

酸性雨自動測定に基づく事例解析 (3)

The Case Study based on the Acid Rain Monitoring (3)

仁平 明 高橋 誠幸 中村 栄一
木戸 一博

Akira NIDAIRA, Seiko TAKAHASHI, Eiichi NAKAMURA
Kazuhiro KIDO

既報に引き続き酸性雨自動測定結果について事例解析を行った。やませが吹いたときなどの霧雨は ECp, rH がともに大きく酸性物質による汚染が顕著で、低雲効果が働いていると考えられた。一方、日本海側地域で pH が低下する冬型の気圧配置に関しては、当地域が風下に位置するにもかかわらず降水の rH が小さく pH は低下しない。このとき硫酸塩エアロゾル化学天気図によれば北日本では大陸からの硫酸塩エアロゾル輸送は認められず、太平洋側やませとの気象的共通性から類推して、日本海側地域における pH 低下の原因は低雲効果による地域汚染であるとの仮説が考えられた。また、海塩粒子の影響形態としては、既報告の海上から搬送され大気中に浮遊する海塩粒子が雨水に捕捉されて降雨強度が弱まったときに高濃度化するほかに、寒冷前線通過の際の降雨強度が大きいときにも海塩粒子の影響を受ける場合があることを確認した。

キーワード：汚染導電率；水素イオン比；やませ；冬型気圧配置；海塩粒子

Key words : electric conductivity by pollutants ; relative hydrogen ; YAMASE ; wintry atmospheric pressure distribution ; sea salt particle

1 はじめに

0.5mm 降水毎に pH, EC を連続測定する pH 型酸性雨自動測定機は、信頼性に課題が残るものの時間分解能の高い測定が可能であるため、酸性雨の動的状態を把握する上で有用である。測定結果の評価に関しては、汚染及び酸性化の観点から降水事象を解釈するための指標として、汚染導電率 ECp と水素イオン比 rH を考案^{1) 2)}した。ECp は汚染度、rH は中和度の指標であり、ともに pH, EC から算出できる。更に、これらの指標を用いて大気常時監視データ等と関連付けた事例解析を行ってきたところである^{3) 4)}。ここでは引き続き事例解析を行うとともに、事例解析によって得た知見をもとに、当地域で ECp, rH がともに大きく酸性物質による汚染が顕著なやませ等のとき、日本海側地域における冬型の気圧配置のときの pH 低下に関する気象の共通性について考察する。また、海塩粒子の影響に関する2つの形態を述べる。

2 方法

2.1 解析対象データ等

平成19年度酸性雨自動測定結果を対象とした。なお、大気常時監視及び気象の参照データ、並びに酸性雨自動測定地点は既報³⁾と同じである。加えて国環研がホームページで公開している硫酸塩エアロゾル化学天気図 (<http://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/index-j.html>) を参考にした。

2.2 ECp と rH

降水の性状に関して、その汚染度及び中和度を推定評価するための指標 ECp と rH については既報^{1)~3)}に記載したとおりである。

3 結果および考察

3.1 温暖前線前面の低雲による低 pH 出現

2007年7月2日に梅雨前線上の低気圧が近畿地方から関東南岸へ進んだときの降水で、1.0mm 目に pH3.96 を記録した。そのときの状況として図1に9時の地上天気図を、図2及び図3には保健環境センター局（以下「センター局」という。）における pH-EC 図及び pH, EC 等の経時変化を示す。pH 最小値が現れた降水初期は降雨強度の小さい霧雨であった。このときセンター局に近い鶴谷大気常時測定局（以下「鶴谷局」という。）では NO₂ が8時前の降り始めと同時に増加し、更に降雨強度が強まった15時から再び増加していた。SPM も降り始めは NO₂ と同様に増加し降雨強度の小さい期間は相対的に高い濃度を維持していたが、降雨強度が強まると減少に転じ NO₂ とは異なっていた。rH は図2、図3のとおり降り始めから次第に増大しており中和が働いていた。しかし、中和が最も大きかった降り始めの0.5mm 目でも rH は0.1であり著しくはなかった。このため ECp が最大となった1.0mm 目に最小 pH が現れたものである。

