



Title	西部北太平洋亜寒帯海域における酸性海霧の発生要因
Author(s)	植松, 光夫
Relation	大気圏と生物圏の相互利用. 北海道大学低温科学研究所編
Citation	低温科学, 68, 49-52
Issue Date	2010-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/45163
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS68_009.pdf



西部北太平洋亜寒帯海域における酸性海霧の発生要因

植松 光夫¹⁾

2009 年 12 月 20 日受付, 2010 年 2 月 12 日受理

西部北太平洋亜寒帯域は霧の多発する海域である。海霧の pH は 2.8-5.5 と酸性を示し、粒径分布は陸上の霧の一山型とは異なり、霧粒の直径は $7.0\ \mu\text{m}$ と $27.5\ \mu\text{m}$ にピークを持つ二山型であった。エアロゾルと海霧のイオン成分の比較から、硝酸イオンを含む粗大粒子が、霧によって選択的に除去される事を明らかにした。これは大気経由の人為起源窒素化合物が海霧により海洋へ供給され、海洋生態系へ影響を与えていることを示唆する。

Factors of sea fog acidification over the western subarctic North Pacific region

Mitsuo Uematsu¹

Chemical and physical properties of sea fog over the sub-arctic North Pacific regions were determined. The mean size distribution of liquid water content (LWC) of sea fog indicated two peaks, which was different from the common single modal spectra of terrestrial fog. The mean pH values of fog water ranged from 2.8 to 5.5 over the investigated regions. Nitrate existed as coarse particles acts as condensation nuclei (CN) of sea fog droplets. These results suggest that sea fog over the subarctic North Pacific is one of important scavengers of natural and anthropogenic substances transported from the Asian continent and atmospheric nitrogen deposition to the marine environment may stimulate phytoplankton growth.

1. わかっていたこと

近年、大気エアロゾルとその前駆体の放出量の増加は、地球温暖化を抑制し放射強制力を負にするといわれている。直接的な冷却効果は、エアロゾルが太陽放射を散乱することで生じる。間接的な効果は、エアロゾルが凝結核として働き、雲粒の物理的特性や光学的特性を変化させることで、放射強制力に負の影響を与えるものである (IPCC, 2007)。

この間接効果は大きく 2 つの効果に分類できる。第 1 の間接効果は凝結核の個数濃度が増加した時に雲粒の個数が増加し、粒径が小さくなることによって、アルベドが増加する効果である (Twomey, 1977)。Hudson and Yum (2001) は、フロリダ半島で航空機観測を行い、海洋起源の空気塊は、多くの凝結核を含む陸起源の空気塊に比べ、積雲の雲粒の平均粒径が大きいばかりでなく、雲水量も増えることを示した。Adhikari et al. (2005) は、日本の南西諸島付近における航空機観測によって、アジア大陸の人為起源物質の影響を受けた海洋起源の空

気塊の雲粒の個数濃度は、清浄な海洋大気に比べ 2 倍以上の高い値であることを示した。

第 2 の間接効果は、凝結核の個数が増加し、雲粒の粒径が小さくなることにより、降水が抑制され、雲の滞留時間が長くなることで、雲による上空を被覆する時間が増加する効果である。陸起源の空気塊中では、雲粒の粒子が小さいままで、霧雨を起こすまで粒子は大きくならなかった (Hudson and Svensson, 1995; Hudson and Yum, 1997, 2001)。しかし、これらの間接効果は、IPCC 第 4 次報告 (2007) の中においても、依然として科学的理解が低いと評価されている。

このような報告を通じ、エアロゾルと雲粒の相互作用に関して、不均一な混合状態、拡散、凝集、除去ということが指摘されてきた。

本研究では、下層雲である海上の霧を対象とした。気象学的定義によると、霧は直径数 $10\ \mu\text{m}$ 以下の小さい水滴 (または氷晶) が光を散乱、反射、吸収し、地表付近の水平方向の視程 1 km 未満になる現象である。今まで化学的な視点から、山岳域や都市域を中心に陸上の霧について研究が取り組まれてきた (例えば、村野, 1993)。南カリフォルニアで高い酸性度を示す霧水の存

1) 東京大学海洋研究所

¹ Ocean Research Institute, The University of Tokyo

在 (Munger et al., 1983) や、高濃度の無機イオンや有機物の存在 (Munger et al., 1990; Richartz et al., 1990; Matsumoto et al., 2005) が報告されている。霧水は降水に比べて化学成分が高濃度のため、人体への影響が懸念されるばかりでなく、地球上の生態系や物質循環にも影響を与える。

