

黄砂によって長距離輸送される バイオエアロゾルの生態学的特徴

牧 輝 弥*

はじめに

大気中を浮遊する微小粒子（エアロゾル）には、砂やスス、海塩などの無機物以外に、微生物や動植物に由来する“生体粒子（バイオエアロゾル）”も含まれる（Iwasaka et al. 2009, 岩坂 2012, 牧 2021）。バイオエアロゾルは、海洋や森林など微生物の生体活動が活発な環境では、全大気粒子の50%を占める場合がある（Pratt et al. 2009）（図1）。微生物は孢子や栄養細胞など単体で浮遊する一方、大部分は互いに集まるか、大きめの無機物粒子に付着して凝集態となり空気中を漂っている（Iwasaka et al. 2009）。特に、中国沙漠から飛来する黄砂の鉱物粒子や中国大陸からの汚染大気である煙霧（PM2.5）のスス粒子などは、微生物が付着して移動するための良好な運搬体となる。凝集態になった微生物細胞は、乾燥や紫外線などの大気ストレスに直に晒されにくくなり、高度数千メート

ルの高高度でも生きながらえる。そのため、黄砂や煙霧は“微生物の空飛ぶ箱船”と呼ばれ、黄砂や煙霧によって運ばれる微生物の拡散範囲はアジア一円に及ぶ（岩坂 2012）。実際、沈着地で黄砂・煙霧が発生すると、大気微生物の細胞密度は10倍から100倍に増える（Hara and Zhang 2012, Maki et al. 2014）。さらに、黄砂・煙霧によって運ばれた微生物は、人体に入り込み気管支炎やアレルギーを誘発するため、その健康被害が懸念される（Ichinose et al. 2005）。一方、大気微生物が陸水や山野に沈着すると生態系を変化させたり、バイオエアロゾルが醗酵文化の伝播にも関与してきたとする仮説も提唱されるようになった。

そこで、本報では、著者の研究取り組みを踏まえ、黄砂・煙霧とともに運ばれる微生物の特徴を述べ、沈着地における健康、発酵食、海洋生態系への影響について紹介する。

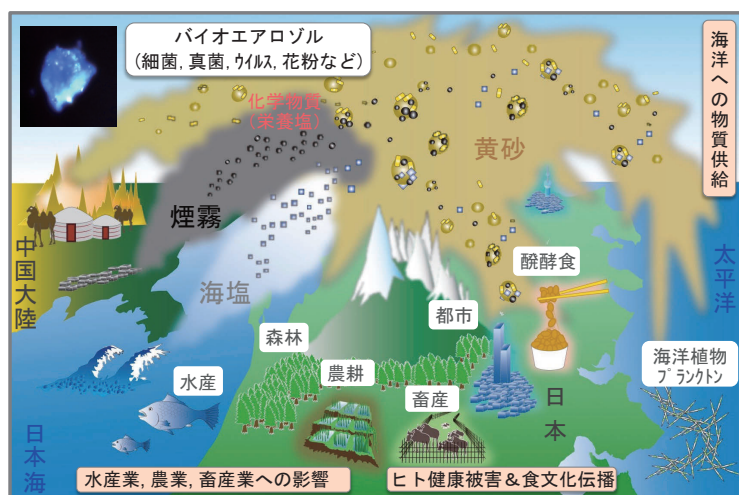


図1. 黄砂・煙霧によって運ばれるバイオエアロゾルによる健康および生態系への影響

*近畿大学理工学部教授

黄砂・煙霧のサンプリング

黄砂・煙霧によって運ばれる微生物を特定するには、発生源と沈着地を浮遊する大気粒子を捕集し、大気粒子に含まれる共通、微生物種を調べる必要がある。そこで、発生源から沈着地までを網羅する東アジア一円に8箇所の観測サイト（日本、中国、韓国、モンゴル）を設け（図2）、各観測サイトの建物屋上において、大気粒子を孔径 $0.2\ \mu\text{m}$ のポリカーボネート製フィルター上にエアポンプを使って吸引捕集した。また、黄砂・煙霧は、数千メートル上空を吹く偏西風に乗って、東アジア全域へと拡散される。そのため、沈着地地上の大気粒子が混合するのを避け、黄砂・煙霧で運ばれてきた微生物を高高度で純度高く捕集しなければならない。そこで、能登半島（内灘-羽咋）では、海岸線上をヘリコプターで飛行し、上空3,000 mの大気粒子を捕集してきた（Maki et al. 2017）（図2）。一方、富山県立山連峰（立山）には毎年6 mから10 mの積雪が融解せずに翌春まで降り積もる。その積雪中には、黄砂・煙霧の

