

課題名	5C-1154 黄砂のヒト健康への影響に対する臨床および基礎研究の融合アプローチ
課題代表者名	渡部仁成 鳥取大学医学部附属病院 第三内科診療科群
研究実施期間	平成23～25年度
累計予算額	69,283千円(うち25年度20,568千円) 予算額は、間接経費を含む。
本研究のキーワード	黄砂、大気粉塵、喘息、慢性閉塞性肺疾患、児童、呼吸機能、気道炎症、interleukin-8、PM _{2.5}

研究体制

- (1) 黄砂飛散が気道炎症に与える影響についてBiomarkerによる評価（鳥取大学）
- (2) 黄砂飛散が喘息およびCOPD患者の症状および活動性に与える影響調査（鳥取大学）
- (3) 黄砂が気道炎症細胞および気道構成細胞に与える影響についての基礎的検討（鳥取大学）
- (4) 大気粉塵の量及び化学成分の季節変動の解析（京都薬科大学）

研究協力機関

鳥取県衛生環境研究所、東北大学、鳥取大学染色体工学センター、山陰労災病院、陽明会小波瀬病院、松江市立病院、松江赤十字病院、国立病院機構米子医療センター、西伯病院、法勝寺内科クリニック、大賀内科クリニック、済生会境港病院、やすだ内科クリニック、福岡県保健環境研究所、富山県環境科学センター、

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

大気中の粒子状物質と呼吸器疾患、循環器疾患、脳血管疾患の死亡率との関連が報告されている。黄砂は大気中の粒子状物質や微小粒子状物質の濃度を増加させる原因となる。しかしながら、黄砂の健康への影響について調査は多くない。台湾からは最も多く黄砂の健康影響について報告があり、黄砂時に死亡率、入院、救急受診が増加することや、循環器疾患、呼吸器疾患、脳血管疾患の発症も増加することが報告されている。一方、喘息の受診やアレルギー性鼻炎では黄砂の影響がなかったことも報告されている。韓国からは黄砂が喘息を増悪させ呼吸機能や症状を増悪させることが報告されている。本邦からも、黄砂時に小児喘息の入院頻度が高くなることが報告されている。しかしながら、本邦において成人、特に呼吸器疾患への影響や児童への影響について調査した報告はなく検討が必要と考えられる。黄砂には様々な化学物質、大気汚染物質、細菌、真菌が付着していることも近年明らかになっている。黄砂がヒトの健康に影響すると仮定し、その増悪メカニズムや黄砂の本体である砂塵成分(Si=シリカ)が原因なのか、付着している物質に原因があるのかも解っていない。本研究では黄砂の呼吸器系への影響を明らかにし、さらに黄砂の気道炎症増悪メカニズムを解明し、増悪させる原因物質の同定を目指した。

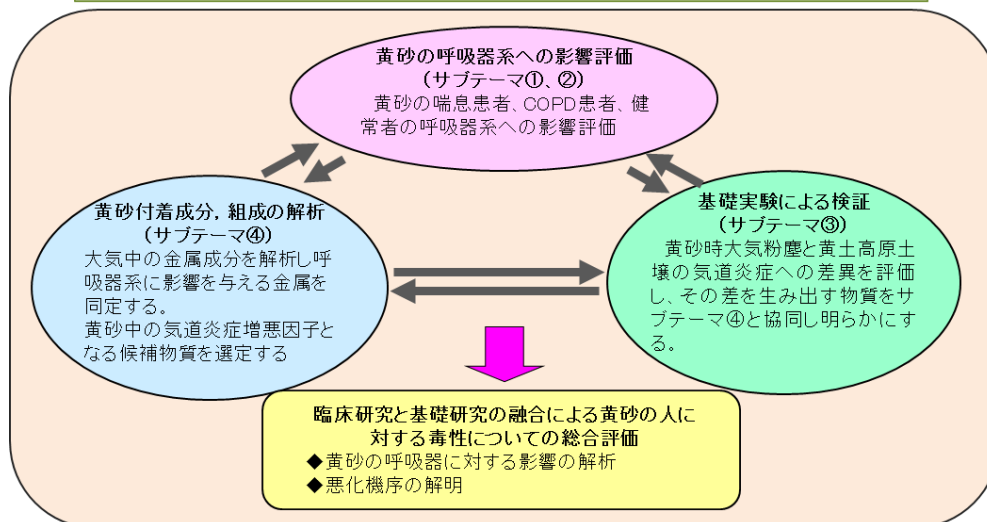
研究開発の最重要課題

■黄砂がヒトの呼吸器系に影響を与えるか

黄砂がヒトの呼吸器系に影響を与えるのか、呼吸器疾患患者と健常者の双方で検証する。

■黄砂が気道炎症を増悪させるメカニズムの解明

日本国内で採取した黄砂粉塵と発生源土壌で気道炎症誘導能の差異を比較し黄砂中あるいは黄砂に付着する物質のうち気道炎症増悪に関与する物質を明らかにする。



2. 研究開発目的

黄砂のヒト健康への影響が懸念されているがその調査は少なく本邦においても十分ではない。また、黄砂の健康影響に関するこれまでの報告のほとんどが死亡率や各疾患での入院、救急受診など重篤な影響に関する報告であり、幅広く実地医療で問題になるような影響については評価がほとんどない。本研究は呼吸器症状や呼吸機能の評価項目にし、黄砂のヒトの呼吸器系への影響を明らかにすることを目的に行った。アレルギー性疾患の喘息患者と非アレルギー性呼吸器疾患である慢性閉塞性肺疾患(Chronic obstructive pulmonary disease, COPD)患者を対象とし、黄砂が呼吸器症状、呼吸機能に影響するか評価し、黄砂の影響に疾患ごと、あるいはアレルギーの有無によって差異があるか検討した。過去の報告からは黄砂の影響は成人より小児、さらに喘息児童で高いことが予測される。しかし、本邦では黄砂の小児への影響に関する調査がほとんどない。小学校児童でピークフローメーターによる呼吸機能モニタリングを行い黄砂が児童の呼吸機能に与える影響について検討した。さらに、黄砂の小児への影響が喘息の有無によって異なるか評価した。一方、最近になりPM_{2.5}への関心が高まっているがPM_{2.5}の健康影響に関する検討は本邦では極めて少ない。PM_{2.5}が児童の呼吸機能に与える影響も同時に評価した。

黄砂が各疾患を増悪させるメカニズムについてはほとんど明らかになっていない。黄砂には様々な化学物質や真菌、細菌が付着していることも報告されており、その付着物質が黄砂毎あるいは地域によって異なることも報告されており、黄砂の疾患増悪に黄砂に付着している物質が関与している可能性がある。黄砂に付着している物質が気道炎症を増悪させることで呼吸器系に影響を及ぼしていないか明らかにするために、黄砂発生源土壌である黄土高原土壌と黄砂飛来時に飛散している本邦の大気粉塵の気道炎症惹起能の差異を比較した。また、大気粉塵の成分を解析することで黄砂に付着している物質のうち気道炎症への関与が高い物質を明らかにすることも目的とした。大気中の金属成分をモニタリングし、大気中の金属成分と児童の呼吸機能の相関を評価することで気道炎症増悪に関与する大気中金属成分を検討した。

3. 研究開発の方法

(1) 黄砂飛散が気道炎症に与える影響についてBiomarkerによる評価

① 呼気一酸化窒素濃度測定による黄砂が喘息患者の気道炎症に与える影響評価

呼気一酸化窒素濃度(FeNO)を測定することで、黄砂が喘息患者の気道炎症に与える影響を評価した。2012年2月から2013年5月の期間、対象者において1ヶ月に1度の定期受診の際にFeNO値を測定した。また、黄砂飛来時には連絡を行い可能な対象者においては定期受診を早めて受診しFeNOの測定を行った。黄砂飛来から7日間以内の測定値を『黄砂後のFeNO値』、黄砂飛来前28日までの測定値を『黄砂前のFeNO値』とした。

② 黄砂による喘息患者の症状増悪に対する効果的治療方法の検討

アレルギー性鼻炎合併喘息患者を対象に2012年2月から5月の期間の定期受診時に鼻症状と呼吸器症状

を記録した。また、黄砂飛来時あるいは煙霧時に点鼻ステロイド薬を使用した後の鼻症状と呼吸器症状を記録し点鼻ステロイド薬の効果を評価した。症状評価は、鼻症状は鼻閉と鼻汁、呼吸器症状は咳、痰、呼吸苦、喘鳴の程度について0点＝なし、1点＝軽度、2点＝中等度、3点＝重度でそれぞれ記録した。鼻症状、呼吸器症状それぞれで合計した値を総合症状点数（total symptom score）とした。

③ 黄砂が気道炎症に与える影響について毎日の呼吸機能測定による定量的評価

黄砂およびSPM、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O₃、さらに、大気中に含まれる金属成分がヒトの気道炎症にどのように影響するか評価するために、ピークフローメーターを用いた呼吸機能モニタリングを行った。ピークフローの測定は、2012年3月から5月、2013年3月から5月に行った。対象は島根県松江市の小学校に通学する児童とした。

（２）黄砂飛散が喘息およびCOPD患者の症状および活動性に与える影響調査

① 電話調査による黄砂が喘息患者およびCOPD患者の自覚症状に与える影響評価

黄砂が喘息患者、COPDの自覚症状に与える影響を評価するために黄砂飛来後から3日以内に対象者に電話調査を行い、黄砂飛来前1週間と比較した際の症状変化について評価した。電話調査は2007年から継続調査を行っており、本課題においても2011年から2013年の黄砂飛来時に同様に実施した。電話調査時の質問項目は、①呼吸器症状について：咳の増加、痰の増量、喘鳴の出現、呼吸苦の出現、増悪、②眼症状について：流涙の増悪、疼痛の有無、眼脂の増加、掻痒の有無、③鼻症状について：鼻閉の増悪、鼻汁の増悪、咽頭の異常感、④皮膚症状について：掻痒感の有無、疼痛の有無、とした。1つの項目でも陽性があった場合には増悪と判断した。一方、気道感染症がある場合、あるいは疑われる場合には、気道感染の増悪と判定し黄砂による増悪とは判定しなかった。気道感染とは、37℃以上の発熱、咽頭痛がある、家族、同僚に感冒症状がある者が居る場合を、『疑い』とし、37℃以上の発熱があり、かつ、『咽頭痛』がある場合を確定とした。

② 症状日誌およびピークフローメーターを用いた呼吸機能評価による黄砂が喘息患者の症状および呼吸機能に与える影響評価

18歳以上の鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市に在住する成人喘息患者184名を対象とした。2011年の2月から5月の期間ですべての登録した喘息患者において毎日の上気道、下気道症状の記録とピークフローメーターによって呼吸機能を測定した。上気道症状は鼻閉と鼻汁、下気道症状は咳、痰、呼吸苦、喘鳴の程度について0点＝なし、1点＝軽度、2点＝重度でそれぞれ記録した。また、予定外受診、救急受診、発熱と咽頭痛の有無、喘息増悪による全身ステロイド薬の使用の有無についても毎日記録した。咽頭痛がある、あるいは、37.5℃以上の発熱がある場合、両者がある場合には気道感染症、いずれか一方の場合には気道感染症の疑いとした。上気道症状と下気道症状について、毎日の合計した値を総合症状点数（total symptom score）とした。黄砂は2011年の5月1日から3日に飛来したと気象庁から発表された。5月1日から5月3日を『黄砂日 (ADS day)』とした。

③ 医師の診療経験調査に基づく黄砂がヒトの健康に与える影響についての評価

鳥取県西部医師会に所属し無床医療機関で内科または小児科を標榜し勤務する医師114名を対象に黄砂が原因となって症状増悪をしたと考えられる患者の診療経験についてアンケート調査を行った。黄砂が飛散した2011年5月3日から5月5日の後にアンケート用紙の配布を開始し6月30日までに回収したものを解析の対象とした。2011年の黄砂飛散も含め過去に黄砂飛散時に呼吸器症状、鼻症状、眼症状、皮膚症状の増悪を訴える患者の診療経験について質問し、増悪した患者の診療経験がある場合には増悪した症状について回答を求めた。また、黄砂が誘因と思われる喘息発作の経験とその強度について質問した。

④ 黄砂が喘息患者の喘息コントロールと呼気一酸化窒素濃度を与える影響について

18歳以上の鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市に在住する成人喘息患者184名を対象にした。2013年3月から5月の期間に喘息のコントロール状態について、1週間毎にAsthma control questionnaire 5 (ACQ5)の記入を行い評価した。

（３）黄砂が気道炎症細胞および気道構成細胞に与える影響についての基礎的検討

① 黄砂曝露が気道構成細胞に与える影響について

黄砂含む大気粉塵によって気道炎症が増悪する場合に気道上皮細胞、気管支平滑筋細胞、線維芽細胞

胞がどのような反応を示すか、すなわちどのような炎症性物質（サイトカイン）を分泌するかが重要になる。黄砂粉塵が気管支、肺内に取り込まれた際にどのようなサイトカインの分泌が高くなるのか検討した。このうち気道平滑筋細胞と黄砂との関連性について検討するための実験系確立を以下の方法で行った。気道平滑筋細胞を用い、刺激は黄土高原土壌（CJ-1 China Loess）で行った。CJ-1 China Loessをオートクレーブで滅菌後にPBSで10mg/mlに調整し、その後、気道平滑筋細胞を50 μ g/ml～500 μ g/mlの濃度で30分、1時間、3時間、6時間、12時間、24時間培養した。刺激培養後に上清を採取した。気道平滑筋細胞が分泌するサイトカインのうち、特に気道炎症において重要な役割を果たすinterleukin (IL)-8、RANTES、thymic stromal lymphopoietin (TSLP)、EotaxinをELISAキットで測定し、黄砂の毒性を評価する上で有用なサイトカインを検証した。

② IL-8 promoter-luciferase gene reporter assayによる黄砂が気道炎症に与える影響の評価

黄土高原土壌（CJ-1 China Loess）と黄砂時の大気粉塵、さらに黄砂時大気粉塵を溶解した液を1時間氷上で静置し採取した上清でTHP-1 derived IL-8 reporter cell（THP-G8細胞）を刺激しIL-8の転写活性を測定した。IL-8転写活性は、IL-8の転写活性を示すstable luciferase orange (SL0)をGAPDHの転写活性を示すstable luciferase red (SLR)で除すことで細胞数を補正しnormalized SL0 luciferase activity (nSL0-LA)で判定した。培養液中のIL-8濃度測定をELISA法によって測定した。また、黄砂時大気粉塵溶解液およびCJ-1溶解液中のエンドトキシン濃度の測定もELISA法によって測定した。

③ 動物モデルによる黄砂が気道炎症に与える影響の評価

マウスに黄土高原土壌と黄砂飛来時の鳥取県での大気粉塵を点鼻投与し、気管支肺胞洗浄（BAL）を行い気管支肺内の炎症細胞浸潤の程度を比較検討した。さらに、肺組織標本を作製し同様に黄土高原土壌と黄砂飛来時の鳥取県での大気粉塵の炎症惹起能について比較検討を行った。

(4)大気粉塵の量及び化学成分の季節変動の解析

福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町、富山県射水市において大気粉塵を2011年6月から2014年2月までハイボリウムエアサンプラーを用いて石英繊維フィルター上に捕集した。その際、フィルターは24時間毎に交換し、大気粉塵量を測定した。2012年2月～5月、2013年2月～5月については原則として毎平日に、それ以外の月は原則として第2週目の平日4日間に大気粉塵を捕集した。大気粉塵を捕集したフィルターは、粉塵を捕集している部分の面積を100%として、その内10%を金属分析、5%をイオン分析、40%を有機成分分析用に切り分けた。金属元素は、試料フィルターをふっ化水素酸・硝酸・過塩素酸法により分解して試験溶液を調製し、Ba、Ca、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ti及びZnは誘導結合プラズマ発光分光分析法により、V、Cd、Pb、Ni及びCrは原子吸光光度法により測定した。イオンは、試料フィルターから水抽出法により試験溶液を調製し、陰イオンとしてCl⁻、NO₃⁻及びSO₄²⁻を、陽イオンとしてNa⁺、K⁺、NH₄⁺、Mg²⁺及びCa²⁺を電気伝導度検出器付きイオンクロマトグラフで測定した。有機成分は、試料フィルターから有機溶媒抽出法により試験溶液を調製し、多環芳香族炭化水素（PAHs；フルオランテン（FL）、ピレン（PY）、ベンゾ[a]アントラセン（BaA）、クリセン（CHR）、ベンゾ[f]フルオランテン（BbF）、ベンゾ[k]フルオランテン（BkF）、ベンゾ[a]ピレン（BaP）、ジベンゾ[a,h]アントラセン（DahA）、ベンゾ[g,h,i]ペリレン（BghiP）及びインデノ[1,2,3-c,d]ピレン（IcdP））を蛍光検出器を用いた高速液体クロマトグラフ法により測定した。後方流跡線解析は、米国海洋大気庁（NOAA）のHYSPRITを用いて行った。太宰府市、湯梨浜町及び射水市を起点として大気粉塵捕集の開始及び終了の中間である22時（JST）を計算開始時間として、高度1500 mで等温位法により96時間遡って行った。

4. 結果及び考察

(1) 黄砂飛散が気道炎症に与える影響についてBiomarkerによる評価

① 呼気一酸化窒素濃度測定による黄砂が喘息患者の気道炎症に与える影響評価

『74名で『黄砂前』と『黄砂後』にFeNOの測定を行った。『黄砂前』のFeNO値が19.8±10.1 ppbであったのに対して、『黄砂後』では27.8±15.9ppbであり『黄砂後』のFeNO値が有意に高かった。黄砂曝露によって喘息患者の好酸球性気道炎症が増悪することが示唆された。

② 黄砂による喘息患者の症状増悪に対する効果的治療方法の検討

2012年2月から5月の期間に黄砂によって鼻症状あるいは呼吸器症状の増悪自覚するスギ花粉症、アレルギー性鼻炎の患者において点鼻ステロイド薬の追加が必要になった対象において、治療薬の処方時に鼻症状と呼吸器症状を記録し、黄砂時の呼吸器症状増悪に対する点鼻ステロイド薬の効果について

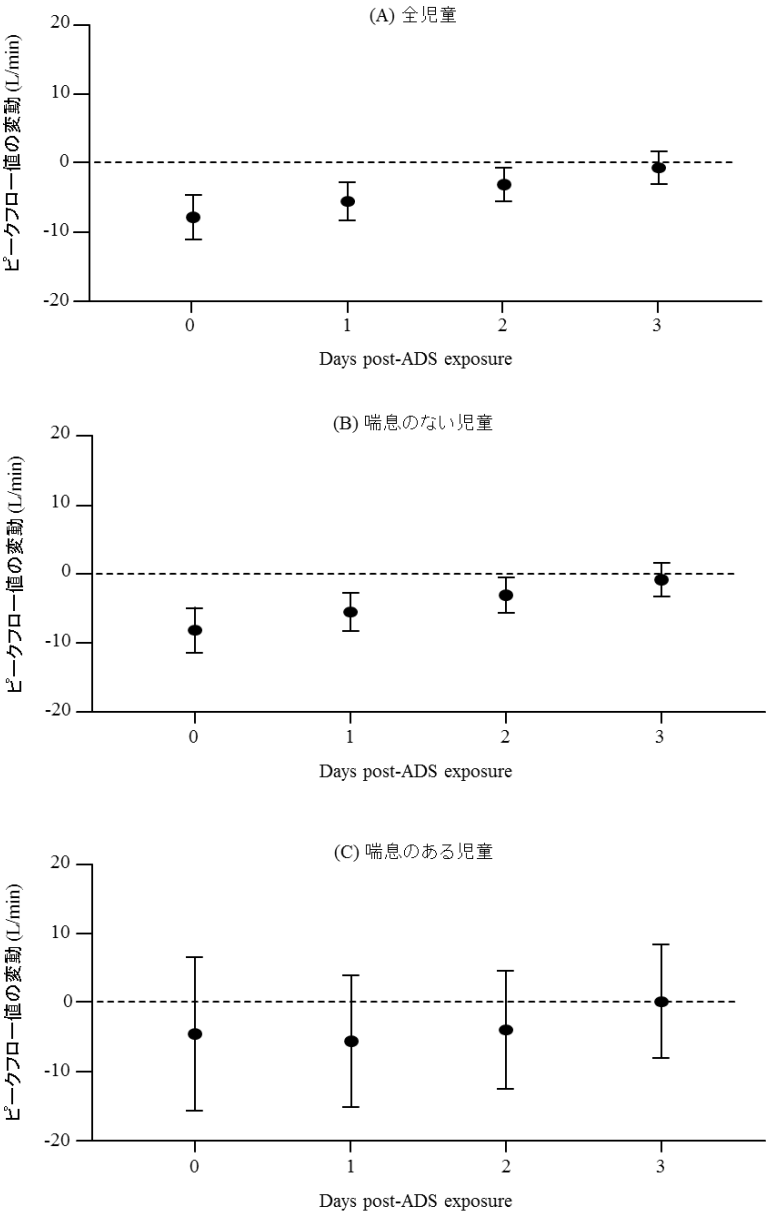
検証した。その結果、黄砂時の呼吸器症状増悪時に点鼻ステロイド薬を使用することで32名の患者のうち18名で呼吸器症状スコアが改善していた

③ 黄砂が気道炎症に与える影響について毎日の呼吸機能測定による定量的評価

2012年3月に松江市内の小学校35校のうち4校に通学する小学校3年生児童（年齢8歳あるいは9歳）を対象に2012年3月から5月、2013年3月から5月の期間、登校日にピークフローによる呼吸機能を登校時に行い、黄砂および大気汚染物質が児童の呼吸機能に与える影響を評価した。2013年3月に401名が研究に参加した。児童2名が記録を行わず399名の記録を2012年6月に回収した。同一の集団で2013年3月から5月まで同様の調査を行った。2013年3月から5月までの調査では16名で記録が行われず、1名は疾病のため記録が出来なかった。

図(1)-1に黄砂への曝露が児童のピークフロー値に与える影響を示す。黄砂曝露から3日後までのピークフロー値の変動を示してあるが、黄砂の曝露があった日に児童のピークフロー値は最も低下している。全児童の解析結果では、黄砂曝露日に -7.82 L/min (95% CI, -10.93 to -4.71 , $P < 0.001$) ピークフロー値が低下し、その後、黄砂曝露1日後に 5.49 L/min (95% CI, -8.14 to -2.85 , $P < 0.001$)、2日後に 3.15 L/min (95% CI, -5.54 to -0.75 , $P = 0.01$)、3日後に 0.72 L/min (95% CI, -3.03 to 1.59)の低下を認めた。喘息のない児童では、黄砂曝露日に 8.17 L/min (95% CI, -11.40 to -4.93 , $P < 0.001$) 低下し、黄砂曝露1日後に 5.49 L/min (95% CI, -8.24 to -2.74 , $P < 0.001$)、2日後に 3.07 L/min (95% CI, -5.56 to -0.58 , $P = 0.016$)、3日後に 0.82 L/min (95% CI, -3.22 to 1.59)のピークフロー値の低下があった。喘息のある児童では、黄砂曝露日には 4.55 L/min (95% CI, -15.63 to 6.53)、黄砂曝露1日後に 5.65 L/min (95% CI, -15.12 to 3.82)、2日後に 4.00 L/min (95% CI, -12.53 to 4.53)、3日後に 0.18 L/min (95% CI, -8.05 to 8.40) のピークフロー値の低下を認めた。全児童と喘息のない児童では黄砂2日後までピークフロー値の有意な低下が認められた。

次に、lidarの観測データを環境省から入手し黄砂消散係数 (mineral dust particles)、球形消散係数 (air-pollution aerosol)、SPM、PM2.5、SO₂、NO₂、Oxとピークフロー値の関連性について解析を行った(表(1)-4)。黄砂消散係数は、全児童、喘息のない児童、喘息のある児童の全てのピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、それぞれ黄砂消散係数が1/km上昇する毎に全児童では 3.26 L/min (95% CI, -4.66 to -4.71 , $P < 0.0001$)、喘息のない児童では 3.43 L/min (95% CI, -4.51 to -2.34 , $P < 0.0001$)、喘息のある児童では 5.58 L/min (95% CI, -9.00 to -2.17 , $P = 0.001$)のピークフロー値の低下を認めた。SPMも全児童、喘息のない児童、喘息のある児童の全てのピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、SPMが1 μ g/m³上昇する毎に全児童では 2.16 L/min (95% CI, -2.88 to -1.43 , $P < 0.001$)、喘息のない児童では 2.06 L/min (95% CI, -2.81 to -1.30 , $P < 0.001$)、喘息のある児童では 3.11 L/min (95% CI, -5.70 to -0.54 , $P < 0.02$) のピークフロー値の低下を認めた。同様に、PM2.5も全児童、喘息のない児童、喘息のある児童の全てのピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、PM2.5が1 μ g/m³上昇する毎に全児童で 2.58 L/min (95% CI, -3.59 to -1.57 , $P < 0.001$)、喘息のない児童では 2.46 L/min (95% CI, -3.51 to -1.41 , $P < 0.001$)、喘息のある児童では 3.69 L/min (95% CI, -7.28 to -0.10 , $P < 0.05$) のピークフロー値の低下を認めた。



図(1)-1 黄砂の児童のピークフロー値に対する影響

(2) 黄砂飛散が喘息およびCOPD患者の症状および活動性に与える影響調査

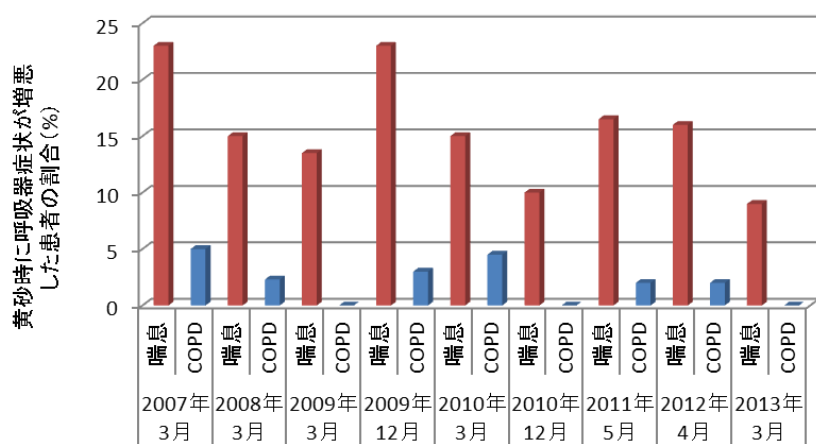
① 電話調査による黄砂が喘息患者およびCOPD患者の自覚症状に与える影響評価

2007年から継続調査を行っており、本課題においても2011年から2013年の黄砂飛来時に同様に黄砂による症状変化について、18歳以上の鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市に在住する喘息患者およびCOPD患者を対象に電話での聞き取り調査を実施した。調査した患者数を表(2)-1に2007年から2010年までのものも含めて示す。2011年5月の黄砂時に喘息患者282名、COPD患者0名、2012年4月の黄砂時に喘息患者242名、COPD患者34名、2013年3月の黄砂時に喘息患者145名、COPD患者20名の調査を行った。

居住地	疾患	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	合計
調査回数		1回	1回	3回	2回	1回	1回	1回	10回
総数	喘息	165	117	346	363	282	242	145	1,660
	COPD	13	28	51	49	—	34	20	195
鳥取県	喘息	142	117	310	271	207	204	145	1,047
	COPD	8	28	42	38	—	34	20	114
島根県	喘息	—	—	—	—	14	16	—	14
北九州	喘息	—	—	36	75	28	8	—	139
	COPD	—	—	9	9	—	—	—	18
豊岡	喘息	23	—	—	17	33	14	—	73
	COPD	5	—	—	2	—	—	—	7

表(2)-1 電話調査による黄砂が喘息患者およびCOPD患者の自覚症状に与える影響評価の調査実施数

2011年5月の黄砂時に喘息患者16.5%、COPD患者2%、2012年4月黄砂時喘息患者16%、COPD患者2%、2013年3月黄砂時喘息患者9%、COPD患者0%で呼吸器症状が黄砂後に増悪していた。黄砂時に喘息患者の少ないときに8%、多いときには23%において呼吸器症状が増悪していた。一方で、非アレルギー性疾患であるCOPD患者においては0%~5%であり、調査対象者数は異なるものの明らかに喘息患者において黄砂時に呼吸器症状が悪化しやすいと考えられた（図(2)-1）。



図(2)-1 電話調査結果

② 症状日誌およびピークフローメーターを用いた呼吸機能評価による黄砂が喘息患者の症状および呼吸機能に与える影響評価

黄砂日の鼻症状スコアは 0.45 ± 0.08 点であり、非黄砂日の 0.26 ± 0.05 点に比較して有意に高かった。アレルギー性鼻炎あるいは副鼻腔炎がある成人喘息患者においては、黄砂日の鼻症状スコアは非黄砂日に比較して同様に高かった。しかし、アレルギー性鼻炎あるいは副鼻腔炎がない成人喘息患者では、黄砂日に鼻症状の有意な増悪はなかった。成人喘息患者全体では黄砂日の呼吸器症状スコアは 0.35 ± 0.61 点であり、非黄砂日の 0.16 ± 0.28 点に比較して有意に高かった。さらに、呼吸器症状についてはアレルギー性鼻炎あるいは副鼻腔炎の有無に関わらず黄砂日のスコアは非黄砂日に比較して高かった。

③ 医師の診療経験調査に基づく黄砂がヒトの健康に与える影響についての評価について結果と考察
対象とした医師114名のうち内科医63人、小児科医11人から回答を得た。36人が黄砂飛散により呼吸器症状が増悪したと考えられる患者の診療をしていた。また、35人が鼻症状の、25人が眼症状の増悪した患者を診療していた。皮膚症状が増悪した患者を診療した医師はなかった。月10例以上の喘息患者を診察する医師では70%以上で黄砂が原因と考えられる呼吸器症状増悪患者の診療を経験していた。16人は黄砂が誘因と考えられる喘息発作の治療経験があったがその強度は軽度までであった。一般医家の半数で黄砂が起因となって呼吸器、鼻、眼症状が増悪したと考えられる患者の診療経験があり黄砂は健康に影響する可能性が示唆された。

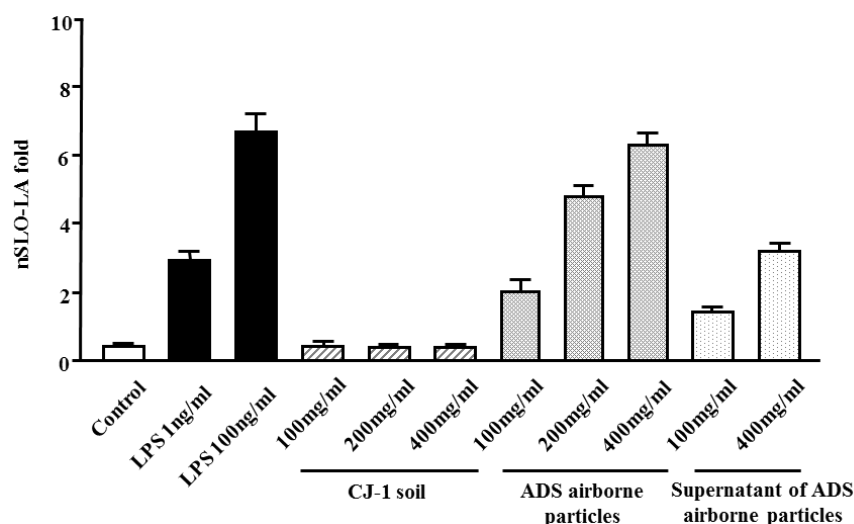
(3) 黄砂が気道炎症細胞および気道構成細胞に与える影響についての基礎的検討

① 黄砂曝露が気道構成細胞に与える影響について

気道構成細胞のうちヒトから分離した気道平滑筋細胞をCJ-1で刺激し、上清中のinterleukin (IL)-8、RANTES、TSLP、Eotaxinを測定した。その結果、IL-8産生の増加が認められた。一方で、RANTES、TSLP、Eotaxinの産生に影響はなかった。黄砂の気道炎症への影響を評価する際には、従来の報告通りIL-8が有用なマーカーになることが示唆された。

② IL-8 promoter-luciferase gene reporter assayによる黄砂が気道炎症に与える影響

THP-G8細胞をCJ-1および黄砂時大気粉塵で刺激培養後に発光強度を測定した。CJ-1での刺激ではnSL0-LAの増加は認められなかった（図(3)-1）。一方、黄砂時に捕集した大気粉塵でTHP-G8細胞を刺激すると濃度依存性にnSL0-LAの増加が認められた。黄砂時大気粉塵懸濁液上清でもnSL0-LAは増加していた。しかし、黄砂時大気粉塵懸濁液上清で刺激した場合、黄砂時大気粉塵懸濁液に比較してnSL0-LAは有意に低値であった。

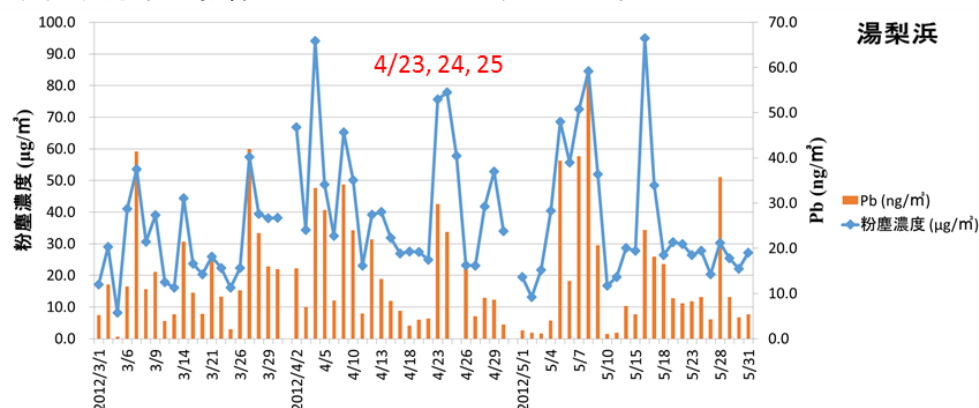


図(3)-1 CJ-1、黄砂時大気粉塵、黄砂時大気粉塵懸濁液上清によるIL-8 transcriptional activity

黄砂発生源土壌の黄土高原土壌ではIL-8産生誘導が確認されなかった。一方、黄砂時に鳥取県で捕集した大気粉塵ではIL-8産生誘導が確認された。すなわち、黄土高原土壌と黄砂時に鳥取県で浮遊している大気粉塵は全く異質な物になっていることを示唆していた。

(4) 大気粉塵の量及び化学成分の季節的変動の解析

2011年6月から2012年3月までの大気粉塵捕集日のうち、気象庁による調査で福岡県、鳥取県及び富山県において黄砂が観測された日はなかった。しかし、大宰府市では、2012年3月に高い粉塵濃度(70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上)の日が多くみられた。2012年4月から2013年3月までの捕集日のうち、福岡県、鳥取県及び富山県において2012年4月及び2013年3月に気象庁から黄砂の観測が報告された日があり、黄砂観測の報告のあった日の延べ日数は18日であった。このうち粉塵濃度が70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上であった日の延べ日数は14日であった。黄砂の観測が報告されない日で、塵濃度が高かった日は、いずれの地点でも、2012年4月、5月、2013年2月、3月にみられた。2013年4月～2014年2月の捕集日のうち、気象庁より福岡県、鳥取県及び富山県において黄砂が観測されたと報告された日はなかった。しかし、2013年4月、5月にいずれの地点においても高い粉塵濃度の日が多数みられた。地殻中に多く含まれているCa、Fe、Mgなどは黄砂飛散の指標になると報告されている。また、K、Cd、Ni、Crなどは廃棄物燃焼、Vは石油燃焼、Pbは有鉛ガソリン及び石炭燃焼に伴う大気汚染の指標になると報告されている。Fe濃度、Ca濃度、Pb濃度、V濃度は粉塵濃度が高いときに高い傾向があり、それぞれの金属元素濃度は粉塵濃度と強い相関性を示した。石炭燃焼の指標になることが報告されている SO_4^{2-} 濃度も粉塵濃度が高いときに高くなる傾向があり、 SO_4^{2-} 濃度と粉塵濃度は強い相関性を示した。黄砂の観測が報告されていない日においても金属元素濃度及び SO_4^{2-} 濃度が黄砂飛散時と同程度に高い日が多くみられ、それらの日では黄砂飛散時と同程度の大気汚染があったと考えられた。Pbと SO_4^{2-} は長距離輸送汚染の指標となることが報告されており、越境汚染の影響が大きいことが示唆された。



図(4)-1 湯梨浜町の大気粉塵濃度及び大気粉塵中のPb濃度(2012年3月～5月)
グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日(気象庁ホームページ)

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

これまでに黄砂が児童の呼吸機能に与える影響について本邦では調査が行われていなかった。本研究が初めて黄砂が児童の呼吸機能を低下させることを明らかにした。さらに、lidarによる黄砂消散係数と球形消散係数と児童呼吸機能を評価した研究は検索した範囲ではこれまでにない。本研究では黄砂消散係数と球形消散係数と児童呼吸機能との関連を評価し、黄砂消散係数と球形消散係数と児童の呼吸機能が統計学的に有意な負の相関を示すことを世界で初めて明らかにした。最近になりPM_{2.5}への関心が本邦で急速に高まっている。本邦ではこれまでにPM_{2.5}と児童の呼吸機能の関連を調査した研究はなかった。本研究は初めてPM_{2.5}と児童の呼吸機能が負の相関を示すことを明らかにした。PM_{2.5}が1 μg/m³上昇する毎にピークフロー値が、喘息のない児童では2.46 L/min、喘息のある児童では3.69 L/min低下していた。

黄砂の影響が黄砂毎に異なることを児童の呼吸機能調査を通じて明らかにした。大気粉塵あるいは大気汚染物質がヒトの呼吸器系に影響するときに気管支肺内のIL-8濃度が上昇することが報告されている。鳥取県環境学術研究等振興事業と連携して黄砂のIL-8産生誘導が黄砂毎に大きく異なることを明らかにした。黄砂の健康影響を考える上で黄砂の組成を考慮する必要があることを明らかにした。

大気中の金属成分のうちCa、Cu、Fe、Mn、Ti、Zn、V、Cd、Pbの濃度が高いときには児童の呼吸機能が低下しやすいことを明らかにした。特にPbは越境してくる大気汚染物質を反映している可能性が指摘されている。大気粉塵中のPbモニタリングが健康被害を予測する上で有用である可能性を示した。3月から5月に、黄砂観測日と同様に大気粉塵濃度が高く、粉塵中の成分も黄砂飛散時と同様の日が多数あることが明らかになった。また、それらの粉塵では長距離輸送汚染の指標となることが報告されているPb濃度及びSO₄²⁻濃度が高く、越境汚染の影響が大きいことが示唆された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特記すべき事項なし。

<行政が活用することが見込まれる成果>

黄砂が児童にどのような影響を与えるのか本邦での報告は少ないが、本研究において黄砂曝露が児童の呼吸機能を低下させることを明らかにした。さらに、児童の呼吸機能がlidarの黄砂消散係数と球形消散係数と良く相関することも見出した。lidarの黄砂消散係数は児童の屋外活動可否を決定する基準になり得ることを示した。また、最近PM_{2.5}に関する関心が高まっているがPM_{2.5}と健康影響についての本邦での知見は少ない。本研究ではPM_{2.5}が上昇すると児童の呼吸機能が低下することを明らかにした。さらに、PM_{2.5}が1 μg/m³上昇する毎にピークフロー値が、喘息のない児童では2.46 L/min、喘息のある児童では3.69 L/min低下するという具体的な数字を明らかにしている。本邦でのPM_{2.5}が具体的にどのような健康影響があるのか提示する際に根拠と出来る研究成果と考える。

黄砂発生源土壌である黄土高原土壌と黄砂飛来時に日本で飛散している大気粉塵では気道炎症に強く影響するIL-8産生誘導能が全く異なることを明らかにした。このことは、黄砂に付着している物質がヒトの健康に影響を与えることを示していると思われる。今後、黄砂に付着しているどのような物質が健康への影響が強いのか検討することに意義が認められる結果になったと考えられる。さらに、黄砂など大気粉塵中に含まれるエンドトキシンが健康に影響する重要な物質の一つであることを見出した。今後、大気粉塵による健康影響を考えていくうえでエンドトキシンが重要な物質である根拠を示した。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Watanabe M, Kurai J, Igishi T, Yamasaki A, Burioka N, Takeuchi H, Sako T, Touge H, Nakamoto M, Hasegawa Y, Chikumi H, Matsumoto S, Yamaski C, Minato S, Ueda Y, Horasaki K, Watanabe T, Shimizu E. Influence of Asian Desert Dust on Lower Respiratory Tract Symptoms in Patients with Asthma over 4 Years. Yonago Acta medica 2012; 55: 41-48
- 2) T. Hasei, H. Nakanishi, Y. Toda, T. Watanabe: Development of a two-dimensional high-performance liquid chromatography system coupled with on-line reduction as a new efficient analytical method of 3-nitrobenzanthrone, a potential human carcinogen. J

Chromatography A 2012; 1253: 52-57.