図4の気象衛星画像によれば、当時は温暖前線前面の三陸から関東沿岸にかけて低い雲が形成されており、前報⁴⁾のやませのときと同じような状態であった。センター局における2007年7~9月の酸性雨自動測定結果について、1降雨毎の最小 pH を仙台上空の降水期間中最大硫酸塩エアロゾル濃度と対比すると図5のようになる。なお、硫酸塩エアロゾル濃度は3時間毎の化学天気図から目的の地点を挟む等値線の間値を読み取り、最小等値線 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の外側は 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ とした。

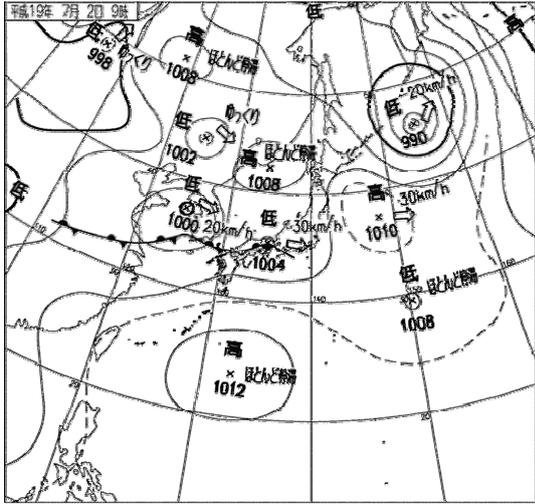


図1 地上天気図 (2007年7月2日9時) 気象庁HPから引用

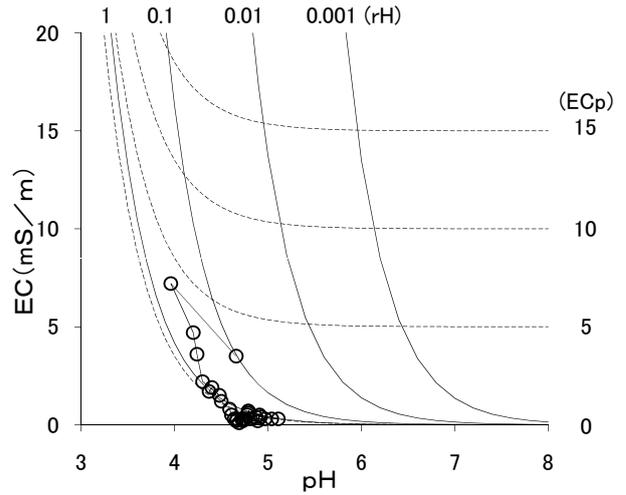


図2 pH-EC図 (センター局, 2007年7月2~3日)

