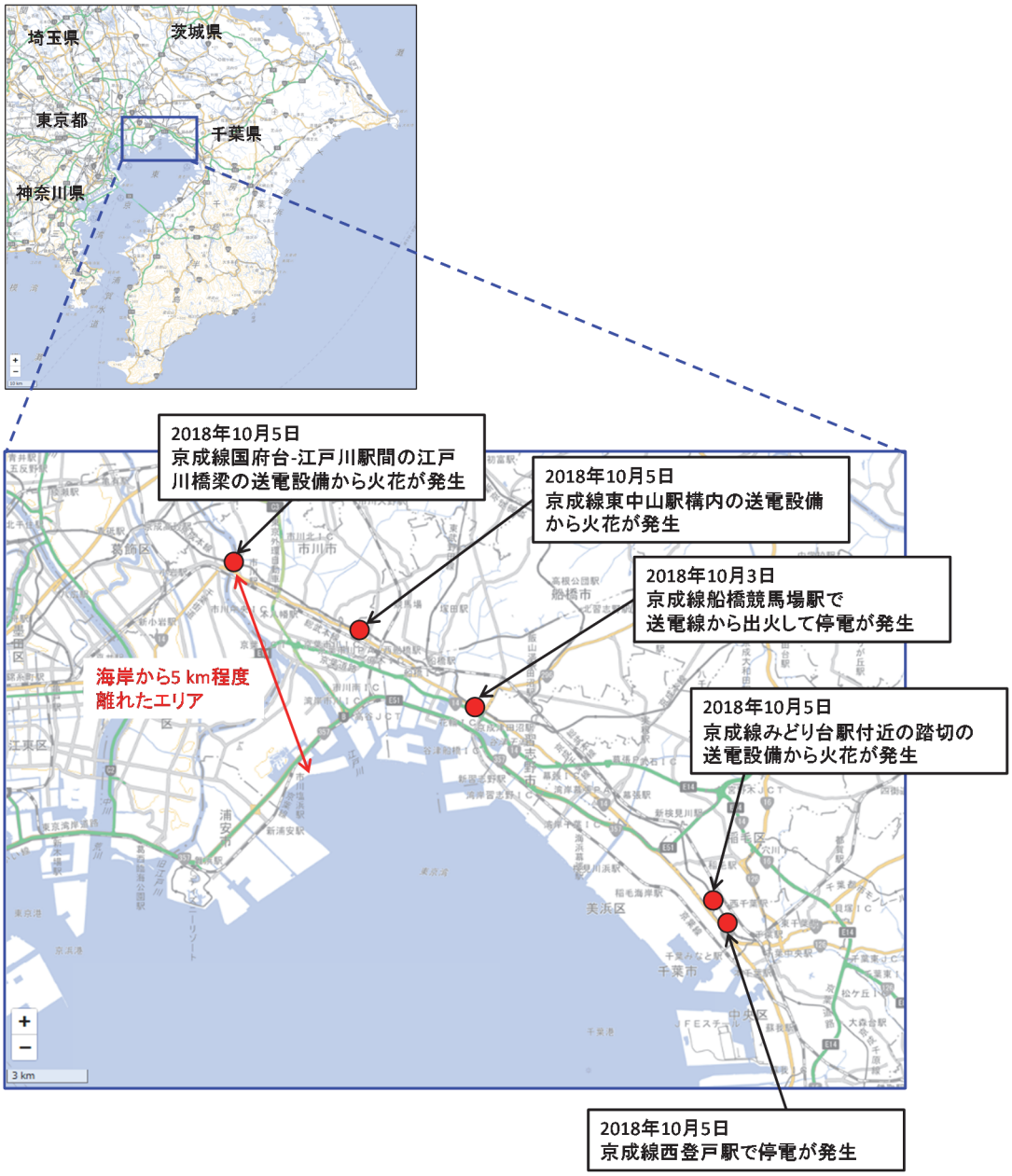


図 1.3　2018 年 10 月 3～5 日にかけて京成電鉄で発生した台風 24 号にともなう塩害の発生位置（文献[13-16]に基づき作成）

c. 維持管理システムの動向

自然災害に対する社会インフラの脆弱性の概念は，多様な定義が存在するが，おおむね，物理的側面に着目した脆弱性の概念と社会的側面に着目した脆弱性の概念の二つに分類することができる[20]。物理的側面に着目したアプローチでは，自然災害の主たる要因を自然現象に起因するハザードであるとみなし，ハザード，曝露，感受性の制御によって自然災害リスクを管理することを目的とする。一方で，社会的側面に着目したアプローチでは，ある社会的集団を脆弱な状況に陥れる政治・経済・社会構造にもとづくプロセスを明らかにし，この構造を変革することによって脆弱性を解消することを目的とする。本論文では，後段の議論につなげるために，脆弱性の概念を物理的側面に着目して定義する。図 1.4 は自然災害リスクと脆弱性の関係を示す概念図を示す。Birkmann[21]や保田ら[7]の研究によると，自然災害リスクはハザード（危害要因），脆弱性および曝露度合いの 3 つの積により表現され，それを災害リスマネジメントによって減少することを強靭化（レジリエンス）としている。また，塩崎ら[20]によると，物理的側面に着目した脆弱性の定義においては，インフラの要素がハザードによる物的な被害を受けやすい状態にあることを脆弱であると定義することから，先述の 2018 年台風 24 号上陸にともなう京成鉄道株式会社での塩害による輸送障害後における耐塩型ケーブルヘッドへの交換は，脆弱性の低下によって自然災害リスクを減少させたと解釈できる。このように，本論文では，社会インフラの設備・設計の耐力を高めることで，脆弱性が低下し，自然災害リスクが減少することを，自然災害に対して社会インフラの健全性が維持されることとして捉える。

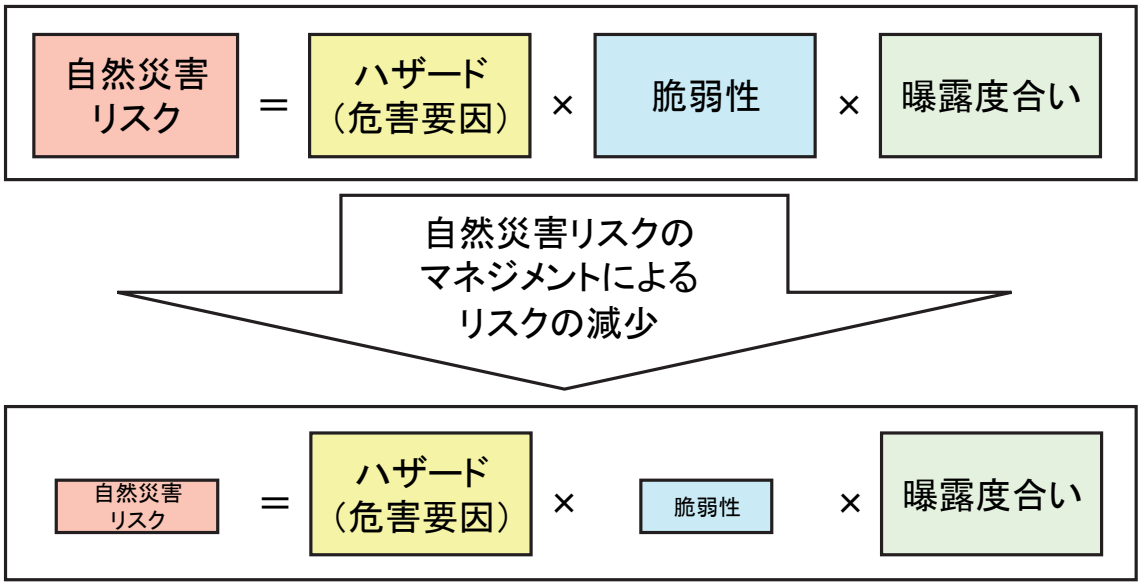


図 1.4　自然災害リスクと脆弱性の関係を示す概念図（文献[7,20-21]に基づき作成）

d. 維持管理システムの実践と課題

京成鉄道株式会社では，2018 年台風 24 号上陸にともなう塩害による大規模輸送障害をうけて，京成本線や千葉線などすべての路線，およそ 1500 ヶ所で耐塩型ケーブルヘッドに切り替える計画である[18]。また，架空高圧配電線を地上に移設し，トラフと呼ばれるパイプ内に収納することも検討するなど，塩害や強風への備えを徹底し，緊急の事態を押さえ込みたい考えである[18]。しかしながら，今回のケースでは，海岸から 5 km 程度離れた国府台駅 - 江戸川駅間でも被害が出るなどの想定していなかった事態が発生した。このことから，自然災害への脆弱性を低下させるには，設備・設計の耐力を高めるだけではなく，自然災害発生のメカニズム・発生可能性評価にもとづく合理的な対策を進めることも課題と考えられる。

1.1.2 社会インフラの健全性における海塩粒子の重要性

本項では，高経年化や自然災害への脆弱性といった観点から検討される社会インフラの健全性に対して，海塩粒子が重要な意味を持つことについて述べる。

海塩粒子は，金属やコンクリートなどのインフラ構造物に付着して腐食劣化を生じさせるだけでなく，鉄道輸送や電力供給に不可欠な送電設備に付着することで絶縁性を低下させることから，社会インフラの健全性を考える上で重要な環境因子である。

海塩粒子の社会インフラへの影響は時間スケールによって大きく二つに区分できる。一つは突発的影響で，数時間～数日レベルでの短期間に海塩粒子が流入し，インフラ構造物に付着することで絶縁機器の性能低下の要因となるものである。事象としては，先述のような台風にともなう塩害のほかにも，冬季に発達した低気圧等によって引き起こされる暴風雪にともなう塩雪害がある。もう一つは，経年的影響で，1 年～数十年レベルでの長期間に海塩粒子が流入し，構造物に付着することで大気腐食を引き起こす要因となるものである。本論文で社会インフラの健全性を検討する二つの観点（高経年化，自然災害に対する脆弱性）に対しては，高経年化に経年的影響が，自然災害に対する脆弱性に突発的影響がそれぞれ対応する。

以下の理由から，世界各国と比較して日本では，海塩粒子が社会インフラの健全性に大きな影響を持つ環境因子であると言える。高経年化と自然災害に対する脆弱性の両方に共通する理由としては，世界的に見て，日本のような島嶼国は，海塩粒子の影響を受ける国土面積の割合が大きいことが挙げられる。また，高経年化に関する理由としては，4 章で後述するように海塩粒子が日本国内で支配的な腐食環境因子であることが挙げられる。この点については，同じく主要な腐食環境因子である大気中 SO_2 ガスの濃度が 1970 年代から 2000 年代にかけておよそ 1/10 に低下した[22]一方で，大気中の海塩粒子量は，漸増の観測報告がなされており[23]，少なくとも明瞭な減少傾向は無いことからも妥当と考えられる。次に，自然災害に対する脆弱性に関する理由としては，台風や発達した低気圧が通過する際に，塩害や塩雪害が広域の多数の地点でほぼ同時に発生し，電力の供給支障や鉄道網の輸

送障害を大規模に引き起こすことが挙げられる。

1.1.3　送電設備の健全性に対する海塩粒子の影響に関する検討の位置づけ

次に，重要な社会インフラとして送電設備にフォーカスするとともに，送電設備に対する海塩粒子の影響について概観し，本研究で取り扱う対象を仕分ける。

内閣官房では政策上の「重要インフラ」として，情報通信，金融，航空，空港，鉄道，電力，ガス，政府・行政サービス（地方公共団体を含む），医療，水道，物流，化学，クレジット，石油の 14 分野を指定しており[24]，このうちの一つである電力において，送電設備は，電力の安定供給を確保するために，さまざまな過酷な気象下においてもその健全性を維持することが求められる。また，送電設備においても他の社会インフラと同様に高経年化による課題を抱えている。そのため，社会インフラの健全性を具体的に検討する上で重要な設備であると考えられる。そこで，本論文では，重要な社会インフラの一つである送電設備を対象として海塩粒子が与える突発的・経年的影響について検討する。

海塩粒子が送電設備に与える突発的影響のうち，塩害に関しては，1960 年代には一定のまとまった報告書が刊行されるなど，早くから現象解明や設備設計・対策が進んでいる[25-31]。一方，塩雪害に関しては，事例が乏しいことから，現象解明がなされておらず，観測などのデータ蓄積から必要な状況である。

また，海塩粒子が送電設備に与える経年的影響については，送電用鉄塔の部材などに用いられる金属材料の大気腐食に関して，効率的に維持管理計画を策定するための大気腐食速度推定手法が国内に未整備である[32]。そこで，本論文では，送電設備に海塩粒子が与える突発的影響として送電用がいしの塩雪害を，経年的影響として送電用鉄塔に用いられる金属材料の大気腐食をそれぞれ取り扱う。以下，1.1.4 では送電用がいしの塩雪害に関する現象解明・対策の状況と課題について，1.1.5 では送電用鉄塔の大気腐食に関する維持管理の状況と課題についてそれぞれ述べる。

1.1.4　送電用がいしの塩雪害に関する現象解明・対策の状況と課題

本項では，送電用がいしの塩雪害に関する現象解明・対策の状況と課題について述べる。まず，塩雪害研究の契機となった新潟下越雪害の概要を示し，次に塩雪害の現象解明・対策の状況と課題について述べる。

(1) 塩雪害研究の契機となった新潟下越雪害の概要

2005 年 12 月に新潟県下越地域において，暴風雪に伴う送電線の雪害事故により，大規模の停電が発生した（以降，新潟下越雪害）。詳細は文献[33]に報告されているが，ここではその概要を示す。なお，事故時の気象状況については 2.2 にて述べる。

2005 年 12 月 22 日に，新潟県の下越地域では，風速 10 m/s を超える強風と大雪に見まわれ，22 日の 9 時前より，新潟市内に供給する複数の 154 kV と 66 kV 送電線において電気

事故が多数発生し，多くの送電線路が次々に遮断された。また，同地域の複数の 275 kV 送電線においても，電線への着雪と強風による電線動揺（ギャロッピング）の発生により，合計 30 送電線の 49 回線で送電が停止した。事故後の巡視により，154 kV と 66 kV 送電線の長幹がいしに，湿雪が大量に付着していることが確認された。この長幹がいしに付着した雪は，強風により圧密された状態で，がいしの笠と笠の間を隙間なく埋め尽くして，笠間を完全に橋絡していた。図 1.5 に新潟下越雪害事故後の巡視により確認された長幹がいし（耐張吊り）への着雪の例を示す[34]。



図 1.5　新潟下越雪害事故後の巡視により確認された長幹がいし（耐張吊り）への着雪例[34]

着雪は，がいしの回りに筒状に発達したもの，風上側に向かった三角錐型に発達したものが見られた。これらの着雪形状は，よく知られた着氷や冠雪とは全く異なったものであった。また，がいしに着雪した雪の密度は約 0.54～0.94 g/cm^3 とかなり高く，さらに導電率も最高で約 200 μS/cm と高い値を示した。そのため，この時の塩雪害は，強風によって多量の雪が送電線のがいしに吹き付けられ，がいしに付着した雪に含まれる海塩によってがいしの絶縁抵抗が低下し，フラッシオーバに至ったものと考えられた[35]。図 1.6 にがいしの絶縁強度の低下メカニズムを示す[36]。

悪天候が比較的回復した 22 日の夜間，復旧作業が進められた。復旧作業は，がいしに付着した雪を人手により取り除く形で進められたが，がいしに着雪した湿雪はおよそ氷化しており，作業は困難を極めた。復旧作業に従事した作業員は延べ 2500 人を超え，事故が発生してから 31 時間後に電気事故は復旧した。

復旧作業中，耐張装置，懸垂装置（I 吊り・V 吊り）のがいしの表面や架線金具類に閃絡（フラッシオーバ）痕が多数発見された。事故点が最も多かった地域は海岸から 30 km 程度も離れた内陸の平地部であり（図 1.7），がいしに付着した雪の導電率もこの地域で測定されたものが最も高かった。そのため，海塩粒子が何らかの形で内陸部まで大量に運ばれ

たものと考えられ，海塩を多く含む降雪が内陸部において生じるメカニズムの解明が求められた。図 1.8 に推定される塩雪害の発生メカニズム[36]を示す。

事故後，東北電力株式会社では，当該地域の 154 kV と 66 kV 送電線について，片回線の長幹がいしを懸垂がいしに取り替える対策を完了し，さらに塩雪害の発生が懸念される類似個所への同様の対策を進めている。図 1.9 に長幹がいしから懸垂がいしへのがいし種類の変更[36]について示す。

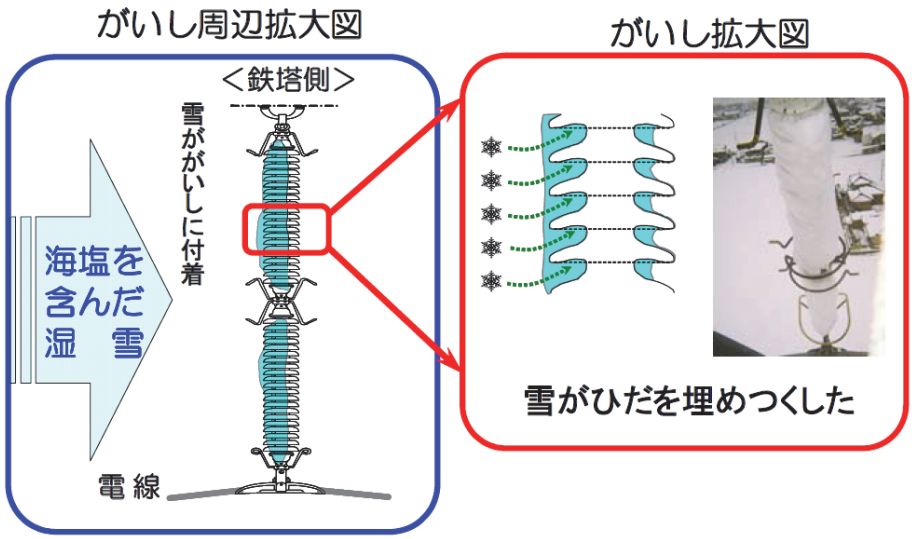


図 1.6　がいしの絶縁強度の低下メカニズム[36]

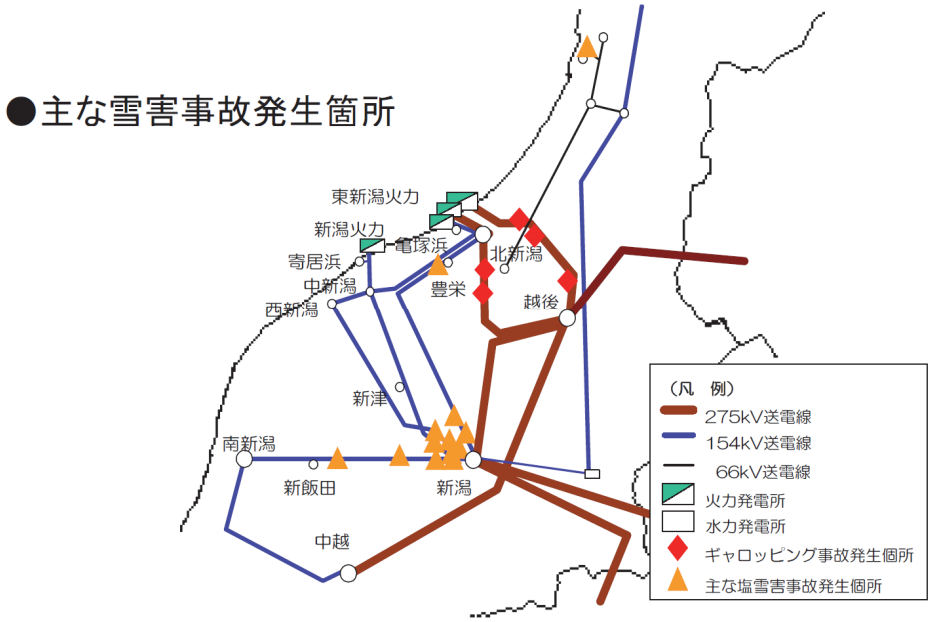


図 1.7　新潟下越雪害時の主な雪害事故発生箇所[36]

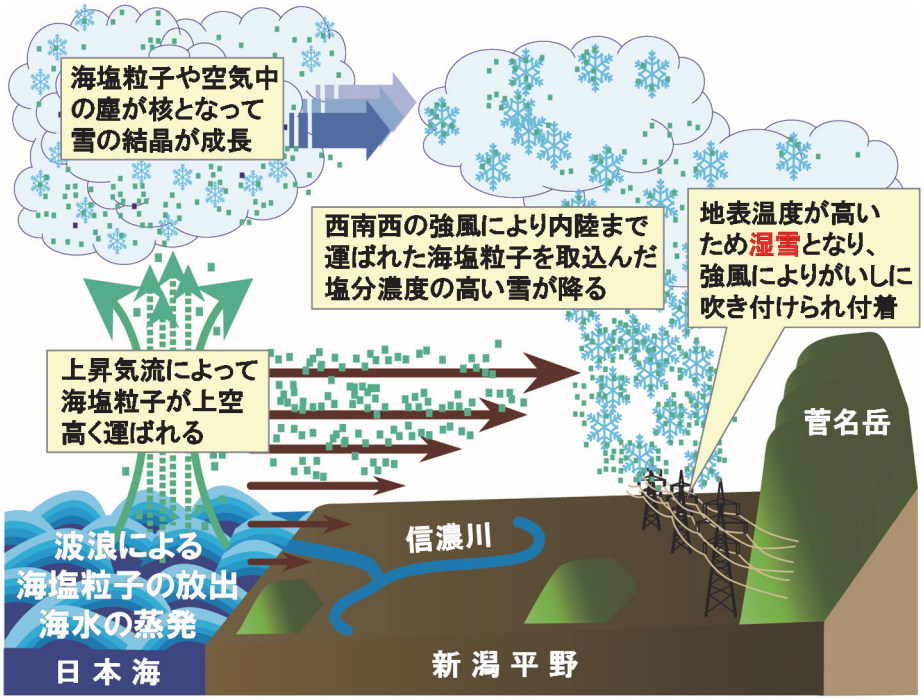


図 1.8　推定される塩雪害の発生メカニズム（文献[36]に基づき作成）

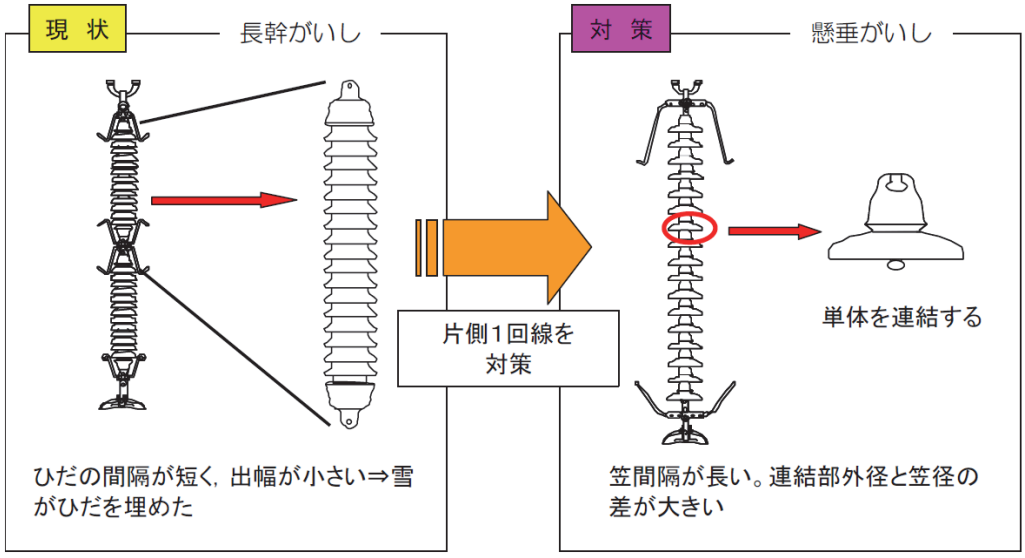


図 1.9　長幹がいしから懸垂がいしへのがいし種類の変更[36]

(2)　塩雪害の現象解明・対策の状況と課題

a. 送電用がいしへの着雪・着氷現象における塩雪害の位置づけ

がいしに雪や氷が付着する現象については，従来から，着氷や冠雪など，その発生過程やフラッシオーバ（閃絡）・メカニズムの異なる現象がいくつかあることが知られている[34]。上記の，2005 年 12 月に発生した新潟県下越地域における雪害事例は，がいしに塩分を含む

湿雪が大量に吹き付けられ，筒雪状に成長発達してフラッシオーバ（閃絡）に至ったものであり，従来の着氷や冠雪などとは異なる現象であった。ここでは，これら着氷雪に関わる各種現象を，下記のように分類する[34]。表 1.2 にがいしへの圧密着雪（塩雪害），着氷，冠雪の一般的特徴[34]を示す。本研究では，がいしの着氷雪現象のうち，特に塩雪害を対象として検討を行った。

・冠着氷雪：がいしに雪や氷が付着する現象（冠雪，着氷，着雪等）の総称。
・着　　雪：湿雪が吹き付けられ，がいし全体に着雪する現象。高濃度の塩分を含んだ雪による事故を特に「塩雪害」と呼ぶ。
・着　　氷：雨氷，雲中着氷，霧氷等によりがいし表面で氷が成長する現象。
・冠　　雪：がいし連の上部に雪が堆積する現象。
・氷　　柱：鉄塔材等から大量の水分が供給され，がいしに氷柱が形成される現象。（着氷の一種であるが，がいし以外の部分からの水分供給によって発生する現象を特に「氷柱」と呼び，着氷と区別する。）

これらの着氷雪現象については，例えば，塩雪害は海岸沿いや内陸の平地において発生するのに対し，着氷は主に高標高地帯などの寒冷地で多く発生し，冠雪は山間部の豪雪地帯で発生するなどの特徴が見られる。また，塩雪害では着雪が発達している最中に電気事故が発生することとなるが，着氷や冠雪では，天候が回復した後の日射や気温上昇などが影響して，電気事故に至る場合が多く，事故発生のタイミングも異なっている。

表 1.2　がいしへの圧密着雪（塩雪害），着氷，冠雪の一般的特徴[34]

項目		塩雪害	着氷	冠雪
気象	気温	-5 ～ +2 ℃	-10 ～ 0 ℃	0 ℃以下
	降水量	大きい	場合による	極めて大きい
	風速	10 m/sec 以上	場合による	ほぼ無風
地域		海岸線，または海塩粒子が入り込む内陸部	寒冷地	豪雪地域
雪（氷）質		湿雪，比重が大きい	氷，比重は極めて大きい	乾雪，比重は小さい
汚損		極めて高い	場合による	極めて軽い
フラッシオーバのタイミング		着雪の発達過程	着氷の発達過程あるいは、日照や気温上昇後	日照や気温上昇後
着雪・着氷形状の例			 （雲中着氷の例）	

b. 過去の塩雪害発生事例

塩雪害については，国内では他に，1973 年 12 月に北海道道南部の日本海側，ならびに 2004 年 1 月にオホーツク地域で発生した事例がある[37]。いずれも発達した低気圧の通過に伴い, 海塩を含む大量の降雪が, 強風により 33 kV 送電線の長幹がいしとラインポスト（LP）がいしに着雪したことが原因とされている。これらの事例は，いずれも海岸から 1 km 程度もしくはそれ以内のエリアで発生しており，砕波帯もしくは海岸構造物から飛散した波しぶきが直接飛来するエリアである。それに対し，新潟下越雪害での塩雪害は内陸部で発生した点が特徴的であり，このような塩雪害の再発防止が求められる[35]。なお，海外において，塩雪害が発生した事例として明らかになっているのは，ノルウェーの 1 件だけで，1993 年 1 月～2 月にノルウェー西海岸において，塩分を含んだ大量の降雪により，300～420 kV 送電線の懸垂がいし（ガラスがいし）に着雪が発達し，事故に至った例がある[38]。

このように，塩雪害については，国内外ともその発生事例は非常に稀であるため，その発生メカニズムの解明や対策技術の開発は十分に進められておらず，塩雪害が発生する気象・地形条件の推定ならびに，がいしの着雪特性・絶縁性能の解明等が重要課題となっている。

c. 塩雪害のメカニズム検討状況と課題

塩雪害による供給支障の再発を防ぐためには，がいしへの着雪特性・絶縁性能を明らかにするとともに，塩雪害が発生しうる気象条件を検討することが重要である。電力中央研究所ではこれらの解明を目的として，がいしへの着雪特性・絶縁性能について室内実験および現地観測を実施するとともに，2007 年 12 月より新潟県において，大気中の海塩粒子と降雪組成に関する連続観測を開始した[35]。本論文では塩雪害が発生しうる気象条件について検討するが，以下では，まず，がいしへの着雪特性・絶縁性能に関する検討について明らかとなった点について要点を述べる。

がいしへの着雪メカニズムに関する検討として，Yaji ら[39]は，新潟県下越地域等でのフィールド観測から，長幹がいしは，懸垂がいしに比較して，笠間が橋絡しやすい傾向を確認した。また，人工着雪試験からも，長幹がいしは，比較的短時間に着雪が発達した笠間橋絡が発生するが，懸垂がいしでは，笠間橋絡が発生しにくいことを確認した。

また, がいしの絶縁性能に関する検討として, Homma ら[40]は, 154 kV 級がいしを対象に，人工雪（氷粒）を用いた着雪課電試験手法を開発するとともに，その試験実施により，各種がいしのフラッシオーバ特性を評価した。試験結果からは，いずれのがいしについても，着雪導電率の増大にともない，フラッシオーバ電圧が低下する傾向が確認され，懸垂がいしのフラッシオーバ電圧は，長幹がいしに比べ高いことが明らかとなった。

これらの知見から，塩雪害の発生リスクに対して，着雪特性および絶縁性能ともに，笠間の狭い長幹がいしは不利であるが，笠間が広く，また融雪により着雪が脱落しやすい懸垂がいしは有利であることが結論付けられた[34]。2005 年 12 月の新潟下越雪害以後，東北電

力株式会社では，当該地区の送電線路ほかにおいて，長幹がいしから懸垂がいしへの取替工事を行ってきたが，上記検討の結果などから，懸垂がいしの適用は，塩雪害の防止対策として極めて有効であるものと判断された[34]。

上記のように耐力の高い設備について知見が得られた一方で，効果的に対策を進めるには，発生が懸念される箇所を的確に抽出し，地域の気象に応じた適切な対策を施す事が重要である。そのためにはまず，新潟下越雪害で塩雪害が海岸から 30 km 程度も離れた内陸部で発生したのかを明らかにする必要がある。したがって，塩雪害が発生しうる気象条件に関しては，海塩粒子が内陸部まで大量に輸送され，海塩を多く含む降雪が内陸部において生じるメカニズムの解明が課題としてあげられた。さらに，対策を適切に進めるには，いつ・どこで塩雪害が発生しうるかを示す指標の提案が必要と考えられた。

1.1.5 送電用鉄塔の大気腐食に関する維持管理の状況と課題

本項では，送電用鉄塔の大気腐食に関する維持管理の状況と課題について述べる。まず，送電設備の保守業務の概要を示し，送電用鉄塔の高経年化および電力中央研究所での経年鉄塔研究の立ち上げについて述べ，効率的な維持管理計画策定において大気腐食速度推定手法の国内未整備が課題であることを述べる。

(1) 送電設備の保守業務

送電設備は架空送電設備と地中送電設備に区分され，架空送電設備は，鉄塔，基礎，がいし，電線・地線，架線金具などで構成されている。本論文では，送電設備のうち架空送電設備を対象とし，さらに，そのうち，鉄塔（送電用鉄塔）を扱うこととする。

設備状態の確実な把握，不具合の未然防止のため，電力各社で巡視・点検が行われる。送電用鉄塔の定期的な巡視項目としては，部材・ボルトの発錆・腐食の有無，鉄塔の折損・傾斜，部材の変形・座屈の有無，ボルトの緩みなどが挙げられる。頻度は各社の規定によるが，2～4 回／年程度の定期巡視および 1 回／4～10 年程度の定期点検などが行われている[41]。送電用鉄塔の鉄塔部材やボルトに使用される鋼材は防錆対策として亜鉛めっきが施されているが，そのめっきが経年とともに消失する。このため，電力各社は，目視点検や測定などにより，腐食による劣化の進行度合いを把握し，その対策時期や優先順位，対策の内容を判断している。

(2) 送電用鉄塔の高経年化と電力中央研究所での経年鉄塔研究の立ち上げ

先述した道路などの社会インフラと同様，送電用鉄塔（支持物）についても，総数約 25 万基のうち，2007 年時点で経年 50 年以上の鉄塔が約 1 割を占めており[5]，2030 年代には半数程度に達する見込みであることから，高経年化対策は保守管理において，喫緊の重要な課題になっている。図 1.10 には送電用支持物（鉄塔）の建設年度別基数の推移を示す。

このため，他の社会インフラ同様，近い将来大規模修繕が一時期に集中することが予想

され，補修・建替等の平滑化，効率化が求められている。また，単純に経年数に応じて改修を進めた場合，更新時期の集中が懸念されることに加え，経年鉄塔数の分布の偏りにより，工事量の浮き沈みが発生し，施工会社での対応ができなくなり，結果的に施工力の確保が困難になるという問題も指摘されている[41]。

補修・建替等の平滑化，効率化を実現するために解決が必要な課題として，補修・建替の時期や箇所の最適な優先順位付けなどが挙げられる。このような課題に対して，電力中央研究所では，電気事業連合会ならびに電力各社の協力のもと，送電用鉄塔の腐食等に対する健全性評価技術に関する研究の一環として，鉄塔立地点ごとの相対的な劣化度合いの評価の手法整備などに取り組んでいる[41]。

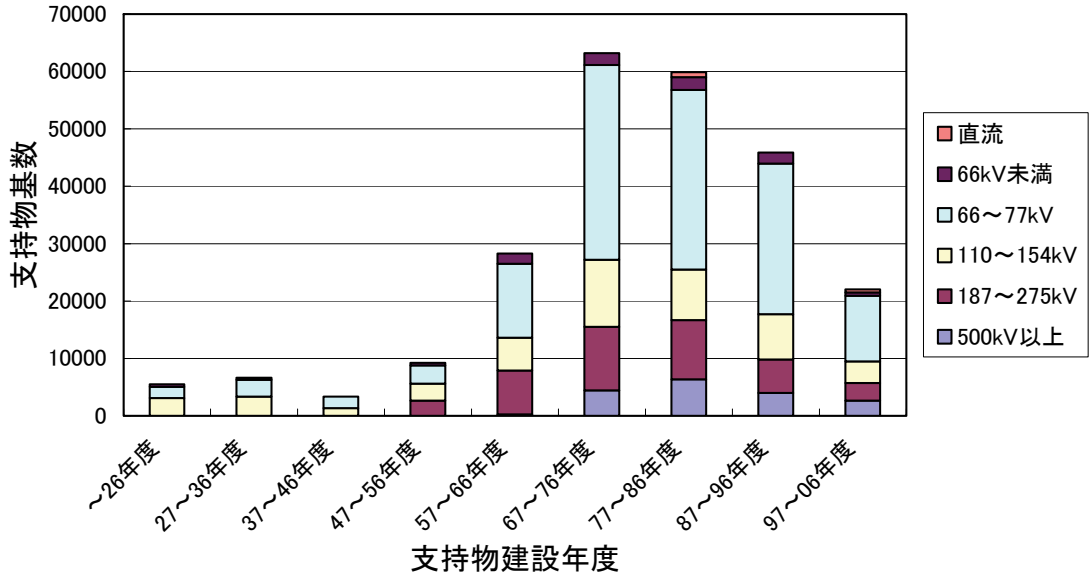


図 1.10 送電用支持物（鉄塔）の建設年度別基数の推移（文献[5]に基づき作成）

(3) 効率的な維持管理計画策定における課題—大気腐食速度推定手法の国内未整備—

補修・建替の時期や箇所の最適な優先順位付けを実現するには，1.1.1 で述べたように図 1.2 に示したようなメンテナンスサイクルにおいて，予測・推定にもとづく劣化状態の把握を可能にすることで，点検・診断を補完し，修繕・更新の対象設備の優先順位付けにおける効率化を図ることが有効であると考えられる。

送電用鉄塔の部材に用いられる金属材料の劣化（大気腐食）状態については，加速試験や屋外大気曝露試験などから海塩粒子，硫黄酸化物，気温，湿度，降水量，降水 pH 等の環境因子が関与することが明らかとなっており，大気腐食現象自体の解明は早くから進んでいる[42-43]。しかしながら，これらの環境因子から大気腐食速度を推定する手法については，国際的にはドーズレスポンス関数（DR 関数）などの手法が整備されているが，国内には整備されていない[32]。ここで，ドーズレスポンス関数とは，環境因子に基づき腐食速度を定量

的に推定する手法の一つであり，腐食速度に対して環境因子が与える影響を関数の形で表し，環境因子を入力データとして，それらの量に応じた腐食速度を推定できる関数である（ドーズレスポンス関数については 4.1 で詳しく述べる）。

大気腐食速度手法が未整備であることが効率的な維持管理を難しくしている。たとえば，環境因子のマップと大気腐食速度推定手法を組み合わせて推定腐食速度マップを作成することで，送電用鉄塔のような面的に多数散在する設備に対して，優先順位付けに有用な劣化度合い評価が可能となる。このように，効率的なメンテナンスサイクルの構築において，日本国内で適用可能な大気腐食速度推定手法の整備が極めて重要である。

1.2 本研究の目的

(1) 社会インフラの健全性・送電設備に対する海塩粒子の影響に関する背景・課題

1.1 節で整理した背景・課題を以下にまとめる。

近年，日本国内では高経年化・自然災害への脆弱性という二つの観点から社会インフラの健全性を維持する必要性が高まっている。

高経年化に対する維持管理システムの動向として，予防保全型維持管理の導入とメンテナンスサイクルの構築が重要である。しかしながら，それらを実践する上で，定期的な点検・診断にかかる費用・労力が増大すると，修繕・更新に充てる費用が圧迫されてしまうという課題があり，その解決策として，予測・推定にもとづく劣化状態の把握を可能にすることで，点検・診断を補完し，修繕・更新の対象設備の優先順位付けにおける効率化を図ることが有効であると考えられる。

自然災害への脆弱性に対する維持管理システムの動向として，2018 年に頻発した大規模な自然災害を受けて，重要インフラの機能維持に関する緊急のハード・ソフト対策が進められている。社会インフラの自然災害に対する脆弱性を物理的側面から捉えると，インフラの設備・設計の耐力を高めることで，脆弱性が低下し，自然災害リスクが減少することを，自然災害に対する社会インフラの健全性が維持されることと捉えられる。しかしながら，緊急の事態を防ぐためには，自然災害発生のメカニズムや発生可能性評価にもとづいて合理的な対策を進めることが課題であると考えられる。

海塩粒子は，構造物の腐食劣化や送電設備の絶縁性能低下など，社会インフラの健全性を検討する上で重要な環境因子である。また，送電設備は，重要な社会インフラの一つである電力において，過酷な気象下においても安定供給を確保するための健全性を維持することが求められており，高経年化による課題を抱えてもいることから，社会インフラの健全性を具体的に検討する上で重要な設備である。

送電設備の健全性に対する海塩粒子の影響は，塩害・塩雪害といった突発的影響と，大気腐食の経年的影響の二つがある。このうち，送電用がいしの塩雪害については，事例が乏しく観測データの蓄積が必要であることや，海塩粒子の内陸への輸送メカニズムの解明および塩雪害発生可能性指標の提案が課題であることを示した。また，送電用鉄塔の大気

腐食については，環境因子から金属材料の大気腐食速度を推定する手法が国内に未整備であり，効率的な維持管理を難しくしているなどの課題を示した。

(2) 本研究の目的と実施事項

そこで，本論文では，重要なインフラの一つである送電設備に焦点をあて，健全性に重要な影響を与える海塩粒子について，突発的影響として塩雪害，経年的影響として大気腐食に着目し，現象解明・発生可能性指標提案および推定手法提案を行う。これらの検討を通じて，送電設備の健全性維持の実現のみならず，社会インフラ全体の健全性維持に応用可能な方法論の提示および重要な示唆が期待できる。

以下に，本論文での実施事項を示す。

送電用がいしの塩雪害については以下の 2 項目である。

- 冬季新潟県（2005 年塩雪害発生）を事例として，時間的空間的に詳細な大気中粒子・降水の現地観測にもとづいて詳細検討することで，塩雪害を引き起こすような暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的に詳細な動態を解明する。
- 対策に資するハザード評価手法として，塩雪害の発生可能性を表す指標（海風着雪ポテンシャル）を提案する。

送電用鉄塔の大気腐食については以下の 1 項目である。

- 環境因子から金属材料の大気腐食速度を推定する手法を国内に整備するために，国内の大気曝露試験データをもとに，ドーズレスポンス関数の国内適用性を評価する。さらに，国内データにもとづき決定した係数を適用することでドーズレスポンス関数の改良を図る。

1.3 本論文の構成

本論文は以下のような構成とした。図 1.11 に本論文の構成と各章の位置づけを示す。

1 章では，本研究の背景として，社会インフラの健全性を取り巻く状況について高経年化および自然災害への脆弱性の観点から述べた。また，社会インフラの健全性について具体的に検討するために本研究で取り扱う，送電設備や海塩粒子についてその適切性や重要性についても述べた。さらに，送電設備の健全性に対する海塩粒子の影響として，突発的影響として塩雪害，経年的影響として大気腐食に着目し，現象解明や対策の状況および課題について述べた上で，本研究の目的・構成を示した。

2 章では，事例が乏しく観測データの蓄積が必要である送電用がいしの塩雪害について，2005 年に塩雪害が発生した新潟県下越地域における現地観測にもとづく検討について述べた。送電用がいしの塩雪害に関する大きな課題の一つである，海塩粒子の内陸への輸送メ

カニズムについて，時間的空間的に詳細な大気中粒子・降水の現地観測にもとづいて検討することで，塩雪害を引き起こすような暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的な動態を解明した。

3 章では，送電用がいしの塩雪害対策に資するハザード評価手法として，塩雪害の発生可能性を表す指標を提案した。塩雪害発生可能性指標の基本的概念を整理するとともに，新潟県や日本海側地域への適用によって，海風着雪ポテンシャルが塩雪害の発生可能性指標として有効であることを示した。

4 章では，送電用鉄塔の大気腐食に関して，環境因子から金属材料の大気腐食速度を推定する手法が国内に未整備であり，効率的な維持管理を難しくしているなどの課題を受け，日本国内での鉄鋼や亜鉛の大気腐食性評価のためのドーズレスポンス関数の提案を試みた。提案においては，まず，日本国内の大気曝露試験データをもとに，既往文献で提案されているドーズレスポンス関数から国内評価向けに適切な関数を選定し，その関数の国内適用性を評価した。さらに，国内データに基づき決定した係数をそのドーズレスポンス関数に適用することで改良を図った。

最後に，5 章では，本研究を総括するとともに，得られた知見による送電設備の健全性維持の実現に関する将来展望および社会インフラ全体の健全性維持に応用可能な方法論について示した。

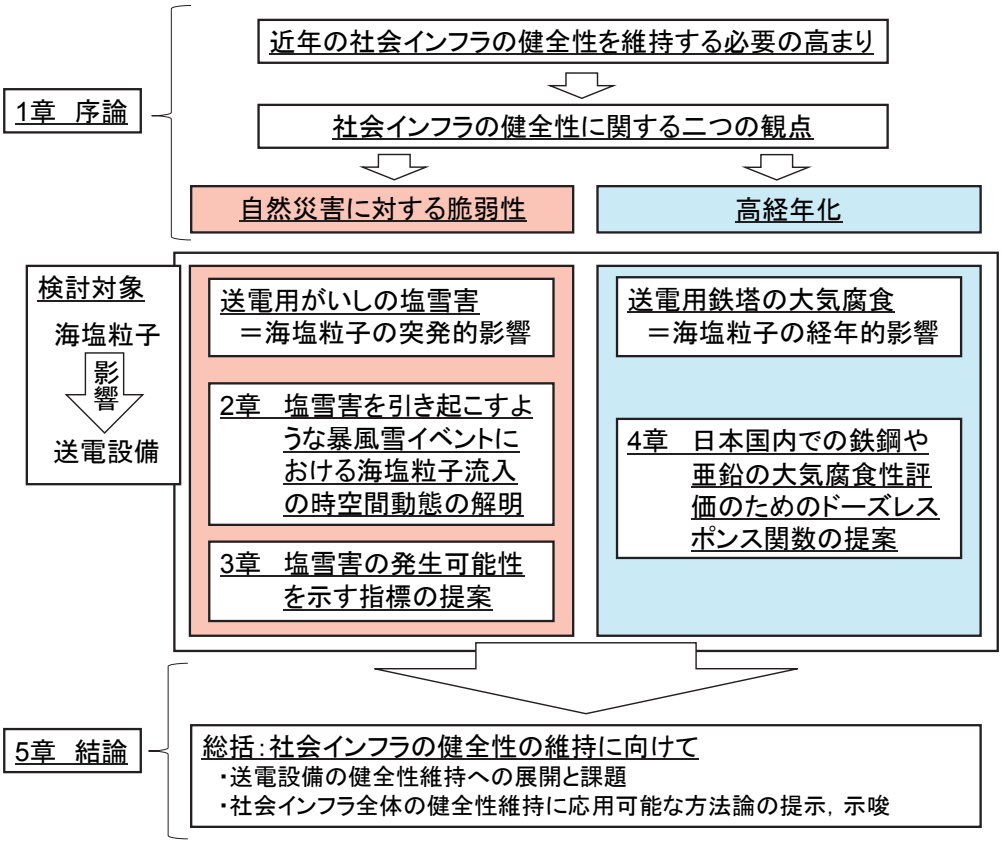


図 1.11 本論文の構成と各章の位置づけ

第 1 章参考文献

[1] 小林潔司, 「予防保全型維持管理の導入に向けて-Part1 予防保全型管理の重要性-」, 土木学会誌, Vol.95, No.12, pp.14-17 (2010).

[2] 古田均, 茅野牧夫, 渡邊英一, 「橋梁の維持管理とブリッジマネジメントシステムの現状と将来展望」, 土木学会論文集, Vol.F 63, No.3, pp.287-294 (2007).

[3] 中神陽一, 「中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故に関する調査・検討委員会報告書の概要 : 天井板落下原因の把握と再発防止策について」, 建設マネジメント, Vol. 424, 22-27 (2013).

[4] G. M. Calvi, M. Moratti, G. J. O'Reilly, N. Scattarreggia, R. Monteiro, D. Malomo, P. M. Calvi and R. Pinho, "Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge", *Strucural Engineering International*, 29, 198-217 (2019).

[5] 架空送電設備の鋼材腐食・磨耗現象調査専門委員会, 「架空送電設備の鋼材腐食・磨耗現象」, 電気学会技術報告, Vol.1163, pp.4-6 (2009).

[6] 内閣官房, 「国土強靭化基本計画-強くて, しなやかなニッポンへ-」, 2018 年 12 月 14 日 (2018).

[7] 保田敬一, 白木渡, 井面仁志, 「レジリエンスと脆弱性による長寿命化修繕計画の継続的運用面での評価の試み」, 土木学会論文集 F6（安全問題）, Vol. 73, No. 2, I_127-I_138 (2017).

[8] インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議,「インフラ長寿命化基本計画」, 2013 年 11 月 (2013).

[9] 中村裕司, 水野高志, 幸野茂, 岩佐宏一, 菅沼久忠, 家入正隆, 丸山明, 中川均, 平島寛, 「インフラマネジメント最前線」, 日経 BP 社 (2015).

[10] 国土交通省道路局, 「道路メンテナンス年報」, 2018 年 8 月 (2018).

[11] 茨城新聞クロスアイ, 「道路法改正義務化 5 年 老朽橋点検の負担ずしり」, 2018 年 10 月 27 日, https://ibarakinews.jp/news/newsdetail.php?f_jun=15405561235744 (2018).

[12] 内閣府総合科学技術・イノベーション会議, 「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」, https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/.

[13] 産経ニュース, 「台風影響の塩害か…京成線で停電, ダイヤ乱れ 7 万人に影響」, 2018 年 10 月 4 日, https://www.sankei.com/affairs/news/181004/afr1810040012-n1.html (2018).

[14] 日本経済新聞, 「京成線が全線運転見合わせ 塩害か, 複数の電線出火」, 2018 年 10 月 5 日 (2018).

[15] 朝日新聞デジタル, 「京成電鉄が全線ストップ 送電設備から火花, 塩害か調査」, 2018 年 10 月 5 日, https://www.asahi.com/articles/ASLB53GBKLB5UTIL00V.html (2018)

[16] 東洋経済オンライン, 「京成止めた台風塩害､応急処置は『拭き掃除』」, 2018 年 12 月 4 日, https://toyokeizai.net/articles/-/252465 (2018).

[17] 気象庁, 「平成 30 年（2018 年）全国災害時気象概況」, 2019 年 3 月, http://www.jma.go.

jp/jma/kishou/books/kishougaikyo/gaikyo_2018.pdf (2019).
[18] 日本経済新聞, 「東日本大震災 8 年 都市は備える③ 塩害 交通インフラの死角」, 2019 年 3 月 8 日 (2019).
[19] 首相官邸, 「重要インフラの緊急点検に関する関係閣僚会議」, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/jyuyouinfura/index.html (2018).
[20] 塩崎由人, 加藤孝明, 菅田寛, 「自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理」, 土木学会論文集 D3（土木計画学）, Vol. 71, No. 3, 127-140 (2015).
[21] J. Birkmann, “Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster relisient societies (second edition)”, United Nation University Press (2013).
[22] S. Wakamatsu, T. Morikawa and A. Ito, “Air Pollution Trends in Japan between 1970 and 2012 and Impact of Urban Air Pollution Countermeasures”, *Asian J. Atmos. Environ.*, 7, 177-190 (2013).
[23] 加藤善徳, 梅田てるみ, 草野一, 「横浜における海塩物質沈着量の経年的増加傾向について(1984-2004)」, 大気環境学会誌, 45, 132-143 (2010).
[24] 内閣サイバーセキュリティセンター, 「重要インフラの情報セキュリティ対策に係る第４次行動計画」, https://www.nisc.go.jp/active/infra/outline.html.
[25] 塩害対策専門委員会配電分科会, 「配電設備の塩害対策」, 電気協同研究, Vol. 20, No.1 (1964).
[26] 塩害対策専門委員会送変電分科会, 「送変電設備の塩害対策」, 電気協同研究, Vol. 20, No.2 (1964).
[27] 塩害対策専門委員会気象小委員会, 「塩害と気象」, 電気協同研究, Vol. 20, No.3 (1964).
[28] 送電機能研究委員会, 「500kV 送電に関する研究報告その 6　500kV 送変電設備の耐塩害設計」(1969).
[29] 500KV 送電実証試験研究委員会,「500KV 送変電設備の実証試験研究報告その 2　塩害対策」(1972).
[30] 変電設備耐塩設計専門委員会, 「変電設備の耐塩設計」, 電気協同研究, Vol. 35, No.3 (1979).
[31] 配電設備耐塩性対策専門委員会,「配電設備の耐塩性向上対策」, 電気協同研究, Vol. 51, No.3 (1996).
[32] 大原信, 小﨑明郎, 朱牟田善治, 村尾直人, 「日本国内における鉄鋼や亜鉛の大気暴露試験データに対するドーズレスポンス関数の適用性評価」, 材料と環境, Vol.67, No.10, pp.416-425 (2018).
[33] T. Onodera, H. Inukai and T. Odashima, “Overview of power outage in the Niigata Kaetsu Area caused by a snowstorm”, IWAIS XII (2007).
[34] 本間宏也, 屋地康平, 木原直人, 大原信, 西原崇, 平口博丸, 「「送電設備の雪害に関する研究」10 ヶ年研究成果（その 2）－がいし塩雪害の評価手法と対策－」, 電力中央研

究所報告, H16004 (2017).

[35] 西原崇, 杉本聡一郎, 清水幹夫, 本間宏也, 石川智巳, 屋地康平, 松宮央登, 大原信, 木原直人, 麻生照雄, 渡邉眞人, 平口博丸, 「送電設備の雪害に関する研究 －2007～2011年度成果－」, 電力中央研究所報告, N19 (2012).

[36] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会, 「今後の雪害対策のあり方」, http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g70125a01j.pdf , (2007).

[37] N. Sugawara and K. Hosono, “Insulation properties of long rod and line post insulators for 33 kV transmission line in wet-snow storm on January 2004”, IWAIS XI (2005).

[38] S. V. Fikke, T. M. Ohnstad, H. Förster, L. Rolfseng and T. Telstad, “Effect of long range airborne pollution on outdoor insulation”, Nordic Insulation Symposium, pp.103-112 (1994).

[39] K. Yaji, H. Homma, G. Sakata and M. Watanabe, “Evaluation on flashover voltage property of snow accreted insulators for overhead transmission lines, part I-field observations and laboratory tests to evaluate snow accretion properties”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.21, No.6, pp.2549-2558 (2014).

[40] H. Homma, K. Yaji, T. Aso, M. Watanabe, G. Sakata, A. Dernfalk and I. Gutman, “Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part III - 154 kV Full-scale Flashover Voltage Test of Snow Accreted Insulators -”, *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 21, No. 6, pp. 2568-2575 (2014).

[41] 堀康彦, 谷純一, 足立和郎, 石川智巳, 服部康男, 大原信, 朱牟田善治, 須藤仁, 速水洋, 布施則一, 長沼淳, 正木浩幸, 福冨広幸, 大石祐嗣, 佐藤雄亮, 石野隆一, 安本憲司,「送電用鉄塔の腐食等に対する健全性評価技術に関する研究－第Ⅱ期（2015～2018）の成果－」, 電力中央研究所報告, H18009 (2019).

[42] 外川靖人, 「講座 1-大気腐食試験方法-」, 材料, Vol.45, No.8, pp.952-958 (1996).

[43] C. Leygraf, I. O. Wallinder, J. Tidblad and T. Graedel, Atmospheric Corrosion, 2nd edition, Electrochemical Society Series, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New York, pp.100-120 (2016).

