

筒形装置による飛来塩分量測定法の開発と初期測定結果

植村綾一郎^{*1}・池田圭吾^{*1}・小橋みなみ^{*1}・上田真也^{*2}・横山有太^{*3}・高田 拓^{*4}

Development of measurement method of airborne salts by cylindrical device and its initial measurement results

Ryoichiro UEMURA^{*1}, Keigo IKEDA^{*1}, Minami KOBASHI^{*1},
Shinya UETA^{*2}, Yuta YOKOYAMA^{*3}, and Taku TAKADA^{*4}

Summary

In this study, we developed an inexpensive and simple method to measure, in a shorter time than previous methods, the airborne salts dispersed from sea water. By using a cylindrical device, with an attached gauze of larger surface area, salinity is absorbed in the gauze. The cylinder with gauze is then immersed in water, and electric conductivity is measured to estimate salt content. We were able to detect a reasonable amount of salt by conducting short-term measurements of about two days at two locations within 2 km of the coast. It is suggested, from the continuous measurement in this system, that the amount of airborne salts varies in the short term. The relationship to weather conditions can be examined in the future.

序 論

日本は、多くの島から構成されており、海と接する地域が多い。沿岸に近い地域では、塩分を含んだ波しぶきが風によって内陸部へ運ばれることがあり、植物や農作物、建築物、構造物などに様々な被害が生じる。例を挙げると、塩害が起きた植物の葉は、縮れて変色し、すぐに枯れる。東北や北海道の一部を除いて、日本海や太平洋に面する多くの地域で、海水塩に由来する塩害は海岸から約2 kmまでの地域で発生している¹⁾。

一方、台風に伴う強風の場合には、海岸から遠く離れた内陸部まで被害が及ぶ場合がある。平成3年の台風19号による強風の場合、広島県などでは、瀬戸内海沿岸部から内陸40kmにかけて電線に海水塩が付着した。その後の降水が少なく、雨水で十分に海水塩が洗い流されなかったため、絶縁部に付着した海水塩が雨や湿気により塩水となり通電時に短絡し、長時間に及ぶ停電を引き起こした。また、愛媛県では大量の温州ミカンの木が枯死するなど、離島部を中心に広域で塩害が発生した。

飛来塩分量を測定する方法は、主に土研式タンク法（土研法）とJIS規格のドライガーゼ法（ガーゼ法）があるが、比較研究によるとガーゼ法の方が飛来塩分量の捕捉効率が良いとされている²⁾。

*1 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 3年生
*2 高知工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術専門職員
*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 講師
*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授
(E-mail: takada@ee.kochi-ct.ac.jp)

ガーゼ法では、10cm×10cm（面積100 cm²）のガーゼを枠で挟み、雨水が直接かからないように上方が屋根で覆われた簡易架台の中に設置する。通常、1か月間暴露させて飛来塩分を補足した後、チオシアン酸水銀（II）を用いた吸光光度法、またはイオンクロマトグラフィー法で定量する。

飛来塩分量は、日平均飛来塩分量 [mdd] で示されるのが一般的で、日平均飛来塩分量 [mdd] = 塩分量 [mg] / (捕集面積 [dm²] × 計測期間 [day]) の式で算出される。ここで、dm²は立方デシメートルである。建築・土木分野では、飛来塩分量が0.05mdd以上の地域は、塩害のリスクが大きいと考えられ、例えば、高い耐食性を持つ対候性鋼にも塗装が必要という指針が定められている。建設現場などの環境評価のためには、飛来塩分量の精度の高い計測や予測が必要である。一般に、飛来塩分量は風速や風向と関係があり、空気密度に比例し風速の3乗に比例する風力エネルギー係数を用いた飛来塩分量の予測などが研究されている³⁾。これまで1か月毎の飛来塩分量が用いられてきたが、数日単位の短期間で飛来塩分量を正確に計測することができれば、気象条件と合わせた解析・考察を行うことで、ある場所の長期的に妥当な塩害リスクを推定することができると考えられる。

本研究では、従来の方法より簡易的で、短期間の飛来塩分量を計測できる方法を考案し、測定器の製作と初期測定を行った。また、温湿度・気圧などの気象データとの関係性を確かめるために、オンボードコンピュータに温湿度・気圧センサを組み込んだ気象データロガーを製作し、動作確認を行った。