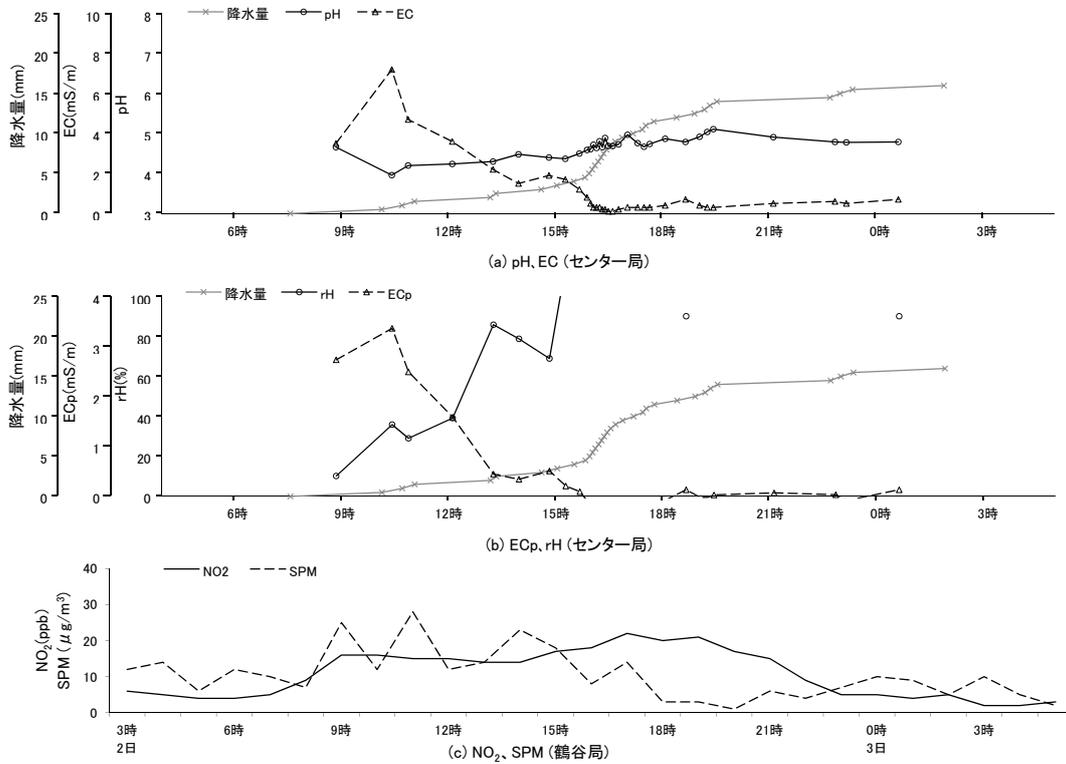
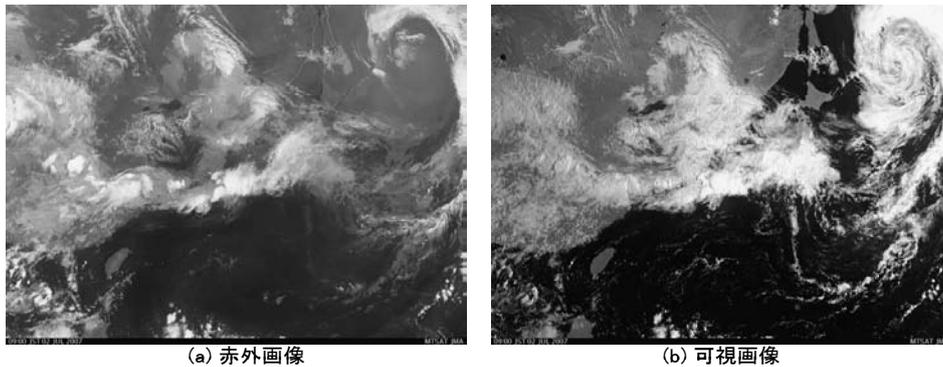


図3 経時変化図 (2007年7月2~3日)



(a) 赤外画像 (b) 可視画像
図4 気象衛星画像 (2007年7月2日9時) 気象庁HPから引用

図5では●印のやませによる降水は○印の他の降水に比べ酸性化がより進んでいる。やませはオホーツク海高気圧から大気の下層に流れ込んだ冷たく湿った風であり、東北地方の太平洋沿岸海上に奥羽山脈を越えられない低い雲ができる。▲印の降水は本事例のように温暖前線前面に雲頂高度の低い雲ができたときで、やませ同様に酸性化が進んでいる。低い高度に雲ができる場合は、地域から排出された汚染物質が拡散の進む前の比較的濃度の高い状態で雲水に影響し、酸性化を促進させることが推測される。これを「低雲効果」と呼ぶことにする。

なお、鶴谷局のNO₂が降り始めと同時に増加していたことは、雲底下の大気が安定な状態で汚染物質の濃度が高まり、SO₂や大気汚染性のエアロゾルは雲粒に取り込まれて雨水の酸性化に寄与したのに対し、NO₂は雨水に取り込まれず大気中に残存した⁵⁾もので、低雲効果の一つの証と考えることができる。

3.2 冬型の気圧配置による降水と日本海側地域のpH低下に関する考察

日本海側でpHが低下する西高東低の気圧配置⁶⁾のとき、日本海側で発生した雪雲が風下の当地域に流入しているにもかかわらず、降水のrHは小さくpHは低下しないことを既に報告⁴⁾した。平成19年度も2007年11月21～22日と2008年2月23～24日に冬型の気圧配置によるみぞれ又は降雪があったが、先行事例と同様rHは小さくpHは高かった。