第 2 章　塩雪害を引き起こすような暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的動態の解明

2.1　はじめに

本章では，時間的空間的に詳細な大気中粒子・降水の現地観測にもとづいて塩雪害を引き起こすような暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的に詳細な動態を検討する。

1 章で述べたとおり, 2005 年冬季の豪雪にともない, 12 月 22 日に新潟県内で発生した「塩雪害」では，大規模な停電事故が発生した[1]。国内における塩雪害事故の発生は，これまで数例が報告されているに過ぎないが，一般に海塩成分を多く含んだ着雪により絶縁性能が低下することがその原因と言われている[2]。今回の塩雪害事故は海岸から 30 km 程度も離れた内陸部で発生した。また，事故地点周辺では最大 200 μS/cm 程度の高い導電率を示す圧密した着雪が確認された。そのため，海塩粒子が内陸部まで大量に輸送され，海塩を多く含む降雪が内陸部において生じるメカニズムの解明が課題となっている。

以下では，海塩粒子流入の時空間的動態について，まず，塩雪害の発生気象条件の検討に必要な諸事象を整理し，次に，海塩粒子の内陸への輸送メカニズムの解明に現地観測にもとづくデータ取得が必要であることを示し，本研究の目的と実施事項について述べる。

(1) 塩雪害の発生気象条件の検討に必要な諸事象の整理

a. 日本海沿岸における降雨・降雪の化学組成における海塩粒子の影響

新潟県の位置する日本海沿岸における降雨・降雪の化学組成については，これまで多くの研究が報告されている[3-4]。降雨・降雪中の硫酸イオンや硝酸イオンの濃度は他のイオンに比べて相対的に高く，日本海をわたって大陸から輸送された大気汚染物質の影響が大きいことも指摘されている[5]。しかし，既往の研究の多くは，非海塩起源の成分の動態を主な対象としたものであり，海塩起源の成分や降雨・降雪の導電率に着目してはいない。

海塩起源の成分の指標として，日本国内ではイオン成分の濃度よりも測定が容易な導電率がしばしば使われてきた。一般に，降水の導電率は，以下の 9 種の陽イオン・陰イオンによって決まっていることが知られている：H^+，NH_4^+，Na^+，K^+，Mg^{2+}，Ca^{2+}，Cl^-，NO_3^-，SO_4^{2-}。越境大気汚染が早くから顕在化したスカンジナビア半島では，ノルウェー西海岸での塩雪害発生に，海をわたって近隣諸国から到達した大気汚染物質も関与していたことが指摘されている[6]。2005 年の新潟下越雪害における塩雪害の発生に，越境大気汚染がどの程度関与していたのかは明確ではない。

一般に降水や粒子状物質に含まれる海塩成分の評価には，ナトリウムイオン（Na^+）基準による方法が用いられる[7-8]。降水や粒子状物質に含まれる Na^+はすべて海塩起源であると見なされ，海洋から発生し，大気中を輸送・捕捉される過程で変化しないと仮定する。同様に海塩起源とされる Cl^-では，大気中での分別が生じるため，海塩のトレーサーとしては Na^+の方が好まれる。

b. 大気中の海塩粒子が地表・構造物に到達する二つのプロセス—湿性沈着と乾性沈着—

大気中のガスや粒子状物質（海塩粒子を含む）が大気中から地表面や構造物に到達するプロセスは二つに区分される。一つは湿性沈着であり，雨や雪などに捕捉されて大気中のガスや粒子状物質が地表面等に運ばれる過程である。もう一つは乾性沈着であり，降水を介さずに地表面や構造物へと大気中のガスや粒子状物質が到達する過程である。この二つの過程のどちらかを通じて，大気中のガスや粒子状物質（海塩粒子を含む）が大気中から地表面や構造物に輸送される。

海域から発生して内陸に輸送された海塩成分についても，基本的にこのプロセスは共通である。図 2.1 に海塩粒子の湿性沈着と乾性沈着の模式図[9]を示す。湿性沈着とは，降水に取込まれた海塩成分が，雪片や雨滴とともに送電設備に付着する現象であり，乾性沈着とは陸域に輸送された海塩粒子（風送塩）が送電設備に直接付着する現象として区別される。塩雪害事故の発生に，湿性沈着と乾性沈着が量的にどのように関与しているのかは明らかとなっていない。したがって，海塩粒子が内陸部まで大量に輸送され，海塩を多く含む降雪が内陸部において生じるメカニズムの解明においては，濃度や導電率のみならず，沈着量の評価も重要である。

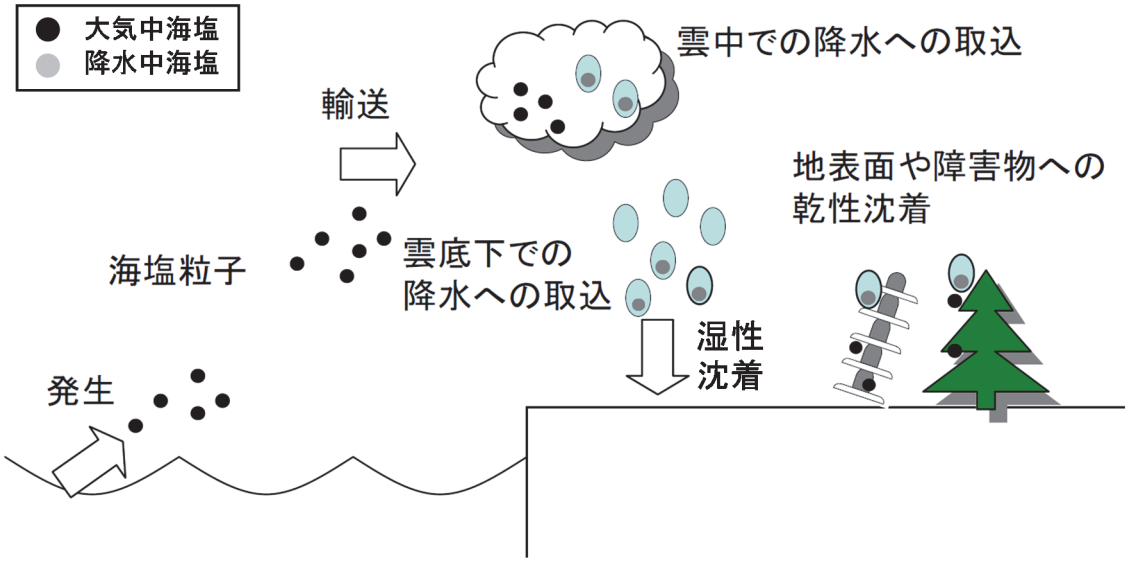


図 2.1　海塩粒子の湿性沈着と乾性沈着の模式図[9]

c. 海塩粒子の湿性沈着・乾性沈着の空間分布に関する評価例・利用可能なデータと課題

海塩粒子が内陸に輸送されるメカニズムに関連して，海塩成分の湿性沈着や乾性沈着の空間分布を評価した既往例は数例ある。Vet ら[10]は，湿性沈着モニタリングなどから地球規模での海塩成分の湿性沈着・乾性沈着量分布を評価した。図 2.2 は Vet ら[10]が評価した 2005～2007 年において世界各地で観測された Na^+の湿性沈着量の平均値を示す。湿性沈着・乾性沈着ともに海岸から内陸に入るほどに急速に沈着量が低下する傾向が認められた。しか

しながら，時間分解能については 3 ヵ年平均であり，空間解像度についても日本のような島嶼国における海塩の内陸への輸送を評価できるような解像度にはなっていない。Lloyd[11]はアメリカにおける湿性沈着モニタリング網による長期観測結果から，Na^+の湿性沈着の空間分布における時間変化を評価した。図 2.3 は Lloyd[11]が評価した湿性沈着モニタリング観測値にクリギング法を用いて作成したアメリカ国内の Na^+湿性沈着量分布を示す。空間解像度については，やや粗いものの国内で海塩の内陸への輸送が評価できるような解像度を有しているように見える。一方で，データは月平均値であり，時間分解能は低いと言える。また，Manders ら[12]や Tsyro ら[13]は，ヨーロッパにおいて大気中海塩粒子濃度の空間分布をモデル計算によって評価した。図 2.4 は Manders ら[12]が評価したヨーロッパの 2005 年時におけるモデル計算による大気中 Na^+濃度と大気中海塩濃度の分布を示す。空間解像度については，やや粗いものの国内で海塩の内陸への輸送が評価できるような解像度を有しているように見える。一方で，データは年平均値であり，時間分解能は低い。Foltescu ら[14]は，ヨーロッパにおいて海塩成分の湿性沈着量と乾性沈着量をモデル計算によって評価した。図 2.5 は Foltescu ら[14]が評価したヨーロッパの 1999 年 1 月～2001 年 12 月時におけるモデル計算による海塩沈着量の分布を示す。湿性沈着の方が乾性沈着よりも内陸まで海塩の進入があることや，湿性沈着の方がヨーロッパ域内での地域差が顕著であることが確認できる。また，空間解像度については，やや粗いもののヨーロッパ域内で海塩の内陸への輸送が評価できるような解像度を有しているように見える。しかしながら，データは約 3 年間の平均値であり，時間分解能は低いと言える。さらに，乾性沈着については，水平方向のフラックス量としての観点から，観測やモデル計算による Meira ら[15-16]や Gustafusson and Larsson[17]などの評価例もあるが，これらにおいても，データは月平均値であり，時間分解能は低い。

このように既往の海塩の湿性沈着・乾性沈着の空間分布評価においては，およそ年平均ベースでの評価であった。評価の時間分解能に関しては，塩雪害事故の発生時には，数時間程度の比較的短時間での厳しい気象条件であったことから，少なくとも数時間程度の時間分解能が必要であると判断される。

一方で，国内外で展開されてきた降水や粒子状物質のセットデータを取得している観測ネットワーク（例えば，東アジア酸性雨モニタリングネットワーク[18]や全国環境研協議会による酸性雨全国調査[19]）は，こうした短時間の現象の把握を想定して設計されたものではないため，データの時間分解能は湿性沈着で 1 日～1 週間隔，乾性沈着で 1 週～2 週間隔であり，既に構築されている観測ネットワークのデータからは塩雪害の発生要因や海塩の内陸への輸送過程の解明は困難と考えられた。

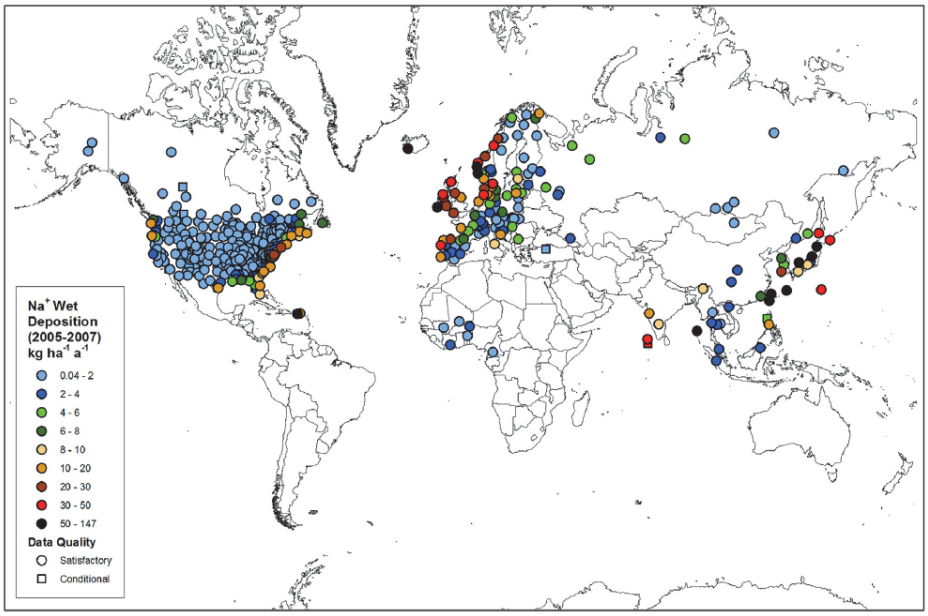


図 2.2　2005～2007 年において世界各地で観測された Na^+の湿性沈着量の平均値[10]

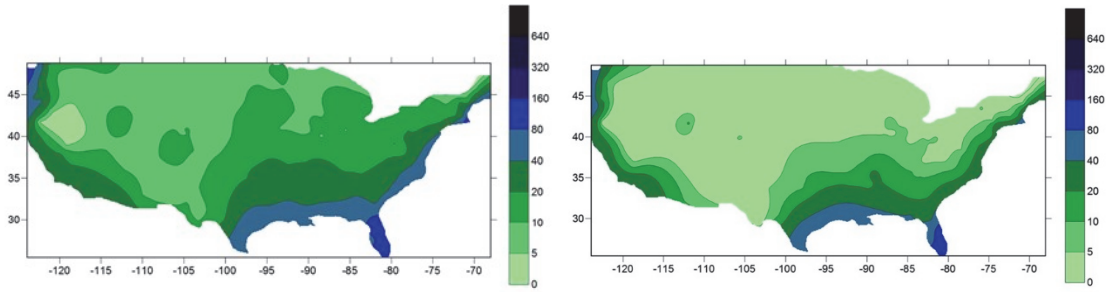


図 2.3　湿性沈着モニタリング観測値にクリギング法を用いて作成した米国内の Na^+湿性沈着量分布（左：1986 年，右：2006 年）[11]

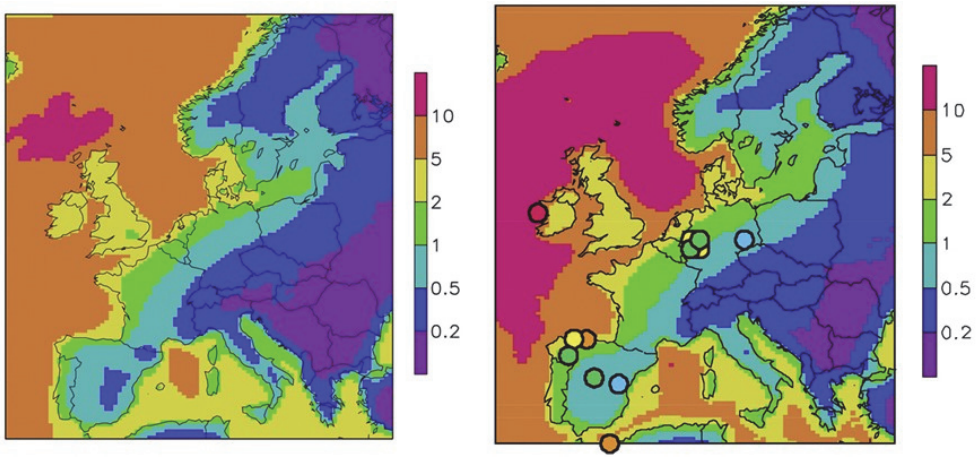


図 2.4　ヨーロッパの 2005 年時におけるモデル計算による大気中 Na^+濃度（左）と大気中海塩濃度（右）の分布（海塩濃度の計算は，海塩濃度＝Na^+濃度×3.26/2.46 に基づく）[12]

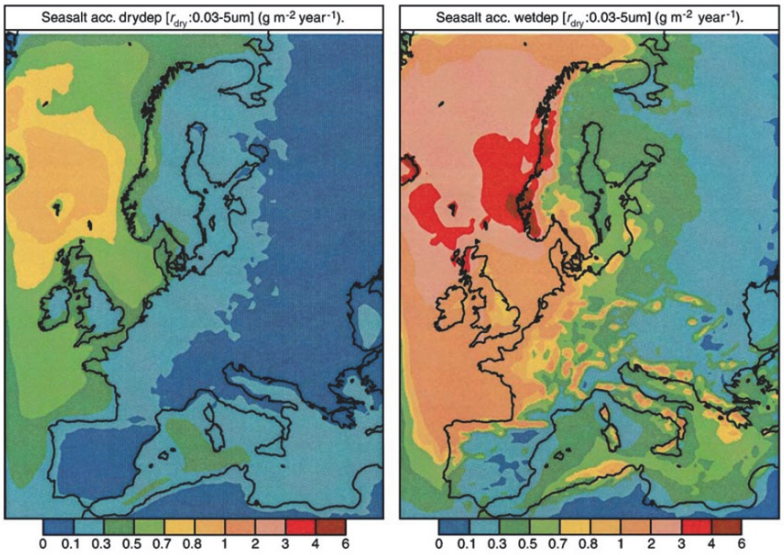


図 2.5　ヨーロッパの 1999 年 1 月～2001 年 12 月時におけるモデル計算による海塩沈着量の分布（左：乾性沈着量，右：湿性沈着量）[14]

(2)　本章の目的と実施事項

a. 課題解決に必要な現地観測にもとづくデータ取得

上記のような背景のもと，塩雪害事故の発生メカニズムに関わる海塩粒子の内陸への流入現象を捉えるためのデータとしては，数時間程度の時間分解能で，沿岸から内陸への多地点での降水・粒子状物質のセットデータを現地観測により取得することが必要と考えられた。また，降水導電率測定は，降水中海塩成分濃度の簡易測定として有用であるとともに，降水量 0.5 mm ごとに導電率を計測できることから，時々刻々のデータ取得の面からもとしても活用できると考えられた。さらに，大気中粒子状物質の濃度を光学的に計測する粒径分布測定機器は，成分濃度結果との突合せなどを行うことで，大気中海塩粒子濃度の時々刻々のデータ取得に応用できる可能性がある。海塩粒子を含めた大気中粒子状物質の輸送・沈着現象には，その粒径が大きく影響するため[15-16,20]，粒径分布に関するデータ取得も検討する必要がある。

b. 本章の目的と実施事項

そこで本研究では，新潟下越雪害が発生した地域において大気中粒子・降水の現地観測を行い，以下の項目について検討することで，暴風雪時の海塩粒子流入の時空間的動態の解明を図る。なお，新潟下越雪害発生時における気象状況に関しては，気象庁観測データを中心として事故時の局所的な気象状況について述べるとともに，電力中央研究所の雪害研究の一環として，木原ら[9,21]が実施した気象・海塩に関する数値解析結果について参照することで，メソから総観スケールでの海塩粒子の輸送について述べることとする。

1. 新潟下越雪害発生時における気象状況（2.2 節）
2. 現地観測による暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的動態の解明（2.3 節）
   ①大気中粒子状物質・降雪に関わる現地観測システムの構築（2.3.1）
   ②冬季の新潟県下越地域での風況特性（2.3.2）
   ③降水導電率データの特徴（2.3.3）
   ④大気中粒子・降水の成分による風向・風速依存性（2.3.4）
   ⑤高い降水導電率時の風向・風速および化学組成（2.3.5）
   ⑥内陸への海塩粒子流入における海塩湿性沈着の重要性（2.3.6）

2.2　新潟下越雪害発生時における気象状況

本節では，新潟下越雪害発生時における気象状況について，地上気象観測データの分析およびメソから総観スケールの気象状況および大気中を輸送される海塩の分析にもとづいて述べる。

(1)　地上気象観測データにもとづく新潟下越雪害発生時における気象状況の分析

a. 新潟下越雪害発生時の気象状況の概要

以下では，新潟下越雪害発生時の気象状況の概要について，Onodera ら[22]による報告を参照しながら述べる。

2005 年 12 月は非常に強い寒気が日本列島に断続的に流れ込み，強い冬型の気圧配置の日が多かった。同月の平均気温は 1985 年以来 20 年ぶりの全国的な低温となり，日本海側の地域を中心に 12 月としては記録的な大雪となった。

2005 年 12 月 21 日 21 時, 22 日 9 時, 22 日 21 時の気象庁地上天気図を図 2.6 に示す。Onodera ら[22]に記述されているように，12 月 21 日 21 時には，前線を伴う低気圧が本州南岸に位置しており（南岸低気圧），日本海上にはメソ低気圧が見られ，強風・高波浪を一般に引き起こす「二つ玉低気圧」が見られた。

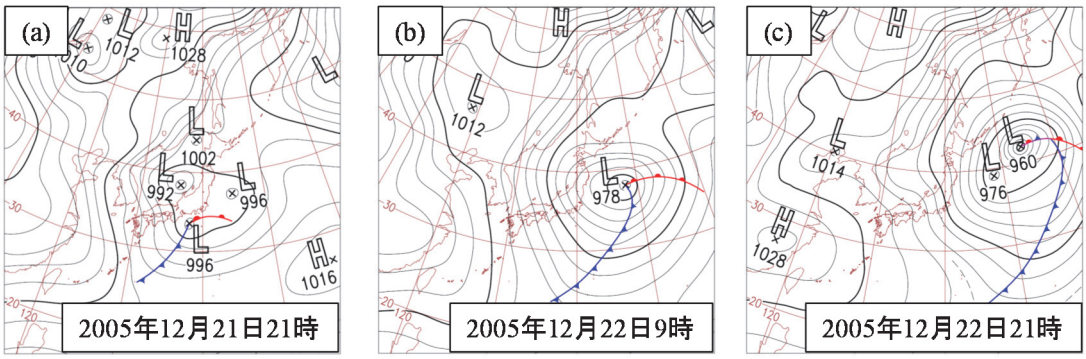


図 2.6　2005 年 12 月 21 日 21 時，22 日 9 時，22 日 21 時の気象庁地上天気図[21]

b. 地上気象観測データにもとづく新潟下越雪害発生時の気象条件の分析

次に，新潟下越雪害において塩雪害が発生した地点および時間における周辺気象条件について，地上観測データを用いて整理する。着氷雪・気象データベース[23]から，新潟下越雪害における圧密着雪に伴う塩雪害が発生したエリアを抽出し，分析した結果，塩雪害が集中的に発生している時間帯および場所が 2 区分される。1 つめは，12 月 22 日 8 時頃から 11 時 30 分頃までに五泉市を中心として比較的内陸で発生した塩雪害であり，2 つめは，22 日 15 時半頃から 18 時頃までに新潟市から村上市にかけて比較的沿岸域で発生した塩雪害である。

五泉市を中心とした塩雪害発生時の気象分析には，五泉市よりやや沿岸に位置するものの，その最も近傍の気象庁アメダス地点である新津地点における地上アメダス観測データを用いる。アメダス新津地点における前 10 分および前 1 時間降水量，気温，風速，風向の時系列データを図 2.7 に示す。新津アメダスにおいて，前 1 時間降水量が途切れなく 1 mm 以上の値を示し始める 4 時から，塩雪害事故が発生する 8 時 20 分頃までの間を，気象状況の違いに着目して下記のように 4 期間に分けることができる。

- 4 時から 5 時にかけては, 気温が安定した着雪適温であるものの, 風速が 5 m/s から 7 m/s で，それほど強くなく，さらに前 1 時間降水量が 2 mm 程度で多くない。後述する電力中央研究所の観測システムによる 2010 年 1 月 13 日の新潟県での実観測事例において，気温 0.2 度から 0.4 度，1 時間降水量 2 mm 程度の降雪が見られたものの，がいしの笠間が埋まるような着雪発達に至らなかったことから，この時間帯では着雪が十分に発達しなかったと推測される。
- 5 時から 5 時 30 分にかけて，気温が 3 度程度まで上昇し，着雪適温帯よりも高い。このことから，この間に着雪が発達した可能性は低いと推測される。
- 5 時 30 分から 6 時にかけて，気温は着雪適温帯に入り，風速が 10 m/s を超える強風となる。ただし，前 1 時間降水量が 2 mm 前後であることから，着雪が十分に発達しなかったと推測される。
- 6 時から 8 時にかけて，気温は 0.7℃前後で着雪適温帯を維持し，風速は 10 m/s を超える強風を維持する。また，前 1 時間降水量が 4 mm を超えている。その後，降雪が弱まった 8 時 17 分頃に五泉市を中心に塩雪害が発生した。このことから，着雪適温で猛烈な吹雪が 2 時間程度維持されたことにより，圧密着雪が発達したものと推測される。また，風向が西南西であることから，能登半島側の海域から新潟平野を越えて海塩を含んだ気流および降雪が流入したことで，着雪中の導電率が高くなったと推測される。

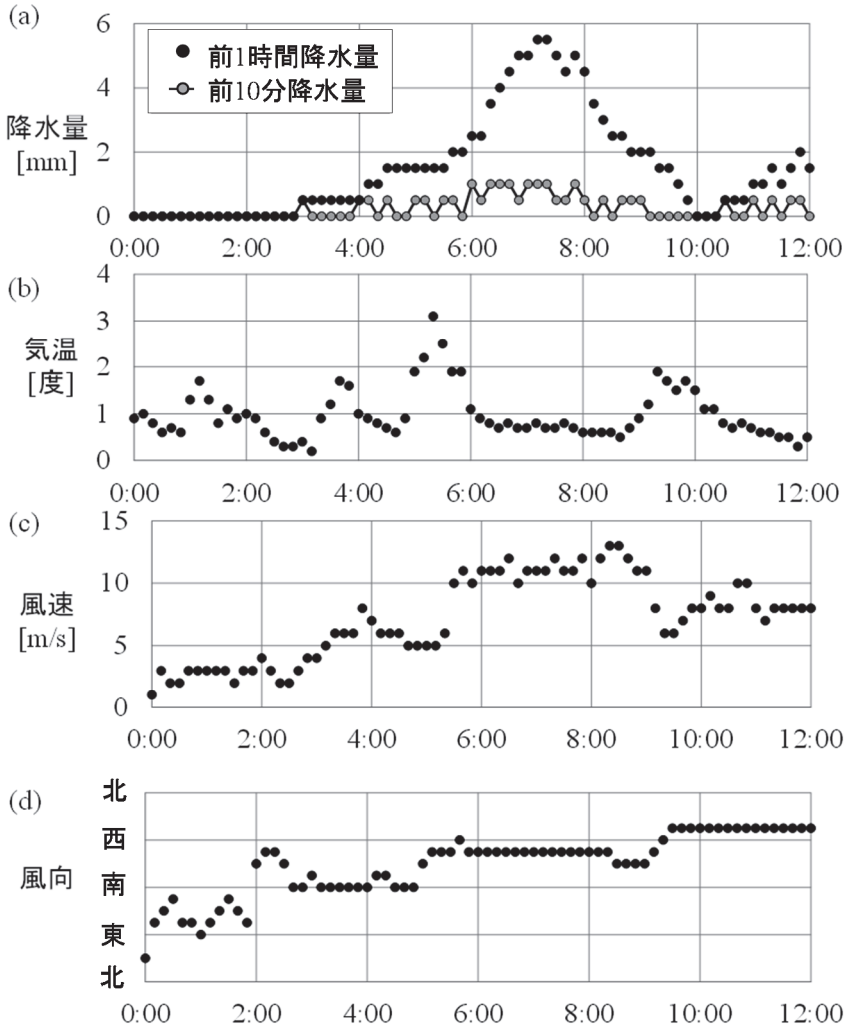


図 2.7　2005 年 12 月 22 日におけるアメダス新津での前 10 分および前 1 時間降水量, 気温, 風速，風向の時系列データ[21]

次に，新潟市から村上市にかけて比較的沿岸域で発生した塩雪害発生時の周辺気象場について分析する。分析には，塩雪害発生位置近傍の気象庁アメダス地点である中条および村上における地上アメダス観測データを用いる。前 1 時間降水量，気温，風速，風向の時系列データを図 2.8 に示す。

中条アメダスにおいて，周辺地域で塩雪害事故が発生する 16 時 50 分頃までの気象状況を以下のように整理できる。

- 9 時 30 分から 11 時 30 分まで，気温が着雪適温帯よりも 1～2 度程度高く，降水がほとんどなかったことから，この間に着雪はほとんど発達しなかったと推測される。
- 11 時 30 分前後で，急激に気温が低下したが，12 時 30 分頃まで降水量が少ないため，この間にも着雪はほとんど発達しなかったと推測される。

・その後，降水量が増え，また，着雪適温を維持し，西北西の強風も維持されていることから，12 時 30 分から 15 時頃まで圧密着雪が発達したと推測される。
・その後，降水および風速が弱まるが，気温は着雪適温を概ね維持した後に，その周辺地域で 16 時 50 分頃に塩雪害が発生したと推測される。

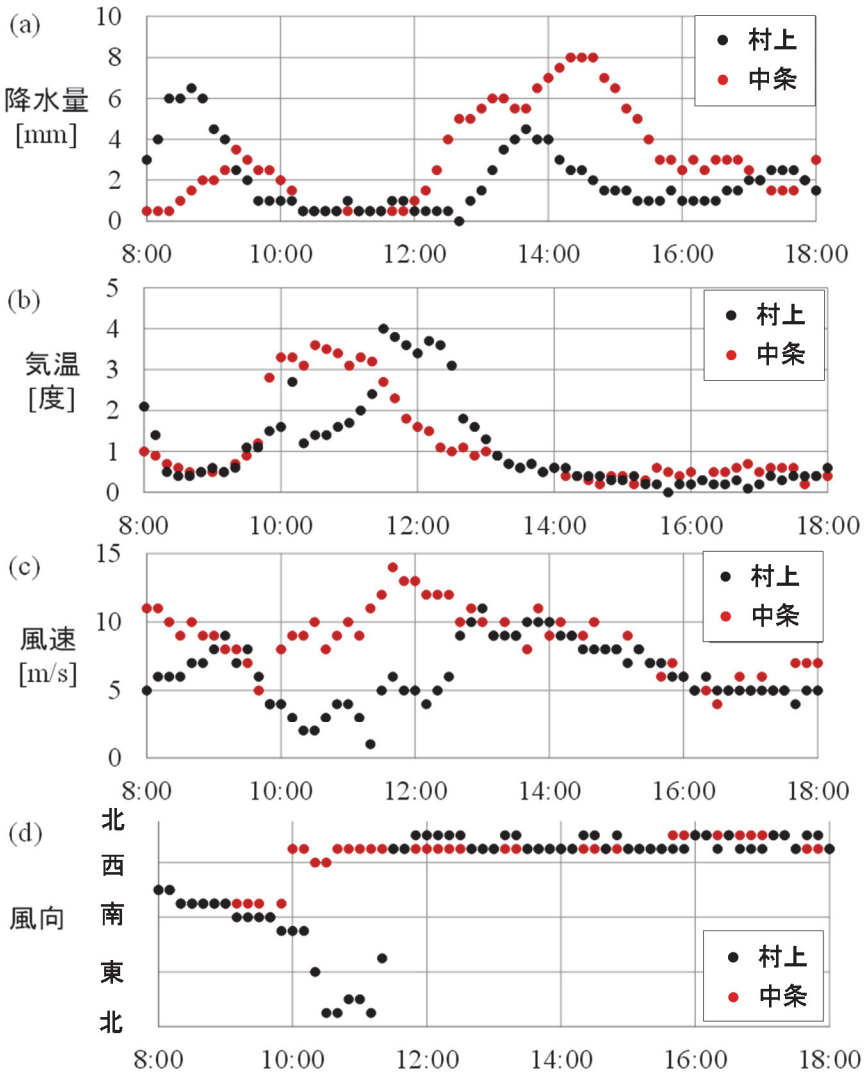


図 2.8　2005 年 12 月 22 日におけるアメダス村上，中条での前 1 時間降水量，気温，風速，風向の時系列データ[21]

村上アメダスにおいて，周辺地域で塩雪害事故が発生する 17 時 50 分頃までの気象状況を以下のように整理できる。

・9 時前後で，着雪適温条件下で，降水量が多く，また 5 m/s～10 m/s 程度の強風であったため，一時的に着雪が発達したと推測される。

・その後降水量が少なく，風速も弱まり，気温も上昇したことで，13 時頃まで着雪が発達しなかったと推測される。
・13 時から 15 時にかけて，西北西から北西の強風が見られ，また，着雪適温条件で前 1 時間降水量が 2～4 mm 程度で推移し，降水量も多かったことから，圧密着雪が発達したと推測される。
・その後降水および風速が弱まるが，気温は着雪適温を概ね維持した後に，その周辺地域で 17 時 50 分頃に塩雪害が発生したと推測される。

以上をまとめると，新潟下越雪害において塩雪害を引き起こした局所的な気象条件は下記のとおりであったと推測される。

①海側からの強風，多い降水量，着雪適温帯の条件が 2～3 時間継続したことにより圧密着雪が発達
②その後，降水量，風速が低下するが，気温が着雪適温条件を維持している間に塩雪害が発生

(2) 新潟下越雪害発生時のメソから総観スケールの気象状況および大気中を輸送される海塩の分析

上記のような地上気象観測データの分析にくわえて，新潟下越雪害発生時におけるメソから総観スケールの気象状況および大気中を輸送される海塩について，衛星画像等の観測データの分析と，気象予測・解析システム NuWFAS と領域海塩解析モデル Re-SPRAY を組み合わせた数値解析により，新潟下越雪害発生時の気象条件は以下のとおりであったことがわかった[21]。なお，メソから総観スケールでの海塩粒子の輸送については，電力中央研究所の雪害研究の一環として，木原ら[9,21]が実施した気象・海塩に関する数値解析結果を参照した。

朝鮮半島の付け根から図 2.9 に示すような日本海寒帯気団収束帯 JPCZ が見られ，複数の渦状擾乱が収束帯上に発生していた。これらの渦状擾乱が継手となって JPCZ 上で発達した対流雲である降水帯を繋いだ。渦状擾乱間を結ぶ降水帯は，能登半島の北側海上から，佐渡の南端をかすめるように東西方向へ伸び，新潟県五泉市上空を通過した（図 2.10）。そして，これらの降水帯の形状および位置は，2 時間程度ほぼ変化がなく，五泉地区周辺において継続的に降水が生じた。

一方，この東西に伸びる降水帯は，弧を描くように南北に伸びる別の降水帯と佐渡周辺で繋がっていた。この南北に伸びる降水帯は，太平洋側を北東方向へ移動する低気圧（南岸低気圧）による影響も受けたと考えられ，渦状擾乱へ伸びたものであった。これらの降水帯の形状および位置も，2 時間程度ほぼ変化がなく，中条周辺において継続的に降水が生じた。

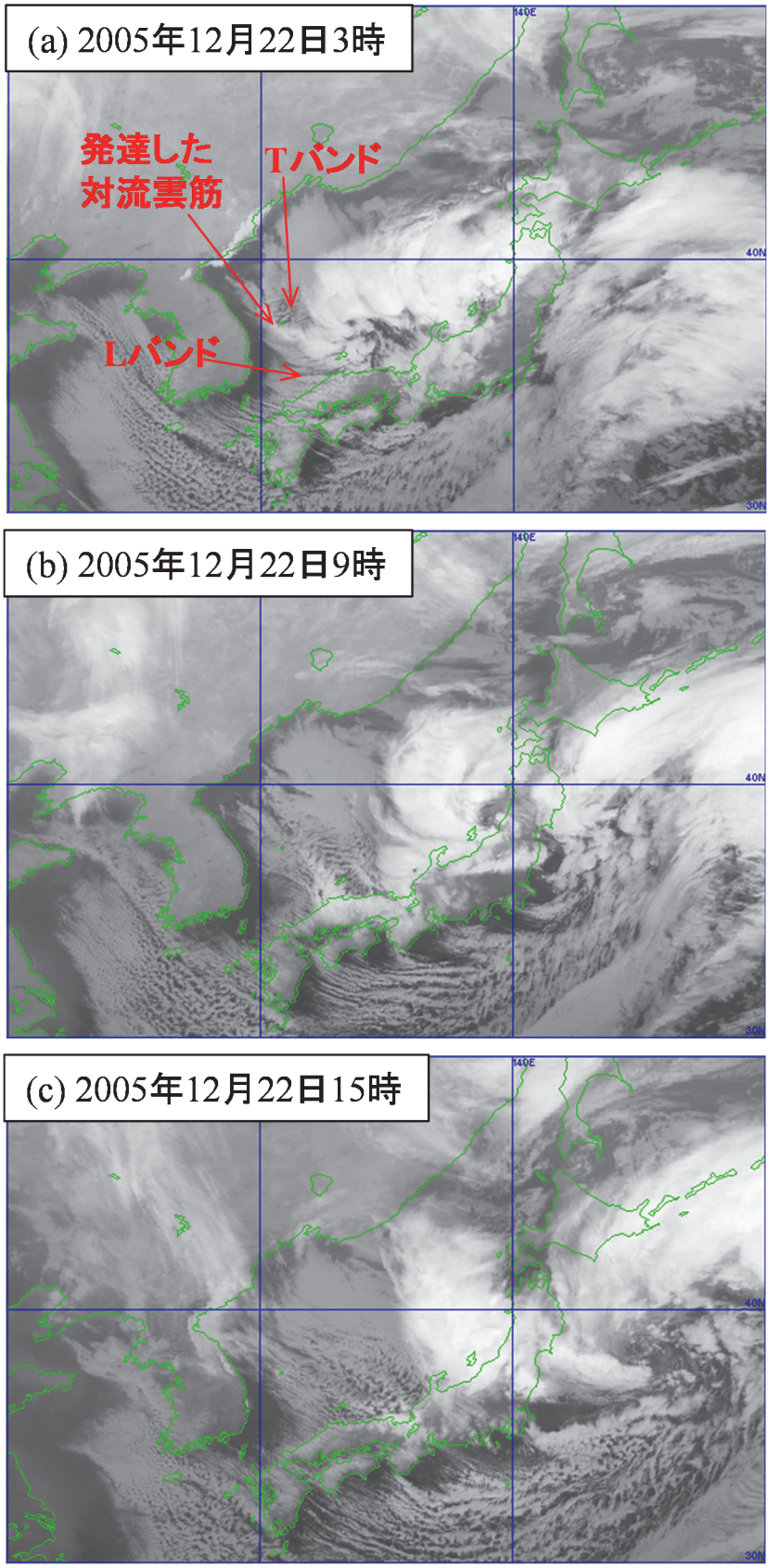


図 2.9　2005 年 12 月 22 日 3 時，22 日 9 時，22 日 15 時の衛星画像（赤外）[21]

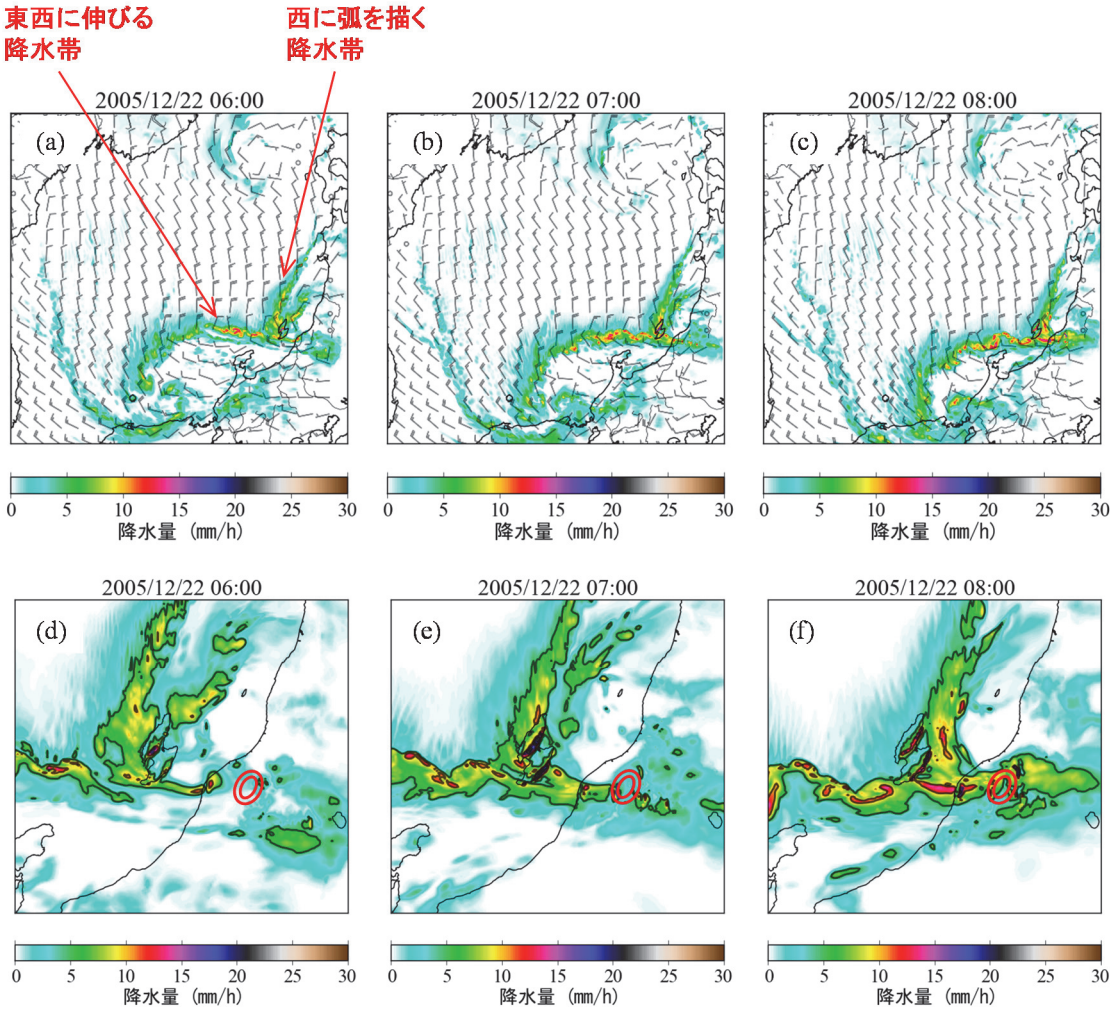


図 2.10 気象計算から得られた 2005 年 12 月 22 日 6 時，7 時，8 時における 1 時間降水量の分布（(a)-(c)は広域を，(d)-(f)は新潟周辺を図示。(a)-(c)には風速ベクトルを，(d)-(f)には降水量が 5 mm/h のコンターラインを併記。また，五泉市周辺において塩雪害が発生したエリアを赤色の◎で図示。）[21]

したがって，塩雪害を引き起こした降水は，JPCZ に伴う降水と，南岸低気圧の影響も受けた降水の両者によるもので，その結果豪雪になった可能性がある。

五泉市上空を東西方向に伸びる降水帯周辺の地上気象に着目した結果，新潟平野に見られた降水域において，その周囲よりも気温が降水の蒸発冷却によって 2 度程度低下し，さらにその南側と併せて西南西から西の強風が生じていたことがわかった。海側からの強風，高降水量，着雪適温帯の条件が五泉市周辺において 2，3 時間継続したことにより圧密着雪が発達したと推測された。

JPCZ の渦状擾乱周辺の強風域において多量の海塩が大気中に放出され，渦状擾乱周辺で上空まで海塩が輸送された。図 2.11 に示すように五泉市上空を東西方向に伸びる降水帯の強降水域のやや南側において多量の降水中海塩が新潟平野を通って内陸まで輸送されたことにより，圧密着雪の導電率が高くなり，塩雪害が発生したことがわかった。また，図 2.12 に示すように，このとき，大気中 Na^+濃度に比べて，降水中 Na^+濃度が新潟平野を通って内陸部まで高濃度の状態で流入していることも明らかとなった。

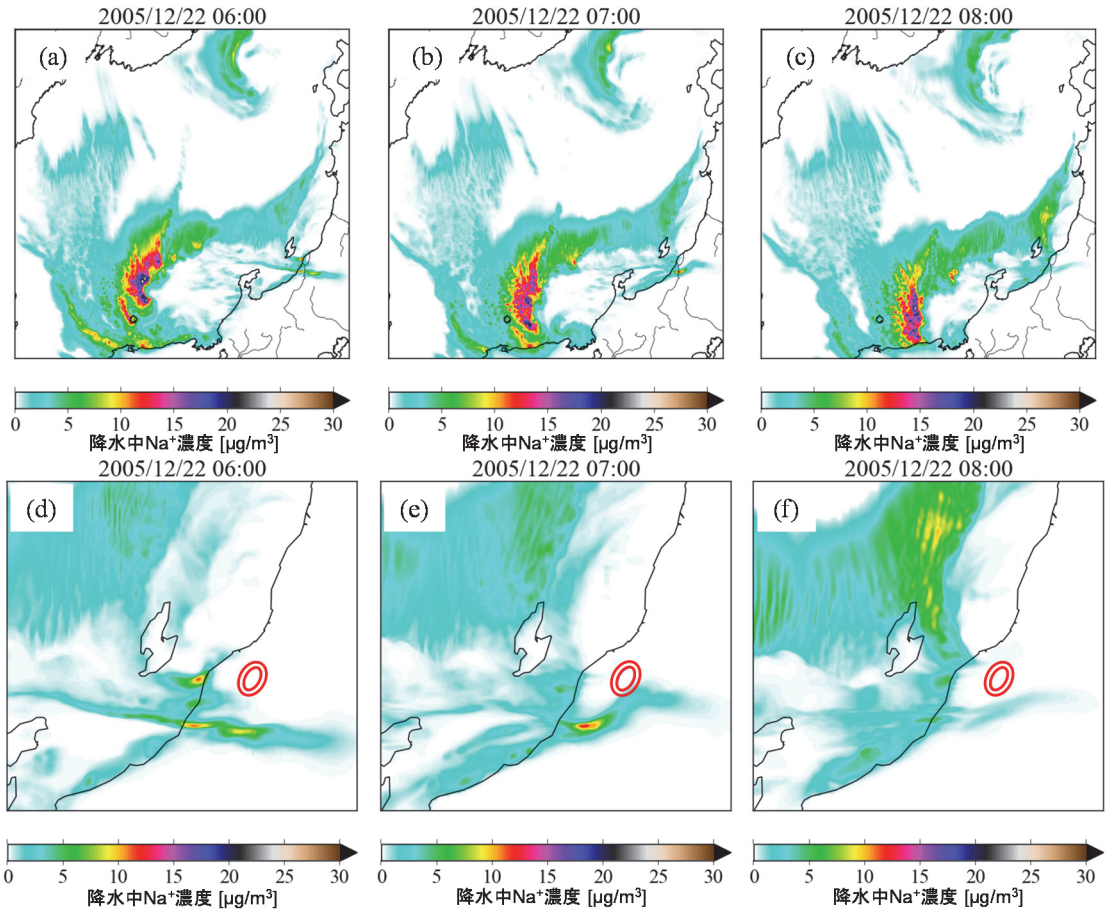


図 2.11 海塩計算から得られた 2005 年 12 月 22 日 6 時，7 時，8 時における地上近傍での降水中 Na^+濃度[μg/m3]の分布（(a)-(c)は広域を，(d)-(f)は新潟周辺を図示。五泉市周辺において塩雪害が発生したエリアを赤色の◎で図示）[21]

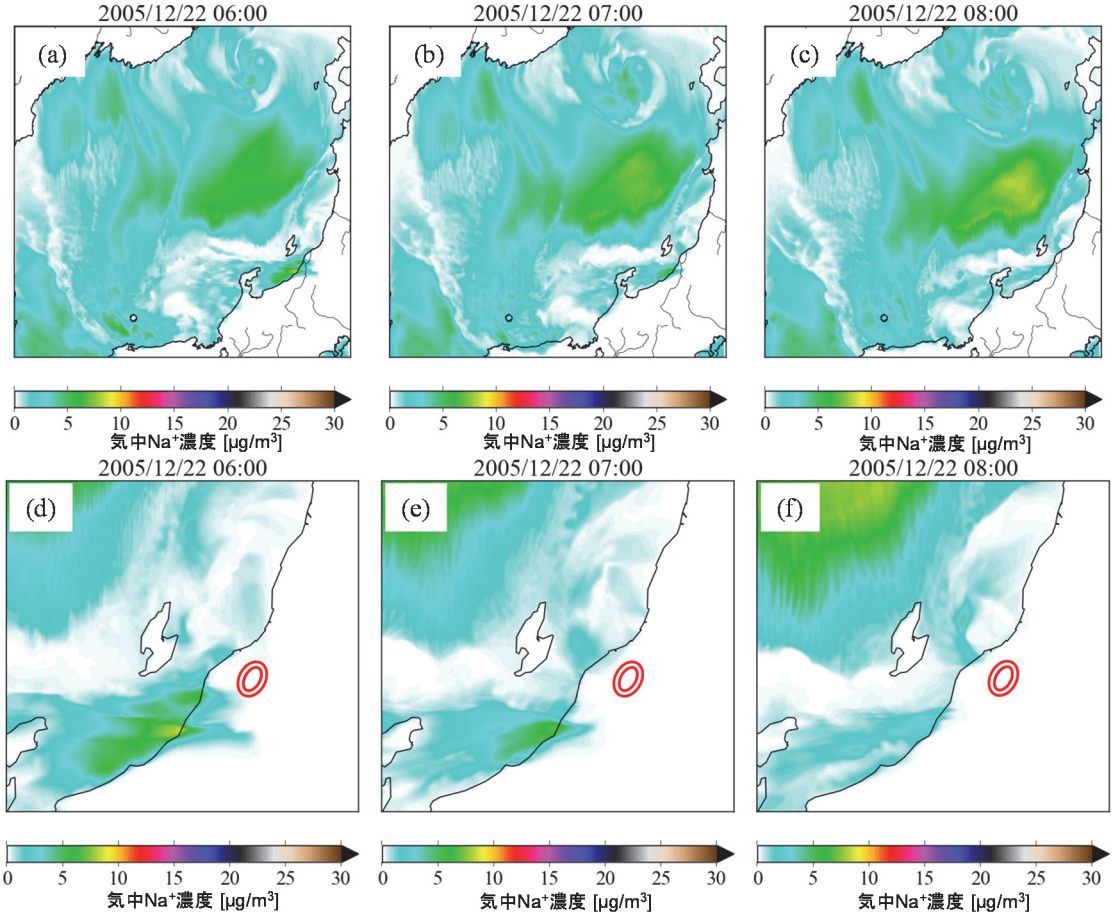


図 2.12 海塩計算から得られた 2005 年 12 月 22 日 6 時，7 時，8 時における地上近傍での気中 Na^+濃度[μg/m^3]の分布（(a)-(c)は広域を，(d)-(f)は新潟周辺を図示。五泉市周辺において塩雪害が発生したエリアを赤色の◎で図示）[21]

2.3　現地観測による暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的動態の解明

本節では，塩雪害事故の発生を受けて，発生気象条件・地形条件の解明のために実施した大気中海塩粒子・降雪に関わる現地観測の概要（2.3.1）および現地観測によって明らかとなった暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的動態（2.3.2～2.3.6）について述べる。

2.3.1 大気中粒子状物質・降雪に関わる現地観測システムの構築

(1) 現地観測システム構築の基本方針

2005 年新潟下越雪害を受けて，電力中央研究所で実施する雪害研究では，東北電力株式会社の協力の下，新潟下越雪害が発生した地域において塩雪害に関する雪害現地観測システムを設置して，現象の実態把握や対策品の効果比較検証に取り組んでいる[23]。観測システムは海塩・降雪観測とがいし着雪観測から構成されており，本論文では海塩・降雪観測について述べる。海塩・降雪観測では，塩雪害発生気象・地形条件の解明を目的として，既往の大気中・降水中の海塩や化学成分の観測結果等も踏まえ，特に 2005 年新潟下越雪害時のように，内陸部での塩雪害が発生する要因の解明には，以下のような観測が必要と判断して，測定項目・測器仕様を決定した。なお，時間分解能に関しては，2.2 で述べたとおり，塩雪害事故の発生時には，数時間程度の比較的短時間での厳しい気象条件であったことから，少なくとも数時間程度の時間分解能が必要であると判断された。一方で，国内外で展開されてきた降水や粒子状物質に関する観測ネットワークは，こうした短時間の現象の把握を想定して設計されたものではないため，既に構築されている観測ネットワークのデータからは塩雪害の発生要因や海塩の内陸への輸送過程の解明は困難と考えられた。

・降雪中・大気中の海塩粒子の同時取得
・海岸近くから内陸部に至る面的なデータ取得
・数時間程度の時間分解能のデータ取得

(2) 現地観測システムの概要と各設置機器の稼動および採取試料の分析

a. 観測地点の配置と計測項目・計測期間

そこで，2005 年新潟下越雪害時に塩雪害が発生した新潟下越地域の中から，7 ヶ所（新津，新潟，五泉，聖籠，新発田，飯豊，二王子）を選定し，2008 年度に新潟県下越地域において，降水導電率や降水・大気中粒子状物質の化学組成を観測する「海塩・降雪観測システム」[21,23-24]を構築し，2008～2015 年度の各冬季に当システムを活用してデータ取得を行った。観測地点の位置を図 2.13 に示し，各観測地点での設置機器を表 2.1 に示す。全 7 地点のうち，新潟，新津，五泉の 3 地点は，重点観測地点に位置づけ，導電率モニターによる降水導電率の連続観測に加え，降水試料および大気中粒子状物質試料の採取を行った。それ以外の 4 地点（聖籠，新発田，飯豊，二王子）は一般観測地点と位置づけ，導電率モニターのみを設置し，降水導電率のみを計測した。計測実施期間は表 2.2 に示すとおりである。また，以下に詳述する海塩・降雪観測システムにおける設置機器の外観写真を図 2.14 に示す。



図 2.13 新潟県下越地域と新発田市，五泉市の位置，および，海塩・降雪観測システムにおける各観測地点の位置（図中①～⑦の地点名および設置機器は表 2.1 に記載，図は Google Earth を元に加工）[21]

表 2.1　海塩・降雪観測システムにおける各観測地点の設置機器（位置は図 2.13 に記載）[21]

地点	地点名	分類	設置機器							
			降水サンプラー	粒子状物質サンプラー	降雪導電率モニター	複合気象センサー	温度センサー	いっ水式雨量計	粒径別粒子サンプラー	粒径分布計測装置
①	新津	重点	○	○	○	○	－	○	○	○
②	新潟	重点	○	○	○	○	－	－	－	－
③	五泉	重点	○	○	○	○	－	－	－	－
④	聖籠	一般	－	－	○	－	○	－	－	－
⑤	新発田	一般	－	－	○	－	○	－	－	－
⑥	飯豊	一般	－	－	○	－	○	－	－	－
⑦	二王子	一般	－	－	○	－	○	－	－	－

表 2.2　海塩・降雪観測システムによる 2008～2015 年度冬季の観測期間[21]

年度	実施期間				
	降水・大気中粒子状物質の試料採取	気象要素の計測	降水導電率の計測	粒径別粒子の試料採取	粒径分布の計測
2008	2008/12/18～2009/3/18	2008/12/18～2009/3/18	2008/12/18～2009/3/18	–	–
2009	2009/12/1～2010/3/20	2009/12/1～2010/3/20	2009/12/1～2010/3/20	–	–
2010	2010/12/1～2011/3/15	2010/12/1～2011/3/15	2010/12/1～2011/3/15	–	–
2011	2011/12/1～2012/3/12	2011/12/1～2012/3/12	2011/12/1～2012/3/12	–	–
2012	2012/12/14～2013/2/12	2012/12/1～2013/3/15	2012/12/1～2013/3/15	2013/1/7～2013/2/12	2013/1/7～2013/3/15
2013	2013/12/2～2014/1/25	2013/12/1～2014/3/12	2013/12/1～2014/3/12	–	–
2014	2014/12/1～2015/2/1	2014/12/1～2015/3/12	2014/12/1～2015/3/12	–	–
2015	2015/12/1～2016/1/5	2015/12/1～2016/3/12	2015/12/1～2016/3/12	2015/12/1～2016/1/5	2015/12/1～2016/3/12



図2.14　　海塩・降雪観測システムにおける設置機器の外観写真[21]

b. 降水・大気中粒子状物質の試料採取と化学分析

降水試料の採取には，1 L のポリプロピレン製容器を 6 本装填したターンテーブル付きのウェットオンリーサンプラー（小松製作所, 特注品）を用いた（表 2.1 および図 2.14 の「降水サンプラー」）。サンプラーの採取口の直径は 20 cm であり，内蔵されたヒーターにより採取部に入った降雪も融解し，下部の採水容器へ落とすように設計されている。大気中粒子状物質試料の採取には，10 ライン式ローボリュームサンプラー（東京ダイレック, GS-10N）を用いた（表 2.1 および図 2.14 の「粒子状物質サンプラー」）。大気の吸引流量を 30 L min^{-1} に設定し，φ47 mm のテフロンフィルター（Pall, Zeflour）上に粒子状物質を捕集した。降水および大気中粒子状物質の試料採取は 6 時間間隔で行った（0～6 時，6～12 時，12～18 時，18～24 時）。採取した試料は毎日 9 時に回収し，電力中央研究所の実験室（千葉県我孫子市）に速やかに運び化学分析を行った。降水試料は，孔径 0.2 μm のオレフィン系ポリマー製のフィルター（ジーエルサイエンス，GL クロマトディスク 25AI）を用いてろ過を行い，ろ液を化学分析に供した。粒子状物質を捕集したフィルターは，純水中で超音波抽出を行ったのち，抽出液をろ過したものを化学分析用試料とした。降水試料の pH はガラス電極法（東亜 DKK，HM-30R）により，導電率は電極法（東亜 DKK，CM-30R）によりそれぞれ測定した。降水試料とフィルター抽出液試料は，イオンクロマトグラフ法（ダイオネクス, ICS-1500）により，NH_4^+，Na^+，K^+，Mg^{2+}，Ca^{2+}，Cl^-，NO_3^-，SO_4^{2-}を定量分析した。

c. 気象要素の計測

重点観測地点においては，複合気象センサー（Vaisala，WXT510）を用いて風向・風速，気温，相対湿度，気圧を計測した。さらに，新津地点ではこれに加えて，地上高 10 m に風向・風速センサー（Vaisala，WMT50）と地上にいっ水式雨量計（横河電子機器，B-071）も設置した。

一般観測地点においては，縦型強制通風筒の内部に配置した白金測温抵抗体温度センサー（クリマテック社製，C-HPT-5-JM）を用いて気温を計測した。

d. 降水導電率の計測

降水導電率の計測には，導電率モニター（クリマテック，C-SRM-600）を用いた．このモニターは転倒マス式雨量計の下部に，導電率計測部を接続し，転倒マスの 1 転倒（降水量 0.5 mm）ごとに導電率を計測することで，降水量を計測すると同時に，時々刻々に変化する降水導電率も計測することができる。なお，採取口の直径は 20 cm であり，内蔵されたヒーターにより採取部に入った降雪も融解し，下部の転倒マスへ落とすように設計されている。

e. 大気中粒子状物質の粒径別採取と化学分析

粒径別粒子サンプラーには，アンダーセンサンプラー（東京ダイレック，AN-200）を採

用した（表 2.1 および図 2.14 の「粒径別粒子サンプラー」）。アンダーセンサンプラーは，多段式インパクター方式によって，粒子の径に基づく慣性力の差によって粒子を分級して捕集する装置である。粒径範囲 0.43～11 μm の粒子を 8 段のフィルターに分級捕集し，0.43 μm 以下の粒子はバックアップフィルターによってろ過捕集する。サンプリング間隔は 24 時間とし，観測期間中の毎日 9 時に試料交換を行った。粒子状物質を捕集したフィルターの抽出や化学分析は「b. 降水・大気中粒子状物質の試料採取と化学分析」と同様に行った。

f. 大気中粒子状物質の粒径分布計測

粒子濃度計測装置には，APS スペクトロメーター（Aerodynamic Particle Sizer，TSI 社，Model 3321）を採用した（表 2.1 および図 2.14 の「粒径分布計測装置」）。APS スペクトロメーターは，2 本のレーザー光を用いてレーザー間を通過する粒子の通過時間（Time Of Flight（TOF））を光学的に計測することで，装置内に導入した空気中に含まれる粒子の空気動力学径を測定する装置である。本装置を用いて，粒径 0.5～20 μm の範囲を 52 分割して大気中粒子濃度を計測することが可能である。計測間隔は 1 分間間隔に設定した。

2.3.2 冬季の新潟県下越地域での風況特性

本項では，新潟下越雪害において塩雪害が発生した五泉市に近い新津における冬季の風況特性について整理する。

本項では，圧密着雪を伴う塩雪害が発生するような強風時における風況特性の整理を対象としているため，風車型風向風速計が用いられている気象庁アメダス新津のデータを用いて風況を整理する。ただし，地上アメダスの風速計は比較的低高度に取り付けられており，さらに風況を乱す構造物等が隣接している場合がある。そのため，五泉市や新津地点よりも沿岸寄りではあるが，信頼性が高い風速データが取得されていると推測される新潟地方気象台のデータも併せて用いる。アメダス新津においては，風速計の高さが 10 m に変更された 2011 年 11 月以降のデータを評価対象として，2011 年度から 2015 年度までの各年度の 12 月 1 日から 2 月 29 日までの 1 時間間隔のデータを用いる。新潟地方気象台では風速計の高さが 2012 年 6 月 28 日に 15.0 m から 15.1 m に若干変更されたが，その変更によるデータの差異は小さいと考えられるため，2008 年度から 2015 年度までのデータを用いる。

新潟地方気象台およびアメダス新津における風速 10 m/s 以上での風向の出現頻度を図 2.15 に示す。なお，風速を 10 m/s 以上で抽出した根拠は，白波砕波の海面被覆率がおおよそ風速の 3 乗から 4 乗に比例すると言われており[25-26]，海上において風速 10 m/s 以下の条件では大気中の海塩飛散量が微小であることに基づく。また，データ整理にあたり，前後 48 時間は同一の気象イベントと見なし，各風向において同一気象イベントのデータに対しては併せて 1 回とカウントする（同一気象イベントにおける，同一風向での複数回の風速 10 m/s のデータは 1 回とカウントし，異なる風向での風速 10 m/s のデータは各々カウントする）。ここで，本データ整理において，気象イベントとは，単一の低気圧などによって引

き起こされる，顕著な強風条件を含む時間的に一連な気象状況を示す。新潟地方気象台およびアメダス新津ともに，西よりに出現が集中している。すなわち圧密着雪を伴う塩雪害が発生する危険性がある冬季強風時の風向は西寄りの風が主体的であることがわかる。

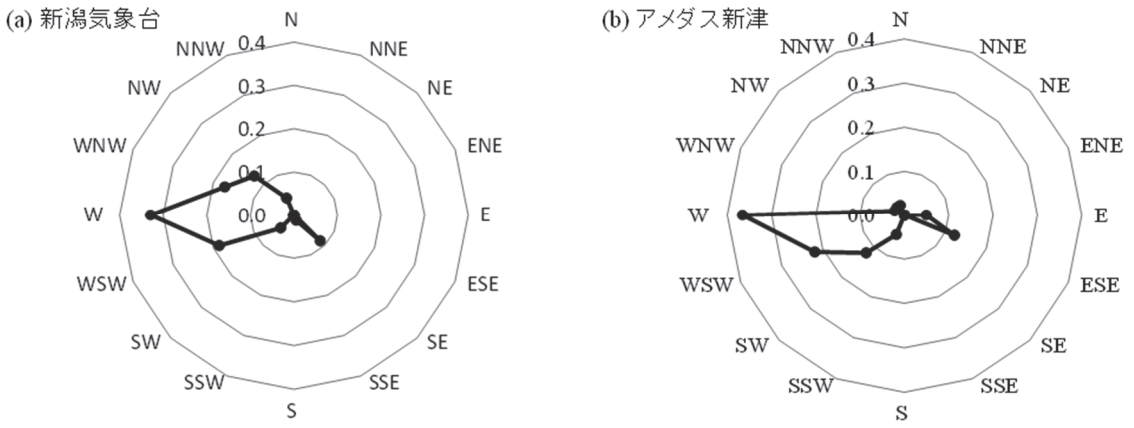


図 2.15 気象庁新潟地方気象台(a)およびアメダス新津(b)における風速 10 m/s 以上の時の風向の出現頻度[21]

西南西から西北西にかけての風速 10 m/s を超える日付を表 2.3 に示し，新潟地方気象台またはアメダス新津において風速 12 m/s 以上のイベントに対しては気象擾乱も追記する。なお，アメダス新津において強風イベントを抽出した結果，表 2.3 で示したイベントと概ね一致した。風速 12 m/s 以上では，2.2 で述べたように 2005 年新潟下越雪害時に認められた、二つ玉低気圧もしくは JPCZ のどちらかの気象条件を伴っている場合が多い。このことから，上記気象条件における日本海上の低気圧の影響によって新津付近で西南西，西，西北西の風向において強風が生じやすいことがわかる。

2.3.3 降水導電率データの特徴

(1) 一冬季における降水導電率の変動

1 冬季における導電率観測データの特徴について，2014 年度冬季を例に述べる。2014 年度冬季においては，重点観測 3 地点における降水試料および大気中の粒子状物質試料の採取期間は，2014 年 12 月 1 日から 2015 年 2 月 1 日までの 63 日間であった。12 月 1 日から 2 月 1 日までの期間中に，新潟県下越地域（観測地点の位置する新潟市，新発田市，五泉市，聖籠町を対象）においては，気象庁により暴風雪警報や大雪警報，暴風警報が発令される気象条件が 3 回見られた[27--29]。12 月 1 日～2 日には新潟市，新発田市，五泉市，聖籠町において暴風警報が発令された。12 月 6 日には，新潟市，新発田市，五泉市，聖籠町において大雪警報が発令され，12 月 16 日～18 日および 12 月 31 日～1 月 1 日には，新潟市，新発田市，聖籠町において暴風雪警報が発令された。

表 2.3　新潟地方気象台において西南西から西北西の風向（時計回り）で 10 m/s を超える風速の気象イベントの日付（新潟地方気象台もしくはアメダス新津において風速 12 m/s 以上の気象イベントに対しては，気象擾乱も併記）[21]

日付	気象擾乱(風速 12m/s 以上のみ記載)	海塩・降雪観測システムのデータの有(✓)・無(-)
2008 年 12 月 11 日		-
2008 年 12 月 28 日		✓
2009 年 2 月 20 日		✓
2009 年 12 月 6 日		✓
2009 年 12 月 20 日		✓
2010 年 1 月 1 日	JPCZ	✓
2010 年 1 月 5 日		✓
2010 年 1 月 13 日	JPCZ	✓
2010 年 12 月 4 日	日本海上に低気圧	✓
2010 年 12 月 25 日		✓
2011 年 1 月 29 日		✓
2012 年 12 月 6 日	JPCZ	-
2012 年 12 月 25 日		✓
2013 年 1 月 2 日		✓
2013 年 1 月 25 日		✓
2013 年 2 月 8 日		✓
2013 年 2 月 24 日		-
2013 年 12 月 13 日	二つ玉低気圧	✓
2014 年 12 月 2 日	JPCZ	✓
2014 年 12 月 17 日	JPCZ，二つ玉低気圧	✓
2015 年 1 月 7 日		✓
2015 年 2 月 10 日	日本海上に低気圧	-
2015 年 2 月 13 日	日本海上に低気圧	-
2015 年 12 月 4 日	JPCZ、二つ玉低気圧	✓
2016 年 1 月 19 日	二つ玉低気圧	-

図 2.16 は，この 2014 年 12 月～2015 年 2 月の観測期間に，重点観測 3 地点（新潟，新津，五泉）において採取した降水試料の導電率の経時変化を示したものである。なお，図中の各降水試料の雨雪判別は，杉本ら[30]および大原ら[24]を参照して行った。また，6 時間ごとの試料採取期間の降水量が 1 mm 以上の降水のみを示している。

図 2.16 から明らかなように，降水の導電率は 12 月から 2 月にかけて，200 μS/cm を超える値が 16 回認められた。なお，後述するように，新潟下越雪害事故時にがいしに付着した雪の導電率の最大値である 200 μS/cm を，導電率の高低を判断する目安としている[1]。これら 200 μS/cm 以上の導電率が複数の観測地点で同時(6 時間ごとに見て地点間の一致を整理)に観測された降水イベントは，①2014 年 12 月 2 日 0～6 時の新潟地点と新津地点，②2014 年 12 月 2 日 6～12 時の新潟地点，新津地点，五泉地点，③同日 12～18 時の新潟地点，新津地点，五泉地点で計 3 回見られた。

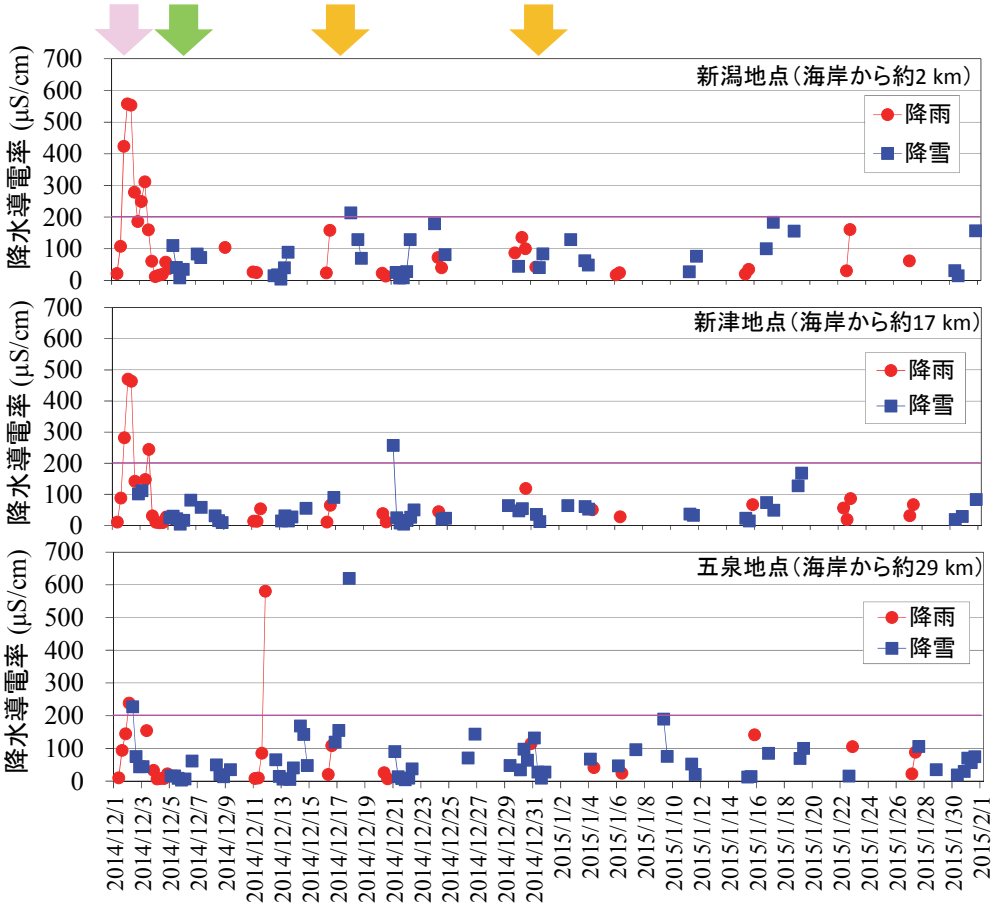


図 2.16 2014 年 12 月 1 日から 2015 年 2 月 1 日に重点観測 3 地点（新潟，新津，五泉）で採取した 6 時間ごとの降水試料の導電率の観測結果（各地点での温度，湿度の観測結果をもとに雨雪判別式により降水データを降雪(青)，降雨(赤)に区分，図上部の矢印は，観測地点（新潟市，新発田市，五泉市，聖籠町）での暴風雪警報 2 回（橙矢印），大雪警報 1 回（黄緑矢印），暴風警報 1 回（桃矢印）発令を示す）[21]