- 3) 渡部仁成, 倉井淳, 井岸正, 都田裕之, 山崎章, 長谷川泰之, 山崎千恵, 渡辺徹志, 清水英治. 医師の診療経験調査による黄砂が臨床症状に与える影響についての検討. 鳥取医学雑誌 2012; 40: 62-67.
- 4) Masanari Watanabe, Jun Kurai, Katsuyuki Tomita, Hiroyuki Sano, Satoshi Abe, Rumiko Saito, Sayaka Minato, Tadashi Igishi, Naoto Burioka, Takanori Sako, Kazuhito Yasuda, Masaaki Mikami, Shinichi Kurita, Hirokazu Tokuyasu, Yasuto Ueda, Tatsuya Konishi, Akira Yamasaki, Setsuya Aiba, Mitsuo Oshimura, and Eiji Shimizu. Effects on asthma and induction of interleukin-8 caused by Asian dust particles collected in western Japan. J Asthma 2014 Mar 27. [Epub ahead of print]
- 5) Watanabe M, Kurai J, Shimizu E. Influence of Asian dust storms on asthma in western Japan. Gene and Environment in press.

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 長谷井友尋, 穀内修, クウリバリスレイマン, 秋山雅行, 浅川大地, 嵐谷圭一, 池盛文数, 稲葉洋平, 片岡洋行, 岸川直哉, 世良暢之, 出口雄也, 鳥羽陽, 船坂邦弘, 洞崎和徳, 山口孝子, 渡辺徹志: 日本環境変異原学会第40回大会(2011)「全国14地点における大気粉塵の変異原性及び化学成分の年内変動並びにそれらに対する長距離輸送の影響」
- 2) 渡部仁成: 第41回大気汚染公害認定研究会, 岡山県公害健康被害認定審査会(2012)「黄砂飛散が喘息に与える影響」
- 3) 渡辺徹志, 長谷井友尋, 木戸瑞佳, 相部美佐緒, 湊 沙花, 世良暢之, 船坂邦弘, 浅川大地, 池盛文数, 渡部仁成: 第53回大気環境学会年会(2012)「大気粉塵の化学成分及び生物活性の季節的変動」
- 4) 渡部 仁成, 阿部 智志, 齋藤 るみ子, 倉井 淳, 山崎 千恵, 山崎 章, 相場 節也, 押村 光雄, 湊 沙花, 上田 豊, 清水 英治. 「THP-1-derived IL-8 reporter cell Line(THP-G8)を用いた黄砂発生源土壌と黄砂時降下粉塵のアレルギー毒性の相違に関する検討」 第53回日本呼吸器学会学術講演会、2013年
- 5) 渡部 仁成, 倉井 淳, 山崎 章, 清水 英治. 「黄砂および煙霧の小中学校児童の呼吸機能への影響について」 第63回日本アレルギー学会秋季学術大会、2013年
- 6) 倉井 淳, 渡部 仁成, 阿部 智志, 齋藤 るみ子, 山崎 章, 相場 節雄, 押村 光雄, 清水 英治. 「花粉と黄砂 鳥取県で採取した黄砂時降下粉塵の免疫学的毒性評価」 第63回日本アレルギー学会秋季学術大会、2013年
- 7) 倉井 淳, 渡部 仁成, 山崎 章, 清水 英治. 「ダニ抗原誘発性気管支喘息モデルマウスにおける黄砂時降下粉塵の気道炎症増強効果の検討」 第63回日本アレルギー学会秋季学術大会、2013年
- 8) 渡辺徹志: 平成25年度日本環境変異原学会公開シンポジウム(2013)「大気粉塵及び変異原性物質による汚染 —黄砂現象との関係」
- 9) Watanabe T, Coulibaly S, Hasei T, Funasaka K, Asakawa D, Sera N, Seiyama T, Kido M, Toriba A, Hayakawa K, Tang N, Zhao L, Chung HY, Watanabe M, Wakabayashi K: Trans-boundary air pollution with genotoxic compounds in East Asia. 11th International Conference on Environmental Mutagens, Foz Do Iguaçu, Brazil, 2013

7. 研究者略歴

課題代表者: 渡部仁成 鳥取大学医学部卒業, 医学博士, 現在鳥取大学医学部附属病院講師

研究分担者

- 1) 鯉岡直人 鳥取大学医学部卒業, 医学博士、ミネソタ大学留学(米国)、現在鳥取大学医学部教授
- 2) 山崎章 鳥取大学医学部卒業, 医学博士、マニトバ大学(カナダ)留学、現在鳥取大学医学部附属病院講師
- 3) 渡辺徹志 京都薬科大学薬学部卒業, 薬学博士、ノースカロライナ大学(米国)留学、元米国環境保護局研究員, 現在京都薬科大学薬学部教授

5C-1154 黄砂のヒト健康への影響に対する臨床および基礎研究の融合アプローチ

(1) 黄砂飛散が気道炎症に与える影響について Biomarker による評価

鳥取大学 医学部附属病院 第三内科診療科群 渡部仁成

〈研究協力機関〉

情報・システム研究機構統計数理研究所

野間久史

平成 23(開始年度)～25 年度累計予算額：36,032 千円

(うち、平成 25 年度予算額：7,858 千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

黄砂の健康影響が報告されているが調査の多くが入院、救急受診、死亡などへの影響で評価されている。また、黄砂のヒトへの影響を biomarker で評価した報告は少なく、海外で呼吸機能を用いて評価されたものが散見されるに過ぎない。黄砂がヒトの健康、特に呼吸器システムにどのような影響を与えているのか、児童のピークフローを用いた呼吸機能評価と成人喘息患者で好酸球性気道炎症を反映する呼気一酸化窒素 (FeNO) の測定により評価を行った。

黄砂の前後で成人喘息患者の FeNO を比較すると黄砂後に FeNO 値は上昇しており黄砂曝露が好酸球性気道炎症を増悪させている可能性が示唆された。また、本研究は本邦で初めて黄砂が児童の呼吸機能を低下させることを明らかにした。さらに、lidar による黄砂消散係数と球形消散係数と児童呼吸機能の関係について検討した研究は検索した範囲でこれまでにない。本研究では、黄砂消散係数と球形消散係数と児童の呼吸機能が統計学的に有意な負の相関を示すことを世界で初めて明らかにした。この結果からも黄砂により児童の呼吸機能が低下することが示唆された。一方、黄砂の児童呼吸機能への影響は黄砂毎に異なることも見出した。この原因として黄砂毎に気道炎症で重要な役割を果たす interleukin (IL)-8 産生誘導が異なる可能性が示唆された。このような黄砂による呼吸器システムの増悪に対し、アレルギー性鼻炎を合併している場合に点鼻ステロイド薬が有効な治療である可能性も明らかにした。

最近になり本邦で関心が高くなっている PM2.5 と児童の呼吸機能の関連を解析した結果、PM2.5 と児童の呼吸機能が負の相関をすることを明らかにした。PM2.5 が $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇する毎にピークフロー値が、喘息のない児童では 2.46 L/min、喘息のある児童では 3.69 L/min 低下していた。また、大気中の金属成分のうち Ca、Cu、Fe、Mn、Ti、Zn、V、Cd、Pb の濃度が高いときには児童の呼吸機能が低下しやすいことを明らかにした。

[キーワード]

児童、呼吸機能、呼気一酸化窒素、黄砂、PM2.5

1. はじめに

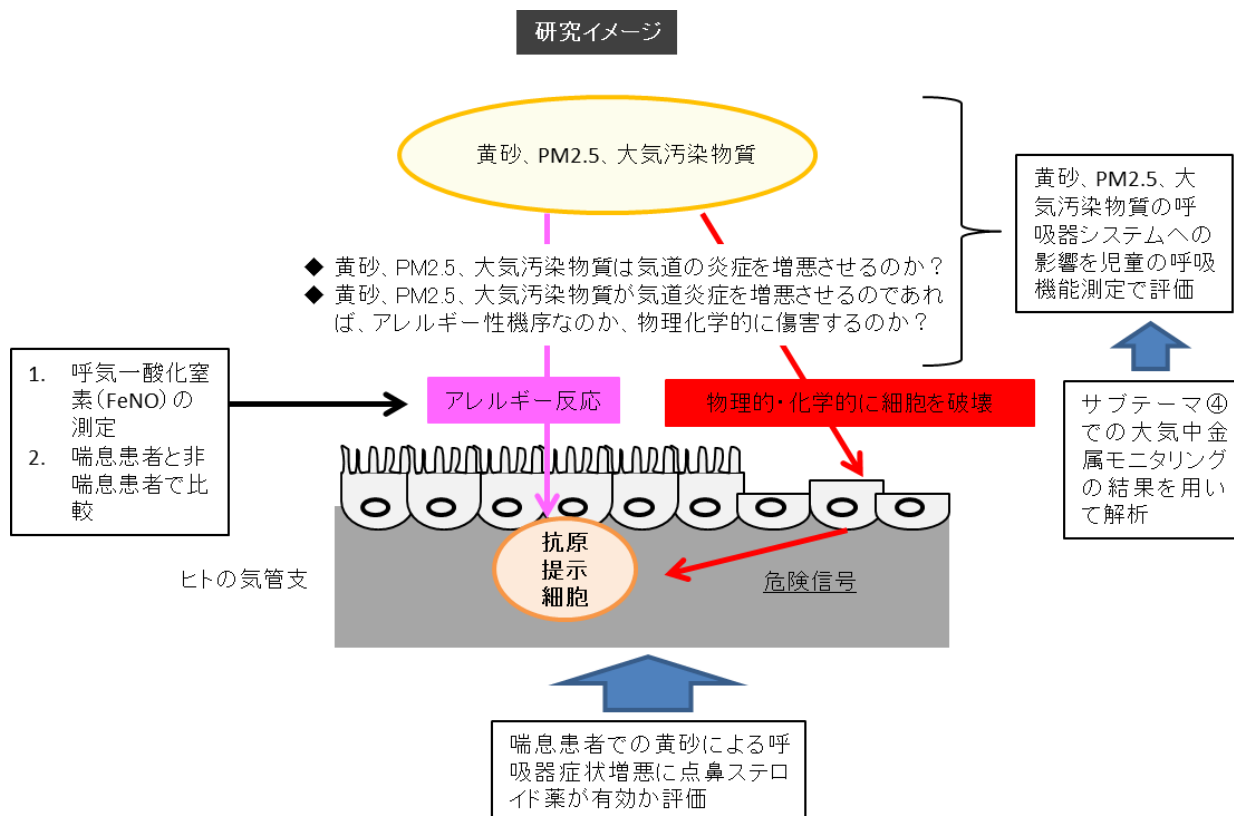
黄砂には様々な金属成分、化学物質、有機成分が付着していることが明らかになってきたこともあり、健康影響の懸念が高まっている¹⁾⁻³⁾。東アジア各国を中心に黄砂の健康被害についての検討が行われ、黄砂飛散後に全死亡率、循環器疾患、呼吸器疾患、脳血管疾患の入院、受診頻度が増加することが報告されるようになってきている⁴⁾⁻²⁰⁾。本邦でも黄砂飛散時に小児喘息患者での入院率が上昇することが報告されている²¹⁾。我々もこれまでに、①黄砂飛散時に喘息患者の呼吸器症状が増悪する、②花粉が同時に飛散すると増悪を訴える患者数が増加する、③全ての花粉飛散がない12月の黄砂飛散時においても呼吸器症状は増悪する、④増悪のリスク因子はアレルギー性鼻炎の合併である、⑤黄砂飛散の度に悪化する群と必ずしも悪化しない群が存在する、⑥調査対象者の居住地は米子市、豊岡市、北九州市であったが、増悪頻度は豊岡市が最も高く、次いで米子市、北九州市の順であった。都市大気汚染の程度が軽度な地域である方が同等程度の黄砂飛散であっても影響を受けやすい、⑦ピークフロー(peak flow expiratory flow, PEF)モニタリングによる呼吸機能への影響評価では、黄砂飛来により呼吸器症状が増悪する喘息患者では黄砂が飛来していない時と比較してPEFは黄砂飛来時に約4%低下する。さらに、黄砂飛来時に呼吸器症状の増悪を訴える群でのPEFはsuspected particulate matter (SPM)と有意な相関を認めることなどを明らかにしてきた。しかしながら一方で、黄砂が循環器疾患、呼吸器疾患、アレルギー疾患の増悪に影響しなかったとする報告もあり、黄砂が喘息をはじめヒトの健康に影響すると確定するには知見はまだ十分とは言えない。黄砂が喘息に影響したとする報告は他の疾患に比較して多くあるが、黄砂が喘息を悪化させると仮定し、その増悪機序の解明、効果的な治療方法を明らかにすること、さらには発病に影響するか検討することは極めて重要と考えられる。

2. 研究開発目的

黄砂のヒト健康への影響が懸念されているが、その調査は少なく本邦においても十分ではない。また、黄砂の健康影響に関するこれまでの報告のほとんどが死亡率や各疾患での入院、救急受診など重篤な影響に関する報告であり、biomarkerに基づく影響は評価がほとんどない。さらに、黄砂が呼吸器疾患を増悪させると仮定し、どのようなメカニズムであるかはほとんど解明されていない。

本テーマでは、黄砂およびSPM、PM2.5、sulfur dioxide (SO₂)、nitrogen dioxide (NO₂)、photochemical oxidants (O_x)などの大気汚染物質、さらには、大気中に含まれる金属成分がヒトの気道炎症にどのように影響するか評価することを目的にした。ヒトで気道炎症が増悪した際に呼吸機能が低下することが報告されている^{22), 23)}。そこで、小学校児童を対象に呼吸機能モニタリングを行い、黄砂をはじめSPM、PM2.5、SO₂、NO₂、O_xなどの大気汚染物質が児童の気道炎症に影響するか調査した。さらに、喘息がある児童と喘息がない児童で比較を行い、喘息の有無が黄砂をはじめSPM、PM2.5、SO₂、NO₂、O_xなどの大気汚染物質に対する感受性因子になるかを評価した。黄砂、SPM、PM2.5、SO₂、NO₂、O_xなどの大気汚染物質が呼吸器疾患を増悪させる際にアレルギー機序を介すのか、物理化学的に傷害をするのか明らかにするのは増悪メカニズムを解明する上で極めて重要である。通常、ヒトでの気道炎症を精緻に評価するには誘発喀痰や気管支鏡下に肺生検や気管支肺胞洗浄を行い、どのような種類の白血球が増加しているのか、あるいはどのような炎症性サイトカインが上昇しているのか測定する必要がある。しかし、侵襲が強く、また、その手技も煩雑なために一度に多くの患者の調査を行うことはできない。近年、喘息患者での好酸球

性気道炎症の評価に非侵襲的、簡便に測定が行える呼気一酸化窒素濃度（FeNO）が有用であることが報告されている²⁴⁾。そこで、黄砂飛来前後で FeNO を測定し、黄砂が好酸球性気道炎症を介して呼吸器システムに影響を与えるか評価することを目的に調査を行った。さらに、喘息患者において点鼻ステロイド薬が黄砂による呼吸器症状増悪に対して治療効果があるか検討を行った。



3. 研究開発方法

（1）黄砂が喘息患者の気道炎症に与える影響について

1）対象

18 歳以上の鳥取大学医学部附属病院に通院する成人喘息患者 184 名を登録した。喘息の診断は Global Initiative for Asthma (GINA) ガイドラインの基準に基づき、喘鳴の既往があり、メサコリンに対する気道過敏性がある場合、あるいは気道可逆性がある場合とした。研究については鳥取大学医学部の倫理委員会の承認を経たのち、全ての対象者においてインフォームドコンセントを行い同意書を取得した。調査はヘルシンキ宣言を遵守して行った。

2）黄砂日の判定

黄砂日は気象庁が発表に基づいて判定した。

3）呼気一酸化窒素濃度測定

呼気一酸化窒素濃度（FeNO）を測定することで、黄砂が喘息患者の気道炎症に与える影響を評価した。2012 年 2 月から 2013 年 5 月の期間、対象者において 1 ヶ月に 1 度の定期受診の際に FeNO 値を測定した。FeNO は NOBreath (Bedfond) を用いて測定した。測定は 5 回行い、最大値と最小値を除外した 3 測定値の平均値を用いた。黄砂飛来時には連絡を行い可能な対象者においては定期

受診を早めて受診し FeNO の測定を行った。黄砂飛来から 7 日間以内の測定値を『黄砂後の FeNO 値』、黄砂飛来前 28 日までの測定値を『黄砂前の FeNO 値』とした。

（２）黄砂による喘息患者の症状増悪に対する効果的治療方法の検討

１）対象

18 歳以上の鳥取大学医学部附属病院呼吸器内科に定期受診する成人喘息患者のうちアレルギー性鼻炎を合併し、喘息とアレルギー性鼻炎の治療のいずれをも受けている 32 名を対象とした。喘息の診断は Global Initiative for Asthma (GINA) ガイドラインの基準に基づき、喘鳴の既往があり、メサコリンに対する気道過敏性がある場合、あるいは気道可逆性がある場合とした。アレルギー性鼻炎は耳鼻科医に診断されている場合とした。

２）点鼻ステロイド剤に使用による黄砂時の症状増悪変化の評価

2012 年 2 月から 5 月の期間の定期受診時に鼻症状と呼吸器症状を記録した。また、黄砂飛来時あるいは煙霧時に点鼻ステロイド薬を使用した後の鼻症状と呼吸器症状を記録し点鼻ステロイド薬の効果を評価した。症状評価は、鼻症状は鼻閉と鼻汁、呼吸器症状は咳、痰、呼吸苦、喘鳴の程度について 0 点＝なし、1 点＝軽度、2 点＝中等度、3 点＝重度でそれぞれ記録した。鼻症状、呼吸器症状それぞれで合計した値を総合症状点数 (total symptom score) とした。

（３）黄砂が気道炎症に与える影響について毎日の呼吸機能測定による定量的評価

１）研究デザインと対象

黄砂、SPM、PM2.5、SO₂、NO₂、O₃、さらに大気中に含まれる金属成分がヒトの気道炎症にどのように影響するか評価するために、ピークフローメーター (Mini-Wright, Harlow, England, American Thoracic Society scale) を用いて呼吸機能モニタリングを行い黄砂、SPM、PM2.5、SO₂、NO₂、O₃、大気中に含まれる金属成分との関連を解析した。ピークフローの測定は、2012 年 3 月から 5 月、2013 年 3 月から 5 月、2014 年 1 月から 2 月に行った。対象は島根県松江市の小学校に通学する児童 401 名とし、年齢は 8 歳から 9 歳、2012 年 3 月時に小学校 3 年生であった。児童は松江市内の小学校 35 校のうち 4 校に通学しており、該当する小学校 3 年生児童 (2012 年 3 月時点) すべてで研究への参加を各小学校を通じて依頼した。4 校は互いに 10km 圏内に位置していた。

全ての児童は 2012 年 3 月、2013 年 3 月、2014 年 1 月に、性別、身長、体重、喘息、アレルギー性鼻炎、アレルギー性結膜炎、アトピー性皮膚炎、食物アレルギーの有無を記録した。喘息の定義は、①参加 12 ヶ月以内に医師から喘息の診断を受けている、②12 ヶ月以内に喘鳴を呈したことがある、③12 ヶ月以内に喘息用薬の服用がある、④喘息の定期治療をうけている、のうち 1 つでも該当する場合とした。アレルギー性鼻炎、アレルギー性結膜炎、アトピー性皮膚炎、食物アレルギーの有無は、①12 ヶ月以内に医師の診断を受けている、②12 ヶ月以内にアレルギー性鼻炎、アレルギー性結膜炎、アトピー性皮膚炎、食物アレルギーの治療を受けている、③アレルギー性鼻炎、アレルギー性結膜炎、アトピー性皮膚炎、食物アレルギーのために定期受診している、のうち 1 つでも該当する場合とした。研究は鳥取大学医学部の倫理委員会の承認を得た。研究実施のために松江市教育委員会に協力の依頼を行い承諾を得た。

２）ピークフローを用いた呼吸機能の測定

2012年3月から5月、2013年3月から5月、2014年1月から2月の登校日の午前8時から9時までの間にピークフローメーターを用いて呼吸機能の測定を行った。ピークフローの測定は3回実施し最も良い値を採用した。

3) 黄砂日の判定と大気汚染物質のモニタリングデータについて

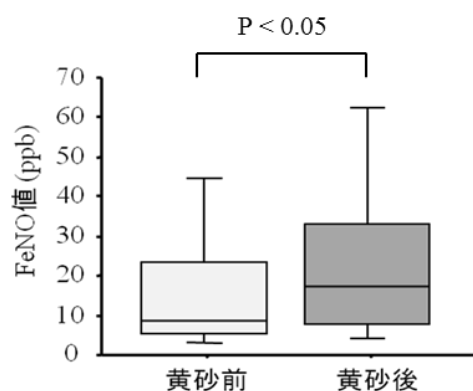
黄砂日は気象庁が発表に基づいて判定した。島根県松江市のSPM、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O_xの測定データは環境省より入手した。

4) 大気粉塵中の金属成分の濃度はサブテーマ④で得られたデータに基づいた。測定の詳細はサブテーマ④に記載した。

4. 結果及び考察

(1) 黄砂が喘息患者の気道炎症に与える影響について結果と考察

2012年4月23日と4月24日、2013年3月8日から3月10日、2013年3月19日と20日に米子市で黄砂が観測された。黄砂の喘息への影響は7日間継続することが報告されている²¹⁾。『黄砂曝露期間』を2012年4月23日から4月29日、2013年3月8日から3月14日、2013年3月19日から3月25日と定義し、この間に測定したFeNO値を『黄砂後』のFeNO値とした。対照として『黄砂前』のFeNO値と比較したが、黄砂前のFeNO値は2012年2月あるいは2013年2月に測定した値を『黄砂前のFeNO値』と定義した。74名で『黄砂前』と『黄砂後』にFeNOの測定を行った。『黄砂前』のFeNO値が 19.8 ± 10.1 ppbであったのに対して、『黄砂後』では 27.8 ± 15.9 ppbであり『黄砂後』のFeNO値が有意に高かった(図(1)-1)。

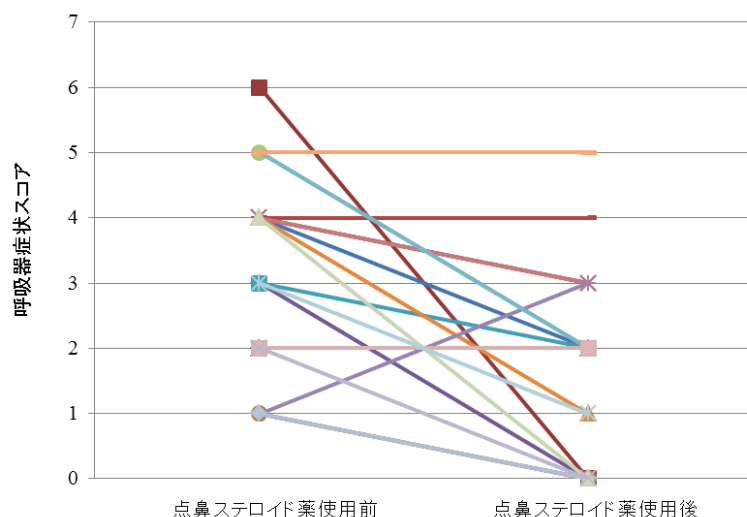


図(1)-1 黄砂が喘息患者のFeNO値に与える影響

気管支喘息の病態は慢性の剥離性好酸球性気管支炎であることが報告され、好酸球性の気道炎症の評価方法としてFeNOの測定が臨床現場で実施されるようになっている。成人における正常値は報告や測定方法によって差があるが、30 ppb～50 ppbとされている。さらに、変動を見ることで好酸球性気道炎症を評価できる可能性があることが指摘されている。今回の調査では、黄砂後にFeNO値の有意な上昇が成人喘息患者で確認された。本邦では、これまでに黄砂の成人喘息患者への影響について症状や呼吸機能の評価しかなくFeNOで気道炎症を評価した検討は本研究が検索した範囲では初めてである。結果からは黄砂が喘息患者の好酸球性気道炎症を増強させる可能性が示唆された。

（２）黄砂による喘息患者の症状増悪に対する効果的治療方法の検討について結果と考察

アレルギー性鼻炎を合併している喘息患者ではアレルギー性鼻炎の治療が不十分である場合には喘息のコントロールが悪化することが報告されている²⁵⁾。また、アレルギー性鼻炎の患者では、点鼻ステロイド薬を自覚症状が増悪した際に頓用使用しても連用と同様の症状コントロールが得られることも報告されている²⁶⁾。今回の調査でアレルギー性鼻炎を合併する喘息患者では、黄砂飛来時に呼吸器症状の増悪した場合に点鼻ステロイド薬を使用すると32名の患者のうち18名で呼吸器症状スコアが改善していた（図(1)-2）。黄砂時にアレルギー性鼻炎合併の喘息患者で呼吸器症状が増悪した場合には点鼻ステロイド薬が有効である可能性が示唆された。

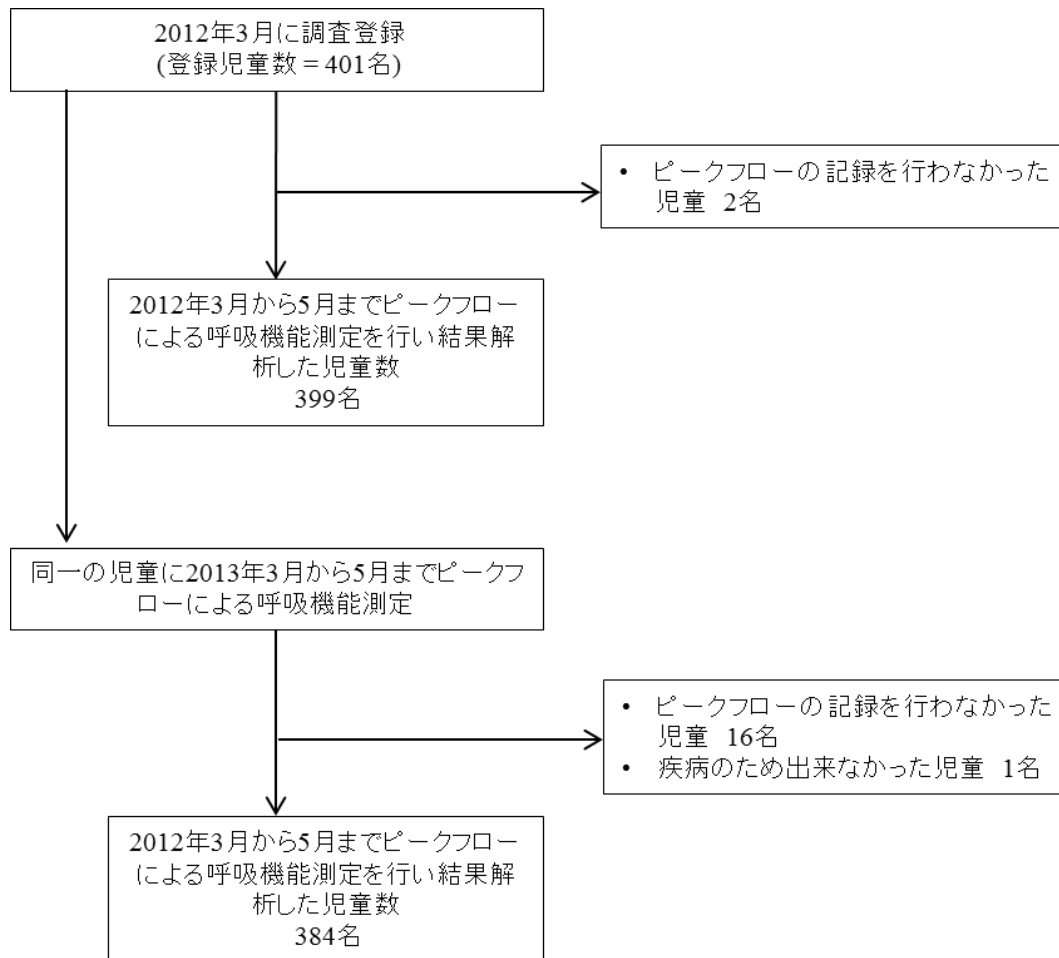


図(1)-2 黄砂による呼吸器症状増悪に対する点鼻ステロイド薬の効果

（３）黄砂が気道炎症に与える影響について毎日の呼吸機能測定による定量的評価の結果と考察

１）調査状況

図(1)-3 に研究の概略を示す。2012年3月に松江市内の小学校35校のうち4校に通学する小学校3年生児童（年齢8歳あるいは9歳）を対象に2012年3月から5月、2013年3月から5月、2014年1月から2月の期間、登校日にピークフローによる呼吸機能の測定を登校時に行い黄砂および大気汚染物質が児童の呼吸機能に与える影響を評価した。2013年3月に401名が研究に参加した。児童2名が記録を行わず399名の記録を2012年6月に回収した。同一の集団で2013年3月から5月まで同様の調査を行った。2013年3月から5月までの調査では16名で記録が行われず、1名は疾病のため記録が出来なかった。



図(1)-3 黄砂が気道炎症に与える影響について毎日の呼吸機能測定による定量的評価について研究概略図

2) 2012 年調査結果

399 名の児童で調査を行い、そのうち 38 名は喘息児童であった。児童の背景を喘息の有無に分けて表 (1)-1 に示す。

	全児童	喘息のない児童	喘息のある児童
Number	399	361	38
Gender, Male/Female	205/194	187/174	18/20
Height (cm)	132.3 ± 5.94	132.3 ± 5.84	131.9 ± 6.95
Male	132.2 ± 5.51	132.4 ± 5.42	130.3 ± 6.15
Female	132.4 ± 6.41	132.3 ± 6.30	133.5 ± 7.50
Weight (kg)	29.5 ± 5.83	29.4 ± 5.78	30.4 ± 6.36
Male	29.6 ± 6.23	29.7 ± 6.32	28.6 ± 5.29
Female	29.3 ± 5.40	29.0 ± 5.11	32.3 ± 6.94
Existence of allergic disease except for asthma			
Allergic rhinitis	78	62	16
Allergic conjunctivitis	8	5	3
Atopic dermatitis	44	36	8
Food allergy	19	14	5

Data are presented as the mean ± S.D.

表(1)-1 児童の背景

2012 年の調査期間中、4 月 23 日と 4 月 24 日に黄砂が観測され、この日を『黄砂日 (= ADS days)』と定義した。2012 年 4 月 1 日から 5 月 31 日の期間で黄砂日を除いた日を『非黄砂日 (= non-ADS days)』と定義した。研究期間の気象情報と大気汚染状況を表(1)-2 に示す。

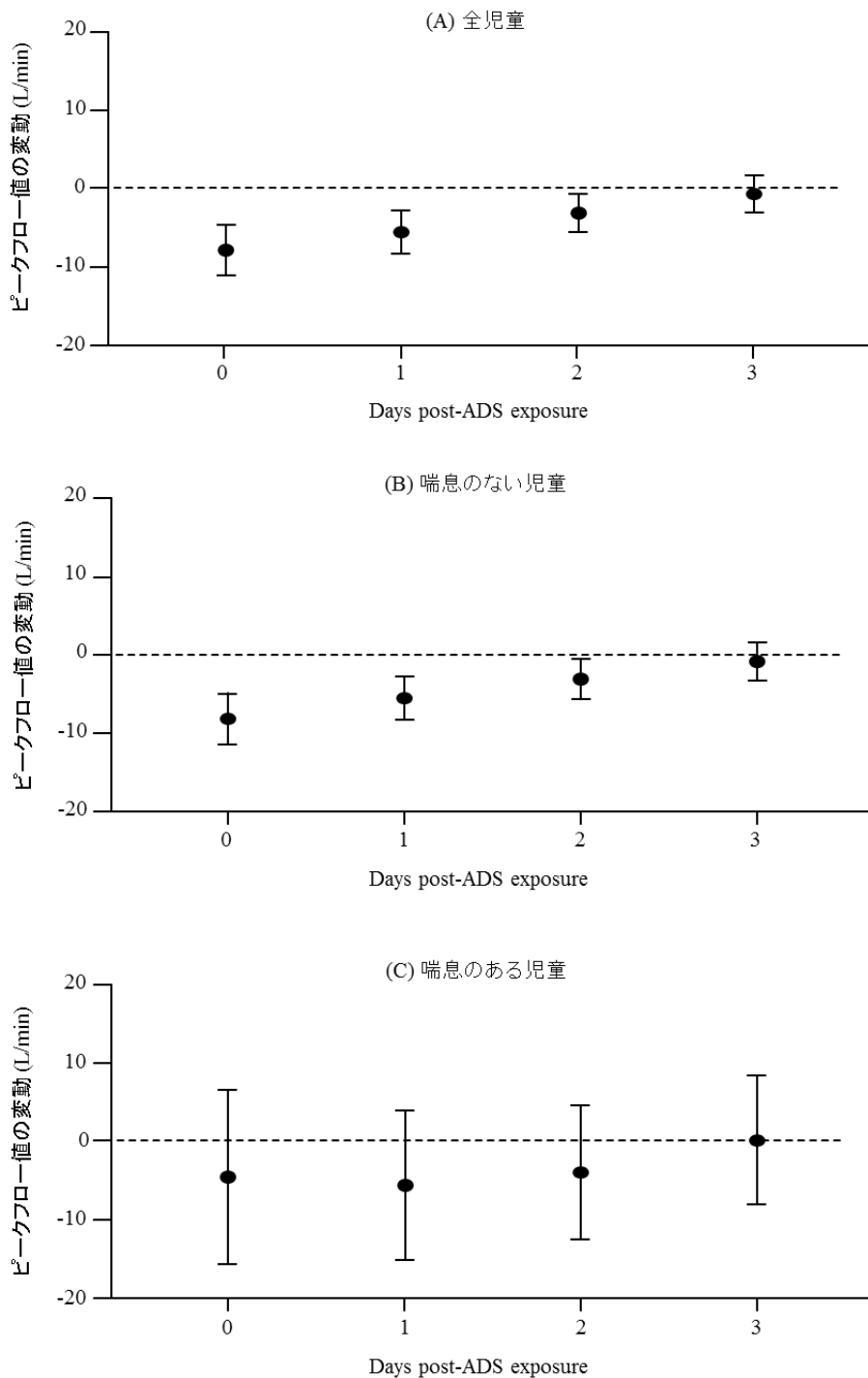
	ADS days	Non-ADS days
Daily average temperature, °C	17.6 ± 1.1	15.7 ± 3.5
Daily maximum temperature, °C	23.3 ± 3.0	20.9 ± 4.5
Daily minimum temperature, °C	13.1 ± 0.7	10.9 ± 4.0
Daily average relative humidity, %	70.0 ± 5.7	70.4 ± 9.3
Daily minimum relative humidity, %	48.0 ± 12.7	44.9 ± 15.4
Daily average atmospheric pressure, hPa	1010.8 ± 1.0	1010.0 ± 5.7
Daily average mineral dust particles, km ⁻¹	0.035 ± 0.011	0.016 ± 0.10
Daily average non-mineral dust particles, km ⁻¹	0.148 ± 0.097	0.042 ± 0.037
Daily average SPM, µg/m ³	36.0 ± 2.8	17.7 ± 10.1
Daily maximum SPM, µg/m ³	58.0 ± 11.3	30.6 ± 19.9
Daily average PM _{2.5} , µg/m ³	17.2 ± 1.3	10.3 ± 5.4
Daily maximum PM _{2.5} , µg/m ³	29.0 ± 5.7	22.5 ± 10.7
Daily average SO ₂ , ppb	1.30 ± 0.57	0.85 ± 0.60
Daily maximum SO ₂ , ppb	2.45 ± 1.34	2.10 ± 3.17
Daily average NO ₂ , ppb	1.50 ± 0.42	2.57 ± 1.15
Daily maximum NO ₂ , ppb	3.45 ± 1.77	5.50 ± 3.14
Daily average Ox, ppb	55.9 ± 5.7	50.0 ± 7.5
Daily maximum Ox, ppb	71.0 ± 5.4	66.4 ± 12.2

Data are presented as the mean ± S.D., ADS days were April 23 to 24 in 2012., Non-ADS days were from 1 April to 31 May in 2012 except for ADS days.