海上に発生する霧 (海霧) の研究例は、陸上の霧に比べて限られている。海霧は海表面上に発生するため、航空機観測は難しく、船舶を用いた観測が中心となる。しかしながら、船舶を用いた研究は、Sasakawa and Uematsu (2002, 2005) や Sasakawa et al. (2003) の北太平洋での観測以外ほとんど報告例がない。海洋上では、人為的な影響を避ける操船が可能な船舶をプラットフォームとすることにより、定点観測だけでなく、陸のような地形や移動路などの制約を受けず、航走しながら霧の発生状況を時空間的に観測、解析することが可能である。

北部北太平洋は夏季に高い頻度で海霧が発生するため、霧の研究に適した海域である (図 1)。

特に、北海道から千島列島周辺にかけての海域では、7 月の海霧の出現頻度は 50% を越える (Wang, 1985)。この海霧は、主に北太平洋高気圧から吹き出す暖湿な空気塊が、北海道の太平洋沿岸部を流れる寒冷な親潮の上を通過する際、下層から冷やされて水蒸気が飽和して引き起こされる、典型的な移流霧である。

Sasakawa and Uematsu (2002) は、夏季 (1998–2001 年) に海霧が頻発する北西部北太平洋、オホーツク海、日本海において船上で霧水を採取し、pH が 2.8–5.5 と酸性であることを見出した。また、以下の主要イオン成分の結果を得た (図 2)。

(1) 霧水中的の NO_3^- 、非海塩性 (nss-) SO_4^{2-} 濃度は、アジア大陸起源の人為起源物質が取り込まれたため、他の海域より日本海が高い傾向を示す。(2) オホーツク海では、生物起源硫黄化合物の寄与が大きく、日本海より nss- SO_4^{2-} 濃度が高い場合がある。(3) エアロゾルと霧水の化学成分濃度の比較から、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ のような微小粒子よりも海塩粒子のような粗大粒子のほうが、霧粒の凝結核になりやすい。さらに、Sasakawa et al. (2003) は、2001 年初夏、霧発生時に連続したエアロゾルと霧

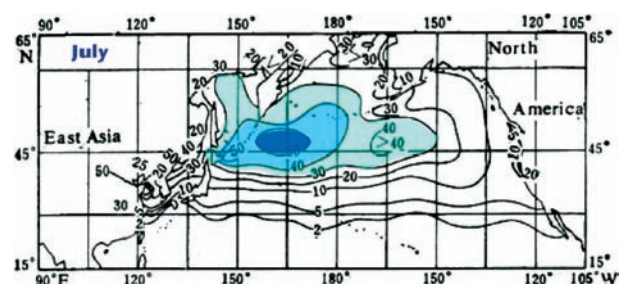


図 1：北太平洋における海霧の発生頻度 (Wang, 1985)。

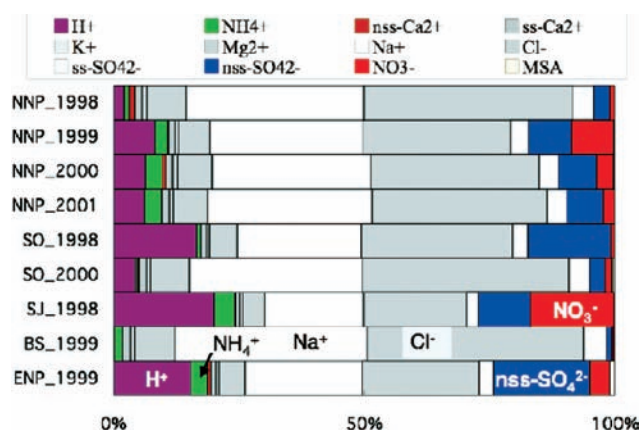


図 2：北太平洋における海霧の平均化学組成 (当量濃度) Northwestern North Pacific (NNP), Sea of Okhotsk (SO), Sea of Japan (SJ), Bering Sea (BS) and Northeastern North Pacific (ENP)。

水の採取を行い、北西部北太平洋における霧の化学・物理的变化と発生メカニズムを見出した。

(1) エアロゾルの粒子数観測により、 $0.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子よりも $0.5 \mu\text{m}$ 以上の粒子が霧粒の凝結核として働き、優先的に霧粒へ成長する。(2) 霧水中的の化学成分は、人為起源物質濃度が発生時間とともに霧水から減少している。(3) 特に NO_3^- 濃度の時間当たりの減少量が大きく、 NO_3^- を含む粗大粒子が霧粒へ成長する。