また，同一地点で 200 μS/cm を超える導電率が 2 採取期間（12 時間）以上連続した事例は，①2014 年 12 月 2 日 0～24 時（4 採取期間）の新潟地点，②2014 年 12 月 3 日 6～18 時（2 採取期間）の新潟地点，③2014 年 12 月 2 日 0～18 時（3 採取期間）の新津地点，④2014 年 12 月 2 日 6～18 時（2 採取期間）の五泉地点で計 4 回見られた。しかしながら，この 4 例については，図 2.16 の雨雪判別の結果から，連続して 200 μS/cm を超える導電率の降水試料の一つもしくは全てが降雨であった可能性が高い。なお，2009 年度および 2012 年度の観測では，200 μS/cm 以上の値が 12 時間以上継続するような降雪イベントがみられた。

上記のように，導電率は 1 冬季の間でも大きく変動しており，観測期間の大半は，概ね 100 μS/cm 以下の値ではあるが，6 時間間隔の 3 地点における採取で，1 冬季に数回～十数回の 200 μS/cm 以上の値を示すことが特徴である。また，この特徴は，他の冬季においても，おおむね同様に見られた。

(2) 導電率モニターによって得られる降水導電率の特徴

先述の通り，導電率モニターは，転倒ます式雨量計の下部に導電率計測部を接続することで，転倒マスの 1 転倒（降水量 0.5 mm）ごとに導電率を計測し，時々刻々に変化する降水導電率をリアルタイムに計測することができる。また，同装置は，電力中央研究所で展開する「海塩・降雪観測システム」のほかに，東北電力株式会社においても新潟支店管内の 6 地点での観測に用いられており，本計測データも検討に用いる。以下では，上記観測によって得られた降水導電率データを整理し，導電率モニターによって得られる降水導電率の特徴を評価する。

a. 降水導電率モニター計測値の妥当性および降水初期の高導電率

まず，導電率モニターの計測値の妥当性を確認するため，降水サンプラーによる計測値と比較を行う。降水サンプラーは降水時のみ採取口の蓋が開くため，無降水時の採取口への粒子状物質等の乾性沈着の影響を排除でき，常時開放された採取口を用いる導電率モニターに比べ，機器の構造上，実際の降水導電率をより正確に捉えられると考えられる。図 2.17 は，2010 年 12 月 21～31 日の新潟，新津，五泉地点における導電率モニターと降水サンプラーによる降水導電率の時系列変動を比較したものである。なお，降水サンプラーの導電率は，導電率モニターとの時系列変動の比較において降水サンプラーのデータが少なくなりすぎぬよう，6 時間あたりの降水量が 1 mm 以下のものも示し，時間的な連続性を損なわぬようにした。全体として，導電率モニターと降水サンプラーによる降水導電率の計測値は一致している。この両計測値の一致は，他の観測期間においても同様に見られた。

次に，導電率モニターによる計測値において，降水開始前の採取口への汚損がどの程度影響するか調べるため，採取口を純水で洗浄し（採取口洗浄実験），出力される導電率について評価を行う。図 2.18 は，導電率モニターの測定時における水の流れと，採取口洗浄実験における純水での吹き付け箇所を示す。採取口洗浄実験では，導電率モニターの採取口

に，霧吹きを用いて純水を吹き付け清浄な降水を模擬し，洗浄水の出力導電率を調べた。図 2.19 は，2013 年 4 月 9 日に実施した導電率モニターの採取口洗浄結果を示す。横軸は 0.5 mm ごとに計測される降水量の積算値である。地点によって，初期の導電率のレベルには 70.8～232.5 μS/cm とばらつきが見られるが，いずれの地点でも，採取口洗浄中の累積降水量が多くなるほど導電率が低くなる傾向を示した。また，いずれの地点も，おおむね累積降水量 3 mm 以上となると，十数 μS/cm 以下の低いレベルで一定となった。この結果は，導電率モニターの採取口が常時開放されていることによって，非降水時に大気中の粒子状物質等が雨量計のロート部に乾性沈着し，採取口洗浄の初期にこれらが洗浄水に洗い流されることで，測定値が本来の導電率よりも高い値を示していたと解釈される。

一方で，既往研究においては，降水時のみ蓋が開放されるタイプの降水サンプラーによる計測例においても，降水初期に降水中の各種成分濃度が降水中・後期よりも相対的に大きな値を示し，降水継続とともにその濃度が急激に低下する例が数多く報告されている[31-36]。このため，導電率モニターで見られる初期降水の高導電率は，降水開始前の採取口への汚損だけが原因ではなく，実際の降水導電率の時間変動を反映した結果でもあると考えられる。

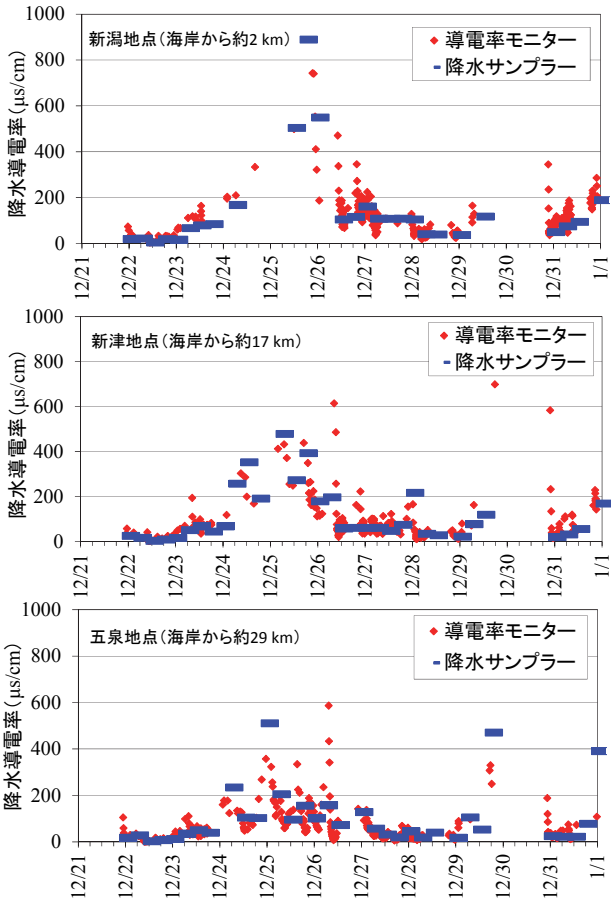


図 2.17 2010 年 12 月 21 日～31 日における導電率モニターと降水サンプラーによる降水導電率の時系列変動の比較[21]

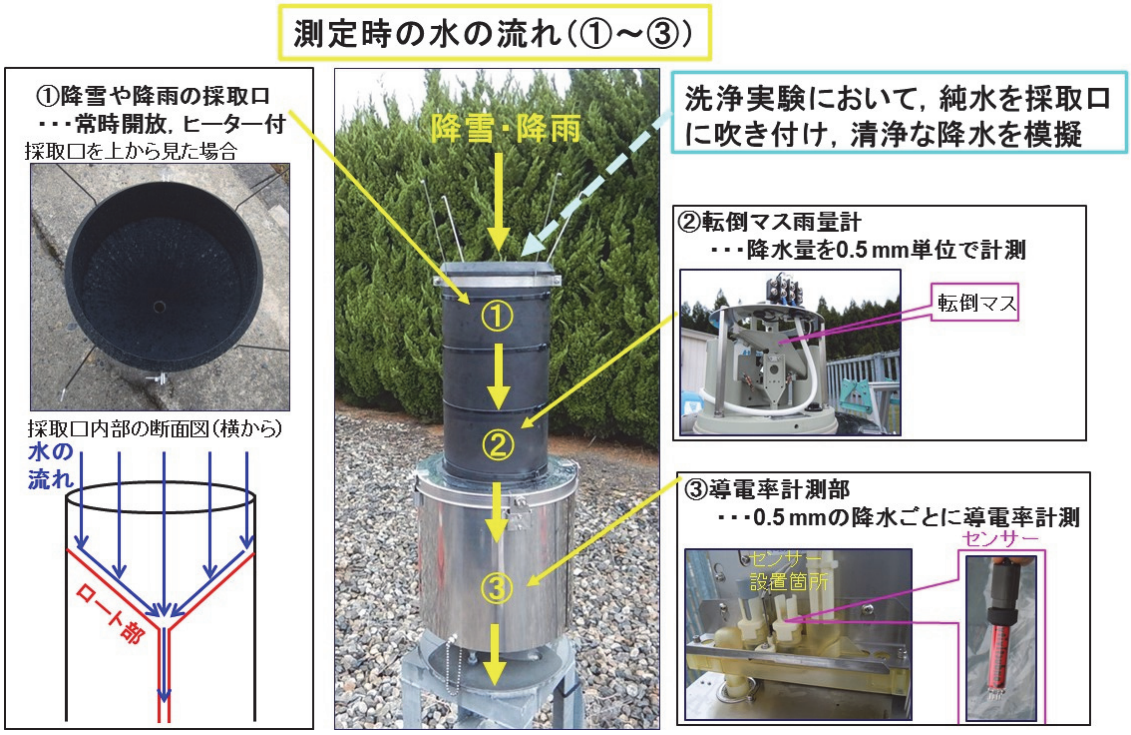


図 2.18 導電率モニターの測定時における水の流れと，採取口洗浄実験における純水の吹き付け箇所[21]

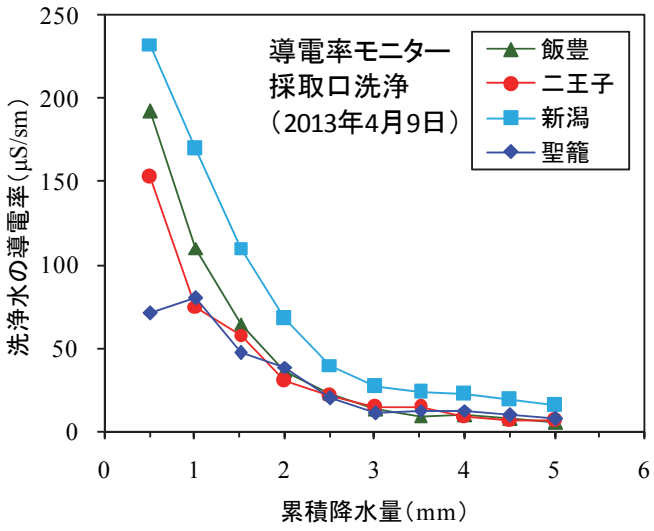


図 2.19 導電率モニターの採取口の純水による洗浄結果[21]

その点について，導電率モニターと降水サンプラーによって計測される降水導電率の詳細な時間変動から評価を行う。図 2.20 は，2011 年 2 月 27～28 日における導電率モニターと降水サンプラーによる降水導電率の時系列データを示したものである。導電率モニター（降水量 0.5 mm 毎）と降水サンプラー（6 時間間隔）では計測間隔が異なるが，この期間には，両計測値ともに，降水イベント初期に導電率が高く，降水が継続するとともに急激に導電率が低下する傾向を示した。降水サンプラーは上述の通り無降水時における採取口への粒子状物質等の乾性沈着の影響はないと考えられるため，この事例では実際の降水導電率においても初期降水の高導電率が観測されたと判断される。また，降水サンプラー計測値で見られたこの時間変動は，上述した既往研究の計測例において報告されている降水中の各種成分濃度の時間変動[31-36]と整合する。なお，この傾向は，電力中央研究所の計測において降雨時に限らず降雪時にも確認された。

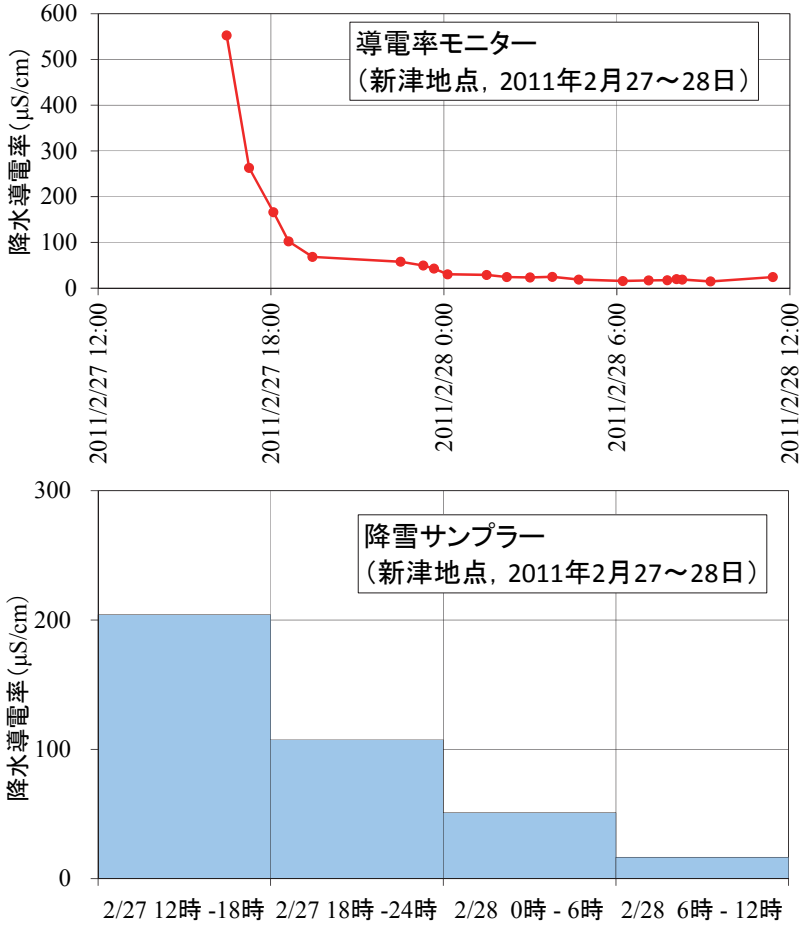


図 2.20 2011 年 2 月 27～28 日における導電率モニターと降水サンプラーによる降水導電率の時系列変動の比較[21]

図 2.18～図 2.20 に示した結果を総合すると，導電率モニターの計測値は，降水イベント初期に相対的に高いレベルを示すことがあるが，これは，①導電率モニターの採取口が常時開放されているために無降水時に乾性沈着した粒子状物質の影響とともに，②既往研究での降水中成分濃度の一般的な時間変動[31-36]（初期降水は濃度が高い）から類推される実際の降水導電率の時間変動，の両者を反映したものである可能性がある。いずれの要因が作用しているかを判断するにはより詳細な解析が必要となるが，いずれにせよ，これまで得られている観測結果からは，このようなタイプの降水導電率の上昇は，降水イベントによって変動はあるものの，おおむね降水量 2～3 mm 程度で数十 μS/cm 以下の相対的に低い値に低下する傾向が認められている。

導電率モニターを用いて塩雪害懸念の気象を評価する際には，下越雪害事故時にがいしに付着した雪の導電率の最大値である 200 μS/cm[1]が，その高低を判断する上での一つの基準として考えられる。しかしながら，図 2.18～図 2.20 に関する検討を踏まえると，一律に 200 μS/cm を超えたかどうかで塩雪害懸念を判断するのではなく，計測手法に基づくデータ特性や実際の降水導電率の特性から，はじめの降水量 2 mm 程度は高い導電率となることを考慮した判断が必要となる。

b. 高い降水導電率の出現パターン—導電率の変動パターン，地域—

前述の検討結果を考慮すると，降水導電率の時系列変動については，200 μS/cm 以上の高導電率の出現パターンがおおむね二つに大別できる。一つは降水開始後初期に 200 μS/cm 以上の降水が生じるパターン（パターン A）であり，もう一つは，降水開始後中期・後期に 200 μS/cm 以上の降水が生じるパターン（パターン B）である。図 2.21 は両パターンの典型例を示す。上述の通り，降水開始後初期に 200 μS/cm 以上の降水が生じるパターン A では，200 μS/cm 以上の高い導電率が継続する降水量がおおむね 2～3 mm 程度であり，図 2.21 では 200 μS/cm 以上を示す降水量が 2.0 mm カウントされている。一方，降水開始後中期・後期に 200 μS/cm 以上の降水が生じるパターン B では，図 2.21 においては 200 μS/cm 以上を示す降水量が 9.5 mm カウントされており，降水イベントによって 200 μS/cm 以上を示す降水量にはばらつきがあるものの，全体として前者のパターン A よりも高導電率の降雪が多量にもたらされる傾向にある。

図 2.22 は，2016 年 1 月 19 日（暴風雪警報発令）の前後期間での下越地域 7 地点における導電率モニターによる降水導電率計測結果を示す。1 月 18 日以降，断続的に降り続いていた降水は，1 月 18 日 23 時頃より導電率が上昇し始めた。上昇した導電率は 1 月 19 日 5 時～6 時頃にピークを示し，1 月 19 日 7 時頃までは，全 7 地点において 100 μS/cm 以上を超える高いレベルで推移し，200 μS/cm 以上を超える導電率も多く見られた。図 2.22 中の枠で囲った期間はパターン B の高導電率が見られる箇所である。高導電率上昇のピーク時以外の期間では，地点によって導電率の変動に差が見られたものの，パターン B のような導電率上昇は，7 地点で同時期に認められ，この傾向は，その他の期間においてもほぼ同様に認

められた。

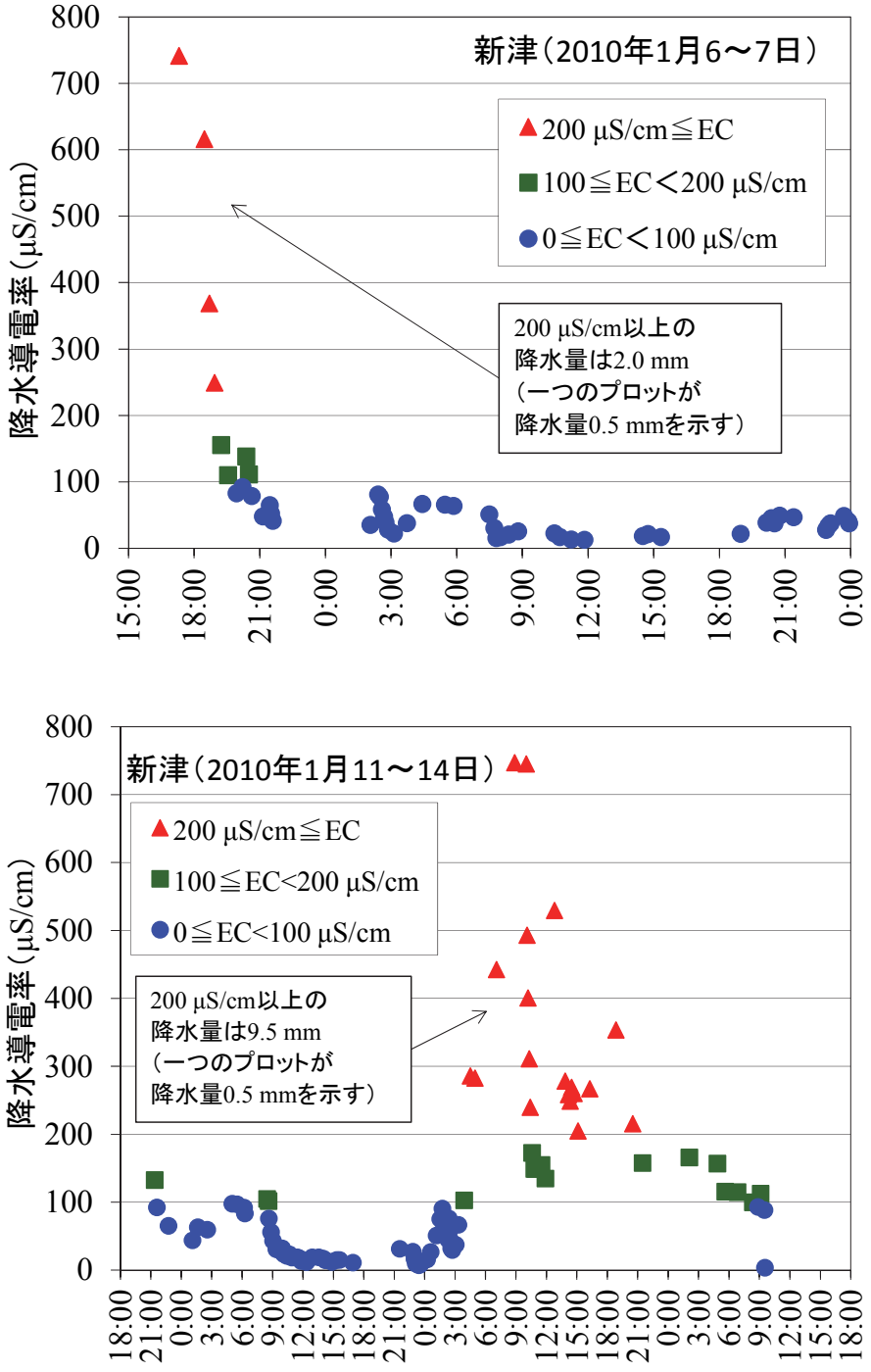


図 2.21 降水導電率の時系列変動の典型的パターン（上図：降水開始後初期パターン例（パターン A），下図：降水開始後中期・後期パターン例（パターン B）），降水導電率（EC）のプロットは 3 つのレベル（青丸：0～100 μS/cm；緑四角：100～200 μS/cm；赤三角：200 μS/cm 以上）別に示す）[21]

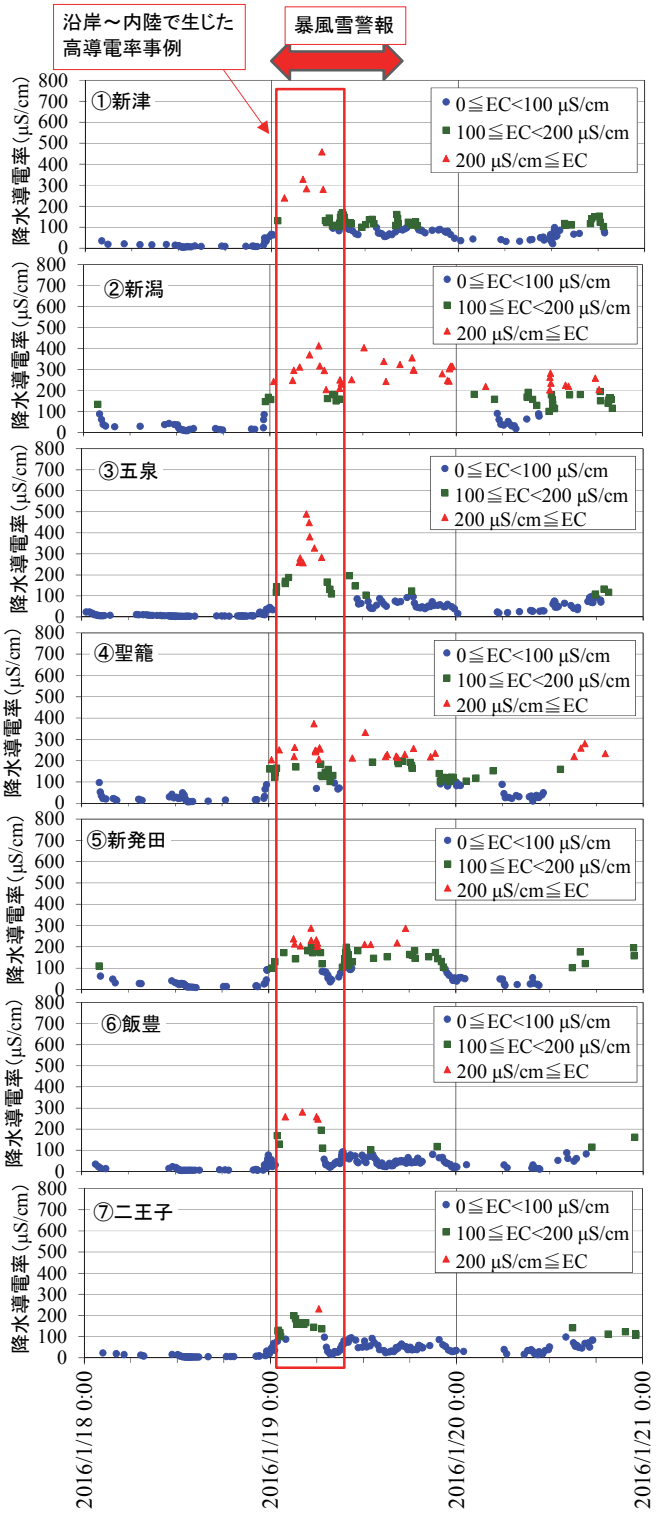


図 2.22 2016 年 1 月 19 日（暴風雪警報発令）の前後期間での下越地域 7 地点（新潟，新津，五泉，聖籠，新発田，飯豊，二王子）における導電率モニターによる降水導電率計測結果（降水導電率（EC）のプロットは 3 つのレベル（青丸：0～100 μS/cm；緑四角：100～200 μS/cm；赤三角：200 μS/cm 以上）別に示す）

図 2.23 は，2013 年 12 月～2014 年 3 月の新潟県の上・中・下越の代表地点における降水導電率の時系列変動を示したものである。上・中越のデータは先述した東北電力株式会社による同新潟支店管内の 6 地点における導電率計測データから 2 地点分（大島地点（上越地域）および三条地点（中越地域））を示す。なお，降水導電率（EC）のプロットは 3 つのレベル（青丸：0～100 μS/cm；緑四角：100～200 μS/cm；赤三角：200 μS/cm 以上）別に示している。図 2.23 中の枠で囲った期間はパターン B の高導電率が見られる箇所であり，それ以外の 200 μS/cm 以上の導電率はパターン A である。降水導電率における経時変化の全体的な傾向は，①降水の生じる時期，および，②降水導電率のレベル，の 2 点において，上・中・下越の 13 地点（電力中央研究所 7 地点＋東北電力 6 地点）間でおおむね一致する傾向が見られ，この傾向は，その他の期間においてもほぼ同様に認められる。特に，パターン B では地点によらず新潟県全体で高導電率がある程度まとまった降水量でもたらされる傾向にある。

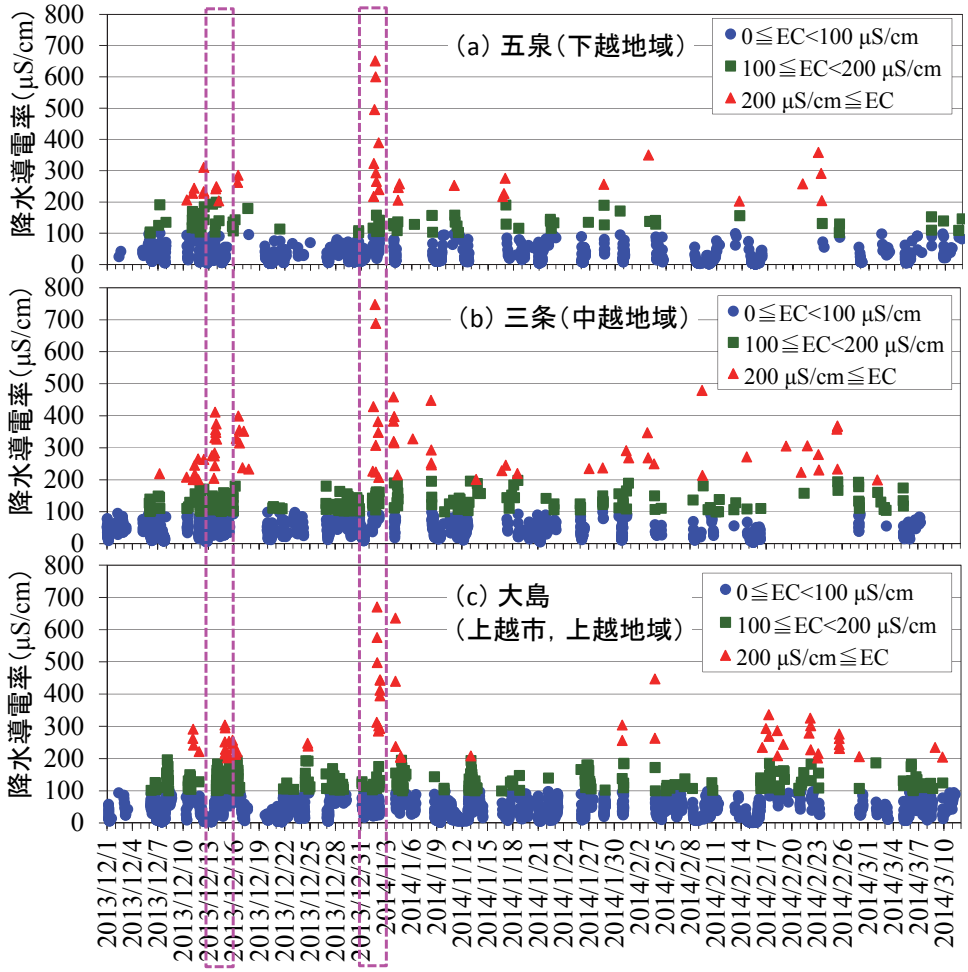


図 2.23 上・中・下越地域での降水導電率の経時変化（2013 年 12 月～2014 年 3 月，降水導電率（EC）のプロットは 3 つのレベル（青丸：0～100 μS/cm；緑四角：100～200 μS/cm；赤三角：200 μS/cm 以上）別に示す）[21]

2.3.4　大気中粒子・降水の海塩／非海塩成分における風向・風速依存性の相違

本項では，前述の観測システムにおける重点観測 3 地点において実施した，海塩・降雪に関する 3 年間（2008 年度～2010 年度）の連続観測データを対象に，大気中粒子・降水の成分による風向・風速依存性を評価した[37-38]。評価にあたっては，Na^+と非海塩性 SO_4^{2-}（$nss\text{-}SO_4^{2-}$）を海塩成分と非海塩性分の指標とした。また，風向は，データ数が比較的多く，かつ，風速に対する上昇／低下の傾向が明瞭な風向として，海からの風向として北西（292.5°～337.5°），陸からの風向として南（157.5°～202.5°）を選び，詳細に検討する。また，大気中粒子成分の風向・風速依存性については，粒径別の成分濃度や粒径分布の計測データから，要因の考察を行う。

(1) 検討データ

大気中粒子・降水の成分の検討データとして，2008 年度～2010 年度の各年の 12 月上旬～3 月中旬に，重点観測 3 地点（新潟，新津，五泉）において採取した降水 941 試料を，杉本ら[30]によって提案された雨雪判別式を用いて，降雨 433 試料，降雪 508 試料に区分した。また，風速，風向は新津地点での観測値を用いた。また，6 時間ごとの試料採取期間あたりの降水量が 1 mm 以上の降水試料を検討の対象とした。

(2) 大気中粒子の海塩／非海塩成分における風向・風速依存性の相違

a. 海風時／陸風時によって異なる大気中粒子の海塩／非海塩成分における濃度の風速依存性

図 2.24 と図 2.25 は，北西（292.5°～337.5°）からの風向における大気中 Na^+濃度・大気中 $nss\text{-}SO_4^{2-}$濃度と風速の関係を示す。沿岸～内陸の 3 地点ともに，風速が強くなるほど大気中 Na^+濃度が単調に増大する傾向が認められた。この風速増大に対する大気中 Na^+濃度増大の傾きは，海岸からの距離が短い地点ほど大きい傾向を示した。一方で，大気中 $nss\text{-}SO_4^{2-}$濃度は，3 地点ともに，風速が強くなるほど大気中 Na^+濃度が単調に低下する傾向が認められた。また，図 2.26 と図 2.27 は，南（157.5°～202.5°）からの風向における大気中 Na^+濃度・大気中 $nss\text{-}SO_4^{2-}$濃度と風速の関係を示す。沿岸～内陸の 3 地点ともに，風速が強くなるほど大気中 Na^+濃度が単調に低下する傾向が認められた。同様に，大気中 $nss\text{-}SO_4^{2-}$濃度も，3 地点ともに，風速が強くなるほど低下する傾向が認められた。観測された大気中 Na^+濃度・大気中 $nss\text{-}SO_4^{2-}$濃度の風速依存性は先行研究[39-43]で報告されている傾向と一致していた。

b. 大気中粒子の海塩／非海塩成分濃度と海岸からの距離との関係に与える風速の影響

上述の風速依存性に関連して，海岸からの距離と大気中 Na^+濃度・大気中 $nss\text{-}SO_4^{2-}$濃度の関係についても検討する[37]。図 2.28 は，北西（292.5°～337.5°）からの風向における大気中 Na^+濃度と海岸からの距離の関係を風速レベルごとに区分して示す。大気中 Na^+濃度は，どの風速レベルにおいても，海岸に近い地点で高く，内陸に進むにつれ低下する傾向を示し

た。3 地点ともに風速が上昇すると大気中 Na^+濃度も増大する傾向を共通して示すものの，その増大程度は沿岸の地点ほどが大きいため，風速 6 m/s 以上では，沿岸から内陸への大気中 Na^+濃度の減衰が，風速が強くなるほど急激な低下を示した。図 2.29 は，北西（292.5°～337.5°）からの風向における大気中 nss-SO_4^{2-}濃度と海岸からの距離の関係を風速レベルごとに区分して示す。風速が上昇すると，大気中 nss-SO_4^{2-}濃度が低下し，どの風速レベルにおいても，海岸からの距離によらず濃度が一定となる傾向を示した。

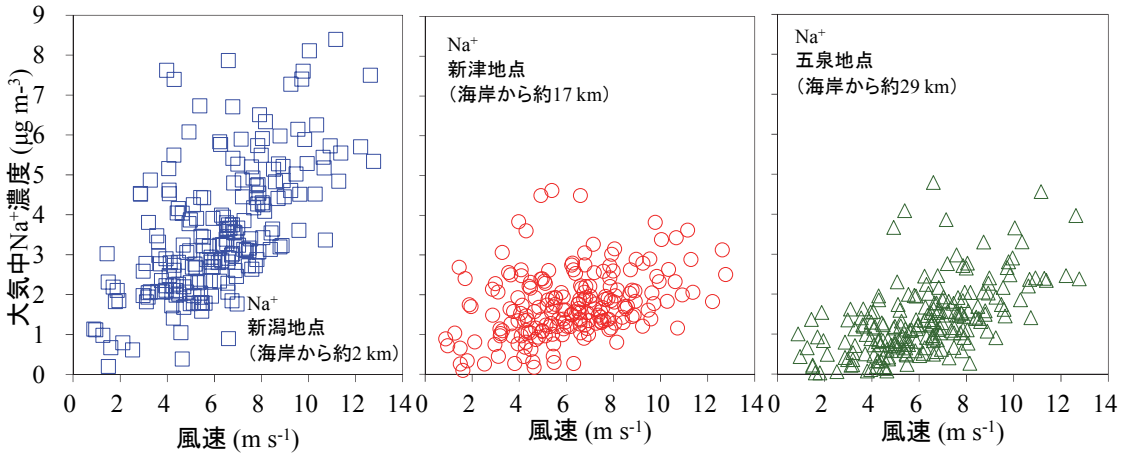


図 2.24 北西風向（292.5°～337.5°）での大気中 Na^+濃度と風速の関係[37-38]

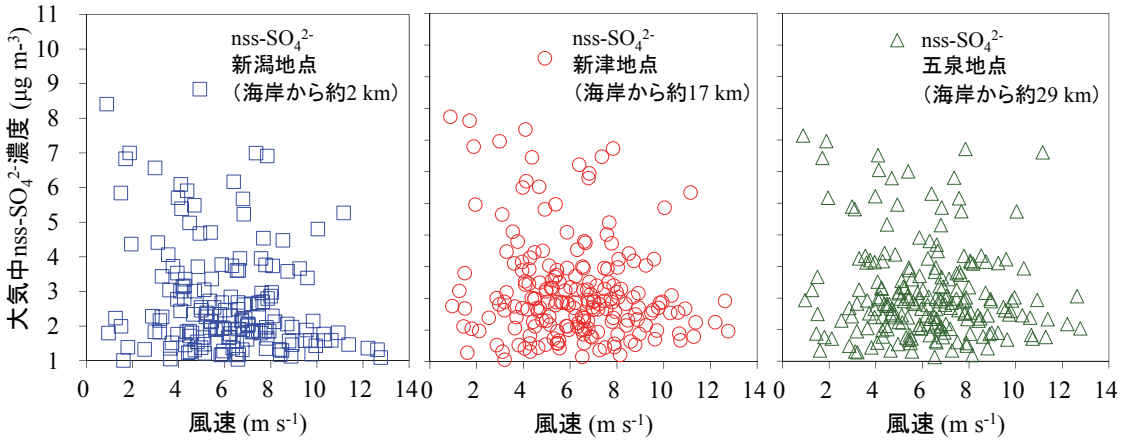


図 2.25 北西風向（292.5°～337.5°）での大気中 nss-SO_4^{2-}濃度と風速の関係[37-38]

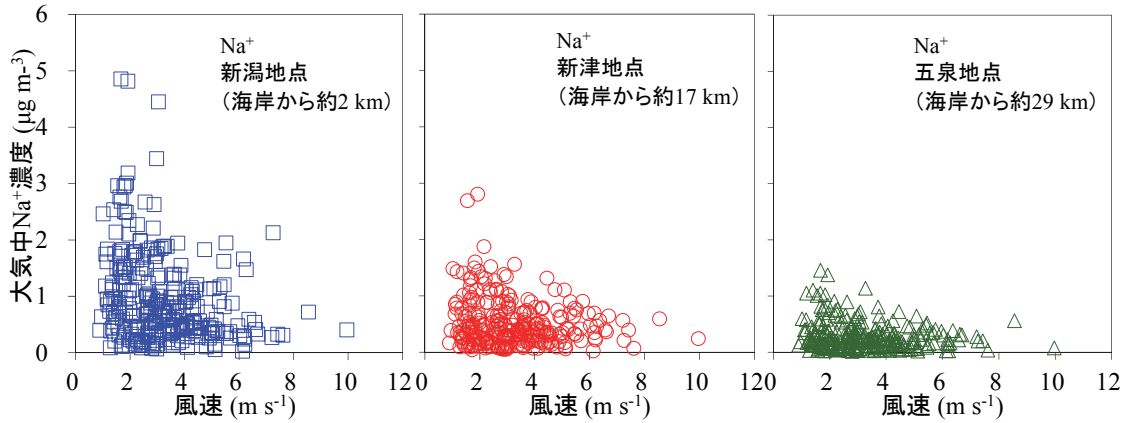


図 2.26 南風向（157.5°～202.5°）での大気中 Na^+濃度と風速の関係[37-38]

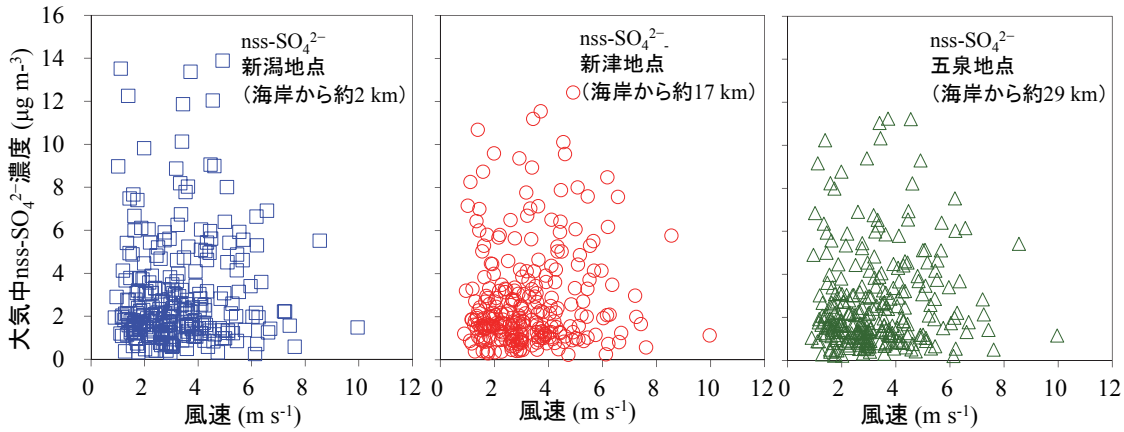


図 2.27 南風向（157.5°～202.5°）での大気中 nss-SO_4^{2-}濃度と風速の関係[37-38]

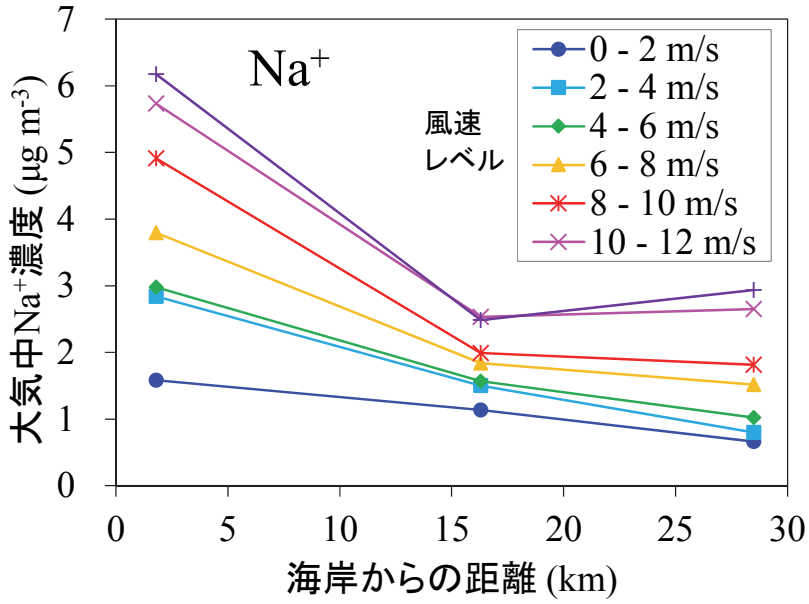


図 2.28 北西風向（292.5°～337.5°）での異なる風速レベルにおける大気中 Na^+濃度と海岸線からの距離の関係[37-38]

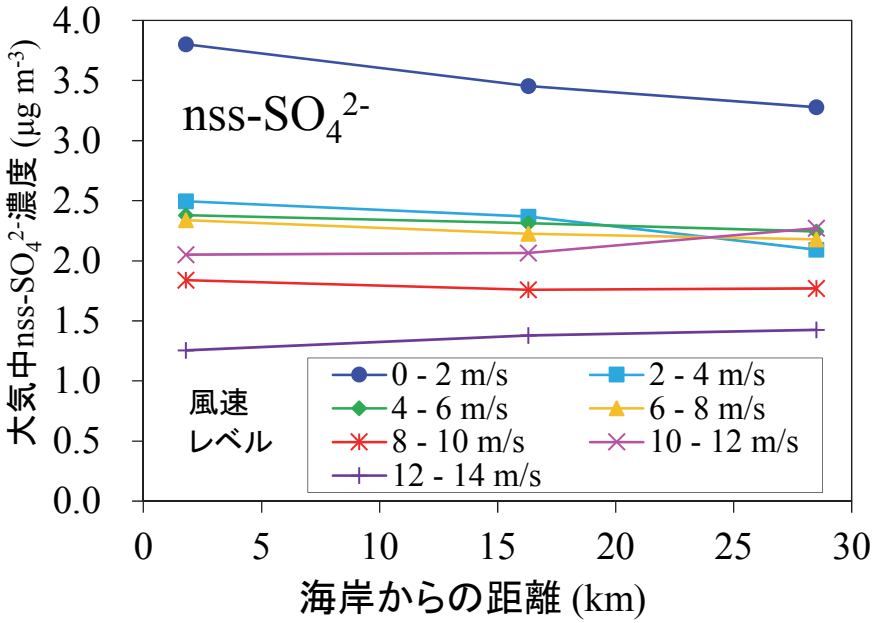


図 2.29 北西風向（292.5°～337.5°）での異なる風速レベルにおける大気中 nss-SO_4^{2-}濃度と海岸線からの距離の関係[37-38]

(3) 大気中粒子の海塩／非海塩成分における風向・風速依存性についての粒径別成分濃度・粒径分布にもとづく要因の考察

以下では，大気中 Na^+濃度・大気中 nss-SO_4^{2-}濃度の風向・風速依存性に関して，粒径別成分濃度と粒径分布の風向･風速応答の観点から考察する[37,44]。内陸の新津地点で計測された，二つの暴風時の海塩粒子輸送イベント（2013 年 1 月[44]，2015 年 12 月[37]）をもとに検討を行う。

a. 暴風時の海塩粒子輸送イベント①—2013 年 1 月—

2012 年度の観測期間中, 2013 年 1 月 25 日～26 日に新潟市内に暴風雪警報が発令された。この期間には，強い冬型の気圧配置の影響で西～北西から 10 m/s 程度の強い風が吹いていた（図 2.30 および図 2.31）。以下では，海からの強風による海塩粒子の粒径分布への影響を調べるため，上記強風時（1 月 25 日～26 日）と 2 m/s 程度の弱風時（1 月 22 日～23 日）の粒径分布を比較した。

図 2.32 は，APS で計測された観測期間中の強風時（1 月 25 日～26 日）と弱風時（1 月 22 日～23 日）における大気中粒子状物質の粒径分布を示す。なお，粒径分布は体積濃度（$dV/d\log D_p$（V：体積，D_p：粒径））で示す。粒径 2～3 μm 付近には，強風時と弱風時に共通して体積濃度のピークが見られた。粒径 1 μm 以下では，弱風時のほうが強風時よりも濃度が高かった。さらに，粒径 10 μm 以上における顕著なピークは強風時のみに見られた。

図 2.33 は，アンダーセンサンプラーを用いて計測された観測期間中の強風時（1 月 25 日

～26 日）と弱風時（1 月 22 日～23 日）における大気中粒子状物質の粒径別成分濃度を示す。Na^+と Cl^-を海塩成分の指標とし，それ以外の成分は非海塩（nss（non-sea-salt））成分の指標とする。Na^+や Cl^-の海塩成分濃度は粒径 1 μm 以上が支配的な質量を占めており，強風時のほうが弱風時よりも高濃度であった。一方，非海塩成分濃度は粒径 1 μm 以下が支配的な質量を占めており，強風時よりも弱風時のほうが高濃度であった。このことより，図 2.32 で示される強風時に粒径 1 μm 以上でみられる体積濃度の上昇は海塩粒子によるものだと考えられる。

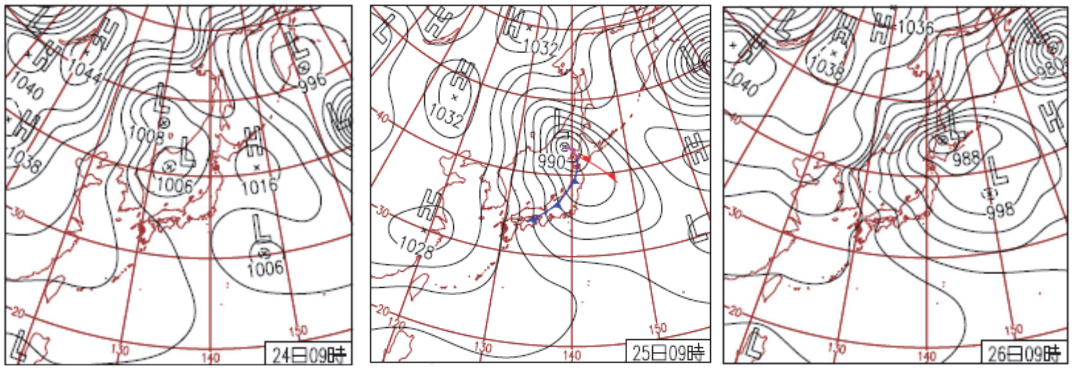


図 2.30 暴風雪警報が発令された 2013 年 1 月 25 日とその前後日の天気図[44]

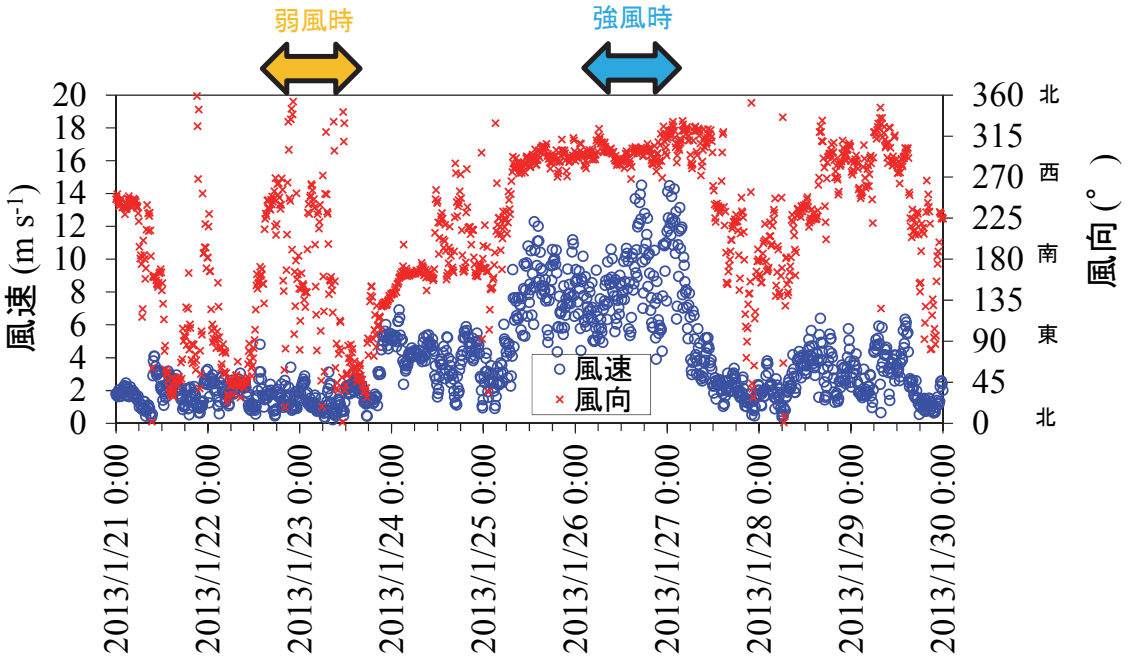


図 2.31 暴風雪警報が発令された 2013 年 1 月 25 日とその前後期間の風向・風速[44]

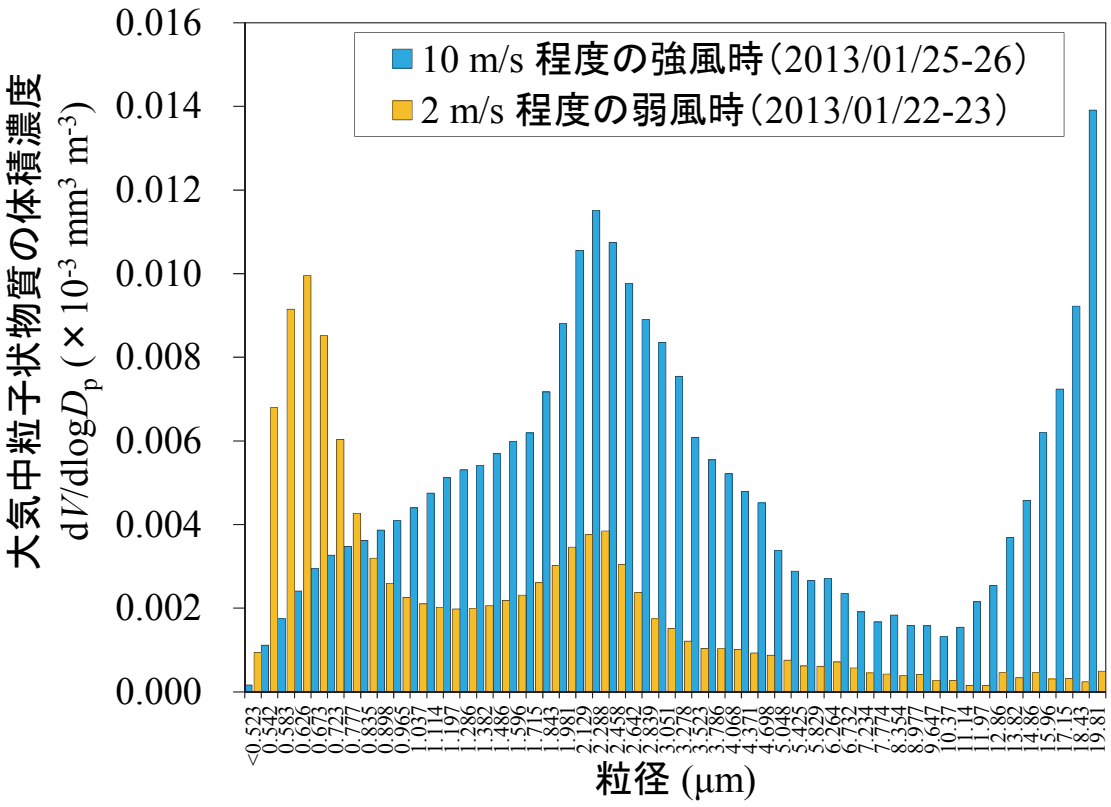


図 2.32 強風時と弱風時における大気中粒子状物質の粒径分布[44]

図 2.34 および図 2.35 は，APS で計測された粒子状物質の体積濃度とローボリュームサンプラーによる 6 時間毎サンプリング結果から求めた大気中成分濃度の時間変動を示す。なお，APS 計測結果は図 2.32 に示す粒径分布を考慮し，粗大粒子の代表として 2.288 μm，19.81 μm を，微小粒子の代表として 0.626 μm とした。粗大粒子では，粒径 2～3 μm にピークをとる粒子と粒径 10 μm 以上の粒子の両方において 1 月 25 日～26 日の強風時に特に高濃度であったことがわかる（図 2.34）。この強風時における粗大粒子の高濃度イベントは，大気中 Na^+ 濃度と時間的対応関係が見られた。また，微小粒子では，全体的に nss-SO_4^{2-}，NO_3^-，NH_4^+ の大気中濃度と時間的対応関係が見られた。

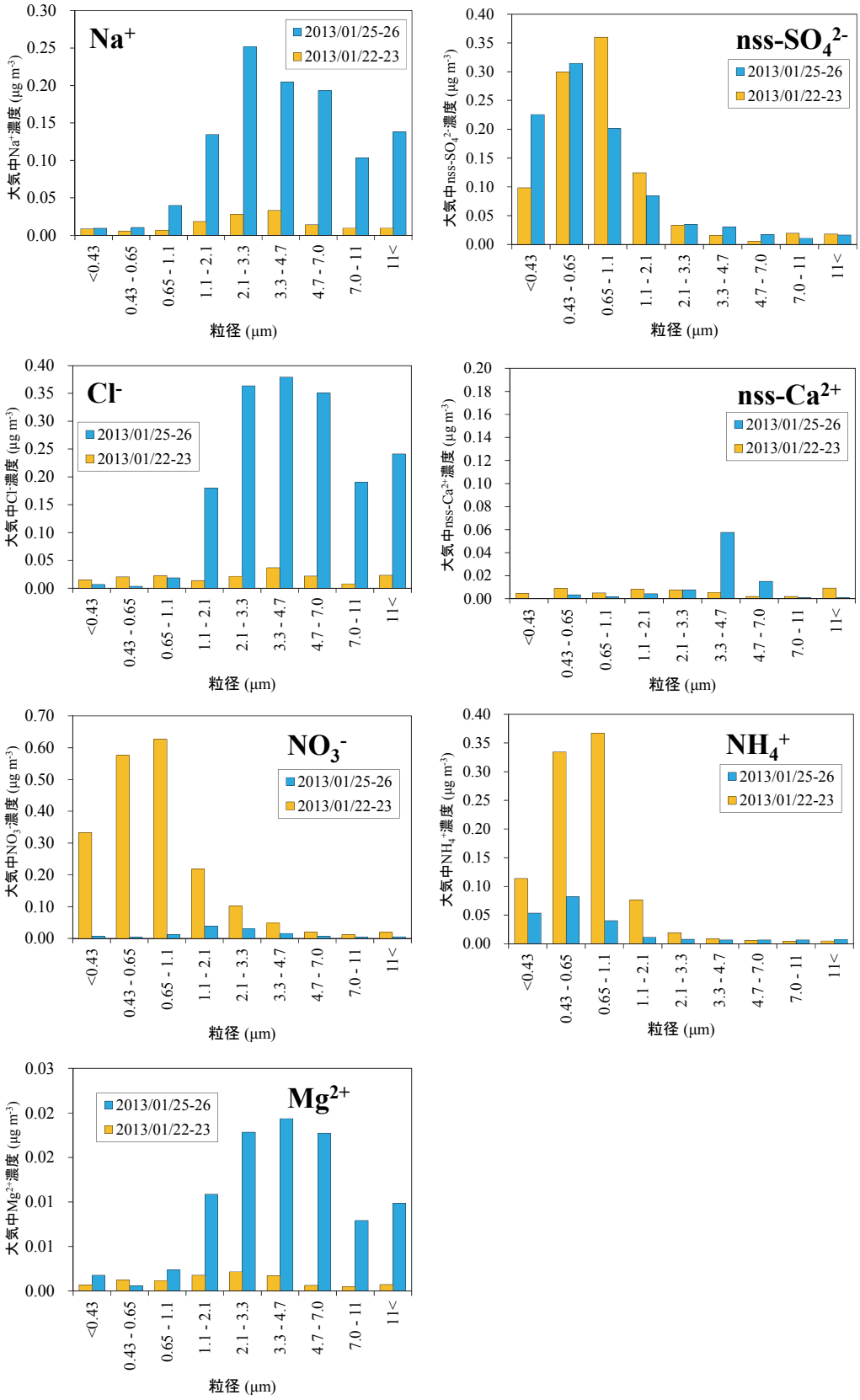


図 2.33 強風時と弱風時における大気中粒子状物質の粒径別成分濃度[44]

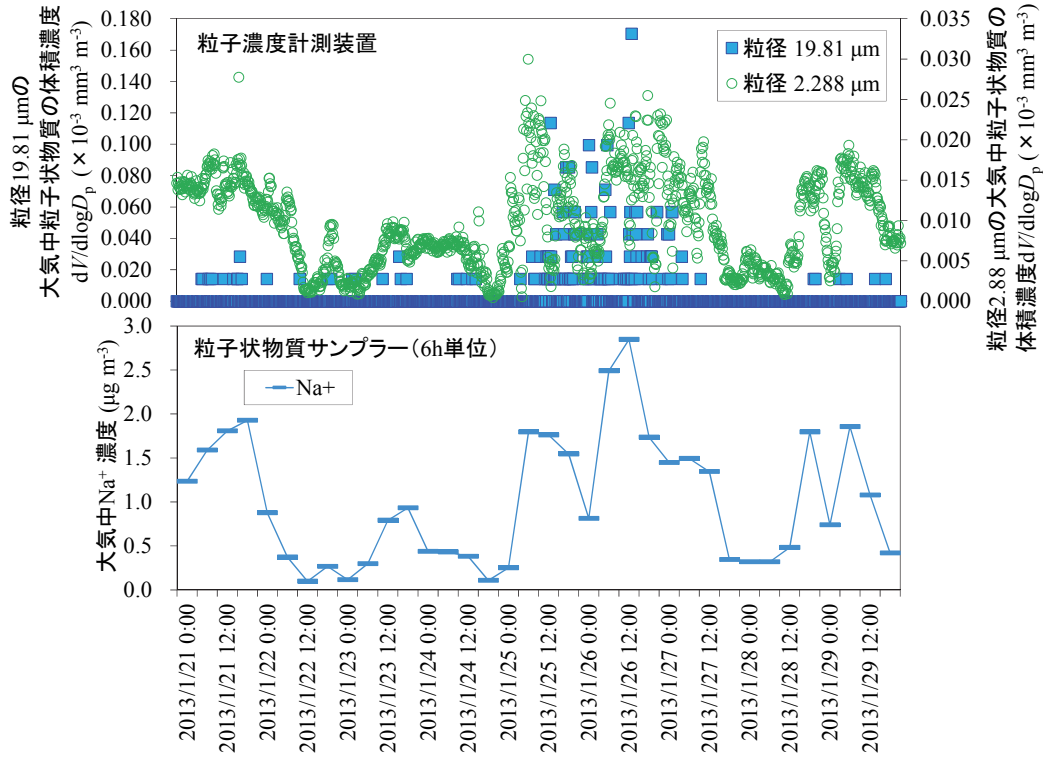


図 2.34 APS で計測した粗大粒子状物質の体積濃度と毎 6 時間フィルター採取により求めた Na^+の大気中成分濃度の比較[44]