表(1)-2 2012年調査期間の気象情報と大気汚染状況

図(1)-4 に黄砂への曝露が児童のピークフロー値に与える影響を示す。黄砂曝露から 3 日後までのピークフロー値の変動を示してあるが、黄砂の曝露があった日に児童のピークフロー値は最も低下している。全児童の解析結果では、黄砂曝露日に 7.82 L/min (95% CI, -10.93 to -4.71, $P < 0.001$) ピークフロー値が低下し、その後、黄砂曝露 1 日後に 5.49 L/min (95% CI, -8.14 to -2.85, $P < 0.001$)、2 日後に 3.15 L/min (95% CI, -5.54 to -0.75, $P = 0.01$)、3 日後に 0.72 L/min (95% CI, -3.03 to 1.59) の低下を認めた。喘息のない児童では、黄砂曝露日に 8.17 L/min (95% CI,

-11.40 to -4.93, $P < 0.001$) 低下し、黄砂曝露 1 日後に 5.49 L/min (95% CI, -8.24 to -2.74, $P < 0.001$)、2 日後に 3.07 L/min (95% CI, -5.56 to -0.58, $P = 0.016$)、3 日後に 0.82 L/min (95% CI, -3.22 to 1.59) のピークフロー値の低下があった。喘息のある児童では、黄砂曝露日には 4.55 L/min (95% CI, -15.63 to 6.53)、黄砂曝露 1 日後に 5.65 L/min (95% CI, -15.12 to 3.82)、2 日後に 4.00 L/min (95% CI, -12.53 to 4.53)、3 日後に 0.18 L/min (95% CI, -8.05 to 8.40) のピークフロー値の低下を認めた。全児童と喘息のない児童では黄砂 2 日後までピークフロー値の有意な低下が認められた。



図(1)-4 黄砂の児童のピークフロー値に対する影響

表(1)-3 に one-pollutant model および他の大気汚染物質を調整後の two-pollutant model による黄砂曝露と児童の呼吸機能の関係について示す。One-pollutant model では黄砂の曝露によって、全児童ではピークフロー値が 7.82 L/min (95% confidence interval [CI], -10.9 to -4.71, $P < 0.001$)、喘息ない児童では 8.17 L/min (95% CI, -11.40 to -4.93, $P < 0.001$)、喘息のある児童では 4.55 L/min (95% CI, -15.63 to 6.53, $P = 0.42$) 低下していた。黄砂の曝露によっ

て全児童と喘息のない児童ではピークフロー値が統計学的に有意に低下していた。Two-pollutant models で SPM、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O_x の影響を調整したがやはり同様の結果であった。

	Regression coefficients	95%CI	P value
全児童			
Without adjustment*	-7.82	-10.93, -4.71	< 0.001
Adjusted for SPM	-5.52	-8.79, -2.25	0.001
Adjusted for PM _{2.5}	-6.04	-9.21, -2.86	< 0.001
Adjusted for SO ₂	-7.05	-10.20, -3.90	< 0.001
Adjusted for O _x	-3.51	-6.70, -0.32	0.03
Adjusted for NO ₂	-9.71	-12.96, -6.47	< 0.001
喘息のない児童			
Without adjustment*	-8.17	-11.40, -4.93	< 0.001
Adjusted for SPM	-6.04	-9.44, -2.64	< 0.001
Adjusted for PM _{2.5}	-6.48	-9.78, -3.18	< 0.001
Adjusted for SO ₂	-7.41	-10.69, -4.13	< 0.001
Adjusted for O _x	-3.93	-7.25, -0.62	0.02
Adjusted for NO ₂	-10.04	-13.42, -6.67	< 0.001
喘息の児童			
Without adjustment*	-4.55	-15.63, 6.53	0.42
Adjusted for SPM	-0.47	-12.10, 11.16	0.94
Adjusted for PM _{2.5}	-1.80	-13.21, 9.61	0.76
Adjusted for SO ₂	-3.66	-14.86, 7.55	0.52
Adjusted for O _x	0.49	-10.83, 11.80	0.93
Adjusted for NO ₂	-6.64	-18.18, 4.90	0.26

ADS; Asian dust storm

CI; confidence intervals

*Single-pollutant model

表(1)-3 黄砂の児童のピークフロー値との関連性

次に、lidar の観測データを環境省から入手し黄砂消散係数 (mineral dust particles)、球形消散係数 (air-pollution aerosol)、SPM、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O_x とピークフロー値の関連性について解析を行った (表(1)-4)。黄砂消散係数は、全児童、喘息のない児童、喘息のある児童の全てのピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、それぞれ黄砂消散係数が 1/km 上昇する毎に全児童では 3.26 L/min (95% CI, -4.66 to -4.71, P < 0.0001)、喘息のない児童では 3.43 L/min (95% CI, -4.51 to -2.34, P < 0.0001)、喘息のある児童では 5.58 L/min (95% CI, -9.00 to -2.17, P = 0.001) のピークフロー値の低下を認めた。SPM も全児童、喘息のない児童、喘息のある児童の全てのピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、SPM が 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇する毎に全児童では 2.16 L/min (95% CI, -2.88 to -1.43, P < 0.001)、喘息のない児童では 2.06 L/min (95% CI, -2.81 to -1.30, P < 0.001)、喘息のある児童では 3.11 L/min (95% CI, -5.70 to -0.54, P < 0.02) のピークフロー値の低下を認めた。同様に、PM_{2.5} も全児童、喘息のない児童、喘息のある児童の全てのピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、PM_{2.5} が 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇する毎に全児童で 2.58 L/min (95% CI, -3.59 to -1.57, P < 0.001)、喘息のない児童では 2.46 L/min (95% CI, -3.51 to -1.41, P < 0.001)、喘息のある児童では 3.69 L/min (95% CI, -7.28 to -0.10, P < 0.05) のピークフロー値の低下を認めた。SO₂ も全児童、喘息のない児童、喘息のある児童

の全てのピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、 SO_2 が1 ppb 上昇する毎に全児童で 7.09 L/min (95% CI, -8.23 to -5.94, $P < 0.001$)、喘息のない児童で 6.99 L/min (95% CI, -8.18 to -5.79, $P < 0.001$)、喘息のある児童で 8.04 L/min (95% CI, -12.06 to -4.02, $P < 0.001$) のピークフロー値の低下を認めた。さらに、球形消散係数と全児童、喘息のない児童、喘息のある児童の全てにおいてもピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、球形消散係数が 1/km 増加する毎に全児童では 4.62 L/min (95% CI, -5.59 to -3.64, $P < 0.0001$)、喘息のない児童では 4.65 L/min (95% CI, -5.67 to -3.63, $P < 0.0001$)、喘息のある児童では 4.33 L/min (95% CI, -7.56 to -1.09, $P = 0.009$) のピークフロー値の低下を認めた。

一方、 O_x については全児童と喘息のない児童のピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、 O_x が1 ppb 上昇する毎に全児童で 1.84 L/min (95% CI, -2.79 to -0.89, $P < 0.001$)、喘息のない児童で 1.82 L/min (95% CI, -2.81 to -0.85, $P < 0.001$) のピークフロー値の低下を認めた。同様に、 NO_2 も全児童と喘息のない児童でピークフロー値と統計学的に有意な負の相関を認め、 NO_2 が1 ppb 上昇する毎に全児童で 1.07 L/min (95% CI, -1.93 to -0.22, $P < 0.02$)、喘息のない児童で 1.03 L/min (95% CI, -1.92 to -0.14, $P < 0.03$) ピークフロー値の低下を認めた。喘息児童のピークフロー値では O_x と NO_2 と関連を認めなかった。

全児童			
IQR of exposure metric	Change in PEF	95%CI	P value
Mineral dust particle	-3.26	-4.66, -2.59	< 0.0001
Air pollution aerosol	-4.62	-5.59, -3.64	< 0.0001
SPM	-2.16	-2.88, -1.43	< 0.0001
PM _{2.5}	-2.58	-3.59, -1.57	< 0.0001
NO ₂ , ppb	-1.07	-1.93, -0.22	< 0.02
O _x , ppb	-1.84	-2.79, -0.89	< 0.0001
SO ₂ , ppb	-7.09	-8.23, -5.94	< 0.0001
喘息のない児童			
IQR of exposure metric	Change in PEF	95%CI	P value
Mineral dust particle	-3.43	-4.51, -2.34	< 0.0001
Non-mineral dust particles	-4.65	-5.67, -3.63	< 0.0001
SPM	-2.06	-2.81, -1.30	< 0.0001
PM _{2.5}	-2.46	-3.51, -1.41	< 0.0001
NO ₂	-1.03	-1.92, -0.14	< 0.03
O _x	-1.82	-2.81, -0.85	< 0.0001
SO ₂	-6.99	-8.18, -5.79	< 0.0001
喘息のある児童			
IQR of exposure metric	Change in PEF	95%CI	P value
Mineral dust particle	-5.58	-9.00, -2.17	0.001
Non-mineral dust particles	-4.33	-7.56, -1.09	0.009
SPM	-3.11	-5.70, -0.54	< 0.02
PM _{2.5}	-3.69	-7.28, -0.10	< 0.05
NO ₂	-1.54	-4.58, 1.50	0.32
O _x	-1.96	-5.29, 1.37	0.25
SO ₂	-8.04	-12.06, -4.02	< 0.0001

IQR; interquartile range
CI; confidence intervals

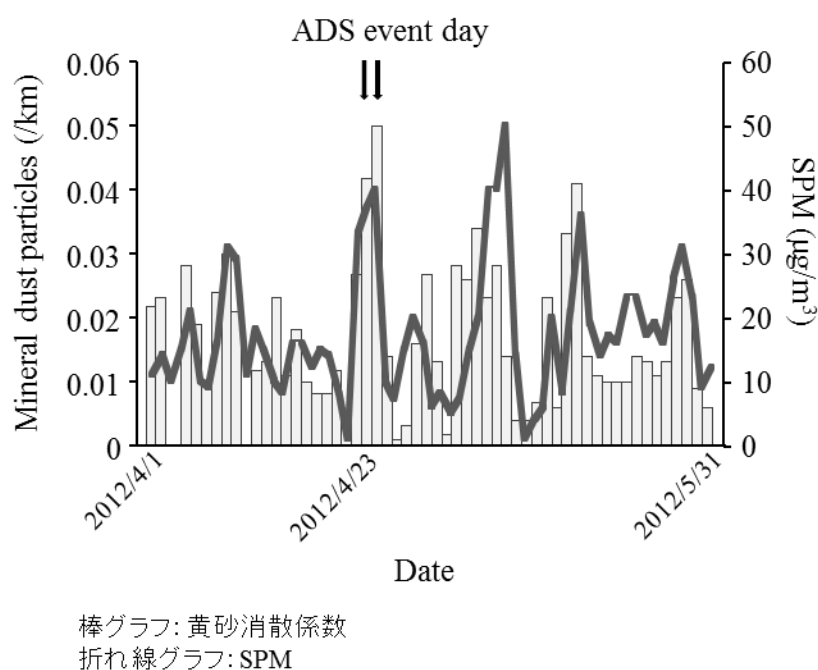
表(1)-4 黄砂消散係数(mineral dust particles)、球形消散係数(air-pollution aerosol)、SPM、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O_xとピークフロー値の関連性

黄砂曝露と児童のピークフローメーターを用いた呼吸機能との関連について 2012 年 4 月から 5 月に調査した結果を示した。黄砂を契機に全児童と喘息のない児童ではピークフローの値が有意に低下していた。一方で、黄砂を契機にしたピークフロー値の低下を喘息児童では確認できなかった。しかし、lidar による黄砂消散係数は全児童、喘息のない児童、喘息のある児童のピークフロー値との間で負の相関を認めた。さらに、SPM および PM_{2.5} はいずれもが全児童、喘息のない児童、喘息のある児童のピークフロー値と負の相関を認めていた。この結果からは、黄砂によって児童の呼吸機能が低下することが唆された。黄砂によって児童の呼吸機能が低下することを確認したのは本邦では本研究が初めてであり、さらに、lidar の黄砂消散係数と児童の呼吸機能に負の相関があることを示したのは、検索した範囲では、本研究が世界で初めてである。

喘息のない児童の呼吸機能と黄砂が負の相関を明らかにした研究も、検索した範囲では、本研究が世界で初めてである。Hong らは¹⁹⁾、韓国において黄砂の児童呼吸機能への影響を検討したが大気の金属量との関連は明らかにしたが、SPM や PM_{2.5} との関連が認められず黄砂と喘息のない児童の呼吸機能の関連については検討する余地が残っていたと考えられる。今回の研究で黄砂と喘息のない児童の呼吸機能との関連が見いだせたのは調査規模が大きく統計学的な十分なパワー

があったからと考えられる。一方で、黄砂は黄砂毎に組成が異なり、国によっても相違があることから、韓国と日本では児童への影響が異なっている可能性は考えられる。また、今回の研究では黄砂の児童の呼吸機能に対する影響が2日後にまで遷延することを明らかにしたが、黄砂の影響が遷延することは黄砂後に小児喘息の入院頻度が7日後まで増加するとした報告とも合致する結果であった²¹⁾。

今回の研究で黄砂後の喘息児童の呼吸機能低下は明らかに出来なかった。この原因としては、喘息の児童が38名と少なかったこと、また、黄砂が2012年4月23日と24日の二日しかなかったことが挙げられる。喘息の児童数を増やす、あるいは黄砂日が多ければ統計学的な有意差を導き出せたと考えられる。事実、黄砂消散係数、SPM、PM2.5と喘息児童のピークフロー値は有意な負の相関を示していた。



図(1)-5 黄砂消散係数とSPMとの関係

黄砂時に SPM が上昇するが、黄砂日以外にも当然のことながら SPM が上昇することがある。図(1)-5 に示す 2012 年調査期間の黄砂消散係数と SPM との関係からもこの事は明らかである。他国の黄砂と健康影響評価では PM10 あるいは PM2.5 が用いられることが多いが、純然と黄砂の影響を評価が可能であるかという点では議論の余地がある。本研究は lidar 情報を活用し黄砂を含む砂塵と児童の呼吸機能の関係を明らかにすることが出来た点は新規性が高いと考えられた。

今回の調査で SO₂ と児童の呼吸機能には負の相関があることも明らかにした。この結果は海外からの報告とも合致しており²⁷⁻²⁹⁾、本邦においても大気中 SO₂ の上昇は児童の呼吸機能を悪化させると考えられた。大気中 NO₂ および O_x の上昇は喘息のない児童の呼吸機能とは負の相関があったが、喘息児童では同様な相関が確認できなかった。大気中 NO₂ および O_x の上昇は喘息の有無に関わらず児童の呼吸機能を低下させることが海外からは報告されている³⁰⁾⁻³⁴⁾。今回の結果で、喘息児童の呼吸機能と大気中 NO₂ および O_x の間で関連を認めなかったのは、やはり喘息児童数が少

なかったことが考えられる。一方で、 O_x は気温と連動して増減するため関連の検出ができないこと、また、時に大気中 O_x の上昇が児童の呼吸器疾患の保護因子になることも報告されており³⁵⁾、さらなる検討が必要と考えられた。

(3) 2012 年調査と 2013 年調査の比較による黄砂が児童の呼吸機能に与える影響の差異について

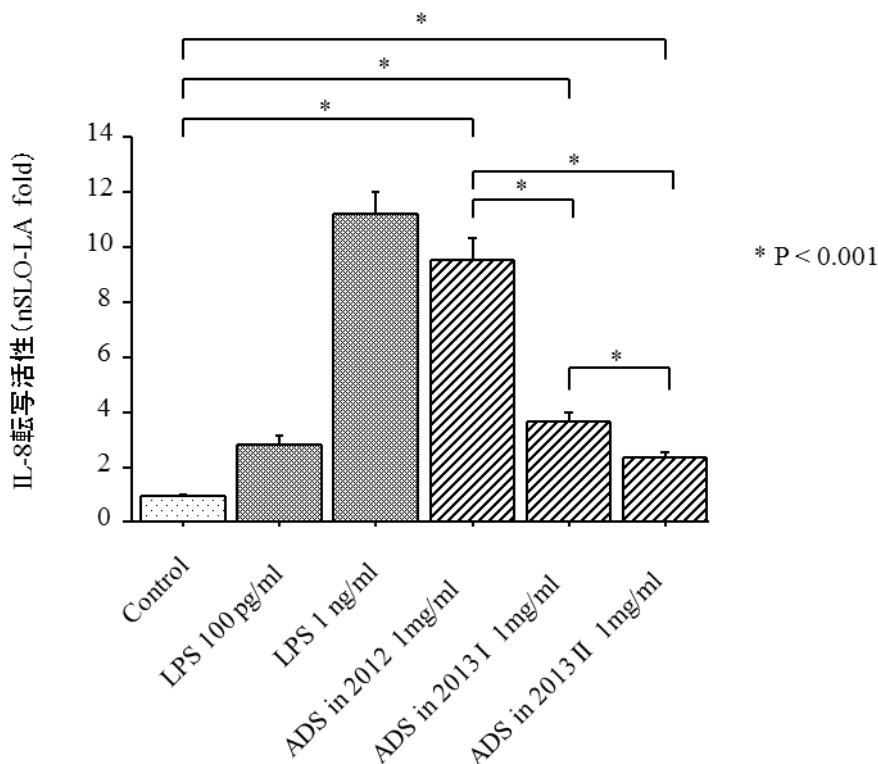
今回、黄砂の児童の呼吸機能への影響を評価するために同一集団を 2012 年 3 月から 5 月、2013 年 3 月から 5 月、さらには 2014 年 1 月から 2 月に調査を行った。多年にわたって研究期間を設定したのは黄砂毎に影響が異なるか評価することを意図していた。2013 年 3 月から 5 月の調査について 2012 年と分けて解析を行い、黄砂毎に児童の呼吸機能への影響に差異があるのか検討した。表(1)-5 に 2013 年に調査を行った 384 名の児童の背景を示す。

	2013年調査		
	全児童	喘息のない児童	喘息のある児童
Number	384	339	45
Gender (Male/Female)	194/190	171/168	23/22
Height (cm)	137.7 ± 7.01	137.8 ± 6.90	137.2 ± 7.87
Male	136.9 ± 6.25	137.1 ± 6.10	135.5 ± 7.20
Female	138.5 ± 7.65	138.4 ± 7.58	138.9 ± 8.28
Weight (kg)	32.4 ± 6.60	32.3 ± 6.39	33.2 ± 8.03
Male	32.3 ± 6.79	32.2 ± 6.48	33.2 ± 8.90
Female	32.6 ± 6.42	32.5 ± 6.32	33.2 ± 7.29
Allergic disease			
Asthma	45	-	-
Allergic rhinitis	74	61	13
Allergic conjunctivitis	15	12	3
Atopic dermatitis	36	26	10
Food allergy	20	13	7

表(1)-5 2013年調査の児童の背景

表(1)-6 に 2012 年調査と 2013 年調査における黄砂日が児童の呼吸機能に与える影響について結果の相違を示す。2012 年の調査結果と異なり、2013 年調査では全児童、喘息のない児童と黄砂との間で呼吸機能に有意な相関を認めなかった。一方で、2013 年調査においては喘息児童で黄砂と呼吸機能の低下の間に有意な負の相関を認めた。喘息児童は喘息のない児童に比較して黄砂の影響を受けやすいことが報告されている¹⁸⁾⁻²¹⁾。2012 年調査では喘息児童数が 38 名であったものが 2013 年では 45 名であり、喘息児童数が増加したことが 2013 年では有意な相関を見いだせた一因と考えられた。一方で、喘息のない児童で 2012 年と 2013 年の結果に相違があったのは黄砂の気道炎症への影響に差があった可能性が考えられる。黄砂の組成が黄砂毎に異なっていることは既に報告されている¹⁾⁻³⁾。本事業サブテーマ③と鳥取県環境学術研究等振興事業と連携して 2012 年の黄砂と 2013 年の黄砂の interleukin (IL)-8 誘導の差異を比較した。IL-8 産生能の差異で黄砂の毒性を評価する意義およびその方法についてはサブテーマ③で詳細を示す。nSL0-LA による IL-8 の転写活性は、2012 年 4 月 23 日と 4 月 24 日の黄砂時に捕集した大気粉塵では 9.56 ± 0.80 fold、2013 年 3 月 8 日から 3 月 10 日の黄砂時大気粉塵では 3.65 ± 0.36 fold、2013 年 3 月 19 日と 3 月 20 日の黄砂時大気粉塵では 2.33 ± 0.24 fold であった (図(1)-6)。IL-8 誘導能は黄砂毎

に有意に異なっており、特に 2012 年の黄砂時大気粉塵と 2013 年の黄砂時大気粉塵では IL-8 誘導能は著しく異なっており 2012 年の黄砂時の大気粉塵の IL-8 誘導能は高かった。大気粉塵をヒトが吸入した場合に気管支肺内の IL-8 濃度が上昇することにより、呼吸器系が傷害を受けることが報告されている^{36)~38)}。2012 年調査では黄砂時に児童の呼吸機能が低下していたのに対して、2013 年の調査では黄砂による呼吸機能低下が確認されなかった原因として、2012 年の黄砂時大気粉塵の IL-8 誘導が 2013 年の黄砂時大気粉塵に比較して非常に高いことが考えられた。この結果からは、黄砂毎に大気粉塵の気道炎症への影響は異なることが推察され、サブテーマ②において黄砂毎に呼吸器症状が増悪する喘息患者の割合が異なっていた結果とも合致すると考えられた。



ADS in 2012: 2012年4月23日と4月24日の黄砂時に鳥取県で捕集した3~7 μ mの大気粉塵

ADS in 2013 I: 2013年3月8日から3月10日の黄砂時に鳥取県で捕集した3~7 μ mの大気粉塵

ADS in 2013 II: 2013年3月19日から3月20日の黄砂時に鳥取県で捕集した3~7 μ mの大気粉塵

図(1)-6 黄砂毎のIL-8誘導能の差異

(4) 大気中金属濃度と児童呼吸機能との関連について

サブテーマ④において大気粉塵中の金属濃度のモニタリングを島根県松江市から約 60km 離れた鳥取県湯梨浜町で行った。大気粉塵中の金属元素のモニタリング方法と結果の詳細はサブテーマ④に示す。大気粉塵中の金属元素モニタリングを連続的に行うのは難しく、特に土曜日、日曜日、休日のデータに欠損が生じた。また、児童の呼吸機能測定も休校日には欠損するため、解析の精

度を高めるため 2012 年と 2013 年の児童呼吸機能の調査結果を統合して、児童の呼吸機能と大気粉塵中金属元素との関連について検討を行った。

全児童のピークフロー値と大気粉塵中の金属成分との関連を解析した結果、大気粉塵中の Ca、Cu、Fe、Mn、Ti、V、Cd、Pb の濃度上昇とピークフロー値は有意な負の相関を示した（表（1）-7）。大気粉塵中の Ca 濃度が 1 ng/m³ 上昇する毎に児童のピークフロー値は 3.03 L/min (95%CI: -5.305, -0.758, P < 0.02) に低下していた。以下同様に、大気粉塵中の Cu 濃度が 1 ng/m³ 上昇する毎に 1.76 L/min (95%CI: -3.294, -0.225, P < 0.03)、Fe では 2.77 L/min (95%CI: -4.853, -0.693, P < 0.01)、Mn では 3.35 L/min (95%CI: -5.643, -1.03, P < 0.006)、Ti では 2.39 L/min (95%CI: -4.507, -0.326, P < 0.03)、V では 2.27 L/min (95%CI: -3.885, -0.659, P < 0.007)、Cd では 1.94 L/min (95%CI: -3.211, -0.67, P < 0.004)、Pb では 2.53 L/min (95%CI: -4.494, -0.558, P < 0.02) のピークフロー値の有意な低下を認めた。一方、大気粉塵中の Ba、Mg、Zn、Ni、Cr と全児童のピークフロー値の間に有意な相関はなかった。

IQR of exposure metric	Change in PEF	95% CI	P value
Ba	-0.608	-2.215, 0.998	N.S.
Ca	-3.031	-5.305, -0.758	< 0.02
Cu	-1.761	-3.294, -0.225	< 0.03
Fe	-2.773	-4.853, -0.693	< 0.01
Mg	-1.774	-3.902, 0.355	N.S.
Mn	-3.346	-5.643, -1.03	< 0.006
Ti	-2.389	-4.507, -0.326	< 0.03
Zn	-1.19	-3.371, 1.058	N.S.
V	-2.273	-3.885, -0.659	< 0.007
Cd	-1.94	-3.211, -0.67	< 0.004
Pb	-2.526	-4.494, -0.558	< 0.02
Ni	-1.101	-9.873, 7.654	N.S.
Cr	-0.016	-1.549, 1.514	N.S.

表(1)-7 全児童における呼吸機能と大気粉塵中金属元素濃度との関連

喘息のない児童のピークフロー値と大気粉塵中の金属成分との関連を解析した結果、大気粉塵中の Ca、Cu、Fe、Mg、Mn、Ti、Zn、V、Cd、Pb の濃度上昇とピークフロー値は有意な負の相関を示した（表(1)-8）。大気粉塵中の Ca 濃度が 1 ng/m³ 上昇する毎に児童のピークフロー値は 1.14 L/min (95%CI: -1.894, -0.379, P < 0.003) に低下していた。以下同様に、大気粉塵中の Cu 濃度が 1 ng/m³ 上昇する毎に 3.5 L/min (95%CI: -3.549, -2.553, P < 0.001)、Fe では 0.69 L/min (95%CI: -0.693, 0, P < 0.03)、Mg では 1.06 L/min (95%CI: -1.774, -0.355, P < 0.008)、Mn では 1.41 L/min (95%CI: -2.178, -0.614, P < 0.001)、Ti では 0.76 L/min (95%CI: -1.412, -0.054, P < 0.04)、V では 0.90 L/min (95%CI: -1.42, -0.378, P < 0.002)、Cd では 0.46 L/min (95%CI: -0.887, -0.023, P < 0.04)、Pb では 1.61 L/min (95%CI: -2.263, -0.951, P < 0.001)、Zn では 3.17 L/min (95%CI: -3.9, -2.38, P < 0.001)、Cr では 1.52 L/min (95%CI: -1.994, -1.053, P < 0.001) のピークフロー値の有意な低下を認めた。大気粉塵中の Ni と喘息のない児童のピークフロー値の間に有意な相関はなかった。一方、大気粉塵中の Ba と児童との呼吸機能には正の相関があり、大気粉塵中の

Ba 濃度が 1 ng/m^3 上昇する毎に児童のピークフロー値は 1.15 L/min (95%CI: $0.608, 1.7$, $P < 0.001$) 増加していた。

IQR of exposure metric	Change in PEF	95% CI	P value
Ba	1.154	0.608, 1.7	< 0.001
Ca	-1.137	-1.894, -0.379	< 0.003
Cu	-3.501	-3.549, -2.553	< 0.001
Fe	-0.693	-0.693, 0	< 0.03
Mg	-1.064	-1.774, -0.355	< 0.008
Mn	-1.406	-2.178, -0.614	< 0.001
Ti	-0.76	-1.412, -0.054	< 0.04
Zn	-3.173	-3.9, -2.38	< 0.001
V	-0.899	-1.42, -0.378	< 0.002
Cd	-0.455	-0.887, -0.023	< 0.04
Pb	-1.607	-2.263, -0.951	< 0.001
Ni	1.789	-0.98, 4.558	N.S.
Cr	-1.523	-1.994, -1.053	< 0.001

表(1)-8 喘息のない児童における呼吸機能と大気粉塵中金属元素濃度との関連

喘息のある児童のピークフロー値と大気粉塵中の金属成分との関連を解析した結果、大気粉塵中の Ca、Cu、Fe、Mn、Ti、Zn、V、Cd、Pb の濃度上昇とピークフロー値は有意な負の相関を示した (表 (1) -9)。大気粉塵中の Ca 濃度が 1 ng/m^3 上昇する毎に児童のピークフロー値は 3.03 L/min (95%CI: $-5.305, -0.758$, $P < 0.02$) に低下していた。以下同様に、大気粉塵中の Cu 濃度が 1 ng/m^3 上昇する毎に 1.76 L/min (95%CI: $-3.294, -0.225$, $P < 0.03$)、Fe では 2.77 L/min (95%CI: $-4.853, -0.693$, $P < 0.01$)、Mn では 3.35 L/min (95%CI: $-5.643, -1.03$, $P < 0.006$)、Ti では 2.39 L/min (95%CI: $-4.507, -0.326$, $P < 0.03$)、V では 2.27 L/min (95%CI: $-3.885, -0.659$, $P < 0.007$)、Cd では 1.94 L/min (95%CI: $-3.211, -0.67$, $P < 0.04$)、Pb では 2.53 L/min (95%CI: $-4.494, -0.558$, $P < 0.001$) のピークフロー値の有意な低下を認めた。大気粉塵中の Ni、Ba、Mg、Zn、Cr と喘息のある児童のピークフロー値の間に有意な相関はなかった。

IQR of exposure metric	Change in PEF	95% CI	P value
Ba	-0.608	-2.215, 0.998	N.S.
Ca	-3.031	-5.305, -0.758	< 0.02
Cu	-1.761	-3.294, -0.225	< 0.03
Fe	-2.773	-4.853, -0.693	< 0.01
Mg	-1.774	-3.902, 0.355	N.S.
Mn	-3.346	-5.643, -1.03	< 0.006
Ti	-2.389	-4.507, -0.326	< 0.03
Zn	-1.19	-3.371, 1.058	N.S.
V	-2.273	-3.885, -0.659	< 0.007
Cd	-1.94	-3.211, -0.67	< 0.004
Pb	-2.526	-4.494, -0.558	< 0.02
Ni	-1.101	-9.873, 7.654	N.S.
Cr	-0.016	-1.549, 1.514	N.S.

表(1)-9 喘息のある児童における呼吸機能と大気粉塵中金属元素濃度との関連

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでに黄砂が児童の呼吸機能に与える影響について本邦では調査が行われていなかった。本研究が初めて黄砂が児童の呼吸機能を低下させることを明らかにした。さらに、lidar による黄砂消散係数と球形消散係数と児童呼吸機能を評価した研究は検索した範囲ではこれまでにない。本研究では黄砂消散係数と球形消散係数と児童呼吸機能との関連を評価し、黄砂消散係数と球形消散係数と児童の呼吸機能が統計学的に有意な負の相関を示すことを世界で初めて明らかにした。最近になり PM2.5 への関心が本邦で急速に高まっている。本邦ではこれまでに PM2.5 と児童の呼吸機能の関連を調査した研究はなかった。本研究は初めて PM2.5 と児童の呼吸機能が負の相関を示すことも明らかにした。PM2.5 が $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇する毎にピークフロー値が、喘息のない児童では 2.46 L/min、喘息のある児童では 3.69 L/min 低下していた。

黄砂の影響が黄砂毎に異なることを児童の呼吸機能調査を通じて明らかにした。大気粉塵あるいは大気汚染物質がヒトの呼吸器システムに影響するときに気管支肺内の IL-8 濃度が上昇することが報告されている。鳥取県環境学術研究等振興事業と連携して黄砂の IL-8 産生誘導が黄砂毎に大きく異なることを明らかにした。黄砂の健康影響を考える上で黄砂の組成を考慮する必要があることを明らかにした。

大気中の金属成分のうち Ca、Cu、Fe、Mn、Ti、Zn、V、Cd、Pb の濃度が高いときには児童の呼吸機能が低下しやすいことを明らかにした。特に Pb は越境してくる大気汚染物質を反映している可能性が指摘されている。³⁹⁾ 大気粉塵中の Pb モニタリングが健康被害を予測する上で有用である可能性を示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

黄砂が児童にどのような影響を与えるのか本邦での報告は少ないが、本研究において黄砂曝露が児童の呼吸機能を低下させることを明らかにした。さらに、児童の呼吸機能が lidar の黄砂消散係数と球形消散係数と良く相関することも見出した。lidar の黄砂消散係数は児童の屋外活動可否を決定する基準になり得ることを示した。また、最近 PM2.5 に関する関心が高まっているが PM2.5 と健康影響についての本邦での知見は少ない。本研究では PM2.5 が上昇すると児童の呼吸機能が低下することを明らかにした。さらに、PM2.5 が $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇する毎にピークフロー値が、喘息のない児童では 2.46 L/min、喘息のある児童では 3.69 L/min 低下するという具体的な数字を明らかにしている。本邦での PM2.5 が具体的にどのような健康影響があるのか提示する際に根拠と出来る研究成果と考える。

黄砂に健康影響があることは徐々に明らかになりつつある。その中で、黄砂に付着あるいは含まれる物質のうちどのような成分が健康影響により強く関与するのかが新たな関心になっている。大気中の金属成分のうち Ca、Cu、Fe、Mn、Ti、Zn、V、Cd、Pb の濃度上昇が児童の呼吸機能低下

と関与することを明らかにした。この中で Pb について、大気汚染物質の長距離輸送現象への関与が報告されている³⁹⁾。黄砂のヒトへの毒性を評価していく上で Pb が重要な金属成分であることを臨床研究では本邦で初めて明らかにした。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Watanabe M, Kurai J, Igishi T, Yamasaki A, Burioka N, Takeuchi H, Sako T, Touge H, Nakamoto M, Hasegawa Y, Chikumi H, Matsumoto S, Yamaski C, Minato S, Ueda Y, Horasaki K, Watanabe T, Shimizu E. Influence of Asian Desert Dust on Lower Respiratory Tract Symptoms in Patients with Asthma over 4 Years. *Yonago Acta medica* 2012; 55: 41-48.
- 2) Watanabe M, Kurai J, Shimizu E. Influence of Asian dust storms on asthma in western Japan. *Gene and Environment* in press.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 渡部仁成：黄砂を含む越境大気汚染物質とアレルギー疾患．西宮市医師会医学雑誌 2013;18:98

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 渡部仁成, 山崎章, 井岸正, 鰐岡直人, 竹内裕美, 湊沙花, 長谷川泰之, 中本成紀, 服岡泰司, 松本慎吾, 千酌浩樹, 清水英治：第 51 回日本呼吸器学会学術講演会(2011)「黄砂による喘息症状増悪と花粉の関与について」
- 2) 渡部仁成, 山崎章, 長谷川泰之, 清水英治：第 61 回日本アレルギー学会秋季学術大会(2011)「黄砂による喘息症状増悪と飛散花粉の影響」
- 3) 渡部 仁成：第 62 回アレルギー学会秋季学術大会(2012)「黄砂のアレルギー疾患への影響 成人喘息への影響」
- 4) 渡部仁成, 山崎 章, 井岸 正, 鰐岡 直人, 唐下 泰一, 服岡 泰司, 中本 成紀, 長谷川 泰之, 松本 慎吾, 千酌 浩樹, 湊 沙花, 洞崎 和徳, 清水 英治：第 52 回日本呼吸器学会学術講演会(2012)「黄砂による喘息症状増悪と花粉の関与について」
- 5) 渡部 仁成, 阿部 智志, 齋藤 るみ子, 倉井 淳, 山崎 千恵, 山崎 章, 相場 節也, 押村 光雄, 湊 沙花, 上田 豊, 清水 英治. 「THP-1-derived IL-8 reporter cell Line(THP-G8)を用いた黄砂発生源土壌と黄砂時降下粉塵のアレルギー毒性の相違に関する検討」 第 53 回日本呼吸器学会学術講演会、2013 年

- 6) 渡部 仁成(鳥取大学 呼吸器内科), 倉井 淳, 阿部 智志, 齋藤 るみ子, 井岸 正, 山崎 章, 相場 節也, 押村 光雄, 清水 英治. 「黄砂時飛散粉塵の免疫学的毒性評価」 第 44 回日本職業環境アレルギー学会、2013 年
- 7) 渡部 仁成, 倉井 淳, 山崎 章, 清水 英治. 「花粉と黄砂 黄砂および煙霧の小学校児童の呼吸機能への影響について」 第 63 回日本アレルギー学会秋季学術大会、2013 年
- 8) 渡部仁成、倉井淳、野間久史、山崎章、清水英治。「黄砂、PM2.5、大気汚染物質の小学校児童 PEF 値への影響」 第 26 回日本アレルギー学会春期臨床大会、2014 年

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 松江市民公開講座 「知ると得する黄砂、PM2.5 の健康影響について本当のところ」 平成 25 年 12 月 8 日（日）午前 10～午後 12 時 場所：松江市く にびきメッセ 大会議室 501、観客 74 名

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日本海新聞（2013 年 6 月 26 日、地方版）
- 2) 山陰中央新報（2014 年 1 月 4 日）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Han YJ, Holsen TM, Hopke PK, Cheong JP, Kim H, Yi SM. Identification of source locations for atmospheric dry deposition of heavy metals during yellow-sand events in Seoul, Korea in 1998 using hybrid receptor models. Atmos Environ 2004; 38: 5353-5361.
- 2) Choi JC, Lee M, Chun Y, Kin J, Oh S. Chemical composition and source signature of spring aerosol in Seoul. Korea J Geophy Res 2001; 106: 18067-18074.
- 3) Onishi K, Kurosaki Y, Otani S, Yoshida A, Sugimoto N, Kurozawa Y. Atmospheric transport route determines components of Asian dust and health effects in Japan. Atmos Environ 2012; 49: 94-102. Chang CC, Lee IM, Tsai SS, Yang CY. Correlation of Asian dust storm events with daily clinic visits for allergic rhinitis in Taipei, Taiwan. J Toxicol Environ Health A 2006; 69: 229-235.
- 4) Chen YS, Sheen PC, Chen ER, Liu YK, Wu TN, Yang CY. Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan. Environ Res 2004; 95: 151-155.
- 5) Chen YS, Yang CY. Effects of Asian dust storm events on daily hospital admissions for cardiovascular disease in Taipei, Taiwan. J Toxicol Environ Health A 2005; 68: 1457-1464.