ところで、典型的な冬型の気圧配置による天気は、図6に示したようにシベリアからの寒気の吹き出しによって日本海上に奥羽山脈を越えられない低い雪雲が形成され、日本海側は雪、太平洋側は晴である。図6の場合に注目したいのは、化学天気図において北日本のNW季節風が卓越する領域では硫酸塩エアロゾル濃度が最小等値線未満ということである。このことを長期的に確認するために、2008年1月について海岸部の新潟地方気象台及び内陸の山形地方気象台における時間降水量と、3時間毎の硫酸塩エアロゾル化学天気図から読み取ったそれぞれの気象台上空の硫酸塩エアロゾル濃度の時系列を図7に示した。エアロゾル濃度の読み取り方は前項と同じである。図7で西高東低欄の灰色の帯は冬型の気圧配置のときで、硫酸塩エアロゾル濃度はほとんどが最小等値線未満である。5～12日のように大陸起源と思われる硫酸塩エアロゾルの濃度が増加したときの降水もあるが、冬型の気圧配置に関しては硫酸塩エアロゾル濃度が低いのが一般的のようであり、大陸の影響というpH低下の根拠は成立していない。

大塚⁷⁾は宮城県側の山形県境で1日単位のサンプリングを行い、奥羽山脈鞍部の宮城県内陸では冬型の気圧配置のときに日本海側から雪雲が流入するため降雪中のイオン成分は日本海側と類似し、SO₄²⁻濃度が高くpHは低いことを示している。図7の事実を踏まえれば、一般的にいわれているようなSO₄²⁻の起源を大陸に求めるこ

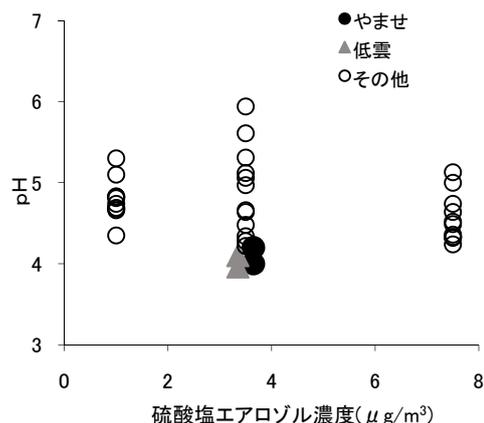


図5 1降水当たりの最小pHと化学天気図による硫酸塩エアロゾル最大濃度との関係(センター局, 2007年7～9月) 総降水量0.5mmのやませ, 低雲を除く

とは困難である。このことを説明するには新しい考え方が必要となる。

先に述べたように、太平洋側地域ではやませのときなどに奥羽山脈を越えられない低い雲ができ、低雲効果によって低pH高ECが出現するとの推論を行った。日本海側の冬期には図6のように、冬型の気圧配置のときに日本海上に奥羽山脈を越えられない低い雪雲が形成され、このときにpHが低下している。この意味において太平洋側のやませと気象的条件が共通しており、仮説として日本海側では冬型の気圧配置のときに低雲効果が働いて地域汚染によりpHが低下し、奥羽山脈鞍部から宮城県内陸に流入する下層の雪雲は低雲効果が働いたものであるため日本海側と類似の性状を示すが、奥羽山脈を越えて太平洋沿岸に流入する雪雲にまでは低雲効果が及ばずpHは低下しないことが考えられた。

3.3 海塩粒子の影響事例

図8に2008年3月14日21時の地上天気図を示した。日本海中部を北東に進む低気圧からのびる前線が東北地方を通過したときで、センター局では14日11時半頃から24時前の間に6.5mmの降水があった。図9のpH-EC図において、この雨でECpが増加した時のpHはほぼ一定であり、海塩粒子が影響していたとみられる。