粒子が、積雪下部から時系列に層を形成し保存される。春に立山の標高2,450 mにおいて積雪断面を形成し、その断面の黄砂・煙霧の層からも高高度を飛来してきた微生物を採取できる（Maki et al. 2018）。

黄砂・煙霧に含まれる微生物

黄砂・煙霧によって運ばれる細菌の群集構造を解析するには、全観測サイトで採取した大気粒子試料から細菌由来のゲノムDNAを抽出し、細菌の種の指標となる遺伝子配列を解読する。実際に、解読した遺伝子配列を使って主成分分析すると、座標の上で黄砂・煙霧の発生源と沈着地の試料は異なる分布を示し、一部分の試料（砂塵が発生した発生地と黄砂時の飛来地の試料）では細菌群集構造が類似した（図3, Maki et al. 2022）。群集構造が類似した発生源と沈着地の試料は、ヘリコプターおよび立山で採取した試料とも座標上で近くなった。従って、黄砂や煙霧の発生源から特有の細菌群集が高高度を通過しながら、沈着地まで



図2. 東アジアを網羅するバイオエアロゾルの観測サイトとヘリコプターと立山積雪を利用したサンプリング手法

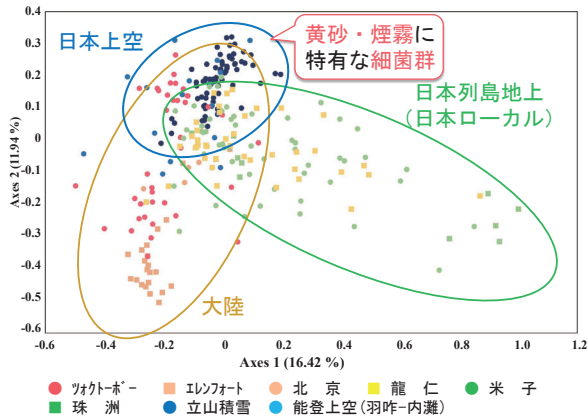


図3. 全8観測サイトの大気粒子に含まれる細菌群集の主成分分析 (Maki et al. 2022)

運ばれていると推定される。

細菌群集に含まれる分類群を詳しくみると、黄沙・煙霧の大気粒子試料には数百種以上の細菌群が含まれており、特に、沙漠地帯（黄沙発生源）と黄沙時の沈着地の大気には Bacteroidetes 門や Firmicutes 門の細菌種が優占する傾向にあった（図4）。Firmicutes 門の *Bacillus* 属の細菌種は発生源と沈着地の大気粒子から共通種が分離培養されており、黄沙・煙霧によって運ばれる典型的な

グループである。一方、煙霧を多く含む試料では、Actinobacteria 門の細菌種の割合が増大した。従って、大陸沿岸部の汚染大気が黄沙に混入すると、Firmicutes 門の *Bacillus* 属の細菌種に、Actinobacteria 門の種も混合され日本まで輸送されと言える。一方、日本海海上を長時間経由し飛来した大気粒子からは、海洋性の Proteobacteria 門の細菌種が優占して検出されたため、黄沙は輸送される際に海洋細菌も巻き上げ運んでくると推察される。

ヒトや動植物への健康影響

大気微生物の生体影響としては、アレルギーの誘発や気管支炎が懸念される。実際に、黄沙粒子から分離培養した真菌類をマウスの鼻先に付着させると、ヤケイロタケ *Bjercandela adusta* やクロカビ *Cladosporium cladosporioides* などアレルギーの誘発や気管支炎の症状が確認された。しかも、これら真菌類が黄沙の鉱物粒子に混合していると、鉱物粒子のみのアレルギー症状が、10倍以上に増悪される（市瀬&牧 2014）。アレルギー原