- 6) Cheng MF, Ho SC, Chiu HF, Wu TN, Chen PS, Yang CY. Consequences of exposure to Asian dust storm events on daily pneumonia hospital admissions in Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2008; 71: 1295-1299.
- 7) Chiu HF, Tiao MM, Ho SC, Kuo HW, Wu TN, Yang CY. Effects of Asian dust storm events on hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease in Taipei, Taiwan. *Inhal Toxicol* 2008; 20: 777-781.
- 8) Lai LW, Cheng WL. The impact of air quality on respiratory admissions during Asian dust storm periods. *Int J Environ Health Res* 2008; 18: 429-450.
- 9) Yang CY, Chen YS, Chiu HF, Goggins WB. Effects of Asian dust storm events on daily stroke admissions in Taipei, Taiwan. *Environ Res* 2005; 99: 79-84.
- 10) Yang CY, Tsai SS, Chang CC, Ho SC. Effects of Asian dust storm events on daily admissions for asthma in Taipei, Taiwan. *Inhal Toxicol* 2005; 17: 817-821.
- 11) Yang CY. Effects of Asian dust storm events on daily clinical visits for conjunctivitis in Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2006; 69: 1673-1680.
- 12) Yang CY, Cheng MH, Chen CC. Effects of Asian dust storm events on hospital admissions for congestive heart failure in Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2009; 72: 324-328.
- 13) Chen YS, Sheen PC, Chen ER, et al. Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan. *Environ Res* 2004; 95: 151-155.
- 14) Bell ML, Levy JK, Lin Z. The effect of sandstorms and air pollution on cause-specific hospital admissions in Taipei, Taiwan. *Occup Environ Med* 2008; 65: 104-111.
- 15) Chan CC, Chuang KJ, Chen WJ, Chang WT, Lee CT, Peng CM. Increasing cardiopulmonary emergency visits by long-range transported Asian dust storms in Taiwan. *Environ Res* 2008; 106: 393-400.
- 16) Kwon HJ, Cho SH, Chun Y, Lagarde F, Pershagen G. Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea. *Environ Res* 2002; 90: 1-5.
- 17) Hawng SS, Chou SH, Kwon HJ, et al. Effects of the severe Asian dust events on daily mortality during spring of 2002, in Seoul, Korea. *J prev Med Public Health* 2005; 38: 197-202.
- 18) Yoo Y, Choung JT, Yu j, et al. Acute effects of Asian dust events on respiratory symptoms and peak expiratory flow in children with mild asthma. *J Korean Med Sci* 2008; 23: 66-71.
- 19) Hong YC, Pan XC, Kim SY, et al. Asian dust storm and pulmonary function of school children in Seoul. *Sci Total environ* 2010; 408: 754-759.
- 20) Park JW, Lim YH, Kyung SY, et al. Effects of ambient particular matter on peak expiratory flow and respiratory symptoms of asthmatics during Asian dust periods in Korea. *Respirology* 2005; 10: 470-476.
- 21) Kanatani KT, Ito I, Al-Delaimy WK, Adachi Y, Mathews WC, Ramsdell JW; Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team. Desert-dust exposure is associated with increased risk of asthma hospitalization in children. *Am J Respir Crit Care Med* 2010; 182: 1475-1481

- 22) Koninckx M, Buysse C, de Hoog M. Management of status asthmaticus in children. *Paediatr Respir Rev.* 2013; 14: 78-85.
- 23) Rosi E, Lanini B, Ronchi MC, Romagnoli I, Stendardi L, Bianchi R, Zonefrati R, Duranti R, Scano G. Dyspnea, respiratory function and sputum profile in asthmatic patients during exacerbations. *Respir Med.* 2002; 96: 745-750.
- 24) Wechsler ME, Grasemann H, Deykin A, Silverman EK, Yandava CN, Israel E, Wand M, Drazen JM. Exhaled nitric oxide in patients with asthma: association with NOS1 genotype. *Am J Respir Crit Care Med.* 2000; 162: 2043-2047.
- 25) Bousquet J, Gaugris S, Koccevar VS, Zhang Q, Yin DD, Polos PG, Bjermer L. Increased risk of asthma attacks and emergency visits among asthma patients with allergic rhinitis: a subgroup analysis of the investigation of montelukast as a partner agent for complementary therapy [corrected]. *Clin Exp Allergy.* 2005; 35: 723-727.
- 26) Khan MA, Abou-Halawa AS, Al-Robaee AA, Alzolibani AA, Al-Shobaili HA. Daily versus self-adjusted dosing of topical mometasone furoate nasal spray in patients with allergic rhinitis: randomised, controlled trial. *J Laryngol Otol.* 2010; 124:3 97-401.
- 27) Neas LM, Dockery DW, Koutrakis P, Speizer FE. Fine particles and peak flow in children: acidity versus mass. *Epidemiology* 1999; 10: 550-553.
- 28) Peters A, Goldstein IF, Beyer U, Franke K, Heinrich J, Dockery DW, Spengler JD, Wichmann HE. Acute health effects of exposure to high levels of air pollution in eastern Europe. *Am J Epidemiol* 1996; 144: 570-581.
- 29) Brunekreef B, Hoek G. The relationship between low-level air pollution exposure and short-term changes in lung function in Dutch children. *Expo Anal Environ Epidemiol* 1993; 3: 117-128.
- 30) Global Initiative for Asthma (GINA): Global strategy for asthma management and prevention. NIH Publication issued January, 1995 (update 2006).
- 31) Patel MM, Miller RL. Air pollution and childhood asthma: recent advances and future directions. *Curr Opin Pediatr* 2009; 21: 235-242.
- 32) Peters JM, Avol E, Gauderman WJ, Linn WS, Navidi W, London SJ, Margolis H, Rappaport E, Vora H, Gong H Jr, Thomas DC. A study of twelve Southern California communities with differing levels and types of air pollution. II. Effects on pulmonary function. *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159: 768-775.
- 33) Linn WS, Shamoo DA, Anderson KR, Peng RC, Avol EL, Hackney JD, Gong H Jr. Short-term air pollution exposures and responses in Los Angeles area schoolchildren. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1996; 6: 449-472.
- 34) Altuğ H, Gaga EO, Döğeroğlu T, Brunekreef B, Hoek G, Van Doorn W. Effects of ambient air pollution on respiratory tract complaints and airway inflammation in primary school children. *Sci Total Environ* 2014; 479-480: 201-209.
- 35) Li S, Williams G, Jalaludin B, Baker P. Panel studies of air pollution on children's lung function and respiratory symptoms: a literature review. *J Asthma* 2012; 49: 895-910.

- 36) Sierra-Vargas MP, Guzman-Grenfell AM, Blanco-Jimenez S, Sepulveda-Sanchez JD, Bernabe-Cabanillas RM, Cardenas-Gonzalez B, Ceballos G, Hicks JJ. Airborne particulate matter PM_{2.5} from Mexico City affects the generation of reactive oxygen species by blood neutrophils from asthmatics: an in vitro approach. *J Occup Med Toxicol*. 2009; 4: 17.
- 37) Holgate ST, Sandström T, Frew AJ, Stenfors N, Nördenhall C, Salvi S, Blomberg A, Helleday R, Söderberg M. Health effects of acute exposure to air pollution. Part I: Healthy and asthmatic subjects exposed to diesel exhaust. *Res Rep Health Eff Inst*. 2003; 112: 1-30.
- 38) Bellido-Cassado J, Plaza V, Perpina M, Picado C, Bardagi S, Martinez-Bru C, Torrejon M. Inflammatory response of rapid onset asthma exacerbation. *Arch Bronconeumol*. 2010; 46: 587-593.
- 39) Hioki T, Nakanishi S, Mukai H, Murano K. Analysis of long-range transport of aerosol with water-soluble ionic species and trace metal components, collected continuously with particle size segregation in the coastal area of the sea of Japan - Focusing on the Kosa event in spring 2002. *J Aerosol Res* 2006; 21: 160-175.

（２）黄砂飛散が喘息およびCOPD患者の症状および活動性に与える影響調査

鳥取大学 医学部 病態検査学	鯉岡直人
鳥取大学 医学部附属病院 第三内科診療科群	長谷川泰之
〈研究協力機関〉	
山陰労災病院	加藤和宏
陽明会小波瀬病院	迫 隆紀・栗田伸一
松江市立病院	小西龍也・龍河敏行・早瀬達也
松江赤十字病院	徳安和宏・中崎博文・福嶋健人
国立病院機構米子医療センター	上田康仁
西伯病院	山本司生
法勝寺内科クリニック	三上真顯
大賀内科クリニック	大賀秀樹
済生会境港病院	藤井義寛
やすだ内科クリニック	安田和人

平成 23～25 年度累計予算額：2,016 千円（うち、平成 25 年度予算額：475 千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

黄砂の健康影響について、全死亡率増加、呼吸器・循環器疾患での死亡率および救急受診頻度の増加や小児喘息での呼吸機能、症状増悪が報告されている。本邦でも小児喘息患者の入院頻度や脳血栓症の発症頻度が増加することが報告されている。しかし、呼吸器疾患、循環器疾患、脳血管疾患、アレルギー性鼻炎などの入院あるいは受診頻度に黄砂が影響しないことも報告されており黄砂の健康影響についての議論は続いている。我々は 2007 年から黄砂の喘息、慢性閉塞性肺疾患（chronic obstructive pulmonary disease, COPD）への影響について電話調査してきた。これまでの研究を継続させるとともに電話調査だけでは調査バイアスがあるため、日誌形式で毎日の症状と呼吸機能、および Asthma control test 5（ACQ5）による喘息コントロールを記録して黄砂が喘息や COPD 患者の症状や呼吸機能、喘息コントロールに与える影響について検討を行った。

成人喘息患者 112 名が記録した症状日誌と呼吸機能記録を解析した結果、黄砂時に呼吸症状スコアの有意な悪化を認めた。一方、鼻症状に関してはアレルギー性鼻炎あるいは副鼻腔炎を合併している患者では黄砂時に悪化したが、合併していない患者では悪化を認めなかった。2011 年 5 月、2012 年 4 月、2013 年 3 月の黄砂時に成人喘息患者と COPD 患者を対象にして、呼吸器症状の変化について電話での聞き取り調査を実施した。その結果、2011 年 5 月の黄砂時に喘息患者 16.5%、COPD 患者 2%、2012 年 4 月黄砂時喘息患者 16%、COPD 患者 2%、2013 年 3 月黄砂時喘息患者 9%、COPD 患者 0%で呼吸器症状が黄砂後に増悪していた。鳥取県西部医師会に所属し無床医療機関で内科または小児科を標榜し勤務する医師 114 名を対象に黄砂が原因となって症状増悪をしたと考えられる患者の診療経験についてアンケート調査を行った。内科医 63 人、小児科医 11 人から回答を得たなかで 36 人が黄砂飛散により呼吸器症状が増悪したと考えられる患者の診療をしていた。また、

35 人が鼻症状の、25 人が眼症状の増悪した患者を診療していた。皮膚症状が増悪した患者を診療した医師はなかった。月 10 例以上の喘息患者を診察する医師では 70%以上で黄砂が原因と考えられる呼吸器症状増悪患者の診療を経験していた。

以上の結果より、黄砂によって喘息患者、COPD 患者の主として呼吸器症状が増悪することを明らかにした。また、黄砂の影響は非アレルギー性疾患である COPD に比較してアレルギー性疾患である喘息の方が高く、黄砂の気道炎症増悪にアレルギー性炎症が関与していることが示唆された。また、黄砂の影響は黄砂毎に著しく異なっていることも明らかにした。

〔キーワード〕

喘息、慢性閉塞性肺疾患、症状、呼吸機能、増悪

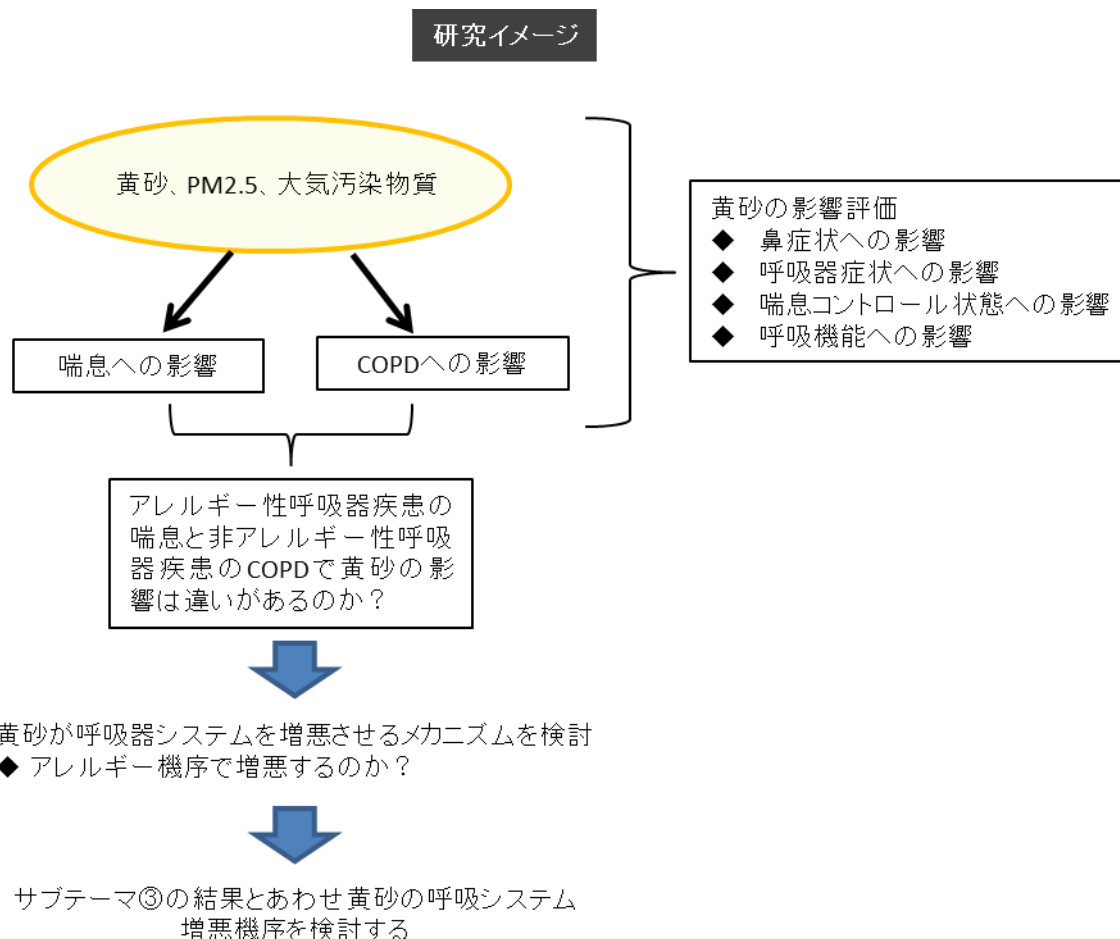
1. はじめに

疫学研究により大気中の粒子状物質と呼吸器疾患、循環器疾患、脳血管疾患の死亡率との関連が報告されている¹⁾。喘息患者において幹線道路沿いを歩行した場合に呼吸機能が低下することも報告されており、大気中粒子状物質の短期曝露でもヒトが影響を受けることも報告されている。このように大気中粒子状物質が短期、長期的にヒトの健康に影響することが明らかとなっている²⁾。黄砂は大気中の粒子状物質や微小粒子状物質の濃度を増加させる原因となる³⁾。しかし、浮遊粒子状物質と異なり黄砂の健康への影響について調査は多くない。台湾からは最も多く黄砂の健康影響について報告があり、黄砂時に死亡率、入院、救急受診が増加することや、循環器疾患、呼吸器疾患、脳血管疾患の発症も増加することが報告されている⁴⁾⁻¹⁶⁾。その一方で、喘息の受診やアレルギー性鼻炎では黄砂の影響がなかったことも報告されている。韓国からは黄砂が喘息を増悪させ呼吸機能や症状を増悪させることが報告されている¹⁷⁾⁻²¹⁾。本邦からも、黄砂時に小児喘息の入院頻度が高くなることが報告されている²²⁾。しかし、東アジア各国と比較して本邦では黄砂の成人、特に呼吸器疾患への影響について調査した報告はほとんどなく、本邦において黄砂が成人の呼吸器疾患に与える影響について調査する必要があると考えられる。さらに、黄砂が呼吸器疾患に影響を与えると仮定し、どのようなヒトで感受性が高いのか、あるいは、どのような対策や治療が有用であるのか明らかにすることは極めて有用だと考えられる。

2. 研究開発目的

黄砂が健康影響を与え、呼吸器系の救急受診や入院を増加させることが報告されているが、報告によって結果に相違がある。また、これまでの報告に基づけば、健常者に比べ喘息や慢性閉塞性肺疾患 (chronic pulmonary obstructive disease, COPD) 患者の方が黄砂の影響を受けやすく、さらに呼吸器疾患毎にも影響は異なっている⁴⁾⁻²²⁾。黄砂が本邦での成人の呼吸器システムにどのような影響を与えるか評価をすることを目的に研究を行った。この方法として、黄砂飛来前と黄砂飛来時の鼻症状および呼吸器症状の増悪の有無、医療機関受診の有無について電話調査を行った。電話調査はアレルギー性呼吸器疾患である成人喘息患者と非アレルギー性呼吸器疾患である (chronic obstructive pulmonary disease, COPD) 患者を対象に行い、疾患毎の黄砂による影響の差異を比較し、黄砂が呼吸器システムを増悪させるメカニズムについて検討した。また、成人喘息患者において鼻症状と呼吸器症状について毎日の症状スコアの記載とピークフローメータ

ーによる呼吸機能モニタリングも行い、黄砂が呼吸器システムに与える影響を評価した。患者を対象にした調査だけでは広く黄砂の呼吸器疾患への影響を評価することはできない。多くの患者を診療する一般医家を対象にアンケート調査を行い、単に黄砂による入院や救急受診などの重篤な影響だけを評価するだけでなく、日常生活に黄砂が与える影響を調査した。



3. 研究開発方法

(1) 電話調査による黄砂が喘息患者および COPD 患者の自覚症状に与える影響評価

1) 対象

Global Initiative for Asthma (GINA) ガイドラインの基準に基づく成人喘息患者と The Global initiative for chronic obstructive pulmonary disease (GOLD)に基づく COPD 患者を対象とした。喘息は喘鳴の既往があり、メサコリンに対する気道過敏性がある場合、あるいは気道可逆性がある場合とした。COPD は気管支拡張薬投与後の 1 秒率 (FEV₁/FVC) 70%未満であり、他疾患が除外された場合とした。鳥取大学医学部の倫理委員会の承認を経たのち、ヘルシンキ宣言を遵守して行った。全ての対象者においてインフォームドコンセントを行い同意書を取得した。

2) 電話調査方法

黄砂が喘息患者、COPD の自覚症状に与える影響を評価するために黄砂飛来後から 3 日以内に対象者に電話調査を行い、黄砂飛来前 1 週間と比較した際の症状変化について評価した。電話調査は

2007 年から継続調査を行っており、本課題においても 2011 年から 2013 年の黄砂飛来時に同様に実施した。電話調査時の質問項目は、①呼吸器症状について：咳の増加、痰の増量、喘鳴の出現、呼吸苦の出現、増悪、②眼症状について：流涙の増悪、疼痛の有無、眼脂の増加、掻痒の有無、③鼻症状について：鼻閉の増悪、鼻汁の増悪、咽頭の異常感、④皮膚症状について：掻痒感の有無、疼痛の有無、とした。1 つの項目でも陽性があった場合には増悪と判断した。一方、気道感染症がある場合、あるいは疑われる場合には、気道感染の増悪と判定し黄砂による増悪とは判定しなかった。気道感染とは、37℃以上の発熱、咽頭痛がある、家族、同僚に感冒症状がある者が居る場合を、『疑い』とし、37℃以上の発熱があり、かつ、『咽頭痛』がある場合を確定とした。

3) 黄砂日の判定

黄砂日は気象庁が発表に基づいて判定した。

(2) 症状日誌およびピークフローメーターを用いた呼吸機能評価による黄砂が喘息患者の症状および呼吸機能に与える影響評価

1) はじめに

平成 23 年度環境省総合環境推進費に応募するにあたり、2010 年中に本調査の実施を立案した。調査の準備を進め採択内定を受けた段階で調査に着手し研究を遂行した。

2) 対象

18 歳以上の鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市に在住する成人喘息患者 184 名を登録した。このうち、①National Heart, Lung, and Blood Institute が定義する軽症、中等症の喘息患者、②2011 年 1 月から 2 月において喘息がコントロールされている患者、③2011 年 3 月から 5 月の期間、毎日の症状記録と呼吸機能測定を日誌形式で行い 90%以上の記入がなされている 184 名の登録者のうち 112 名を解析対象者とした。喘息の診断は Global Initiative for Asthma (GINA) ガイドラインの基準に基づき、喘鳴の既往があり、メサコリンに対する気道過敏性がある場合、あるいは気道可逆性がある場合とした。調査は鳥取大学医学部の倫理委員会の承認を経たのち、ヘルシンキ宣言を遵守して行った。全ての対象者においてインフォームドコンセントを行い、同意書を取得した。

3) 黄砂日の判定と大気汚染物質のモニタリングデータについて

黄砂日は気象庁が発表に基づいて判定した。鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市の suspended particulate matter (SPM)、sulfur dioxide (SO₂)、nitrogen dioxide (NO₂)、photochemical oxidants (O_x) の測定データは環境省より入手した。

4) 上気道および下気道症状の記録と呼吸機能測定

2011 年の 2 月から 5 月の期間ですべての登録した喘息患者において毎日の上気道、下気道症状の記録とピークフローメーター(Mini-Wright, Harlow, England, American Thoracic Society scale)によって呼吸機能を測定した。2 月は練習期間と設定した。上気道症状は鼻閉と鼻汁、下気道症状は咳、痰、呼吸苦、喘鳴の程度について 0 点＝なし、1 点＝軽度、2 点＝重度でそれぞれ記録した(図(2)-1)。また、予定外受診、救急受診、発熱と咽頭痛の有無、喘息増悪による全身ステロイド薬の使用の有無についても毎日記録した。咽頭痛がある、あるいは、37.5℃以上の発熱がある場合、両者がある場合には気道感染症、いずれか一方の場合には気道感染症の疑いとした。上

気道症状と下気道症状について、毎日の合計した値を総合症状点数（total symptom score）とした。

黄砂は2011年の5月1日から3日に飛来したと気象庁から発表された。5月1日から5月3日を『黄砂日(ADS day)』とした。3月と5月では気象条件が大きく異なっており、1ヶ月間を評価期間とすることとし、4月10日から4月30日を『非黄砂日（non-ADS day）』と定義した。ピークフローの測定は起床後30分以内、服薬や吸入を行う前に3回実施し最も良い値を採用した。各対象者における最良値（Best peak expiratory flow value）は2011年2月から5月の期間で最も良い値をとした。5月1日から5月3日の黄砂日と4月10日から4月30日の非黄砂日のピークフローの最低値を各対象者で設定し、その値を最良値で除し黄砂曝露日と非黄砂曝露日の『% recent best』と定義した。

日付	2月16日	2月17日	2月18日	2月19日	2月20日
せき	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし
たん	多 中 少 なし	多 中 少 なし	多 中 少 なし	多 中 少 なし	多 中 少 なし
ゼーゼー	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし
息苦しさ	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし
ぜんそく症状のあった時間	朝 昼 夜	朝 昼 夜	朝 昼 夜	朝 昼 夜	朝 昼 夜
ぜんそく症状による生活への影響	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし
ぜんそく症状のための不眠、目覚め	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし
鼻水	多 中 少 なし	多 中 少 なし	多 中 少 なし	多 中 少 なし	多 中 少 なし
鼻づまり	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし	強 中 弱 なし
のどの痛み	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし
発熱	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし
発作治療薬の使用	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし
救急受診	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし	あり なし
ピークフロー値(朝)					
ピークフロー値(夜)					
屋外にいた時間は おおそどれくらいですか	時間	時間	時間	時間	時間
備考					

図(2)-1 調査に用いた喘息症状、ピークフロー記入用日誌

（３）医師の診療経験調査に基づく黄砂がヒトの健康に与える影響についての評価

１）対象および調査方法

鳥取県西部医師会に所属し内科あるいは小児科を標榜し無床の医療機関で勤務する医師を対象とした。対象医師に直接ないしは郵送でアンケート用紙を配布し回収した。2011年5月にアンケート用紙の配布を開始し2011年6月30日までに回収したものを解析の対象とした。

2) アンケート調査内容

調査内容を図(2)-2に示す。2011年の黄砂飛散も含め過去に黄砂飛散時に呼吸器症状、鼻症状、眼症状、皮膚症状の増悪を訴える患者の診療経験について質問し、増悪した患者の診療経験がある場合には増悪した症状について回答を求めた。さらに、黄砂が誘因と思われる喘息発作の経験とその強度について質問した。喘息の発作強度は喘息予防・管理ガイドライン2009に準じて、喘鳴/胸苦しい、軽度(小発作)、中等度(中発作)、高度(大発作)、重篤の5段階で評価した[23]。医師が一月あたりに診療する喘息患者数の違いによって黄砂飛散時の呼吸器症状増悪患者を診療する経験の差異についてはKruskal-Wallis検定を用いた。

- 問. 黄砂の飛散に伴って呼吸器症状が増悪した患者(喘息に限らず)を診察した経験がありますか?
☐ しばしばある ☐ 時々ある ☐ 全くない
- 問. それはどのような呼吸器症状が増悪していましたか?
☐ 咳 ☐ 痰 ☐ 喘鳴 ☐ 呼吸困難 ☐ 労作時息切れ ☐ その他
- 問. 黄砂飛散に伴って喘息発作をおこした喘息患者を診察された経験がありますか?
☐ ない ☐ ある (☐ 1~3症例 ☐ 4~5症例 ☐ 6~9症例 ☐ 10症例以上)
- 問. その発作の程度はどの程度でしたか?
☐ 喘鳴, 胸苦しいのみ (おおよそ 例)
☐ 軽度: 苦しいが横になれる, 動作がやや困難 (おおよそ 例)
☐ 中等度: 苦しくて横になれない, 動作はかなり困難, かろうじて歩ける (おおよそ 例)
☐ 高度: 苦しくて動けない, 歩行不能, 会話困難 (おおよそ 例)
☐ 重篤: 呼吸減弱, チアノーゼ, 呼吸停止, 会話・体動不能, 意識障害 (おおよそ 例)
- 問. 黄砂飛散時に喘息治療を強化する必要があると思いますか?
☐ 強く思う ☐ ややそう思う ☐ どちらでもない ☐ あまり思わない ☐ 全く思わない
- 問. 黄砂の飛散に伴って鼻の症状が増悪した患者(喘息に限らず)を診察した経験がありますか?
☐ しばしばある ☐ 時々ある ☐ 全くない
- 問. “ある”と回答した先生に伺います. それはどのような鼻の症状が増悪していましたか?
☐ 鼻汁 ☐ 鼻閉 ☐ そう痒 ☐ くしゃみ ☐ 喉のイガイガ感 ☐ その他
- 問. 黄砂の飛散に伴って眼の症状が増悪した患者(喘息に限らず)を診察した経験がありますか?
☐ しばしばある ☐ 時々ある ☐ 全くない
- 問. “ある”と回答した先生に伺います. それはどのような眼の症状が増悪していましたか?
☐ そう痒 ☐ 目やに ☐ 疼痛 ☐ 涙 ☐ その他
- 問. 黄砂の飛散に伴って皮膚の症状が増悪した患者(喘息に限らず)を診察した経験がありますか?
☐ しばしばある ☐ 時々ある ☐ 全くない
- 問. “ある”と回答した先生に伺います. それはどのような症状が増悪していましたか?
☐ そう痒 ☐ 発赤 ☐ 発疹 ☐ その他

図(2)-2 黄砂時の診療経験に関するアンケート

(4) 黄砂が喘息患者の喘息コントロールと呼気一酸化窒素濃度を与える影響について

1) 対象

18歳以上の鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市に在住する成人喘息患者184名を登録した。喘息の診断はGlobal Initiative for Asthma (GINA) ガイドラインの基準に基づき、喘鳴の既往があり、メサコリンに対する気道過敏性がある場合、あるいは気道可逆性がある場合とした。研究については鳥取大学医学部の倫理委員会の承認を経たのち、全ての対象者においてインフォームドコンセントを行い同意書を取得した。調査はヘルシンキ宣言を遵守して行った。

2) 喘息コントロール状態のモニタリング

2013 年 3 月から 5 月の期間で調査を行った。喘息のコントロール状態について、1 週間毎に Asthma control questionnaire 5 (ACQ5) の記入を行い評価した。ACQ5 の質問内容を図(2)-3 に示す。

ぜんそくの管理に関するアンケート◎		患者 ID: _____
(JAPANESE VERSION)		年月日: _____
		1/2ページ
以下の質問 1 から 5 にお答えください。		
この 1 週間のあなたの状態にもっとも当てはまる番号に○をつけてください。		
1. この 1 週間のうち平均してどのくらいの頻度で、ぜんそくのために夜中に目が覚めましたか。	0 まったくない 1 ほとんどない 2 たまに 3 時々 4 たびたび 5 ほとんどいつも 6 ぜんそくのせいで眠れなかった	
2. この 1 週間のうち平均して、朝目覚めた時のぜんそく症状はどのくらいだったでしょうか。	0 無症状 1 非常に軽い 2 軽い 3 中程度 4 やや重い 5 重い 6 非常に重い	
3. 全体的にみて、この 1 週間のうちぜんそくのためにあなたの生活にはどのくらい支障がでましたか。	0 ぜんぜん支障がなかった 1 ほとんど支障がなかった 2 少し支障があった 3 ある程度支障があった 4 かなり支障があった 5 非常に支障があった 6 まったくできなかった	
4. 全体的にみて、この 1 週間のうちぜんそくのためにどのくらい息切れを感じましたか。	0 ぜんぜんない 1 ほとんどない 2 少々 3 ある程度 4 かなり 5 強い 6 非常に強い	

図(2)-3 ACQ5 質問票

3) 下気道症状の記録

2012 年 3 月から 5 月および 2013 年 3 月から 5 月の期間ですべての登録した喘息患者において毎日の下気道症状の記録を行った。下気道症状は咳、痰、呼吸苦、喘鳴の程度について 0 点＝なし、1 点＝軽度、2 点＝中程度、3 点＝重度でそれぞれ記録した。また、予定外受診、救急受診、発熱と咽頭痛の有無、喘息増悪による全身ステロイド薬の使用の有無についても毎日記録した。咽頭痛がある、あるいは、37.5℃以上の発熱がある場合、両者がある場合には気道感染症、いずれか

一方の場合には気道感染症の疑いとした。下気道症状について、毎日の合計した値を総合症状点数 (total symptom score) とした。

4) 呼吸機能測定

2012 年 3 月から 5 月、2013 年 3 月から 5 月の期間でピークフローメーター) によって呼吸機能を測定した。

5) 黄砂日の判定と大気汚染物質のモニタリングデータについて

黄砂日は気象庁が発表に基づいて判定した。鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市の suspended particular matter (SPM), sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), and photochemical oxidants (O_x) の測定データは環境省より入手した。

4. 結果及び考察

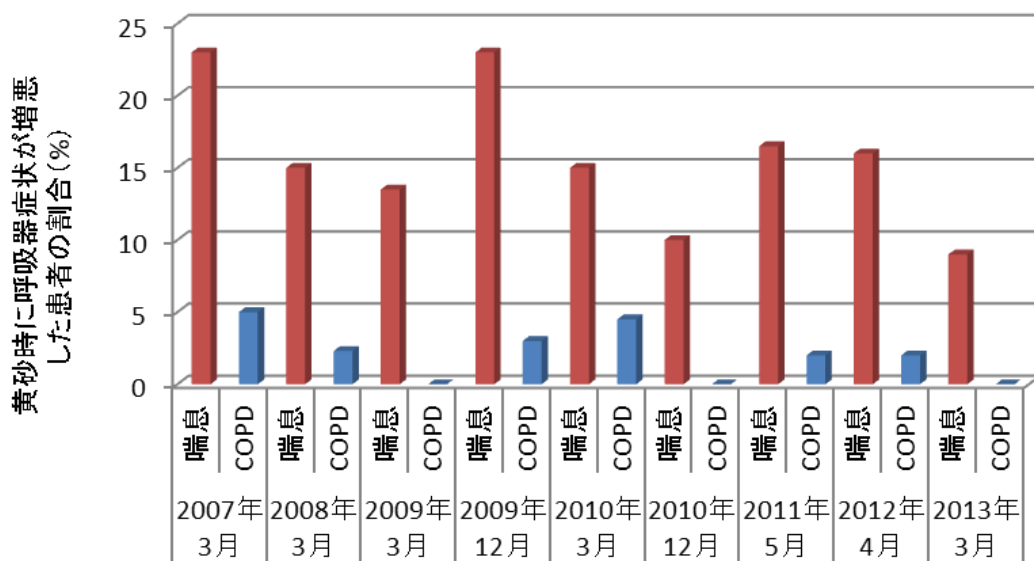
(1) 電話調査による黄砂が喘息患者および COPD 患者の自覚症状に与える影響評価について結果と考察

2007 年から継続調査を行っており、本課題においても 2011 年から 2013 年の黄砂飛来時に同様に黄砂による症状変化について、18 歳以上の鳥取県米子市、島根県松江市、兵庫県豊岡市、福岡県北九州市に在住する喘息患者および COPD 患者を対象に電話での聞き取り調査を実施した。調査した患者数を表 (2)-1 に 2007 年から 2010 年までのものも含めて示す。2011 年 5 月の黄砂時に喘息患者 282 名、COPD 患者 0 名、2012 年 4 月の黄砂時に喘息患者 242 名、COPD 患者 34 名、2013 年 3 月の黄砂時に喘息患者 145 名、COPD 患者 20 名の調査を行った。

居住地	疾患	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	合計
調査回数		1回	1回	3回	2回	1回	1回	1回	10回
総数	喘息	165	117	346	363	282	242	145	1,660
	COPD	13	28	51	49	—	34	20	195
鳥取県	喘息	142	117	310	271	207	204	145	1,047
	COPD	8	28	42	38	—	34	20	114
島根県	喘息	—	—	—	—	14	16	—	14
北九州	喘息	—	—	36	75	28	8	—	139
	COPD	—	—	9	9	—	—	—	18
豊岡	喘息	23	—	—	17	33	14	—	73
	COPD	5	—	—	2	—	—	—	7

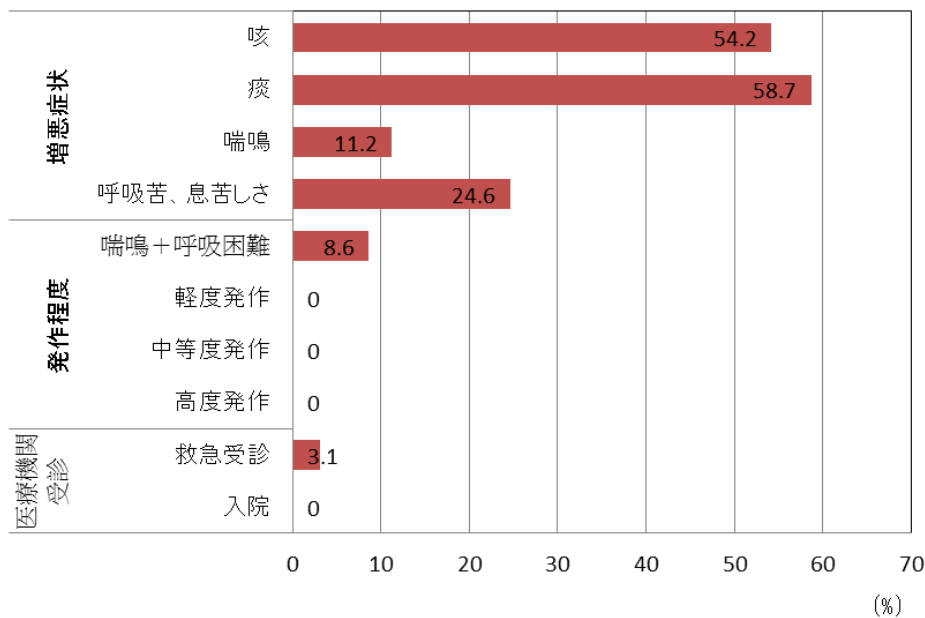
表(2)-1 電話調査による黄砂が喘息患者およびCOPD患者の自覚症状に与える影響評価の調査実施数

その結果 (図 (2)-4) 、2011 年 5 月の黄砂時に喘息患者 16.5%、COPD 患者 2%、2012 年 4 月黄砂時喘息患者 16%、COPD 患者 2%、2013 年 3 月黄砂時喘息患者 9%、COPD 患者 0%で呼吸器症状が黄砂後に増悪していた。黄砂時に喘息患者では少ない場合に 8%、多い場合には 23%において呼吸器症状が増悪していた。一方で、非アレルギー性疾患である COPD 患者においては 0%~5%であり、調査対象者数は異なるものの明らかに喘息患者において黄砂時に呼吸器症状が悪化しやすいと考えられた。この差異は、黄砂時の何が、あるいはどのような物質がヒトの健康に影響する物質であるのかを明らかにする上で重要な結果と考えられた。



図(2)-4 電話調査結果

これまでに調査を行った喘息患者 1660 名のうち 14.9% (247 名) で黄砂時に呼吸器症状が増悪することが確認された。その増悪した症状のほとんどは咳、痰の増加であった (図(2)-5)。また、呼吸困難と喘鳴を認め黄砂を機に喘息発作を起こした患者も存在した。黄砂を契機に喘息が増悪し救急受診を要した患者を 3.1%で認めたが、その発作の程度は軽く入院となった症例はなかった。



図(2)-5 電話調査で黄砂時に呼吸器症状が増悪した喘息患者での増悪状況

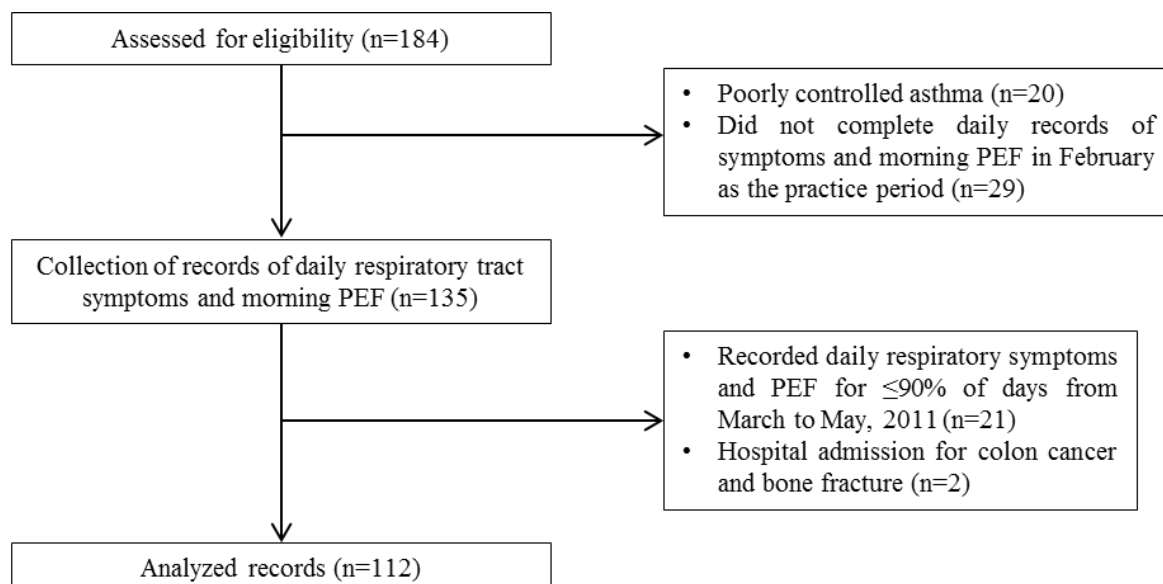
今回調査した全ての患者が呼吸器専門医あるいはアレルギー専門医での治療を受けている。本邦からは喘息時に小児喘息の入院頻度が高くなることが報告されている²²⁾。この調査では入院となった喘息児童の治療背景は検討されておらず、喘息治療を十分に受けていない患者が入院となっ

た可能性がある。今回の調査結果からは、本邦において成人喘息と小児喘息で黄砂によって受ける影響に差がある可能性が示唆された。一方、黄砂は確かに喘息を増悪させるものの、きちんとした治療を受けていれば成人喘息患者では入院に至るまでの増悪にはならない可能性が示唆される。今後の黄砂による健康対策を考えていく上で重要な結果と考えられた。

(2) 症状日誌およびピークフローメーターを用いた呼吸機能評価による黄砂が喘息患者の症状および呼吸機能に与える影響評価についての結果と考察

平成23年度環境省総合環境推進費に応募するにあたり、2010年中に症状日誌およびピークフローメーターを用いた呼吸機能評価による黄砂が喘息患者の症状および呼吸機能に与える影響評価について立案した。調査の準備を進め採択内定を受けた段階で調査に着手し遂行した。

図(2)-6に研究についてのフローチャートを示す。184名の成人喘息患者の登録を行ったが、20名は重症喘息であり、29名は観察期間中に記録を行うことが難しく同意を撤回した。135名について2011年6月に日誌を回収したが21名で記録が90%未満であり、2名が他疾患で入院となったため解析から除外した。112名の軽症、中等症の成人喘息患者の結果を解析した。



図(2)-6 Flowchart showing the disposition of subjects in the study.