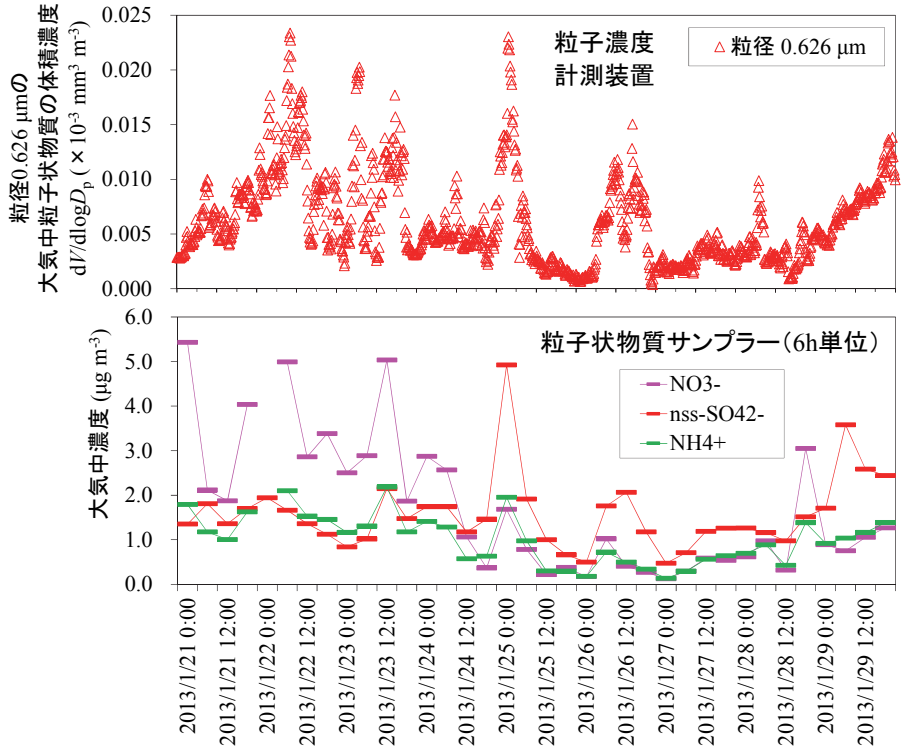


図 2.35 APS で計測した微小粒子状物質の体積濃度と毎 6 時間フィルター採取により求めた nss-SO_4^{2-}と NO_3^-, NH_4^+の大気中成分濃度の比較[44]

b. 暴風時の海塩粒子輸送イベント②—2015 年 12 月—

2015 年度の観測期間中，2015 年 12 月 3 日～4 日に新潟市内に暴風警報が発令された。この期間には，強い冬型の気圧配置の影響で西～北西から 8 m/s 程度の強い風が吹いていた（図 2.36 および図 2.37）。以下では，海からの強風による海塩粒子の粒径分布への影響を調べるため，上記期間の前後期間における強風時（12 月 4 日～5 日）と 2 m/s 程度の弱風時（12 月 7 日～8 日）の粒径分布を比較した。

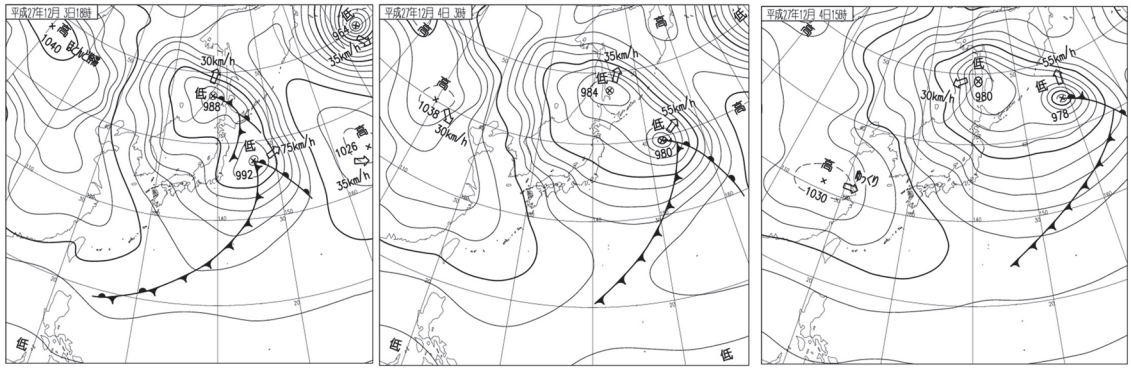


図 2.36 2015 年 12 月 1 日から 2016 年 1 月 5 日までのアンダーセンサンプラーによるサンプリングをともなう観測期間中に暴風警報が発令された 2015 年 12 月 3 日～4 日の天気図[37]

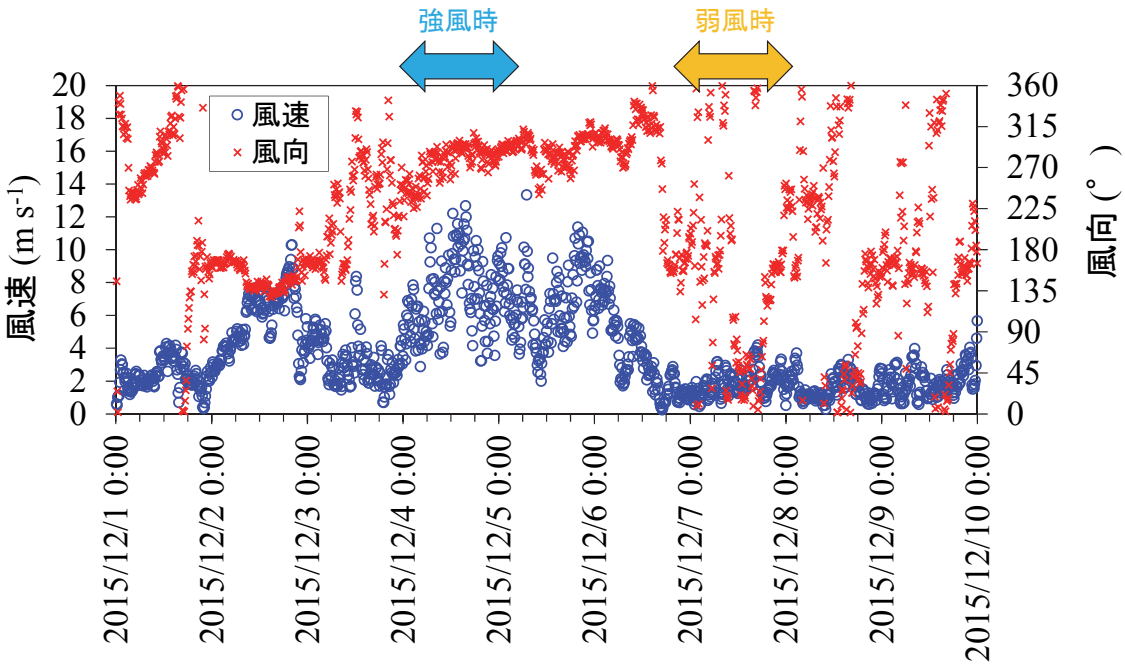


図 2.37 暴風警報が発令された 2015 年 12 月 3 日～4 日とその前後期間の風向・風速[37]

図 2.38 は，APS で計測された観測期間中の強風時（12 月 4 日～5 日）と弱風時（12 月 7 日～8 日）における大気中粒子状物質の粒径分布を示す。なお，粒径分布は体積濃度（dV/dlogD_p（V：体積，D_p：粒径））で示す。粒径 2～3 μm 付近には，強風時と弱風時に共通して体積濃度のピークが見られた。粒径 1 μm 以下では，弱風時においてやや不明瞭ではあるがピークが見られた。しかしながら，粒径 10 μm 以上においては，2013 年の強風時（西～北西から 10 m/s 程度の）に見られたような顕著なピークは見られなかった。

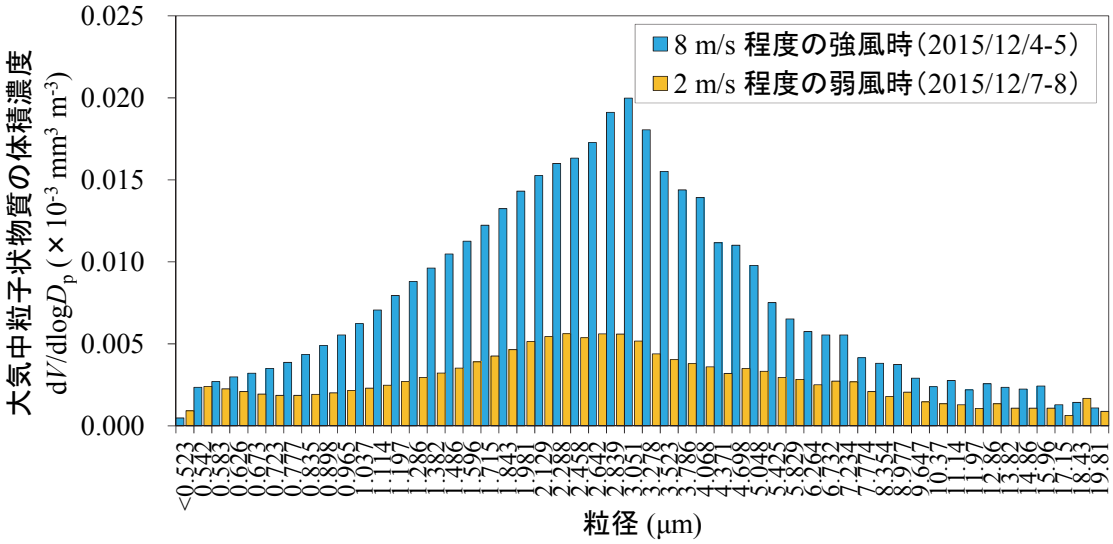


図 2.38 強風時（2015 年 12 月 4 日～5 日）と弱風時（2015 年 7 日～8 日）における大気中粒子状物質の粒径分布[37]

図 2.39 は，アンダーセンサンプラーを用いて計測された観測期間中の強風時（12 月 4 日～5 日）と弱風時（12 月 7 日～8 日）における大気中粒子状物質の粒径別成分濃度を示す。Na^+と Cl^-，Mg^{2+}を海塩成分の指標とし，それ以外の成分は非海塩（nss（non-sea-salt））成分の指標とする。Na^+や Cl^-，Mg^{2+}の成分濃度は粒径 1 μm 以上が支配的な質量を占めており，強風時のほうが弱風時よりも高濃度であった。一方，非海塩成分濃度は粒径 1 μm 以下が支配的な質量を占めており，強風時よりも弱風時のほうが高濃度であった。このうち，NO_3^-と nss-Ca^{2+}では，強風時において弱風時のほうが顕著に高濃度になる傾向はみられなかったものの，粗大の領域にも微小領域に匹敵する割合の質量を持っていた。以上のことより，図 2.38 で示される強風時に粒径 1 μm 以上でみられる体積濃度の上昇は海塩粒子によるものだと考えられる。

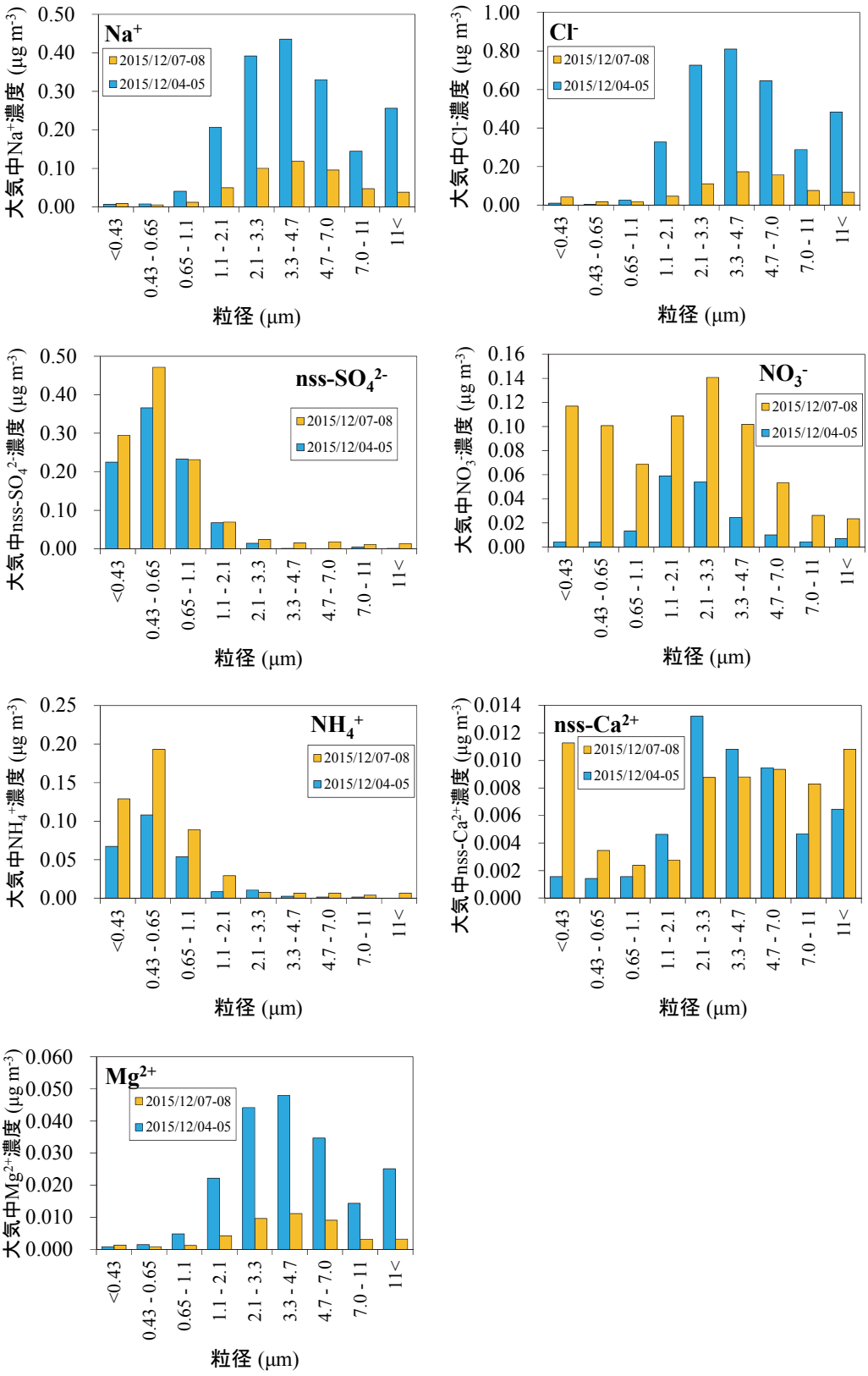


図 2.39 強風時（2015 年 12 月 4 日～5 日）と弱風時（2015 年 7 日～8 日）における大気中粒子状物質の粒径別成分濃度[37]

次に，大気中海塩粒子が内陸に位置する新津地点に流入する挙動を時々刻々のデータから検討する。図 2.40 は，APS で計測された粒子状物質の体積濃度と粒子状物質サンプラーによる 6 時間毎サンプリング結果から求めた大気中成分濃度の時間変動を示す。なお，APS 計測結果は図 2.38 に示した粒径分布を考慮し，粗大粒子の代表として 2.288 μm，3.051 μm，7.234 μm とした。12 月 3 日～6 日の西南西～西からの 8 m/s 程度の強風時における粗大粒子の濃度上昇は，同時期に 6 時間間隔で計測された大気中 Na^+濃度，Cl^-濃度と時間的対応関係が見られた。

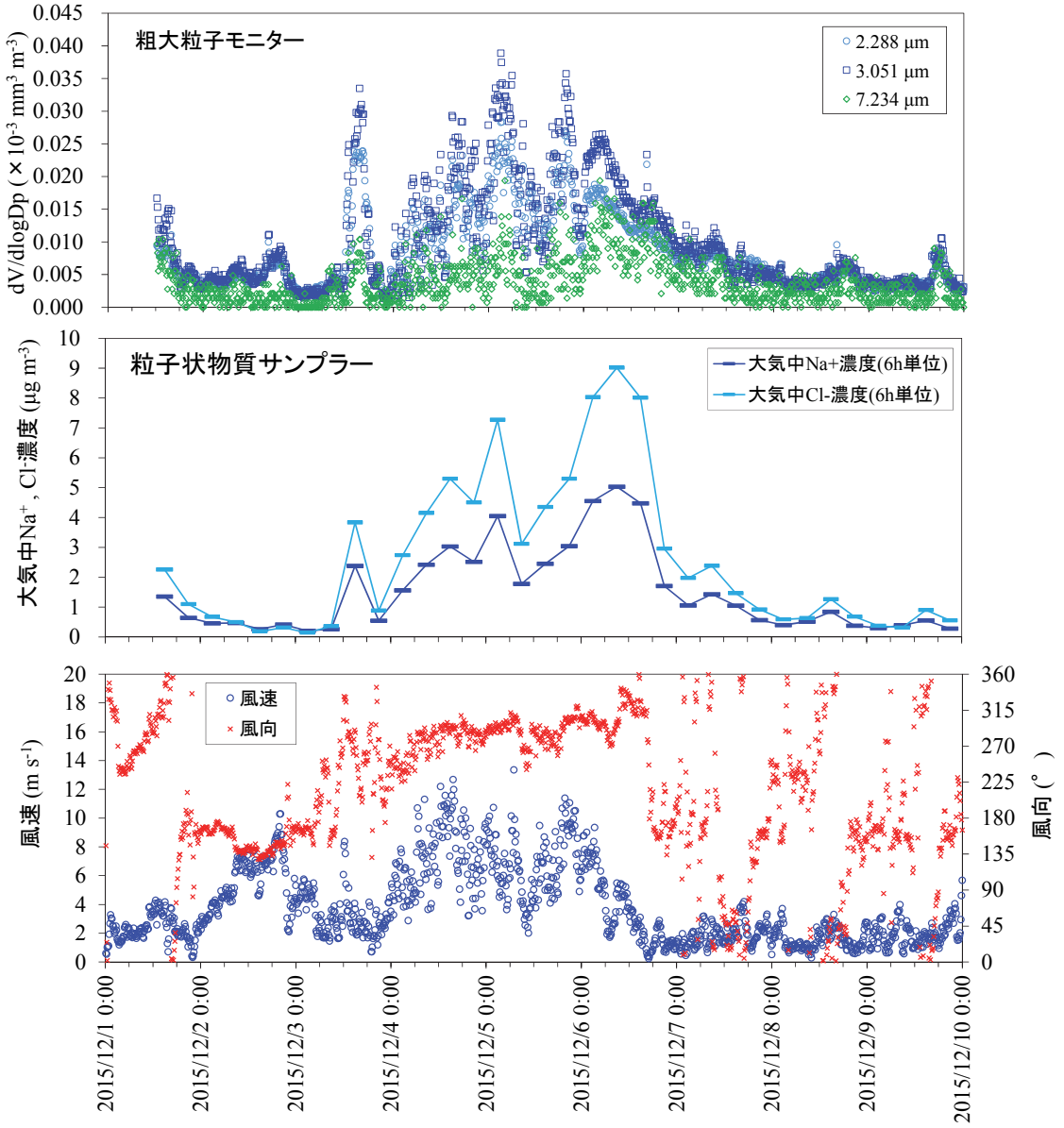


図 2.40 APS で計測した粗大粒子状物質の体積濃度と毎 6 時間フィルター採取により求めた Na^+と Cl^-の大気中成分濃度，および風速・風向の時間変動の比較[37]

図 2.41 は，APS で計測された粒子状物質の体積濃度を 6 時間平均した値と粒子状物質サンプラーによって 6 時間間隔で計測された大気中 Na^+, Cl^-濃度の比較を示す。粒径 2.288 μm, 3.051 μm，7.234 μm のいずれの粒子濃度においても，大気中 Na^+，Cl^-濃度と比較的良い相関関係が認められた（R^2：0.74～0.87）。このことから，粗大粒子モニターによって，大気中海塩成分濃度の時間変動を把握することのできる可能性が示された。ただし，定量的な関係を明らかにするにはさらなる解析が必要である。

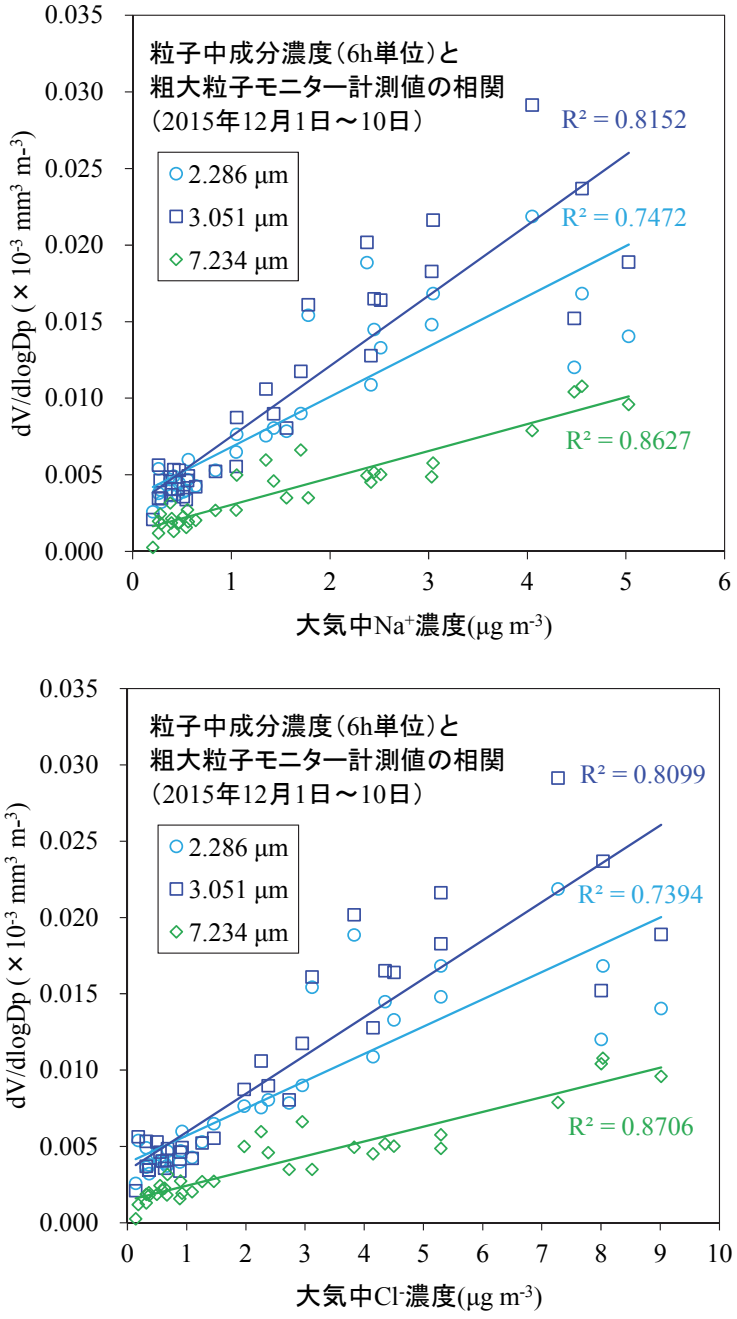


図 2.41 APS で計測した粗大粒子状物質の体積濃度の 6 時間平均値と毎 6 時間フィルター採取により求めた Na^+と Cl^-の大気中成分濃度の比較[37]

c. まとめ—二つの暴風時の海塩粒子輸送イベントにおける粒径別成分濃度・粒径分布について—

2013 年 1 月の観測データでは，冬季新潟県下越地域では，海からの 10 m/s 程度の強風下において，粒径 2〜3 μm にピークを持つ領域だけではなく粒径 10 μm 以上の領域も伴う海塩粒子の高濃度輸送イベントが見られた。2015 年 12 月の観測事例では，海からの 8 m/s 程度の強風下において，粒径 2〜3 μm にピークを持つ領域の濃度上昇が見られ，流入してくる海塩粒子の粒径が再確認できた。しかしながら，粒径 10 μm 以上の領域の濃度上昇は見られず，両イベントには何らかの相違が考えられる。また，粗大粒子モニターの時々刻々の計測値によって，大気中海塩成分濃度の時間変動を把握することができる可能性が示された。

d. 粒径別成分濃度・粒径分布にもとづく大気中粒子の海塩／非海塩成分における風向・風速依存性についての要因の考察

以上のような大気中粒子成分と粒径の対応を踏まえて，図 2.28 と図 2.29 に示される海岸からの距離と大気中 Na^+濃度・大気中 nss-SO_4^{2-}濃度の関係について考察する。

まず，大気中 Na^+濃度と海岸からの距離の関係についてである。図 2.28 では大気中 Na^+濃度の沿岸から内陸への減衰は，風速が強くなるほど急激な低下を示した。風速の上昇に伴う大気中 Na^+濃度の増大は，粒径 2〜3 μm の粗大海塩粒子，場合によっては粒径 10 μm 以上の海塩粒子によるものである。これらの海塩粒子は粒径が大きいため，沿岸から内陸に輸送される過程で沈着によって除去されやすいという特性を有している。そのため，海からの強風時には，粗大な海塩粒子の割合が大きいため，沿岸地点では高濃度になりやすく，内陸に進むと，粗大な海塩粒子が沈着によって除去されるために急激に海塩粒子濃度が低下することによって図 2.28 のような海岸からの距離と大気中 Na^+濃度が形成されると解釈できる。また，図 2.24 に示す風速増大に対する大気中 Na^+濃度増大の傾きが，海岸からの距離が短い地点ほど大きい傾向を示したことについても，沿岸の地点ほど全体の海塩粒子に占める粗大粒子の割合が大きく，内陸に進むほど沈着による除去の影響を受け，粗大粒子の割合が小さくなることが影響したと解釈できる。

次に，大気中 nss-SO_4^{2-}濃度と海岸からの距離の関係についてである。図 2.29 では，風速が上昇すると，大気中 nss-SO_4^{2-}濃度が低下し，どの風速レベルにおいても，海岸からの距離によらず濃度が一定となる傾向を示した。粒子状 nss-SO_4^{2-}は，粒径が 0.1〜1μm の領域に濃度のピークを持つため，沈着速度が非常に小さい。そのため，沿岸から内陸への輸送において沈着による除去の影響が小さいと考えられるため，大気中 nss-SO_4^{2-}濃度が海岸からの距離によらない一定な分布の一因となったと推定される。一般に，本研究で対象とする日本海沿岸地域などでは，海塩粒子のように海域に発生源を持つ物質の場合，大気中濃度は地表付近で高濃度となり，高度が上昇するにつれて低下する傾向を示す[45]が，粒子状 nss-SO_4^{2-}は，その先駆物質（SO_2）の主要発生源が大陸にあり，化学反応によって SO_4^{2-}に変

化しながら十分な鉛直混合を経て長距離輸送される[46]ので，沿岸から内陸まで均一な濃度分布となりやすいと考えられる。

(4) 降水の海塩／非海塩成分における風向・風速依存性の相違

図 2.42 と図 2.43 は，北西（292.5°～337.5°）からの風向における降雨・降雪中 Na^+濃度・降雨・降雪中 nss-SO_4^{2-}濃度と風速の関係を示す[38]。降雨・降雪中 Na^+濃度では，沿岸～内陸の 3 地点ともに，風速が強くなるほど濃度が単調に増大する傾向が認められた。この風速増大に対する降雨・降雪中 Na^+濃度増大の傾きは，大気中 Na^+濃度と同様に，海岸からの距離が短い地点ほど大きい傾向を示した。一方で，降雨・降雪中 nss-SO_4^{2-}濃度は，3 地点ともに，風速の上昇に伴う明瞭な傾向が認められなかった。また，図 2.44 と図 2.45 は，南（157.5°～202.5°）からの風向における降雨・降雪中 Na^+濃度・降雨・降雪中 nss-SO_4^{2-}濃度と風速の関係を示す。沿岸～内陸の 3 地点ともに，風速が強くなるほど降雨・降雪中 Na^+濃度が単調に低下する傾向が認められた。同様に，降雨・降雪中 nss-SO_4^{2-}濃度も，3 地点ともに，風速が強くなるほど低下する傾向が認められた。

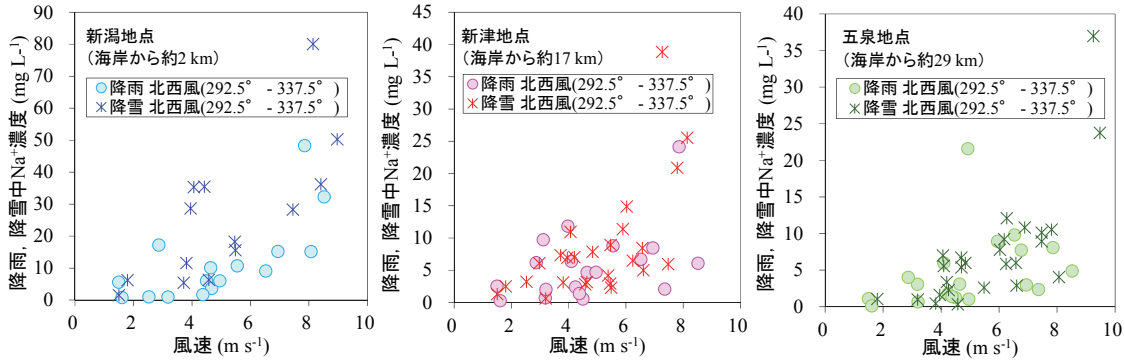


図 2.42 北西風向（292.5°～337.5°）での降雨・降雪中 Na^+濃度と風速の関係[38]

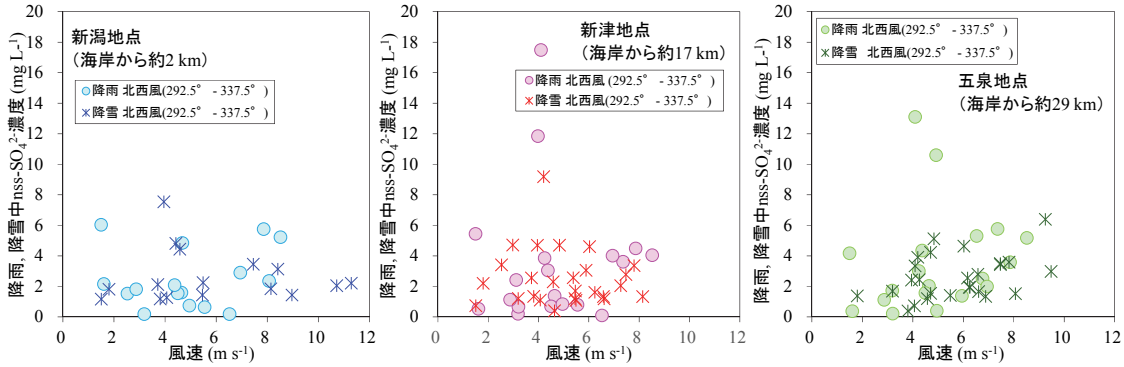


図 2.43 北西風向（292.5°～337.5°）での降雨・降雪中 nss-SO_4^{2-}濃度と風速の関係[38]

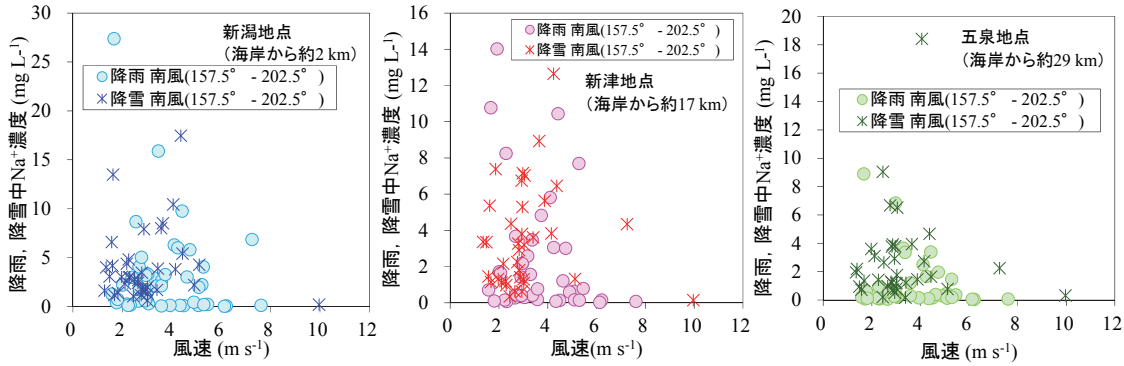


図 2.44 南風向（157.5°～202.5°）での降雨・降雪中 Na^+濃度と風速の関係[38]

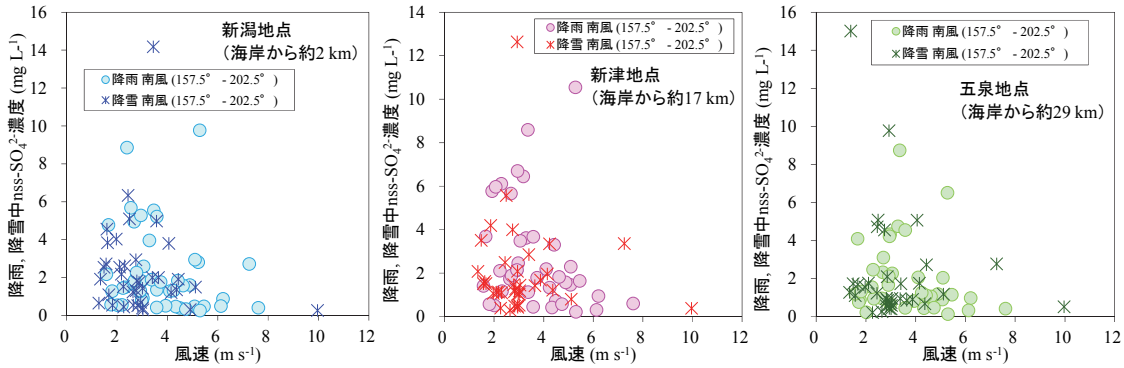


図 2.45 南風向（157.5°～202.5°）での降雨・降雪中 nss-SO_4^{2-}濃度と風速の関係[38]

降水中成分濃度の風向・風速依存性は，南からの風向における nss-SO_4^{2-}濃度を除き，大気中成分濃度の風向・風速依存性と整合するものであった。特に，北西（292.5°～337.5°）からの風向における降雨・降雪中 Na^+濃度の風速依存性は，3 地点での風速増大に対する応答性も含めて，大気中 Na^+濃度の風速依存性と良く対応していた。大原らは日本海沿岸地域での降雨と降雪による大気中粒子状物質の取り込みについて，海塩成分では，非海塩成分に比べて雲底下での取込みの寄与が相対的に大きいと推定しており[24, 47-49]，非海塩成分である nss-SO_4^{2-}に比べて海塩成分である Na^+の方が，風速依存性について大気中濃度と降雨・降雪中濃度の良い対応が見られたことと整合している。

2.3.5 高い降雪導電率時の風向・風速および化学組成

ここまで，降水（降雨や降雪）の導電率の上昇について現象論として述べてきた。本項では，新潟県下越地域における降雪導電率の高くなる条件を明らかにするため，上述の「海塩・降雪観測システム」の重点観測 3 地点において，降水サンプラーと粒子状物質サンプラーを用いて実施した，粒子・降水試料の採取・分析結果を対象に，①降雪導電率と導電率に対する海塩成分の寄与の関係，②降雪導電率と風向・風速の関係，③顕著に高い導電率を示す降雪が出現する風向と海岸からの距離の関係について検討する。また，化学組成

のデータから得られた，降雪導電率の高くなる条件に関しては，時々刻々の導電率・粗大粒子濃度データの対応からも検討を行う。

(1) 検討データおよび導電率に対する海塩成分の寄与の算出方法

a. 検討データ

2008～2015 年度の各年の冬季に，重点観測 3 地点において実施した粒子・降水試料の採取・分析結果を解析対象データとした。各年の計測期間は以下の通りである。

・2008 年 12 月 18 日～2009 年 3 月 18 日（91 日間）
・2009 年 12 月 1 日～2010 年 3 月 20 日（110 日間）
・2010 年 12 月 1 日～2011 年 3 月 15 日（105 日間）
・2011 年 12 月 1 日～2012 年 3 月 12 日（103 日間）
・2012 年 12 月 14 日～2013 年 2 月 12 日（61 日間）
・2013 年 12 月 2 日～2014 年 1 月 25 日（55 日間）
・2014 年 12 月 1 日～2015 年 2 月 1 日（63 日間）
・2015 年 12 月 1 日～2016 年 1 月 5 日（36 日間）

上記計測期間において，重点観測 3 地点では降水 1997 試料を得た。ただし，6 時間あたりの降水量が 1 mm 以上の試料に限定した場合の試料数である。この降水 1997 試料を，杉本ら[30]で提案された雨雪判別式を用いて降雨 844 試料（新潟地点 : 302 試料，新津地点 : 264 試料，五泉地点 : 278 試料），降雪 1153 試料（新潟地点 : 299 試料，新津地点 : 398 試料，五泉地点 : 456 試料）に区分した。なお，風向・風速は新潟地方気象台での観測値を用いた。

b. 導電率に対する海塩成分の寄与の算出方法

図 2.46 に降雪の平均組成を地点ごとに示し，図 2.47 には降雪の平均イオン成分濃度から推定した導電率を地点ごとに示す。導電率に対する海塩成分の寄与の算出においては，降水中の主要イオンの当量濃度 C_i と，無限希釈におけるイオンの当量導電率 λ_i の積，$\lambda_i C_i$ を各イオンについて求め，それらの和$\sum\lambda_i C_i$（降水導電率の計算値）に対して海塩成分の $\lambda_i C_i$ が占める割合を求めた。ここで，降水に含まれる主要なイオン成分は，H^+，NH_4^+，Na^+，K^+，Mg^{2+}，Ca^{2+}，Cl^-，NO_3^-，SO_4^{2-}の 9 種とした。このうち，全て海塩を起源とするイオンは Na^+，Mg^{2+}，Cl^-とし，実際の降水中の成分比も海水組成と整合していた。また，K^+，Ca^{2+}，SO_4^{2-}は海塩起源（ss）と非海塩起源（nss）を含むため，Na^+濃度と海水組成比を元に海塩起源の濃度を算出し（たとえば ss-SO_4^{2-}），実測濃度から海塩起源の濃度を差し引いたものを非海塩起源の濃度とした（たとえば nss- SO_4^{2-}）。したがって，本検討では，海塩成分には，Na^+，ss-K^+，Mg^{2+}，ss-Ca^{2+}，Cl^-，ss-SO_4^{2-}が該当し，非海塩成分には，H^+，NH_4^+，nss-K^+，nss-Ca^{2+}，NO_3^-，nss-SO_4^{2-}が該当する。

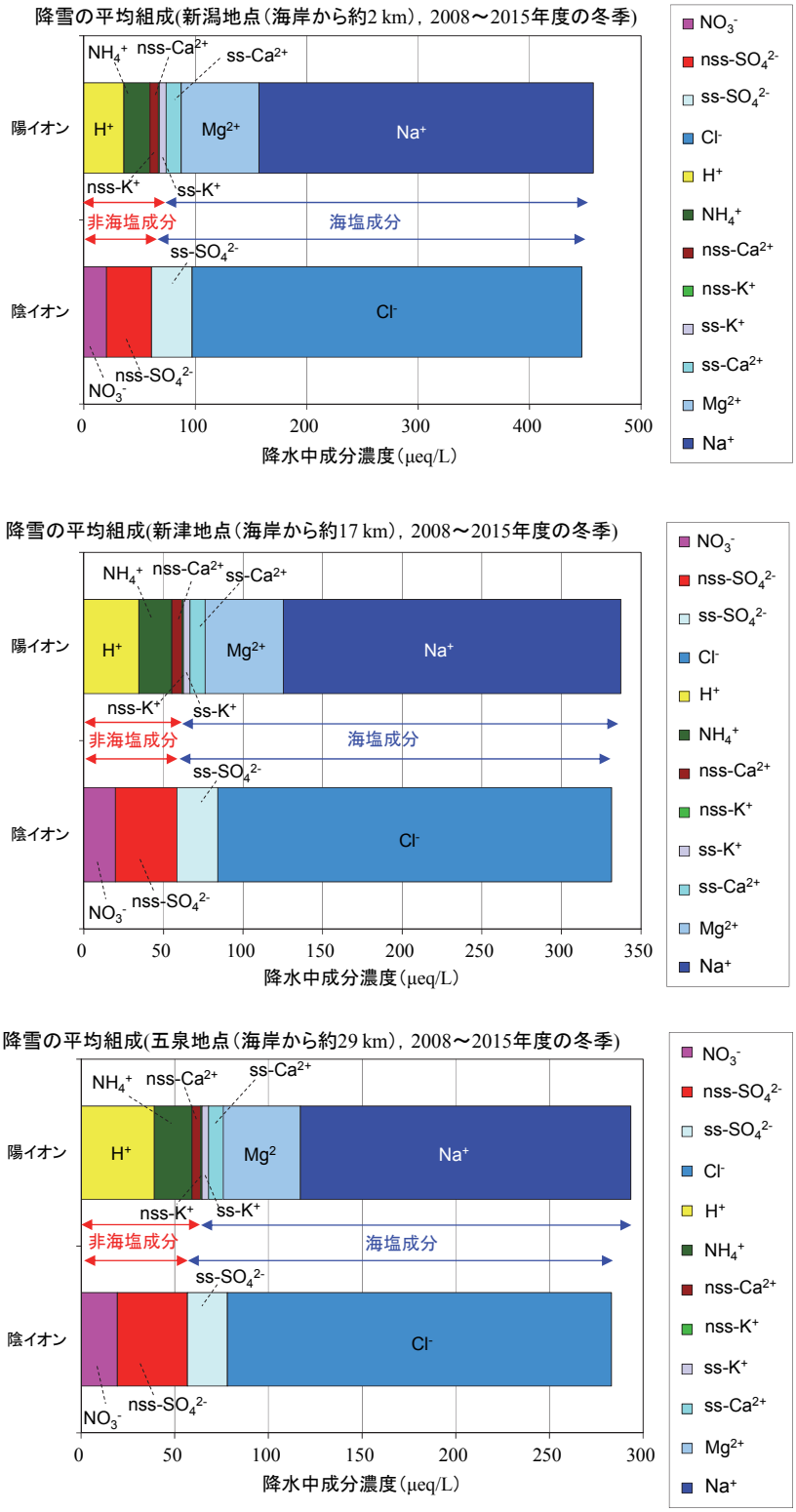


図 2.46 2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）において 6 時間ごとに採取した降雪の平均組成

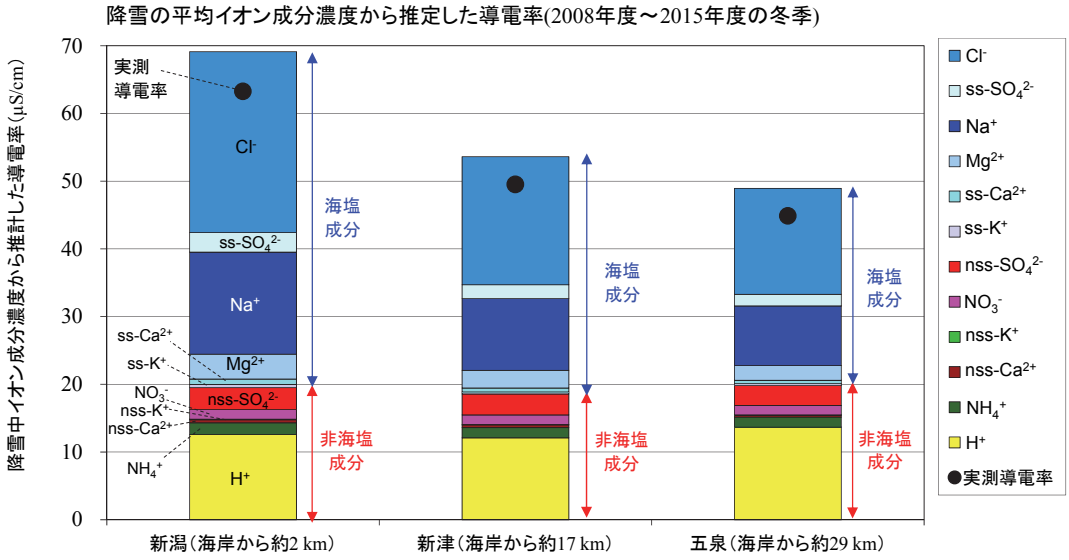


図 2.47 2008～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）において 6 時間ごとに採取した降雪の平均イオン成分濃度から推定した導電率

(2) 導電率の高い降雪の発生条件

a. 降雪導電率と導電率に対する海塩成分の寄与の関係

まず，上述①降雪導電率と導電率に対する海塩成分の寄与の関係について，導電率と海塩成分・非海塩成分の濃度との関係を検討する。図 2.48 に 3 地点での降雪導電率と降雪中の海塩・非海塩成分濃度の関係を示す。3 地点ともに降雪導電率は，非海塩成分濃度よりも海塩成分濃度との相関が良い傾向が認められる。この点について，より直接的な検討を行うため，海塩・非海塩成分濃度から推計した導電率との比較を行う。図 2.49 に降雪導電率と降雪中の海塩・非海塩成分濃度から推計した導電率の関係を示す。図から明らかなように，3 地点ともに，100 μS/cm を超えるような比較的高い導電率では，海塩成分濃度から推計した導電率と 1：1 の関係となる傾向を示し，さらに 200 μS/cm を超えるような顕著に高い導電率においては，海塩成分濃度から推計した導電率とほぼ 1：1 の関係を示していた。

次に，導電率に対して海塩成分がどの程度の寄与を示すかについて，推計導電率に対する海塩成分の寄与と降雪導電率の関係から検討する。図 2.50 に降雪導電率と導電率における海塩成分の寄与の関係を示す。また，表 2.4 に導電率の各区分における降雪導電率への海塩成分の寄与を示す。降雪導電率が 100 μS/cm 以下の相対的に低いレベルにおいては，導電率における海塩成分の寄与は数%～90%程度の範囲に広がり，変動が大きく，平均的な寄与は 4～6 割程度であった。一方，降雪導電率が 150 μS/cm 以上では，海塩成分の平均寄与は 8 割程度に増大し，さらに，200 μS/cm 以上の導電率を示す降雪の場合，平均寄与は新潟地点で 92.0%，新津地点で 88.4%，五泉地点で 85.0%となり，およそ 9 割程度が海塩成分の寄与となった。これらのことから，沿岸～内陸のいずれの地点でも 200 μS/cm 以上の導電率を示す降雪では海塩の寄与が極めて支配的であると言える。

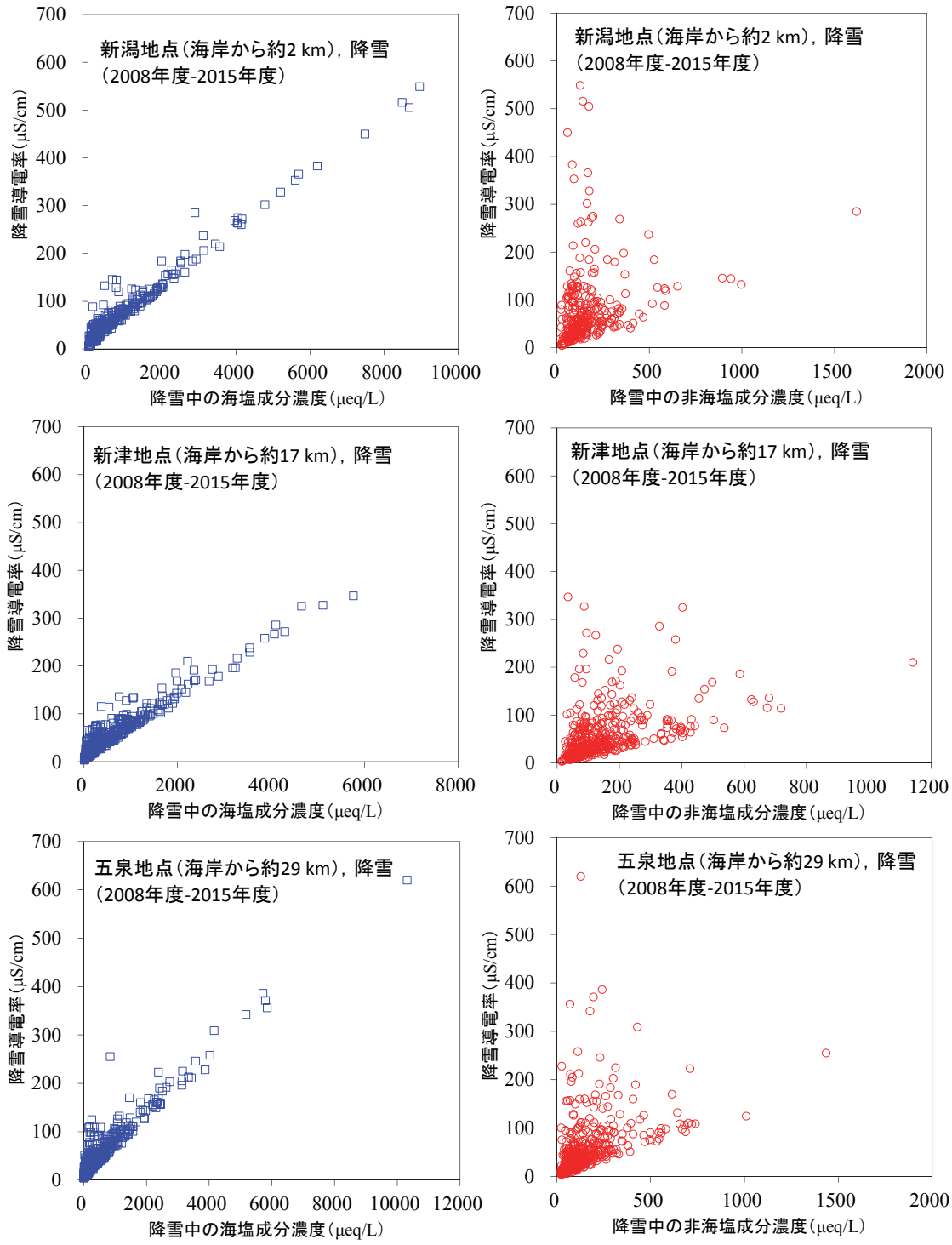


図 2.48 降雪導電率と降雪中の海塩成分濃度・非海塩成分濃度の関係（2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）で採取）

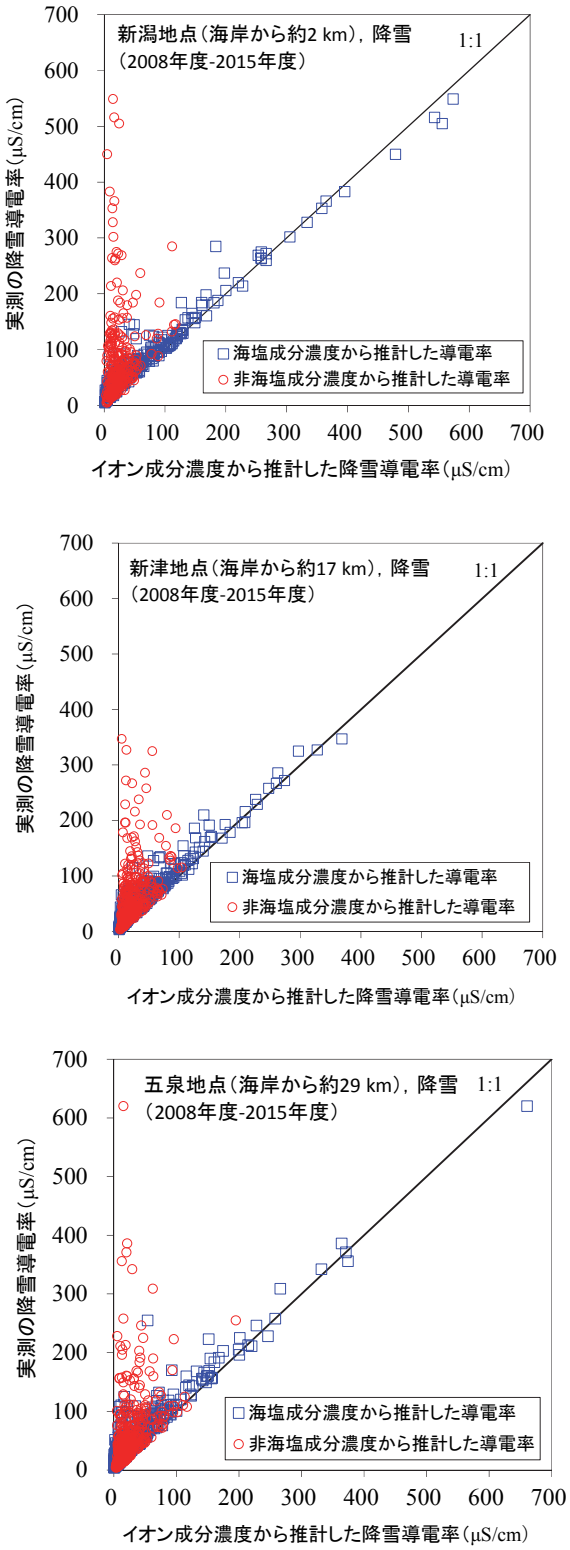


図 2.49 降雪導電率と降雪中の海塩・非海塩成分濃度から推計した導電率の関係（2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）で採取）

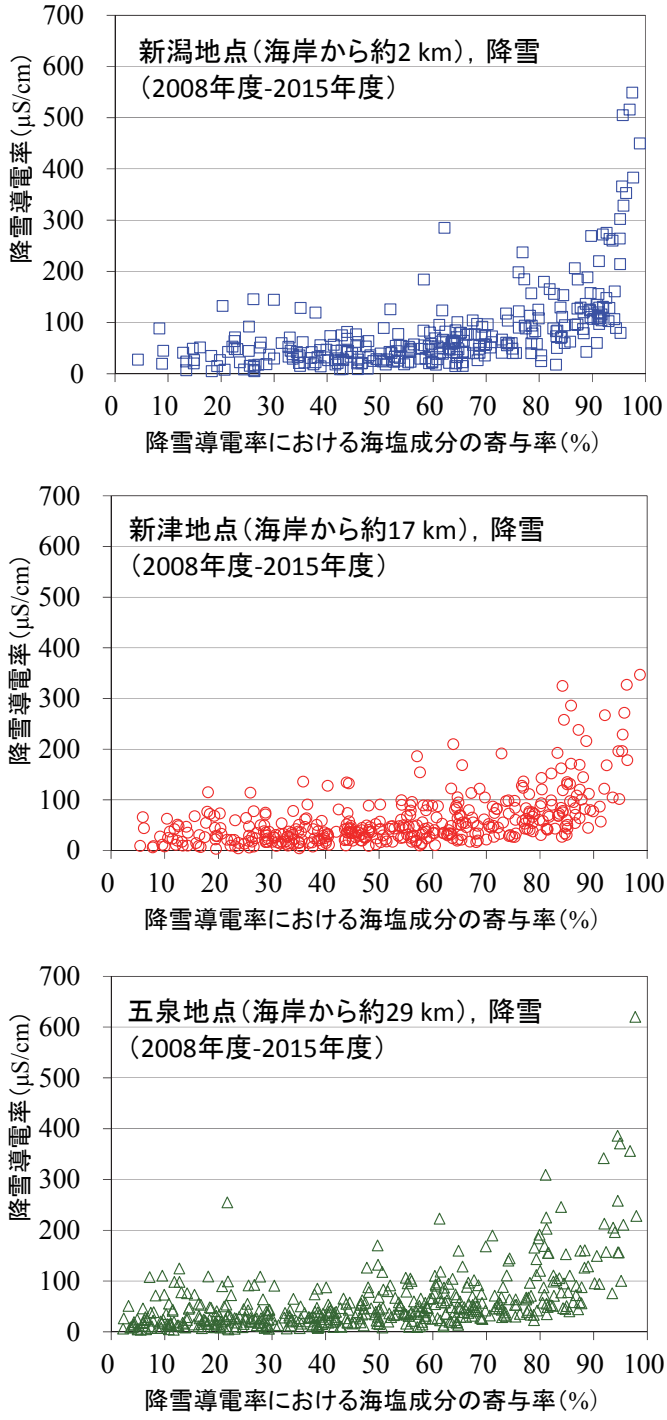


図 2.50 2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）において 6 時間ごとに採取した降雪の導電率と降雪導電率における海塩成分の寄与の関係[21]

表 2.4　導電率の各区分における降雪導電率への海塩成分の寄与（2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）で採取）

降雪導電率の区分 (μS/cm)	降雪導電率における海塩成分の寄与(%)					
	新潟地点（海岸から約 2 km）		新津地点（海岸から約 17 km）		五泉地点（海岸から約 29 km）	
	n	平均 (最小-最大)	*n*	平均 (最小-最大)	*n*	平均 (最小-最大)
0-50	129	45.5 (4.3-88.9)	232	44.3 (5.4-89.0)	281	38.0 (2.2-87.1)
50-100	98	62.5 (8.4-95.3)	113	61.4 (5.9-91.3)	112	56.7 (3.2-93.5)
100-150	39	77.6 (20.3-94.2)	29	71.4 (18.1-94.8)	30	62.2 (7.2-95.1)
150-200	13	82.4 (58.3-94.2)	13	81.1 (57.1-96.3)	17	80.8 (49.7-94.7)
200-	20	92.0 (62.1-99.0)	11	88.4 (63.8-98.7)	16	85.0 (21.7-97.9)

b. 降雪導電率と風向・風速の関係

上述②降雪導電率と風向・風速の関係に関する検討として，図 2.51 に，降雪導電率と風向・風速の関係を示す。データプロットは降雪導電率のレベルによって区分した。西（270°）～北（0°，360°）の風向では，他の風向に比べて導電率の高い降雪が多く見られ，さらに，この風向において風速 5 m/s 程度を超える領域では，100 μS/cm 以上の相対的に高い導電率の降雪が主となり，200 μS/cm 以上の降雪も頻出した。この傾向は，沿岸～内陸のいずれの地点でも認められた。また，6 m/s 以上の強風域では風速が強くなるほど，西風（270°）付近にプロットが収束する傾向も認められた。

次に，風速に対する降雪導電率の連続的な応答を風向区分して検討する。風向区分は時計回りに西～北と東～南の 2 区分とした。図 2.52 に，異なる風向区分における降雪導電率と風速の関係を示す。西～北の風向では，風速への導電率上昇の応答は沿岸地点の方が大きいものの，沿岸～内陸に共通して風速が増大するほど降雪導電率も高くなる傾向が認められた。

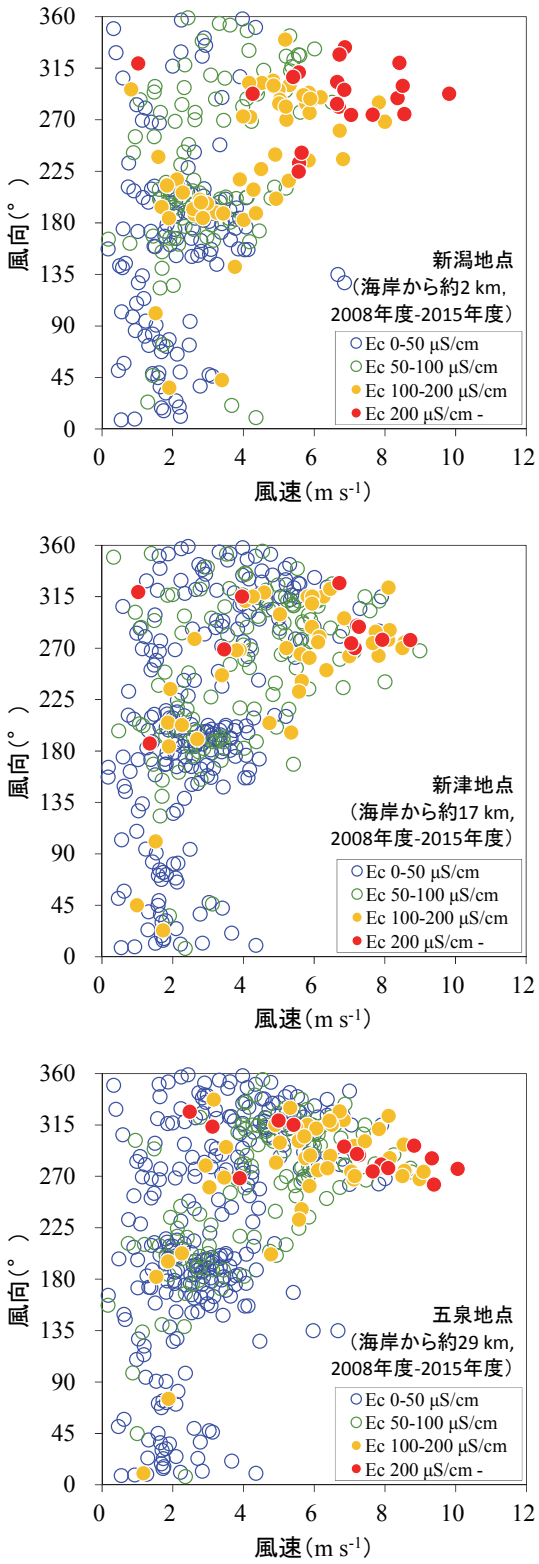


図 2.51 降雪導電率（EC）のレベルでプロット分けした風速と風向（北を 0°として時計回り）の関係（2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）で採取）[21]