本論文では、エアロゾルと下層雲である霧の挙動に対する知見を、エアロゾルと霧の粒子数、粒径分布、そして化学成分から得ることを試みる。このため、北太平洋で最も霧が発生する海域で船舶大気観測を行い、霧発生域における霧水の粒径別粒子数と化学成分を連続的に測定し、両者の変化を捉えた。また、霧発生時と非発生時のエアロゾルと霧水の化学成分濃度を比較し、霧の凝結核になるエアロゾルの挙動を明らかにした。霧のような巨大粒子を高い時間分解能で粒径別に粒子数を計測するのは、船舶を用いた観測では初めての試みである (吉田他, 2007)。

2. はかったこと

海霧の観測は 2004 年 7 月 13 日–8 月 23 日に北部北太平洋において学術研究船白鳳丸船上で行われた (KH-04-3 次航海)。

大気エアロゾルの捕集には、ハイポリウムバーチャルインパクター式エアサンプラー (紀本電子工業; AS-9) を使い、微小粒子 ($d < 2.5 \mu\text{m}$) と粗大粒子 ($d > 2.5 \mu\text{m}$) に分級して捕集した。試料採取時間は 12 時間とした。霧水試料の採取は、細線式霧水捕集装置 (臼井工業; FWG-400) を用いた。採水量は、採水量 50 ml を基準として捕集した。霧水の採取後、直ちに pH、電気伝導度を測定した。

その後、イオンクロマトグラフを用いて、エアロゾル

試料と霧水試料中の主要水溶性イオン成分 (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) と MSA (メタンスルホン酸) を分離, 定量した.

フォグモニター (Droplet Measurement Technologies; FM-100) を用いて, 霧の粒径分布 (2-50 μm , 19 段階) と霧水量 (Liquid Water content: LWC) を算出した. 同様に, エアロゾルの粒径分布 (0.1-5 μm) をパーティクルカウンター (リオン株式会社; KC-01D, KC-18) で測定した.

3. わかったこと

霧水中平均化学イオン成分の 65% を海塩成分が, 非海塩成分では nss-SO_4^{2-} が 10% を占めていた. また, 全期間を通じて平均した LWC の粒径分布は, 7.0 μm と 27.5 μm にピークを持つ二山型であり, 陸上における一山型の霧と異なる粒径分布型を持つことがわかった (図 3).

エアロゾルが霧粒へと成長が始まる海霧発生海域の末端部で, LWC と霧水中の海塩成分濃度は最大値となり, LWC の粒径分布では, 17.0 μm にピークが見られた. 中心部に向けて凝結核となった海塩粒子は指数的に減少し, 霧水中の海塩成分は同じ除去過程が続いたと考えられた. 粒子個数の低い中心部では, LWC は 5.0 μm と 36.5 μm にピークをもつ二山型の粒径分布となった.

エアロゾルと海霧の化学成分から, 微小粒子は霧発生時に粗大粒子にまで成長するが, 沈着を起こすほど大きな霧粒には成長しなかったことが明らかになった. 一方, 海塩成分や硝酸イオンを含む粗大粒子は, 霧発生に伴い霧粒の凝結核として大きく寄与し, 霧生長とともに沈着がおこるため, 70% 以上が霧発生中に大気中から除去されたと見積もられた (図 4).

このように霧多発海域では, 霧が人為起源物質を含む

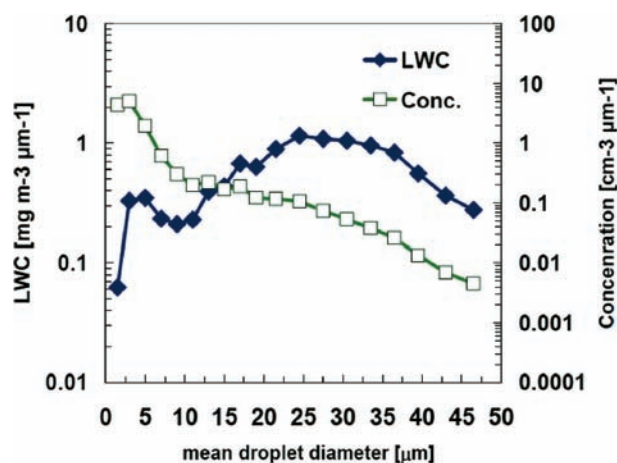


図 3: KH-04-3 次航海での海霧の平均粒径別数濃度分布と LWC の粒径分布.