図10はセンター局におけるpH、EC及び風の経時変化である。本降水では終始pHが高かったためECpはECと同じとみなしてよい。ECは降り始めの3.0mmは小さかったが、降雨強度が大きくなった21時過ぎに急激に増大し、その後減少しながら降水は終わっている。なお、このときは降水中のEC急増に伴うSPMの増加はみられなかった。

センター局の風は、EC急増前はS寄り、降水終了後はNW寄りに転じており、降水終期の降雨強度が大きくなったときに風向きが変わっていた。図11の風分布によれば、降雨強度が大きくECが増加した期間の22時は破線で示した線状の地域でSSWの風が吹き、その

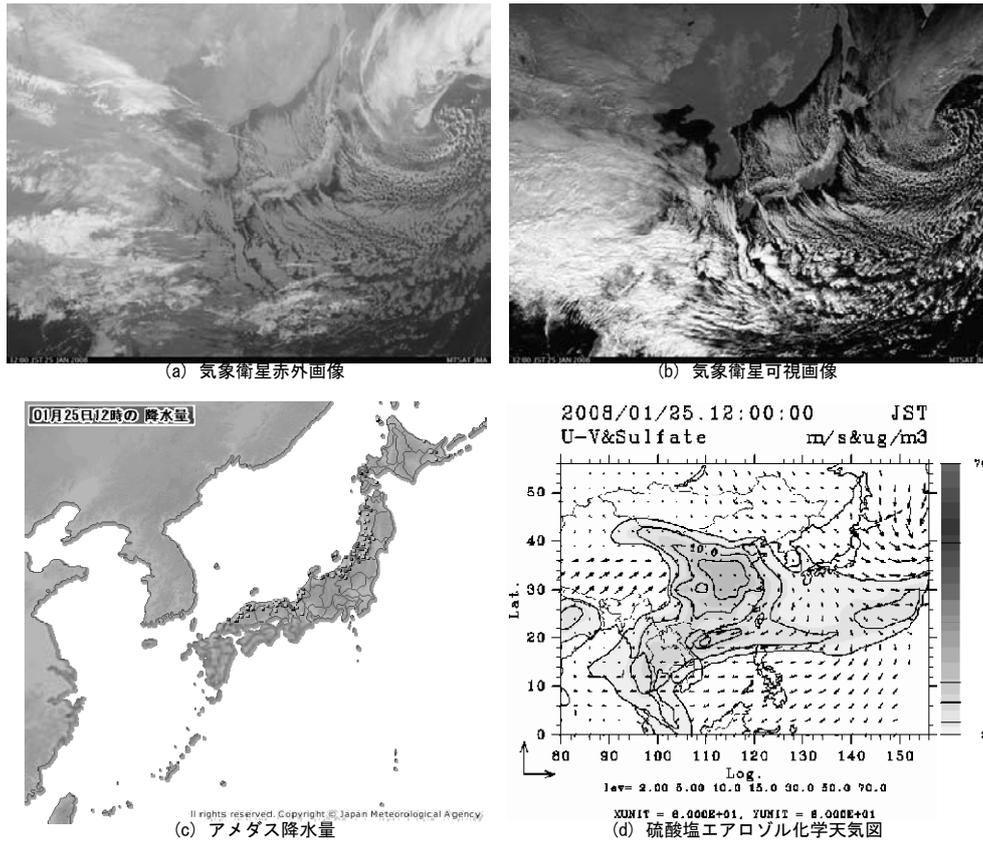
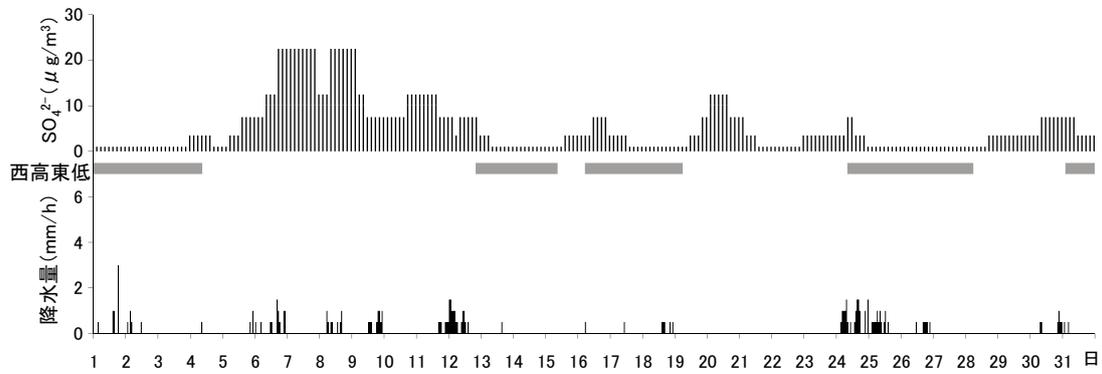
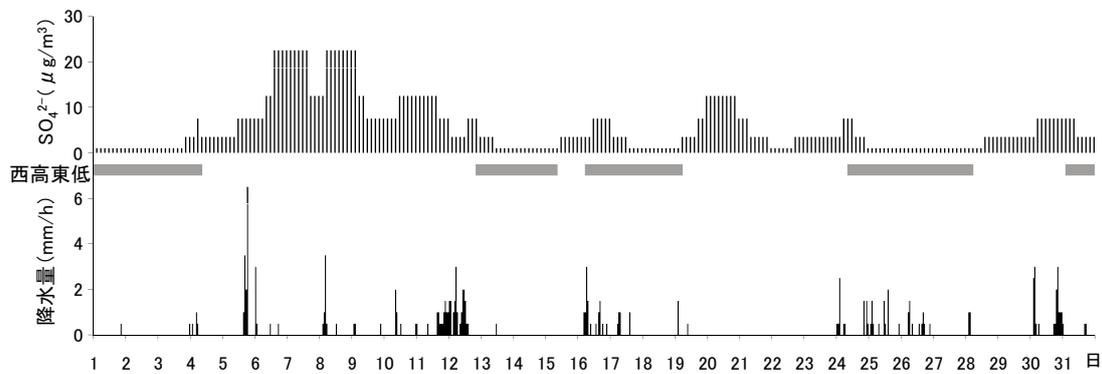