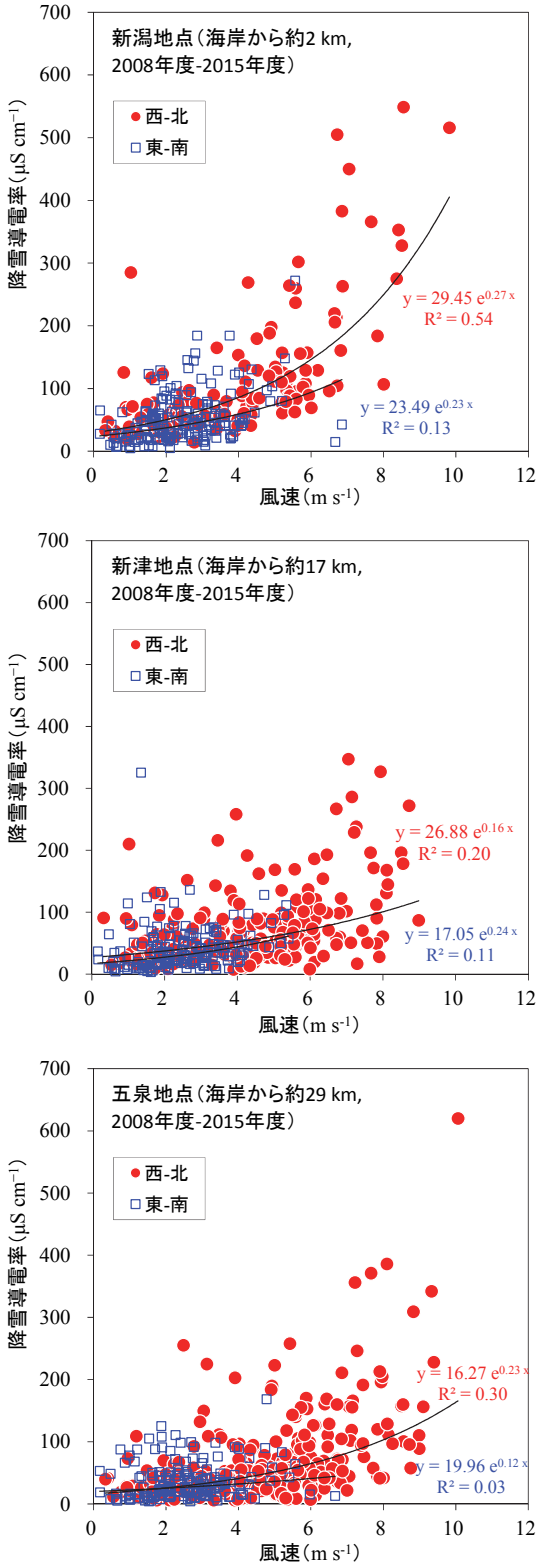


図 2.52 異なる風向区分における降雪導電率と風速の関係（2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）で採取）

c. 顕著に高い導電率を示す降雪が出現する風向と海岸からの距離の関係

最後に，上述③顕著に高い導電率を示す降雪が出現する風向と海岸からの距離の関係について検討する。

まず，顕著に高い導電率を示す降雪の出現割合を風向ごとに評価する。図 2.53 に，風向ごとの導電率 100，150，200 μS/cm 以上の降雪データの出現割合を地点ごとに示す。顕著に高い導電率として抽出する閾値の導電率が 100，150，200 μS/cm のどの場合においても，沿岸地点（新潟）の方が内陸地点（新津，五泉）よりも幅広い風向で高い導電率の降雪が出現していることがわかる。閾値が 150 μS/cm や 200 μS/cm 以上の導電率の場合では，沿岸地点では北西，西，南西の風向で高導電率が出現しており，内陸地点では，ほぼ北西と西でのみ出現している。これは，内陸域では沿岸域よりも海塩の影響が及ぶ風向が狭まっていき，顕著に高い導電率となりうる風向が狭まるためと推察される。したがって，ある一定以上の海岸からの距離があると，海塩の影響が及ばなくなり，顕著に高い導電率の降雪が出現しなくなることが予想される。

次に，この点について顕著に高い導電率を示す降雪の出現割合と海岸からの距離の関係について検討する。ここで，海岸からの距離は各地点の風上風向での海岸からの距離とした。そのため，同一地点において風上風向ごとに海岸からの距離が異なることとなる。図 2.54 は，導電率 100，150，200 μS/cm 以上の降雪データの出現割合と各地点の風上方位での海岸からの距離の関係を示す。海岸から 0～40 km 程度の範囲では，抽出する閾値の導電率が 100，150，200 μS/cm のどの場合におおいても，3 地点ともに顕著に高い導電率の降雪が出現する可能性があることがわかる。ただし，南西風向では，内陸地点（海岸から 35km，55km）では出現が無いが，西方向では，海岸から 35 km の内陸地点でも出現があるなど，同程度の海岸からの距離でも，風向によって傾向が異なる点については解釈が難しい。一方，海岸から 50 km 以上離れた領域では，150，200 μS/cm 以上の顕著に高い導電率の降雪が出現する可能性は極めて低くなる傾向が認められた。ただし，海岸から 50～150 km のデータが乏しいため，顕著に高い導電率の降雪が出現しなくなる境界としての海岸からの距離を特定（例えば 50，80，100 km など）するには，本検討のデータでは難しいと考えられる。

これらのことから，顕著に高い導電率を示す降雪の出現と風向・海岸からの距離について，本検討から示唆されたことをまとめると以下のようになる。

- 内陸域では沿岸域よりも海塩の影響が及ぶ風向が狭まっていき，顕著に高い導電率が出現しうる風向が狭まる。
- ある一定以上の海岸からの距離があると，海塩の影響が及ばなくなり，顕著に高い導電率の降雪が出現しなくなる。
- 顕著に高い導電率の降雪が出現しなくなる境界は，海岸からの距離が 50～150 km の範囲のいずれかに設定することが妥当と推察される。

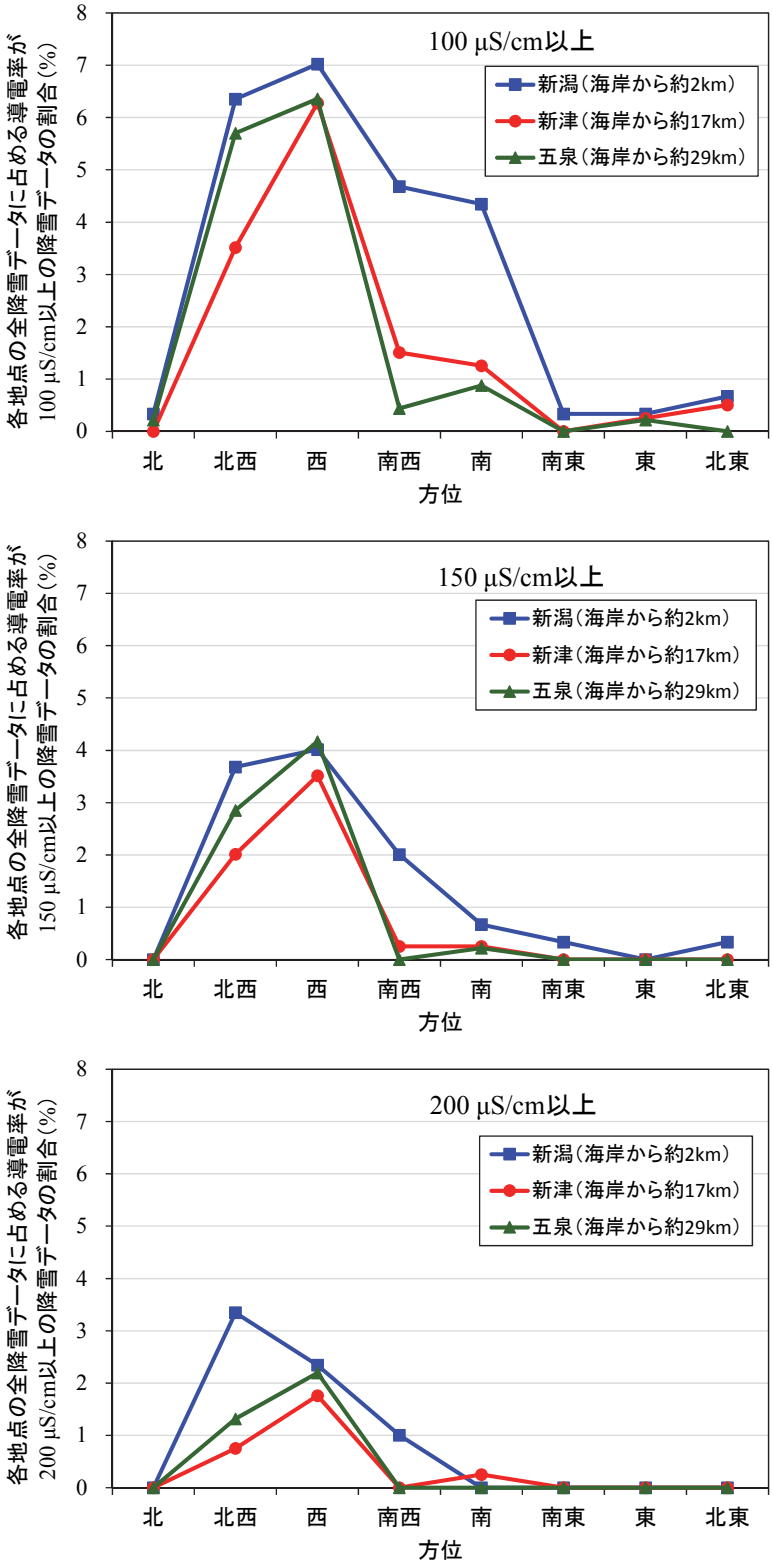


図 2.53 風向ごとの導電率 100，150，200 μS/cm 以上の降雪データの出現割合（2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）で採取）

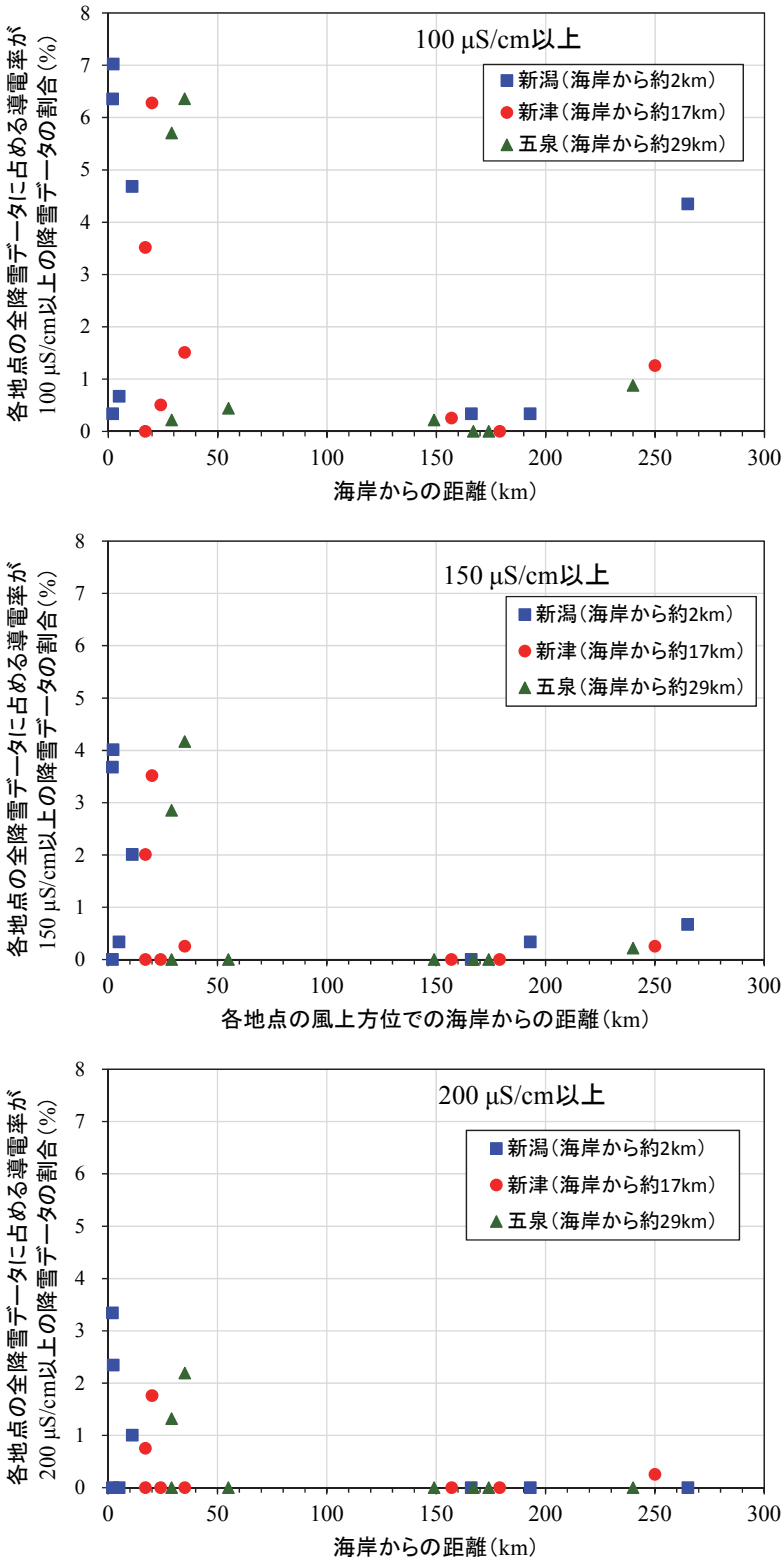


図 2.54 導電率 100，150，200 μS/cm 以上の降雪データの出現割合と各地点の風上方位での海岸からの距離の関係（2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）で採取）

d. まとめ—風向・風速や化学組成から見た導電率の高い降雪の発生条件—

以上のことより，新潟県下越地域で見られる 100 μS/cm 以上の導電率の相対的に高い降雪は，日本海側（西～北の風向）から風速 5 m/s 程度を超える風が吹くことにより海塩粒子がこの地域に運ばれることによってもたらされると推察された。また，このことは，海岸線に近い新潟地点と同様に，内陸に位置する新津地点や五泉地点においても共通して見られる現象であることが認められた。さらに，顕著に高い導電率を示す降雪が出現する風向は，沿岸域よりも内陸域で狭まる傾向が認められた。また，海塩の支配的な影響を受けた顕著に高い導電率の降雪が出現する地域の境界は，海岸からの距離が 50～150 km の範囲のいずれかに設定することが妥当と推察された。

(3) 導電率の高い降雪の発生条件に関する時々刻々のデータによる検討

2.3.4 では，粗大粒子モニターの時々刻々の計測値によって，大気中海塩成分濃度の時間変動を把握できる可能性が示された。以下では，降水導電率と粗大粒子濃度データの時々刻々の対応を見ることで，内陸地点における海塩粒子の流入による降雪導電率上昇について検討する。

例として 2 期間（2016 年 1 月 19 日，2016 年 1 月 23 日～24 日）の新津地点における降雪導電率と風向・風速，および粗大粒子モニター出力値の時間変動の対応を見ていく。

a. 2016 年 1 月 19 日における降水導電率と粗大粒子濃度の時間変動の対応—降水導電率の上昇と粗大粒子濃度の上昇が対応した例として—

図 2.55 は，暴風雪警報が発令された 2016 年 1 月 19 日とその前後期間の新津地点における降水導電率，APS で計測した粗大粒子状物質の体積濃度（粒径 2.288 μm，3.051 μm，7.234 μm），風向・風速の時間変動を示す。新津地点では 1 月 18 日 23 時頃より導電率が上昇し始め，1 月 19 日 1 時～7 時頃は 200 μS/cm 以上の値で推移し，1 月 19 日 7 時以降は，同日 19 時頃まで，断続的に 100 μS/cm 以上の導電率が計測された。この期間，粗大粒子状物質の体積濃度は 1 月 19 日 23 時頃から濃度が上昇し，1 月 19 日 7 時頃までに濃度上昇のピークが見られ，導電率上昇と時間的に対応している。また，1 月 19 日 7 時以降は，1 月 19 日 1 時～7 時頃に比べて，濃度が低下しており，定量的には詳細検討が必要だが，この期間でも導電率の時間変動と対応している。この間は 1 月 18 日 23 時頃～1 月 19 日 7 時では風向が西～西南西で，1 月 19 日 7 時～同日 19 時では風向が西南西～南西で，風速は両期間とも 6 m/s～8 m/s 程度であった。

b. 2016 年 1 月 23～24 日における降水導電率と粗大粒子濃度の時間変動の対応—低い降水導電率と低濃度な粗大粒子が対応した例として—

図 2.56 は，暴風雪警報が発令された 2016 年 1 月 23 日～24 日とその前後期間の新津地点における降水導電率，APS で計測した粗大粒子状物質の体積濃度（粒径 2.288 μm，3.051 μm，

7.234 μm)，風向・風速の時間変動を示す。新津地点では 1 月 24 日 3 時頃に開始した降水には導電率上昇は見られず，数 μS/cm～数十 μS/cm の低い値で推移していた。この期間，粗大粒子状物質の体積濃度は 1 月 24 日 6 時頃にやや濃度上昇が見られるものの，低い値で推移しており，導電率で見られる低い値で一定に推移する傾向と対応している。この間は，1 月 24 日 3 時～同日 18 時では，風向の変動が大きく，風速も 2 m/s 程度～10 m/s 程度と変動が大きく，1 月 24 日 18 時以降は風向が南南西で，風速は 2 m/s 程度であった。

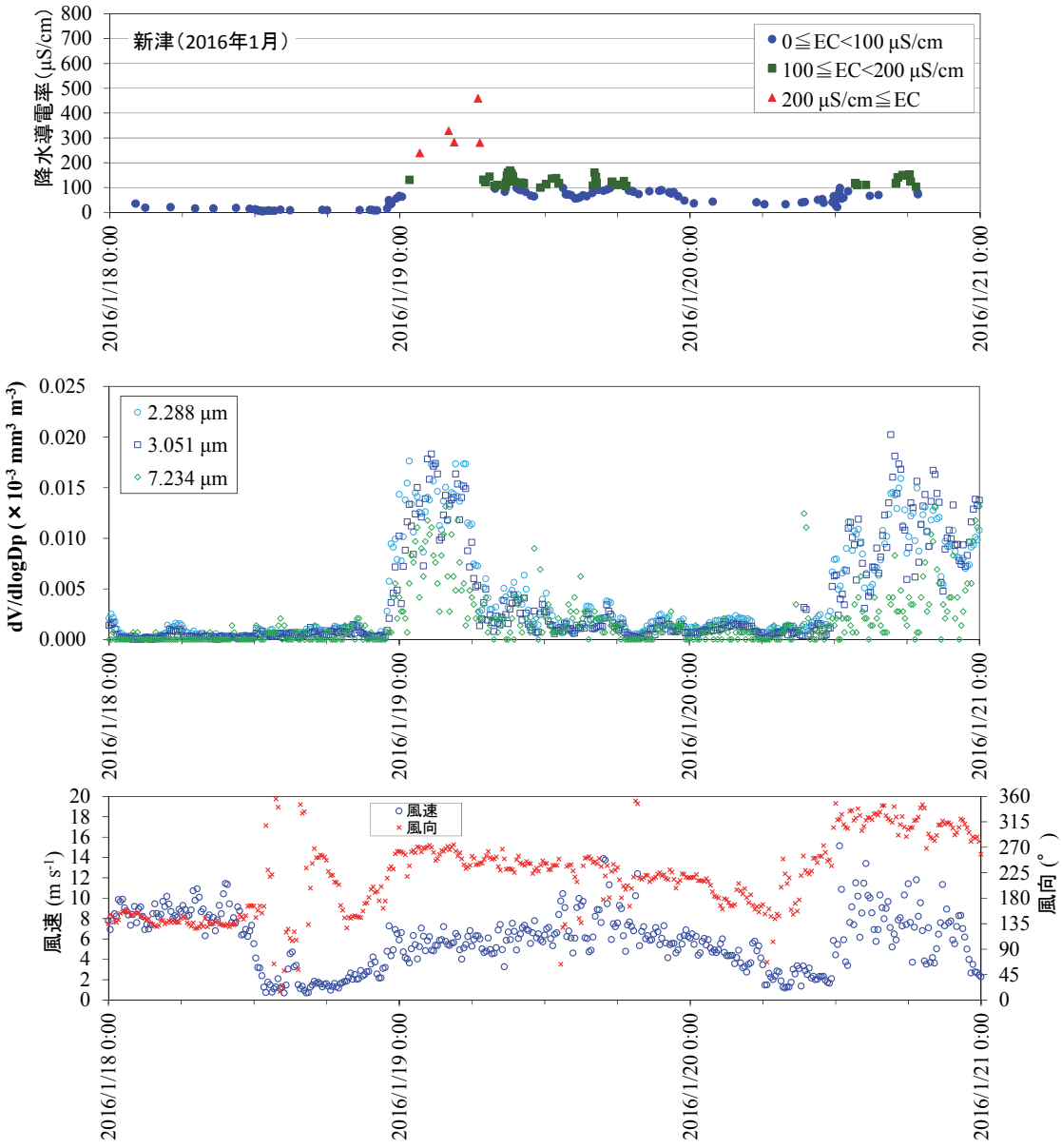


図 2.55 暴風雪警報が発令された 2016 年 1 月 19 日とその前後期間の新津地点における降水導電率，APS で計測した粗大粒子状物質の体積濃度，風向・風速の時間変動

c. まとめ—時々刻々のデータから見た降水導電率と粗大粒子濃度の対応—

以上のように，導電率上昇を確認できた期間においては，降水導電率の上昇と時間的に対応する粗大粒子状物質の濃度上昇が確認できた一方で，導電率上昇の見られなかった期間では，粗大粒子状物質の濃度上昇は見られなかった。このことから，時々刻々のデータからも，内陸地点における海塩粒子の流入による降雪導電率上昇が確認できた。

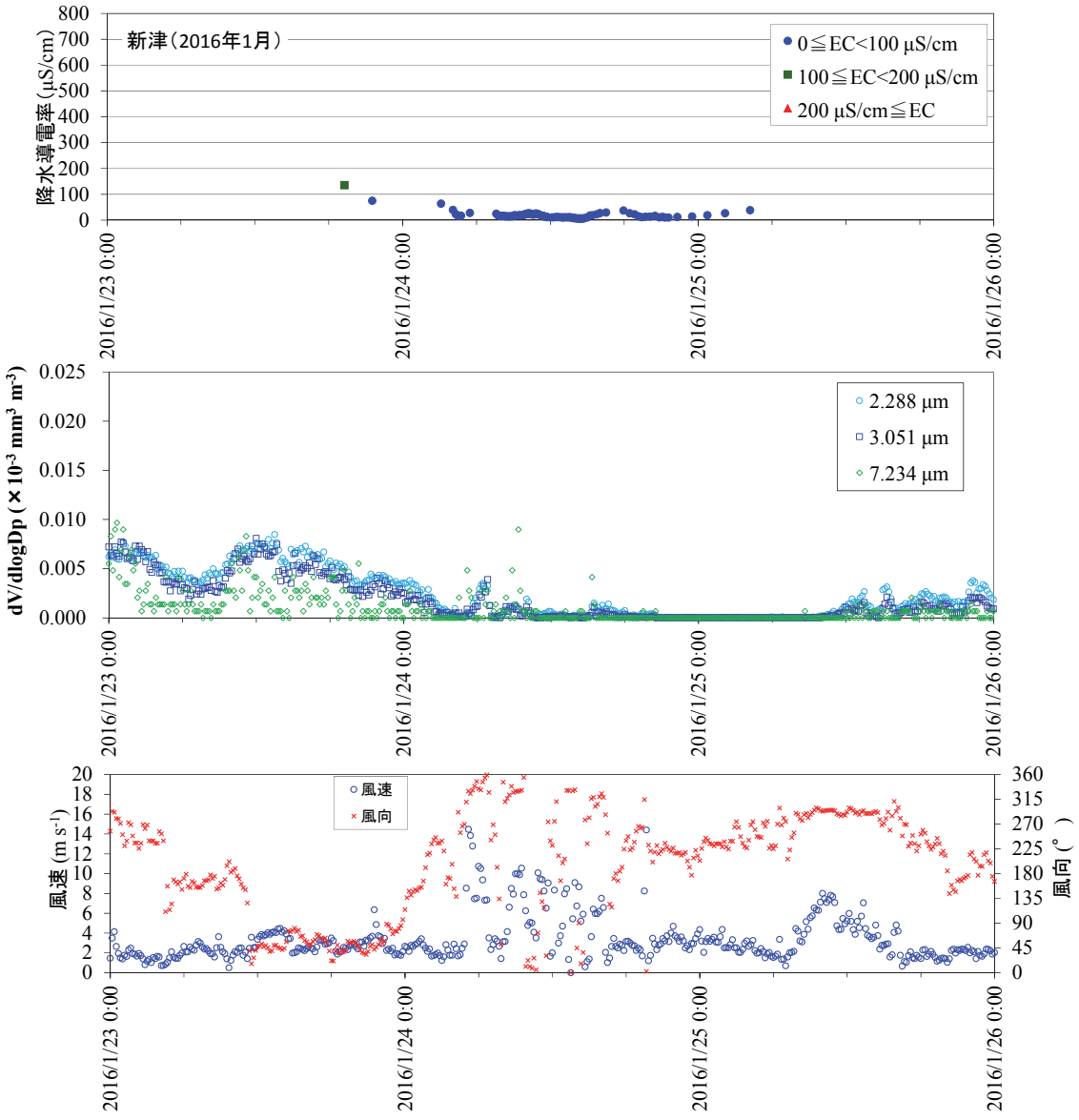


図 2.56 暴風雪警報が発令された 2016 年 1 月 23 日～24 日とその前後期間の新津地点における降水導電率，APS で計測した粗大粒子状物質の体積濃度，風向・風速の時間変動

2.3.6　内陸への海塩粒子流入における海塩湿性沈着の重要性

(1) 湿性沈着量を検討する理由

ここまで塩雪害発生の気象条件の解明に関しては，導電率の高い降雪が発生する条件を海塩成分の寄与や風向・風速との関係性から明らかにした。本項では内陸への海塩粒子流入における海塩湿性沈着の重要性について検討する。

まず，本検討を行う理由について述べる。

がいしの耐電圧特性に対しては，着雪の導電率が影響する。ただし，一般に降水強度と導電率との関係は，降水量と降水中成分濃度の関係[50]-[55]から類推されるとおり，反比例であり，がいしを橋絡させるほどの強い降水強度の時には，導電率が低い場合が多い。すなわち，塩雪害を引き起こすような，強い降水強度かつ高い導電率が発生することは稀であり，このような条件下では降水中の Na^+濃度と降水量の積で表される Na^+の湿性沈着量が大きいと予想される[56]。

また，これに関連した既往研究として，藤田ら[57]は，2005 年 12 月 5 日から 2006 年 3 月 27 日までの間を 9 つに区切られた各期間での新潟県内における気中・降水中化学組成観測データを用いることで，新潟下越雪害発生日時を含む期間のデータの特異性について議論した。その結果，塩雪害発生日時を含む期間の気中や降水中の Na^+濃度は，前後の期間と比べて極端に大きくないが，Na^+の湿性沈着量は極めて大きい値であったことが示された。そして，何らかの気象条件のもとで湿性沈着量の極大が内陸域に現れることが，塩雪害の発生に関係していると推察された。

そこで本節では，塩雪害発生気象条件・地形条件に対する海塩湿性沈着の重要性に関して，高導電率と多量の降水量の重畳，各要因の時間変化と海塩湿性沈着の重要性の点から検討を行う。

(2) 高い導電率と多量の降水量の重畳が発生する条件

まず，高い導電率と多量の降雪が重畳して発生について把握するとともにその条件について検討する。

a. 降雪導電率と降雪量の関係

図 2.57 は，2008 年度～2015 年度の各年の冬季の重点観測 3 地点における，降雪について導電率と降水量の関係を示したものである。図中の実線は「導電率×降水量」の等値線を意味する。一般的な傾向[56]と同様に，降水量の少ない試料の導電率は高く，降水量の多い試料の導電率は低くなる傾向が認められる。これは導電率と降水量が相殺する関係にあることを意味しており，基本的には，ある量の大気中成分に対して，それを捕捉する雨や雪の量が多くなるほど，降水中の成分濃度が希釈されるためと解釈される。一方，同一地点で見られる降雪の中にも「導電率×降水量」が比較的大きい領域に分布するものもある。

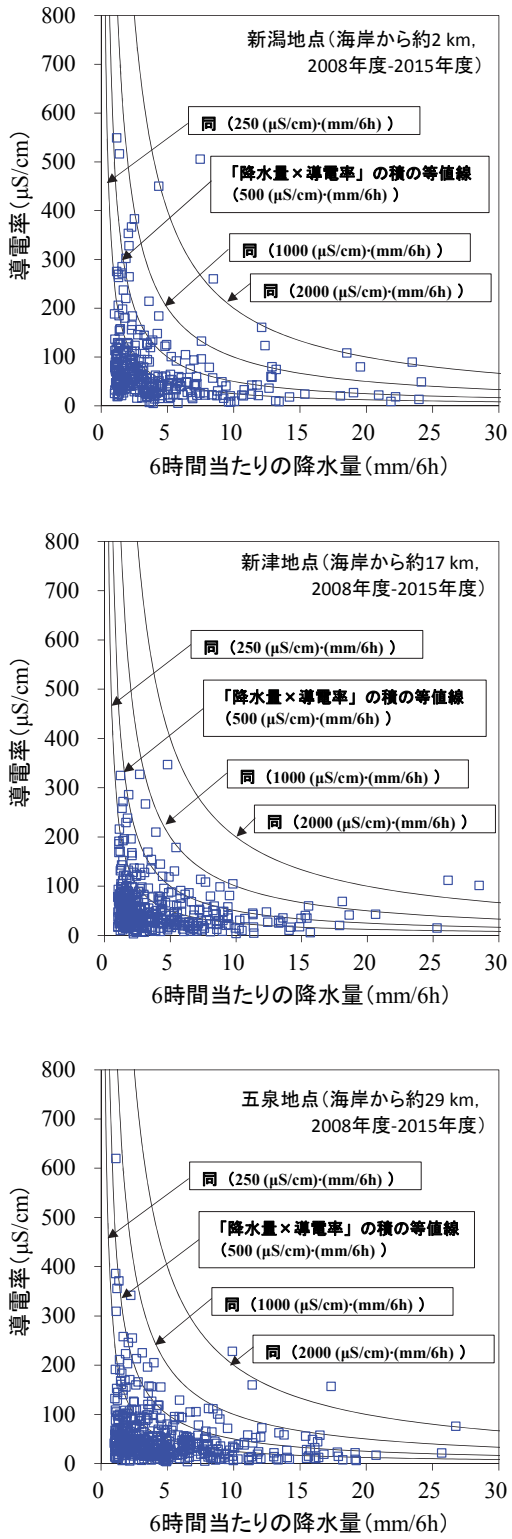


図 2.57 降雪導電率と降水量の関係（2008 年度～2015 年度の各年の冬季に重点観測 3 地点（新潟地点，新津地点，五泉地点）で採取，図中の実線は「導電率×降水量」の等値線を示す）[21]

b. 高い導電率と多量の降水量の重畳が発生する条件

表 2.5 は, 図 2.57 に示した結果のうち,「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え, かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である試料を抽出したものである。その中でも,「導電率×降水量」が 1000 (μS/cm)·(mm/6h)を超す試料は各地点において 4〜7 個しか見られず, 特に値が大きい試料と言える。「導電率×降水量」が 1000 (μS/cm)·(mm/6h)を超す試料は, 新潟地点で 1 試料だけ該当しないものがあるが, それ以外の全てにおいて, 表 2.3 に示される西南西〜西北西の風向で 10 m/s を超える風速が計測された日付, もしくはその日付の前後 2 日間以内に該当していた。

なお, 地点ごとに表 2.3 に示される西南西〜西北西の風向で 10 m/s を超える風速が計測された日付に該当する試料数を見ると, 新潟地点では, 当日が 8 個（表 2.5 中「○」と記載), 前後 1 日が 4 個（表 2.5 中「○'」と記載), 前後 2 日が 2 個（表 2.5 中「○''」と記載）で, 新津地点では, 当日が 9 個, 前後 1 日が 4 個, 前後 2 日が 1 個で, 五泉地点では, 当日が 13 個, 前後 1 日が 8 個, 前後 2 日が 0 個であった。このことから, 導電率が高くかつ多量の降雪が重畳して発生する条件と強い西風に何らかの関係が推察される。

また, 該当する複数の試料が連続して生じる期間は 5 つあった：期間①；2010 年 1 月 13〜14 日, 期間②；2010 年 12 月 25〜27 日, 期間③；2013 年 1 月 25〜26 日, 期間④；2013 年 12 月 12〜13 日, 期間⑤；2014 年 12 月 2〜3 日。さらに, これらの期間では「導電率×降水量」が 1000(μS/cm)·(mm/6h)を超す試料を含むことが多く, 導電率が高くかつ多量の降雪が重畳して発生する条件が顕著に現れている期間と考えられる。

表 2.3 に示すとおり, JPCZ（期間①と期間⑤）や二つ玉低気圧（期間④）の気象擾乱を伴っていることから, 導電率が高くかつ多量の降雪が重畳して発生する条件と強い西風の因果関係において, これらの気象擾乱が重要と考えられる。上記の因果関係における気象擾乱の重要性については, 木原ら[9,21]の気象・海塩輸送に関する数値解析結果を踏まえると, JPCZ 等の気象擾乱の周辺に発生した渦状擾乱周辺において海塩が多量に発生するとともに, それらが鉛直輸送され降水に取り込まれることで, 結果として, 多量の降水量によって希釈されても比較的高い海塩濃度が維持できるだけの多量の海塩供給がなされることが要因と推察される。

表2.5(a)　新潟地点（海岸から約2 km）における「導電率×降水量」が500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の6時間平均値が5 m/s以上である降雪試料リスト（2008年度～2015年度の各年の冬季，西南西～西北西の風向で10 m/sを超える風速が計測された日付との該当は，当日を「○」，前後1日を「○’」，前後2日を「○”」と記載，また，「導電率×降水量」が1000 (μS/cm)·(mm/6h)を超す試料は，セルを黄緑色で表示）[21]

地点	サンプル期間		雨雪判別	導電率×降水量	WSW-WNW	複数回が	降水量	導電率	海塩成分寄与	6h平均風速	6h平均風向
	START	END		(μS/cm)·(mm/6h)	かつ10 m/s以上	連続する期間	mm/6h	μS/cm	%	m/s	°
新潟地点	2008/12/26 6:00	2008/12/26 12:00	snow	682.1	○”		2.1	328.0	95.9	8.5	299.4
新潟地点	2009/1/13 18:00	2009/1/14 0:00	snow	554.9	×		2.1	264.0	95.2	5.4	307.3
新潟地点	2009/1/16 18:00	2009/1/17 0:00	snow	722.9	×		7.5	95.9	86.7	5.6	276.7
新潟地点	2009/12/20 18:00	2009/12/21 0:00	snow	2096.3	○		23.4	89.4	94.5	5.9	288.4
新潟地点	2010/1/13 0:00	2010/1/13 6:00	snow	560.7	○	期間①	1.9	302.0	95.3	5.6	241.1
新潟地点	2010/1/13 6:00	2010/1/13 12:00	snow	1944.7	○	期間①	4.3	450.0	99.0	7.0	274.1
新潟地点	2010/1/13 12:00	2010/1/13 18:00	snow	3763.4	○	期間①	7.5	505.0	95.7	6.7	326.8
新潟地点	2010/2/6 6:00	2010/2/6 12:00	snow	700.1	×		1.4	516.0	97.1	9.8	292.5
新潟地点	2010/2/6 18:00	2010/2/7 0:00	snow	717.2	×		2.0	353.0	96.4	8.4	319.5
新潟地点	2010/12/25 18:00	2010/12/26 0:00	snow	636.4	○	期間②	1.2	549.0	97.6	8.6	274.8
新潟地点	2010/12/26 6:00	2010/12/26 12:00	snow	663.9	○’	期間②	6.4	104.5	91.8	6.7	260.3
新潟地点	2010/12/26 18:00	2010/12/27 0:00	snow	1944.3	○’	期間②	12.1	160.7	94.2	6.8	235.5
新潟地点	2010/12/27 0:00	2010/12/27 6:00	snow	2003.4	○”	期間②	18.5	108.2	91.0	5.8	234.4
新潟地点	2011/1/16 18:00	2011/1/17 0:00	snow	521.7	×		3.9	134.5	91.0	5.0	284.1
新潟地点	2012/2/1 6:00	2012/2/1 12:00	snow	1032.6	×		12.9	80.2	65.3	5.2	210.3
新潟地点	2012/12/25 6:00	2012/12/25 12:00	snow	626.4	○		4.2	148.1	92.7	5.3	216.7
新潟地点	2013/1/2 18:00	2013/1/3 0:00	snow	833.4	○		2.3	366.0	95.6	7.7	274.3
新潟地点	2013/1/26 18:00	2013/1/27 0:00	snow	955.1	○’	(期間③)※	2.5	383.0	97.7	6.8	296.0
新潟地点	2013/12/13 6:00	2013/12/13 12:00	snow	2195.9	○	(期間④)※	8.4	260.0	93.8	5.6	232.0
新潟地点	2014/12/18 6:00	2014/12/18 12:00	snow	770.1	○’		3.6	214.0	95.3	6.7	281.1

表2.5(b)　新津地点（海岸から約17 km）における「導電率×降水量」が500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の6時間平均値が5 m/s以上である降雪試料リスト（2008年度～2015年度の各年の冬季，西南西～西北西の風向で10 m/sを超える風速が計測された日付との該当は，当日を「○」，前後1日を「○’」，前後2日を「○”」と記載，また，「導電率×降水量」が1000 (μS/cm)·(mm/6h)を超す試料は，セルを黄緑色で表示）[21]

地点	サンプル期間		雨雪判別	導電率×降水量	WSW-WNW	複数回が	降水量	導電率	海塩成分寄与	6h平均風速	6h平均風向
	START	END		(μS/cm)·(mm/6h)	かつ10 m/s以上	連続する期間	mm/6h	μS/cm	%	m/s	°
新津地点	2009/1/16 18:00	2009/1/17 0:00	snow	509.0	×		11.3	45.2	71.0	5.6	276.7
新津地点	2009/1/24 12:00	2009/1/24 18:00	snow	527.8	×		4.4	120.1	87.4	5.6	264.7
新津地点	2009/12/20 18:00	2009/12/21 0:00	snow	1021.0	○		9.8	104.7	93.5	5.9	288.4
新津地点	2010/1/13 0:00	2010/1/13 6:00	snow	830.2	○	期間①	7.7	108.3	86.8	5.6	241.1
新津地点	2010/1/13 6:00	2010/1/13 12:00	snow	1659.9	○	期間①	4.8	347.0	98.7	7.0	274.1
新津地点	2010/1/13 12:00	2010/1/13 18:00	snow	827.4	○	期間①	3.1	267.0	92.1	6.7	326.8
新津地点	2010/12/25 18:00	2010/12/26 0:00	snow	967.6	○	期間②	5.4	178.4	96.3	8.6	274.8
新津地点	2010/12/26 6:00	2010/12/26 12:00	snow	546.8	○’	期間②	9.4	58.3	80.6	6.7	260.3
新津地点	2010/12/27 0:00	2010/12/27 6:00	snow	933.5	○”	期間②	15.5	60.2	77.9	5.8	234.4
新津地点	2012/12/25 12:00	2012/12/25 18:00	snow	612.5	○		4.2	144.6	88.0	8.1	285.8
新津地点	2013/1/25 6:00	2013/1/25 12:00	snow	557.0	○	期間③	6.4	86.8	71.2	9.0	267.7
新津地点	2013/1/25 18:00	2013/1/26 0:00	snow	871.7	○	期間③	2.7	327.0	96.2	7.9	277.2
新津地点	2013/2/7 18:00	2013/2/8 0:00	snow	523.7	○’		1.8	286.0	85.8	7.2	270.0
新津地点	2013/12/13 6:00	2013/12/13 12:00	snow	557.2	○	(期間④)※	3.3	169.2	87.4	5.6	232.0
新津地点	2013/12/30 12:00	2013/12/30 18:00	snow	618.1	×		15.3	40.5	62.9	5.5	261.9
新津地点	2014/1/1 18:00	2014/1/2 0:00	snow	693.7	×		5.3	130.9	85.1	8.1	277.2
新津地点	2014/1/2 0:00	2014/1/2 6:00	snow	867.2	×		8.8	98.8	82.1	6.5	287.8
新津地点	2014/12/3 0:00	2014/12/3 6:00	snow	2894.3	○’	期間⑤	28.5	101.6	94.8	7.0	262.9
新津地点	2014/12/3 6:00	2014/12/3 12:00	snow	2926.6	○’	期間⑤	26.1	112.0	89.1	7.8	263.3

表2.5(c)　五泉地点（海岸から約29 km）における「導電率×降水量」が500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の6時間平均値が5 m/s以上である降雪試料リスト（2008年度～2015年度の各年の冬季，西南西～西北西の風向で10 m/sを超える風速が計測された日付との該当は，当日を「〇」，前後1日を「〇’」，前後2日を「〇”」と記載．また，「導電率×降水量」が1000 (μS/cm)·(mm/6h)を超す試料は，セルを黄緑色で表示）[21]

地点	サンプル期間		雨雪判別	導電率×降水量	WSW-WNW かつ10 m/s以上	複数回が連続する期間	降水量	導電率	海塩成分寄与	6h平均風速	6h平均風向
	START	END		(μS/cm)·(mm/6h)			mm/6h	μS/cm	%	m/s	°
五泉地点	2009/1/13 18:00	2009/1/14 9:00	snow	806.1	×		13.8	58.4	86.2	5.4	307.3
五泉地点	2009/1/16 18:00	2009/1/17 0:00	snow	776.9	×		16.0	48.7	67.7	5.6	276.7
五泉地点	2009/1/17 0:00	2009/1/17 6:00	snow	568.7	×		6.1	93.5	60.5	5.9	308.8
五泉地点	2009/1/24 12:00	2009/1/24 18:00	snow	563.0	×		5.9	95.5	84.4	5.6	264.7
五泉地点	2009/12/31 6:00	2009/12/31 12:00	snow	517.3	〇’		16.1	32.1	33.2	5.6	311.3
五泉地点	2010/1/13 0:00	2010/1/13 6:00	snow	756.0	〇	期間①	7.2	105.5	83.6	5.6	241.1
五泉地点	2010/1/13 6:00	2010/1/13 12:00	snow	2718.3	〇	期間①	17.3	156.7	94.5	7.0	274.1
五泉地点	2010/1/13 12:00	2010/1/13 18:00	snow	1820.5	〇	期間①	11.4	159.9	87.5	6.7	326.8
五泉地点	2010/1/14 0:00	2010/1/14 6:00	snow	640.2	〇’	期間①	11.1	57.9	62.3	6.0	315.0
五泉地点	2010/2/7 0:00	2010/2/7 6:00	snow	761.5	×		5.9	128.9	89.0	8.1	322.8
五泉地点	2010/12/25 0:00	2010/12/25 6:00	snow	814.8	〇	期間②	4.0	205.0	93.6	8.0	278.6
五泉地点	2010/12/25 6:00	2010/12/25 12:00	snow	529.1	〇	期間②	5.5	95.6	90.2	8.7	277.1
五泉地点	2010/12/25 12:00	2010/12/25 18:00	snow	589.6	〇	期間②	3.8	156.1	94.7	9.1	273.9
五泉地点	2010/12/25 18:00	2010/12/26 0:00	snow	883.9	〇	期間②	8.8	100.6	95.1	8.6	274.8
五泉地点	2010/12/26 0:00	2010/12/26 6:00	snow	568.3	〇’	期間②	3.6	157.5	92.3	8.5	270.0
五泉地点	2010/12/26 6:00	2010/12/26 12:00	snow	877.3	〇’	期間②	12.1	72.4	86.7	6.7	260.3
五泉地点	2011/1/9 18:00	2011/1/10 0:00	snow	703.2	×		6.7	104.6	63.7	6.8	319.2
五泉地点	2011/12/22 18:00	2011/12/23 0:00	snow	505.3	×		2.1	246.0	83.9	7.3	288.6
五泉地点	2012/2/4 7:50	2012/2/4 12:00	snow	515.9	×		4.4	118.6	61.4	7.1	267.1
五泉地点	2012/12/25 12:00	2012/12/25 18:00	snow	938.1	〇		8.4	111.2	73.8	8.1	285.8
五泉地点	2013/1/6 6:00	2013/1/6 12:00	snow	507.7	×		4.3	118.0	50.6	5.3	329.9
五泉地点	2013/1/25 12:00	2013/1/25 18:00	snow	565.7	〇	期間③	2.7	213.0	92.0	7.9	280.3
五泉地点	2013/1/25 18:00	2013/1/26 0:00	snow	688.6	〇	期間③	3.5	196.2	93.9	7.9	277.2
五泉地点	2013/1/26 12:00	2013/1/26 18:00	snow	764.6	〇’	期間③	2.2	342.0	91.9	9.3	285.6
五泉地点	2013/12/12 6:00	2013/12/12 12:00	snow	700.3	〇’	期間④	4.5	155.4	81.4	5.7	304.9
五泉地点	2013/12/13 12:00	2013/12/13 18:00	snow	952.4	〇	期間④	16.5	57.7	72.3	8.8	274.0
五泉地点	2013/12/30 12:00	2013/12/30 18:00	snow	859.1	×		15.4	55.7	46.6	5.5	261.9
五泉地点	2014/12/2 12:00	2014/12/2 18:00	snow	2258.2	〇	期間⑤	9.9	228.0	97.9	9.4	262.7
五泉地点	2014/12/2 18:00	2014/12/3 0:00	snow	2030.2	〇	期間⑤	26.7	75.9	93.5	7.5	266.9
五泉地点	2014/12/3 0:00	2014/12/3 6:00	snow	726.9	〇’	期間⑤	16.3	44.5	87.1	7.0	262.9
五泉地点	2014/12/14 18:00	2014/12/15 0:00	snow	508.1	×		3.6	143.1	79.3	5.5	313.3
五泉地点	2014/12/18 0:00	2014/12/18 6:00	snow	689.1	〇’		1.1	620.0	97.7	10.1	276.3

(3) 暴風雪時における塩雪害に関わる各要因の時間変化と海塩湿性沈着の重要性

塩雪害の発生には，さまざまな気象条件や地形条件が複雑に関与していると推察されるが，ここまでの議論から，塩雪害発生の必要条件の一つである，導電率が高くかつ多量の降雪の重畳した発生には，強い西風および気象擾乱との関連が示唆されている。ここでは，このようなイベントにおいて降雪導電率や大気中・降雪中海塩粒子にかかわる各要因の関連を評価する。

要因の評価手法においては，藤田ら[57]を参考にし，Na^+の湿性沈着量，乾性沈着量，降水量等の要因がイベント時においてどのような時間変動を示すかを調べることで，塩雪害事象にかかわる要因の重要性比較を試みる。なお，本研究では，藤田ら[57]の評価において用いられたデータと比較して，時間分解能（降水・粒子組成の 6 時間平均値）や空間分布（評価対象である新潟平野において沿岸から内陸の 3 地点）の点で詳細なデータを使用しており，数時間程度の厳しい気象条件下で比較的内陸で発生した新潟下越雪害に対して，同地域で観測された顕著なイベントの詳細な時間変動や空間分布に基づく直接的な評価が期待できる。

a. 検討対象とするイベントと塩雪害に関わる各要因の算出方法

対象とするイベントは，2008～2015 年度冬季の重点観測 3 地点におけるデータにおいて表 2.5 で抽出した「導電率×降水量」が特に大きい期間とした。対象イベントは，表 2.5 において新潟，新津，五泉の 3 地点で複数試料が連続する日付に含まれる期間がみられた期間①（2010 年 1 月 13 日）と期間②（2010 年 12 月 25～27 日），および，新津，五泉においてともに 1000 (μS/cm)·(mm/6h)を超す試料が見られた期間⑤(2014 年 12 月 2～3 日)とした。

対象イベントにおいて，①降水量，②風速，③降水中（降雨と降雪）の Na^+濃度，④大気中 Na^+濃度，⑤降水導電率，⑥Na^+湿性沈着量（鉛直方向），⑦Na^+乾性沈着量（鉛直方向），⑧Na^+湿性沈着量（水平方向），⑨Na^+乾性沈着量（水平方向），⑩「導電率×降水量」，⑪Na^+洗浄比の時間変化を調べた。

なお，Na^+湿性沈着量や乾性沈着量は，鉛直方向および水平方向における海塩粒子の輸送量（フラックス量）として評価した。水平方向での Na^+の湿性沈着量・乾性沈着量は，大気中に存在する降雨・降雪に含まれる／含まれない Na^+の濃度と水平風速の積として定義され，それぞれ，降水を介する／介さない形での風による海塩粒子の水平輸送量を示す。水平方向の Na^+湿性沈着量の算出に用いた雪片や雨滴の落下速度は，Yuter ら[58]の観測結果に基づき，それぞれ 1 m/s および 6 m/s とした。また，鉛直方向の乾性沈着量の算定に当たっては藤田ら[57]を参考に Na^+の乾性沈着速度を 0.65 cm/s とした。なお，Na^+洗浄比は降水中 Na^+濃度を大気中 Na^+濃度で除した値として定義され，値が大きいほど降水による海塩粒子の取り込み効率が高いことを示す。

b. 暴風雪イベントにおける塩雪害に関わる各要因の時間変化

図 2.58(a)，図 2.59(a)，図 2.60(a)には期間①，②，⑤での新潟，新津，五泉における各要因の時系列変化をそれぞれ示す。図中，「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料は枠で囲んで示した。なお，各要因の重要度を評価するため，期間ごとに各地点における期間全体での平均値に対する比（相対値）で示した。また，塩雪害の発生に海塩粒子の湿性沈着と乾性沈着が量的にどのように関与しているかを考察するため，同一期間における Na^+の湿性沈着量，乾性沈着量を鉛直方向と水平方向のフラックス量の絶対値で比較して示した（図 2.58(b)-(c)，図 2.59(b)-(c)，図 2.60(b)-(c)）。

図 2.58～図 2.60 を見ると，三つの期間のうち，「導電率×降水量」が特に大きい時と平時の差が最も明瞭に見られたのは期間①であったことから，期間①について以下に詳述する。なお，期間⑤においても，期間①程度の大きさの「導電率×降水量」が見られているが，先述の「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料が，新潟地点において見られなかったことから，3 地点にわたる整理を行うためにも，期間①が代表例として最適と判断した。

図 2.58(a)に示されるとおり，期間①においては，2010 年 1 月 13 日 0 時～18 時にかけて新潟，新津，五泉地点で「導電率×降水量」が特に大きい降雪が見られた。この間は，前後期間に比べると風速が上昇しているが，それに対して，降水導電率，降水中 Na^+濃度，大気中 Na^+濃度も増大している。また，降水量にも増大が認められる。先述のとおり，海塩粒子の指標となる Na^+は降水中濃度，大気中濃度ともに海風時の風速の上昇に伴って増大するが，本事例においてはその増大の程度に相違が見られた。2010 年 1 月 13 日 0 時～18 時での降水中 Na^+濃度は，相対値の最大で見ると，新潟で 3.3，新津で 4.2，五泉で 3.2 であったのに対して，大気中 Na^+濃度は，同様に相対値の最大で見ると，新潟で 3.0，新津で 2.2，五泉で 1.7 であり，新潟では両者の相対値は同程度まで上昇したが，新津と五泉では大気中 Na^+濃度に比べて降水中 Na^+濃度の上昇幅の方が大きかったことがわかる。図 2.57 で述べたとおり，降水中成分濃度には降水量の増大に伴い低下する傾向が認められるが，本期間では，降水量が増大しているにもかかわらず，降水中 Na^+濃度は増大し，かつ内陸の新津や五泉では大気中 Na^+濃度の増大幅を上回っていた。海塩粒子の降水による取り込みの指標となる Na^+の洗浄比は，一般に時間当たりの降水量（降水強度）が増大するほど低下する傾向を持つが，2010 年 1 月 13 日 0 時～18 時においては前後期間に比べてむしろ増大しており，降水による効率的な海塩粒子の取り込みの可能性が推察される。

c. 暴風雪イベントにおける海塩の湿性沈着量と乾性沈着量の比較

次に，同一期間における Na^+の湿性沈着量，乾性沈着量を絶対値で比較する。まずは，鉛直方向のフラックス量で比較した Na^+の湿性沈着量，乾性沈着量の時間変化について見ていく（図 2.58(b)）。なお，図中，「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速

の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料は枠で囲んで示すとともに，湿性沈着のプロットは降雨時は白抜き，降雪時は青塗りとして区別して示した。

「導電率×降水量」が特に大きい降雪が見られた 2010 年 1 月 13 日 0 時～18 時において極大値を示すという点では，Na^+の湿性沈着量，乾性沈着量には共通した挙動が認められたが，その増大幅は Na^+の湿性沈着量の方が乾性沈着量に比べて著しく大きいことがわかった。オーダーで見ると，Na^+の湿性沈着量が数十 μg/(m^2·s)であり，数 μg/(m^2·s)の乾性沈着量に比べて一桁大きい。また，新潟～五泉で沿岸から内陸にかけた低下幅を見ると，Na^+の乾性沈着量では，沿岸から内陸にかけて新津で 69%，五泉で 87%の減少が見られたが（乾性沈着量の極大値：4.2 μg/(m^2·s)（新潟）→1.3 μg/(m^2·s)（新津）→0.6 μg/(m^2·s)（五泉)），一方で，Na^+の湿性沈着量では，新津で 57%，五泉で 34%の減少（湿性沈着量の極大値 : 26.6 μg/(m^2·s)（新潟）→11.4 μg/(m^2·s)（新津）→17.5 μg/(m^2·s)（五泉)）にとどまり，内陸に進むにつれて見られる海塩粒子量の距離減衰は，湿性沈着の方が乾性沈着に比べて小さかった。そのため，湿性沈着量と乾性沈着量の極大値の大小関係を地点ごとに比較すると，沿岸の新潟では湿性沈着量が乾性沈着量に比べて 6.3 倍の大きさであるが，内陸の新津では湿性沈着量がさらに乾性沈着量に比べて大きくなり（8.8 倍）となり，さらに内陸に進んだ五泉では湿性沈着量が乾性沈着量に比べて圧倒的に大きくなった（29.1 倍)。なお，Na^+湿性沈着量では，新津よりも内陸の五泉の方が大きい値を示しているが，これは，降雪中 Na^+濃度では，新津（51.7 mg/L）の方が五泉（21.7 mg/L）よりも高濃度である一方で，降雪量では，五泉（17.3 mm/6h）が新津（4.8 mm/6h）を大きく上回ったことによって，降雪中 Na^+濃度と降雪量の積である Na^+湿性沈着量において，上記のような海岸からの距離だけでは説明できない傾向が生じたと考えられる。ただし，詳細な要因については特定できていない。

上記のような，湿性沈着量が乾性沈着量に比べて著しく大きい傾向や，沿岸の地点から内陸に進むにつれて，湿性沈着量と乾性沈着量の大小関係において湿性沈着が圧倒的になる傾向は，水平方向のフラックス量で比較した場合でも同様に認められた（図 2.58(c)）。

また，期間⑤や期間②においては，期間①に比べると「導電率×降水量」が特に大きい時と平時の差が明瞭ではなかったが，期間①における傾向は共通して認められた（図 2.59 および図 2.60）。

d. まとめ—暴風雪時における海塩湿性沈着の重要性—

以上のことから，「導電率×降水量」が顕著に大きいイベント時に，海塩の湿性沈着量の増大幅が特に大きい点が明らかになり，内陸の地点ほど，海塩の湿性沈着量が乾性沈着量に比べ重要性を増すことが示唆された。

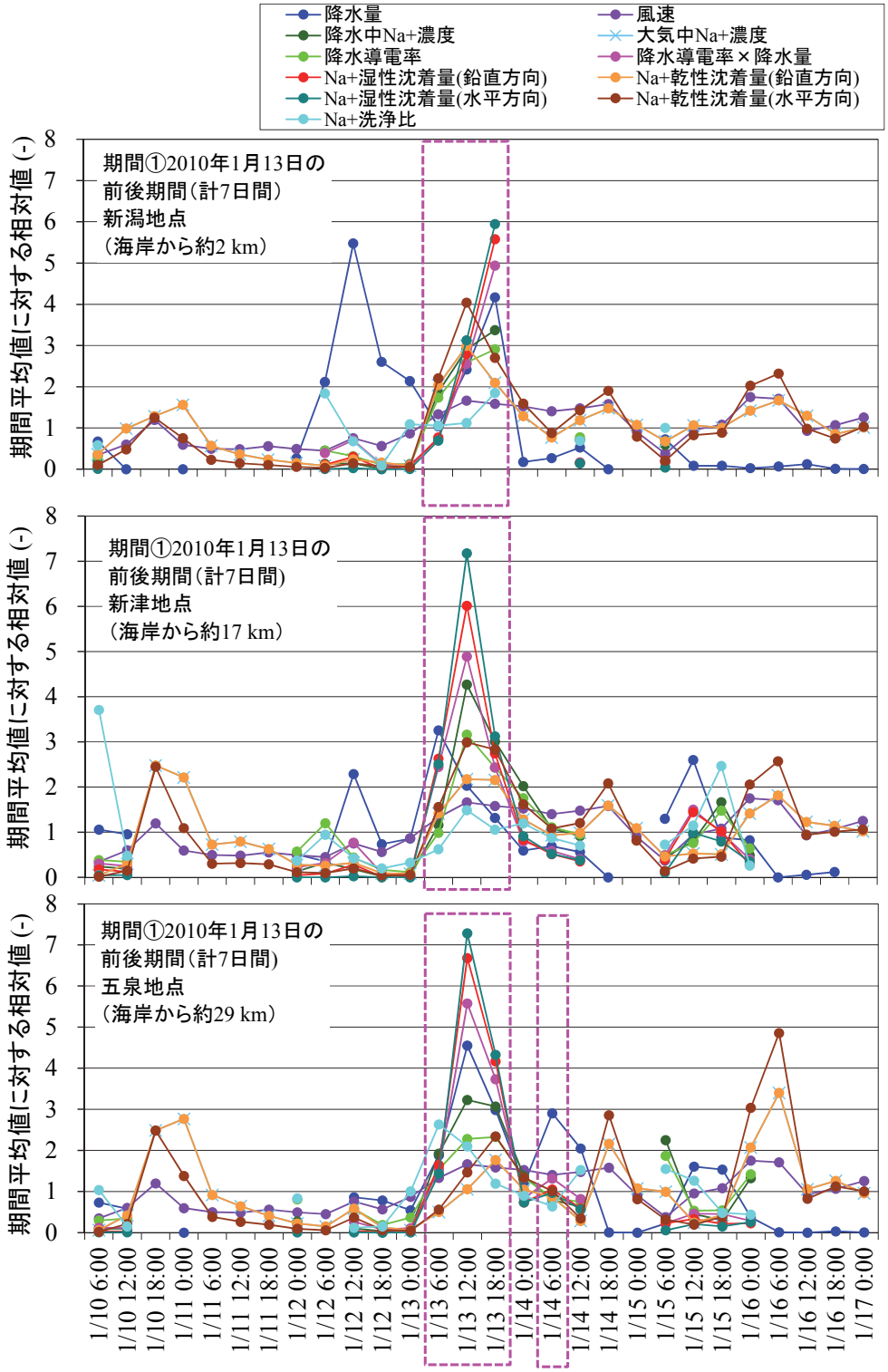


図 2.58(a)期間①における重点観測 3 地点における各因子の時間変化（「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる）[21]

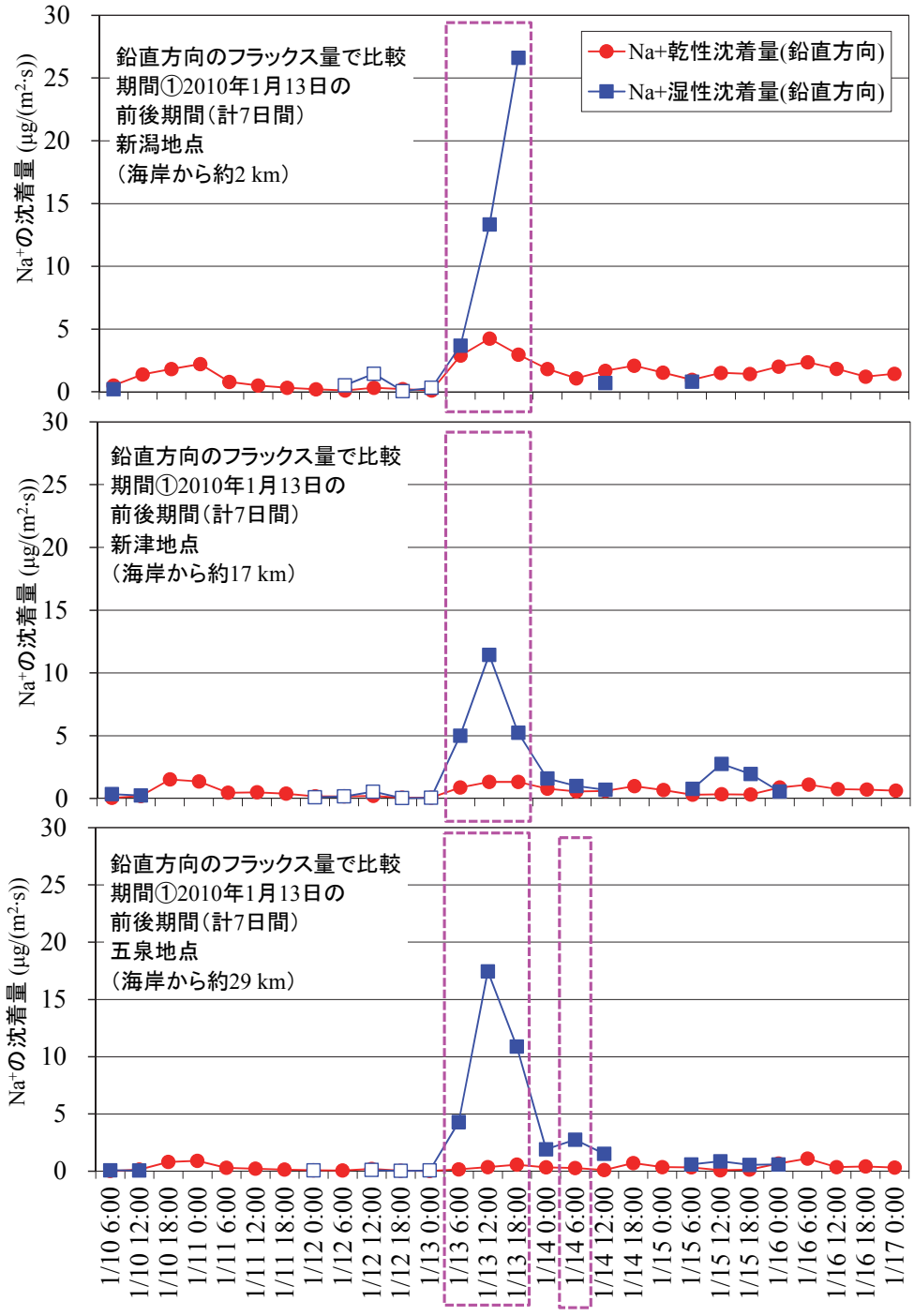


図 2.58(b)鉛直方向のフラックス量で比較した期間①における重点観測 3 地点における Na^+ の湿性沈着量，乾性沈着量の時間変化（「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h) を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる。湿性沈着量のプロットは白抜きが降雨，青塗りが降雪を示す。）[21]