2. 飛来塩分量測定装置の開発

2.1 測定場所

飛来塩分量の測定は、高知工業高等専門学校（高知高専）の敷地内（高知県南国市物部乙200-1）で海岸線に最も近いグラウンドの端、および、やや内陸に位置する建物の屋上（地上から約10mの高さ）の2か所で行った。図1に示すように、この2か所は、海拔約5mで、海岸線から約1.40kmと約1.73km離れた位置にあり、海に流れ出す河川からは約400m以内の距離にある。海岸から2km以内に位置しているため、塩害が発生するリスクが十分ある測定点である。また、グラウンド南側（海岸側）は、田や畑、空港の滑走路、公園などが広がっており、高い建物などの障害物はない。装置の動作確認のため、ガーゼの暴露期間は10日以内で、変動させた。

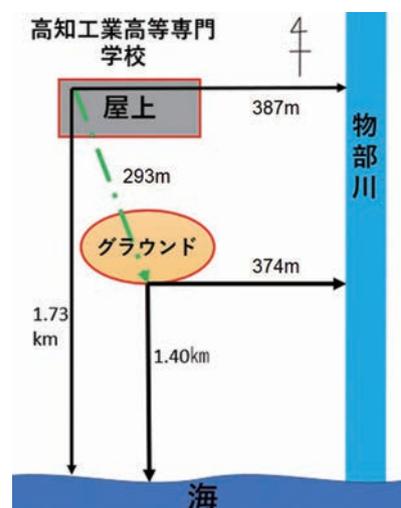


図1 測定地点と周辺の地図

2.2 測定装置の構成

図2に示すように、飛来塩分の捕捉装置は、2本の塩ビ管の間に、クリアファイルで作成したガーゼ差込口を挟んで固定する形式とした。塩ビ管の径が異なる2つの装置を製作した。1つは、直径10.5cm、長さ1mの塩ビ管を4本束（総断面積346cm²）にしたもの、もう1つは、直径20cm、長さ1mの塩ビ管1本のみ（断面積314cm²）のものである。塩ビ管の長さに関しては、雨がガーゼに直接当たらないように長さを1mにしている。最適な長さについては検証を行っていないが、一連の測定の間、筒の内部が濡れた形跡はなかった。飛来塩分を捕捉するために、ガーゼを用いているが、図3に示すように、取り換え用ガーゼを準備しており、ガーゼ差込口のポケットに入れ替えて使用している。塩ビ管のガーゼ差込口は雨にさらされると浸水する可能性があるため、塩ビ管全体

をブルーシートで覆っている。ガーゼの暴露する表面積は、従来のガーゼ法による装置の100cm²よりも大きく、暴露期間を短縮するようにした。ガーゼに付着した塩分量を推定するために、暴露したガーゼを注射用水に浸し、ECメータを用いて電気伝導度を計測する。

飛来塩分量と気象条件の関係を調べるため、温湿度・気圧を計測できる小型の測定装置（気象データロガー）を製作した。図4に示すように、気象データロガーは、コンピュータボード（Raspberry Pi Zero W）、データ保存用のマイクロSDカード、モバイルバッテリー、温湿度・気圧センサモジュール、9軸センサモジュール（3軸の加速度、角速度、磁気センサを含む）で構成されている。気象データロガーは、モバイルバッテリーの残量が確認できるように蓋が透明なボックスに入れて測定する（図5参照）。センサ制御のプログラミング言語にはPythonを用いた。



図2 装置の外観

(左：4本束タイプ，右：1本タイプ)