図6 冬型気圧配置における気象状況(2008年1月25日12時) 気象庁HP及び国環研HPから引用



(a) 山形地方気象台



(b) 新潟地方気象台

図7 冬型気圧配置と降水量, SO_4^{2-} エアロゾル濃度の関係(2008年1月)

西側はNW風、東側はSE風となっている。破線が寒冷前線で東西から風が吹き込むため、時系列的には寒冷前線の東進により風向きが変わったのである。

これまで報告した海塩粒子影響事例は海上から搬送された海塩粒子が雨水に捕捉され、降雨強度が弱まったときに雨水中で高濃度化してEC_pが増大するとともに、大気中においてもSPMとして検出される形態であった³⁾。本事例の場合は寒冷前線通過時の降雨強度が大きくなったときに降水中のECは急増したが、大気中のSPMは増加していない。活発な前線活動により南方海上で雲粒に取り込まれた海塩粒子が寒冷前線面をSSW風によって当地域に輸送されたもので、そのために大気中SPM濃度の増加は伴わなかったと解釈される。海塩粒子の影響はウォッシュアウトとレインアウトの異なる2つの形態で起きている。

4 まとめ

既報に引き続き、pH型酸性雨自動測定結果について汚染度及び中和度の指標であるEC_p及びrHを導入して事例解析を行ったところ、次の結果を得た。

- (1) 当地域では、やませが吹いたときや温暖前線の前面で低い雲が形成されたときは、EC_p、rHがともに大きく酸性物質による汚染が顕著な霧雨が降る。その原因として、低い高度に雲ができる場合は、地域から排出された汚染物質が拡散の進む前の比較的濃度の高い状態で雲水に影響し、酸性化を促進させることが推測された。これを「低雲効果」と呼ぶことにする。
- (2) 日本海側地域でpHが低下する冬型の気圧配置のとき、奥羽山脈鞍部の宮城県内陸では日本海側から雪雲が流入するため降雪中のイオン成分は日本海側と類似し、pHは低下するが、同じ風下でも太平洋沿岸地域では日本海側で発生した雪雲が流れ込んでいるにもか