112名の患者の背景因子をアレルギー性鼻炎 (allergic rhinitis, AR) あるいは副鼻腔炎 (chronic sinusitis, CS) の合併の有無に分類して表(2)-2に示す。

	All patients	Patients without comorbid AR and/or CS	Patients with comorbid AR and/or CS
Number	112	81	31
Age (year)	61.4 ±16.3	64.3±14.7*	55.5 ±18.0*
Gender (male/female)	43/69	31/50	12/19
Allergic rhinitis / Chronic sinusitis / Both	23/5/3	0/0/0	23/5/3
Allergic conjunctivitis	3	1	2
Atopic dermatitis	4	2	2
Smoking status Never / Ex / Current	101/8/3	72/6/3	29/2/0
FVC (L)	3.09±0.91	3.00 ± 0.86	3.35±0.96
FEV ₁ (L)	2.45 ±0.80	2.34 ±0.75	2.66 ±0.86
%FEV ₁ (%)	110.5±18.5	106.4±17.7	112.0 ±23.5
FEV ₁ % (%)	79.2±7.4	78.6±6.7	79.1±8.7
Inhaled corticosteroid	111	80	31
low dose	27	15	12
medium dose	73	60	13
high dose	11	5	6
Long-acting β_2 -agonists	42	32	10
Leukotriene receptor antagonist	60	36	24
Theophylline	24	21	3
Histamine antagonist	26	1	25
Intranasal corticosteroid	12	0	12

Data are presented as the mean ±S.D.

Abbreviations: FEV₁; forced expiratory volume in 1 second, %FEV₁; percentage of predicted

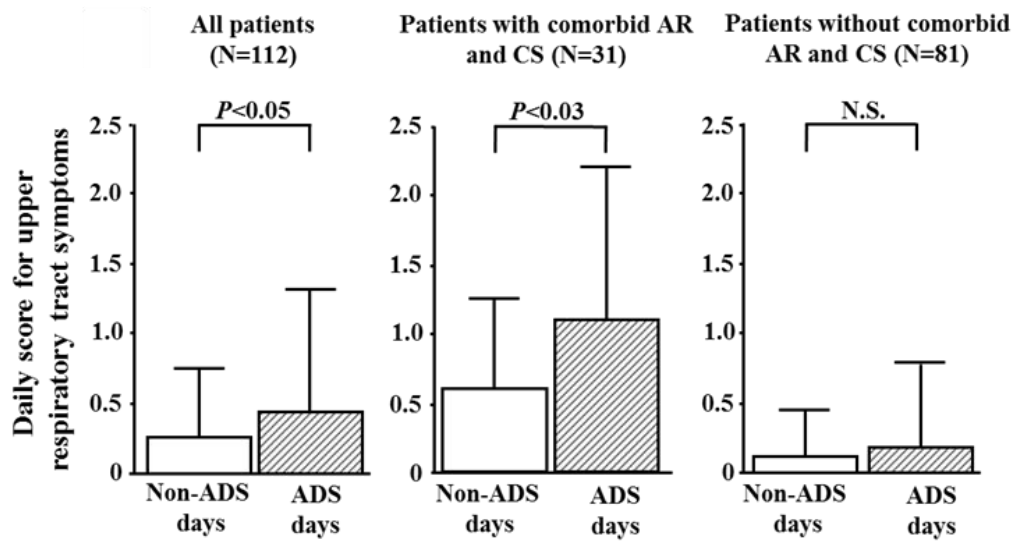
FEV₁, FVC; forced vital capacity.

* $P<0.05$ by Mann-Whitney U for comparison of patients with and without comorbid allergic rhinitis and/or chronic sinusitis

表(2)-2 患者背景

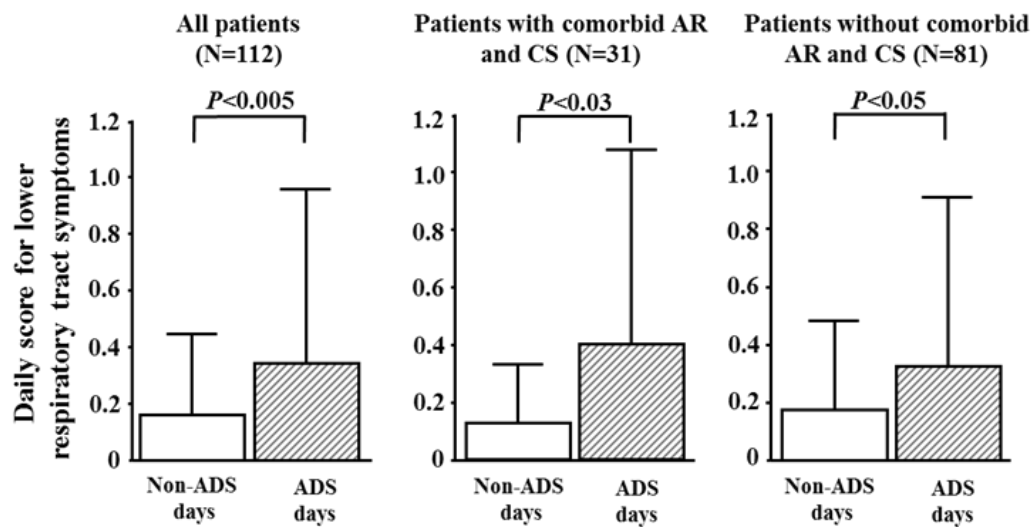
年齢を除いて、アレルギー性鼻炎（AR）あるいは副鼻腔炎（CS）の有る患者と無い患者で背景因子に統計学的な違いはなかった。黄砂は 2011 年 5 月 1 日から 3 日に観測された。

『黄砂日 (=ADS days)』を 2011 年 5 月 1 日から 3 日とし、『非黄砂日 (= non-ADS days)』を 2011 年 4 月 10 日から 4 月 30 日とした。112 名の成人喘息患者全体では黄砂日の鼻症状スコアは 0.45 ± 0.08 点であり、非黄砂日の 0.26 ± 0.05 点に比較して有意に高かった（図(2)-7）。アレルギー性鼻炎（AR）あるいは副鼻腔炎（CS）がある成人喘息患者においては、黄砂日の鼻症状スコアは非黄砂日に比較して同様に高かった。しかし、アレルギー性鼻炎あるいは副鼻腔炎がない成人喘息患者では、黄砂日に鼻症状の有意な増悪はなかった。



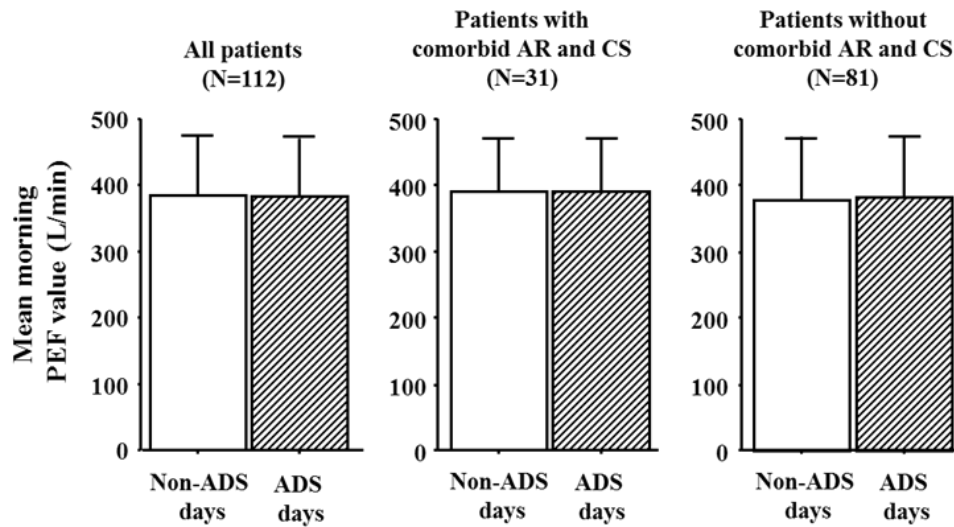
図(2)-7 黄砂日と非黄砂日の鼻症状スコアの比較

成人喘息患者全体では黄砂日の呼吸器症状スコアは 0.35 ± 0.61 点であり、非黄砂日の 0.16 ± 0.28 点に比較して有意に高かった (図(2)-8)。さらに、呼吸器症状についてはアレルギー性鼻炎 (AR) あるいは副鼻腔炎 (CS) の有無に関わらず黄砂日のスコアは非黄砂日に比較して高かった。



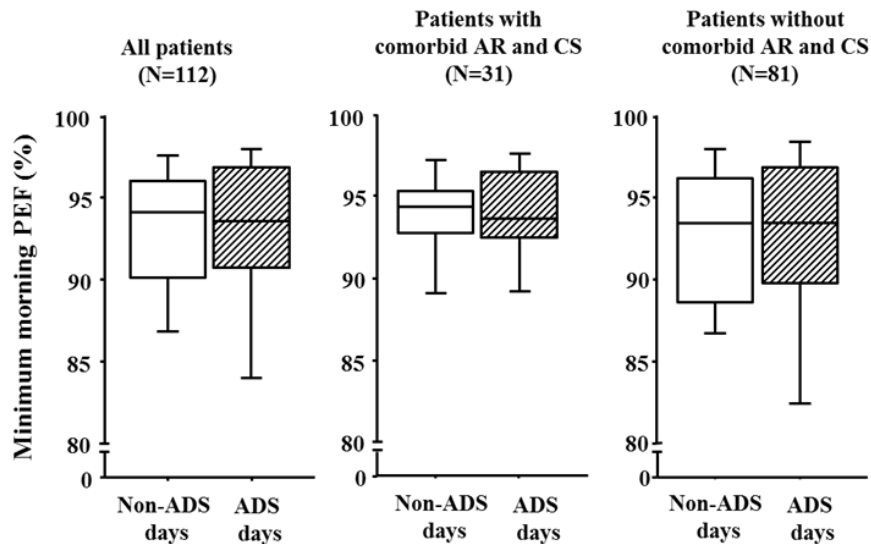
図(2)-8 黄砂日と非黄砂日の呼吸器症状スコアの比較

ピークフローによる呼吸機能測定について検討をした。朝のピークフロー値の平均は黄砂日が 384.9 ± 89.6 L/min、非黄砂日が 382.3 ± 90.2 L/min で有意な差を認めなかった (図(2)-9)。



図(2)-9 黄砂日と非黄砂日の朝の平均ピークフロー値

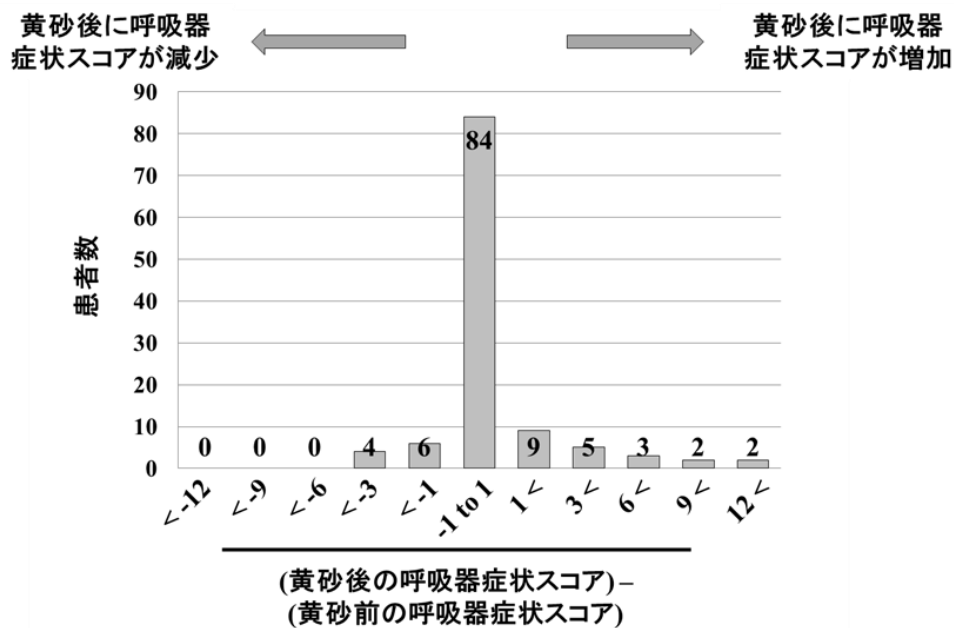
さらに、非黄砂日と黄砂日のピークフロー値の最低値(%)は、成人喘息患者全体で黄砂日が $92.4 \pm 5.9\%$ 、非黄砂日が $92.7 \pm 4.6\%$ で有意な差を認めなかった(図(2)-10)。アレルギー性鼻炎あるいは副鼻腔炎の有無でも評価した。アレルギー性鼻炎あるいは副鼻腔炎のある患者では、黄砂日が $93.4 \pm 3.2\%$ 、非黄砂日が $93.2 \pm 4.2\%$ であった。また、アレルギー性鼻炎あるいは副鼻腔炎のない患者では、黄砂日が $92.3 \pm 5.1\%$ 、非黄砂日が $92.0 \pm 6.4\%$ であった。いずれの患者群においても黄砂日にピークフロー値の低下は認めなかった。



図(2)-10 ピークフロー値の最低値(%)

黄砂前後での呼吸器症状スコアの差をとると、112名のうち21名(18.8%)で黄砂時に呼吸器症状が増悪していた(図(2)-11)。さらに、3名の患者では黄砂前まで喘息のコントロールが良好

であったにも関わらず喘息発作のために救急受診が必要であった。しかし、入院加療に至っては至っていなかった。



図(2)-11 黄砂前後での呼吸器症状スコア差

本調査でコントロールが良好な成人喘息患者であっても黄砂時に呼吸器と鼻の症状が増悪することが明らかになった。また、一部の患者では黄砂時に喘息発作があったものの、発作の程度は軽症であった。これまで我々は黄砂が喘息患者の症状を増悪させることを報告してきたが、手法が電話での聞き取り調査であり、客観的指標として呼吸機能低下があることも明らかにしてきたが、調査バイアスを完全に除外できなかった。本調査では、毎日の呼吸器と鼻の症状をスコア化して記録していたが、やはり黄砂時に呼吸器症状、鼻症状は増悪しており、黄砂は喘息患者の症状を増悪させると考えられた。

以前の調査では、成人喘息患者の呼吸機能が黄砂に連動して悪化することを明らかにしていた。しかしながら、今回の検討では黄砂による呼吸機能悪化は確認できなかった。この原因は幾つか考えられる。一つには、2011年の黄砂時の大気粉塵量が少なかったことが挙げられる。表(2)-2に今回調査をした喘息患者が居住する米子市、松江市、豊岡市、北九州市の本研究期間での黄砂日と非黄砂日の大気汚染データを示す。松江市、米子市ではSPMの平均濃度が $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えることがなく、これまで行ってきた調査の黄砂時に比較して大気粉塵の量が少なかったことが挙げられる。また、これまでの調査では黄砂時に呼吸器症状が増悪した患者においてのみ呼吸機能が増悪していることを確認していた。今回の調査では解析を行った全ての成人喘息患者での呼吸機能の変化を見ているため差がでにくかったと考えられる。事実、82%の患者では黄砂時に症状が増悪していなかった。

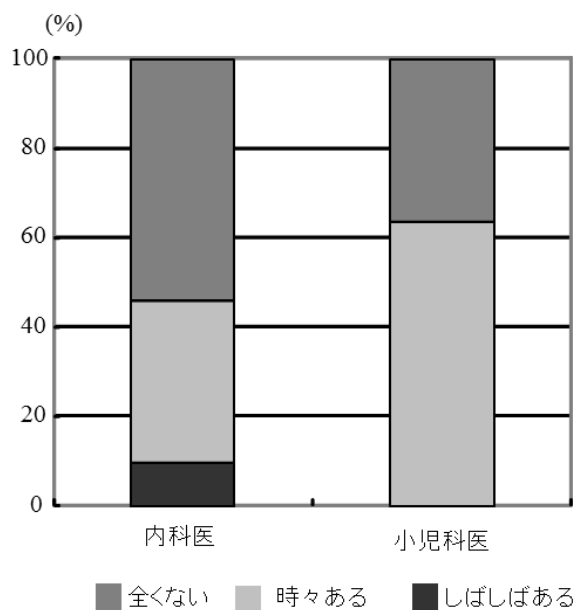
	Yonago City		Matsue City	
	ADS days	Non-ADS days	ADS days	Non-ADS days
Av SPM, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	80.3 $\pm$ 29.1*	19.2 $\pm$ 1.5	64.0 $\pm$ 28.2*	17.2 $\pm$ 1.5
Av daily maximum SPM, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	124.3 $\pm$ 2.1*	38.3 $\pm$ 4.3	92.3 $\pm$ 13.8*	29.4 $\pm$ 2.4
Av SO ₂ , ppb	1.0 $\pm$ 0.0	1.2 $\pm$ 0.1	0.6 $\pm$ 0.1	1.0 $\pm$ 0.1
Av daily maximum SO ₂ , ppb	2.0 $\pm$ 0.0	2.6 $\pm$ 0.4	1.1 $\pm$ 0.2	2.1 $\pm$ 0.3
Av NO ₂ , ppb	6.3 $\pm$ 3.1	6.1 $\pm$ 2.0	2.0 $\pm$ 1.1	2.5 $\pm$ 1.2
Av daily maximum NO ₂ , ppb	13.3 $\pm$ 8.5	15.3 $\pm$ 7.4	3.5 $\pm$ 1.9	5.9 $\pm$ 3.4
Av Ox, ppb	37.7 $\pm$ 5.0	38.3 $\pm$ 8.1	46.1 $\pm$ 12.4	53.1 $\pm$ 8.0
Av daily maximum Ox, ppb	52.3 $\pm$ 2.1	52.2 $\pm$ 13.3	61.5 $\pm$ 6.5	69.1 $\pm$ 11.6
	Toyooka City		Kanda Town	
	ADS days	Non-ADS days	ADS days	Non-ADS days
Av SPM, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100.6 $\pm$ 6.5*	22.2 $\pm$ 2.4	109.0 $\pm$ 35.8*	28.8 $\pm$ 11.4
Av daily maximum SPM, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	162 $\pm$ 14.9*	32.0 $\pm$ 11.8	160.0 $\pm$ 17.8*	57.6 $\pm$ 33.2
Av SO ₂ , ppb	0.30 $\pm$ 0.06	0.71 $\pm$ 0.90	1.3 $\pm$ 0.6	2.1 $\pm$ 1.2
Av daily maximum SO ₂ , ppb	0.67 $\pm$ 0.33	1.3 $\pm$ 1.2	3.7 $\pm$ 2.1	5.9 $\pm$ 4.1
Av NO ₂ , ppb	3.86 $\pm$ 0.28	4.76 $\pm$ 0.48	10.0 $\pm$ 8.7	15.5 $\pm$ 10.7
Av daily maximum NO ₂ , ppb	13.0 $\pm$ 2.1	11.6 $\pm$ 3.7	26.0 $\pm$ 17.6	39.2 $\pm$ 22.4
Av Ox, ppb	45.2 $\pm$ 6.5	58.5 $\pm$ 2.1	37.0 $\pm$ 11.4	42.5 $\pm$ 14.4
Av daily maximum Ox, ppb	59.3 $\pm$ 6.4	67.0 $\pm$ 10.8	52.7 $\pm$ 13.7	63.8 $\pm$ 13.2

表(2)-2 米子市、松江市、豊岡市、北九州市における黄砂日と非黄砂日の大気汚染データ

(3) 医師の診療経験調査に基づく黄砂がヒトの健康に与える影響についての評価について結果と考察

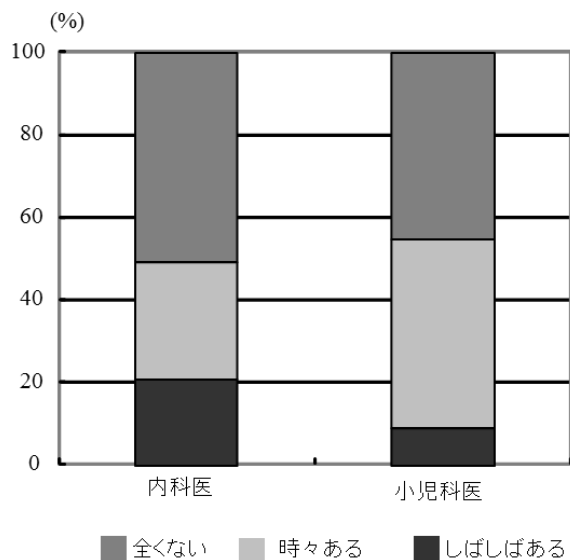
患者調査をおこなった全ての喘息患者が呼吸器専門医あるいはアレルギー専門医による治療を受けていた。そこで専門医の治療を受けていない患者において黄砂がどのような影響を与えているか実態を把握するために、鳥取県西部医師会に所属し内科あるいは小児科を標榜し無床の医療機関で勤務する医師を対象として、黄砂時の診療経験についてアンケート調査をおこなった。

内科医 103 人、小児科医 11 人の合計 114 人にアンケートを配布し、内科 63 人(回収率 61.2%)、小児科 11 人(回収率 100%)から回答を得た。内科医では黄砂が飛散した際に呼吸器症状が増悪する患者を 6 人(9.5%)が“しばしば経験”し、23 人(36.5%)が“時々経験する”と回答した。一方で、34 人(54.0%)が“経験がない”と回答した(図(2)-12)。小児科医では 7 人(63.6%)が“時々経験する”と回答し、“しばしば経験”すると回答した医師はなかった。また、4 人が“経験がない”と回答したが、このうち 1 名は黄砂が増悪させているのか判断が出来ないと回答した。



図(2)-12 黄砂時の呼吸器症状増悪患者の診療経験

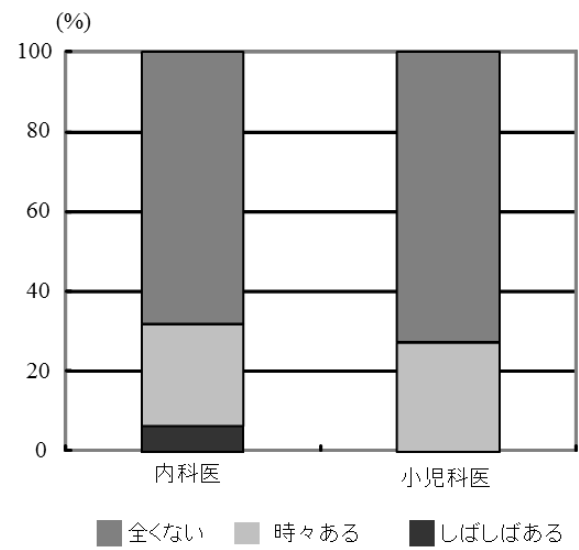
鼻症状については、内科医のうち 13 人 (20.6%) が“しばしば経験”、18 人 (28.6%) が“時々経験する”、32 人 (50.8%) が“経験がない”と回答した(図(2)-13)。小児科医では 1 人 (9.1%) が“しばしば経験”、5 人 (45.45%) が“時々経験する”、5 人 (45.45%) が“経験がない”と回答した。



図(2)-13 黄砂時の鼻症状増悪患者の診療経験

また、眼症状については内科医のうち 4 人 (6.3%) が“しばしば経験”、16 人 (25.4%) が“時々経験する”、43 人 (68.3%) が“経験がない”と回答した。小児科医では 5 人 (27.3%) が“時々経験する”、6 人 (72.7%) が“経験がない”と回答し、“しばしば経験”すると回答したものは

なかった(図(2)-14)。一方、皮膚症状については内科医、小児科医とも全医師で増悪を経験しているものはなかった。



図(2)-14 黄砂時の眼症状増悪患者の診療経験

月に診療する喘息患者数毎に黄砂飛散時の呼吸器症状増悪患者の診療経験の有無をみると、10 症例未満の医師 25 人のうち 6 人 (24%) が診療を経験していたのに対し、月毎の診療喘息患者数が 10～19 症例の医師 25 人では 18 人 (72%)、以下 20～49 症例の医師 14 人中 11 人 (78.6%)、50 症例以上の医師 7 人中 6 人 (85.6%) であった(表(2)-3)。医師が月に診療する喘息患者数によって黄砂飛散時に呼吸器症状が増悪する患者を診療する機会は有意に異なっていた ($P<0.002$)。

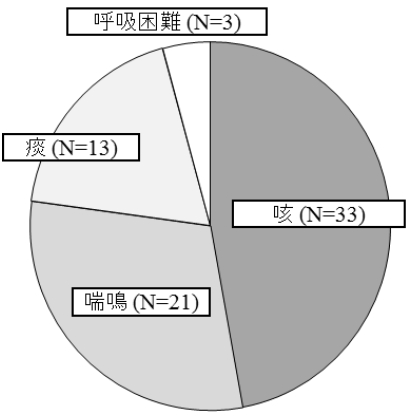
月当たりの喘息患者診療数	黄砂時に喘息発作患者の診療経験があると回答した内科医あるいは小児科医数
10症例未満	6/25
10-19症例	18/25
20-49症例	11/14
50症例以上	6/7

分母は該当する“月当たり喘息患者診療数”を回答した内科医および小児科医の総数. 分子はこのうち黄砂時に喘息発作患者の診療経験があると回答した内科医および小児科医数. 3人の内科医は無回答.

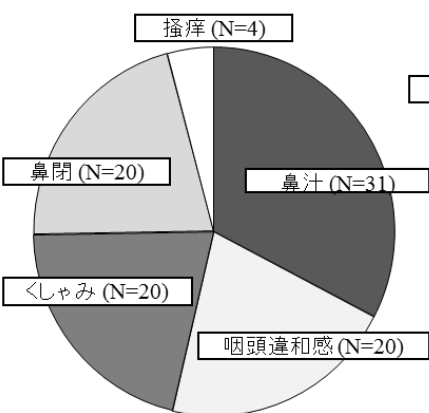
表(2)-3 月別喘息診療患者数と黄砂時の喘息発作診療経験

どのような呼吸器症状が増悪していたかという質問に対して、アンケートに回答した内科医、小児科医をあわせた 74 人のうち、33 人が咳、21 人が喘鳴、13 人が痰、3 人が呼吸困難と回答した(図

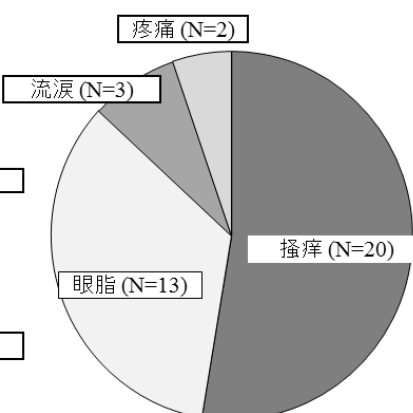
(2)-15)。鼻症状では鼻汁 31 人、鼻閉 20 人、くしゃみ 20 人、咽頭違和感 20 人、掻痒感が 4 人であり (図 (2)-16)、眼症状では掻痒感 20 人、涙 13 人、眼脂 3 人、疼痛 2 人であった (図 (2)-17)。



図(2)-15 悪化した呼吸器症状



図(2)-16 悪化した鼻症状



図(2)-17 悪化した眼症状

黄砂飛散時に呼吸器症状が増悪した患者の診療経験があると回答した内科医 29 人のうち 14 人、小児科医 7 人のうち 2 人が黄砂飛散が誘因と考えられる喘息発作患者の診療経験を有していた。内科医で喘息発作患者を診療した例数では、11 人が 1～3 例、2 人が 4～5 例を診療したと回答し、1 人の内科医は 10 例以上の診療経験を有していた (表 (2)-4)。

診療した喘息発作患者数		回答した医師数
内科医	1-3症例	11人
	4-5症例	2人
	10症例以上	1人
小児科医	1-3症例	1人
	無回答	1人

表(2)-4黄砂飛散時に診療した喘息発作患者数

喘息発作強度毎の診療人数では喘鳴/胸苦しいが 28 例、軽度発作が 9 例であり、中等度以上の発作の症例はなかった (表 (2)-5)。黄砂飛散が誘因と考えられる喘息発作患者の診療経験があると回答した小児科医 2 人のいずれもが、診療した喘息発作患者の症例数は 1～3 例であり、その強度は喘鳴/胸苦しさのみが 4 例、軽度発作が 1 例であった。

	喘息発作重症度	該当する患者数
成人喘息患者	喘鳴/呼吸困難	28人
	小発作	9人
	中発作	0人
	大発作	0人
	重篤	0人
小児喘息患者	喘鳴/呼吸困難	4人
	小発作	1人
	中発作	0人
	大発作	0人
	重篤	0人

表(2)-5 黄砂時に診療した喘息発作患者数

これまでに黄砂飛散が成人喘息患者の症状および呼吸機能を増悪させることを報告してきたが、その調査では喘息患者は呼吸器内科医のみによって診療されていた。このため一般医家が診療している喘息患者の実態は十分に反映されていなかった。より多くの喘息患者について調査を実施することが重要であるが、無床医療機関で診療に従事する内科医、小児科医を対象に黄砂飛散が原因となって症状増悪したと考えられる患者の診療経験を調査することで黄砂が臨床症状に与える影響について検討した。調査の結果、48%の医師が黄砂が原因で呼吸器、鼻、眼症状が増悪したと考えられる患者の診療を経験していた。さらに、月に10例以上の喘息患者を診察する医師においては70%以上が黄砂飛散時に呼吸器症状が増悪する患者を診療していた。鳥取県西部の一般医家の半数は黄砂が臨床症状、特に呼吸器、鼻症状増悪に影響すると考えており、黄砂はヒト健康に影響していることが示唆された。

調査可能だった内科医数と小児科医数に差があり比較は難しいが、小児科医の方が黄砂飛散を機に症状が増悪している患者の診療を経験している割合は高かった。これまでの調査では成人喘息患者で黄砂を契機に入院となるような例はなかった。一方で、本邦からは黄砂飛散時に小児喘息の入院患者数が増加し、この傾向は男児で顕著であることが報告されている。屋外での活動時間の差異、解剖学的な性差、あるいは特に成人と小児では体格の差などが原因として考えられるが、黄砂による影響に成人と小児、特に喘息において、差がある可能性があり今後検討していく必要があると思われる。

黄砂飛散時に呼吸器症状が増悪した患者の診療経験があると回答した内科医、小児科医36人のうち21人が喘鳴を呈する患者を診察していた。これまでに行ってきた呼吸器専門医に診療を受けている喘息患者での調査では、黄砂飛散時に増悪する呼吸器症状の60%が咳あるいは痰であり、喘鳴は5%以下であった。単純に比較をすることは難しいが、一般医家に受診する喘息患者は黄砂飛散時の症状増悪が咳、痰に留まらず、喘鳴に至ることが多いと推測された。

さらに我々のこれまでの報告では発作の程度は喘鳴/胸苦しいまでに留まり、軽度発作以上をきたした患者はなかった。しかし、今回の調査では黄砂が原因と考えられる軽度発作症例が成人喘息で9例、小児喘息で1例と回答された。黄砂飛散時に症状が増悪する喘息患者において、一般医家の方がより症状が強い喘息患者の診療経験を有していることが推察された。この原因として病床を有しない医院あるいは診療所の方が、服薬アドヒアランスが悪い不定期受診となるような喘息患者の診療機会が多いことが一因と考えられる。一方、中等度以上の発作症例の経験は一般医家でもなく、黄砂飛散は喘息の発作を誘発する可能性があるものの、その強度はそれほど重篤ではない可能性がある。他方、黄砂飛散は本邦の小児喘息の入院を増加させるとする報告がある。黄砂飛散が喘息を含めたヒトの健康に与える影響について、まだ十分に実態が把握されているとは言えず、これまで以上に規模の大きい詳細な調査を行う必要がある。

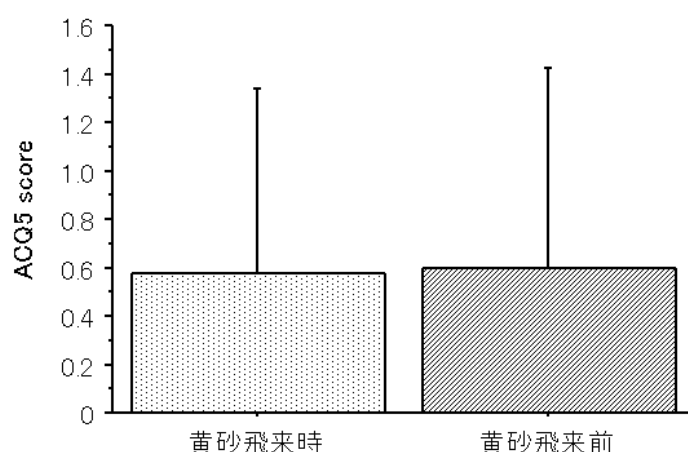
黄砂飛散が多い時期に喘息治療を強化する必要があるかという質問に対して、黄砂飛散時に呼吸器症状の増悪した患者の診療経験がある内科医29人、小児科医7人のうち2人(5.6%)が“強く思う”、22人(61.1%)が“ややそう思う”、7人(19.5%)が“どちらでもない”、3人(8.3%)が“あまり思わない”と回答し、2人(5.6%)は無回答であった(表(2)-6)。

回答した内科医および小児科医数	
強く思う	2人
ややそう思う	22人
どちらでもない	7人
あまり思わない	3人
全く思わない	0人
無回答	2人

表(2)-6 黄砂時に喘息治療強化の必要性に関する一般医家の意識

4) 黄砂が喘息患者の喘息コントロールと呼気一酸化窒素濃度を与える影響について結果と考察

2013年3月から5月の期間で調査を行った。喘息のコントロール状態について、1週間毎にAsthma control questionnaire 5 (ACQ5)の記入を行い評価した。2013年は3月8日から10日、3月19日と20日に黄砂が観測された。黄砂飛来時の喘息コントロール指数は2013年3月8日から10日、3月19日と20日を含む週のスコアとした。また、黄砂飛来前として3月1日から7日までのスコアとした。246名の軽症から重症の成人喘息患者でモニタリングをおこなった。その結果、黄砂飛来時のACQスコアは 0.57 ± 0.77 、黄砂飛来前は 0.60 ± 0.82 であり両群に有意な差を認めなかった(図(2)-17)。



図(2)-17 黄砂による喘息コントロール状態の変化

今回の調査で喘息によるコントロール状態の悪化が確認できなかった原因が幾つか考えられる。まず、第一に 2012 年以降黄砂時の砂塵量は極めて少なく、SPM は日最高値であっても環境基準値である $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えていることがない（表(2)-6。喘息患者に影響を与えるだけの黄砂が飛来していなかったと考えられる。別の原因として、喘息の重症度が様々な患者が混在していることが挙げられる。今後、層別化して詳細な解析を行う必要がある。同様にアレルギー性鼻炎の患者がどのような割合で含まれているか検討する必要もある。黄砂飛来は 3 月から 5 月が多いが、この時期はスギあるいはヒノキ花粉の飛散も同時に認められる。本邦はスギ花粉症があり、他国と同様に黄砂について考えることは難しい。

	黄砂日		非黄砂日	
	2012年	2013年	2012年	2013年
Daily average temperature, °C	17.6 ± 1.1	12.5 ± 3.0	15.7 ± 3.5	13.2 ± 5.0
Daily maximum temperature, °C	23.3 ± 3.0	19.1 ± 1.7	20.9 ± 4.5	18.7 ± 5.7
Daily minimum temperature, °C	13.1 ± 0.7	7.1 ± 4.7	10.9 ± 4.0	8.1 ± 5.0
Daily average relative humidity, %	70.0 ± 5.7	70.2 ± 8.9	70.4 ± 9.3	69.8 ± 9.8
Daily minimum relative humidity, %	48.0 ± 12.7	37.7 ± 13.1	44.9 ± 15.4	42.8 ± 13.6
Daily average atmospheric pressure, hPa	1010.8 ± 1.0	1010.0 ± 5.2	1010.0 ± 5.7	1011.3 ± 5.9
Daily average SPM, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	36.0 ± 2.8	37.5 ± 14.5	17.7 ± 10.1	17.8 ± 8.9
Daily maximum SPM, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	58.0 ± 11.3	60.2 ± 11.2	30.6 ± 19.9	28.8 ± 14.0
Daily average PM _{2.5} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	17.2 ± 1.3	35.6 ± 11.8	10.3 ± 5.4	17.5 ± 7.3
Daily maximum PM _{2.5} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	29.0 ± 5.7	61.3 ± 15.4	22.5 ± 10.7	29.2 ± 10.7
Daily average SO ₂ , ppb	1.30 ± 0.57	1.92 ± 0.92	0.85 ± 0.60	0.95 ± 0.75
Daily maximum SO ₂ , ppb	2.45 ± 1.34	6.93 ± 5.39	2.10 ± 3.17	2.45 ± 3.14
Daily average NO ₂ , ppb	1.50 ± 0.42	3.50 ± 1.17	2.57 ± 1.15	2.75 ± 1.16
Daily maximum NO ₂ , ppb	3.45 ± 1.77	6.90 ± 3.44	5.50 ± 3.14	5.61 ± 2.83
Daily average O ₃ , ppb	55.9 ± 5.7	55.7 ± 10.8	50.0 ± 7.5	50.2 ± 8.4
Daily maximum O ₃ , ppb	71.0 ± 5.4	78.6 ± 11.4	66.4 ± 12.2	67.3 ± 13.3

Data are presented as the mean ± S.D., ADS days were April 23 to 24 in 2012., Non-ADS days were from 1 April to 31 May in 2012 except for ADS days.