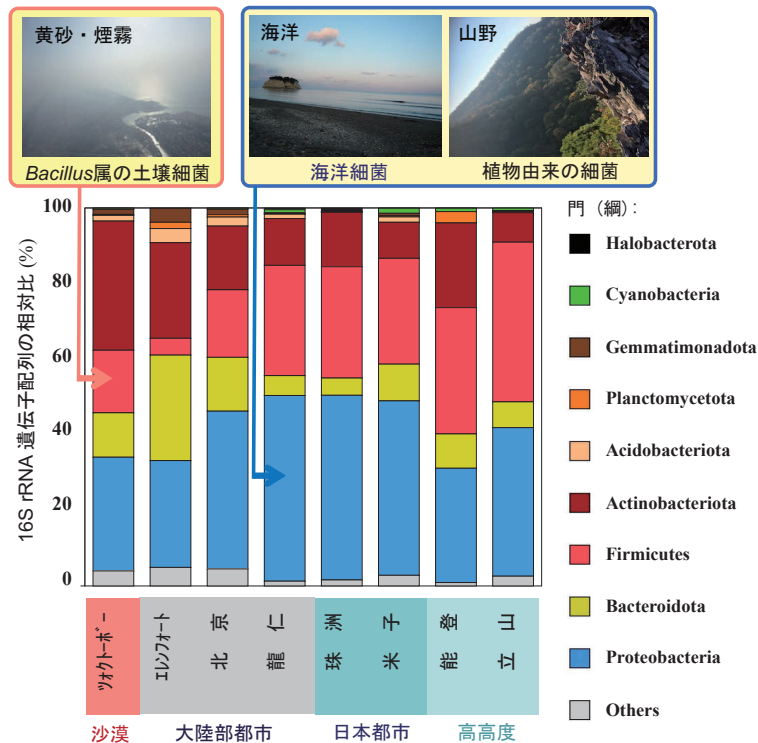


図4. 全8観測サイトの大気粒子に含まれる細菌の群集構造 (Maki et al. 2022)

因物質（アレルゲン）としては、真菌細胞の β グルカンやグラム陽性細菌のペプチドグリカンがある（Ichinose et al. 2005）。銜物粒子の凹凸が細胞を傷つけ、傷口から真菌由来のアレルゲンが入りこみ、過剰に細胞の免疫系を刺激すると考えられている。よって、銜物粒子のみならず、真菌の気中拡散にも公衆衛生学的な注意喚起が必要となる。

黄砂・煙霧発生時には緻密な疫学的調査も実施されており、バイオエアロゾルの飛散・輸送が川崎病などの小児病（Rodó et al. 2011）や麦さび病などの農畜産物の病害（Brown and Hovmöller 2002）の拡散にも関与していることが判ってきた。一方、*Mycobacterium* 属の特定種は肺炎に似た非結核性抗酸菌症を引き起こし、特に、*M. intracellulare* による感染症は中国大陸から西日本（九州地方から関西）にかけて集中する。この感染分布域と黄砂・煙霧の飛来地が重なっているため、非結核性抗酸菌症が越境大気によって感染伝播するという仮説が立てられている（Morimoto et al. 2017）。実際に、立山積雪とヘリコプターで採取した高高度の黄砂・煙霧の粒子からは *Mycobacterium* 属の核酸配列が検出されており、その風送拡散の可能性は高い（Maki et al. 2022）。さらに、麻疹や口蹄疫などのウイルス感染の拡大にも、黄砂や煙霧の飛散が関わっていると報告もあり、病原性の微生物やウイルスの風送による伝播が懸念される（Ma et al., 2017）。

発酵食文化の伝播

健康被害について述べたが、黄砂・煙霧には、食品醗酵に関わる有益な微生物の近縁種も多く含まれる（岩坂 2012, 牧 2021）。特に、*Bacillus subtilis* グループの細菌群は、黄砂・煙霧の発生源と沈着地の気粒子に共通して優占し、頻繁に分離培養される（全株の 70%）。*Bacillus* 属の細菌種は、乾燥などの環境ストレス下では芽胞を形成し、乾燥や熱、紫外線に強い耐性を示す（Nicholson et al., 2000）。そのため、本種は大気中でのストレス環境においても生命を維持したま