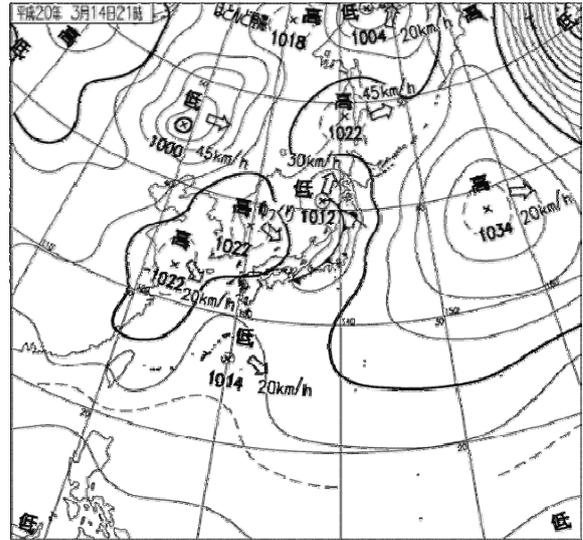


図8 地上天気図(2008年3月14日21時) 気象庁HPから引用

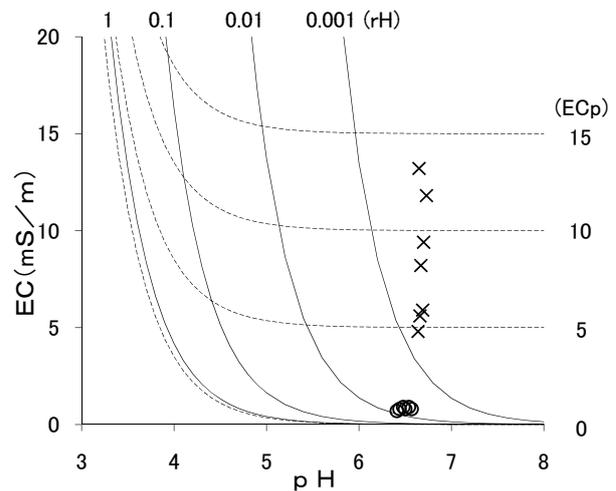


図9 pH-EC図(2008年3月14日)