表(2)-7 2012年、2013年の黄砂日、非黄砂日の気象、大気汚染データ

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

黄砂が呼吸器疾患である喘息患者および COPD 患者の呼吸器症状を増悪させることを明らかにした。さらに、COPD 患者に比較してアレルギー疾患である喘息患者の方が黄砂によって症状の増悪

が起こりやすく、黄砂は単に気道炎症を増悪させるのではなく、気道のアレルギー性炎症を増悪させる作用がより強い可能性が示唆された。黄砂が呼吸器システムを増悪させるメカニズムは明らかになっていないが、じん肺の歴史からは黄砂の本体である砂塵（＝Si）が喘息の発症、増悪に関与している可能性は低い。黄砂にはさまざまな化学物質や細菌、真菌などが付着していることが既に明らかになっているが、このうち気道のアレルギー性炎症を増悪させることが出来る物質が黄砂の喘息増悪に深く関わっていることが推察された。この事は黄砂のうちヒトの呼吸器システムへの影響が強い物質を同定する上で重要な知見と考えられた。すなわち、黄砂に付着するアレルギー性炎症を起こすことができる物質こそが黄砂が呼吸器システムを増悪させる際の原因物質と推定される。本研究では黄砂による喘息への影響が黄砂毎に大きく異なっていたが、黄砂に付着するアレルギー性気道炎症を増悪させる物質の多寡によってこのような結果になったことが予測された。以上より、黄砂は呼吸器疾患、特に喘息を増悪させ、その原因として黄砂に付着している物質が重要であることを示唆した。

（２）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

黄砂による健康影響は確かに認められるが、専門医に治療を受けている場合にはその増悪の程度は重篤ではない。黄砂に対する健康対策のなかで黄砂によって呼吸器症状が増悪する場合には呼吸器専門医あるいはアレルギー専門医の治療を受けることが有用であることを示すことができる。COPDによる死亡が年々増加し我が国では死亡原因の第9位、WHOの統計では第4位になっている。さらに、COPDに費やされる医療費は他疾患より高額であることが明らかになっている。このため世界的にCOPDに大きな関心が集まり、その対策に巨費が投じられている。我が国でも平成25年から健康日本21の中にCOPDが主要疾患の一つとして取り上げられている。一方で、テレビCMなどのメディアでもCOPDの啓発が進められているが国民の認知度が改善していないのは大きな問題となっている。最近、黄砂への国民の関心は高くなっており、黄砂に関する知見を紹介する中でCOPDへの影響にも言及すればCOPDの啓発活動に活用できると考えられる。COPDの啓発を進めることは医療費抑制につながり、医療政策あるいは我が国の財政対策上極めて有用と考えられる。実際に我々が今回の研究で行った市民公開講座の中で黄砂あるいはPM2.5のCOPDへの影響を紹介した。その結果、市民参加者でのCOPD認知度は高くなり、また、禁煙への動機付けになっていた。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 渡部仁成, 倉井淳, 井岸正, 都田裕之, 山崎章, 長谷川泰之, 山崎千恵, 渡辺徹志, 清水英治. 医師の診療経験調査による黄砂が臨床症状に与える影響についての検討. 鳥取医学雑誌 2012; 40: 62-67.
- 2) Masanari Watanabe, Jun Kurai, Katsuyuki Tomita, Hiroyuki Sano, Satoshi Abe, Rumiko Saito, Sayaka Minato, Tadashi Igishi, Naoto Burioka, Takanori Sako, Kazuhito Yasuda, Masaaki Mikami, Shinichi Kurita, Hirokazu Tokuyasu, Yasuto Ueda, Tatsuya Konishi, Akira Yamasaki, Setsuya Aiba, Mitsuo Oshimura, and Eiji Shimizu. Effects on asthma and induction of interleukin-8 caused by Asian dust particles collected in western Japan. J Asthma 2014 Mar 27 [Epub ahead of print]

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 倉井 淳, 渡部 仁成, 井岸 正, 都田 裕之, 山崎 章, 長谷川 泰之, 山崎 千恵, 清水 英治: 第 62 回アレルギー学会秋季学術大会 (2012)「医師の診療経験調査による黄砂が喘息を含む健康に与える影響について」
- 2) 倉井 淳, 渡部 仁成, 迫 隆紀, 三上 真顯, 安田 和人, 上田 康仁, 徳安 宏和, 小西 龍也, 加藤 和宏, 山本 司生, 藤井 義寛, 井岸 正, 山崎 章, 清水 英治.「コントロール良好な成人喘息患者への黄砂の影響」 第 44 回日本職業環境アレルギー学会、2013 年
- 3) 渡部 仁成, 倉井 淳, 山崎 章, 清水 英治.「花粉と黄砂 黄砂がコントロール良好な成人喘息患者の呼吸器・鼻症状、呼吸機能に与える影響」 第 63 回日本アレルギー学会秋季学術大会、2013 年

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Douglas WD, Dockery AP, Xiping X, John DS, James HW, Martha EF. An association between air pollution and mortality in six U.S. Cities. *N Engl J Med* 2003; 329: 1753-1759.
- 2) McCreanor J, Cullinan P, Nieuwenhuijsen MJ, Stewart-Evans J, Malliarou E, Jarup L. Respiratory effects of exposure to diesel traffic in persons with asthma. *N Engl J Med* 2007; 357: 2348-2358.
- 3) Onishi K, Kurosaki Y, Otani S, Yoshida A, Sugimoto N, Kurozawa Y. Atmospheric transport route determines components of Asian dust and health effects in Japan. *Atmos Environ* 2012; 49: 94-102.
- 4) Chang CC, Lee IM, Tsai SS, Yang CY. Correlation of Asian dust storm events with daily clinic visits for allergic rhinitis in Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2006; 69: 229-235.
- 5) Chen YS, Sheen PC, Chen ER, Liu YK, Wu TN, Yang CY. Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan. *Environ Res* 2004; 95: 151-155.
- 6) Chen YS, Yang CY. Effects of Asian dust storm events on daily hospital admissions for cardiovascular disease in Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2005; 68: 1457-1464.
- 7) Cheng MF, Ho SC, Chiu HF, Wu TN, Chen PS, Yang CY. Consequences of exposure to Asian dust storm events on daily pneumonia hospital admissions in Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2008; 71: 1295-1299.
- 8) Chiu HF, Tiao MM, Ho SC, Kuo HW, Wu TN, Yang CY. Effects of Asian dust storm events on hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease in Taipei, Taiwan. *Inhal Toxicol* 2008; 20: 777-781.
- 9) Lai LW, Cheng WL. The impact of air quality on respiratory admissions during Asian dust storm periods. *Int J Environ Health Res* 2008; 18: 429-450.
- 10) Yang CY, Chen YS, Chiu HF, Goggins WB. Effects of Asian dust storm events on daily stroke admissions in Taipei, Taiwan. *Environ Res* 2005; 99: 79-84.
- 11) Yang CY, Tsai SS, Chang CC, Ho SC. Effects of Asian dust storm events on daily admissions for asthma in Taipei, Taiwan. *Inhal Toxicol* 2005; 17: 817-821.
- 12) Yang CY. Effects of Asian dust storm events on daily clinical visits for conjunctivitis in Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2006; 69: 1673-1680.
- 13) Yang CY, Cheng MH, Chen CC. Effects of Asian dust storm events on hospital admissions for congestive heart failure in Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2009; 72: 324-328.
- 14) Chen YS, Sheen PC, Chen ER, et al. Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan. *Environ Res* 2004; 95: 151-155.
- 15) Bell ML, Levy JK, Lin Z. The effect of sandstorms and air pollution on cause-specific hospital admissions in Taipei, Taiwan. *Occup Environ Med* 2008; 65: 104-111.

- 16) Chan CC, Chuang KJ, Chen WJ, Chang WT, Lee CT, Peng CM. Increasing cardiopulmonary emergency visits by long-range transported Asian dust storms in Taiwan. *Environ Res* 2008; 106: 393-400.
- 17) Kwon HJ, Cho SH, Chun Y, Lagarde F, Pershagen G. Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea. *Environ Res* 2002; 90: 1-5.
- 18) Hawng SS, Chou SH, Kwon HJ, et al. Effects of the severe Asian dust events on daily mortality during spring of 2002, in Seoul, Korea. *J prev Med Public Health* 2005; 38: 197-202.
- 19) Yoo Y, Choung JT, Yu j, et al. Acute effects of Asian dust events on respiratory symptoms and peak expiratory flow in children with mild asthma. *J Korean Med Sci* 2008; 23: 66-71.
- 20) Hong YC, Pan XC, Kim SY, et al. Asian dust storm and pulmonary function of school children in Seoul. *Sci Total environ* 2010; 408: 754-759.
- 21) Park JW, Lim YH, Kyung SY, et al. Effects of ambient particular matter on peak expiratory flow and respiratory symptoms of asthmatics during Asian dust periods in Korea. *Respirology* 2005; 10: 470-476.
- 22) Kanatani KT, Ito I, Al-Delaimy WK, Adachi Y, Mathews WC, Ramsdell JW; Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team. Desert-dust exposure is associated with increased risk of asthma hospitalization in children. *Am J Respir Crit Care Med* 2010; 182: 1475-1481
- 23) 日本アレルギー学会. 喘息予防・管理ガイドライン 2009 2009. 協和企画

(3) 黄砂が気道炎症細胞および気道構成細胞に与える影響についての基礎的検討

鳥取大学 医学部附属病院 第三内科診療科群 山崎 章・原田智也

<研究協力機関>

鳥取大学 医学部附属病院 第三内科診療科群 倉井 淳

鳥取大学染色体工学センター

押村光雄・阿部智志

東北大学 医学部

相場節也・齋藤るみ子・木村裕

鳥取県衛生環境研究所

湊沙花・洞崎和徳・吉田篤志・上田豊・

大呂忠司

平成 23～25 年度累計予算額：11,736 千円（うち、平成 25 年度予算額：5,235 千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

黄砂による健康影響について本邦を含め東アジア各国から報告がある。しかし、その報告数は PM_{10} や $PM_{2.5}$ に関する報告に比較して非常に少ない。さらに、砂漠砂塵について健康影響が確認されなかった報告も多く本邦で黄砂時に観測される砂塵量で本当に健康影響があるのかは検討が必要な状況である。また、黄砂が健康に影響を与えるとしてその機序についてはほとんど解明されていない。さらに、臓器によっても黄砂の影響や増悪機序は異なることが予測される。本研究では黄砂が気道炎症にどのような影響を与え得るのか基礎実験学的に検証した。

黄砂発生源土壌である黄土高原土壌をコントロールとして、黄砂時に鳥取県で捕集した大気粉塵の気道炎症惹起能と気道炎症誘導メカニズムをヒト由来白血球細胞とマウスによって評価した。大気汚染物質が気道炎症を増悪させる際に気管支肺内の interleukin (IL)-8 が重要な役割を果たすことが明らかになっており、ヒト由来白血球細胞の IL-8 誘導能を指標とした。黄土高原土壌には IL-8 産生誘導能を認めなかったのに対して、黄砂時大気粉塵は濃度依存性に IL-8 を誘導してきた。この結果から、黄砂時の日本の大気粉塵は気道炎症を増悪させること、さらには黄土高原土壌には同様の作用を認めなかったことから黄砂砂塵に付着あるいは含まれる物質が気道炎症を増悪させることが明らかになった。同様の結果は、マウスでも確認された。気道炎症を増悪させる原因物質として、可溶性物質、不可溶性物質いずれもが考えられたが、その中でエンドトキシンは黄砂による気道炎症増悪の重要な因子であることが示唆された。また、黄砂時の大気粉塵はアレルギー毒性があることも確認された。黄砂時大気粉塵の気道炎症増悪は N-acetylcysteine により抑制されたことから、黄砂時の気道炎症増悪に対して N-acetylcysteine が治療薬となる可能性も示唆された。

[キーワード]

喘息モデルマウス、THP-G8 細胞、黄砂付着物質、interleukin-8、白血球

1. はじめに

近年の研究で黄砂が喘息増悪のリスク因子であり入院頻度をふやすことなどが報告されてきている¹⁾⁻⁴⁾。我々も電話調査によって黄砂が成人喘息患者の症状と呼吸機能を増悪させることを既に報告している^{5),6)}。しかしながら、台湾からは黄砂と喘息の入院と発作に関連が認められなかったことが報告されている^{7),8)}。また、砂漠砂が喘息の発病や増悪に関与しないということも一般的には指摘されている⁹⁾⁻¹¹⁾。したがって、黄砂での喘息を含むヒト健康への影響について検討の余地が残っている。黄砂発生源の土壌や黄砂時に捕集した粉塵をマウスに投与すると気道の炎症が増悪することが報告されており、動物実験においても黄砂が喘息を増悪させ得る可能性を示している¹²⁾⁻¹⁴⁾。しかしながら、その詳細な機序は明らかにされていない。黄砂には様々な化学物質、大気汚染物質、細菌、真菌が付着していることも近年明らかになっている¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。黄砂が喘息を含む呼吸器疾患を増悪させると仮定し、黄砂の本体である砂塵成分が原因なのか、付着している物質こそが増悪原因であるのか明らかにすることも重要と考えられる。

サブテーマ①、②において黄砂が呼吸器疾患に与える影響については検証を行っている。サブテーマ③においては、黄砂の気道炎症増悪メカニズムを解明し増悪させる原因物質の同定を目指して基礎実験学的に検証を行った。

2. 研究開発目的

黄砂が呼吸器疾患の増悪に関与しているか明らかにすることを目的に基礎実験学的に検証した。さらに、黄砂が気道炎症を増悪させることが確認できた場合には、その増悪メカニズムを解明し、炎症増悪の原因が黄砂の砂塵であるのか、付着している物質であるのか明らかにすることを目的に研究を行った。

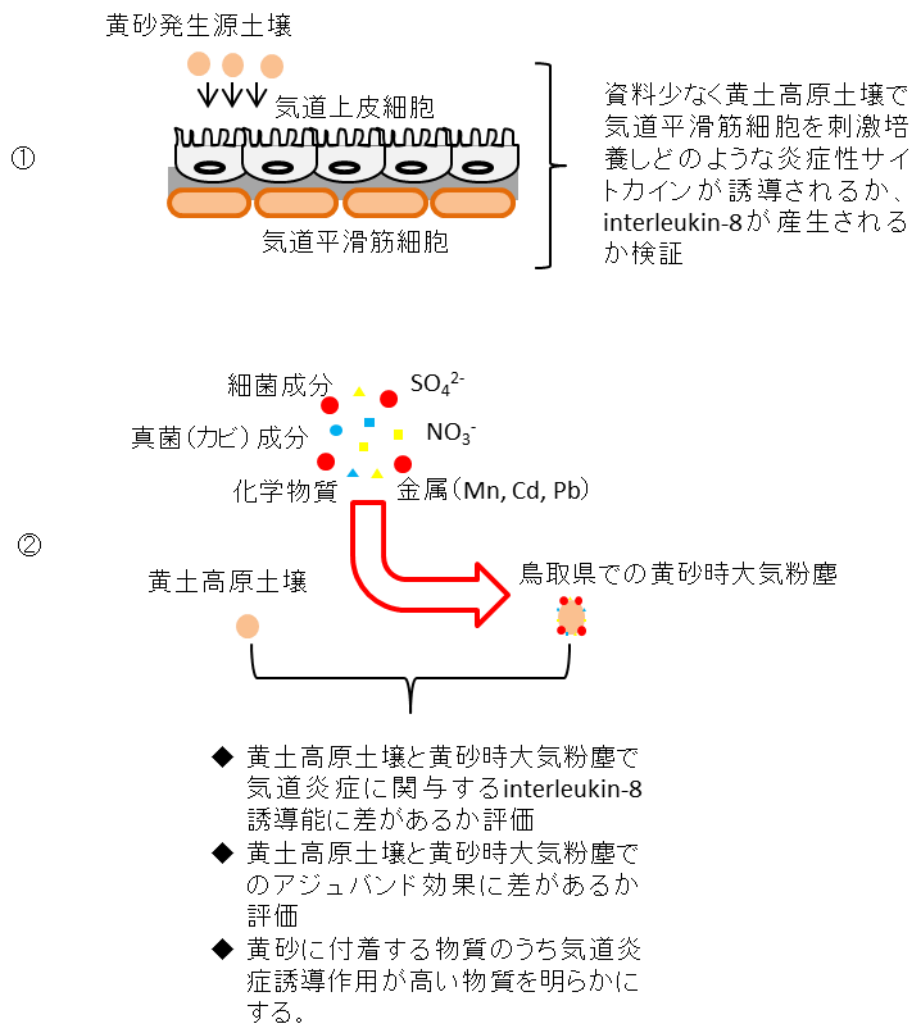
Sierra-Vargas らは、大気汚染物質の曝露があった場合に白血球のうちの好中球が誘導され急性の気道炎症が惹起することを報告している。¹⁸⁾健康者が大気汚染の曝露を受けると気管支肺胞洗浄液中の interleukin (IL)-8 の濃度が上昇し、気管支組織中の IL-8 mRNA の発現が増強することも報告されている¹⁹⁾。さらに、喘息が増悪した場合に血中の IL-8 濃度が上昇することも報告されている²⁰⁾。このように、黄砂の曝露によって気道炎症が増悪する場合には IL-8 が重要な役割を果たすことが推定される。一方で、捕集できる大気粉塵量も限られている。そこで、まず気管支を構成し気道炎症に深く関与する気道平滑筋細胞を黄土高原土壌で刺激培養し IL-8 が産生されてくるか検証した。さらに、他の代表的な炎症性サイトカインの誘導についても評価を行った。

ヒト単球由来の THP-1 細胞に IL-8 を導入した THP-1-derived IL-8 reporter cell (THP-G8 細胞) は少ない試料で簡便に IL-8 の誘導能を評価することが出来る細胞である。この THP-G8 細胞を使用して、黄砂時に捕集した大気粉塵の IL-8 誘導能を評価することで黄砂の気道炎症への影響を評価した。さらに、鳥取県で捕集した黄砂時の大気粉塵と黄砂発生源土壌である黄土高原の土壌の IL-8 誘導能の差を比較し黄砂の気道炎症増悪に関与する物質の同定を試みた。

細胞を用いた黄砂の毒性評価はスクリーニング的に行える利点があるものの、標的とした炎症性物質しか評価できないという欠点もある。このため、細胞実験で黄土高原土壌と黄砂飛来時大気粉塵の気道炎症への影響の差異を喘息モデルマウスでも評価を行った。これまで報告がある黄砂の気道炎症について評価を行った動物実験では卵白アルブミン (OVA) で感作した喘息モデルマウスが使用されている¹²⁾⁻¹⁴⁾。一方、ヒトでは OVA が喘息の抗原となることはなく、代表的な喘息

の抗原はダニ抗原である。そこで今回は出来る限りヒトの条件に近づけるためにダニ抗原感作喘息モデルを使用した。黄土高原土壌と黄砂飛来時大気粉塵をダニ抗原感作喘息モデルマウスに点鼻投与後に、気管支、肺内に浸潤する白血球および炎症性サイトカインの差異を検証した。また、黄砂曝露を受けた際にダニ抗原が誘導するアレルギー性炎症に変化があるか確認した。さらに、黄土高原土壌と黄砂飛来時大気粉塵のそれぞれのアジュバンド効果について血清特異的 IgE、IgG を測定することで評価を行った。黄砂の気道炎症評価でダニ抗原感作喘息モデルマウスを使用することは初めての試みになる。

研究イメージ



3. 研究開発方法

(1) 大気粉塵

黄砂発生源土壌である黄土高原の土壌として国立環境研究所より販売されていた the China Loess Plateau (CJ-1)を使用した。黄砂時の落下大気粉塵を口径 5,000 cm²、深さ 30 cm の特注

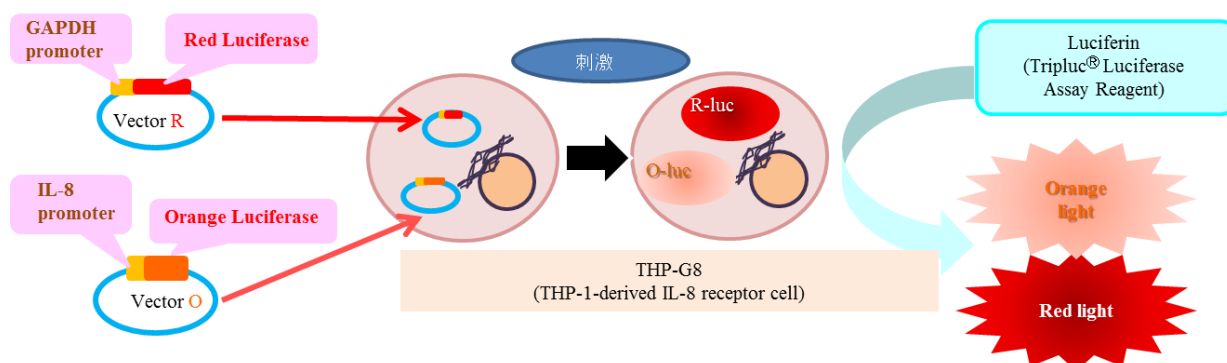
の皿を用いて鳥取県湯梨浜町で採取した。捕集した黄砂時落下大気粉塵、CJ-1 は 121℃、30 分間滅菌処理後に-20℃で保管し細菌や真菌の増殖を防いだ。

(2) 黄砂曝露が気道構成細胞に与える影響について

黄砂の曝露を受けた際にヒトは呼吸活動によって黄砂を含む大気粉塵を体内に取り入れる。吸気によって取り込まれた黄砂などの大気粉塵は気管支あるいは肺胞に到達し、気道上皮細胞、気管支平滑筋細胞、線維芽細胞などと接触することになる。黄砂含む大気粉塵によって気道炎症が増悪する場合に気道上皮細胞、気管支平滑筋細胞、線維芽細胞がどのような反応を示すか、すなわちどのような炎症性物質（サイトカイン）を分泌するかが重要になる。黄砂粉塵が気管支、肺内に取り込まれた際にどのようなサイトカインの分泌が高くなるのか検討した。気道平滑筋細胞を用い、刺激は標準黄砂（CJ-1 China Loess）で行った。CJ-1 China Loess をオートクレーブで滅菌後に PBS で 10mg/ml に調整した。その後、気道平滑筋細胞を 50 μ g/ml～500 μ g/ml の濃度で 30 分、1 時間、3 時間、6 時間、12 時間、24 時間培養した。刺激培養後に上清を採取した。気道平滑筋細胞が分泌するサイトカインのうち、特に気道炎症において重要な役割を果たす IL-8、RANTES、thymic stromal lymphopoietin (TSLP)、Eotaxin を ELISA キットで測定し、黄砂の毒性を評価する上で有用なサイトカインを検証した。

(3) IL-8 promoter-luciferase gene reporter assay による黄砂が気道炎症に与える影響の評価

THP-G8 細胞は IL-8 と glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase (GAPDH) のプロモーター領域にそれぞれオレンジルシフェラーゼとレッドルシフェラーゼを挿入し THP-1 細胞にベクター導入し確立された細胞である（図(3)-1）²¹⁾。ルシフェリンを基質とし色分離測定により、IL-8 と GAPDH のレポーター酵素活性を測定することが可能となっている。通常、IL-8 Luc Assay[®]と呼ばれている。



Takahashi T, Saito R, Aiba S, et al. Toxicol sci 2011; 124: 359

図(3)-1 IL-8 Luc Assay

この THP-G8 細胞を種々の濃度の lipopolysaccharide (LPS) で刺激した。さらに、様々な時間で培養し測定系の確立をおこなった。その後、種々の濃度の CJ-1 と黄砂時の大気粉塵、さらに黄砂

時大気粉塵を懸濁した液を1時間氷上で静置し採取した上清で刺激しIL-8の転写活性を測定した。IL-8の転写活性は、IL-8の転写活性を示すstable luciferase orange (SLO)をGAPDHの転写活性を示すstable luciferase red (SLR)で除すことで細胞数を補正したnormalized SLO luciferase activity (nSLO-LA)で判定した。

(4) 培養上清中のIL-8濃度測定と黄砂時大気粉塵溶解液およびCJ-1溶解液中のエンドトキシン濃度の測定

培養液中のIL-8濃度測定をELISA法によって測定した。また、黄砂時大気粉塵懸濁液およびCJ-1溶解液中のエンドトキシン濃度の測定もELISA法によって測定した。

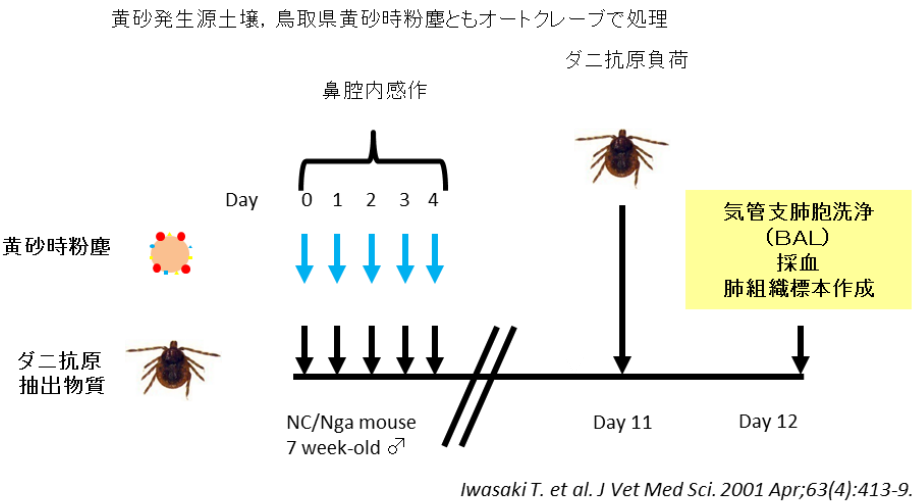
(5) 動物モデルによる黄砂が気道炎症に与える影響の評価

1) 実験動物

7週齢のNC/Ngaマウス(雄)を購入し、鳥取大学医学部内の動物飼育室にて実験開始日まで1週間順応させたのち実験を開始した。実験動物は至適温度・湿度管理下のもと、一般的な実験マウス用飼料を与えて飼育した、すべての動物実験は動物実験計画書を鳥取大学動物実験倫理審査委員会に提出し承認を得たうえで実験計画にしたがって行った、また、動物が耐え難い苦痛を伴う場合は適切な時期に実験処置を中断または中止し、安楽死措置をとるなどの人道的エンドポイントを考慮して実験を行った。

2) 感作および抗原負荷

合計48匹のマウスを購入後1週間ほど実験施設内で順応させ、1グループを8匹として6グループに無作為に分けてグループを作成した。NC/Ngaマウスは図(3)-2に示すようにイソフルランによる吸入麻酔により麻酔状態としたのち、ダニ抗原²²⁾(Dermatophagoides farina, Greer Laboratories Inc. USA)を生理食塩水25ulあたり50ug溶解させ、1回50ugのダニ抗原を5日間連続で経鼻投与し感作を成立させた(Day 0-4)。ダニ抗原に感作されたマウスは、最終感作日から7日後のDay 11に再度ダニ抗原を同量経鼻投与して抗原惹起を行い、その24時間後に解剖を行い血清、気管支肺胞洗浄液、肺組織標本の回収を行い保存した。



図(3)-2 ダニ抗原感作喘息モデルマウス

本研究ではCJ-1（黄土高原土壌）と黄砂時大気粉塵のマウスにおける免疫賦活効果と気道炎症増強効果を確認するために，それぞれの大気粉塵（生理食塩水 25ul に 0.1mg の粉塵を溶解）をダニ抗原と共感作、あるいは単独感作を成立させ、以下に示す 6 グループ間で比較評価を行った（表(3)-1）。

グループ名	感作物質	抗原惹起物質
グループ(i) NS/NSマウス	生理食塩水のみ	生理食塩水
グループ(ii) Df/Dfマウス	ダニ抗原と生理食塩水	ダニ抗原
グループ(iii) CJ-1/NSマウス	CJ-1と生理食塩水	生理食塩水
グループ(iv) CJ-1+Df/Dfマウス	CJ-1とダニ抗原	ダニ抗原
グループ(v) ADS/NSマウス	黄砂時粉塵と生理食塩水	生理食塩水
グループ(vi) ADS+ Df/Dfマウス	黄砂時粉塵とダニ抗原	ダニ抗原

表(3)-1 喘息モデルマウスグループ分類

3）マウス気管支肺胞洗浄液の回収方法

ダニ抗原による抗原負荷をおこなった翌日の Day12 に、イソフルランによる吸入麻酔下にマウス頸部に切開を加え気管を体表面に露出させたのち、18G サーフロー針を気管内に挿入のうえ、4℃ に冷却した生理食塩水 1ml を 1ml 注射器にて 5 回注入と回収を繰り返し，可能な限りの気管支肺胞洗浄液を回収した。回収した気管支洗浄液は 300 x g 回転数で 5 分間遠心分離し、細胞成分は細胞数と細胞分画解析に、上清はサイトカイン解析に使用した。総細胞数はチュルク染色液に希釈したのち、血球計算板を用いて計測し細胞分画はディフクイック染色液で細胞を染色したのち光学顕微鏡下でマクロファージ数、好中球数、好酸球数、リンパ球を合計 300 個計測して算出した。

4）肺組織の病理組織学的検討

マウスを高濃度二酸化炭素ガスにて安楽死させたのち、マウス肺を 5 分間にわたり、25cmH₂O の圧をかけた状態で 10%ホルマリンを肺内の注入し肺組織伸展固定をおこなった。ホルマリン固定された肺組織は、汎用されているパラフィンブロック作成手順と同じ手法にて、脱水・パラフィン包埋・薄切りの行程をへて、最終的に未染標本をヘマトキシリン-エオジンで染色し気道周囲の炎症細胞浸潤を光学顕微鏡下に組織学的評価をおこなった。

5) 酵素結合免疫吸着法 (ELISA; Enzyme-linked immunosorbent assay) による血清中免疫グロブリン濃度の評価

血清中の免疫グロブリン (総 IgE, 総 IgG_{2a}) 濃度は、市販されている OptEIA キット (BD Pharmigen, San Diego, Ca, USA) を用いて、添付されている実験手順したがって測定した。ダニ抗原特異的 IgE 濃度、IgG_{2a} 濃度については、確立されたキットはないため、過去に報告されている手法²³⁾をもとに我々独自で測定方法、条件設定を確立してから実際の測定を行った。具体的には、96 ウェルプレート内を 50 ug/ml 濃度のダニ抗原抽出液で一晩コーティングしたうえで、適正濃度に希釈したマウス血清を各ウェルに添加し、2 時間かけて血清内の各種抗体がウェル内のダニ抗原に吸着するのを促した。その後、二次抗体と発色基質を添加した後、発色させ吸光度計 (Tecan Group Ltd, Japan) をもちいて 450nm 波長で測定した。この手法では絶対的濃度の算出は困難なため、吸光度値に応じて血清中の免疫グロブリン濃度を推測した。

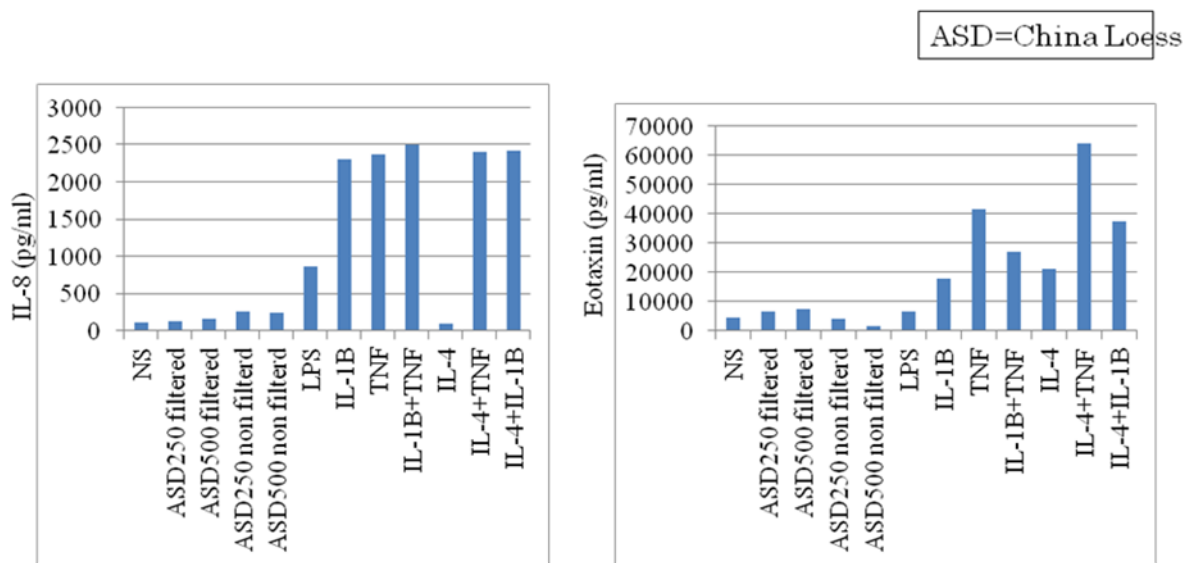
6) 気管支肺胞洗浄液中サイトカイン濃度測定

6 グループのマウスから回収された気管支肺胞洗浄液中の各種サイトカイン (IL- γ ; インターフェロ γ 、IL-13; インターロイキン-13、IL-5; インターロイキン-5、IL-6; インターロイキン-6、KC; Keratinocyte-derived chemokine、MIP-2; macrophage inflammatory protein-2) の測定を ELISA キット (R&D Systems Europe, United Kingdom) にておこなった。測定に用いた気管支肺胞洗浄液は、インターロイキン- γ の測定時のみ希釈は行わず、その他のサイトカイン測定時にはすべて 5 倍希釈をして測定した。

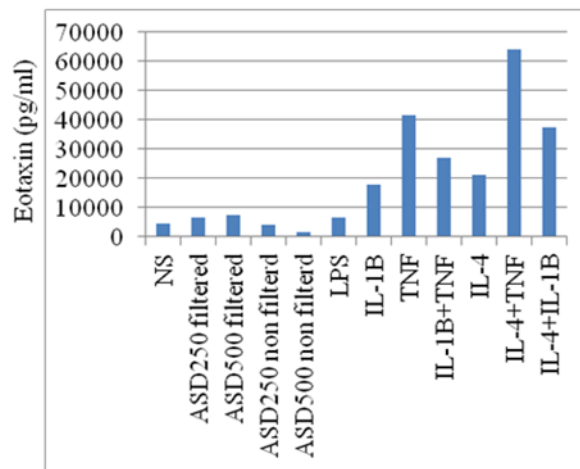
4. 結果及び考察

(1) 黄砂曝露が気道構成細胞に与える影響について結果と考察

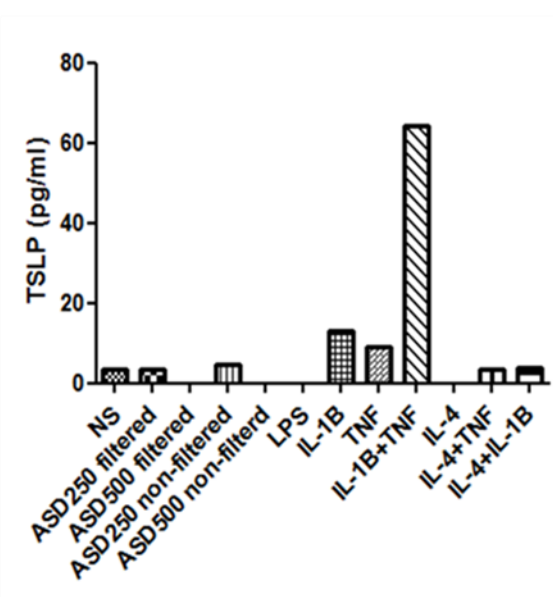
気道構成細胞のうちヒトから分離した気道平滑筋細胞を CJ-1 で刺激し、上清中の IL-8、RANTES、TSLP、Eotaxin を測定した。その結果、IL-8 産生のみ増加を認めたが、RANTES、TSLP、Eotaxin の産生に影響はなかった (図 (3)-3~6)。この結果から、黄砂の気道炎症への影響を評価する際には従来の報告通り IL-8 が有用なマーカーになることが示唆された¹⁸⁾⁻²¹⁾。