図 5. 高度 3,000 m で採取した黄砂粒子から分離培養した *B. subtilis* で作成した納豆

ま、高高度を風送されやすい。*Bacillus* 属には炭疽菌 (*B. anthracis*) や食中毒菌 (*B. cereus*) などの強い毒性をもつ有害菌が含まれる。しかしながら、黄砂・煙霧から頻繁に検出される *B. subtilis* は、無害であるばかりか、「納豆菌」として知られている。そこで、実際に、能登半島上空 3,000 m と立山積雪の大気試料から得た *B. subtilis* 株を使って、納豆を試作してみた。発酵・熟成が進むと、納豆の匂いがかもし出され、糸引きが見られ、納豆が生成された（図 5）。

大豆の発酵食品は、世界中でも納豆トライアングルとよばれる日本、ネパール、インドネシアを結んだ三角地帯で、主に製造・消費されている（横山 2014）。特に、三角地帯の北部には、*B. subtilis* を使った大豆醗酵食品が集中するため、三角地帯の中心にある中国雲南省から各地に大豆醗酵文化が広がったとする「起源一元論説」が中尾佐助によって提唱された（中尾 1966）。これに対して、それぞれ地域ごとに大豆醗酵文化が生じたとする「起源多元論説」がある（横山 2014）。大豆を調理する行程で、黄砂など大陸由来の大気粒子が食材に混入し、その粒子に付着した微生物が、自然発酵を促したのであれば、「起源多元論説」の方が支持される。太古の日本でも、黄砂で風送された微生物が、食品醗酵に利用され、日本の醗酵食品文化の変遷と歴史に関わったのかもしれない。

海洋微生物の群集構造への影響

黄砂の鉱物粒子には、鉄や亜鉛などの金属が含まれ、中国都市部で発生する人為起源の煙霧には硝酸や硫酸が混在する（藤永ら 2005）。こうした黄砂・煙霧の化学物質は、海洋に沈着すると、植物プランクトンや細菌などの増殖を促す必須元素や栄養塩となり得る（図1）。しかしながら、黄砂・煙霧の沈着によって増殖する微生物の種組成変化を詳細に調べた知見は少ない。また、黄砂・煙霧とともに運ばれる微生物の海洋生態系への移入についても不明である。そこで、著者は、紀伊半島沖合の外洋水に黄砂・煙霧の粒子を添加し、海洋微生物の増殖を調べる船上培養実験を実施した（Maki et al. 2021）。その結果、貧栄養海域の海水に、黄砂・煙霧の大気粒子を加えると、硝酸

態窒素が増え、その硝酸態窒素の減少とともに植物プランクトン由来のクロロフィル a が増大した。さらに、光学顕微鏡で植物プランクトンを観察すると、*Pseudo-nitzschia* 属や *Chaetoceros* 属などの珪藻類の増殖が確認された（図5）。また、立山積雪の黄砂・煙霧層の積雪融解水や硝酸を海水に加えても、同様にケイ藻が増殖した。一方、十分に栄養塩がある海域の海水では、黄砂・煙霧の粒子を添加しても、無添加区に比べ、有意なケイ藻の増殖は見られなかった。従って、貧栄養海域では、黄砂・煙霧に含まれる硝酸態窒素が珪藻類の栄養塩になると推察できる。