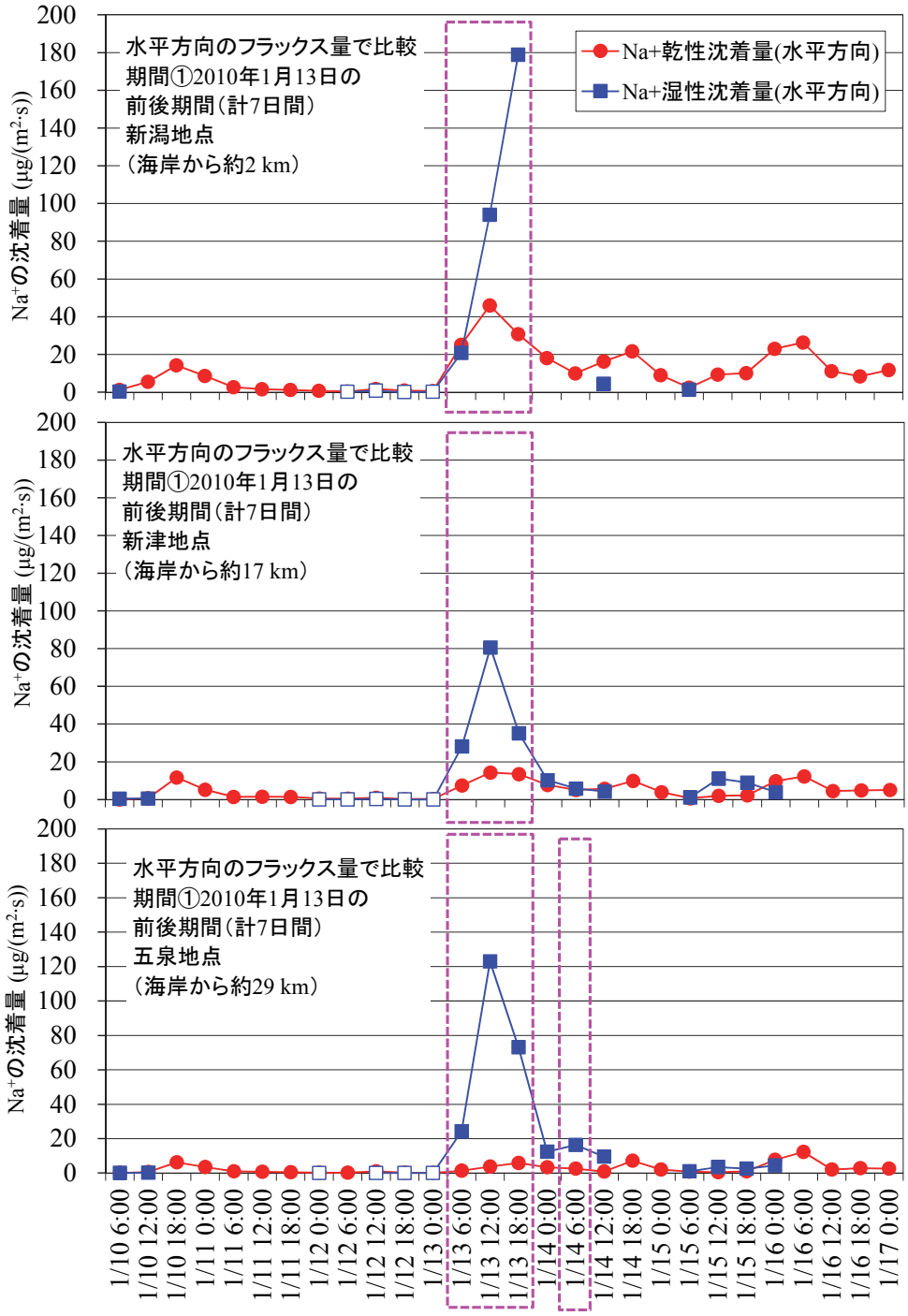


図 2.58(c) 水平方向のフラックス量で比較した期間①における重点観測 3 地点における Na^+ の湿性沈着量，乾性沈着量の時間変化（「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h) を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる。湿性沈着量のプロットは白抜きが降雨，青塗りが降雪を示す。）[21]

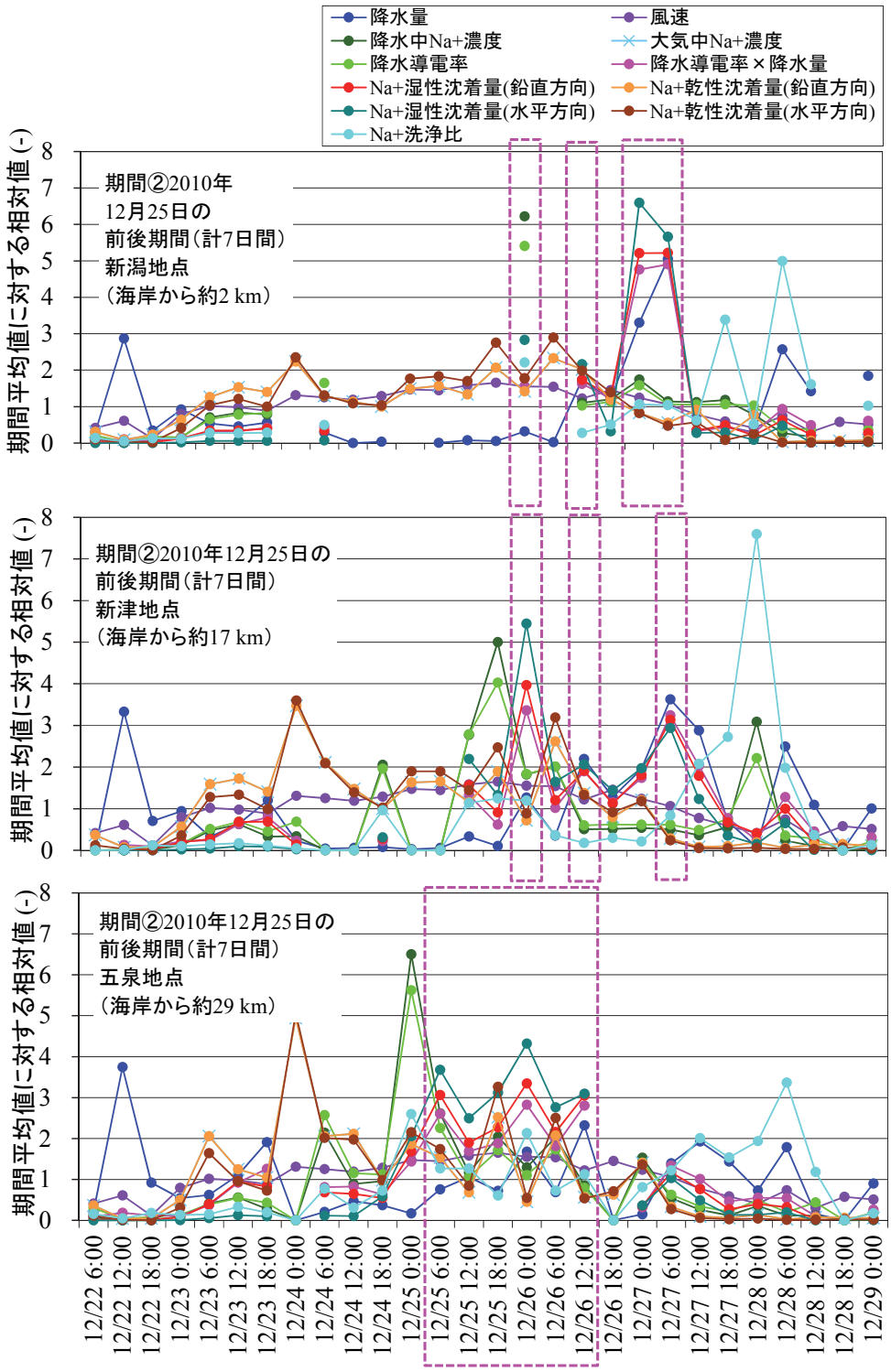


図 2.59(a) 期間②における重点観測 3 地点における各因子の時間変化（「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる）[21]

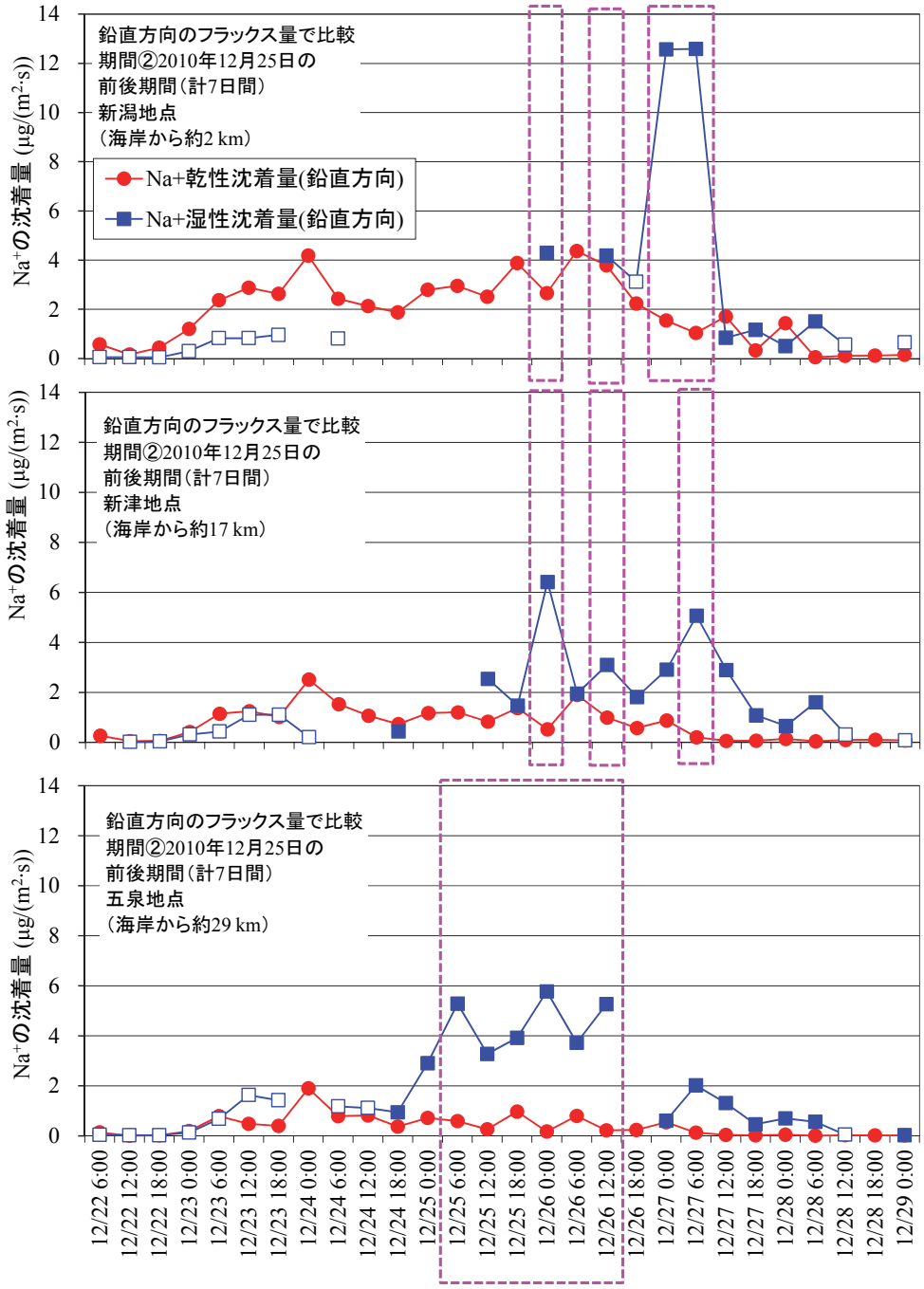


図2.59(b) 鉛直方向のフラックス量で比較した期間②における重点観測3地点におけるNa^+の湿性沈着量，乾性沈着量の時間変化（「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる。湿性沈着量のプロットは白抜きが降雨，青塗りが降雪を示す。）[21]

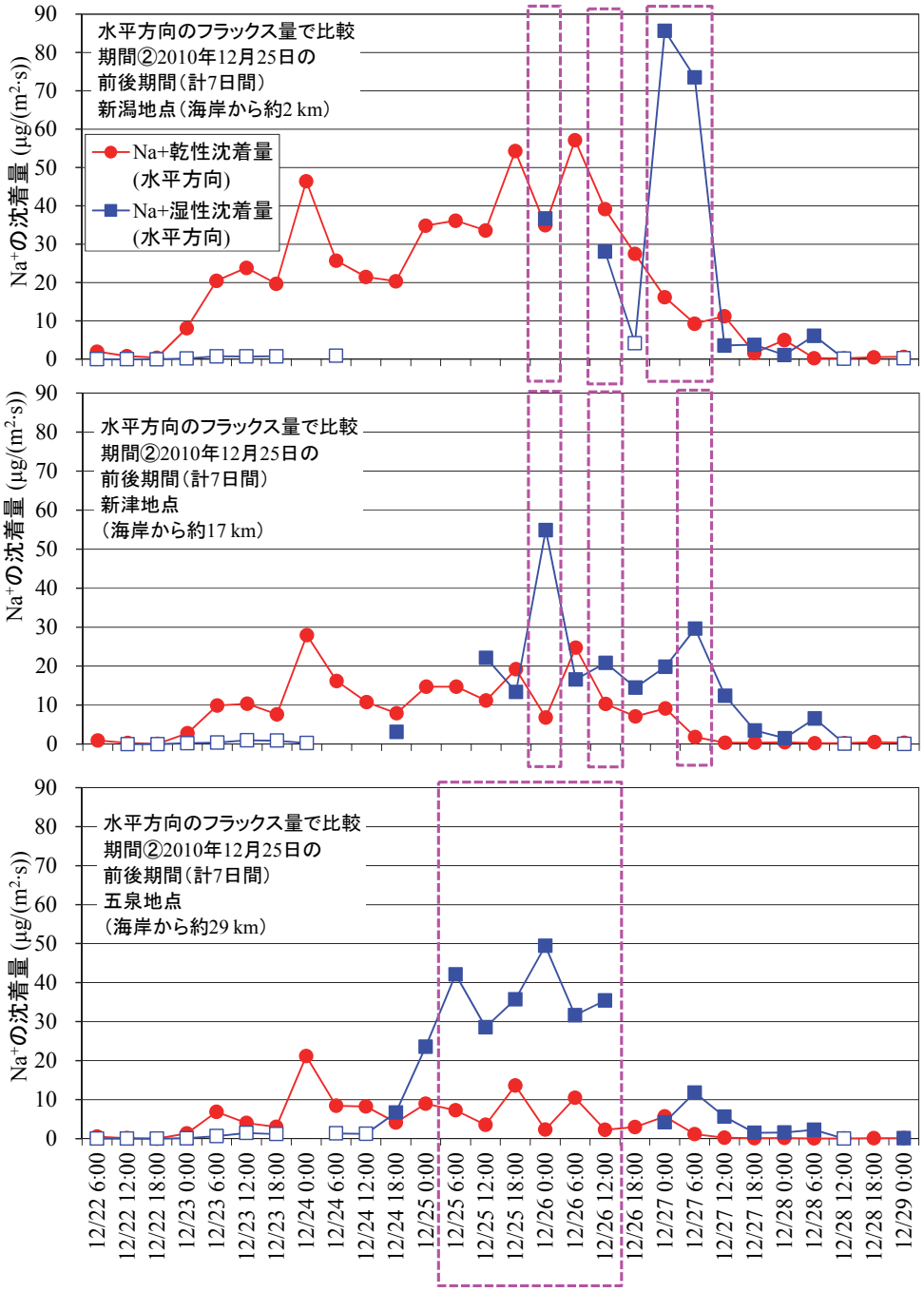


図 2.59(c) 水平方向のフラックス量で比較した期間②における重点観測 3 地点における Na^+ の湿性沈着量，乾性沈着量の時間変化（「導電率 × 降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる。湿性沈着量のプロットは白抜きが降雨，青塗りが降雪を示す。）[21]

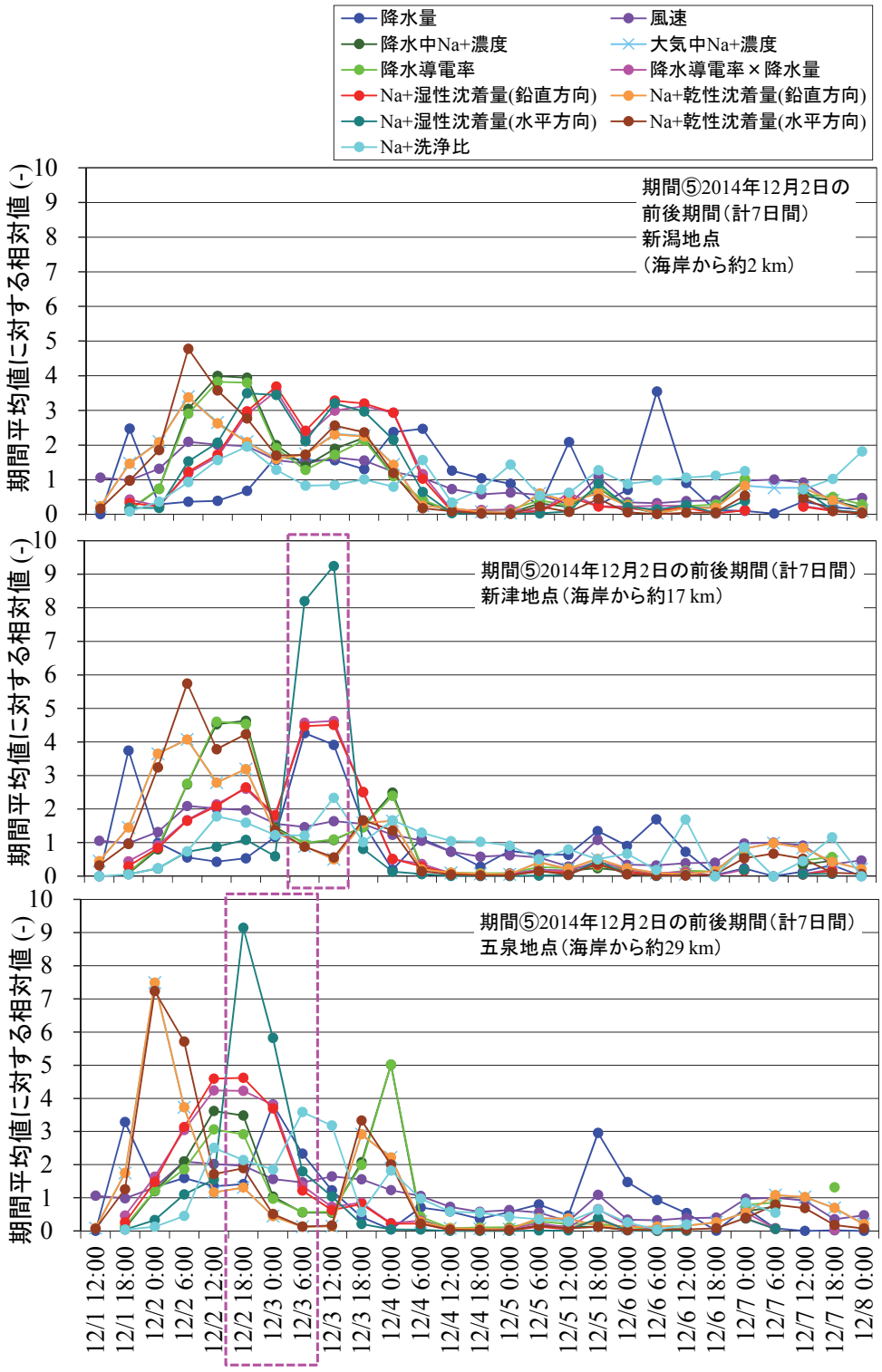


図 2.60(a) 期間⑤における重点観測 3 地点における各因子の時間変化（「導電率×降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる）[21]

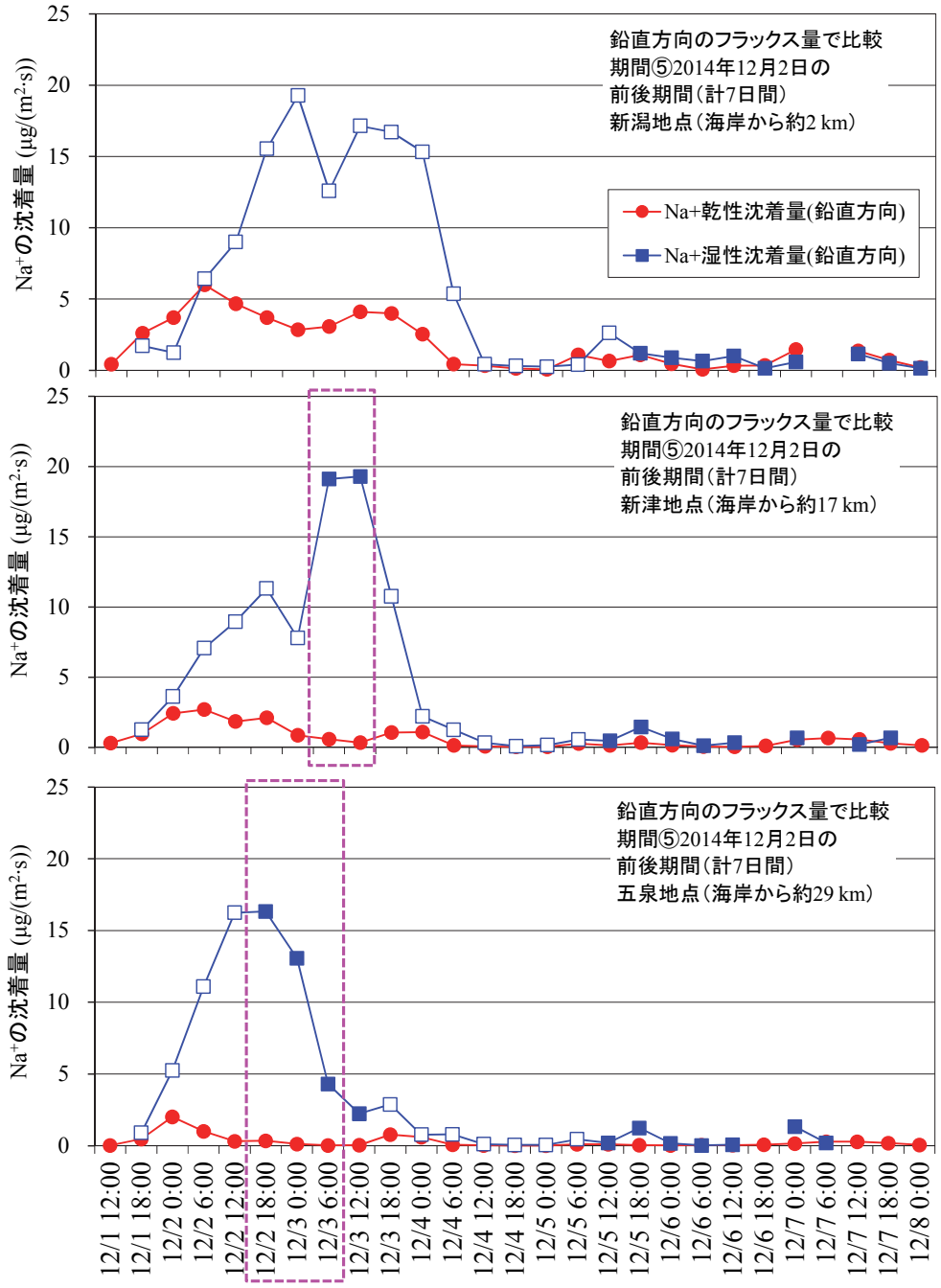


図 2.60(b) 鉛直方向のフラックスで比較した期間⑤における重点観測 3 地点における Na^+ の湿性沈着量，乾性沈着量の時間変化（「導電率 × 降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる。湿性沈着量のプロットは白抜きが降雨，青塗りが降雪を示す。）[21]

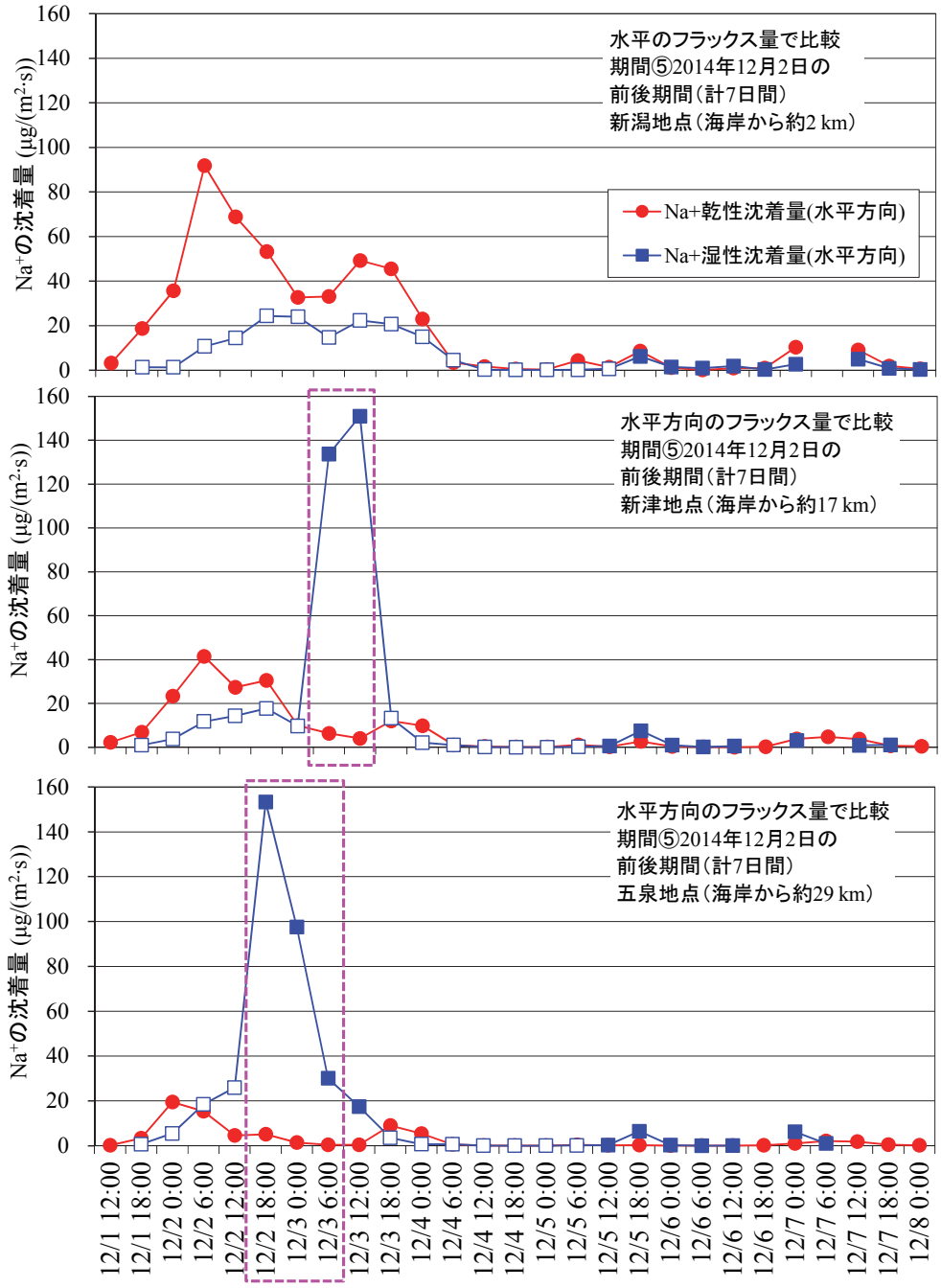


図 2.60(c) 水平方向のフラックスで比較した期間⑤における重点観測 3 地点における Na^+ の湿性沈着量，乾性沈着量の時間変化（「導電率 × 降水量」が 500 (μS/cm)·(mm/6h)を超え，かつ風速の 6 時間平均値が 5 m/s 以上である降雪試料を枠で囲んでいる。湿性沈着量のプロットは白抜きが降雨，青塗りが降雪を示す。）[21]

2.4 まとめ

本章では，新潟下越雪害が発生した地域において大気中粒子・降水の現地観測を行い，海塩成分が導電率に与える影響や内陸への海塩輸送における湿性沈着の重要性について検討することで，暴風雪時の海塩粒子流入の時空間的動態の解明を図った。得られた成果のうち特に重要なものは以下のとおりである。

1. 新潟下越雪害発生時には，日本海寒帯気団収束帯上（JPCZ）に発生していた渦状擾乱周辺で降雪中の海塩が高濃度となり，この高濃度の海塩が降水帯にともなって新潟平野へ輸送された結果，塩雪害発生エリアでは，西からの強風かつ着雪適温の条件下で高濃度の海塩を含む多量の降雪が 2〜3 時間継続したものと推定された。
2. 新潟県下越地域において 200 μS/cm 以上の高い導電率を示す降雪が見られる場合は，その導電率においては，非海塩成分に比べて，海塩成分の寄与が支配的となることが明らかとなった。このことは，沿岸〜内陸に共通して認められた。
3. 風向や風速に対する降水や粒子状物質中の海塩成分・非海塩成分濃度の応答性には明瞭な相違が見られ，海からの風向で風速が強くなる条件下では，海塩成分では降水・粒子状物質ともに濃度が増大し，非海塩成分では降水・粒子状物質ともに濃度が低下することがわかった。
4. 200 μS/cm 以上の高い導電率を示す降雪は，海から風速 5 m/s 程度を超える風が吹く条件下で発生し，これら降雪の導電率への寄与においては，海塩成分が支配的であった。このことは，沿岸〜内陸に共通して認められる条件であった。さらに，顕著に高い導電率を示す降雪が出現する風向は，沿岸域よりも内陸域で狭まる傾向が認められた。また，海塩の支配的な影響を受けた顕著に高い導電率の降雪が出現する地域の境界は，海岸からの距離が 50〜150 km の範囲のいずれかに設定することが妥当と推察された。
5. 高い導電率と多量の降雪量が重畳する降雪においては，西から（西南西〜西北西）10 m/s を超える風速の生じる期間にほぼ含まれていた。なお，これらの期間では JPCZ や二つ玉低気圧の気象擾乱をともなっていることから，数値解析結果から導き出された結果と整合的であり，多量の降水量によって希釈されても比較的高い海塩濃度が維持できるだけの多量の海塩供給が気象擾乱周辺においてなされたことが示唆された。
6. 西から（西南西〜西北西）10 m/s を超える風速下で高い導電率と多量の降雪量が重畳する降雪が見られた期間においては，Na^+の湿性沈着量が，Na^+の乾性沈着量に比べて著しく大きい極大値を示していた。この傾向は，沿岸地点に比べて，内陸の地点で顕著に認められた。
7. これらのことから，新潟県下越地域に見られる暴風雪イベントにおいては，沿岸から内陸へ海塩粒子が多量にもたらされる沈着過程として，乾性沈着よりも湿性沈着の寄与が重要であることが示された。

以上の成果を受けて，3 章では塩雪害の発生可能性指標の提案につなげる。

第 2 章参考文献

[1] 小田島達彦, 池川豊年, 坂田学, 「新潟下越雪害と再発防止に向けた研究の取り組み」, 日本風工学会誌, Vol. 33, 17-22 (2008).

[2] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会, 「今後の雪害対策のあり方」, http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g70125a01j.pdf , (2007).

[3] 原宏, 「日本の降水の化学」, 日本化学会誌, Vol. 11, pp. 733-748 (1997).

[4] S. Fujita, A. Takahashi and T. Sakurai, “The wet deposition of acid and some major ions over the Japanese Archipelago”, *Tellus*, 55B, 23-34 (2003).

[5] Y. Ichikawa, H. Hayami and S. Fujita, “Long-range transport model for East Asia to estimate sulfur deposition in Japan”, *J. Appel. Meteor.*, 37, 1364-1374 (1998).

[6] S. V. Fikke, T. M. Ohnstad, H. Förster, L. Rolfseng and T. Telstad, “Effect of long range airborne pollution on outdoor insulation”, Nordic Insulation Symposium, pp.103-112 (1994).

[7] W. C. Keene, A. A. P. Pszenny, J. N. Galloway and M. E. Hawley, “Sea-salt corrections and interpretation of constitutent ratios in marine precipitation”, *J. Geophys. Res.*, 91(D6), 6647-6658 (1986).

[8] M. E. Hawley, J. N. Galloway and W. C. Keene, “Standard error calculations for non-sea salt constituents in marine precipitation”, *Water, Air, and Soil Pollution,* 42, 87-102 (1988).

[9] 木原直人, 野村光春, 高橋章, 大原信, 平口博丸, 「時間変化する気象条件下での大気中と降水中の海塩濃度予測手法の開発」, 電力中央研究所報告, N11011 (2012).

[10] R. Vet, R. S. Artz, S. Carou, M. Shaw, C.-U. Ro, W. Aas, A. Baker, V. C. Bowersox, F. Dentener, C. Galy-Lacaux, A. Hou, J. J. Pienaar, R. Gillett, M. C. Forti, S. Gromov, H. Hara, T. Khodzer, N. M. Mahowald, S. Nickovic, P. S. P. Rao and N. W. Reid, “A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus”, *Atmos. Environ.*, 93, pp.3-100 (2014).

[11] P.J. Lloyd, “Changes in the wet precipitation of sodium and chloride over the continental United States, 1984-2006”, *Atmos. Environ.*, 44, 3196-3206 (2010).

[12] A.M.M. Manders, M. Schaap, X. Querol, M.F.M.A. Albert, J.Vercauteren, T.A.J. Kuhlbusch, R. Hoogerbrugge, “Sea salt concentrations across the European continent”, *Atmos. Environ.*, 44, 2324-2442 (2010).

[13] S. Tsyro, W. Aas, J. Soares, M. Sofiev, H. Berge, G. Spindler, “Modelling of sea salt concentrations over Europe: key uncertainties and comparison with observations”, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 10367-10388 (2011).

[14] V. L. Foltescu, S.C. Pryor, C. Bennet, “Sea salt generation, dispersion and removal on the regional scale”, *Atmos. Environ.*, 39, 2123-2133 (2005).

[15] G. R. Meira, M.C. Andrade, I.J. Padaratz, M.C. Alonso, J.C. Borba Jr., “Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil”, *Atmos. Environ.*, 40, 5596-8607 (2006).

[16] G. R. Meira, C. Andrade, C. Alonso, I.J. Padaratz, J.C. Borba, “Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone - A tool for corrosion studies”, *Corros. Sci.*, Vol.50, pp.2724-2731 (2008).

[17] M. E. R. Gustafsson and E. H. Larsson, “Spatial and temporal patterns of chroide deposition in southern Sweden”, *Water, Air, and Soil Pollution*, 124, 345-369 (2000).

[18] Network Center for EANET, “Technical Manual for Air Concentration Monitoring in East Asia”, December 2013 (2013).

[19] 全国環境研協議会 酸性雨広域大気汚染調査部会, 「第 6 次酸性雨全国調査報告書（平成 28 年度）」, 全国環境研会誌, Vol. 43, 79-119 (2018).

[20] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, “Atmospheric chemistry and physics-From air pollution to climate change-, Second edition”, John Wiley & Sons, Inc. (2006).

[21] 大原信, 木原直人, 麻生照雄, 大塚弘, 屋地康平, 守護雅富, 西原崇, 平口博丸, 「塩雪害の発生気象条件に関する数値解析的および観測的研究－がいしへの圧密着雪を伴う塩雪害発生可能性の指標の提案－」, 電力中央研究所報告, V17001, (2017).

[22] T. Onodera, H. Inukai and T. Odashima, “Overview of power outage in the Niigata Kaetsu Area caused by a snowstorm”, IWAIS XII (2007).

[23] 西原崇, 杉本聡一郎, 清水幹夫, 本間宏也, 石川智巳, 屋地康平, 松宮央登, 大原信, 木原直人, 麻生照雄, 渡邉眞人, 平口博丸, 「送電設備の雪害に関する研究 －2007～2011 年度成果－」, 電力中央研究所報告, N19 (2012).

[24] 大原信, 藤田慎一, 杉本聡一郎, 高橋章, 「冬季の日本海沿岸地域における降水による粒子状物質の取り込み」, 大気環境学会誌, Vol.48, pp.74-81 (2013).

[25] J. Wu, “Oceanic whitecaps and sea state”, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.9, pp.1064–1068 (1979).

[26] D. Zhao and Y. Toba, “Dependence of whitecap coverage on wind and wind-wave properties”, *Journal of oceanography*, Vol.57, No.5, pp.603-616 (2001).

[27] 新潟地方気象台: 新潟県の気象・地震概況（平成 26 年 12 月）. http://www.jma-net.go.jp/niigata/gaikyo/geppo/604_12.pdf.

[28] 新潟地方気象台: 新潟県の気象・地震概況（平成 27 年 1 月）. http://www.jma-net.go.jp/niigata/gaikyo/geppo/604_01.pdf.

[29] 新潟地方気象台: 新潟県の気象・地震概況（平成 27 年 2 月）. http://www.jma-net.go.jp/niigata/gaikyo/geppo/604_02.pdf.

[30] 杉本聡一郎, 麻生照雄, 佐伯正樹, 「気象データを用いた送電線着雪タイプの判別手法の提案」, 電力中央研究所報告, N11059 (2012).

[31] R. G. De Pena, T. N. Carlson, J. F. Takacs and J. O. Hlian, “Analysis of precipitation collected

on a sequential basis", *Atmospheric Environment*, Vol.18, pp.2665-2670 (1984).

[32] J. L. Collet Jr., A. S. H. Prévôt, J. Staehelin and A. Waldvogel, "Physical factors influencing winter precipitation chemistry", *Environmental Science and Technology*, Vol.25, pp.782-788 (1991).

[33] L. Wanqing, "The characterization of hydrogen ion concentration in sequential cumulative rainwater", *Atmospheric Environment*, Vol.35, pp.6219-6225 (2001).

[34] A. Alastuey, X. Querol, A. Chaves, A. Lopez-Soler and C. R. Ruiz, "Wet-only sequential deposition in a rural area in north-eastern Spain", *Tellus*, Vol.53B, pp.40-52 (2001).

[35] A. F. Pelicho, L. D. Martins, S. N. Nomi and M. C. Solci, "Integrated and sequential bulk and wet-only samplings of atmospheric precipitation in Londrina, South Brazil (1998-2002)", *Atmospheric Environment*, Vol.40, pp.6827-6835 (2006).

[36] G. Bertrand, H. Celle-Jeanton, P. Laj, J. Rangognio and G. Chazot, "Rainfall chemistry: long range transport versus below cloud scavenging. A two-year study at an inland station (Opme, France)", *Journal of Atmospheric Chemistry*, Vol.60, pp.253-271 (2008).

[37] S. Ohara, N. Kihara and N. Murao, "Wind dependence of sea-salt and non-sea-salt components in ambient aerosol in Niigata Plain during winter seasons", European Aerosol Conference 2017, T212N0a7 (2017).

[38] S. Ohara, "Wind dependence of sea-salt and non-sea-salt components in precipitation and aerosol during winter seasons in Niigata Plain, Japan", The 9th International Conference on Acid Deposition, p. 318 (2015).

[39] M. R. Heal, L. R. Hibbs, R. M. Agius and I. J. Beverland, "Interpretation of variations in fine, coarse and black smoke particulate matter concentrations in a northern European city", *Atmos. Environ.*, 39, 3711-3718 (2005).

[40] A. M. Jones, R. M. Harrison and J. Baker, "The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NOx", *Atmos. Environ.*, 44, 1682-1690 (2010).

[41] P. J. Nair, K. Parameswaran, A. Abraham and S. Jacob, "Wind-dependence of sea-salt and non-sea-salt aerosols over the oceanic environment", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, 884-898 (2005).

[42] J. Piazzola, G. Tedeschi and A. Demoisson, "A Model for the Transport of Sea-Spray Aerosols in the Coastal Zone", *Boundary-Layer Meteorol.*, 155, 329-350 (2015).

[43] K.-M. Wai and P. A. Tanner, "Wind-dependent sea salt aerosol in a Western Pacific coastal area", *Atmos. Environ.*, 38, 1167-1171 (2004).

[44] 大原信, 木原直人, 高橋章, 「冬季新潟件下越地域における大気中粒子状物質の粒径分布」, 第 20 回大気化学討論会, p. 58 (2014).

[45] D. C. Blanchard, A. H. Woodcock and R. J. Cipriano, "The vertical distribution of the concentration of sea salt in the marine atmosphere near Hawaii", *Tellus*, 36B, 118-125 (1984).

[46] 藤田慎一, 岡村和幸, 三浦和彦, 高橋章, 「ナトリウムの洗浄比-日本海の沿岸地域における観測データの解析」, エアロゾル研究, 25, 349-354 (2010).

[47] S. Ohara, S. Fujita, S. Sugimoto, G. Sakata and A. Takahashi, “Scavenging of sea-salt aerosol by snow in Niigata Prefecture, Japan”, The 7th Asian Aerosol Conference, pp.1024-1030 (2011).

[48] S. Ohara, S. Fujita, S. Sugimoto and A. Takahashi, “Wintertime measurements of scavenging ratios of sea-salt components for snow and rain in Niigata Prefecture”, American Association for Aerosol Research 31st Annual Conference, 2CC.14 (2012).

[49] S. Ohara, S. Fujita, N. Kihara, S. Sugimoto and A. Takahashi, “Precipitation scavenging of aerosols in the Niigata Plain, Japan, during the winter season”, American Association for Aerosol Research 32nd Annual Conference, 3RA.4 (2013).

[50] G. E. Likens, F. H. Bormann, R. S. Pierce, J. S. Eaton and R. E. Munn, “Long-term trends in precipitation chemistry at Hybbard Brook, New Hampshire”, *Atmospheric Environment*, Vol. 18, pp.2641-2647 (1984).

[51] R. Prado-Fielder, “On the relationship between precipitation amount and wet deposition of nitrate and ammonium”, *Atmospheric Environment*, Vol. 24A, pp.3061-3065 (1990).

[52] C. Hontoria, A. Saa, J. Almorox, L. Cuadra, A. Sánchez and J. M. Gascó, “The chemical composition of precipitation in Madrid”, *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 146, pp. 35-54 (2003).

[53] S. Seto and H. Hara, “Precipitation chemistry in western Japan: Its relationship to meteorological parameters”, *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp.1538-1549 (2006).

[54] M. Aikawa and T. Hiraki, “Washout/rainout contribution in wet deposition estimated by 0.5 mm precipitation sampling/analysis”, *Atmospheric Environment*, Vol. 43, pp.4935-4939 (2009).

[55] T.-O. Soyol-Erdene, Y. Han, B. Lee and Y. Huh, “Sources and fluxes of Pt, It and REE in the Seoul metropolitan area through wet scavenging processes”, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, pp.1970-1978 (2011).

[56] 藤田慎一, 高橋章, 「日本海沿岸における豪雪の化学特性」, 大気環境学会年会講演要旨集 (2008).

[57] 藤田慎一, 高橋章, 坂田学, 「平成 18 年豪雪時の降雪と海塩の化学」, 日本気象学会秋期大会講演要旨集 (2008).

[58] S. E. Yuter, Kingsmill D. E., Nance L. B. and Löffler-Mang M., “Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexiting rain and wet snow”, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 45, pp.1450-1464 (2006).

第 3 章　塩雪害の発生可能性を表す指標の提案

3.1　はじめに

本章では，これまでに明らかになった新潟下越雪害発生時における気象条件を基に，圧密着雪を伴う塩雪害の発生可能性を表す指標について検討する[1]。

(1) 本研究での指標に関する基本的な考え方

国内での圧密着雪を伴う塩雪害が数十 km の範囲において複数地点で同時に発生した事例は，着氷雪・気象データベース[2]を用いて調べた結果，新潟下越雪害を除くと 2004 年の北海道の事例のみであった。新潟県にのみ着目した場合，複数地点で同時に塩雪害が発生したのは新潟下越雪害のみであることから，新潟下越雪害発生時・発生エリアの気象条件が新潟県内のこれまでの気象条件の中でも特異であると言える。この特異性に着目して，塩雪害の発生可能性を表す指標を検討する。ここで検討する指標は，実務での活用性を重視して，気象庁による地上気象観測データなど，長期間にわたり広いエリアのデータを容易に入手できる情報のみから推定可能な経験的指標とする。すなわち，モデルを用いた海塩計算などの，特定の期間，特定の場所のみを対象とした数値解析や評価のデータは用いない。

(2) 災害の発生可能性を評価するハザード評価の一般的な考え方

災害の発生可能性を評価するハザード評価は様々な自然災害を対象に実施されている[3]。例えば，港湾設計においては有義波高を対象に，河川計画においては降水量を対象に極値統計解析が実施され，確率波高や確率降水量が求められる。これらのハザード情報は，設計の基準となる外力や運用方法の意思決定材料となる。ハザード評価においては，災害発生に関連が強い物理量を指標として，その大きさおよび発生頻度が評価されるため，塩雪害に関連が強い物理量について整理する必要がある。

(3) 本章の目的と実施事項

そこで本研究では，2005 年の新潟下越雪害発生時の気象状況や現地観測で得られた知見にもとづき，圧密着雪をともなう塩雪害の発生可能性を表す指標について以下に示す項目を検討し，送電用がいしの塩雪害に適用性をもった発生可能性指標の提案を図った。

1. 塩雪害の発生可能性を表す指標の基本的概念の整理（3.2 節）
2. 海風着雪ポテンシャルの提案と適用性の確認（3.3 節）

3.2 塩雪害の発生可能性を表す指標の基本的概念の整理

(1) 塩雪害の発生要因の区分—気象条件・設備要因—

塩雪害の発生要因は，気象条件に起因した外的要因と，がいしの耐塩雪害性能に起因した設備要因とに区別される。長幹がいしに比して，懸垂がいしは笠間隔が広いことにより笠間橋絡が発生しづらく，耐塩雪害性能が高いことが示されている[4]。また，懸垂がいしの最低フラッシオーバ電圧は長幹がいしのそれよりも高いことから[5]，新潟下越雪害において塩雪害が発生した長幹がいしに比べて，懸垂がいしは耐塩雪害性能が高いと言える。このように，設備要因については一定レベルまで解明されていることから，本検討では，気象条件に起因した外的要因の議論を対象とする。

気象条件に起因した外的要因として，第一に圧密着雪の発達，第二に着雪中の導電率が上昇することによるフラッシオーバ電圧・漏れ抵抗の低下があげられる。既往研究から，圧密着雪[2]は，強風，着雪適温，高降雪量条件において発達することが知られている。一方，フラッシオーバ電圧・漏れ抵抗は，着雪中の導電率が上昇するにつれて低下する。すなわち，着雪中の海塩濃度が上昇するにつれてそれらは低下する。

(2) 着雪ポテンシャル—設備への着雪量を表す指標—

設備への着雪量を表す指標には，風速，気温，降水量から求められる着雪ポテンシャルが活用できることが示されてきた[2]。ここで，ある期間 a[h]で積分された着雪ポテンシャル P_{snow} [kg/m^2]は次式で与えられる。

$$P_{snow}(t)=\rho_w\int_{t-a\text{時間}}^{t} p\frac{V}{W}E_T\,dt \tag{3.1}$$

ここで，t は時間[h]であり，ρ_{w} は水の密度(1000 kg/m^3)，p は 1 時間降水量[m/h]，V は水平方向風速[m/s]，W は雪の落下速度であり，ここでは 1 m/s と設定する。E は気温 T [°C]に依存した着雪効率であり，次式を仮定する。

$$E_T(t)=\begin{cases}1 & -0.5^\circ C\le T\le 1.5^\circ C\\ 0 & T<-0.5^\circ C, T>1.5^\circ C\end{cases} \tag{3.2}$$

上記の着雪ポテンシャルは，着雪効率が気温のみに依存するパラメータで表されている。実際には，湿雪で着雪しやすく，乾雪では着雪しにくい。また，当然のことながら，雨の場合には，着雪はない。乾雪，湿雪，雨を地上気象情報から判別する方法が提案されているため[6]，雪質を考慮した着雪効率とすることにより，着雪量をより正確に表現できると考えられる。ただし，雪質の判別方法には，気温に加えて相対湿度も必要となるが，一般に気象庁アメダス地上観測では相対湿度が計測されていない。ここでは，地上の気象観測データなどの容易に入手できる情報のみから推定可能な経験的指標とすることを指向しているため，上記の気温にのみ依存した着雪効率を用いる。

(3) 着雪ポテンシャルによる新潟下越雪害時の事故発生点近傍の気象データへの適用と課題抽出

新潟下越雪害において塩雪害が発生した五泉市の近傍に位置する気象庁アメダス新津のデータを用いて，高い着雪ポテンシャルが見られた過去のイベントを抽出する。解析に用いるデータは前 1 時間降水量，風速，気温の 1 時間間隔データである。新潟下越雪害が 2, 3 時間程度で圧密着雪が発達したことを踏まえて，ここでは着雪ポテンシャルの 3 時間積算値を求める。使用したデータの期間は 1979 年 1 月 1 日から 2016 年 2 月 29 日までとし，解析期間において 3 時間積算着雪ポテンシャルを大きい順に並べ，その上位 10 個のイベントを図 3.1 に示す。なお，前後 7 日間以内の気象イベントは同一イベントと見なした。2011 年 11 月 16 日に風速計高さが 6.5 m から 10.0 m に変更されているため，桑形・近藤[7]による 1985 年時点での土地利用区分に基づいた風向別粗度高さを用い，中立条件での対数則により，2011 年 11 月 15 日以前の高さ 6.5 m で計測された風速を 10 m 高さでの値に補正した。なお，土地利用区分が古いこと，また，接地層の状態に中立を仮定していることなどから，高さ補正の精度は高くないことを認識しているが，高さ補正を行うことによって，風速の高さを統一することができ，同一地点での期間内の比較や，後述する他地点との比較に活用しやすくすることができる。

図 3.1 より，2005 年 12 月 22 日 8 時に高い着雪ポテンシャルが見られ，新潟下越雪害の発生時刻とも整合する。しかしながら，2005 年 12 月 22 日よりも高い値が，塩雪害が発生していない 2001 年 1 月 8 日に見られ，また，2005 年 12 月 22 日に近い数値のイベントがいくつか抽出されていることから，着雪ポテンシャルだけでは 2005 年 12 月 22 日の特異性を十分に示すことができないことがわかる。

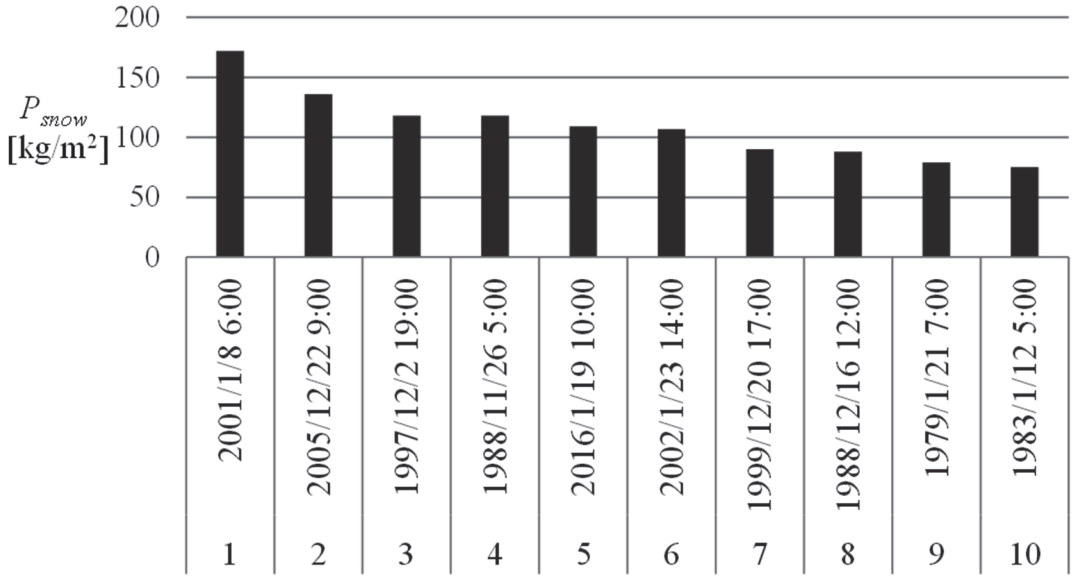


図 3.1　1979 年 1 月 1 日から 2016 年 2 月 29 日における気象庁アメダス新津における 3 時間積算着雪ポテンシャルが大きい上位 10 イベント[1]

3.3　海風着雪ポテンシャルの提案と適用性の確認

(1) 海風着雪ポテンシャルの提案—海風方向に限定した着雪ポテンシャルとして—

a. 高い着雪ポテンシャルが算出された事例の分析と風向条件の考察

ここで，新潟下越雪害よりも，気象庁アメダス新津における着雪ポテンシャルが高かった 2001 年 1 月 8 日の気象場について分析する。なお，新潟下越雪害以降，東北電力株式会社による塩雪害対策として，新潟県内における主要幹線の長幹がいしが懸垂がいしへ取り替えられた。そのため，2016 年 1 月 19 日には，新潟下越雪害と同程度の着雪ポテンシャルが見られるが，この時の設備は，新潟下越雪害前の設備に比べて耐塩雪害性能が高まっていることから，塩雪害発生の有無と，気象条件に起因した外的要因との関係がそれ以前と異なる。そのため，本件の議論からは 2016 年 1 月 19 日の事例を除外する。

まず，新潟下越雪害よりも着雪ポテンシャルが高かった 2001 年 1 月 8 日の気象場について分析する。なお，図示しないが気象庁の地上天気図より，1 月 4 日から 8 日にかけてのメソから総観スケールの気象場は下記のようなものであった。1 月 4 日から 1 月 6 日にかけては典型的な冬型の気圧配置であった。6 日に華中にあった低気圧が 7 日には室戸沖と山陰に進みながら一つになり本州南岸を南岸低気圧として東進した。冬型の気圧配置と南岸低気圧の影響で 8 日は全般に風が強かった。ただし，500 hPa 面での高層天気図を見ると，日本海上で−30 度もしくはそれ以上であり，それほど強い寒気ではないものの，日本海沿岸部における地上では雪やみぞれが降っていた可能性がある。2001 年 1 月 7 日 12 時から 1 月 9 日 0 時における気象庁アメダス新津の前 1 時間降水量，気温，風速，風向を図 3.2 に示す。1 月 8 日 3 時から 6 時にかけて強い降水が見られると共に，気温は着雪適温帯を維持している。また，風速が 10 m/s を超える強風であったため，結果的に着雪ポテンシャルは高い値であった。さらに，新潟地方気象台での記録を見ると，1 月 8 日は 5 時 30 分まで雪が降り，その後 6 時 20 分までみぞれが降っていたことが示されており，圧密着雪が発達する気象条件であったことがわかる。ただし，風向きが東南東から南東であったため，海塩が内陸に運ばれることはなく，着雪中の導電率は低かったと推測される。このことから，新潟下越雪害での塩雪害を表現するには，着雪量を表す指標である着雪ポテンシャルに加えて，着雪中の導電率を表す指標を考慮する必要性が示唆される。

b. 降雪・着雪の導電率上昇に海塩粒子が関与する風向の条件付け

設備の着雪中に含まれる海塩は，風波が強風により砕波することによって大気中に飛散されたものが移流・拡散を通して内陸に輸送されたものである。白波砕波の海面被覆率はおおよそ風速の 3 乗から 4 乗に比例すると言われており[8-9]，海上において風速 10 m/s 以下の条件では大気中の海塩飛散量が微小である。したがって，風速がある一定のレベル以上でない限り，着雪中の導電率は上昇しない。また，風向が海風で無い限り，海塩は内陸へ移流されない。すなわち，導電率の高い着雪の発達を表す指標は，風速と風向に対しても規定されるはずである。ここで，気象庁アメダス新津における着雪ポテンシャルの 3 時間

積算値と風速の 3 時間平均値との関係を図 3.3 に示す。図より，風速が増加するにつれて，着雪ポテンシャルが分布するレンジが広がり，$P_{snow} < 21\overline{V}$ で分布する．すなわち，塩雪害の発生条件の一つは圧密着雪の発達であり，着雪ポテンシャルが高いことが必要条件だと考えられるが，この条件下では風速が必ず大きい。したがって，導電率の高い着雪の発達を表す指標として着雪ポテンシャルを用いた場合，強風速条件はあえて指標に加える必要はなく，風向による規定のみを加えればよいと考えられる。

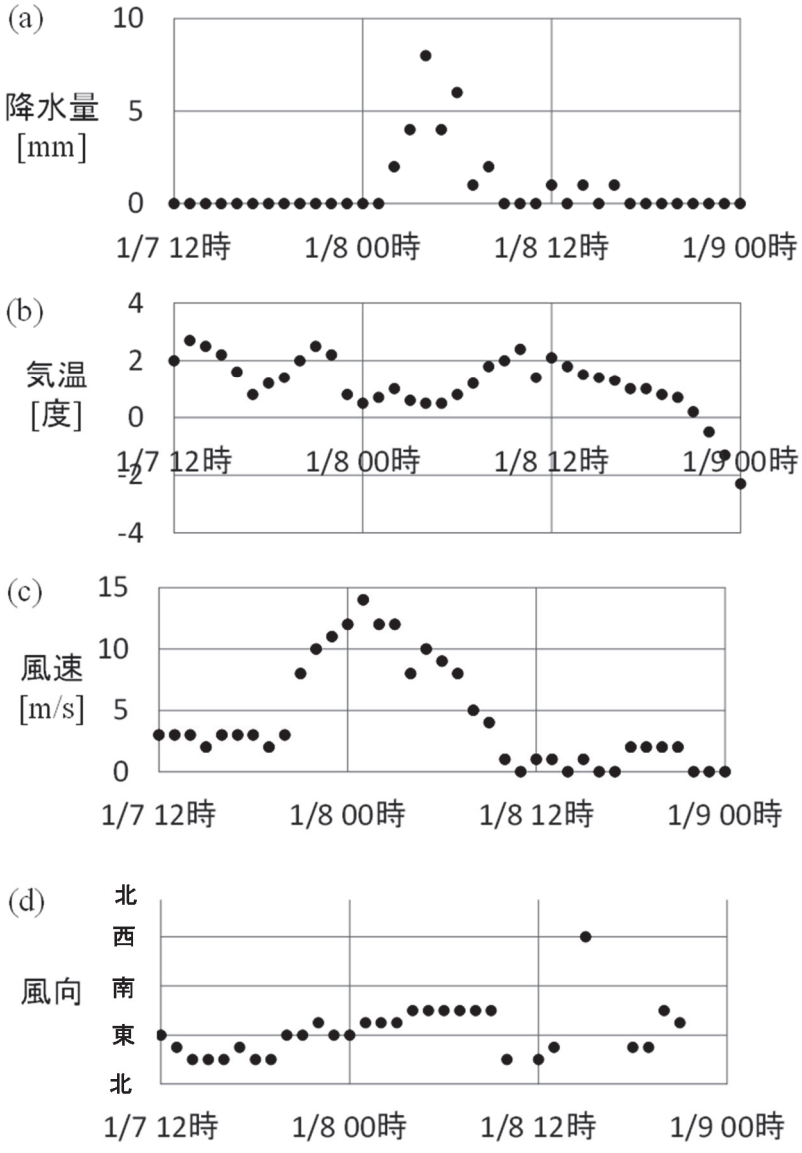


図 3.2　2001 年 1 月 7 日 12 時から 1 月 9 日 0 時における気象庁アメダス新津の前 1 時間降水量，気温，風速，風向[1]