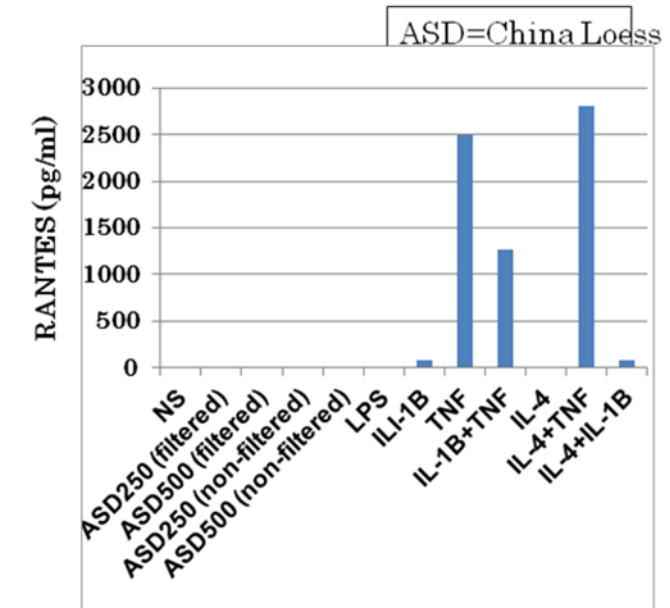
図(3)-3 黄砂刺激による気道上皮細胞からのIL-8分泌



図(3)-4 黄砂刺激による気道上皮細胞からのEotaxin分泌



図(3)-5 黄砂刺激による気道上皮細胞からのTSLP分泌

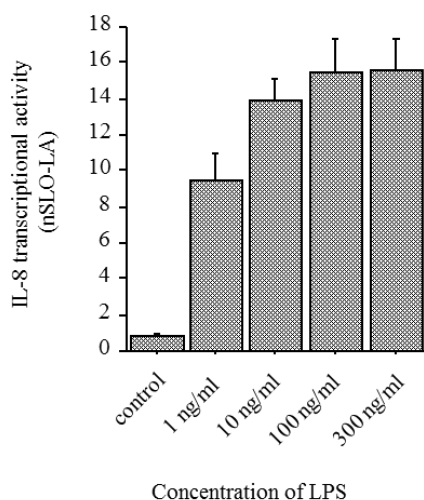


図(3)-6 黄砂刺激による気道上皮細胞からのTSLP分泌

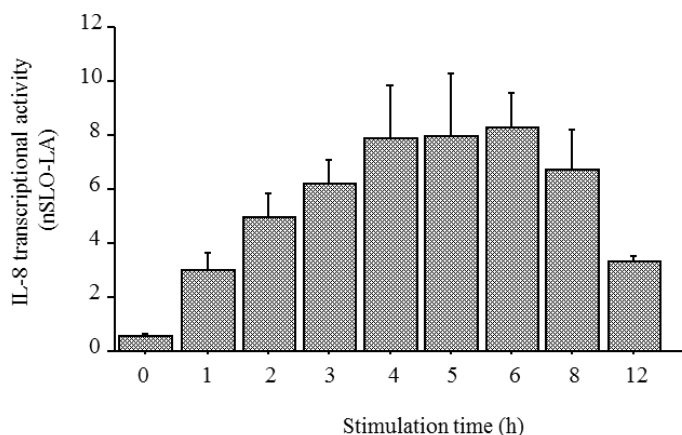
(2) IL-8 promoter-luciferase gene reporter assay による黄砂が気道炎症に与える影響の評価の結果と考察

先行して実施した『黄砂曝露が気道構成細胞に与える影響について』で黄砂の気道炎症への影響を評価するために IL-8 が有用であることが確認された。そこで、IL-8 Luc Assay で黄土高原の土壌である CJ-1 と黄砂飛来時に鳥取県で採取した大気粉塵の IL-8 誘導能を検討し、気道炎症に

与える影響の差異を検討した。まず、positive control として負荷する LPS 濃度を決定するために種々の濃度の LPS で THP-G8 細胞を 5 時間刺激し nSLO-LA を算出して IL-8 transcriptional activity を評価した (図 (3)-7) 。LPS が 100ng/ml で nSLO-LA が最大に達することを確認した後で、LPS 100ng/ml で THP-G8 細胞を刺激した際の nSLO-LA を time course で評価した (図 (3)-8) 。その結果、4 時間で nSLO-LA はほぼ最大となることから、今回の CJ-1、黄砂時大気粉塵の IL-8 誘導の評価をする際に、刺激培養時間は 5 時間、positive control として LPS を 100ng/ml で刺激することとした。

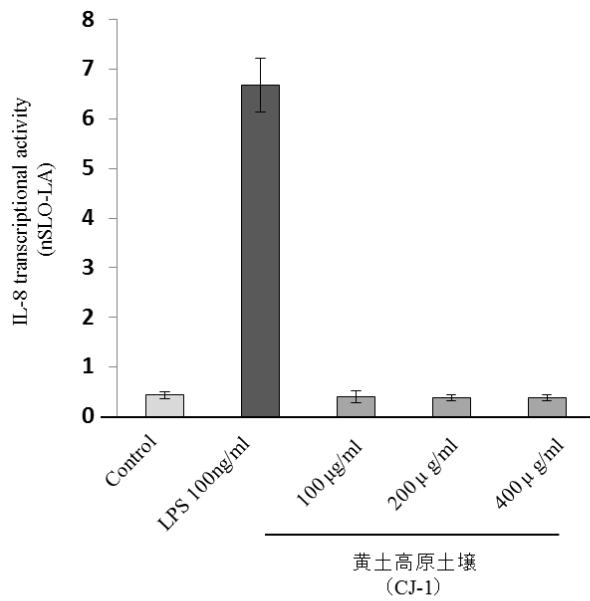


図(3)-7 IL-8 transcriptional activity(に対するLPS刺激の濃度勾配

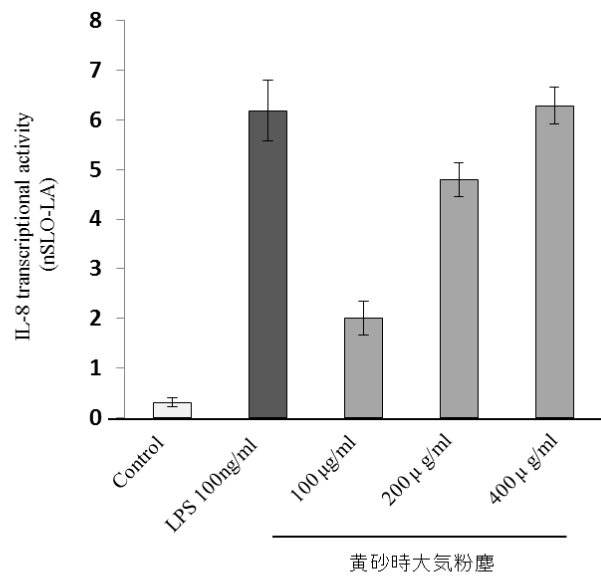


図(3)-8 LPS刺激(100 ng/ml)によるIL-8 transcriptional activityの経時変化

CJ-1 の pH は 8.4、黄砂時捕集大気粉塵は 7.9 であった。0.1 N sodium hydroxide で pH を 7.8 に調整後に、THP-G8 細胞を CJ-1 および黄砂時大気粉塵で 100 μ g/ml、200 μ g/ml、400 μ g/ml で 5 時間刺激培養後に発光強度を測定した。CJ-1 での刺激では nSLO-LA の増加は認められなかった (図 (3)-9) 。一方、黄砂時に捕集した大気粉塵で THP-G8 細胞を刺激すると濃度依存性に nSLO-LA の増加が認められた (図 (3)-10) 。

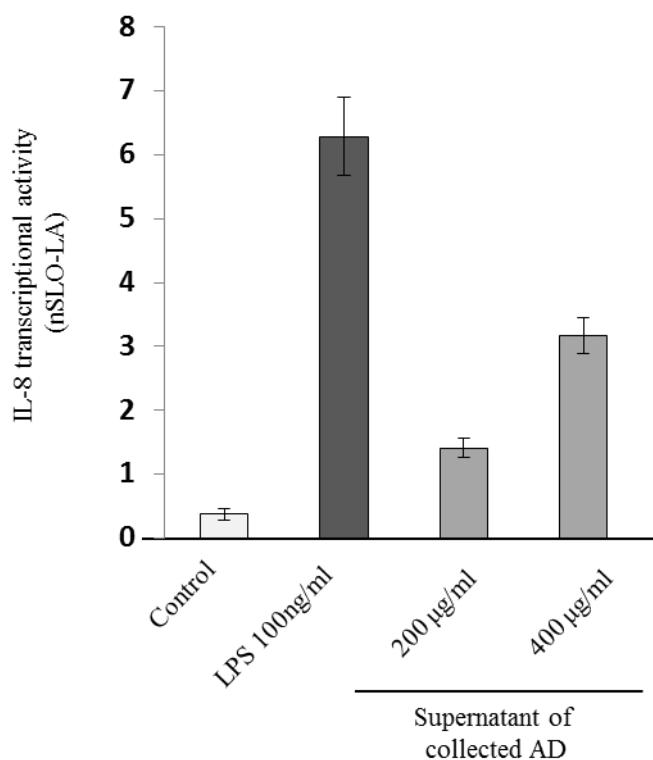


図(3)-9 CJ-1によるIL-8 transcriptional activityの経時変化



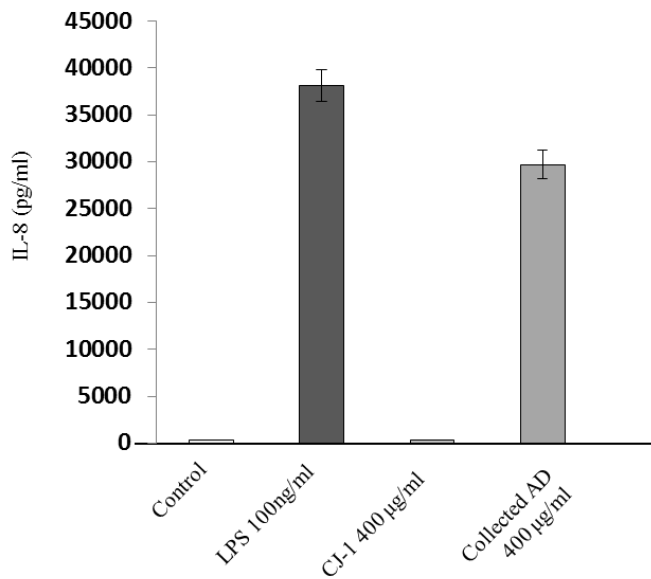
図(3)-10 黄砂時大気粉塵によるIL-8 transcriptional activityの経時変化

次に、黄砂時大気粉塵を懸濁した液（200 μ g/ml および 400 μ g/ml 懸濁液）を1時間氷上で静置し採取した上清で THP-G8 細胞を刺激した。その結果、nSLO-LA は 200 μ g/ml 懸濁液上清において 1.3 ± 0.1 fold、400 μ g/ml 懸濁液上清において 3.1 ± 0.2 fold と増加していた（図(3)-11）。しかし、黄砂時大気粉塵懸濁液上清で刺激した場合、黄砂時大気粉塵懸濁液に比較して nSLO-LA は有意に低値であった。



図(3)-11 黄砂時大気粉塵の上清による
IL-8 transcriptional activityの経時変化

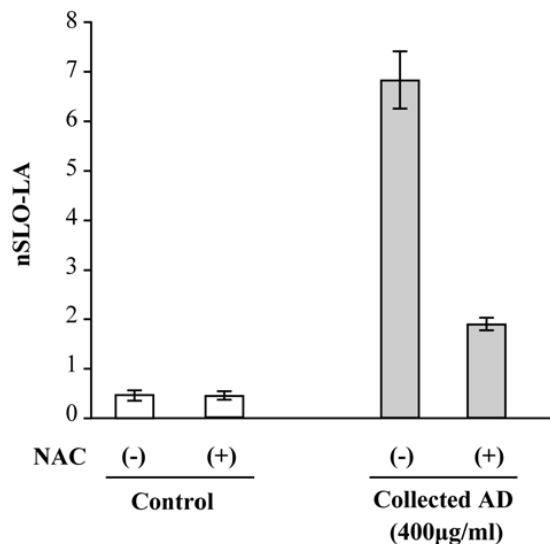
培養上清中の IL-8 濃度 ELISA キットで測定し、IL-8 転写活性の亢進とともに IL-8 が実際に産生されているか検討を行った。培養液上清中の IL-8 濃度は、LPS (100 ng/ml) が 3700 ± 200 pg/ml、CJ-1 soil (400 μ g/ml) が 38.1 ± 1.7 pg/ml、黄砂時大気粉塵が 2970 ± 150 pg/ml であった (図(3)-12)。THP-G8 細胞での IL-8 転写活性の亢進は IL-8 産生に反映されていることが確認できた。



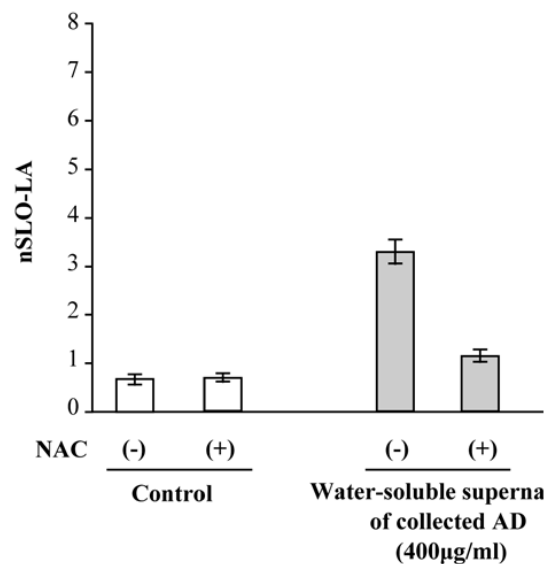
図(3)-12 培養液上清中IL-8濃度

THP-G8 細胞を刺激した CJ-1、黄砂時大気粉塵、LPS のエンドトキシン濃度を ELISA キットで測定した。エンドトキシン濃度は、LPS (100 pg/ml) が 0.885 EU/ml、CJ-1 soil (400 µg/ml) が 0.074 EU/ml、黄砂時大気粉塵が 0.192 EU/ml であった。

次に、黄砂時大気粉塵により誘導された IL-8 転写活性亢進に対する N-acetylcysteine (NAC) の抑制効果を確認した (図(3)-13, 14)。黄砂時大気粉塵で誘導された IL-8 転写活性亢進は NAC によって抑制されていた。



図(3)-13 NACによるIL-8転写活性抑制効果



図(3)-14 NACによるIL-8転写活性抑制効果

IL-8 は大気汚染物質によって誘導される気道炎症において重要な役割を果たすサイトカインである¹⁸⁾⁻²⁰⁾。また、Honda らは黄砂に付着している物質が気道上皮細胞からの IL-6 および IL-8 の産生を誘導することを報告している²⁴⁾。本研究では、黄砂発生源土壌の黄土高原土壌では IL-8

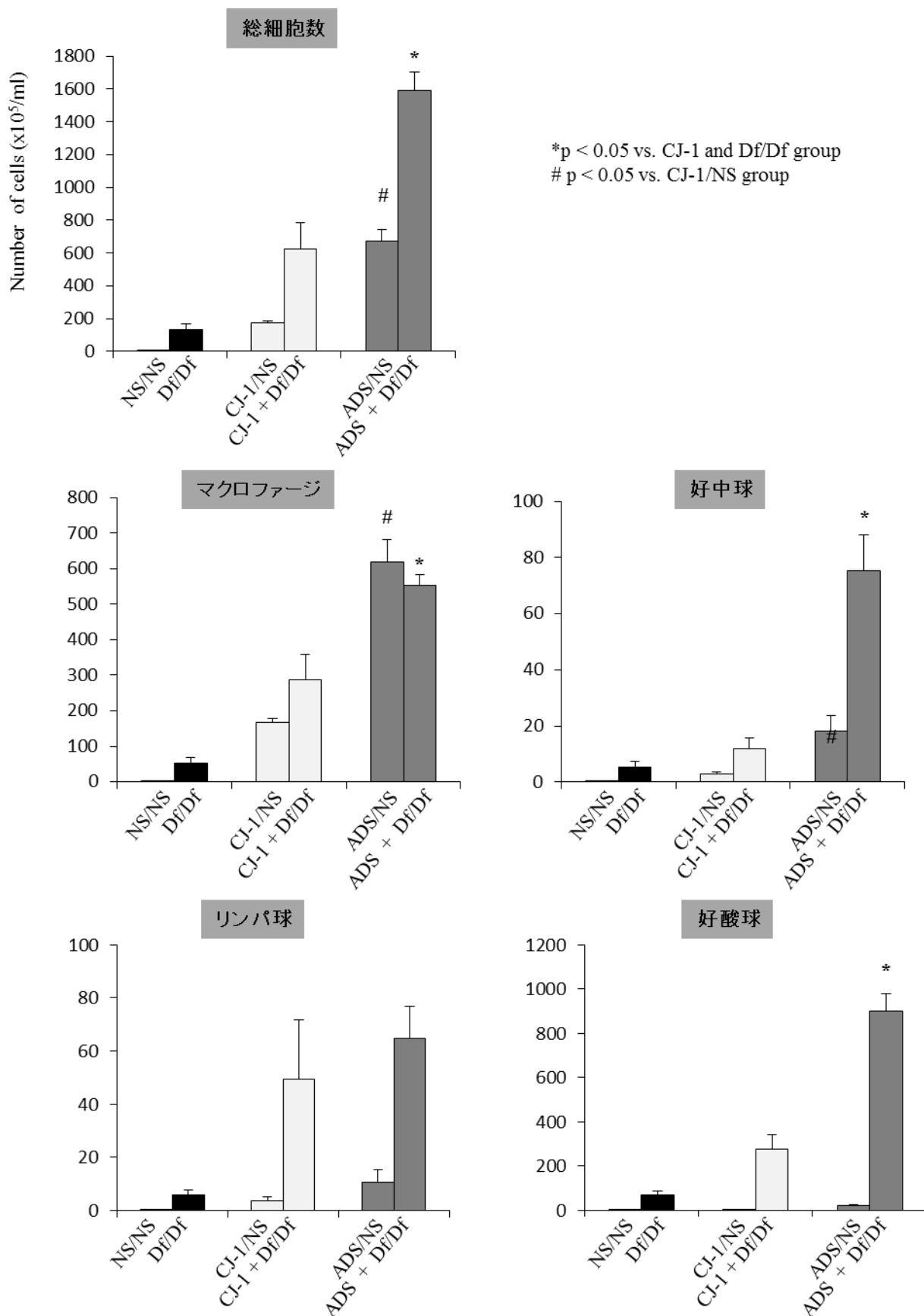
産生誘導が確認されなかった。一方、黄砂時に鳥取県で捕集した大気粉塵では IL-8 産生誘導が確認された。すなわち、黄土高原土壌と黄砂時に鳥取県で浮遊している大気粉塵は全く異質な物になっていることを示唆していた。黄砂が呼吸器疾患患者の呼吸器症状を増悪させることも本研究で確認しているが、黄砂の本体である土壌成分、言い換えればシリカ (Si) ではなく、黄砂の本体である土壌成分に付着している化学物質や細菌、真菌などの物質こそが呼吸器疾患患者の呼吸器症状を増悪させる原因と考えられた。さらに、黄砂時大気粉塵の懸濁液上清においても、減弱はするものの同様に IL-8 産生誘導能が確認された。この結果からは、黄砂に付着している可溶性物質、不溶性物質のいずれもが呼吸疾患増悪に関わる原因物質であると考えられた。また、黄砂に付着する複数の物質がヒトの健康に影響を与えていることも推察された。

LPS は IL-8 Luc Assay において陽性コントロール物質になっているが、大気粉塵中にも含まれている物質である。そこで、THP-G8 細胞を刺激した CJ-1、黄砂時大気粉塵、LPS それぞれのエンドトキシン濃度を測定した。黄砂時大気粉塵のエンドトキシンは陽性コントロールで用いた LPS 100ng/ml に含まれるエンドトキシンの 1/8000 の量であった。このことから、黄砂時大気粉塵により誘導される IL-8 産生にエンドトキシンは関与しているものの、IL-8 の産生量を考慮したときにエンドトキシンだけでは説明ができなかった。黄砂による気道炎症増悪の一つの原因物質としてエンドトキシンが重要であることが実験結果からは示されたが、エンドトキシン以外にも気道炎症を増悪させる付着物質があると考えられた。

近年、物質がアレルギー感受性を有するのか判定するうえで IL-8 が重要なマーカーになることが報告されるようになってきた²⁵⁾。この感作の過程において樹状細胞と IL-8 が密接に関与し、感受性のある物質が樹状細胞からの IL-8 産生を誘導するこのとも報告されている^{26), 27)}。この際、感受性のある物質は ROS を介して IL-8 を産生すると考えられている。今回、黄砂時の大気粉塵で誘導された IL-8 産生は NAC によって抑制されていた。この結果からは、黄砂時大気粉塵中に感受性をもつ物質が含まれることが示唆され、黄砂時の大気粉塵はアレルギー毒性を持つことが示唆された。また、この黄砂時大気分時による IL-8 誘導が NAC により抑制されるという結果からは、NAC が黄砂による増悪に対して治療効果を示すことも示唆された。

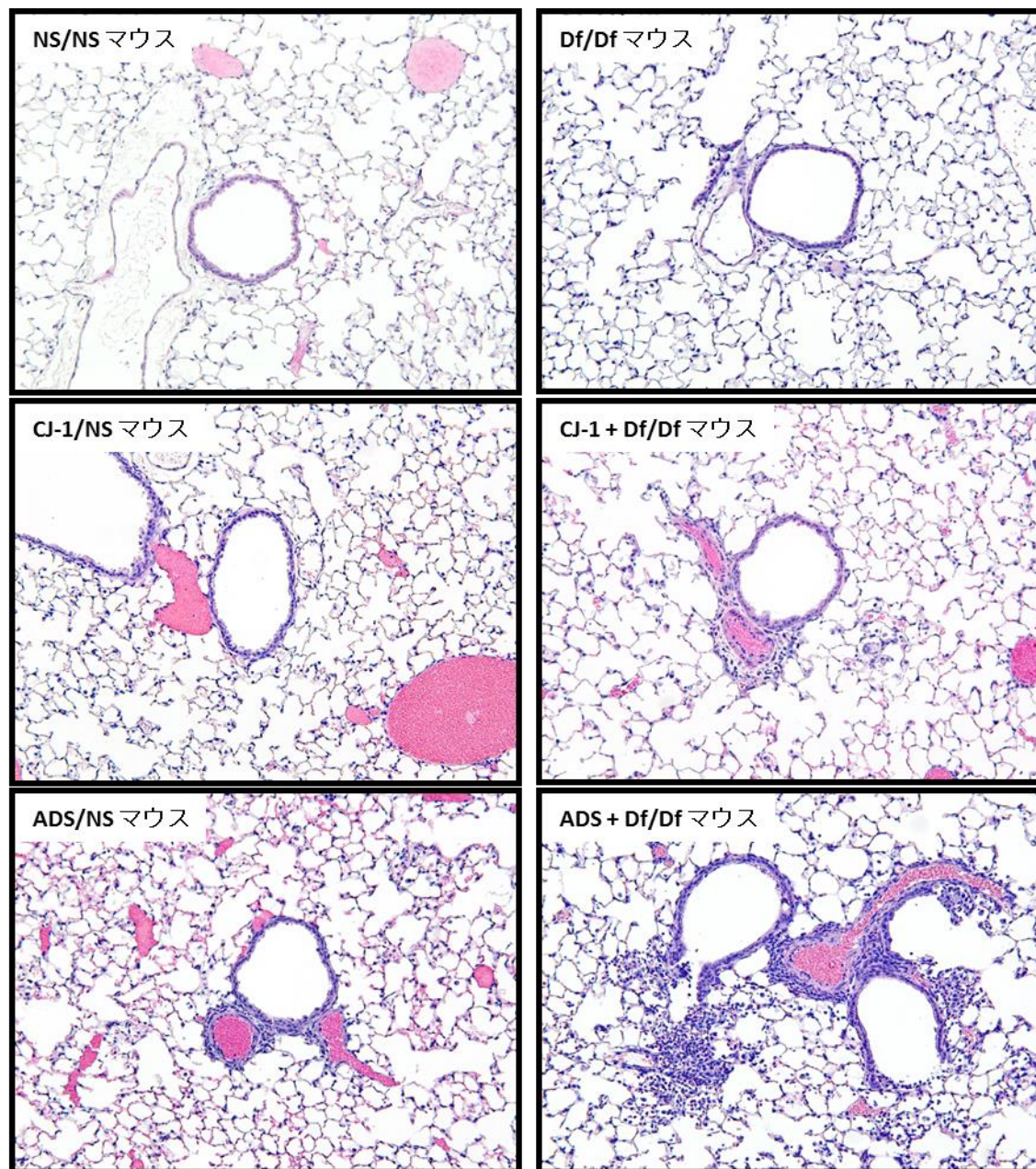
(3) 動物モデルによる黄砂が気道炎症に与える影響の評価について結果と考察

Df/Df マウスは、コントロールマウス (NS/NS マウス) と比較して、気管支肺胞洗浄液中の総細胞数の著しい増加を示した (図 (3)-15)。また、黄砂発生源土壌である CJ-1 とダニ抗原の共感作をおこなった CJ-1+Df/Df マウスにおいては、Df/Df マウスにおける総細胞数の 4.6 倍の炎症細胞が気道内に誘導されていた。一方、黄砂時大気粉塵とダニ抗原により共感作された ADS+Df/Df マウスは、CJ-1+Df/Df マウスと比較して、さらに強い気道炎症が誘導されており、総細胞数として 2.5 倍の炎症細胞が気道内に誘導されていた。この総細胞数の増加は、主としてマクロファージ数、好酸球数、好中球数の増加によるものであり、CJ-1+Df/Df マウスに対する ADS+Df/Df マウスにおけるそれぞれの細胞分画増加率は、マクロファージが 1.9 倍、好酸球が 3.3 倍、好中球が 6.2 倍であった。このことは黄砂時粉塵とダニ抗原で共感作を行うと、強い気道炎症が誘導され、特に好中球性炎症が強く誘導されることを示している。



図(3)-15 気管支肺胞洗浄液中の総細胞数と細胞分画

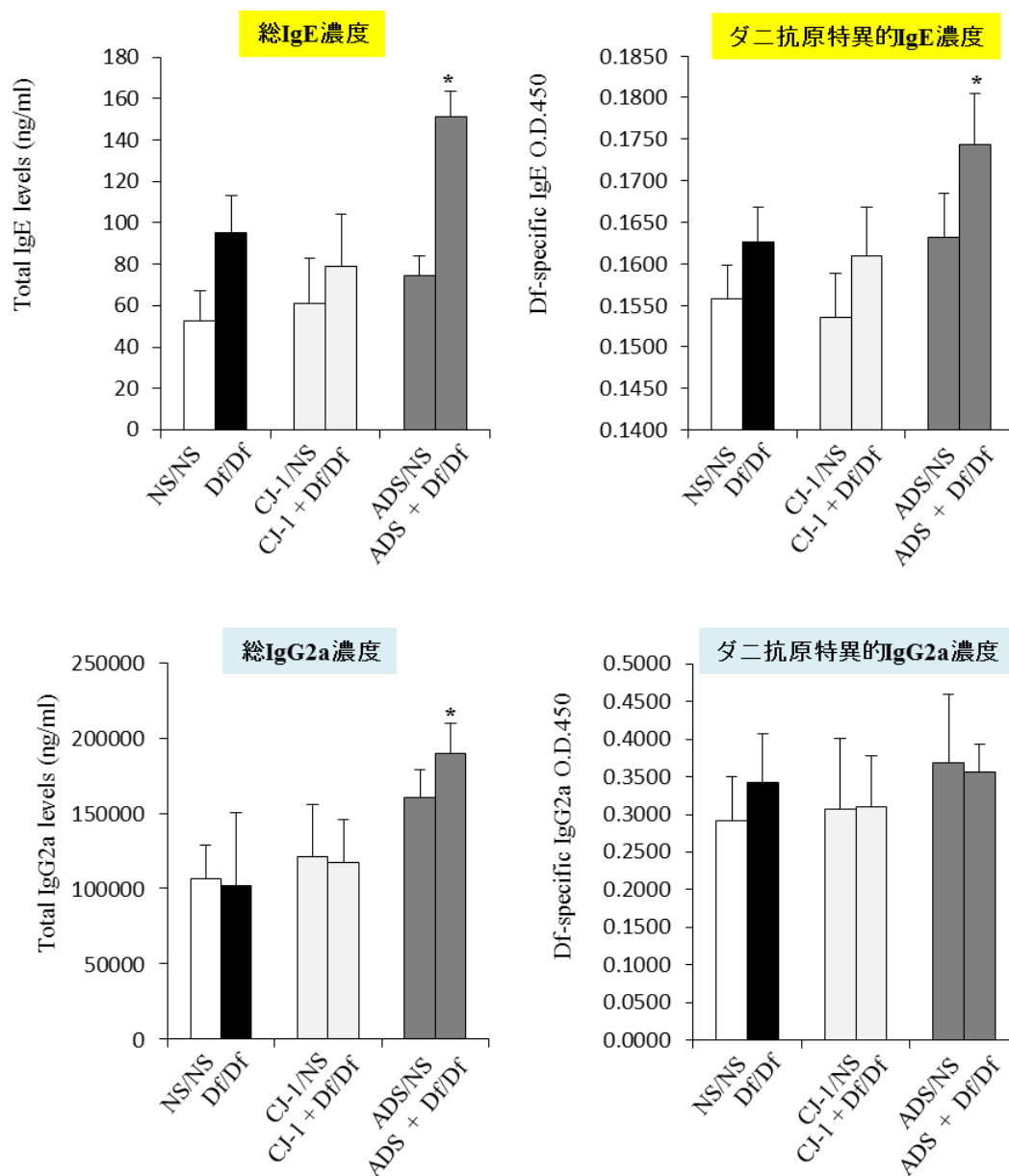
黄砂時粉塵とダニ抗原の共感作が、マウス肺組織に与える影響をヘマトキシリン-エオジン染色された肺組織切片にて病理組織学的に検討した。図(3)-16 に示すように、ADS + Df/Df マウスにおいては、CJ-1 + Df/Df マウスと比較しても、気管支周囲と肺末梢血管周囲に著しい炎症細胞の浸潤を認め、肺組織内で強い炎症細胞誘導が起こっていることが病理組織学的にも証明された。気管支肺胞洗浄液中の総細胞数増加、好中球数増加、好酸球数増加などの所見を支持する組織所見と考えられた。



図(3)-16 マウス肺組織所見 x200 HE染色

黄砂発生源土壌である CJ-1 と黄砂時粉塵が、免疫賦活効果を有しているかどうかを明らかにすることを目的として血清中の免疫グロブリン濃度（総 IgE 濃度、ダニ抗原特異的 IgE 濃度、総 IgG₂a

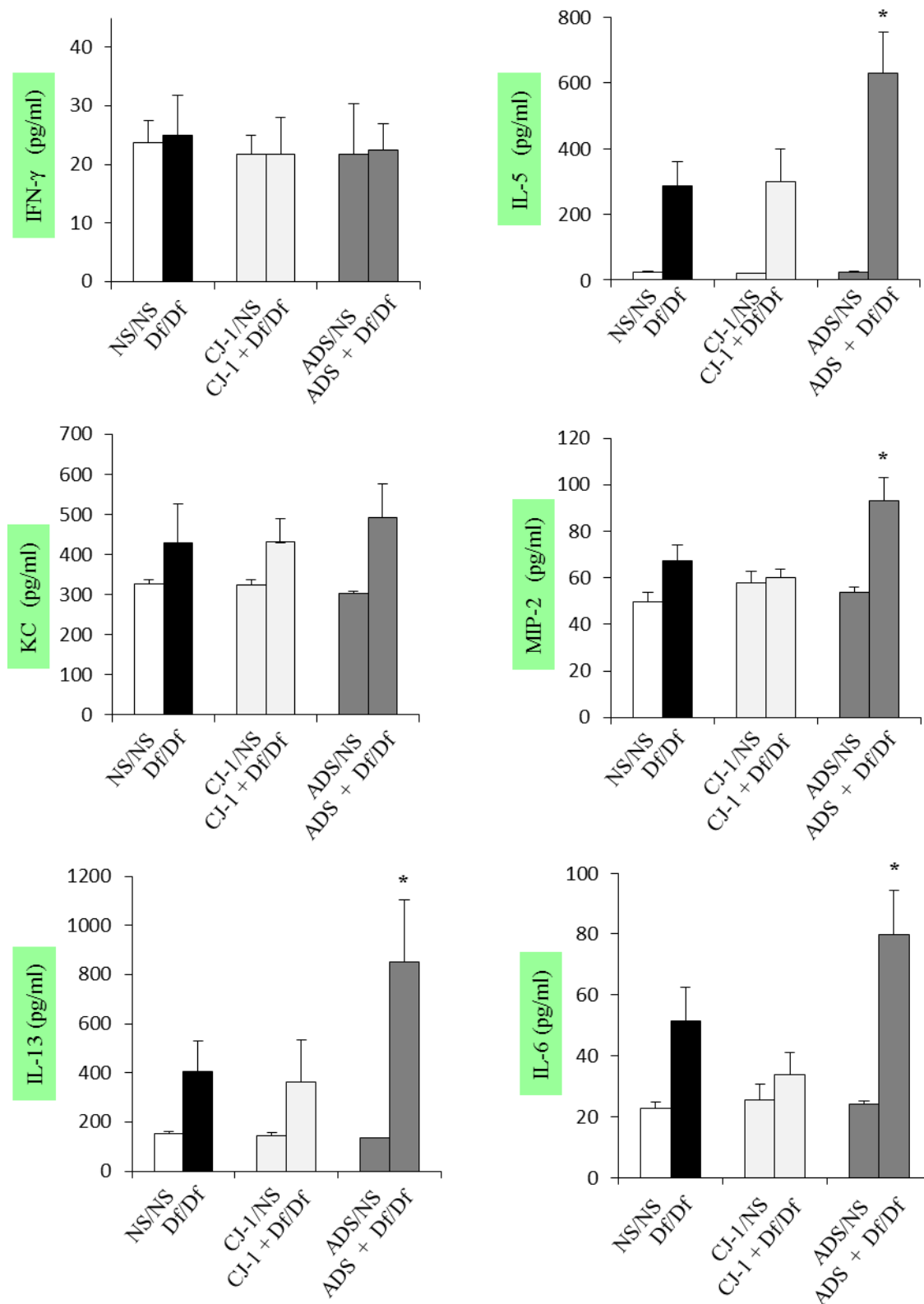
濃度、ダニ抗原特異的 IgG2a 濃度) を評価した。図(3)-17 に示すように、ADS+Df/Df マウスは CJ-1+Df/Df マウスと比較して総 IgE 濃度 (1.9 倍) 、総 IgG_{2a} 濃度 (1.6 倍)、ダニ抗原特異的 IgE 濃度 (450nm 吸光度値) の上昇を認めた。一方、CJ-1+Df/Df マウスは Df/Df マウスと比較して免疫賦活効果はなく、いずれの免疫グロブリン濃度の上昇を示さなかった。これらの結果は、黄砂時粉塵による感作は肺組織への炎症細胞を強く誘導するだけではなく、免疫賦活効果を有していることを示しており、その効果は黄砂時粉塵に特異的で黄砂発生源土壌には認められなかった。



*p < 0.05 vs. CJ-1 and Df/Df group.

図(3)-17 血清中IgE, IgG_{2a}値の相違

黄砂時粉塵がアレルギー性気道炎症を増強させるメカニズムを明らかにすることを目的として、気管支肺胞洗浄液中の各種サイトカイン濃度を測定した。今回の実験としては Th1 サイトカインとして IL- γ 、Th2 サイトカインとして IL-13 と IL-5、炎症性サイトカインとして IL-6, KC, MIP-2 を測定した。図(3)-18 に示すように、ADS+Df/Df マウスの気管支肺胞洗浄液では CJ-1+Df/Df マウスや Df/Df マウスと比較して、Th2 サイトカイン(IL-13 と IL-5)や炎症性サイトカイン(IL-6、MIP-2) 濃度の有意な上昇を認めた。一方、CJ-1+Df/Df マウスは Df/Df マウスと比較して、同等のサイトカイン濃度であり、CJ-1 は自体には黄砂時粉塵と違いサイトカインを誘導する能力を有しない可能性が示唆された。以上のことから、黄砂時粉塵は Th2 サイトカインや炎症性サイトカインを介してダニ抗原誘導喘息モデルマウスにおける気道炎症増強を引き起こしている可能性が示唆された。



* $p < 0.05$ vs. CJ-1 and Df/Df group

図(3)-18 気管支肺胞洗浄液中サイトカインレベルの相違

本研究により得られた成果

（１）科学的意義

黄砂による健康影響が本邦を含め東アジア各国から報告されており、呼吸器疾患、特に喘息は黄砂により影響を受けやすいことが分かってきている。しかしながら、黄砂が喘息を含む呼吸器疾患を悪化させる機序や黄砂中の何が悪化させる原因であるのかはほとんど分かっていない。本研究結果から、他の大気汚染物質と同様に黄砂は IL-8 という炎症性サイトカインを介して気道炎症を増悪させることが示唆された。さらに、IL-8 産生誘導能は黄砂発生源土壌である黄土高原土壌にはないことを確認し、黄砂が IL-8 を介して気道炎症を増悪させるのは黄砂に付着している物質であることを明らかにした。黄砂に付着するどのような物質が IL-8 を介して気道炎症を増悪させるかが重要な点になるが、黄砂に付着する可溶性物質、不溶性物質のいずれにもその能力があり、物質を特定することが今後の重要なテーマと考えられる。その中で唯一、LPS(=エンドトキシン)が重要であることを本研究で示すことが出来たのは大きな意義があつと考えられる。一口に黄砂の健康影響といっても、その程度が黄砂毎に大きく異なることも我々はサブテーマ②で明らかにした。今回の研究結果からは黄砂に含まれる、あるいは付着するエンドトキシンの量がヒトへの健康影響を左右すると考えられる。今後は大気粉塵を量でモニタリングするだけではなく、健康影響を考慮するのであれば一つには大気中のエンドトキシン量をモニタリングする必要があるように考えられた。また、黄砂による呼吸器疾患増悪に対する治療薬として N-acetylcysteine が有用である可能性を示した。

（２）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項なし

<行政が活用することが見込まれる成果>

黄砂発生源土壌と黄砂飛来時の国内で採取した大気粉塵では気道炎症に与える影響が著しく異なっていた。この結果からは、浮遊粒子状物質による健康影響はその組成によって大きく変化すると推察される。現在は浮遊粒子状物質を量に基づいてモニタリングし環境基準値が発表されている。しかし、それだけでは不十分でありその時々浮遊粒子状物質の性状も考慮することが極めて重要であることを本研究は示した。浮遊粒子状物質のヒト健康への影響を規定する原因物質の一つとして大気中エンドトキシンが候補になることを本研究は明らかにした。また、黄砂による呼吸器疾患増悪に対する治療薬として N-acetylcysteine が有用である可能性を示した。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 倉井 淳、渡部 仁成、阿部 智志、齋藤 るみ子、山崎 章、相場 節雄、押村 光雄、清水 英治。「花粉と黄砂 鳥取県で採取した黄砂時降下粉塵の免疫学的毒性評価」 第 63 回日本アレルギー学会秋季学術大会、2013 年
- 2) 倉井 淳、渡部 仁成、山崎 章、清水 英治。「ダニ抗原誘発性気管支喘息モデルマウスにおける黄砂時降下粉塵の気道炎症増強効果の検討」 第 63 回日本アレルギー学会秋季学術大会、2013 年
- 3) 渡部仁成、倉井淳、山崎章、阿部智志、齋藤るみ子、相場節也、押村光雄、清水英治。「大気粉塵 IL-8 転写活性への影響について粒径および時期による相違」第 54 回日本呼吸器学会学術講演会、2014 年
- 4) 倉井淳、渡部仁成、山崎章、清水英治。「黄砂時粉塵に曝露されたダニ抗原誘発気管支喘息モデルマウスにおけるプラズマカストの有効性に関する検討」 第 26 回日本アレルギー学会春期臨床大会、2014 年

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Kanatani KT, Ito I, Al-Delaimy WK, Adachi Y, Mathews WC, Ramsdell JW. Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team. Desert-dust exposure is associated with increased risk of asthma hospitalization in children. Am J Respir Crit Care Med. 2010; 182:1475-1481.
- 2) Ueda K, Nitta H, Odajima H. The effects of weather, air pollutants, and Asian dust on hospitalization for asthma in Fukuoka. Environ Health Prev Med. 2010; 15: 350-357.