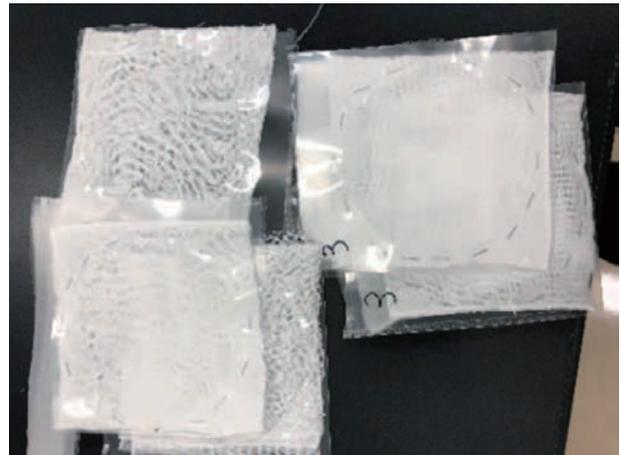


図3 取り換え用ガーゼ

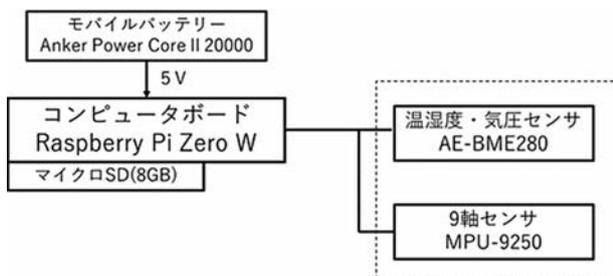


図4 気象データロガーの構成



図5 気象データロガーの外観

2.3 塩分濃度と電気伝導度の関係

ガーゼで捕捉した塩分は、水に浸して溶かし、ECメータを用いて電気伝導度を計測し、塩分濃度を推定する（図6参照）。ECメータは、測定範囲が0-9900 μ S/cmで25 $^{\circ}$ Cでの補正値を表示する「TDS&EC meter」を用いた。塩分濃度と電気伝導度は比例関係にあると考えられるため、事前実験で比例係数を導出する実験を行った。50mlの注射用水に10mgの食塩を溶かし、ECメータで塩水の電気伝導度を計測する。50mlずつ注射用水を加えて塩分濃度を下げながら、計測を繰り返した。図7に示すように、塩分濃度と電気伝導度は比例し、 $y=5.16 \times 10^{-5} x$ の直線で近似できた。この式を用いることで、計測した電気伝導度から、塩分濃度を推定することができる。塩分付着前のガーゼのみで、電気伝導度を測定した場合、15cm \times 15cmのガーゼで10 μ S/cmであったため、10 μ S/cm程度以下の電気伝導度は測定誤差の範囲と考えている。

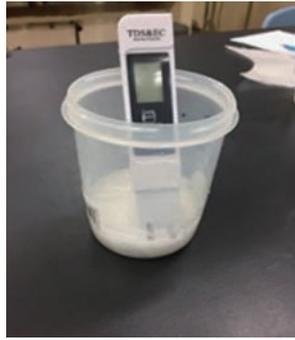


図6 ECメータによる測定の様子

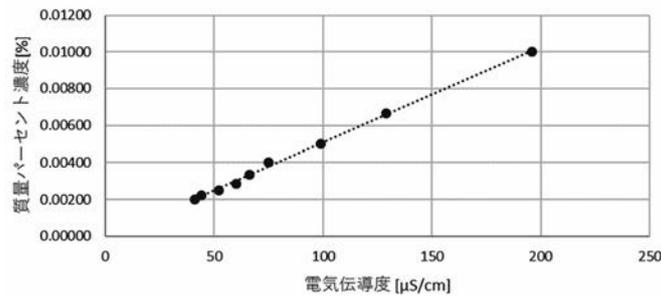


図7 事前実験による塩分濃度と電気伝導度の関係

3. 実験結果と測定データの解析

3.1 動作確認のための測定実験の結果

測定器の動作確認を兼ねて、2018年7月13日から11月5日までの期間で、9回の飛来塩分量の測定を実施した。表3に、実験の条件や得られた飛来塩分量を示す。表1より、計測できた電気伝導度は19-156 $\mu\text{S/cm}$ であり、測定誤差と考えている10 $\mu\text{S/cm}$ を大きく超えており、有意に塩分を検出できた。事前実験で得られた電気伝導度と塩分濃度との関係式を用いることで、飛来塩分量は、全体で0.045-0.231mddと推定できた。塩害リスクの基準である0.05mddを下回ったことは、全実験を通して2回のみであり、高知高専の敷地内には塩分が多く飛来していることが分かる。

また、屋上での飛来塩分量は0.045-0.0794mdd、グラウンドでの飛来塩分量は0.099-0.231mddであり、有意にグラウンドでの値が大きかった。飛来方向による違いについて、比較実験を行った結果が①と②である。①は海岸方向で、②は海岸線に対し垂直方向の結果である。屋上での測定のみで、0.0794mddと0.0692mddとわずかに海岸方向が大きいが、差は小さい。海岸と垂直方向に海とつながる河川があることから、今回の実験だけでは、飛来方向による塩分量の差について明確なことは言えない。今後、さらに検証する必要がある。次に、測定場所のみが異なる比較実験を行った結果が、⑥と⑧、⑦と⑨であるが、屋上とグラウンドで倍以上の値の違いが確認できた。基本的には高さがあるほど、飛来塩分量が到達しにくいと考えられる。