さらに、黄砂・煙霧に含まれる有機物も海水へと供給され、その有機物が減少するに従って細菌の細胞密度も増大した（図6）。海水中の細菌群

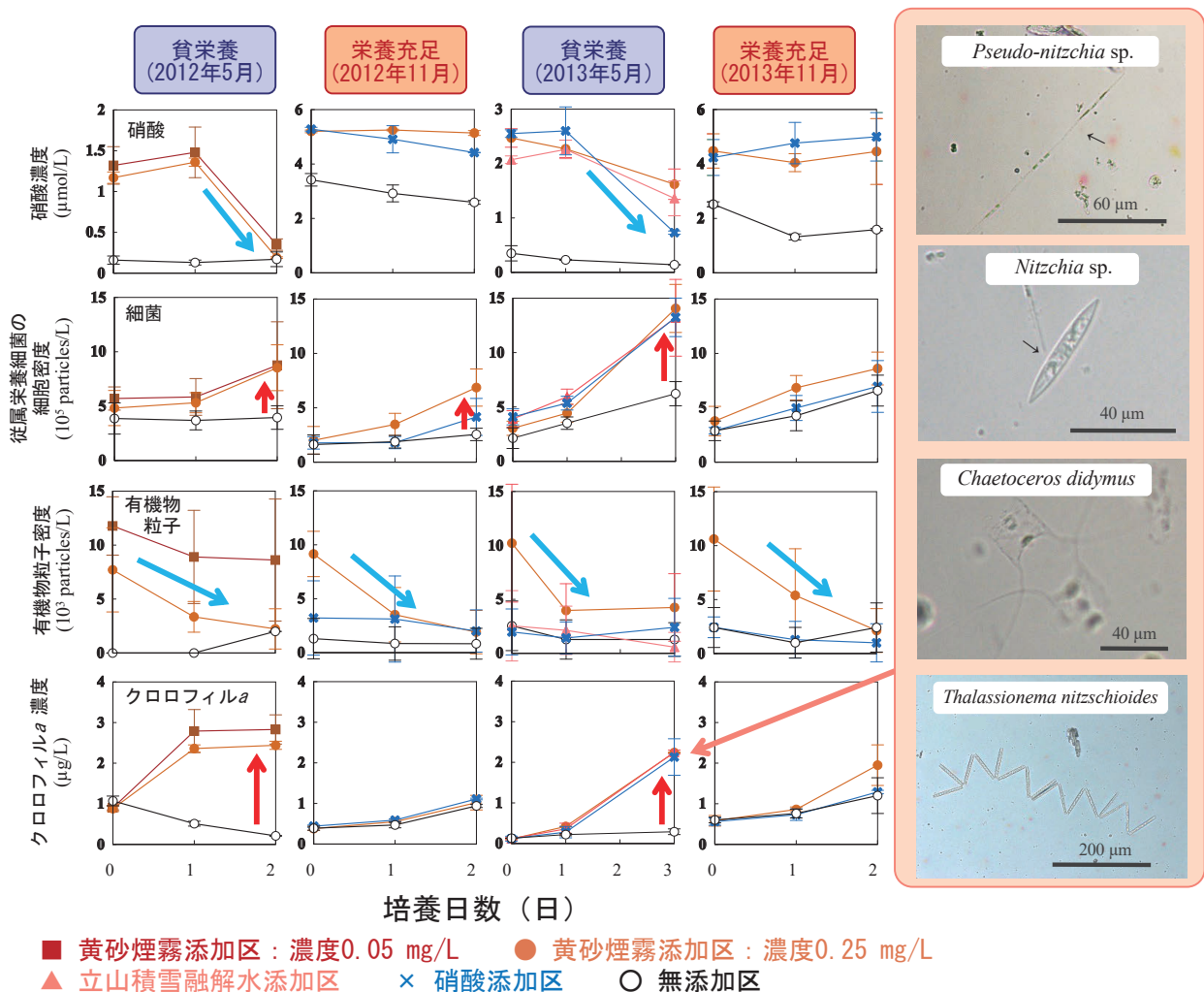


図6. 太平洋紀伊半島沖合で採取した海水に黄砂・煙霧の粒子および立山積雪の融解水、硝酸を添加した実験区と海水の実験区（無添加区）における硝酸および細菌、有機物、クロロフィル a の濃度変化（Maki et al. 2021）