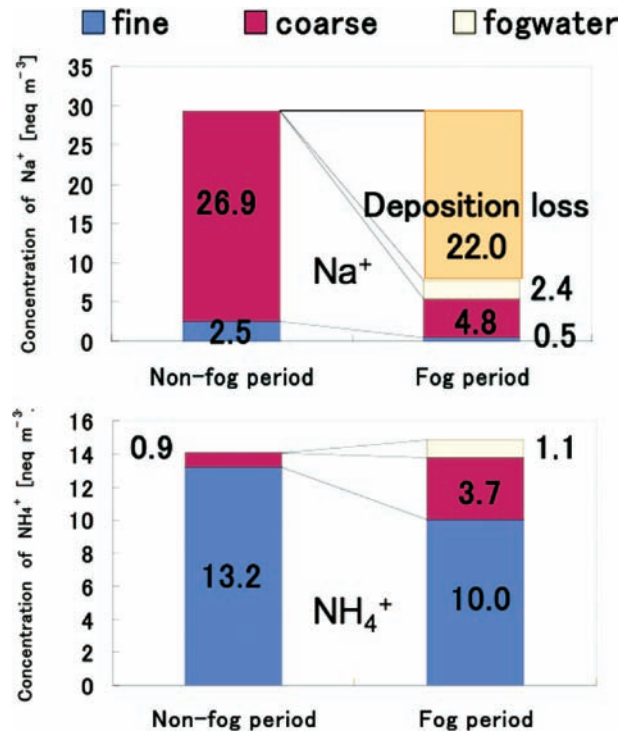


図 4: 海霧発生前と発生中の微小粒子, 粗大粒子エアロゾルと霧水の Na と NH_4^+ の濃度変化の比較.

陸起源や大気に放出された海洋生物起源の気体やエアロゾルを大気中から海洋へ選択的に除去している. 今後, エアロゾル個数, 発生する霧粒の粒径と化学成分などの相関から, 下層雲としての雲粒の粒径変化の実証を行い, また, 霧粒の生成・沈着フラックスの直接測定を通して, 生物地球化学的循環への影響評価などを確立していく必要がある.

引用文献

- Adhikari, M., Ishizaka, Y., Minda, H., Kazaoka R. and Jensen, J. B. (2005) Vertical distribution of cloud condensation nuclei concentrations and their effect on microphysical properties of clouds over the sea near the southwest islands of Japan. *J. Geophys. Res.* 110, doi: 10.1029/2004JD004758.
- Hudson, J. G. and Svensson, G. (1995) Cloud microphysical relationships in California marine stratus. *J. Appl. Meteorol.* 34, 2655-2666.
- Hudson, J. G. and Yum, S. S. (1997) Droplet spectral broadening in marine stratus. *J. Atmos. Sci.* 54, 2642-2654.
- Hudson, J. G. and Yum, S. S. (2001) Maritime-continental drizzle contrasts in small cumuli. *J. Atmos. Sci.* 58, 915-926.
- IPCC. Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis. <http://www.ipcc.ch>, 21 May 2007.
- Matsumoto, K., Kawai, S., Igawa, M. (2005) Dominant factors controlling concentrations of aldehydes in rain, fog,

- dew water, and in the gas phase. *Atmos. Environ.* 39, 7321-7329.
- Munger, J. W., Jacob, D. J., Waldman, J. M. and Hoffman, M. R. (1983) Fogwater chemistry in an urban atmosphere. *J. Geophys. Res.* 88, 5109-5121.
- Munger, J. W., Collet, J., Daube Jr., B. and Hoffmann, M. R. (1990) Fogwater chemistry at Riverside, California. *Atmos. Environ.* 24B, 185-205.
- 村野健太郎 (1993) 「酸性雨と酸性霧」, 裳華房, 179.
- Richartz, H., Reischl, A., Trautner F. and Hutzinger, O. (1990) Nitrated phenols in fog., *Atmos. Environ.* 24A, 3067-3072.
- Sasakawa, M. and Uematsu, M. (2002) Chemical composition of aerosol, sea fog and rainwater in the marine boundary layer of the northwestern North Pacific and its marginal seas. *J. Geophys. Res.* 107(D24), 4783, doi: 10.1029/2001JD001004.
- Sasakawa, M., Ooki, A. and Uematsu, M. (2003) Aerosol size distribution during sea fog and its scavenge process of chemical substances over the northwestern North Pacific. *J. Geophys. Res.* 108 (D3), 4120, doi: 10.1029/2002JD002329.
- Sasakawa, M. and Uematsu, M. (2005) Relative contribution of chemical composition to acidification of sea fog (stratus) over the northern North Pacific and its marginal seas. *Atmos. Environ.* 39, 1357-1362.
- Twomey, S. J. (1977) Influence of pollution on the short-wave albedo of cloud. *J. Atmos. Sci.* 34, 1149-1152.
- 吉田健太郎, 成田祥, フランク グリースバウム, 岩本洋子, 近藤雅輝, 植松光夫 (2007) 「北部北太平洋における海霧の化学組成と粒径分布」地球化学 41, 165-172.
- Wang, B. H. (1985) Distributions and variations of sea fog in the world, In: *Sea Fog*. China Ocean Press, Beijing, pp. 51-90.