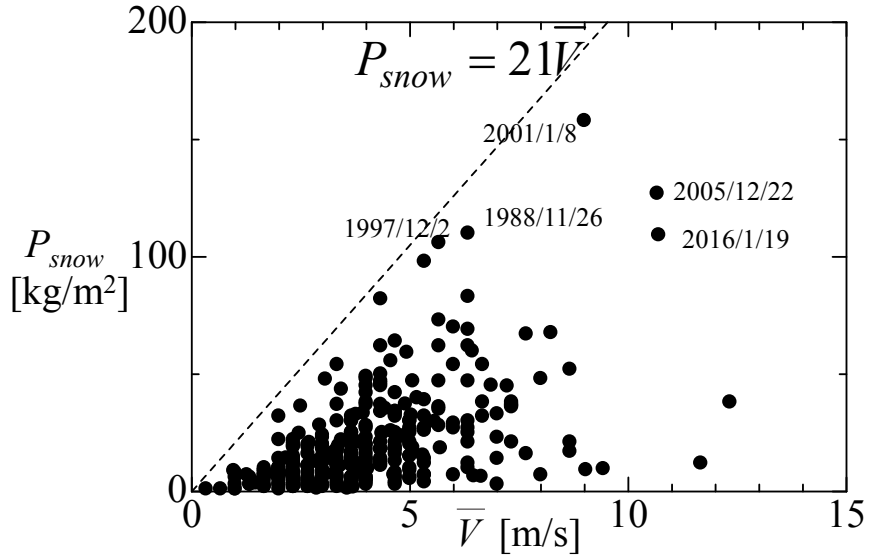


図 3.3　気象庁アメダス新津における着雪ポテンシャルの 3 時間積算値と風速の 3 時間平均値との関係[1]

c. 海風着雪ポテンシャルの定義

高濃度の海塩が内陸に輸送される条件は，強風かつ風向が海風の場合である。着雪ポテンシャルを指標として用いた場合，上記のように強風条件も付加されていることから，導電率の高い着雪の発達は，海風の風向に限定した着雪ポテンシャルの大きさと風速で表されると考えられる。ここで，海風の風向に限定した着雪ポテンシャル $P_{\mathrm{salt\_snow}}$ [kg/m^2]を便宜上，海風着雪ポテンシャルと呼び，以下で定義する。

$$P_{salt\_snow}(t) = \rho_w \int_{t-a}^{t} p \frac{V}{W} E_T E_\theta dt \tag{3.3}$$

$$E_\theta(t) = \begin{cases} 1 & \theta：\text{海風となる風向} \\ 0 & \theta：\text{陸風となる風向} \end{cases} \tag{3.4}$$

ここで，評価地点から半径 80 km 以内に海がある風向を海風となる風向と定義し，それ以外の風向を陸風となる風向と定義する。なお，海塩が内陸まで輸送されうる距離として 80 km を経験的に設定した。これらの設定は，2 章における検討から，顕著に高い導電率を示す降雪の出現と風向・海岸からの距離について示唆された以下の点と整合している。

- 内陸域では沿岸域よりも海塩の影響が及ぶ風向が狭まっていき，顕著に高い導電率が出現しうる風向が狭まる。
- ある一定以上の海岸からの距離があると，海塩の影響が及ばなくなり，顕著に高い導電率の降雪が出現しなくなる。

・顕著に高い導電率の降雪が出現しなくなる境界は，海岸からの距離が 50～150 km の範囲のいずれかに設定することが妥当と推察される。

気象庁アメダス新津での地上観測データから海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値 P_{salt_snow} [kg/m^2]のイベント最大値を求め，図 3.4 に示す。新潟下越雪害における塩雪害が五泉市周辺で発生した日時に最も高く，2016 年 1 月 19 日，1997 年 12 月 2 日と続く。

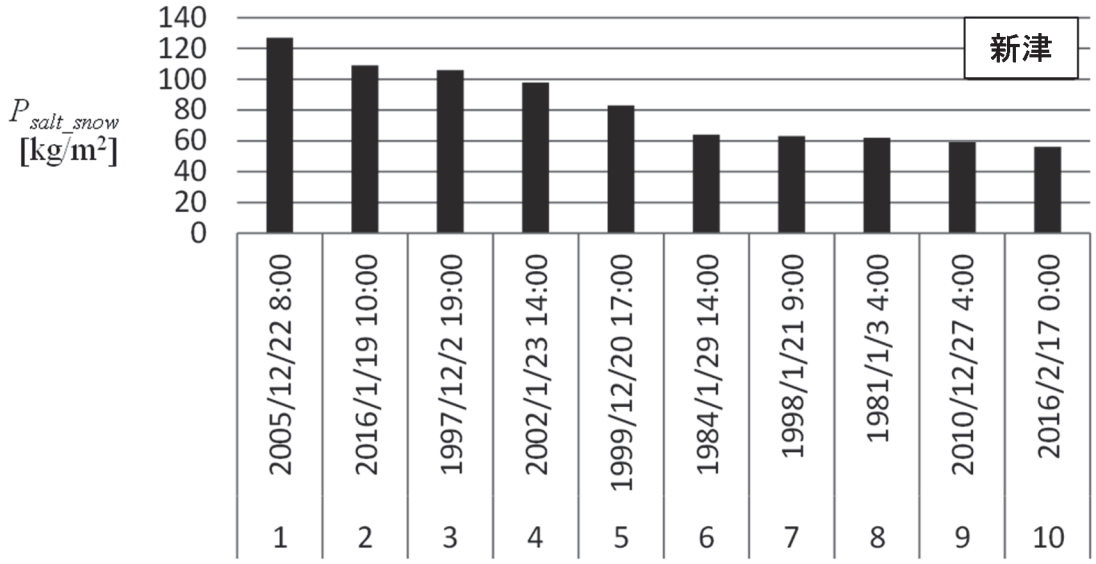


図 3.4　気象庁アメダス新津での地上観測データから推定された海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値 P_{salt_snow} [kg/m^2]のイベント最大値[1]

(2) 海風着雪ポテンシャルの適用性検証

a. 新潟県内の気象庁アメダスにおける過去データへの適用

新潟県内の他の地点に対する上記指標の適用性を調べるため，新潟県内の他の 11 箇所の気象庁アメダス地上観測データを用いて上記で定義された海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値のイベント最大値を抽出する。なお，新潟県内には他にもアメダス観測地点が複数あるが，ここでは解析地点が南北方向にまんべんなく配置されるように，解析地点を選定した。評価対象地点名，評価対象期間，風速計の高さを表 3.1 に示し，これらの計測位置を図 3.5 に示す。各地点の気象庁アメダス地上観測データから求められた海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値のイベント最大値の上位 10 個を図 3.6 に示す．2005 年 12 月 22 日午後に，新潟市から村上市にかけて比較的沿岸域で塩雪害が発生したが，その近傍に位置する村上，中条，下関において，評価期間における最大値が記録されており，2 位のイベントでの値に比べて 2 倍近い値である。さらに，最大値を記録した時刻と塩雪害発生時刻が調和的である。すなわち，気象庁アメダス新津以外においても，海風着雪ポテンシャル P_{salt_snow}

を用いることにより，新潟下越雪害における塩雪害発生時の地上気象条件の特異性を示すことができた。以上より，海風着雪ポテンシャル $P_{\mathrm{salt\_snow}}$ による，新潟下越雪害と同様の圧密着雪を伴う塩雪害の発生予測可能性を示すことができた。

表 3.1　風向・風速データの評価対象地点名および評価対象期間[1]

地点名	評価対象期間	風速計高さ(評価対象期間)
村上	1998 年～2016 年	8.4m
中条	1985 年～2016 年	11.9 m
下関	1979 年～2016 年	6.5 m (～2008/7/1) 10.0 m (2008/7/2～)
新潟	1982 年～2016 年	18.5 m (～2002/11/20) 15.0 m (2002/11/21 ～ 2012/6/27) 15.1 m (2012/6/28～)
新津	1979 年～2016 年	6.5 m (～2011/11/15) 10 m (2011/11/16～)
寺泊	2002 年～2016 年	7.9 m
三条	1979 年～2016 年	12.5 m
長岡	2000 年～2016 年	9.5 m
柏崎	1979 年～2016 年	6.5 m (～2010/3/25) 10 m (2010/3/26～)
高田	1999 年～2016 年	16.6 m (～2011/11/23) 17.0 m (2011/11/24～)
十日町	1979 年～2016 年	8.5 m (～2009/9/14) 10.0 m (2009/9/15～)
糸魚川	1988 年～2016 年	18.3 m (～2013/06//24) 10.0 m (2013/06/25～)

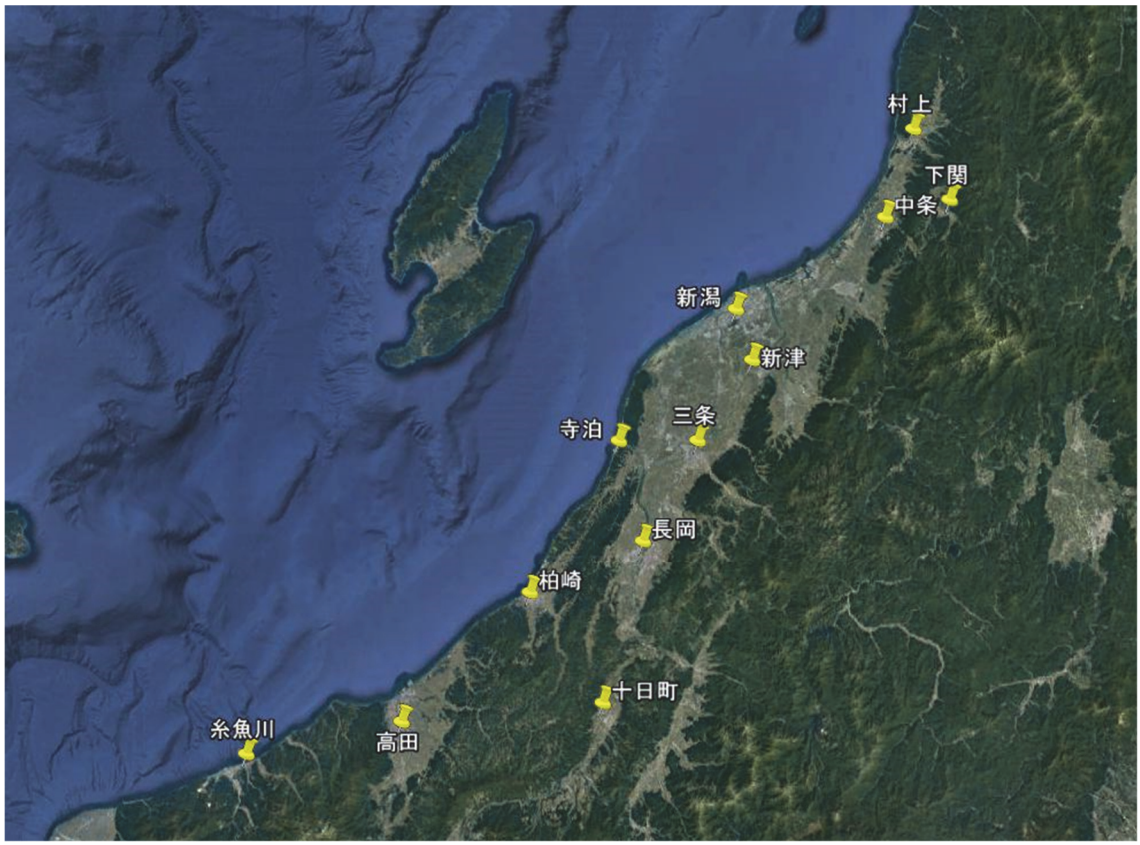


図 3.5　海風着雪ポテンシャルを推定した気象庁地上アメダス地点の位置（図は Google Earth を元に加工）[1]

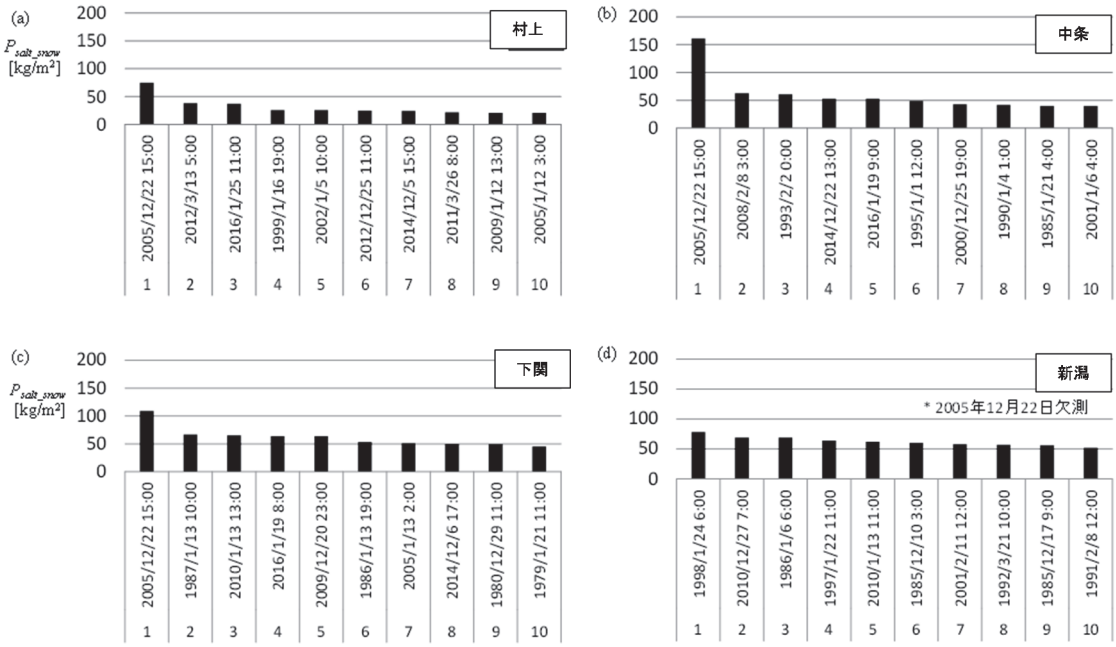


図 3.6　新潟県内の気象庁アメダスデータから海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値 P_{salt_snow} [kg/m^2]のイベント最大値[1]

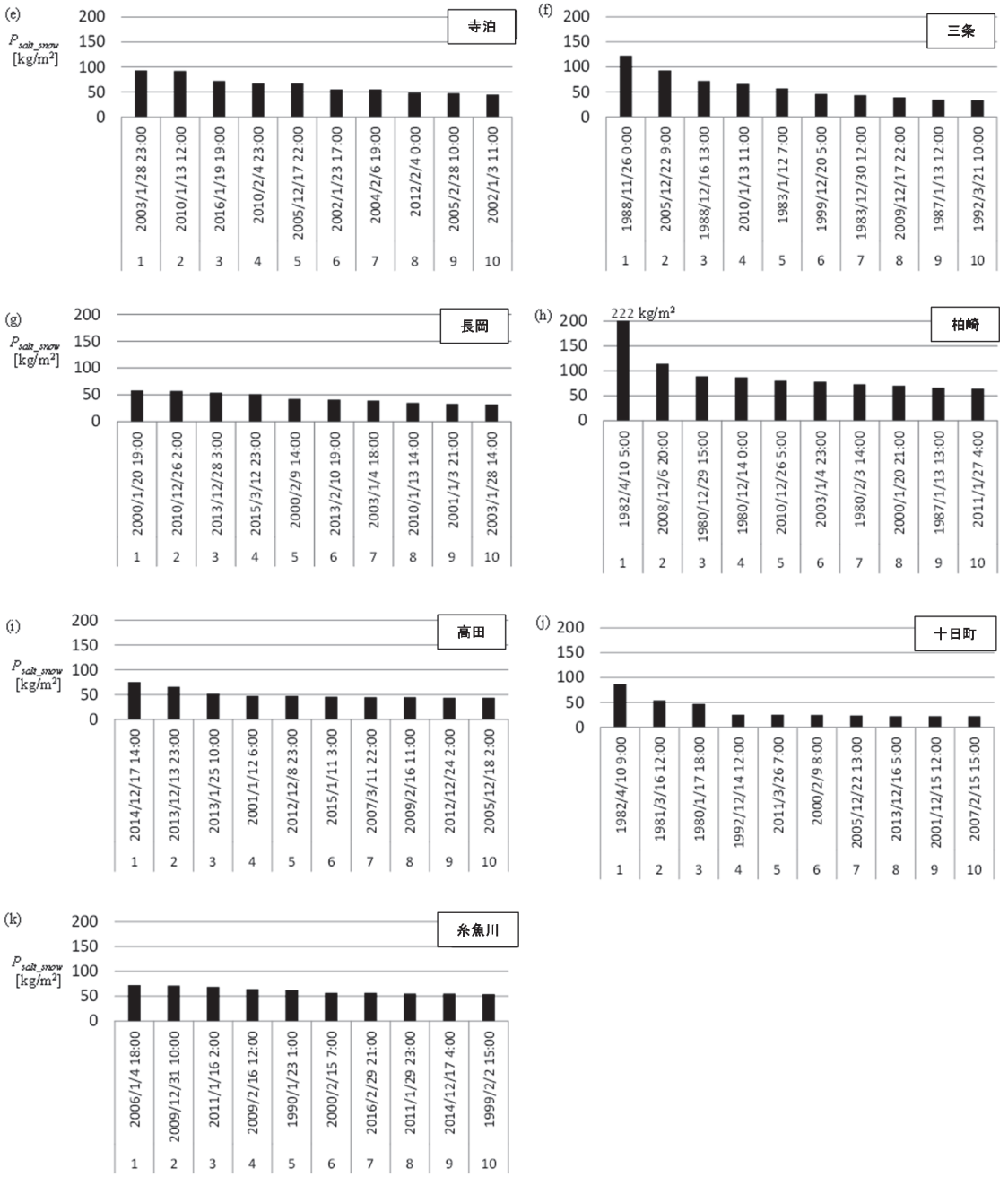


図 3.6　新潟県内の気象庁アメダスデータから海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値 P_{salt_snow} [kg/m²]のイベント最大値（続き）[1]

b. 日本海側地域の気象官署における過去データへの適用

次に，新潟県以外の地域も含めた塩雪害ハザード評価につなげるための検討として，東北から北陸までの日本海側地域の気象官署に対して，海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値を推定した。ただし，本推定では，16 風向別に風上側の粗度区分に応じた地上高補正を行い，送電線の高さに相当する地上高 30 m 高さ相当の風速に換算した値を用いる。分析対

象地点，分析方法の詳細は以下の通りである。

①分析地点

東北地方の日本海側，北陸地方の以下の気象官署 11 地点を分析対象とする：深浦，秋田，酒田，新潟，高田，富山，伏木，輪島，金沢，福井，敦賀。

②分析対象データ

1991 年 1 月 1 日～2015 年 12 月 31 日までの 25 年間を対象とし，毎正時の気温，風向・風速，降水量データを用いる。

なお，1990 年以前は，各気象官署のデータは，毎正時のデータが利用できない地点が大半であり，降水以外は 3 時間おき，または 6 時間おきのデータのみとなる。このため，いずれの地点ともに，毎正時のデータが利用できる上記期間に限定した。

③分析方法

風速の地上高補正については，建築物荷重指針の地表面粗度区分を参考に，16 風向別に，次式により粗度区分 II（農作物程度の障害物がある地域および樹木・低層建築物などが散在している地域）における地上高 30 m（概ね電線地上高と仮定）の風速V_{30}^{II}に換算した。

$$V_{30}^{II} = V_h \times \left(\frac{Z_G}{h}\right)^{\alpha} \times \left(\frac{30}{Z_G^{II}}\right)^{\alpha_{II}} \tag{3.5}$$

ここで，V_{30}^{II}は粗度区分 II に変換された地上高 30m での平均風速[m/s]，V_hは気象官署の地上高 h[m]で観測された平均風速[m/s]，Z_Gは上空風高さ[m]，hは気象官署の風速計設置高さ[m]，αは気象官署の各風向別の粗度区分に対するべき指数，Z_G^{II}は粗度区分 II における上空風高さ，α_{II}は粗度区分 II におけるべき指数である。

上記 11 地点について，海からの風向と判別した風向と風速計の高さの一覧を表 3.2 に示す。

以下に分析結果について述べる。2005 年 12 月 22 日の塩雪害発生時におけるアメダス新津での値は，海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値と 3 時間平均風速はそれぞれ，163 kg/m^2，13.7 m/s となり，アメダス中条の値は，それぞれ 235 kg/m^2，12.4 m/s となった。このことから，地上高 30 m 換算風速を用いた場合，海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値が少なくとも 150 kg/m^2 以上，その間の平均風速が 10 m/s 以上が塩雪害発生の目安となると考えられる。

表 3.2　海風着雪ポテンシャル計算時に考慮する海からの風向と風速計の高さ[1]

地点	計算時に考慮する風向	風速計の高さ
深浦	北～東北東，南～北北西	13.4 m (～1999/12/14) 13.3 m (1999/12/15～2007/12/6) 21.9 m (2007/12/5～) 22.2 m (2013/10/24～)
秋田	南南西～西北西	39.9 m (～2011/05/11) 40.8 m (2011/05/12～)
酒田	南西～北	26.8 m (～1998/01/28) 26.4 m (1998/01/29～2011/08/24) 26.6 m (2011/08/25～)
新潟	北～北東，南西～北北西	18.5 m (～2002/11/20) 15 m (2002/11/21～2012/06/27) 15.1 m (2012/06/28～)
高田	北～北北東，西～北北西	12.2 m (～1998/03/30) 16.6 m (1998/03/31～2011/11/23) 17 m (2011/11/24～)
富山	北～北東，西南西～北北西	14.1 m (～1996/01/29) 20 m (1996/01/30～)
伏木	北～東，西南西～北北西	15.1 m (～2011/11/30) 15.3 m (2011/12/01～)
輪島	全風向	28.3 m (～2011/06/01) 28.1 m (2011/06/02～)
金沢	北～東北東，南西～北北西	13.4 m (～1991/10/23) 48.4 m (1991/10/23～)
福井	北～北北東，南南西～北北西	26.1 m
敦賀	北，西南西～北北西	27.6 m (～2011/12/07) 28 m (2011/12/08～)

図 3.7 に分析結果を示す。11 地点の 23 年半に記録した値と，上記の新潟下越雪害発生時の 2005 年 12 月 22 日に新津や中条において記録した値を比較すると，後者は，海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値，平均風速ともに突出して大きく，新潟下越雪害時の塩雪害発生地域の気象は非常に希な厳しい気象であったことが示唆される。ただし，海風着雪ポテンシャルが高い場合には，風速も必ず高く，その特徴は図 3.7 の結果にも該当する。したがって,海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値のみを参照することで強風条件も満たされる。

上記の新津や中条の値に匹敵する気象は，2005 年 12 月 22 日の塩雪害発生当日夕方に酒

田にて記録されたものを除くと，金沢で海風着雪ポテンシャルが 150 kg/m² を超す事例が 2 事例見られる。

地域の違いに着目すると，深浦，秋田，新潟，高田，富山，伏木，輪島では，上記期間内に，海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値が 100 kg/m² を超える事例は，深浦で 1 例，新潟で 1 例，高田で 2 例，伏木で 1 例のみである。これに比べて，金沢や福井，輪島などの北陸地方西岸では海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値が 100 kg/m² を超える事例が散見される。

これらの結果から，2005 年 12 月の塩雪害発生時の海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値は高く，これに匹敵する気象は，東北から北陸までの日本海側で見る限り，非常に希と言える。なお，2005 年 12 月の塩雪害発生時の新津アメダスにおける値に匹敵するプロットが，金沢や福井，輪島などの北陸地方西岸でいくつか見られるものの，塩雪害の発生は報告されていない。北陸電力管内では，長幹がいしの設備量は少なく，懸垂がいしを用いた送電線では，新潟下越雪害時に匹敵する気象下にあっても塩雪害が発生する可能性が相当に小さいことを示唆しているものと解釈される。

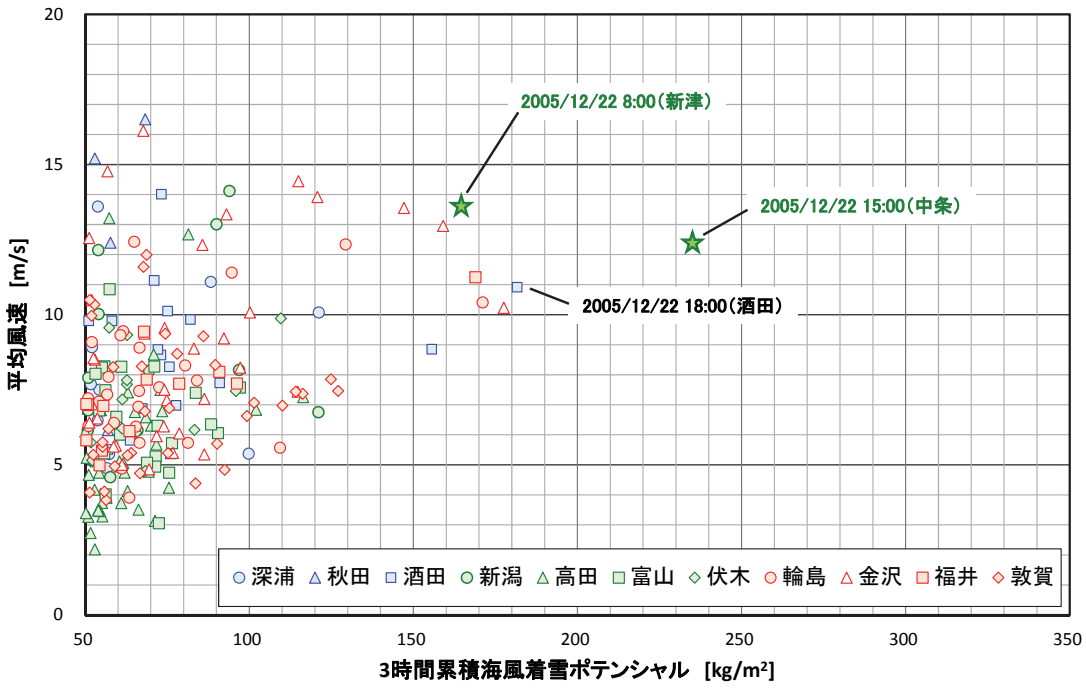


図 3.7　海風着雪ポテンシャルの 3 時間積算値の大きい事例とその際の平均風速抽出結果（北陸および東北日本海側気象官署 11 地点）[1]

3.4 まとめ

本章では，2005 年の新潟下越雪害発生時の気象状況や現地観測で得られた知見にもとづき，圧密着雪をともなう塩雪害の発生可能性を表す指標について検討し，送電用がいしの塩雪害に適用性をもった発生可能性指標の提案を図った。得られた成果のうち特に重要なものは以下のとおりである。

1. 設備への着雪量を表す指標として活用できることが示されてきた着雪ポテンシャルを海風方向に限定し，新たに海風着雪ポテンシャルを提案した。
2. 海風着雪ポテンシャルは，2005 年新潟下越雪害に停電事故発生地点近傍の気象庁アメダスにおける過去 37 年間データをもとにした計算結果において，新潟下越雪害時の値が評価期間の最大値を示した。
3. このことから，海風着雪ポテンシャルが，新潟下越雪害と同様の圧密着雪をともなう塩雪害の発生可能性をあらわす指標として有効であることを示すことができた。

これにより，塩雪害の事故が発生した場合にも適切な事後解析が可能となり，さらに，指標をもとに地域ごとに設備の適正化につながることが期待される。しかしながら，ハザードマップといった使用法を実現するには，新潟県でのデータ・知見にもとづいて提案された指標が全国に適用性を有するのか確認を行う必要があり，今後の課題である。

第 3 章参考文献

[1] 大原信, 木原直人, 麻生照雄, 大塚弘, 屋地康平, 守護雅富, 西原崇, 平口博丸, 「塩雪害の発生気象条件に関する数値解析的および観測的研究－がいしへの圧密着雪を伴う塩雪害発生可能性の指標の提案－」, 電力中央研究所報告, V17001, (2017).

[2] 西原崇, 杉本聡一郎, 清水幹夫, 本間宏也, 石川智巳, 屋地康平, 松宮央登, 大原信, 木原直人, 麻生照雄, 渡邉眞人, 平口博丸, 「送電設備の雪害に関する研究 －2007～2011 年度成果－」, 電力中央研究所報告, N19 (2012).

[3] 合田良實, 「港湾構造物の耐波設計-波浪工学への序説, 増補改訂版」, 鹿島出版会 (1990).

[4] 本間宏也, 屋地康平, 木原直人, 大原信, 西原崇, 平口博丸, 「「送電設備の雪害に関する研究」10 ヶ年研究成果（その 2）－がいし塩雪害の評価手法と対策－」, 電力中央研究所報告, H16004 (2017).

[5] H. Homma, K. Yaji, T. Aso, M. Watanabe, G. Sakata, A. Dernfalk and I. Gutman, “Evaluation on Flashover Voltage Property of Snow Accreted Insulators for Overhead Transmission Lines, Part III - 154 kV Full-scale Flashover Voltage Test of Snow Accreted Insulators -”, *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 21, No. 6, pp. 2568-2575 (2014).

[6] 杉本聡一郎, 麻生照雄, 佐伯正樹, 「気象データを用いた送電線着雪タイプの判別手法

の提案」，電力中央研究所報告, N11059 (2012).
[7] 桑形恒男, 近藤純正, 「東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定」，天気, Vol.37, No.3, pp.197-201 (1990).
[8] J. Wu, “Oceanic whitecaps and sea state”, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.9, pp.1064–1068 (1979).
[9] D. Zhao and Y. Toba, “Dependence of whitecap coverage on wind and wind-wave properties”, *Journal of oceanography*, Vol.57, No.5, pp.603-616 (2001).

第 4 章　日本国内での鉄鋼や亜鉛の大気腐食性評価のためのドーズレスポンス関数の提案

4.1　はじめに

本章では，環境因子に基づく腐食速度推定手法を日本国内に整備するため，日本国内での腐食速度の空間分布評価に適用性を有する鉄鋼や亜鉛のドーズレスポンス関数の提案を図る。

1 章で述べたとおり，高度経済成長期に集中的に整備された橋梁などの社会基盤インフラの高経年化が社会的に深刻な問題となっている[1-2]。送電用鉄塔も例外ではなく，総数約 25 万基のうち，2007 年時点で経年 50 年以上の鉄塔が約 1 割を占めており[3]，2030 年代には半数程度に達する見込みである。このため，近い将来大規模修繕が一時期に集中することが予想され，大規模改修，更新の平滑化を可能とする予防保全型の維持管理手法の導入が期待されている。

送電用鉄塔には，鋼材に防錆対策として溶融亜鉛めっきが施された部材が使用される。これら鉄鋼や亜鉛などの金属材料の大気腐食には，海塩粒子，硫黄酸化物，気温，湿度，降水量，降水 pH 等の環境因子が関与し[4-5]，経年により金属材料が受ける腐食は立地の大気環境によって異なるため，立地に応じた大気腐食性の評価が重要となる。

以下では，国内での腐食速度の空間分布評価に適用性を持つドーズレスポンス関数の提案について，まず，ドーズレスポンス関数の国内整備の必要性に関する背景を整理し，課題を示すとともに，本研究の目的と実施事項について述べる。

(1)　ドーズレスポンス関数の国内整備の必要性に関する背景・課題

a. 大気腐食性の二つの評価手法と精度および活用用途―腐食速度の実測および環境因子にもとづく腐食速度推定―

ある場所における金属の大気腐食性を評価する手法は大きく二つある[5]。一つは，標準金属試験片をその場所に 1 年間屋外曝露し，重量減に基づいて腐食速度を実測する手法である。もう一つは，その場所の腐食に関わる環境因子を計測・入手し，ドーズレスポンス関数（以下，DR 関数（DRF））などの推定法に入力し，腐食速度を推定する手法である。ここで，DR 関数とは，環境因子に基づき腐食速度を定量的に推定する手法の一つであり，腐食速度に対して環境因子が与える影響を関数の形で表し，環境因子を入力データとして，それらの量に応じた腐食速度を推定できる関数である。

これら二つの手法には精度の面で相違があり，金属の大気腐食性に関する国際規格である ISO9223[6]においては，前者では±2～±5%の不確実性で腐食速度が決定（“determination”）され，後者では−33～+50%の不確実性で腐食速度が推定（“estimation”）されるという区別がなされる（表 4.1）。そのため，ある任意の場所における大気腐食性を精度良く評価したいならば，前者の手法による最低 1 年間の材料曝露が推奨されている[6]。しかしながら，後

者の手法にも重要な用途がある。例えば，図 4.1 に示すように，送電用鉄塔のような面的に多数散在する設備に対しては，環境因子のマップと DR 関数を組み合わせて推定腐食速度マップを作成することで，設備の改修，更新の優先順位を判断するための材料を得られる。また，地球温暖化にともなう環境因子の予測結果と DR 関数を組み合わせて，大気腐食性の将来変化を推定する試みもなされている[7]。このように，DR 関数などの腐食速度推定手法を用いることによって，大気腐食性評価における時間・空間的な範囲の拡大・補間が期待できる。

表 4.1　金属の大気腐食性を評価する 2 つの手法における評価範囲，活用方法

	①標準金属試験片曝露	②環境因子に基づく腐食速度推定（DR 関数など）
評価範囲	試験実施地点に限定	環境因子の空間情報と組み合わせて腐食マップが得られる
活用法	ある場所での腐食速度を精度良く評価したいならば，こちらの方法が推奨される	面的に多数散在する設備の評価においては非常に重要（送電用鉄塔にも活用可）

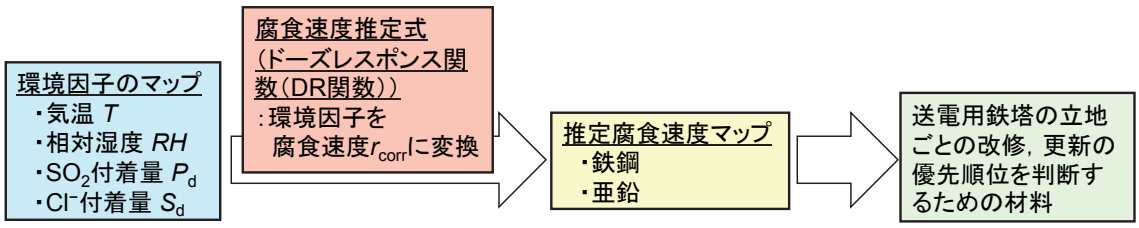


図 4.1　環境因子のマップと DR 関数を組み合わせた推定腐食速度マップの作成に基づく送電用鉄塔の立地ごとの腐食評価の流れ

b. 環境因子にもとづく腐食速度推定手法の国内外の整備状況

環境因子を入力データとする腐食速度推定手法としては，まず，1992 年に ISO9223 において環境因子のレベルを組み合わせて腐食速度を 5 段階のカテゴリーに分類する手法が提案された。次に，2012 年に ISO9223 において環境因子を入力変数として腐食速度を推定する DR 関数が提案された[6]．なお，ISO9223 以外にも，DR 関数は提案されている（4.2 にて後述）。このように，国際的にはカテゴリー法から DR 関数へと変遷しながら，環境因子に基づく腐食速度推定手法が整備されている。一方で，日本国内では，国内規格への導入も含めて腐食速度推定手法の整備がなされていない。また，DR 関数の日本国内データへの適用性についても評価例は無い。

(2) 本章の目的と実施事項

そこで本研究では，送電用鉄塔部材に用いられる亜鉛や鉄鋼を対象とした環境因子に基づく腐食速度推定手法の日本国内での整備を目的として，国内大気曝露試験データにもとづく DR 関数の国内適用性評価および DR 関数の改良を行った。以下に検討項目を示す。

1. DR 関数の評価・改良用国内大気曝露試験データ（4.2 節）
2. 日本国内評価向け DR 関数の選定（4.3 節）
3. 選定した DR 関数の国内大気曝露試験データへの適用性評価（4.4 節）
4. 国内大気曝露試験データにもとづく DR 関数の改良（4.5 節）
   ①国内データにもとづき決定した係数の ISO9223DR 関数への適用（4.5.1）
   ②改良 DR 関数と ISO9223DR 関数の推定精度の比較（4.5.2）

4.2 DR 関数の評価・改良用国内大気曝露試験データ

DR 関数評価・改良用の国内大気曝露試験データとして，日本ウエザリングテストセンター（JWTC）を中心に 2001 年から 2005 年まで国内 25 ヶ所で実施された，新発電関連要素機器の長期耐久性および寿命予測の標準化に関する大気曝露試験結果を用いた（以下，JWTC データ）[8]。この大気曝露試験では，JIS Z 2381[9]において 9 つに分類される国内の気候区分のそれぞれに最低 1 箇所の試験地点が設けられており，日本国内の異なる気候を網羅する形で実施されていることから，改良用国内データに最も適当であると判断した。表 4.2 および図 4.2 に曝露試験地点の概要と位置を示す。各試験地点では鉄鋼（炭素鋼 SM400B）と亜鉛の標準金属試験片を 1 年間曝露して重量減に基づく腐食速度を計測するとともに，Cl^-付着量（ドライガーゼ法），SO_2 付着量（二酸化鉛円筒法）も計測された。気温，相対湿度は曝露地点の計測データ，もしくは，近傍の気象官署の観測データが利用された。試験回数は試験地点によって異なり，1 回につき 1 年間の曝露試験が地点により 2〜8 回実施された。

後述する DR 関数に入力する環境因子のうち，SO_2 と Cl^-の付着量に関しては，ISO9223DR 関数の曝露試験データで使用されたサンプラー（二酸化鉛プレート法およびウェットキャンドル法）と JWTC データで用いられたサンプラー（二酸化鉛円筒法およびドライガーゼ法）が異なるため， ISO9225[10]に示される式(4.1)，(4.2)を用いて換算を行った。

$$P_{\mathrm{d,p}} = 0.67 P_{\mathrm{d,c}} \tag{4.1}$$

$$S_{\mathrm{d,c}} = 2.4\, S_{\mathrm{d,p}} \tag{4.2}$$

ここで，$P_{\mathrm{d,p}}$ は二酸化鉛プレート法により計測された年平均 SO_2 付着量で，$P_{\mathrm{d,c}}$ は二酸化鉛円筒法により計測された年平均 SO_2 付着量（ともに単位は $\mathrm{mg\ m^{-2}\ day^{-1}}$），$S_{\mathrm{d,c}}$ はウェットキャンドル法により計測された年平均 Cl^-付着量で，$S_{\mathrm{d,p}}$ はドライガーゼ法により計測された年平均 Cl^-付着量（ともに単位は $\mathrm{mg\ m^{-2}\ day^{-1}}$）をそれぞれ示す。式(4.1)と(4.2)を用いて，JWTC データの $P_{\mathrm{d,c}}$ と $S_{\mathrm{d,p}}$ をそれぞれ $P_{\mathrm{d,p}}$ と $S_{\mathrm{d,c}}$ に換算し，後述する DR 関数に入力した。

表 4.2　DR 関数の評価・改良用の国内大気曝露試験データの地点概要（既往文献における日本国内の大気曝露試験データ（JWTC データ[8])）

地点	都道府県	緯度	経度	海岸からの距離 [km]	1 年間曝露試験の実施回数 (開始月)
旭川	北海道	北緯 43°47′	東経 142°18′	76	7 (4 月:3, 10 月:4)
釧路	北海道	北緯 43°00′	東経 144°20′	1.4	3 (5 月:1, 10 月:2)
札幌	北海道	北緯 43°05′	東経 141°20′	9.2	4 (5 月:2, 10 月:1, 11 月:1)
秋田	秋田県	北緯 39°43′	東経 140°04′	0.7	4 (5 月:2, 10 月:2)
山形	山形県	北緯 38°14′	東経 140°17′	73	7 (3 月:1, 5 月:2, 10 月:4)
新潟	新潟県	北緯 37°54′	東経 139°04′	4.5	4 (5 月:2, 10 月:2)
高岡	富山県	北緯 36°46′	東経 137°02′	5.0	7 (5 月:3, 9 月:1, 10 月:3)
京都	京都府	北緯 35°00′	東経 135°44′	50	4 (5 月:2, 10 月:2)
米子	鳥取県	北緯 35°28′	東経 133°18′	0.6	7 (3 月:1, 5 月:2, 9 月:1, 10 月:3)
盛岡	岩手県	北緯 39°40′	東経 141°07′	74	3 (5 月:1, 10 月:2)
仙台	宮城県	北緯 38°21′	東経 140°51′	18	3 (5 月:1, 10 月:2)
つくば	茨城県	北緯 36°04′	東経 140°07′	46	8 (3 月:1, 5 月:3, 10 月:4)
銚子	千葉県	北緯 35°43′	東経 140°45′	4.0	8 (3 月:1, 5 月:3, 10 月:4)
東京	東京都	北緯 35°42′	東経 139°45′	6.6	7 (3 月:1, 5 月:2, 10 月:4)
山中湖	山梨県	北緯 35°24′	東経 138°52′	32	2 (5 月:1, 10 月:1)
清水	静岡県	北緯 34°59′	東経 138°30′	0.1	7 (3 月:1, 5 月:2, 10 月:4)
刈谷	愛知県	北緯 35°00′	東経 137°01′	16	4 (5 月:2, 10 月:2)
和泉	大阪府	北緯 34°26′	東経 135°26′	8.0	3 (5 月:1, 10 月:2)
高知	高知県	北緯 33°34′	東経 133°34′	6.2	3 (5 月:1, 10 月:2)
福山	広島県	北緯 34°27′	東経 133°26′	1.5	7 (4 月:1, 5 月:2, 10 月:3, 11 月:1)
大村	長崎県	北緯 32°56′	東経 129°59′	4.0	4 (5 月:2, 10 月:2)
隼人町	鹿児島県	北緯 31°44′	東経 130°43′	1.5	4 (5 月:1, 6 月:1, 10 月:2)
西原町	沖縄県	北緯 26°15′	東経 127°46′	2.4	8 (3 月:1, 5 月:3, 10 月:4)
宮古島	沖縄県	北緯 24°44′	東経 125°19′	2.0	2 (5 月:1, 10 月:1)
宮古島海岸	沖縄県	北緯 24°42′	東経 125°19′	0.008	2 (5 月:1, 10 月:1)
全 25 地点					122

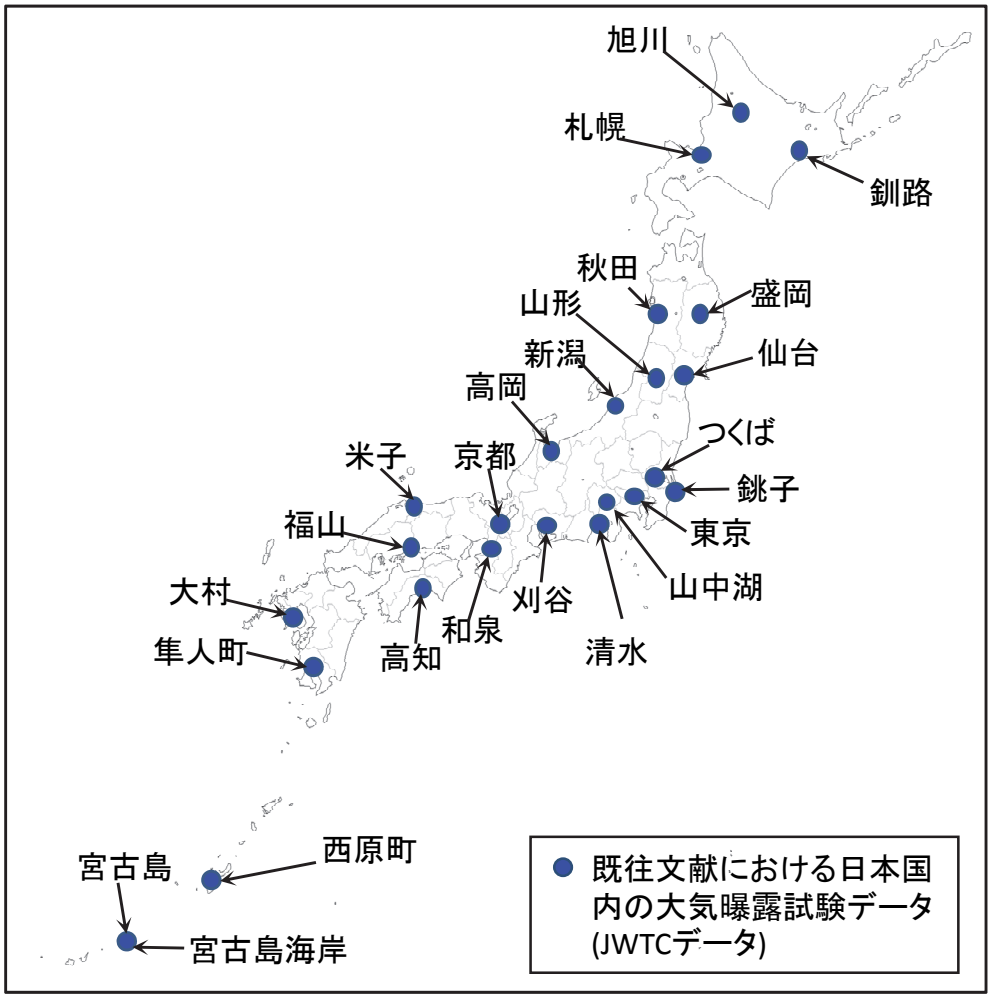


図 4.2　DR 関数の評価・改良用の国内大気曝露試験データの地点の位置（既往文献における日本国内の大気曝露試験データ（JWTC データ[8]））

4.3　日本国内評価向け DR 関数の選定

鉄鋼や亜鉛の曝露開始後 1 年間の腐食速度を推定する DR 関数を既往文献から収集し，鉄鋼で 4 個[6,11-14]，亜鉛で 7 個[6,11-17]の DR 関数を得た（表 4.3）[18].

(1) DR 関数の入力変数や式の形などに関するレビュー

まず，それぞれの DR 関数が基づく曝露試験データについて検討する。曝露試験が実施された地域や気候帯は DR 関数によってさまざまである。例えば，ISO9223[6]の DR 関数は欧州，北米，中南米，ロシア等世界各地のデータに基づく。また，Mikhailov らの DR 関数[14]では，熱帯や亜熱帯を対象とし，Tidblad らの DR 関数[16]では，大気汚染が顕著であった 1990 年代の中国を対象とした。

次に，入力変数となる環境因子について検討する。SO_2 はいずれの DR 関数にも含まれ，重要な腐食性ガスと位置づけられている。O_3 も重要な腐食性ガスとされ，いくつかの DR 関数に入力変数として設定されている。Cl^-付着量も，主要な腐食性環境因子として位置づけられ，ほぼすべての DR 関数に変数として含まれている。また，気温と相対湿度（もしくは濡れ時間）もすべての DR 関数に変数として含まれている。降水中 H^+は，酸性沈着によって生じる腐食を考慮するために，いくつかの DR 関数では入力変数に設定されている。日射量は，熱帯や亜熱帯を対象とした DR 関数[14]のみに入力変数として含まれており，金属表面に生じる電解質を含む水膜が日射によって蒸発することにより，腐食に抑制的に働く効果を持つと想定されている。

さらに DR 関数の式の形について検討する．Klinesmith らの DR 関数[13]を除くすべての DR 関数において，SO_2 と Cl^-と降水中 H^+の効果が別個の項として記述され，各項の和として腐食速度が表されており，濡れ時間や相対湿度などは SO_2 や Cl^-の項に掛かる形で示される。これは，電解質を含む水膜が金属表面に生じる際に腐食反応が進み，SO_2 と Cl^-の寄与を独立に扱っていることを意味する。また，ISO9223[6]を除くすべての DR 関数には式の中に曝露年数 t が含まれており，t=1 年とした場合に，ISO9223[6]と同等の期間における腐食速度を示すこととなる。

表4.3(a)　既往文献から収集した鉄鋼のドーズレスポンス関数[18]

DR関数	出典
$r_{corr} = 1.77P_d^{0.52}\exp(0.020RH + f_{St}) + 0.102S_d^{0.62}\exp(0.033RH + 0.040T)$ $f_{St} = 0.150(T-10)$ when $T \le 10°C$ $f_{St} = -0.054(T-10)$ when $T > 10°C$	Mikhailovら[11]および ISO 9223[6]
$ML = 29.1 + t^{0.6}\left(21.7 + 1.39\left[SO_2\right]^{0.6} RH_{60}e^{f(T)} + 1.29Rain\left[H^+\right] + 0.593\left[PM_{10}\right]\right)$ $f(T) = 0.150(T-10)$ when $T \le 10°C$ $f(T) = -0.054(T-10)$ when $T > 10°C$	Kuceraら[12]
$r_{corr} = 13.4\,t^{0.98}\left(\frac{TOW}{3800}\right)^{0.46}\left(1+\frac{[SO_2]}{25}\right)^{0.62}\left(1+\frac{S_d}{50}\right)^{0.34}e^{0.016(T+20)}$	Klinesmithら[13]
$r_{corr} = 4.28\left[SO_2\right]^{0.28}\exp(0.022RH + 0.021T - 0.00020Rad)\,t^{0.58}$ $+ 0.121S_d^{0.71}\,exp(0.018\,RH + 0.059T)\,t^{0.62}$ when $T > 10°C$	Mikhailovら[14]

ML：重量減で示す腐食速度[g m^{-2}]，r_{corr}：材厚減少で示す腐食速度[1年以上の曝露ではμm，1年間の曝露ではμm yr^{-1}]，T：年平均気温[°C]，RH：年平均相対湿度[%]，t：曝露期間[yr]，SO_2，O_3，HNO_3，およびPM_{10}：ガス・粒子状物質の大気中濃度の年平均値[μg m^{-3}]，H^+：降水中H^+濃度の年平均値[mg L^{-1}]，S_d：年平均Cl^-付着量[mg m^{-2} day^{-1}]，P_d：年平均SO_2付着量[mg m^{-2} day^{-1}]，RH_{60}：RHが60より大きい場合は$RH-60$，60以下の場合は0，Rad：全天日射量[MJ m^{-2} yr^{-1}]，u：地上高10 mにおける年平均風速[m s^{-1}]，TOW：気温が0°Cより高く，かつ相対湿度が80%より大きい時間として定義される濡れ時間[h yr^{-1}]（曝露時間全体に占める濡れ時間の割合としてはTOW_f[-]と表記）

表4.3(b)　既往文献から収集した亜鉛のドーズレスポンス関数[18]

DR関数	出典
$r_{corr} = 0.0129P_d^{0.44}\exp(0.046RH + f_{Zn}) + 0.0175S_d^{0.57}\exp(0.008RH + 0.085T)$ $f_{Zn} = 0.038(T-10)$ when $T \le 10°C$ $f_{Zn} = -0.071(T-10)$ when $T > 10°C$	Mikhailovら[11]および ISO 9223[6]
$ML = 1.82 + t\left(1.71 + 0.471[SO_2]^{0.22}e^{(0.018RH + f(T))} + 0.041Rain[H^+] + 1.37[HNO_3]\right)$ $f(T) = 0.062(T-10)$ when $T \le 10°C$ $f(T) = -0.021(T-10)$ when $T > 10°C$	Kuceraら[12]
$ML = 1.4[SO_2]^{0.22}\exp\{0.018RH + f_{Zn}(T)\}t^{0.85} + 0.029Rain[H^+]t$ $f_{Zn}(T) = 0.062(T-10)$ when $T \le 10°C$ $f_{Zn}(T) = -0.021(T-10)$ when $T > 10°C$	Tidbladら[15]
$r_{corr} = 0.16t^{0.36}\left(\frac{TOW}{3800}\right)^{0.24}\left(1 + \frac{[SO_2]}{25}\right)^{0.82}\left(1 + \frac{S_d}{50}\right)^{0.44}e^{0.05(T+20)}$	Klinesmithら[13]
$r_{corr} = \left(0.13[SO_2]^{0.34}\exp\{0.011RH - 0.028(T-10)\} + 0.21Rain[H^+]\right)t^{0.92}$	Tidbladら[16]
$r_{corr} = 0.33 + 0.38[SO_2]TOW_f ut^{0.53} - 0.5[SO_2]TOW_f t^{0.53} + 0.00007[SO_2][O_3]RHt^{0.53}$	Leuenberger-Mingerら[17]
$r_{corr} = 0.016[SO_2]^{0.14}\exp(0.052RH + 0.002T - 0.00007Rad)t^{0.95}$ $+ 0.040S_d^{0.45}\exp(0.081T)t^{0.65}$ when $T > 10°C$	Mikhailovら[14]

ML：重量減で示す腐食速度[g m^{-2}]，r_{corr}：材厚減少で示す腐食速度[1年以上の曝露ではμm，1年間の曝露ではμm yr^{-1}]，T：年平均気温[°C]，RH：年平均相対湿度[%]，t：曝露期間[yr]，SO_2，O_3，HNO_3，およびPM_{10}：ガス・粒子状物質の大気中濃度の年平均値[μg m^{-3}]，H^+：降水中H^+濃度の年平均値[mg L^{-1}]，S_d：年平均Cl^-付着量[mg m^{-2} day^{-1}]，P_d：年平均SO_2付着量[mg m^{-2} day^{-1}]，RH_{60}：RHが60より大きい場合はRH−60，60以下の場合は0，Rad：全天日射量[MJ m^{-2} yr^{-1}]，u：地上高10 mにおける年平均風速[m s^{-1}]，TOW：気温が0°Cより高く，かつ相対湿度が80%より大きい時間として定義される濡れ時間[h yr^{-1}]（曝露時間全体に占める濡れ時間の割合としてはTOW_f[-]と表記）

(2) 日本国内評価向け DR 関数の選定

表 4.3 に示した DR 関数のうち，国際的な曝露プログラムによるデータに基づいており，かつ，DR 関数を用いた評価例が報告されている[7,19]ものは，鉄鋼，亜鉛ともに ISO 9223 の DR 関数[6]と Kucera らの DR 関数[12]の 2 個である。このうち，ISO 9223 の DR 関数[6]では，入力変数に Cl^-付着量が含まれているが，Kucera らの DR 関数[12]には含まれていない。

Cl^-付着量に関して，地球規模での大気環境観測モニタリングにおいては，海岸からの距離が 100 km 以内を目安として海塩粒子由来の成分が見積もられている[20]ことから，世界的に見て，日本のような島嶼国は，海塩粒子の影響を受ける国土面積の割合が極めて大きいと言える。また，一般的に大気中の海塩量は海岸からの距離に従って指数関数的に減衰していくため[21-22]，大気腐食性の空間分布に与える影響も大きいと予想される。さらに，図 4.3 に示すように，JWTC データ[8]に基づき，日本国内における鉄鋼や亜鉛の実測腐食速度と海岸からの距離の関係を調べると，実測腐食速度は海岸からの距離にしたがって単調に減少する傾向があることが確認できる。したがって，日本国内における立地に応じた大気腐食性評価においては，海塩粒子の考慮が必要不可欠だと判断される。以上より，入力変数に Cl^-付着量が含まれている ISO9223 の DR 関数（以下, ISO9223DR 関数（ISO9223DRF））[6]を国内評価向け DR 関数に選定した。

式(4.3)，(4.4)に鉄鋼および亜鉛の ISO9223DR 関数をそれぞれ示す。

・鉄鋼

$$r_{\mathrm{corr}} = 1.77\,P_{\mathrm{d}}^{0.52}\exp\left(0.020\,RH + f_{\mathrm{St}}\right) + 0.102\,S_{\mathrm{d}}^{0.62}\exp\left(0.033\,RH + 0.040\,T\right) \tag{4.3}$$

ただし，$T \leq 10$°C のとき，$f_{\mathrm{St}} = 0.150(T - 10)$，$T > 10$°C のとき，$f_{\mathrm{St}} = -0.054(\mathrm{T} - 10)$。

・亜鉛

$$r_{\mathrm{corr}} = 0.0129\,P_{\mathrm{d}}^{0.44}\exp\left(0.046\,RH + f_{\mathrm{Zn}}\right) + 0.0175\,S_{\mathrm{d}}^{0.57}\exp\left(0.008\,RH + 0.085\,T\right) \tag{4.4}$$

ただし，$T \leq 10$°C のとき，$f_{\mathrm{Zn}} = 0.038(T - 10)$，$T > 10$°C のとき，$f_{\mathrm{Zn}} = -0.071(\mathrm{T} - 10)$。

ここで，r_{corr}は曝露開始後 1 年間の金属の腐食速度（μm yr^{-1}），T は年平均気温（°C），RH は年平均相対湿度（%），P_{d}は年平均 SO_2 付着量（mg m^{-2} day^{-1}），S_{d}は年平均 Cl^-付着量（mg m^{-2} day^{-1}）をそれぞれ示す。

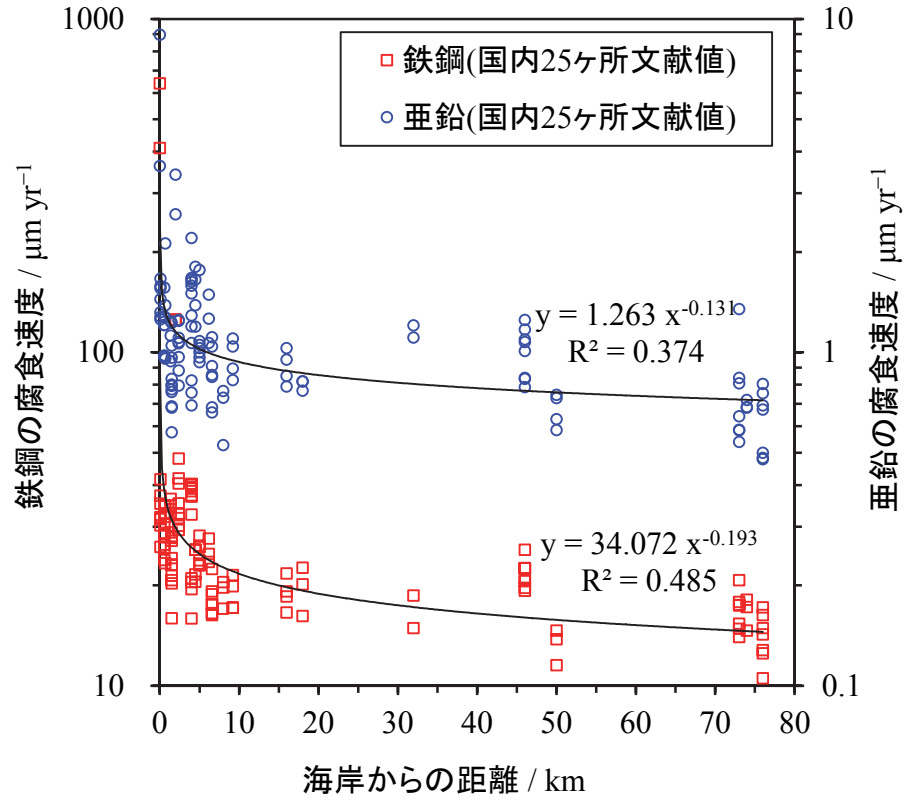


図 4.3　国内文献データ（JWTC データ）における鉄鋼や亜鉛の実測腐食速度と海岸からの距離の関係[18]

4.4　選定した DR 関数の国内大気曝露試験データへの適用性評価

(1)　ISO9223DR 関数の国内腐食速度データに対する推定精度

図 4.4 は鉄鋼および亜鉛の試験片における曝露開始後 1 年間の実測腐食速度（JWTC データ[8]）と ISO9223DR 関数による推定腐食速度の比較を示す。DR 関数の推定精度の指標となる決定係数 R^2 は，鉄鋼で 0.45，亜鉛で 0.20 であった。これらの R^2 値は，ISO9223DR 関数が提案の基となった曝露試験データに対して示した相関（鉄鋼で R^2=0.85，亜鉛で R^2=0.78）に比べると低く，日本国内の腐食速度データを十分には精度良く推定できていないことがわかった。なお，宮古島，宮古島海岸の腐食速度は他の試験地点での値に比べて例外的に大きく[8]，また，特に宮古島海岸では海塩粒子量の非常に多い場所であるため，捕集された SO2 付着量に海塩由来のものが多かったと推察される[8]ことから，これら 2 地点のデータは R^2 算出からは除外した。

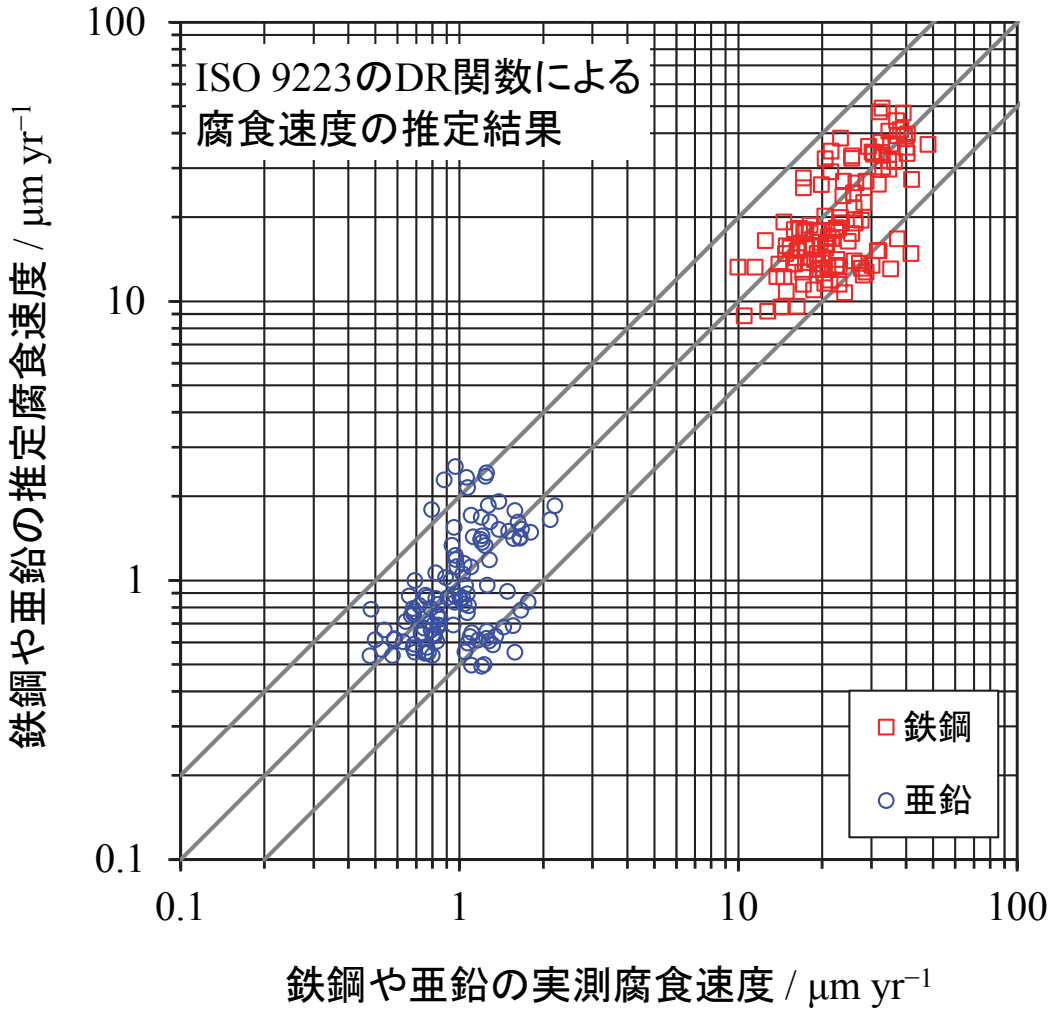


図 4.4　国内文献データ（JWTC データ）における鉄鋼や亜鉛の実測腐食速度と ISO 9223 の DR 関数による推定腐食速度の比較[18]