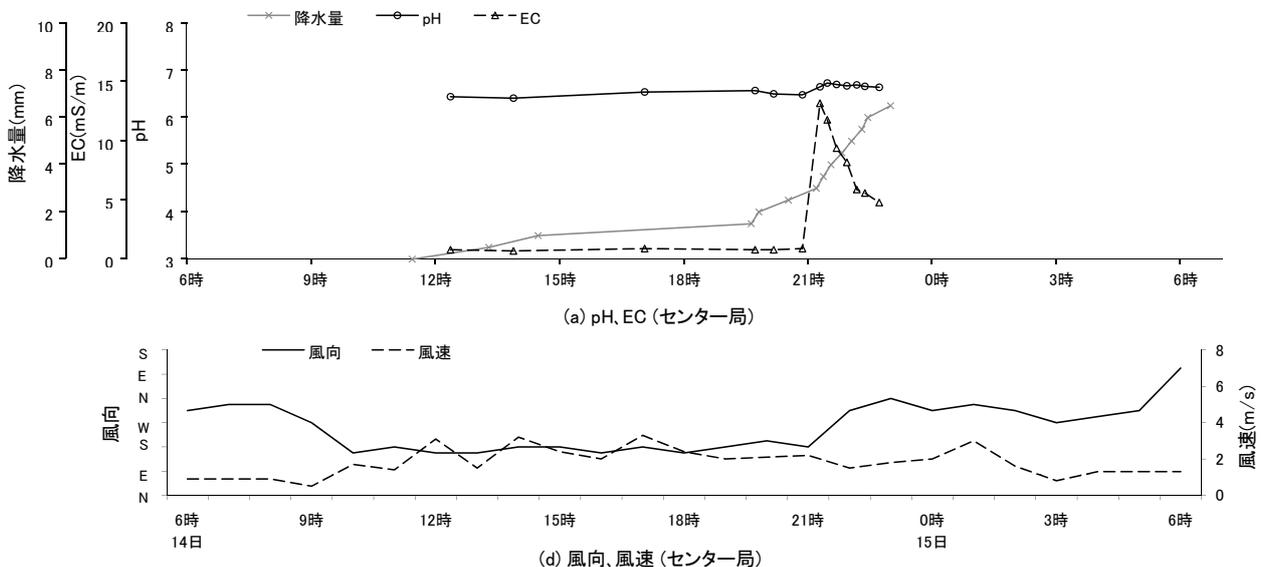


図10 経時変化図(2008年3月14~15日)

かわらず，降水の rH は小さく pH は低下しない。硫酸塩エアロゾル化学天気図によれば，大陸起源と思われる硫酸塩エアロゾルの濃度が増加した期間中の降水もあるが，日本海側で pH が低下する冬型の気圧配置のときは大陸からの硫酸塩エアロゾル輸送は認められず，大陸の影響という pH 低下の根拠は成立していない。太平洋側やませとの気象的共通性から類推して，pH 低下の原因は低雲効果による地域汚染であるとの仮説が考えられた。

- (3) 海塩粒子の影響形態としては，海上から搬送された海塩粒子が雨水に捕捉され降雨強度が弱まったときに高濃度化して EC_p が増大し，大気中においても SPM として検出されることが多いことを既に報告している。もう一つの形態として，寒冷前線通過時の降雨強度が大きくなったときに降水中の EC_p が急増する事例を確認した。この場合は大気中 SPM 濃度の増加は伴っていなかった。活発な前線活動により南方海上で雲粒に取り込まれた海塩粒子が寒冷前線面を SSW 風によって当地域に輸送され，降水として降下したものと考えられた。海塩粒子の影響はレインアウトとウォッシュアウトの異なる2つの形態で起きている。

参考文献

- 1) 百川和子，小島秀行，仁平明，氏家愛子，斉藤達夫：宮城県保健環境センター年報，9，81（1991）
- 2) 仁平明，榎野光永，中村栄一，佐久間隆，木戸一博，須藤構造：宮城県保健環境センター年報，16，68（1998）
- 3) 仁平明，高橋正人，中村栄一，北村洋子，加賀谷秀樹：宮城県保健環境センター年報，24，84（2006）
- 4) 仁平明，木立博，高橋誠幸，加賀谷秀樹：宮城県保健環境センター年報，25，72（2007）
- 5) 鶴田治雄，草野一，加藤善徳，大田正雄，平野耕一郎：酸性雨に関する調査研究報告書（横浜市環境科学研究所），1993，119
- 6) 全国環境研協議会：全国環境研会誌，32，3，78（2007）
- 7) 大塚由香里：東北大学大学院環境科学研究科修士論文（2007）

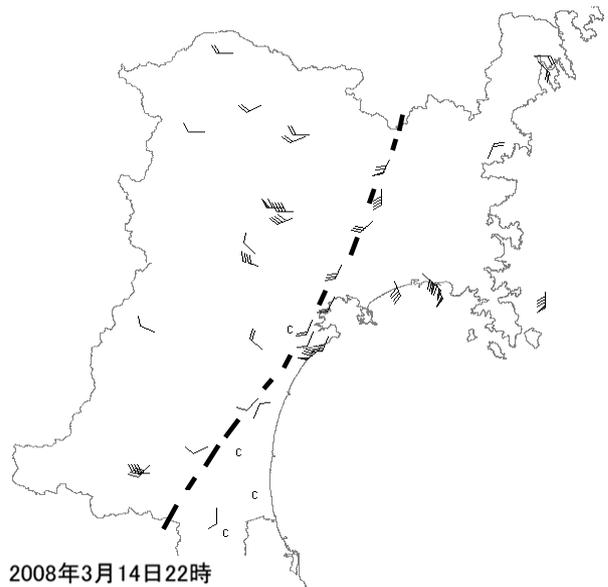


図 11 風分布