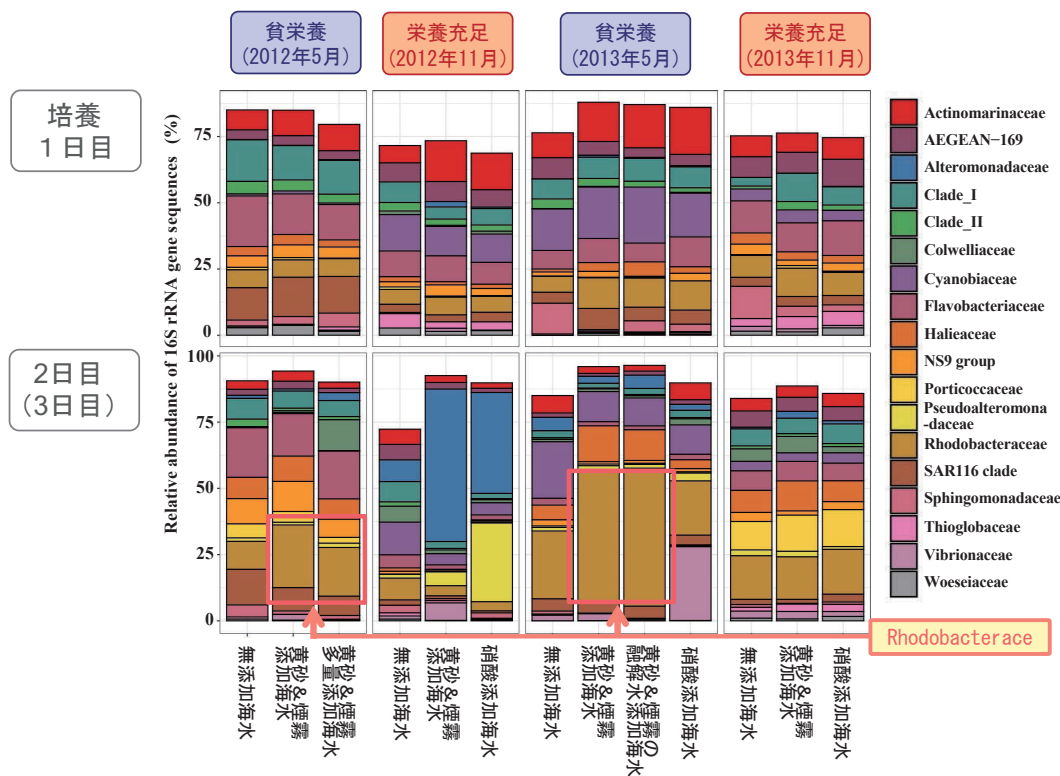


図7. 太平洋紀伊半島沖合で採取した海水に黄砂・煙霧の粒子を添加し、1日および2日培養した後の細菌群集の構造変化 (Maki et al. 2021)

集をメタゲノム解析で調べると、黄砂・煙霧を添加した海水では、有機物分解細菌 (Rhodobacteraceae, OM60) の相対存在比が増加した (図7)。よって、海水に新たに供給された有機物によって、有機物分解細菌も増殖が促されると言える。

まとめ

黄砂・煙霧は多種多様な微生物とともに東アジアを拡散し、ヒト生活や海洋生態系に影響を及ぼしているのは確かである。ただし、調査や実験でわかっている影響は一部分であり、まだ煙霧・黄砂が運ぶ微生物による未知なる影響があると予想される。また、気候変動や産業発展によって、東アジアの大気環境が変化すると、煙霧・黄砂が運ぶ微生物や化学物質も変わってくるであろう。今後、煙霧・黄砂を砂やススの無機粒子とだけと捉えるのではなく、微生物を含めた有機と無機の複合体とみなし、長期的な煙霧・黄砂観測とその影響評価を継続していく必要がある。

謝辞

本研究は、鳥取大学乾燥地研究センター共同研究 (課題番号 02C2021) および科研費 (基盤研究 A: 16H02703, 21H04930) の助成を受けたものである。

引用文献

- Brown, J.K.M., and Hovmöller, M.S. (2002). Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease, *Science* 297, 537–541.
- 藤永太一郎, 宗林由樹, 一色健司 (2005) 『海と湖の化学—微量元素で探る』 京都大学学術出版会
- Hara, K., and Zhang, D. (2012). Bacterial abundance and viability in long-range transported dust, *Atmos. Environ.* 47, 20–25.
- 市瀬孝道, 牧輝弥 (2014). ヤケイロタケのアレルギー学的基礎研究, アレルギーの臨床, 7月臨時増刊号, 34–39.