今回、2つの装置を製作したが、装置の性能差について、簡潔に述べる。筒4本と筒1本の装置に関して、比較実験⑥と⑦では、屋上で0.051mddと0.049mdd、比較実験⑧と⑨では、グラウンドで0.099mddと0.106mddとなり、ほぼ同じ飛来塩分量を得た。実験の運用上、筒1本の方が、装置の設置やガーゼ取り換えが簡易であるため、今後は筒1本の装置を主に利用する。

表1 飛来塩分量の測定データ (2018.7.13 ~ 11.5)

データ 番号	期間		日数	ガーゼの 大きさ[cm]×枚数	場所	パイプ形状 径[cm]×個数
表面積 [cm ²]	日数 [day]	加えた水の量 [g]	電気伝導度 [μ S/cm]	塩分の質量 [mg]	飛来塩分量 [mdd]	天気
①	7/13, 18:20 ~ 7/17, 17:20		3d23h	ϕ 9×4	屋上(海岸方向) ←	ϕ 10.5×4
509	3.96	100	31	1.600	0.0794	晴
②	7/13, 18:20 ~ 7/17, 17:20		3d23h	ϕ 9×4	屋上(垂直方向) ←	ϕ 10.5×4
509	3.96	100	27	1.393	0.0692	晴
③	10/11, 18:30 ~ 10/19, 15:00		7d20h30m	ϕ 9×4	屋上(海岸方向)	ϕ 10.5×4
509	7.85	100	35	1.81	0.045	晴
④	10/11, 18:30 ~ 10/19, 15:00		7d20h30m	ϕ 9×4	グラウンド	ϕ 10.5×4
509	7.85	100	156	8.05	0.201	晴
⑤	10/20, 11:30 ~ 10/23, 17:00		3d5h30m	ϕ 19×1	グラウンド	ϕ 20
567	3.23	100	82	4.23	0.231	10/23 朝から弱雨
⑥	11/1, 18:00 ~ 11/5, 16:30		3d22h30m	ϕ 19×1 ←	屋上 ←	ϕ 20
567	3.94	100	22	1.14	0.051	晴
⑦	11/1, 18:00 ~ 11/5, 16:30		3d22h30m	ϕ 9×4 ←	屋上 →	ϕ 10.5×4
509	3.94	100	19	0.98	0.049	晴
⑧	11/1, 18:00 ~ 11/5, 16:30		3d22h30m	ϕ 19×1 ←	グラウンド ←	ϕ 20
567	3.94	100	43	2.22	0.099	晴
⑨	11/1, 18:00 ~ 11/5, 16:30		3d22h30m	ϕ 9×4 ←	グラウンド →	ϕ 10.5×4
509	3.94	100	41	2.12	0.106	晴

3.2 定点での連続測定の結果

動作確認のための測定実験の結果を受けて、これまで3日間程度以上であった計測期間を短くし、2018年11月5日から11月11日までの期間、グラウンドで2日毎に計3回の連続測定を実施した。気象データロガーによる同時測定を行ったが、配線の接続不良で、今回はデータ取得できなかった。

連続測定の結果を表2に示すが、電気伝導度は44 μ S/cm以上と、ECメータで十分測定できる値が得られた。グラウンドの測定であれば、測定期間を1日にしても十分な値が得られることが多いと考えられる。飛来塩分量は、1週間程度の間で0.189~0.578mddと大きく変動しており、短期間で飛来塩分量が大きく変動する可能性を示唆している。気象庁のアメダスから得られた南国日章における気象データ⁴⁾を参考までに示している。1時間値のデータを用いており、天気と風向は期間中の最頻値、風速は期間中の平均値、降水量は期間中の積分値である。今後、気象データロガーを組み合わせ、中長期的な飛来塩分量の測定を行うことで、飛来塩分量の短期的な変動の過程を明らかにすることができると考えている。

表2 飛来塩分量の連続測定の結果 (2018.11.5~11.11@グラウンド)