(2) ISO9223DR 関数の国内腐食速度データに対する推定精度の地域的傾向

図 4.5 は，鉄鋼と亜鉛における推定腐食速度の誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$（%）を曝露試験地点ごとに示したものである。なお，C_{est} は推定腐食速度，C_{meas} は実測腐食速度を示す。$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ が正の値の場合は過大評価を，負の値の場合は過小評価を，0%に近い場合は実測値とほぼ一致する評価をそれぞれ示す。推定腐食速度の誤差は地点ごとに，過小評価（清水，つくば，福山等），ほぼ一致（米子，銚子等），過大評価（札幌，秋田等）におおむね分かれる傾向が認められた。また，複数回の曝露を行った地点では，再現性を持って推定誤差の大小傾向が見られた。さらに，同一地点における鉄鋼と亜鉛での推定誤差の大小傾向はほぼ一致していた。例えば，米子では，6 回の曝露試験結果に対する推定誤差が，鉄鋼で−7.7～+13.1%，亜鉛で−9.7～+27.1%であり，鉄鋼・亜鉛ともに実測値とほぼ一致する

推定結果を示した。一方，清水では，7 回の曝露試験結果に対する推定誤差が，鉄鋼で−64.3～−46.5%，亜鉛で−65.1～−47.6%であり，鉄鋼・亜鉛ともに再現性を持った過小評価を示した。これらのことから，誤差自体はランダムなものではなく，試験地点に系統的に毎年働く誤差要因であることが示唆される。環境因子には年々変動はあるものの，同一地点では同様の腐食環境が再現性を持って生じるとすると，環境因子の考慮方法を改良することによって DR 関数の推定精度を改善できる可能性がある。

環境因子の年々変動について，例えば清水では，7 回の曝露試験における環境因子の変動範囲が，年平均気温で 16.1～17.4（変動係数 3%），年平均相対湿度で 66～69%（変動係数 2%），年平均 SO_2 付着量で 3.4～4.4 mg m^{-2} day^{-1}（変動係数 10%）であり，環境因子レベルにも再現性が見られる。この三つの環境因子に比較すると，年平均 Cl^- 付着量の変動範囲は 3.5～9.0 mg m^{-2} day^{-1}（変動係数 32%）とやや大きい。ただし，JWTC データの 25 地点の全データにおける年平均 Cl^- 付着量の変動範囲（1.3～271.3 mg m^{-2} day^{-1}）と比較すると同一地点での環境因子の年々変動は非常に小さいと言える。

なお，異なる金属種における推定誤差の大小傾向がほぼ一致したことに関して，沖縄県の西原町では，それ以外の 22 地点とは異なり，鉄鋼に比べて亜鉛において過大評価になる傾向が見られた。実測の腐食速度における鉄鋼と亜鉛の比（鉄鋼の腐食速度／亜鉛の腐食速度）を見ると，沖縄県以外の 22 地点では平均 23.5 である一方，沖縄県の西原町では平均 35.3 であり，1.5 倍程度の大きさであった。このような実測データにおける鉄鋼と亜鉛の腐食速度の大小関係の相違が，亜鉛の腐食速度推定における西原町での過大評価に関連していると推察される。

推定誤差の地域的傾向について，海岸からの距離との関連を検討する。図 4.6 は，鉄鋼と亜鉛における推定腐食速度の誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ と海岸からの距離の関係を示す。$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ が−50%～+100%の範囲（ファクター2）を超えるような過小評価・過大評価データは，海岸からの距離が小さい領域に多く見られ，特に海岸から約 3 km 以内の領域で出現頻度が顕著に高い傾向が認められた。海岸から 3 km 以内の地点では，データ全体に占める−50%以下の過小評価データの割合は，鉄鋼で 27.5%，亜鉛で 17.5%であり，+100%以上の過大評価データの割合は，鉄鋼で 0%，亜鉛で 12.5%であった。一方で，海岸から 10 km 以遠の地点では，亜鉛での−50%以下の過小評価がデータ全体の 10.5%見られるだけであった。なお，海岸から約 3 km 以内の領域では，+100%以上の過大評価が見られる地点には西原町が，−50%以下の過小評価が見られる地点には清水，福山，隼人町がそれぞれ含まれていた。

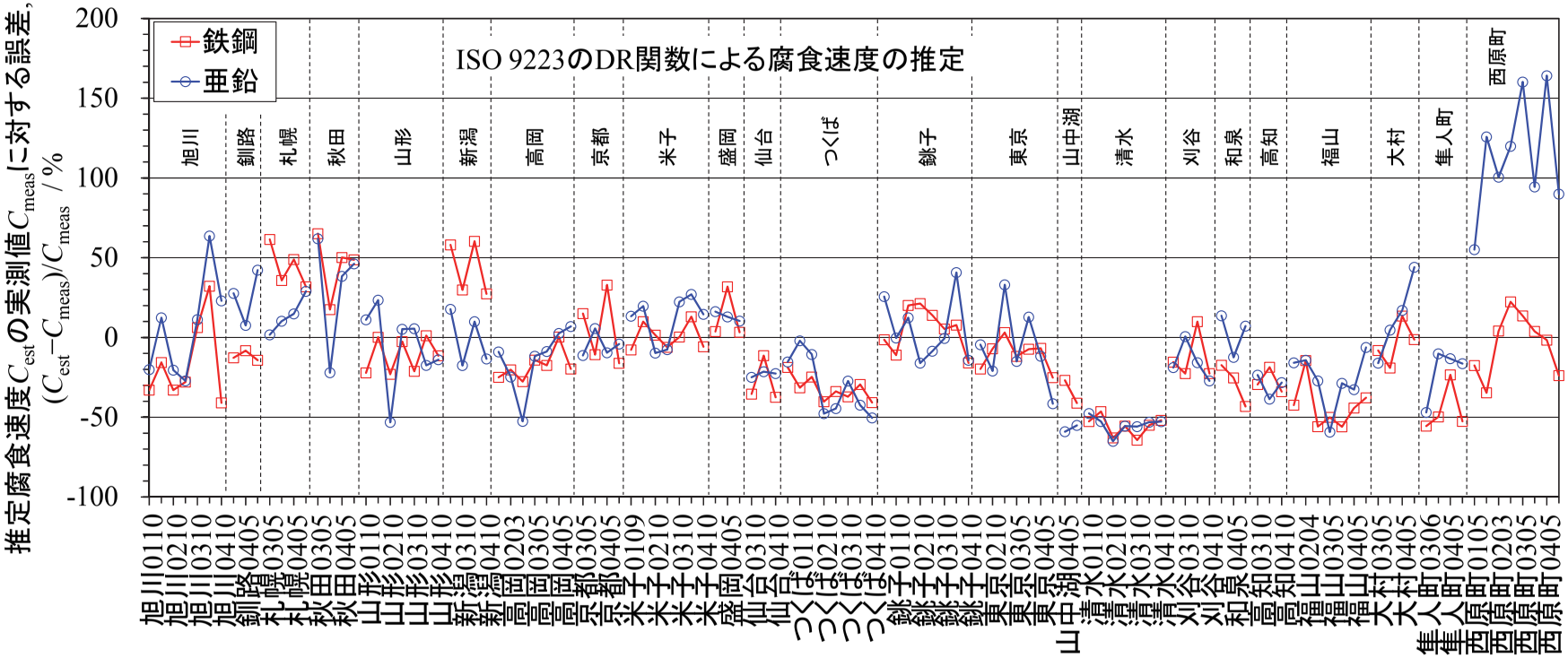


図4.5　ISO 9223のDR関数による鉄鋼や亜鉛の推定腐食速度C_{est}の実測値C_{meas}に対する誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$[18]

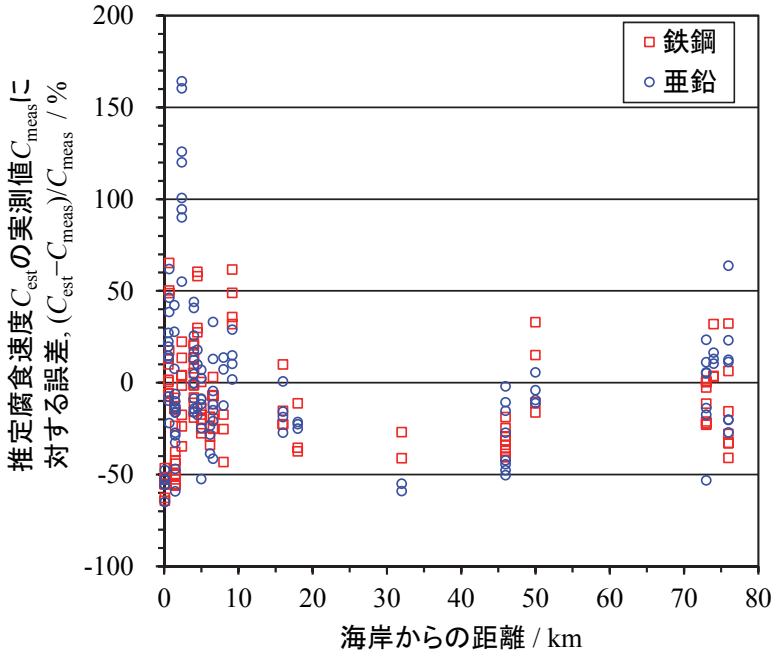


図 4.6　ISO 9223 の DR 関数による鉄鋼や亜鉛の推定腐食速度 C_{est} の実測値 C_{meas} に対する誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ と海岸からの距離の関係[18]

(3) ISO9223DR 関数の国内腐食速度データ推定における誤差要因の考察

先述のとおり，ISO9223DR 関数の日本国内データ推定における誤差傾向から，誤差自体はランダムなものではなく，環境因子の考慮方法の改良によって改善されうるものである可能性が示唆された。

このような推定誤差の要因として一つ目に挙げられるのは，ISO9223DR 関数は，世界各地（欧州，北米[23]，南米[24]，ロシア等）で取得された曝露試験データに基づいて提案されており，日本国内とは異なる大気環境で取得された曝露試験データを反映しているという点である。表 4.4 は，4.5.1 で後述する非線形回帰に用いた DR 関数の改良用国内大気曝露試験データ（JWTC データ[8]）の腐食速度および環境因子のデータ範囲と，ISO9223DR 関数の提案の基となった曝露試験データの環境因子のデータ範囲を示す。それぞれの環境因子を比較すると，気温に関しては，ISO9223DR 関数の曝露試験データにおいて，ロシアの極めて寒冷な地域における氷点下の年平均気温が含まれるため，JWTC データ[8]よりもかなり低い気温範囲をカバーしていることがわかる。また，SO_2 付着量に関しては，ISO9223DR 関数の曝露試験データにおいて，ヨーロッパの工業地域に位置する地点において 100 mg m^{-2} day^{-1} を超えるデータが含まれるため，最高でも数 mg m^{-2} day^{-1} にとどまる JWTC データ[8]に比べると，かなり高いレベルをカバーしていることがわかる。一方，Cl^- 付着量に関しては，JWTC データ[8]においても，ISO9223DR 関数の曝露試験データと同様に 100 mg m^{-2} day^{-1} 以上の範囲までカバーしており顕著な相違は見られない。

表 4.4　DR 関数改良用の国内大気曝露試験データ（JWTC データ[8]）および ISO9223 DR 関数提案時の大気曝露試験データの環境因子や腐食速度の範囲

環境因子および腐食速度	単位	DR 関数改良用国内大気曝露試験データの範囲（JWTC データ[8]）	ISO9223 DR 関数提案時の大気曝露試験データの範囲
気温, T	°C	6.4 - 23.5	−17.1 - 28.7
相対湿度, RH	%	58 - 80	34 - 93
SO_2 付着量, P_d	mg m^{-2} day^{-1}	1.1 - 8.2	0.7 - 150.4
Cl^- 付着量, S_d	mg m^{-2} day^{-1}	1.3 - 129.4	0.4 - 760.5
鉄鋼や亜鉛の腐食速度, r_{corr}	μm yr^{-1}	(鉄鋼) 10.0 - 48.0	—
		(亜鉛) 0.48 - 2.20	—

二つ目に挙げられる推定誤差の要因は，ISO9223DR 関数の入力変数に含まれていない環境因子の影響である。例えば，降水による金属表面付着物の雨洗効果が挙げられる。屋外曝露試験においては，試験片は雨がかりである。一方で，海塩粒子や硫黄酸化物のサンプラーは雨よけの条件であることから，降水によって金属表面が洗い流されることで，サンプラーによって計測された Cl^- や SO_2 の付着量と金属表面に実際に付着物として残る量に乖離が生じる。北米，欧州の湿性沈着の広域モニタリングデータを比較した既往文献[25]によると，日本は北米や欧州に比べて多雨域に分布しているので，他地域に比べて雨洗効果の重要性は高いと考えられる。また，雨洗効果の考慮方法については，降水量と Cl^- や SO_2 の付着量の季節変動における互いの同期を組み入れることによって，推定精度を向上できる可能性もある。また，このほかに ISO9223DR 関数に含まれていない環境因子として，日射による金属表面の水膜蒸発の影響や降水中 H^+ の湿性沈着も挙げられる。

図 4.6 に示したとおり，過小評価・過大評価のデータは海岸からの距離が小さい領域に顕著に多い傾向が認められた。−50%以下の過小評価データは，海岸からの距離が 0.1 km である清水や 1.5 km である福山，隼人町において高頻度で見られた。これらの地点では，海岸からの距離が小さいにもかかわらず Cl^- 付着量が数 mg m^{-2} day^{-1} 程度と小さい傾向が認められ，腐食速度を過小に推定する一因になったと考えられる。一方，+100%以上の過大評価は西原町における亜鉛のデータでのみ見られた。一般的には，腐食速度推定における過大評価を小さくする環境因子としては，雨洗効果や日射による水膜の蒸発が挙げられる。西原町では Cl^- 付着量が大きく（平均 50 mg m^{-2} day^{-1} 程度），かつ，降水量が多い地域のため，ISO9223DR 関数に加味されていない雨洗効果による過大評価低減の可能性は小さくないと推察される。また，低緯度に位置するため日射量が大きいことから，日射による水膜蒸発を加味することによる過大評価低減の可能性も示唆される。

三つ目に挙げられる推定誤差の要因は，ISO9223DR 関数における腐食速度の気温依存性に関する設定の国内データに対する適合性の影響である．ISO9223DR 関数では，SO_2 付着量を含む項における係数を，気温が 10 °C 以下の場合と 10 °C 以上の場合に区分してそれぞれ設定している（f_{St} および f_{Zn}）。この気温 10 °C での区分に関しては，メカニズムとして，気温 10 °C 以上の領域では，気温の上昇に伴い相対湿度が低下するとともに，日射による熱で金属表面の水膜が蒸発することで濡れ時間が気温の上昇に伴い減少することが想定されている[11]。一方で，Cl^- を含む海塩粒子が高い濃度で含まれる場合には，海塩粒子の吸湿性により高い気温でも金属表面の水膜が維持されるため，腐食速度は気温に対して単調な増加傾向を示すとも述べられている[11]。これに対し，図 4.7 に示される JWTC データにおける鉄鋼と亜鉛の実測腐食速度と気温の関係においては，全体的に気温に対する実測腐食速度の単調増加の傾向が認められ，少なくとも気温が上昇した領域での腐食速度の減少が起きていない。したがって，ISO9223DR 関数で設定される気温 10 °C での区分は国内データには適合していないと判断される。このことは，先述したように，ISO9223DR 関数の曝露試験データが取得された世界各地と比較すると，日本では海塩粒子の影響を受ける国土の割合が極めて大きいと推察されることからも妥当と考えられる。このため，4.5 節において後述する DR 関数の係数再決定による改良においては，気温 10 °C での区分は設けなかった。

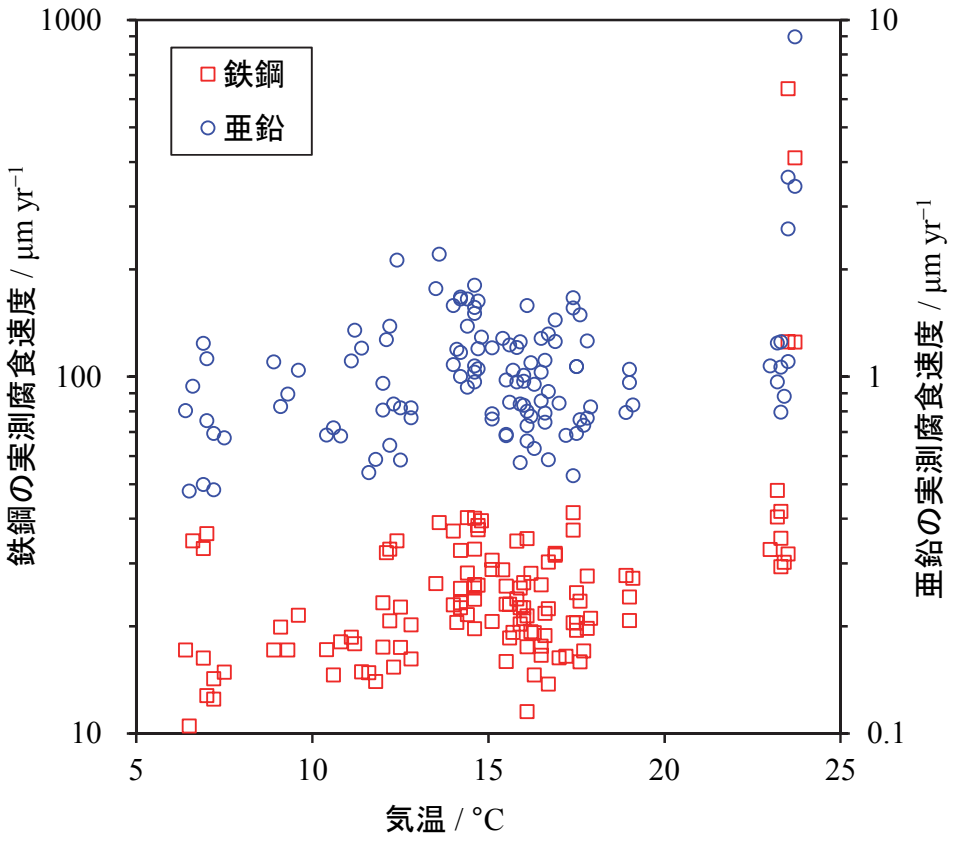


図 4.7　国内文献データ（JWTC データ）における鉄鋼や亜鉛の実測腐食速度と気温の関係[18]

4.5　国内大気曝露試験データにもとづく DR 関数の改良

4.5.1　国内データにもとづき決定した係数の ISO9223DR 関数への適用

これまでの検討を踏まえて，本研究では，ISO9223DR 関数を基本形として，国内大気曝露試験データ（JWTC データ）をもとに決定した係数を適用することで DR 関数の改良を試みた。

改良にあたっては，推定誤差の要因の一つとして，ISO9223DR 関数の提案の基となった曝露試験データと国内曝露試験データにおける環境因子レベルの相違が考えられる点に着目した。4.4 節で述べたとおり，ISO 9223 の DR 関数は，欧州，北米，中南米，ロシア等世界各地で実施された大気曝露試験データ[23-24]に基づいており，その大気曝露試験データを国内大気曝露試験データと比較すると，欧州の工業地域に位置する試験地点の影響で SO_2 付着量において国内よりも 2 桁高いレベルのデータを含んでいること等が挙げられ，日本国内の腐食環境と ISO 9223 の DR 関数の前提となる腐食環境は大きく異なる可能性が高い[18]。そこで，その影響の解消を図るため，現行の ISO 9223 の DR 関数における入力変数や式の基本形は変えずに，国内の大気曝露試験データに基づいて係数の決定を行うことで，DR 関数の改良を実施した。

なお，式の形については，4.4 節の図 4.7 で述べたとおり，国内大気曝露試験データにおいて，気温に対して鉄鋼や亜鉛の実測腐食速度が単調増加する傾向が認められることから[18]，ISO 9223 の DR 関数で用いられている気温 10 °C での係数の区分は行わなかった。

係数の決定においては，式(4.5)に示される改良後の DR 関数（改良 DR 関数）における 8 個の係数（b_1～b_8）を，国内曝露試験データ（23 地点，$n = 118$）に基づく非線形回帰により求めた。なお，宮古島，宮古島海岸の腐食速度は他の試験地点での値に比べて例外的に大きく[8]，また，特に宮古島海岸では海塩粒子量の非常に多い場所であるため，捕集された SO2 付着量に海塩由来のものが多かったと推察される[8]ことから，これら 2 地点のデータは非線形回帰の対象データからは除外した。

$$r_{\mathrm{corr}} = b_1 P_{\mathrm{d}}^{b_2} \exp\left(b_3 RH + b_4 (T - 10)\right) + b_5 S_{\mathrm{d}}^{b_6} \exp\left(b_7 RH + b_8 T\right) \tag{4.5}$$

ここで，r_{corr} は曝露開始後 1 年間の金属の腐食速度（μm yr^{-1}），T は年平均気温（°C），RH は年平均相対湿度（%），P_{d} は年平均 SO_2 付着量（mg m^{-2} day^{-1}），S_{d} は年平均 Cl^- 付着量（mg m^{-2} day^{-1}），b_1～b_8 は係数をそれぞれ示す。改良 DR 関数の係数決定に用いた腐食速度と環境因子のデータ範囲は先述の表 4.4 に示す。

式(4.5)における係数の推定は，国内曝露試験データ（JWTC データ）を基に，ニュートン法により非線形回帰を行い，実測値と推定値の平均 2 乗誤差を最小化するように求めた。使用するデータは $n = 118$ とそれほど試料数が多くはないことから，初期値によっては非線形回帰が収束しないケースもあるため，ISO9223DR 関数の各係数を初期値として非線形回帰を行った。収束判定における許容誤差については，10^{-10}～10^{-1} の 10 パターンを事前検討として実施し，係数が異常に小さくなるなどの過学習が見られない 10^{-3} を妥当な許容誤差

として設定した。

表 4.5 には，推定された改良 DR 関数の 8 個の係数（b_1～b_8）を鉄鋼，亜鉛ごとに示す。比較のため，現行の ISO 9223DR 関数における同係数を併記した。

表 4.5　鉄鋼と亜鉛を対象とした DR 関数の各係数（ISO 9223[6,11]および改良 DR 関数[18]）

DR 関数の係数	鉄鋼			亜鉛		
	ISO9223 の DR 関数		改良 DR 関数	ISO9223 の DR 関数		改良 DR 関数
	T≦10°C	T>10°C		T≦10°C	T>10°C	
b_1	1.77	1.77	1.26	0.0129	0.0129	0.0564
b_2	0.52	0.52	0.34	0.44	0.44	0.29
b_3	0.020	0.020	0.028	0.046	0.046	0.032
b_4	0.150	−0.054	0.085	0.038	−0.071	0.038
b_5	0.102	0.102	0.004	0.0175	0.0175	0.0287
b_6	0.62	0.62	0.61	0.57	0.57	0.86
b_7	0.033	0.033	0.089	0.008	0.008	−0.007
b_8	0.040	0.040	−0.099	0.085	0.085	−0.041

4.5.2　改良 DR 関数と ISO9223DR 関数の推定精度の比較

図 4.8 は，鉄鋼と亜鉛における実測腐食速度と改良 DR 関数および ISO9223DR 関数による推定腐食速度との関係を示す。実測値に対して，推定値が−50%～+100%の範囲（ファクター2）に含まれる推定値の割合は，改良 DR 関数による評価では鉄鋼，亜鉛ともに 100%であり，ISO9223DR 関数（鉄鋼 90.7%，亜鉛 85.6%）を上回った。また，決定係数も，鉄鋼で R^2=0.70，亜鉛で R^2=0.38 と係数適用によって向上した。

表 4.6 は，実測値に対する推定値の誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ の各範囲に含まれるデータ数とデータ総数に対する割合（%）を改良前後で比較したものである。$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ が±40%以内に含まれるデータ割合は，改良 DR 関数による評価では鉄鋼で 96%，亜鉛で 89%であり，ISO9223DR 関数（鉄鋼 77%，亜鉛 73%）を上回った。以上のように，DR 関数の係数再決定による改良によって，日本国内の腐食速度データに対する DR 関数の推定精度を向上することができた。

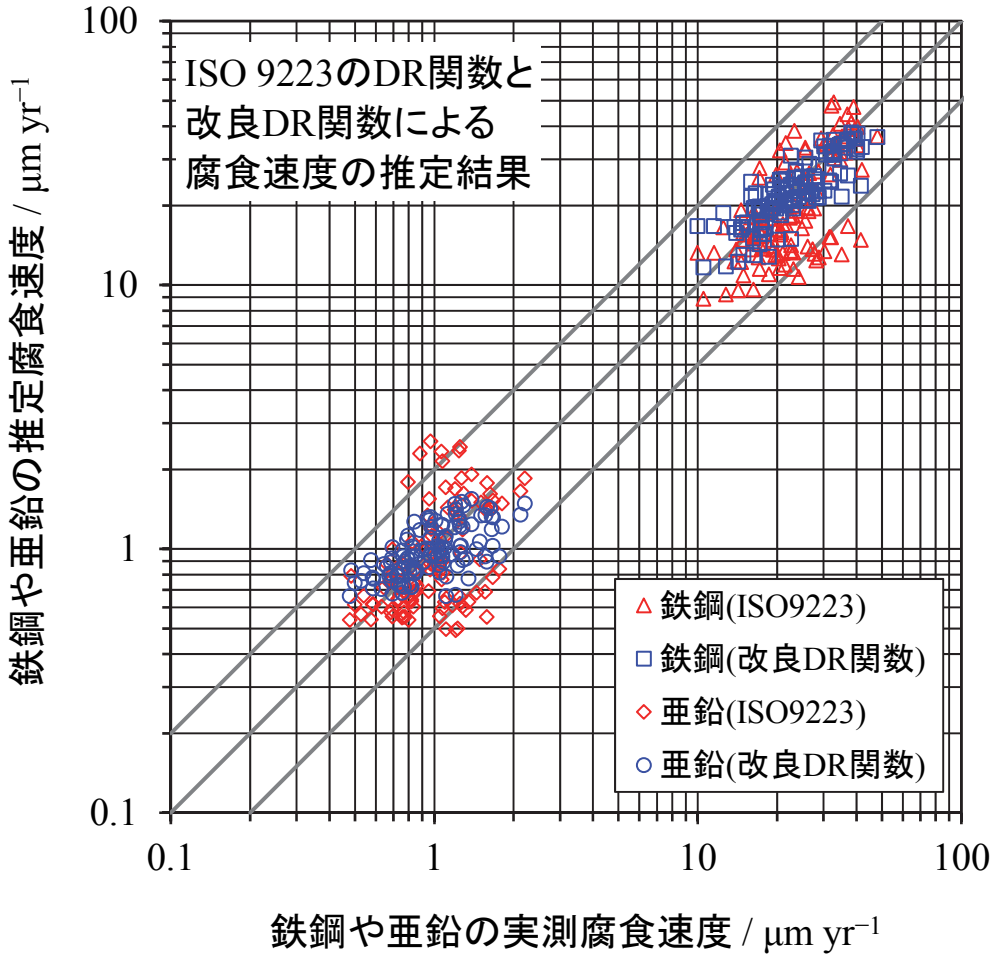


図 4.8　国内文献データ（JWTC データ）における鉄鋼や亜鉛の実測腐食速度と ISO 9223 の DR 関数と改良 DR 関数による推定腐食速度の比較[18]

表 4.6　ISO 9223 の DR 関数と改良 DR 関数による鉄鋼や亜鉛の推定腐食速度 C_{est} の実測値 C_{meas} に対する誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ の各範囲に含まれるデータ数とデータ総数に対する割合[18]

推定腐食速度の実測値に対する誤差の範囲, $(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ / %	鉄鋼				亜鉛			
	ISO9223 DR 関数		改良 DR 関数		ISO9223 DR 関数		改良 DR 関数	
	n	%	*n*	%	*n*	%	*n*	%
−20 - +20	54	46	86	73	60	51	70	59
−40 - +40	91	77	113	96	86	73	105	89
−60 - +60	113	96	117	99	108	92	117	99
−80 - +80	118	100	118	100	111	94	118	100
−80%以下および+80%以上	0	0	0	0	7	6	0	0

以下には，改良 DR 関数の推定誤差の傾向を改良前後で比較する。

まず，推定誤差の地域的傾向における改良前後の変化についてである。図 4.9 は，DR 関数改良の前後における推定腐食速度の誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ を曝露試験地点ごとに示したものである。推定腐食速度の誤差は鉄鋼，亜鉛ともに改良によって，地点全体にわたり 0%に近付いた。改良前では，沖縄県の西原町では，鉄鋼に比べて亜鉛において過大評価になる傾向があったが，改良後は亜鉛も鉄鋼と同様に誤差が 0%に近付いた。清水では，改良によって誤差が低減したが，過小評価となる傾向は改良前後で同様に見られた。

図 4.10 は, DR 関数の改良前後での鉄鋼と亜鉛における$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$と海岸からの距離の関係を示したものである。改良前に過小評価・過大評価のデータが多く見られた，海岸からの距離が約 3 km 以内の領域において，DR 関数改良による推定誤差の大きな低減が見られた。海岸から 3 km 以内のデータ全体に占める−50%以下の過小評価データの割合は，鉄鋼で 0%（27.5%低下），亜鉛で 0%（17.5%低下）に低下し，+100%以上の過大評価データの割合は，亜鉛で 0%（12.5%低下）に低下した（鉄鋼では改良前後ともに 0%）。なお，海岸から 10 km 以遠の領域では，改良前に亜鉛において−50%以下の過小評価のデータが見られていたが，改良後にはすべてのデータがファクター2 の範囲に収まった。以上のことから，改良 DR 関数では，海岸からの距離にともなう推定誤差の格差が解消され，沿岸域においても内陸域と同程度の推定精度が得られるよう改良がなされたと解釈できる。

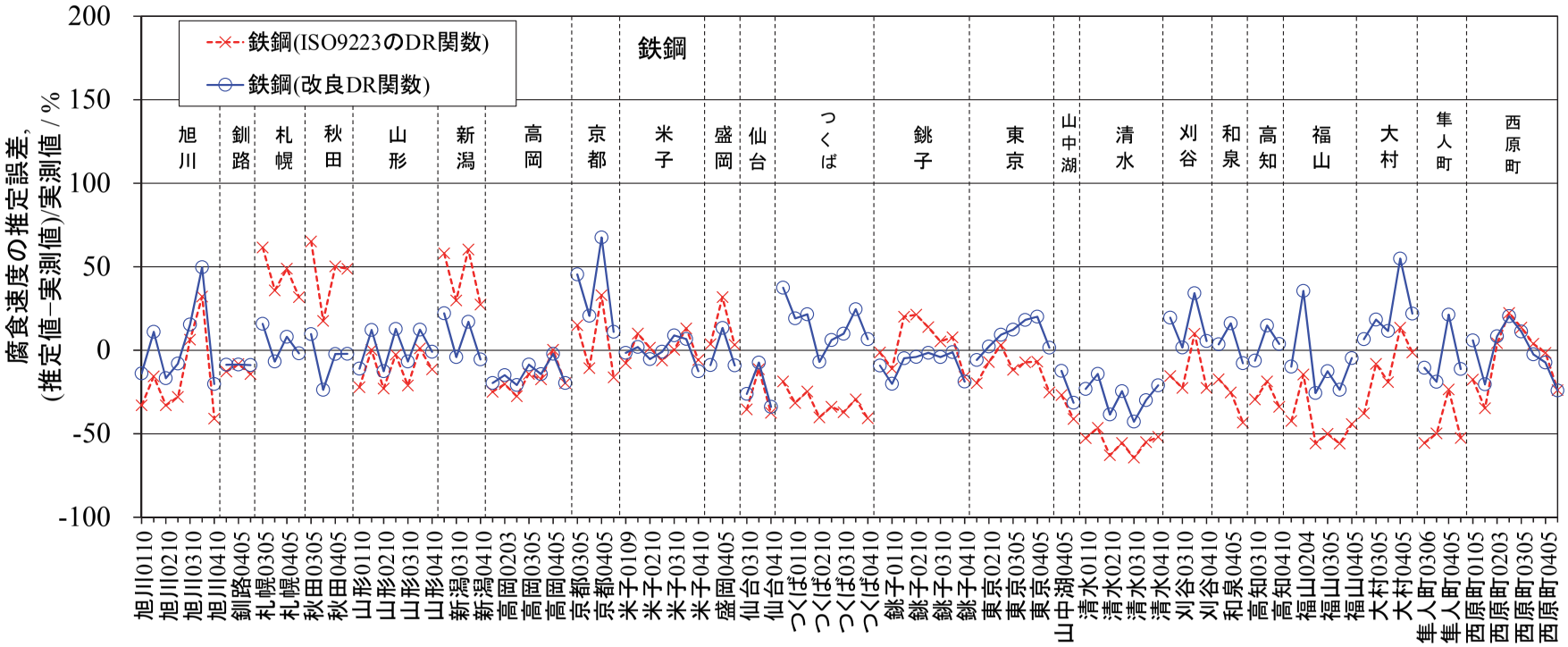


図4.9(a)　ISO 9223のDR関数と改良DR関数による鉄鋼の推定腐食速度C_{est}の実測値C_{meas}に対する誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$[18]

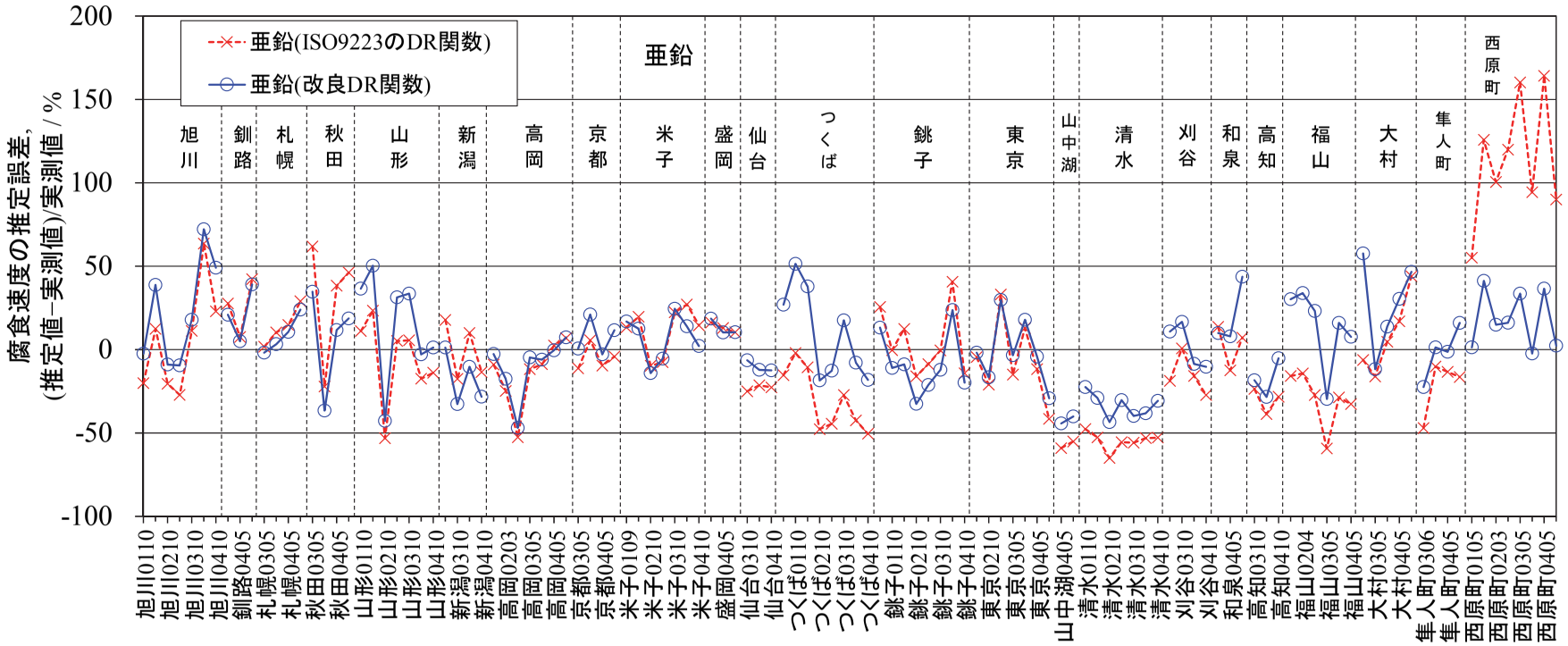


図4.9(b)　ISO 9223のDR関数と改良DR関数による亜鉛の推定腐食速度C_{est}の実測値C_{meas}に対する誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$[18]

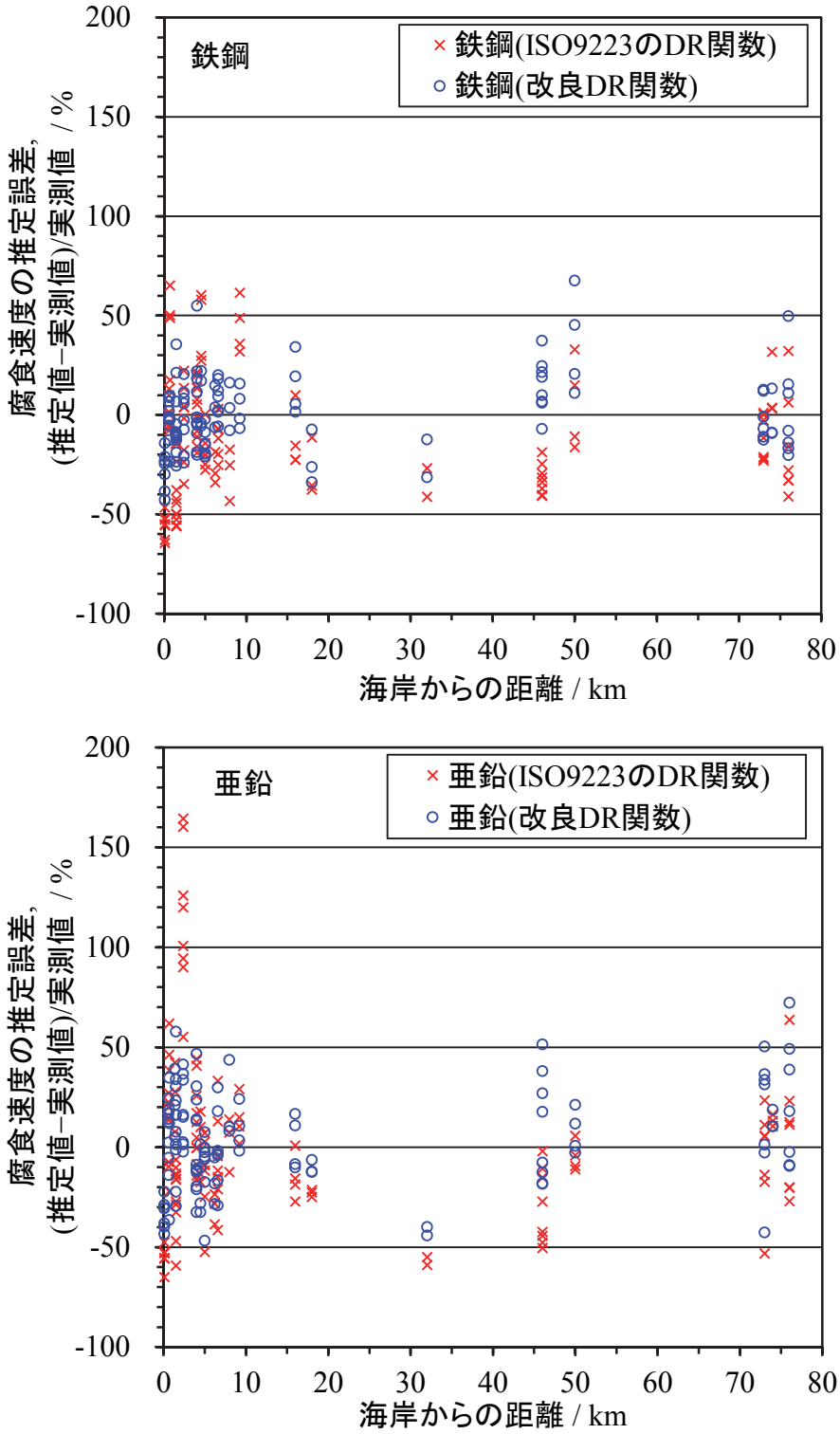


図 4.10 ISO 9223 の DR 関数と改良 DR 関数による鉄鋼や亜鉛の推定腐食速度 C_{est} の実測値 C_{meas} に対する誤差，$(C_{est}-C_{meas})/C_{meas}$ と海岸からの距離の関係[18]

4.6 まとめ

本章では，送電用鉄塔部材に用いられる亜鉛や鉄鋼を対象とした環境因子に基づく腐食速度推定手法の日本国内での整備を目的として，国内大気曝露試験データにもとづく既往DR 関数の国内適用性評価と係数決定による DR 関数の改良を行った。得られた成果のうち特に重要なものは以下のとおりである。

1. 既往研究から亜鉛や鉄鋼を対象とした DR 関数を収集した。このうち，日本国内の腐食速度海岸からの距離に対して単調に減少する空間分布を示すことから，腐食速度評価において海塩の考慮が不可欠と判断されるため，入力する環境因子に Cl^-付着量を含む ISO 9223 の DR 関数を日本国内評価向けの DR 関数として選定した。
2. 国内の大気曝露試験データに対して，ISO 9223 の DR 関数によって推定される腐食速度は実測腐食速度と十分な相関を示さなかった。ただし，推定誤差の地域傾向から，誤差自体はランダムなものではなく，試験地点に系統的に毎年働く誤差要因の影響が推察されることから，環境因子の考慮方法の改良によって DR 関数の推定精度を向上できる可能性が示唆された。
3. 国内大気曝露試験データを使用して決定した係数を ISO 9223 の DR 関数に適用することで DR 関数の改良を試みた。改良 DR 関数では，推定値と実測値の相関や，誤差が−50～+100%の範囲内に入る推定値の割合が増大し，ISO9223DR 関数よりも日本国内データへの推定精度において向上が認められた。さらに，改良 DR 関数では，海岸からの距離にともなう推定誤差の格差が解消され，沿岸域においても内陸域と同程度の推定精度が得られるよう改良がなされた。
4. このことから，送電用鉄塔の立地ごとの腐食評価への一定の適用性を有する，海塩への適切な応答性を持った DR 関数を提案することができたと考えられる。

本研究では DR 関数の適用性評価および国内データに基づく改良によって一定の成果が得られたものの，今後の課題は多い。入力変数とする環境因子の追加・変更に基づく DR 関数のモデル面からの改良は，降水による金属表面の雨洗効果などの考慮を含め，大きな課題である。さらに，本研究で対象とした曝露開始後 1 年間の短期における腐食速度だけではなく，曝露開始後数年～十数年以上の長期間における腐食速度を評価する手法も国内には未整備であることから，今後の重要な課題として挙げられる。これらの課題を踏まえ，より良い曝露試験データの収集を進め，さらに良いモデルの構築を目指し，日本国内に適用できる腐食速度推定手法を継続的に整備していく必要がある。

第 4 章参考文献

[1] 小林潔司, 「予防保全型維持管理の導入に向けて-Part1 予防保全型管理の重要性-」, 土木学会誌, Vol.95, No.12, pp.14-17 (2010).

[2] 古田均, 茅野牧夫, 渡邊英一, 「橋梁の維持管理とブリッジマネジメントシステムの現状と将来展望」, 土木学会論文集, Vol.F 63, No.3, pp.287-294 (2007).
[3] 架空送電設備の鋼材腐食・磨耗現象調査専門委員会, 「架空送電設備の鋼材腐食・磨耗現象」, 電気学会技術報告, Vol.1163, pp.4-6 (2009).
[4] 外川靖人, 「講座 1-大気腐食試験方法-」, 材料, Vol.45, No.8, pp.952-958 (1996).
[5] C. Leygraf, I. O. Wallinder, J. Tidblad and T. Graedel, Atmospheric Corrosion, 2nd edition, Electrochemical Society Series, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New York, pp.100-120 (2016).
[6] ISO9223 2012(E), “Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation”, (2012).
[7] J. Tidblad, “Atmospheric corrosion of metals in 2010-2039 and 2070-2099”, *Atmos. Environ.*, Vol.55, pp.1-6 (2012).
[8] 日本ウエザリングテストセンター, 「平成 17 年度成果報告書 開発成果標準化フォローアップ等標準化調査研究事業新発電関連要素機器の長期耐久性及び寿命予測の標準化-3. 金属委員会-」, (2006).
[9] JIS Z 2381, 「大気暴露試験方法通則」, (2001).
[10] ISO9225 2012(E), “Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres”, (2012).
[11] A.A. Mikhailov, J. Tidblad and V. Kucera, “The classification system of ISO 9223 standard and the dose-response functions assessing the corrosivity of outdoor atmospheres”, *Prot. Met.*, Vol.40, No.6, pp.541-550 (2004).
[12] V. Kucera, J. Tidblad, K. Kreislova, D. Knotkova, M. Faller, D. Reiss, R. Snethlage, T. Yates, J. Henriksen, M. Schreiner, M. Melcher, M. Ferm, R.-A. Lefèvre and J. Kobus, “UN/ECE ICP materials dose-response functions for the multi-pollutant situation”, *Water Air Soil Poll. Focus*, Vol.7, pp.249-258 (2007).
[13] D. E. Klinesmith, R. H. McCuen and P. Albrecht, “Effect of environmental conditions on corrosion rates”, *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol.19, pp.121-129 (2007).
[14] A.A. Mikhailov, P. V. Strekalov and Y. M. Panchenko, “Atmospheric corrosion in tropical and subtropical climate zones: 3. Modeling corrosion and dose-response function for structural metals”, *Prot. Met.*, Vol.43, No.7, pp.619-627 (2007).
[15] J. Tidblad, V. Kucera, A. A. Mikhailov, J. Henriksen, K. Kreislova, T. Yates, B. Stöckle and M. Schreiner, “UN ECE ICP Materials: Dose-response functions on dry and wet acid deposition effects after 8 years of exposure”, *Water Air Soil Poll.*, Vol.130, pp.1457-1462 (2001).
[16] J. Tidblad, V. Kucera and A. A. Mikhailov, “Mapping of acid deposition effects and calculation of corrosion costs on zinc in China”, *Water Air Soil Poll.*, Vol.130, pp.1469-1474 (2001).
[17] A. U. Leuenberger-Minger, B. Buchmann, M. Faller, P. Richner and M. Zöbeli, “Dose-response

functions for weathering steel, copper and zinc obtained from four-year exposure programme in Switzerland", *Corros. Sci.*, Vol.44, pp.675-687 (2002).

[18] 大原信, 小﨑明郎, 朱牟田善治, 村尾直人, 「日本国内における鉄鋼や亜鉛の大気暴露試験データに対するドーズレスポンス関数の適用性評価」, 材料と環境, Vol.67, No.10, pp.416-425 (2018).

[19] F. Karaca, "Mapping the corrosion impact of air pollution on the historical peninsula of Istanbul", *J. Cult. Herit.*, 14, pp.129-137 (2013).

[20] R. Vet, R. S. Artz, S. Carou, M. Shaw, C.-U. Ro, W. Aas A. Baker, V. C. Bowersox, F. Dentener, C. Galy-Lacaux, A. Hou, J. J. Pienaar, R. Gillett, M. C. Forti, S. Gromov, H. Hara, T. Khodzer, N. M. Mahowald, S. Nickovic, P. S. P. Rao and N. W. Reid, "A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus", *Atmos. Environ.*, 93, pp.3-100 (2014).

[21] G.R. Meira, C. Andrade, C. Alonso, I.J. Padaratz and J.C. Borba, "Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone - A tool for corrosion studies", *Corros. Sci.*, Vol.50, pp.2724-2731 (2008).

[22] M. E. R. Gustafsson and L. G. Franzén, "Inland transport of marine aerosols in southern Sweden", *Atmos. Environ.*, Vol.34, pp.313-325 (2000).

[23] D. Knotkova, K. Kreislova and S. W. Dean Jr., "ISOCORRAG International atmospheric exposure programme: Summary of results", ASTM Data Series, Vol.71 (2010).

[24] M. Morcillo, B. Chico, D. de la Fuente and J. Simancas, "Looking back on contributions in the field of atmospheric corrosion offered by the MICAT Ibero-American testing network", *Int. J. Corros.*, Vol.2012, 824365 (2012).

[25] 大泉毅, 「大気沈着-第二講 湿性沈着-」, 大気環境学会誌, 44, pp.A17-A24 (2009).

第 5 章　結論

本論文では，近年，日本国内で高経年化・自然災害への脆弱性という二つの観点から社会インフラの健全性を維持する必要性が高まっている背景を受け，重要な社会インフラの一つである送電設備に焦点をあて，健全性に重要な影響を与える海塩粒子について，突発的影響として送電用がいしの塩雪害，経年的影響として送電用鉄塔の大気腐食に着目し，現象解明・発生可能性指標提案および推定手法提案を行った。

送電用がいしの塩雪害については，事例が乏しく観測データの蓄積から着手する必要があることや，海塩粒子の内陸への輸送メカニズムの解明および塩雪害発生可能性指標の提案が課題であることから，現地観測にもとづいて海塩粒子の内陸への輸送メカニズムの解明を図り，さらに，塩雪害発生可能性の指標を提案した。

また，送電用鉄塔の大気腐食については，環境因子から金属材料の大気腐食速度を推定する手法が国内に未整備であることによって効率的な維持管理を難しくしているという課題があることから，日本国内の送電用鉄塔の立地ごとの腐食評価への適用性を有する，海塩への適切な応答性を持った DR 関数の提案を図った。

本研究の成果について，章ごとに以下にまとめる。

1 章では，本研究の背景として，社会インフラの健全性を取り巻く状況について，高経年化および自然災害への脆弱性の観点から，社会インフラ損傷の実態，維持管理の動向・実践，課題を具体的な事例を通じて概観した。また，本研究で取り扱う送電設備や海塩粒子について，位置づけと重要性を示した。さらに，送電設備の健全性に対する海塩粒子の影響として，突発的影響として塩雪害，経年的影響として大気腐食に着目し，現象解明や対策の状況および課題について述べた。特に，塩雪害については，事例が乏しく観測データの蓄積から着手する必要があることや，海塩粒子の内陸への輸送メカニズムの解明および塩雪害発生可能性指標の提案が課題であり，送電用鉄塔の大気腐食については，環境因子から金属材料の大気腐食速度を推定する手法が国内に未整備であることによって効率的な維持管理を難しくしているという課題があることを強調した。

2 章では，事例が乏しく観測データの蓄積が必要である送電用がいしの塩雪害について，時間的空間的に詳細な大気中粒子・降水の現地観測にもとづいて塩雪害を引き起こすような暴風雪イベントにおける海塩粒子流入の時空間的に詳細な動態を検討した。まず，背景として，海塩粒子の内陸への輸送メカニズムを検討する上で，海塩粒子が輸送され構造物に付着する過程は，湿性沈着と乾性沈着の二つに区分されることや，降雨・降雪の導電率に海塩成分がどの程度寄与するかが明確ではないこと，海塩成分の評価がナトリウムイオン（Na^{+}）にもとづいて行われることなどを整理した。さらに，海塩の湿性沈着・乾性沈着の動態を，数時間程度の時間分解能で評価した既往研究や観測モニタリングが無いことを示した。次に，そのような背景を受けて新潟県下越地域に構築した降水・大気中粒子状物質に関わる現地観測システムについて示し，得られた成果について順に述べた。まず，新

潟県下越地域において 200 μS/cm 以上の高い導電率を示す降雪は，沿岸～内陸に共通して，海から風速 5 m/s 程度を超える風が吹く条件下で発生し，これら降雪の導電率への寄与においては，海塩成分が支配的であることを示した。この背景として，風向や風速に対する降水や粒子状物質中の海塩成分・非海塩成分濃度の応答性の相違があることを示した。さらに，顕著に高い導電率を示す降雪が出現する風向は，沿岸域よりも内陸域で狭まる傾向が認められ，このような顕著に高い導電率の降雪が出現する地域の境界は，海岸からの距離が 50～150 km の範囲のいずれかに設定することが妥当と推察された。また，高い導電率と多量の降雪量が重畳する降雪は，10 m/s を超える西風の期間にほぼ含まれていたことから，これらの期間で特徴的な JPCZ や二つ玉低気圧などの気象擾乱をともなう気象条件が関連していることが示唆された。高い導電率と多量の降雪量が重畳する降雪が見られた期間には，Na^+の湿性沈着量が，Na^+の乾性沈着量に比べて著しく大きい極大値を示していた。この傾向は，沿岸地点に比べて，内陸の地点で顕著に認められた。これらのことから，新潟県下越地域に見られる暴風雪イベントでは，沿岸から内陸へ海塩粒子が多量にもたらされる沈着過程として，乾性沈着よりも湿性沈着の寄与が重要であることが示された。

3 章では，2005 年の新潟下越雪害発生時の気象状況や現地観測で得られた知見にもとづき，圧密着雪をともなう塩雪害の発生可能性を表す指標について検討した。これまで，設備への着雪量を表す指標として活用できることが示されてきた着雪ポテンシャルを海風方向に限定し，新たに海風着雪ポテンシャルを提案した。海風着雪ポテンシャルは，2005 年新潟下越雪害に停電事故発生地点近傍の気象庁アメダスにおける過去 37 年間データをもとにした計算結果において，新潟下越雪害時の値が評価期間の最大値を示したことから，新潟下越雪害と同様の圧密着雪をともなう塩雪害の発生可能性をあらわす指標として有効であると考えられる。

4 章では，送電用鉄塔部材に用いられる亜鉛や鉄鋼を対象として，日本国内に適用可能な腐食速度推定手法を整備するために，国内大気曝露試験データにもとづくドーズレスポンス関数（DR 関数）の改良を行った。まず，背景として，金属の大気腐食速度を推定する手法の一つとして DR 関数が提案されていることや，日本国内では規格への整備も含めて整備がなされていないことを示した。次に，既往研究から亜鉛や鉄鋼を対象とした DR 関数を収集し，このうち，日本国内では腐食速度評価において海塩の考慮が不可欠と判断されることから，入力する環境因子に Cl^-付着量を含む ISO 9223 の DR 関数を日本国内評価向けの DR 関数として選定した。この DR 関数が国内大気曝露試験データに対して十分な推定精度を示さなかったことから，この DR 関数に国内大気曝露試験データにもとづいて決定した係数を適用することで DR 関数の改良を試みた。改良した DR 関数では，鉄鋼，亜鉛ともに，日本国内データへの推定精度において向上が認められるとともに，海岸からの距離にともなう推定誤差の格差が解消され，沿岸域においても内陸域と同程度の推定精度が得られるようになった。このことから，送電用鉄塔の立地ごとの腐食評価への一定の適用性を有する，海塩への適切な応答性を持った DR 関数を提案することができたと考えられる。

以下には，本研究の成果により社会インフラの健全性維持に対してもたらされること，さらなる課題，示唆などについて述べる。

本研究で提案された塩雪害の発生可能性の指標をもとに，塩雪害の事故が発生した場合にも適切な事後解析が可能となり，さらに，指標をもとに地域ごとに設備の適正化につながることが期待される。また，今後の継続的な手法整備は必要であるものの，日本国内の腐食評価への適用性を有する DR 関数によって，図 4.1 に示したようなフローによって，環境因子マップから腐食マップを作成し，劣化の程度を相対化することで，設備の改修・更新における優先順位の判断材料とすることができる。この手法は，鉄鋼・亜鉛を用いる設備であれば，送電用鉄塔以外の社会インフラにも適用可能であり，広範囲への活用が期待される。また，4 章の検討内容は，日本国外においても，ISO 9223 の DR 関数による十分な推定精度が得られない国において，その国の腐食評価に適用性を有する DR 関数へと改良させる方法論としても活用できると考えられる。

このような技術の実用化の一つの有効な形としてマップが挙げられる。塩雪害ハザードマップといった使用法を実現するには，新潟県でのデータ・知見にもとづいて提案された指標が，全国に適用性を有するのか確認を行う必要があり，今後の課題である。また，推定腐食マップについては，腐食実態や曝露試験データとの比較・検証も必要となる。

本研究で取り扱った社会インフラの健全性に対する海塩粒子の影響に関する二つの事象，送電用がいしの塩雪害および送電用鉄塔の大気腐食においては，両事象とも，本来，大気中のさまざまなガス・粒子状物質が関与する事象である。それらの物質の寄与は，降雪の導電率や金属の腐食速度といった束一的な量に集約される。第 1 章において，社会インフラの健全性において海塩粒子が重要な影響を有する環境因子であることを述べたが，本研究の成果を振り返ると，両事象において日本国内において海塩の支配的な影響が示され，あらためて，その影響を考慮することがいかに重要であるかということが示された。

最後に，今後の社会インフラの健全性維持の維持管理に関して展望する。

今後，日本国内では，人口減少も背景として，費用・労力の面から，効率的な設備の維持管理がいっそう求められていくであろう。一方で，国外に目を向けると，新興国への社会インフラの輸出機会は増加する可能性があり，社会インフラの健全性を維持管理する手法を国際的に整合性を持った形で整備していくことも重要である。

また，昨今の自然災害被害の発生頻度が高くなっていることを踏まえると，保田ら[1]が指摘するように，インフラ設備の管理者にとっては，高経年化対応の観点で策定した長期の修繕計画が，突発的な自然災害による中断や見直しなどの影響を受ける可能性があることを意識すべきであろう。そのような可能性に対処するためには，たとえば，高経年化にともなう設備修繕の優先順位付けにおいて，突発的な自然災害のリスクを重ね合わせることで，より実行可能性が高い修繕計画を策定するなどが考えられる。高経年化と自然災害への脆弱性への対応が一体化して考慮できるような維持管理手法・技術の開発も今後は重要となるであろう。

以上のように，社会インフラを取り巻く状況は常に変化していくことから，その健全性を維持管理する取り組みには終わりがないように思われる。一方で，対処は早ければ早い方が費用・労力面からも望ましいことから，社会インフラの維持管理に携わる技術者・研究者は，次世代～数世代先にもわたる広い視野を持つことを意識し，顕在化していない問題に対しても目を向けるよう努めるなどし，インフラ維持管理の手法自体も継続的に見直し・整備していく必要がある。

第 5 章参考文献

[1] 保田敬一, 白木渡, 井面仁志, 「レジリエンスと脆弱性による長寿命化修繕計画の継続的運用面での評価の試み」, 土木学会論文集 F6（安全問題）, Vol. 73, No. 2, I_127-I_138 (2017).

謝　辞

本研究を行うにあたり，懇篤なご指導，ご鞭撻を頂いた北海道大学 村尾直人 准教授に心より感謝いたします。

また，審査委員として査読いただき，貴重なご助言をいただいた北海道大学 松藤敏彦 教授，松井利仁 教授，渡部靖憲 准教授に厚く御礼申し上げます。

現地観測，大気曝露試験に関し，多大なご協力およびご支援を頂いた，東北電力株式会社，東京電力パワーグリッド株式会社の担当者各位，大気腐食速度推定手法の検証用データに関し，国内大気曝露試験データの使用を快諾頂いた，一般財団法人日本ウエザリングテストセンターの担当者各位に深く感謝いたします。

また，研究推進における種々のご助言・ご協力を頂きました，「送電設備の雪害に関する研究委員会」および「送電設備の雪害研究に関する専門家委員会」の学識者・電力各社の委員各位，「経年鉄塔健全性評価技術作業会」の電力各社委員各位，「ISO/TC156 対策委員会 nWG4」の学識者委員各位，雪害研究・経年鉄塔研究等で意見交換をさせて頂いた電力各社の本店・支店・支社・技術センター・研究センターの担当者各位，東京農工大学 原宏 名誉教授，元一般財団法人日本ウエザリングテストセンターの高根由充氏・石毛篤氏，クリマテック株式会社の担当者各位，株式会社巴コーポレーションの黒田清次氏，株式会社コベルコ科研の鳥井康司氏・橋本郁郎氏，JFE 鋼板株式会社の木村賢一氏，株式会社ユアテック新潟支社工務部の担当者各位，東北緑化環境保全株式会社の担当者各位，東京ダイレック株式会社の内山裕哉氏・立身兼一氏，株式会社小松製作所の担当者各位，株式会社電力テクノシステムズの担当者各位，株式会社セレスの担当者各位，一般財団法人電力中央研究所の雪害研究メンバー各位，経年鉄塔研究メンバー各位，藤田慎一 名誉研究アドバイザー，佐田幸一 首席研究員，吉田義勝 環境科学研究所長，高橋章 研究参事，下田昭郎 副研究参事，大気・海洋環境領域メンバー各位に心より感謝の意を表します。

最後に，長きにわたり遠くから見守り，励ましをくれた家族に感謝します。