- Ichinose, T., Nishikawa, M., Takano, H., Sera, N., Sadakane, K., Mori, I., Yanagisawa, R., Oda, T., Tamura, H., Hiyoshi, K., Quan, H., Tomura, S., and Shibamoto, T. (2005). Pulmonary toxicity induced by intratracheal instillation of Asian yellow dust (Kosa) in mice, *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 20, 48–56.
- 岩坂泰信 (2012) 『空飛ぶ納豆菌』PHP 研究所
- Iwasaka, Y., Shi, G-Y., Yamada, M., Kobayashi, F., Kakikawa, M., Maki, T., Naganuma, T., Chen, B., Tobo, Y., and Hong, C. (2009). Mixture of Kosa (Asian dust) and bioaerosols detected in the atmosphere over the Kosa particles source regions with balloon-borne measurements: possibility of long-range transport, *Air Qual. Atmos. Health*, 2, 29–38.
- Ma, Y., Zhou, J., Yang, S., Zhao, Y., and Zheng, X., 2017. Assessment for the impact of dust events on measles incidence in western China. *Atmos. Environ.* 157: 1–9.
- 牧輝弥 (2021) 『雨もキノコも鼻クソも大気微生物の世界 気候・健康・発酵とバイオエアロゾル』築地書館
- Maki T., Lee K.C., Pointing S.B., Watanabe K., Aoki K., Archer S.D.J., Lacap-Bugler D.C., and Ishikawa A. (2021). Desert and anthropogenic mixing dust deposition influences microbial communities in surface waters of the western Pacific Ocean, *Sci. Total Environ.* 791, 2021, 148026, doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.148026](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148026)
- Maki, T., Puspitasari, F., Hara, K., Yamada, M., Kobayashi, F., Hasegawa, H., and Iwasaka, Y. (2014). Variations in the structure of airborne bacterial communities in a downwind area during an Asian dust (Kosa) event, *Sci. Total Environ.* 488–489, 75–84.
- Maki, T., Furumoto, S., Asahi, Y., Lee, K.C., Watanabe, K., Aoki, K., Murakami, M., Tajiri, T., Hasegawa, H., Mashio, A., and Iwasaka, Y. (2018). Long-range transported bioaerosols captured in snow cover on Mount Tateyama, Japan: Impacts of Asian-dust events on airborne bacterial dynamics relating to ice-nucleation activities, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 8155–8171.
- Maki, T., Hara, K., Iwata, A., Lee, K.C., Kawai, K., Kai, K., Kobayash, F., Pointing, S.B., Archer, S., Hasegawa, H., and Iwasaka, Y. (2017). Variations of airborne bacterial communities at high altitudes in response dust events, over Asian-dust downwind area (Japan), *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 11877–11897.
- Maki T., Noda, J., Morimoto, K., Aoki, K., Kurosaki, Y., Huang, Z., Chen, B., Matsuki, A., Miyata, H., and Mitarai, S. (2022). Long-range transport of airborne bacteria over East Asia: Asian dust events carry potentially nontuberculous *Mycobacterium* populations, *Environ. Int.*, 2022, 107471. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107471>
- Morimoto, K., Hasegawa, N., Izumi, K., Namkoong, H., Uchimura, K., Yoshiyama, T., Hoshino, Y., Kurashima, A., Sokunaga, J., Shibuya, S., Shimojima, M., Ato, M., and Mitarai, S. (2017). A laboratory-based analysis of nontuberculous mycobacterial lung disease in Japan from 2012 to 2013, *Ann. Am. Thorac. Soc.* 14, 49–56.
- Nicholson, W.L., Munakata, N., Horneck, G., Melosh, H.J., and Setlow, P., (2000). Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 64, 548–572.
- 中尾佐助 (1966) 『栽培植物と農耕の起源』岩波書店
- Pratt, K.A., DeMott, P.J., French, J.R., Wang, Z., Westphal, D.L., Heymsfield, A.J., Twohy,

C.H., Prenni, A.J., and Prather, K.A. (2009). In situ detection of biological particles in cloud ice-crystals, *Nature Geoscience*, 2, 398–401.

Rodó, X., Ballester, J., Cayan, D., Melish, M.E., Nakamura, Y., Uehara, R., and Burns, J. (2011). Association of Kawasaki disease with tropospheric wind patterns, *Sci. Rep.* 1, 152.
doi:10.1038/srep00152

横山智 (2014) 『納豆の起源』NHK ブックス