データ 番号	期間		日数	ガーゼの 大きさ[cm] ×枚数	場所	パイプ形状 径[cm]×個 数	風向	平均 風速 [m/s]
表面積 [cm ²]	日数[day]	水の量	電気伝導度 [μS/cm]	塩分の質量 [mg]	飛来塩分量 [mdd]	天気	降水量[mm]	
⑩	11/5, 20:00~11/7, 17:00		1d21h	φ19×1	グラウンド	φ20	北北西	5.26
567	1.88	100	57	2.94	0.277	晴	0	
⑪	11/7, 17:00~11/9, 20:00		2d3h	φ19×1	グラウンド	φ20	北北西, 南東	3.16
567	2.13	100	44	2.27	0.189	晴	0	
⑫	11/9, 20:00~11/11, 20:00		2d	φ19×1	グラウンド	φ20	北北西	4.58
567	2.00	100	127	6.55	0.578	晴	0	

4. 測定装置の費用

今回の装置の製作および測定時にかかる費用を表3、表4にまとめた。飛来塩分量測定装置と気象データロガーを合わせた製作費用は、筒4本のタイプで約13,000円、筒1本のタイプで約16,000円であった。表3中の括弧表記は筒1本のタイプの費用である。また、1回の測定で使用する消耗品の費用は約260円である。筒1本のタイプは費用がやや高くなるが、実験実施に関わる作業を軽減できるため、今後、多地点での測定を実施する際には有効である。多地点で同時連続測定する際には、mカ月間、d日毎に、pカ所で測定した場合の費用の見積りは、 $(260 \times 30 \text{ m/d} + 15,982 \text{ p})$ 円となる。

表3 筒形観測装置の製作費用

使用器具	価格
塩ビパイプ	¥2,132 (¥4,293)
PV ロープ	¥160
ブルーシート	¥100
クリアファイル	¥20 (¥400)
養生テープ	¥108
Raspberry Pi Zero W	¥1,296
マイクロSDカード(8 GB)	¥810
温湿度・気圧センサモジュール	¥1,080
9軸センサモジュール	¥2,000
モバイルバッテリー	¥5,499
ブレッドボード	¥130
USB ケーブル	¥108
合計	¥13,441 (¥15,982)

表4 塩分測定にかかる消耗品の費用

使用器具	価格
ガーゼ	¥50
ジップロック	¥20
ゴム手袋	¥20
注射用水 500 ml	¥150
クリアファイル	¥20
合計	¥260

5. まとめと今後の展望

本研究では、飛来塩分量を測定するために、ガーゼ法を元に、簡易かつ短期間で測定可能な筒型装置を開発した。特に、ガーゼの表面積を大きくし、塩分濃度推定のために電気伝導度の計測を実施した。開発した装置による動作確認のための測定実験で、塩害リスクの基準とされる0.05mdd以上の飛来塩分量を高知高専の敷地内で計測した。また、高さ10m程度の建物の屋上とグラウンドの比較実験からは、有意にグラウンドでの飛来塩分量が多いことを示すことができた。さらに、計測期間を短くし、2日間程度の計測期間であっても十分な飛来塩分量を計測し、連続的な測定を実施できることが確認できた。定点での連続測定結果より、飛来塩分量は気象条件などにより、日単位で変動していることが示された。

今後に向けて、2つの検証を実施したいと考えている。1つは、ガーゼに含まれる電解質によるECメータの測定誤差を小さくするため、ガーゼ法と同様に、暴露前にガーゼを水に浸して乾燥させることである。2つ目は従来のガーゼ法との同時測定を実施し、推定した飛来塩分量の比較を行うことである。その後は、気象データロガーとの同時測定を行うとともに、筒型装置による同時多点の飛来塩分量の測定を実施することで、飛来塩分量のマップ作成や、塩害対策へ活かしていく。

謝 辞

装置開発に際して、一般財団法人WNI気象文化創造センターから助成を受けました。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所資料、飛来塩分量全国調査(Ⅲ)、土木研究所資料、第2687号、1988
- 2) 武邊勝道、大屋誠、安達良、大田隼也、落部圭史、梶谷慧、北川直樹、立花裕介、原貴之、土研式タンク法とドライガーゼ法で得られる 飛来塩分量の比較、材料と環境、57、pp.500-505、2008
- 3) 大屋誠武、武邊勝道、広瀬望、松浦葉月、今井篤、風向風速データを用いた飛来塩分子測、材料と環境、62、430-433、2013
- 4) 気象庁：<https://www.jma.go.jp/> (参照日：2018/11/21)