- 3) Yoo Y, Choung JT, Yu J, Kim do K, Koh YY. Acute effects of Asian dust events on respiratory symptoms and peak expiratory flow in children with mild asthma. *J Korean Med Sci.* 2008; 23: 66-71.
- 4) Ding YP, Yao HX, Tang XL, He HW, Shi HF, Lin L, Li M, Chen S, Chen J, Wang HJ. An epidemiology study of bronchial asthma in the Li ethnic group in China. *Asian Pac J Trop Med.* 2012; 5: 157-161.
- 5) Watanabe M, Yamasaki A, Burioka N, Kurai J, Yoneda K, Yoshida A, Igishi T, Fukuoka Y, Nakamoto M, Takeuchi H, Suyama H, Tatsukawa T, Chikumi H, Matsumoto S, Sako T, Hasegawa Y, Okazaki R, Horasaki K, Smizu E. Correlation of Asian dust storms with worsening of symptoms for patients with asthma in western Japan. *Allergol Int.* 2011; 60: 267-275.
- 6) Watanabe M, Igishi T, Burioka N, Yamasaki A, Kurai J, Takeuchi H, Sako T, Yoshida A, Yoneda K, Fukuoka Y, Nakamoto M, Hasegawa Y, Chikumi H, Matsumoto S, Minato S, Horasaki K, Shimizu E. Pollen augments the influence of desert dust on symptoms of adult asthma patients. *Allergol Int.* 2011; 60: 517-524.
- 7) Yang CY, Tsai SS, Chang CC, Ho SC. Effects of Asian dust storm events on daily admissions for asthma in Taipei, Taiwan. *Inhal Toxicol.* 2005; 17: 817-821.
- 8) Bell ML, Levy JK, Lin Z. The effect of sandstorms and air pollution on cause-specific hospital admissions in Taipei, Taiwan. *Occup Environ Med.* 2008; 65: 104-111.
- 9) Budinger GR, Mutlu GM. Update in environmental and occupational medicine 2010. *Am J Respir Crit Care Med.* 2011; 183: 1614-1619.
- 10) Al Frayh AR, Shakoor Z, Gad El Rab MO, Hasnain SM. Increased prevalences of asthma in Saudi Arabia. *Ann Allergy Asthma Immunol.* 2001; 86: 292-296.
- 11) Prospero JM, Blades E, Naidu R, Mathison G, Thani H, Lavoie MC. Relationship between African dust carried in the Atlantic trade winds and surges in pediatric asthma attendances in the Caribbean. *Int J Biometeorol.* 2008; 52: 823-832.
- 12) Lei YC, Chan CC, Wang PY, Lee CT, Cheng TJ. Effects of Asian dust event particles on inflammation markers in peripheral blood and bronchoalveolar lavage in pulmonary hypertensive rats. *Environ Res.* 2004; 95: 71-76.
- 13) Ichinose T, Sadakane K, Takano H, Yanagisawa R, Nishikawa M, Mori I, Kawazato H, Yasuda A, Hiyoshi K, Shibamoto T. Enhancement of mite allergen-induced eosinophil infiltration in the murine airway and local cytokine/chemokine expression by Asian sand dust. *J Toxicol Environ Health A.* 2006; 69: 1571-1585.
- 14) Hiyoshi K, Ichinose T, Sadakane K, Takano H, Nishikawa M, Mori I, Yanagisawa R, Yoshida S, Kumagai Y, Tomura S, Shibamoto T. Asian sand dust enhances ovalbumin-induced eosinophil recruitment in the alveoli and airway of mice. *Environ Res.* 2005; 99: 361-368.
- 15) Han YJ, Holsen TM, Hopke PK, Cheong JP, Kim H, Yi SM. Identification of source locations for atmospheric dry deposition of heavy metals during yellow-sand events in Seoul, Korea in 1998 using hybrid receptor models. *Atmos Environ* 2004; 38: 5353-5361.

- 16) Choi JC, Lee M, Chun Y, Kin J, Oh S. Chemical composition and source signature of spring aerosol in Seoul. *Korea J Geophy Res* 2001; 106: 18067-18074.
- 17) Onishi K, Kurosaki Y, Otani S, Yoshida A, Sugimoto N, Kurozawa Y. Atmospheric transport route determines components of Asian dust and health effects in Japan. *Atmos Environ* 2012; 49: 94-102.
- 18) Sierra-Vargas MP, Guzman-Grenfell AM, Blanco-Jimenez S, Sepulveda-Sanchez JD, Bernabe-Cabanillas RM, Cardenas-Gonzalez B, Ceballos G, Hicks JJ. Airborne particulate matter PM_{2.5} from Mexico City affects the generation of reactive oxygen species by blood neutrophils from asthmatics: an in vitro approach. *J Occup Med Toxicol*. 2009; 4: 17.
- 19) Holgate ST, Sandström T, Frew AJ, Stenfors N, Nördenhall C, Salvi S, Blomberg A, Helleday R, Söderberg M. Health effects of acute exposure to air pollution. Part I: Healthy and asthmatic subjects exposed to diesel exhaust. *Res Rep Health Eff Inst*. 2003; 112: 1-30.
- 20) Bellido-Cassado J, Plaza V, Perpina M, Picado C, Bardagi S, Martinez-Bru C, Torrejon M. Inflammatory response of rapid onset asthma exacerbation. *Arch Bronconeumol*. 2010; 46: 587-593.
- 21) Takahashi T, Kimura Y, Saito R, Nakajima Y, Ohmiya Y, Yamasaki K, Aiba S. An in vitro test to screen skin sensitizers using a stable THP-1-driven IL-8 reporter cell line, THP-G8. *Toxicol Sci*. 2011; 124: 359-369.
- 22) Shibamori M, Ogino K, Kambayashi Y, Ishiyama H (2006) Intranasal mite allergen induces allergic asthma-like responses in NC/Nga mice. *Life Sci* 78: 987-994.
- 23) Fukuyama T, Tajima Y, Hayashi K, Ueda H, Kosaka T (2011) Prior or coinstantaneous oral exposure to environmental immunosuppressive agents aggravates mite allergen-induced atopic dermatitis-like immunoreaction in NC/Nga mice. *Toxicology* 289: 132-140.
- 24) Honda A, Matsuda Y, Murayama R, Tsuji K, Nishikawa M, Koike E, Yoshida S, Ichinose T, Takano H. Effects of Asian sand dust particles on the respiratory and immune system. *J Appl Toxicol*. 2013 Apr 9. DOI: 10.1002/jat.2871.
- 25) Nukada Y, Miyazawa M, Kosaka N, Ito Y, Sakaguchi H, Nisiyama N: Production of IL-8 in THP-1 cells following contact allergen stimulation via mitogen-activated protein kinase activation or tumor necrosis factor- α production. *J Toxicol Sci* 2008; 33: 175-185.
- 26) Toebak MJ, Pohlmann PR, Sampat-Sardjoepersad SC, von Blomberg BM, Bruynzeel DP, Scheper RJ, Rustemeyer T, Gibbs S: CXCL8 secretion by dendritic cells predicts contact allergens from irritants. *Toxicol In Vitro* 2006; 20: 117-124.
- 27) Python F, Goebel C, Aeby P: Assessment of the U937 cell line for the detection of contact allergens. *Toxicol Appl Pharmacol* 2007; 220: 113-124.

（４）大気粉塵の量及び化学成分の季節的変動の解析

京都薬科大学 公衆衛生学分野 渡辺徹志・若林敬二・長谷井友尋

〈研究協力機関〉

福岡県保健環境研究所	世良暢之、
鳥取県衛生環境研究所	大呂忠司、
富山県環境科学センター	木戸瑞佳

平成 23（開始年度）～25 年度累計予算：18,230 千円

（うち、平成 25 年度予算額：7,000 千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

黄砂飛散時に喘息患者の症状が増悪するなどの報告があり、その原因物質の解明が急がれている。本研究は、黄砂飛来と本邦の大気汚染との関係について明かにするため、黄砂が多く観測されている 3 月から 5 月を重点的に年間を通じて福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町及び富山県射水市において大気粉塵を捕集し、粉塵中に含まれる金属元素、イオン及び多環芳香族炭化水素（PAHs）をモニタリングした。その結果、本研究における粉塵捕集日のうち、気象庁の調査により福岡県、鳥取県及び富山県において黄砂が観測された日では、粉塵濃度は高く、黄砂の観測が報告されていない日にも粉塵濃度が高い日が多数あり、それらの日の大気粉塵では、地殻中に多く存在する Ca、Fe、Mg などの金属元素の濃度が高く、粉塵濃度とそれら金属元素濃度の間に強い相関関係があることがわかった。また、人為起源であることが報告されている Pb や V などの金属元素の濃度も粉塵濃度が高かった日に高く、粉塵濃度とそれら金属元素濃度は強い相関関係がみられた。石炭燃焼によって生成することが報告されている SO_4^{2-} の濃度も同様に粉塵濃度と強い相関関係がみられた。以上のことから黄砂の観測された日の粉塵中に人為起源と考えられる汚染物質が多く含まれ、3 月から 5 月には黄砂の観測が報告されない日にも黄砂日と同様の大気汚染が発生する日が多数存在する可能性が高いことがわかった。

〔キーワード〕 黄砂、大気粉塵、金属、イオン、多環芳香族炭化水素

1. はじめに

近年、中国では急速な都市化及び産業化により石炭、石油など化石燃料の使用量が著しく増加し、深刻な大気汚染が発生し大きな社会問題となっている。黄砂はタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠や黄土高原などの乾燥・半乾燥地域で巻き上げられた土壌・鉱物粒子が偏西風に乗って中国東部や日本などに飛来するものであるが、黄砂粒子の分析から土壌起源ではないと考えられる硫酸イオンなども検出され、輸送途中で人為起源の大気汚染物質を取り込んでいる可能性が示唆されている。また、黄砂が多く観測される春季は、中国大陸方面から季節風や偏西風により空気塊が本邦に流入しやすいと考えられる。しかし、大気汚染物質の本邦への飛来に関する知見は十分に得られていない。一方、黄砂飛来時に喘息症状の増悪や呼吸機能の低下が起こることが報告されているが

その原因については未だ明らかにされていない。大気汚染の状況を明らかにすることは越境汚染の実態を明らかにするうえで重要であるばかりでなく、ヒト健康へ影響を及ぼす原因物質を解明し健康被害を防ぐうえで必要であると考えられる。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、黄砂飛来時における本邦の大気汚染の状況を明らかにすることであり、黄砂飛来時に起こる喘息症状の増悪に関与する物質を解明するための基礎的情報を得ることである。また、黄砂が多く観測される春季（3月から5月まで）の本邦における大気の状態を詳細に調査することで、黄砂の観測が報告されない日の大気の汚染状況を明らかにするとともに黄砂日と同様に健康影響について注意すべき日の有無について明らかにすることである。

3. 研究開発方法

福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町、富山県射水市において大気粉塵を2011年6月から2014年2月までハイボリウムエアサンプラーを用いて石英繊維フィルター上に捕集した。その際、フィルターは24時間毎に交換し、大気粉塵量を測定した。2012年2月～5月、2013年2月～5月については原則として毎平日に、それ以外の月は原則として第2週目の平日4日間に大気粉塵を捕集した。大気粉塵を捕集したフィルターは、粉塵を捕集している部分の面積を100%として、その内10%を金属分析、5%をイオン分析、40%を有機成分分析用に切り分けた。

金属元素は、試料フィルターをふっ化水素酸・硝酸・過塩素酸法により分解して試験溶液を調製し、誘導結合プラズマ発光分光分析（ICP-AES）法あるいは原子吸光光度法により測定した。すなわち、大気粉塵を捕集したフィルター10%を細かく切り、硝酸、塩酸とともに加熱した。冷却後、硝酸、過塩素酸、ふっ化水素酸を加え、再び加熱した。ほとんど乾固するまで加熱を続けた後、蒸留水を加えて穏やかに加熱して溶解した。室温冷却後、ろ紙でろ過し、ろ液を蒸発乾固した後、硝酸に溶解して試験溶液とした。Ba、Ca、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ti及びZnはICP-AESを用いて測定した。V、Cd、Pb、Ni及びCrは電気加熱式原子吸光光度計を用いて測定した。

イオンは、試料フィルターから水抽出法により試験溶液を調製し、イオンクロマトグラフ法により測定した。すなわち、大気粉塵を捕集したフィルター5%を細かく切り、蒸留水とともに超音波抽出して得た抽出液をメンブランフィルターでろ過し、試験溶液とした。陰イオンとして Cl^- 、 NO_3^- 及び SO_4^{2-} を、陽イオンとして Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 及び Ca^{2+} を電気伝導度検出器付きイオンクロマトグラフで測定した。

有機成分は、試料フィルターから有機溶媒抽出法により試験溶液を調製し、高速液体クロマトグラフ（HPLC）法により多環芳香族炭化水素（PAHs）を測定した。すなわち、大気粉塵を捕集したフィルター40%を細かく切り、メタノールとともに超音波抽出した。抽出液をろ紙でろ過し、ろ液を蒸発乾固した後、エタノールに溶解して試験溶液とした。フルオランテン（FL）、ピレン（PY）、ベンツ[a]アントラセン（BaA）、クリセン（CHR）、ベンゾ[f]フルオランテン（BbF）、ベンゾ[k]フルオランテン（BkF）、ベンゾ[a]ピレン（BaP）、ジベンゾ[a,h]アントラセン（DahA）、ベンゾ[g,h,i]ペリレン（BghiP）及びインデノ[1,2,3-c,d]ピレン（IcdP）を蛍光検出器付きHPLCで測定した。

後方流跡線解析は、米国海洋大気庁（NOAA）の HYSPLIT を用いて行った。太宰府市、湯梨浜町及び射水市を起点として大気粉塵捕集の開始及び終了の中間である 22 時（JST）を計算開始時間として、高度 1500 m で等温位法により 96 時間遡って行った。

4. 結果及び考察

2011 年 6 月から 2012 年 3 月までの福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町及び富山県射水市における大気粉塵捕集日及び捕集された大気粉塵量から算出した大気粉塵濃度を表 (4)-1 に示す。本捕集日のうち、気象庁による調査で黄砂が観測された日はなかった（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）。太宰府市では、2011 年 6 月 14 日、2012 年 3 月 7、15、28、29 日に高い粉塵濃度が観測され、粉塵濃度はそれぞれ 71.2、80.2、75.3、72.7、90.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。湯梨浜町においては 2012 年 3 月 27 日に最も粉塵濃度が高く、57.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。射水市では 2012 年 3 月 29 日に最も粉塵濃度が高く 67.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。以上のようにいずれの地点においても 2012 年 3 月に比較的高い濃度が観測された日がみられたが、大気粉塵の捕集を行った日で 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の高い粉塵濃度の日にはなかった。

2012 年 4 月から 2013 年 3 月までの福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町及び富山県射水市における大気粉塵捕集日及び捕集された大気粉塵量から算出した大気粉塵濃度を表 (4)-2 に示す。本捕集日のうち、福岡県、鳥取県及び富山県において以下の日（場所）に黄砂が観測されたことが気象庁より報告されている（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）：2012 年 4 月 9 日（富山市）、23 日及び 24 日（福岡市、鳥取市）、4 月 25 日（鳥取市）、2013 年 3 月 8 日（福岡市、鳥取市）、3 月 9 日（福岡市、鳥取市、富山市）、3 月 10 日（福岡市）、3 月 19 日及び 20 日（福岡市、鳥取市、富山市）。これらの日のうち、太宰府市では 2012 年 4 月 23、24 日、2013 年 3 月 8、9、10 及び 19 日に粉塵濃度が高く、それぞれ 90.9、108.5、128.8、96.4、79.0 及び 169.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。湯梨浜町においては 2012 年 4 月 23、24 日、2013 年 3 月 8、9、19 日にそれぞれ 75.6、77.9、182.2、200.7、104.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と高濃度であった。射水市では 2012 年 4 月 9 日、2013 年 3 月 9 日及び 19 日にそれぞれ 76.2、103.3 及び 86.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と高濃度であった。気象庁からは黄砂の観測が報告されなかったが、太宰府市では、2012 年 4 月 2、3、5 日、5 月 6、7、16、17、28、29、30 日、11 月 5 日、2013 年 2 月 28 日、3 月 4、5、7 日に 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の高い粉塵濃度であり、2012 年 5 月 7 日及び 2013 年 3 月 4 日の粉塵濃度は、それぞれ 123.1 及び 133.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高かった。湯梨浜町では 2012 年 4 月 4 日、5 月 7、8、16 日、2013 年 3 月 4、6、7 日に 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の高い粉塵濃度であり、2013 年 3 月 7 日の粉塵濃度は 110.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高かった。射水市では 2012 年 4 月 10、24 日、5 月 16 日、2013 年 3 月 7、8、12 日に 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の高い粉塵濃度であり、2013 年 3 月 8 日及び 12 日の粉塵濃度は、それぞれ 120.3 及び 119.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高かった。

2013 年 4 月～2014 年 2 月の太宰府市、湯梨浜町及び県射水市における大気粉塵捕集日及び捕集された大気粉塵量から算出した大気粉塵濃度を表 (4)-3 に示す。本捕集日のうち、気象庁より福岡県、鳥取県及び富山県において黄砂が観測されたと報告された日はなかった（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）。しかし、2013 年 4 月 9 日には太宰府市と湯梨浜町において、粉

塵濃度はそれぞれ 99.3 及び 76.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と高く、2013 年 4 月 16 日には湯梨浜町と射水市において 88.7 及び 71.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と粉塵濃度が高かった。2013 年 4 月 30 日には湯梨浜町で 91.0

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ の高い粉塵濃度であった。また、2013 年 5 月 13 日には太宰府市、湯梨浜町及び射水市で粉塵濃度が 85.9、75.7 及び 89.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と高く、2013 年 5 月 14 日には太宰府市と射水市でそれぞれ 71.3 及び 74.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と高い粉塵濃度であった。太宰府市ではほかにも 2013 年 5 月 21、22、23、30 日及び 2014 年 1 月 20 日に 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の高い粉塵濃度であり、2013 年 5 月 21 日及び 22 日において粉塵濃度は 107.6 及び 104.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高かった。以上のように、気象庁による調査で黄砂が観測された日の多くで粉塵濃度が高かったが、黄砂観測が報告されなかった日にも粉塵濃度が高い日が多数みられ、特に太宰府市において粉塵濃度の高い日が多かった。

太宰府市、湯梨浜町及び射水市において 2011 年 6 月～2013 年 5 月までに捕集した大気粉塵中の金属元素を分析した。2012 年 3 月～5 月と 2013 年 3 月～5 月の大気粉塵濃度と大気粉塵中の金属元素の分析結果を図(4)-1-1 から図(4)-6-3 に示す。分析した 15 種類の金属元素のうち、Ca、Fe 及び Mg などは地殻中に多く存在する金属であり、黄砂飛来の指標になると報告されている。Fe 濃度は、太宰府市では 2012 年 3 月 7、8、14、15、28、29 日、4 月 2、4、5、24 日、5 月 6、7、16、17、28、29、30 日、11 月 5 日、2013 年 2 月 21、25、27、28 日、3 月 4、5、7、9、12、19、4 月 9、11、15、16、25、30 日、5 月 1、13、14、16、21、22、23、30 日に 1000 ng/m^3 以上と高かった。このうち、2012 年 3 月 7、15、28、29 日、4 月 2、5、24 日、5 月 6、7、16、17、28、29、30 日、11 月 5 日、2013 年 2 月 21、25、27、28 日、3 月 4、5、7、9、19、4 月 9 日、5 月 13、14、21、22、23、30 日は粉塵濃度も高く 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上であった。湯梨浜町では、2012 年 3 月 27 日、4 月 2、4、24、25 日、5 月 7、8、16 日、2013 年 3 月 4、6、7、8、9、19 日、4 月 9、15、16、30 日、5 月 13、21、30 日に Fe 濃度が 1000 ng/m^3 以上であった。このうち、2012 年 4 月 4、24 日、5 月 7、8、16 日、2013 年 3 月 4、6、7、8、9、19 日、4 月 9、16、30 日、5 月 13、21、30 日は粉塵濃度が 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上であった。射水市では、2011 年 8 月 1 日、2012 年 4 月 2、9、10、29、30 日、5 月 7、8、16 日、2013 年 3 月 7、8、19 日、4 月 16、30 日、5 月 13、14、21、22、31 日に Fe 濃度が 1000 ng/m^3 以上であった。このうち、2012 年 4 月 9、10 日、5 月 16 日、2013 年 3 月 7、8、19 日、4 月 16 日、5 月 13、14 日は粉塵濃度が 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上であった。太宰府市、湯梨浜町、射水市において Fe 濃度が 1000 ng/m^3 以上であった日の多くは粉塵濃度が 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上と高かった。2012 年 2 月～5 月及び 2013 年 2 月～5 月のうち、気象庁により黄砂が観測された日のほとんどで Fe 濃度が高かった。また、黄砂飛来の報告がないにも関わらず Fe を多く含み粉塵濃度が高い日が多数存在することが明らかになった。粉塵濃度と金属元素濃度の間の相関係数を表(4)-4 に示す。2012 年 3 月～5 月と 2013 年 3 月～5 月の 3 地点の粉塵濃度と Fe 濃度の相関係数は 0.78 (射水市、2013 年 3 月から 5 月)～0.96 (湯梨浜町、2013 年 3 月～5 月)であり、これらの期間においていずれの地点でも粉塵濃度と Fe 濃度は強く相関していた。また、同期間の 3 地点の粉塵濃度と Ca 濃度、粉塵濃度と Mg 濃度の相関係数は、それぞれ 0.79 (太宰府市、2012 年 3 月～5 月)～0.93 (湯梨浜町、2013 年 3 月～5 月)、0.70 (太宰府市、2012 年 3 月～5 月)～0.88 (2013 年 3 月～5 月)であり、粉塵濃度と各金属濃度は強く相関していた。

大気粉塵中の一部の金属は人為起源であることが報告されており、K、Cd、Ni、Cr などは廃棄物燃焼、V は石油燃焼、Pb は有鉛ガソリン及び石炭燃焼に伴う大気汚染の指標になると報告されている。Pb 濃度は、太宰府市では 2012 年 3 月 7、8、14、15、28 日、4 月 5、23、24 日、5 月 7、28、

29日、10月15日、11月8日、2013年1月9日、2月21、25日、3月4、5、7、8、9、19、4月9、11、16日、5月13、21、22、30日に 30 ng/m^3 以上と高かった。このうち、2012年3月7、15、28日、4月5、23、24日、5月7、28、29日、2013年3月4、5、7、8、9、19、4月9日、5月13、21、22、30日は粉塵濃度も高く $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上であった。湯梨浜町では、2012年3月7、27日、4月4、9日、5月5、7、8、28日、7月12日、2013年2月21日、3月4、6、7、8、9、19日、4月16日、5月13、21日にPb濃度が 30 ng/m^3 以上であった。このうち、2012年4月4日、5月7、8日、2013年3月4、6、7、8、9、19日、4月16日、5月13、21日は粉塵濃度が $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上と高かった。射水市では、2012年3月8日、4月10、24日、5月7日、2013年3月6、7、8日、4月4、16日、5月13、14、22日にPb濃度が 30 ng/m^3 以上であった。このうち、2012年4月10、24日、2013年3月7、8日、4月16日、5月13、14日は粉塵濃度が $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上と高かった。太宰府市、湯梨浜町、射水市においてPb濃度が 30 ng/m^3 以上であった日の多くは粉塵濃度が高く、2012年3月～5月と2013年3月～5月の3地点の粉塵濃度とPb濃度の相関係数は0.61（射水市、2013年3月～5月）～0.86（湯梨浜町、2013年3月～5月）であり、粉塵濃度とPb濃度は強く相関していた（表(4)-4）。粉塵濃度とV濃度との相関係数は、射水市と太宰府市でそれぞれ0.45（2012年3月～5月）及び0.58（2013年3月～5月）であったほかは、0.70（湯梨浜町、2012年3月～5月）～0.88（湯梨浜町、2013年3月～5月）であり、粉塵濃度とV濃度は強く相関していた（表(4)-4）。Pb濃度が高かった日の多くはFe濃度も高かった。

太宰府市、湯梨浜町及び射水市において2011年6月から2013年5月までに捕集した大気粉塵中のイオンを分析した。2012年3月～5月と2013年3月～5月に捕集した大気粉塵についてのイオンの分析結果を表(4)-5から表(4)-10に示す。分析した分8種類のイオンのうち、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} などのイオンは化石燃料の燃焼に伴う大気汚染の指標になると報告されている。 SO_4^{2-} 濃度は、太宰府市では2011年6月13、14日、9月8日、2012年2月23日、3月6、7、8、14、15、28日、4月9、19、23、24日、5月7、8、9、16、28、29、30日、7月10、12日、11月8日、2013年2月21日、3月4、7、8、9、10、19、4月1、2、16、18日、5月9、13、14、15、16、21、22、23、29、30日に 10000 ng/m^3 以上と高かった。このうち、2011年6月14日、2012年3月7、15、28日、4月23、24日、5月7、16、28、29、30日、2013年3月4、7、8、9、10、19、5月13、14、21、22、23、30日は粉塵濃度も高く $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上であった。湯梨浜町では、2012年2月23日、3月7、8日、4月9、10、23、24日、5月7、8、9、16、17、28日、7月12日、2013年2月21日、3月4、7、8、9、19、28日、4月16日、5月13、14、15、21、22、29日に SO_4^{2-} 濃度が 10000 ng/m^3 以上であった。このうち、2012年4月23、24日、5月7、8、16日、2013年3月4、7、8、9、19日、4月16日、5月13日は粉塵濃度が $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上と高かった。射水市では、2012年4月9、24、25日、5月7、16、17、28日、2013年3月8日、4月4、16日、5月13、14、15、22日に SO_4^{2-} 濃度が 10000 ng/m^3 以上であった。このうち、2012年4月9、24、25日、5月16日、2013年3月8日、4月16日、5月13、14日は粉塵濃度が $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上と高かった。太宰府市、湯梨浜町、射水市において SO_4^{2-} 濃度が 10000 ng/m^3 以上であった日の多くは粉塵濃度が高かった。粉塵濃度とイオン濃度の間の相関係数を表(4)-11に示す。粉塵濃度と SO_4^{2-} 濃度の相関係数は、射水市において0.55（2013年3月～5月）であったほかは、0.64（射水市、2012年3月～5月）～0.75（湯梨浜町、2012年3月～5月）であり、粉塵濃度と SO_4^{2-} 濃度は強く相関していた。また、粉塵

濃度と NO_3^- 濃度の相関係数は、太宰府市で 0.63（2013 年 3 月～5 月）、湯梨浜町で 0.66（2012 年 3 月～5 月）及び 0.75（2013 年 3 月～5 月）であり、粉塵濃度と NO_3^- 濃度は強く相関していた。太宰府市、湯梨浜町及び射水市において 2011 年 6 月から 2013 年 5 月までに捕集した大気粉塵中の PAHs を分析した。2013 年 3 月～5 月に捕集した大気粉塵についての PAHs の分析結果を表(4)-12 から表(4)-14 に示す。分析した PAHs 10 種類のうち、国際がん研究機関（IARC）によりヒトに対する発がん性物質に分類されている BaP やヒトに対する発がん性が示唆されている BbF(Group 2B) などが高濃度である傾向を示した。総 PAHs 濃度は、太宰府では、2011 年 11 月 15 日、12 月 5、6 日、2012 年 3 月 7、8 日、11 月 8 日、12 月 3 日、2013 年 1 月 7、8、9 日、2 月 12、14、21、25、26 日、3 月 4、8、10、11、19、4 月 4、22 日、5 月 8、16 日に 2000 pg/m^3 以上と高かった。このうち、2012 年 3 月 7 日、2013 年 3 月 4、8、10、19、5 月 16 日は粉塵濃度も高く $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上であった。湯梨浜町では、2012 年 3 月 7 日、2013 年 3 月 4、8、9、19 日に総 PAHs 濃度が 2000 pg/m^3 以上であった。このうち、2013 年 3 月 4、8、9、19 日は粉塵濃度が $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上と高かった。射水市では、2011 年 12 月 6 日、2013 年 3 月 6、7、12 日に PAHs 濃度が 2000 pg/m^3 以上であった。このうち、2013 年 3 月 7、12 日は粉塵濃度が $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上と高かった。太宰府市では特に粉塵濃度が高くない日にも、PAHs 濃度の高い日が多数みられ、湯梨浜町と射水市においては PAHs 濃度が高い日の多くは粉塵濃度が高かった。

後方流跡線解析の結果、2012 年 1 月～5 月及び 2013 年 1 月～5 月に太宰府市、湯梨浜町及び射水市で大気粉塵を捕集した空気塊の大部分は中国大陸方面から流入したと考えられた。一方、2011 年、2012 年、2013 年の 6 月～9 月は、各地点で気粉塵を捕集した空気塊の多くが太平洋方面から流入したと考えられた。

2012 年 3 月～5 月と 2013 年 3 月～5 月の大気粉塵捕集日のうち、気象庁の調査により福岡県、鳥取県及び富山県において黄砂が観測された日の延べ日数は 18 日であった。このうち粉塵濃度が $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上であった延べ日数は 14 日であり、Fe 濃度が 1000 ng/m^3 以上であった延べ日数は 9 日であり、 900 ng/m^3 以上であった日を含めると 14 日であった。また、Pb 濃度が 30 ng/m^3 以上であった延べ日数は 8 日であり、 SO_4^{2-} 濃度が 10000 ng/m^3 以上であった延べ日数は 13 日であった。黄砂の観測が報告されず、粉塵濃度が $70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以上、Fe 濃度が 1000 ng/m^3 以上、Pb 濃度が 30 ng/m^3 以上、 SO_4^{2-} 濃度が、 10000 ng/m^3 以上のすべてに当てはまる日の太宰府市、湯梨浜町及び射水市における延べ日数は 21 日あった。これらの日においては、該当する地点において黄砂の観測が報告された日と同様の大気汚染があったと考えられた。Pb と SO_4^{2-} は長距離輸送汚染の指標となることが報告されており、越境汚染の影響が大きいことが示唆された。

表(4)-1 福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町及び富山県射水市の大气粉塵濃度 (2011年6月～2012年3月)

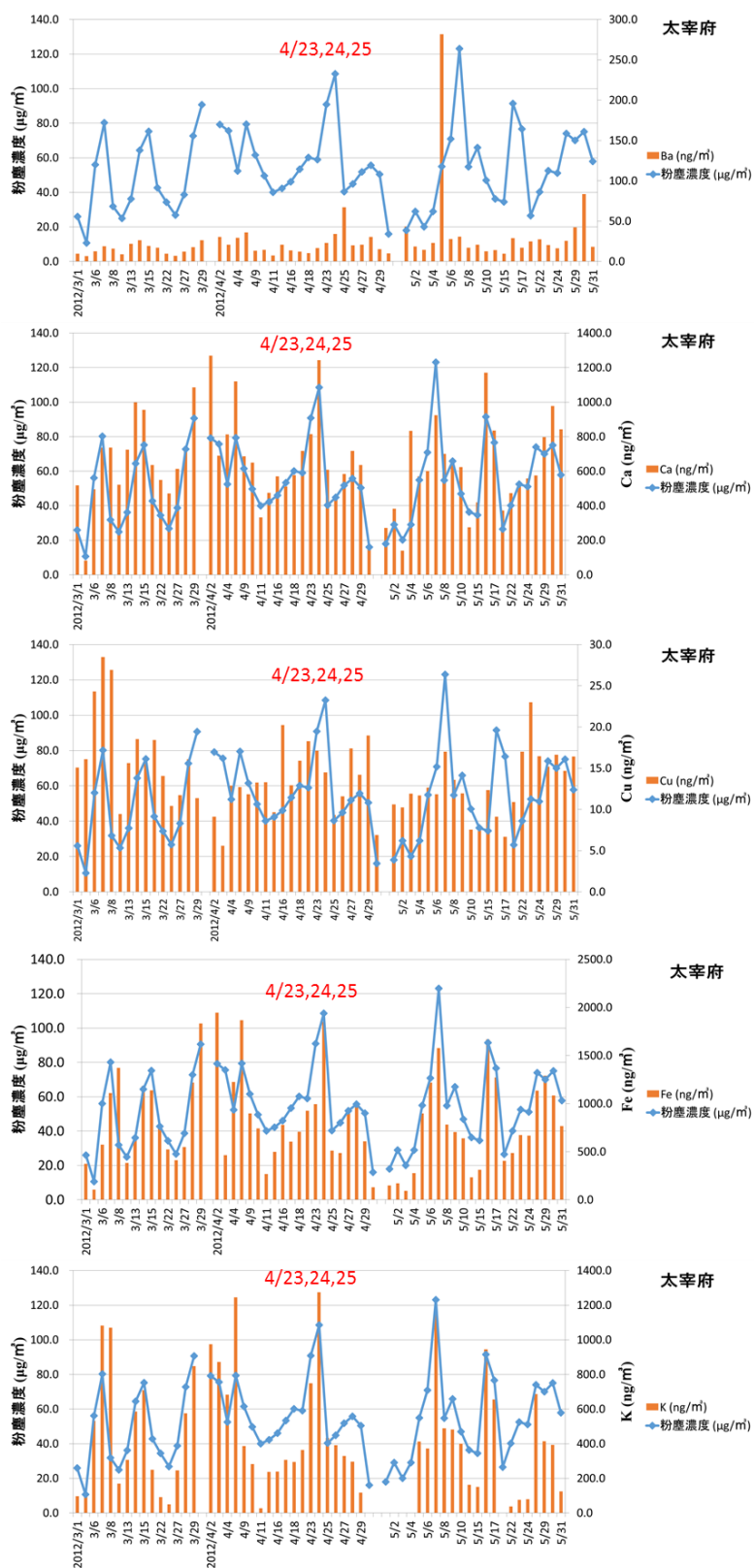
(μg/m ³)				(μg/m ³)			
捕集日	太宰府	湯梨浜	射水	捕集日	太宰府	湯梨浜	射水
2011/6/13	56.1	26.7	20.5	2012/1/23	17.3	—	10.2
2011/6/14	71.2	21.0	13.6	2012/1/24	30.1	11.3	5.9
2011/6/15	37.8	22.7	16.7	2012/1/25	26.1	13.3	9.9
2011/6/16	5.3	19.4	20.5	2012/1/26	22.1	18.0	8.2
				2012/1/27	—	28.5	—
2011年6月平均	42.6	22.4	17.8	2012年1月平均	23.9	17.8	8.5
2011年6月標準偏差	28.4	3.1	3.3	2012年1月標準偏差	5.5	7.7	1.9
2011/7/11	21.5	13.9	22.7	2012/2/1	37.3	18.9	15.5
2011/7/12	18.5	10.6	20.5	2012/2/2	30.3	13.1	10.2
2011/7/13	14.1	16.9	21.5	2012/2/3	—	16.8	—
2011/7/14	24.0	17.8	24.7	2012/2/6	36.1	21.5	23.8
2011年7月平均	19.5	14.8	22.3	2012/2/7	46.0	26.0	11.2
2011年7月標準偏差	4.3	3.2	1.8	2012/2/8	27.3	—	8.0
2011/8/1	—	23.5	19.3	2012/2/9	28.4	14.9	5.9
2011/8/2	—	23.0	23.0	2012/2/10	—	18.2	—
2011/8/3	—	15.9	25.1	2012/2/13	23.4	—	24.5
2011/8/4	—	18.8	24.0	2012/2/14	20.0	13.3	20.3
2011/8/11	37.8	—	—	2012/2/15	49.4	33.6	33.4
2011/8/12	31.3	—	—	2012/2/16	35.8	—	10.0
2011/8/13	17.1	—	—	2012/2/17	—	14.3	—
2011/8/14	19.1	—	—	2012/2/20	34.8	14.4	12.5
2011年8月平均	26.3	20.3	22.9	2012/2/21	25.8	35.5	31.6
2011年8月標準偏差	9.9	3.6	2.5	2012/2/22	18.3	20.7	39.5
2011/9/5	28.0	37.8	18.9	2012/2/23	49.1	46.6	37.2
2011/9/6	26.6	22.0	22.5	2012/2/24	—	28.5	—
2011/9/7	35.3	24.9	24.4	2012/2/27	27.2	9.4	17.6
2011/9/8	57.3	27.8	31.6	2012/2/28	17.6	12.4	16.2
2011年9月平均	36.8	28.1	24.3	2012/2/29	30.1	12.5	20.4
2011年9月標準偏差	14.2	6.9	5.4	2012年2月平均	31.6	20.6	19.9
2011/10/17	36.2	22.1	34.7	2012年2月標準偏差	9.9	9.9	10.4
2011/10/18	39.2	30.3	28.2	2012/3/1	26.0	17.1	30.5
2011/10/19	32.8	20.3	24.2	2012/3/2	—	29.1	—
2011/10/20	35.3	22.7	27.8	2012/3/5	10.7	8.2	9.4
2011年10月平均	35.9	23.8	28.7	2012/3/6	56.1	41.1	26.0
2011年10月標準偏差	2.6	4.4	4.4	2012/3/7	80.2	53.5	33.3
2011/11/7	—	15.5	18.2	2012/3/8	31.9	30.7	29.2
2011/11/8	—	12.6	17.4	2012/3/9	—	39.0	—
2011/11/9	—	13.6	15.7	2012/3/12	24.9	17.9	12.5
2011/11/10	—	9.6	13.9	2012/3/13	36.2	16.1	11.3
2011/11/14	53.4	—	—	2012/3/14	64.4	44.4	28.0
2011/11/15	45.7	—	—	2012/3/15	75.3	23.7	28.2
2011/11/16	27.5	—	—	2012/3/16	—	20.4	—
2011/11/17	34.4	—	—	2012/3/21	42.7	25.9	39.5
2011年11月平均	40.2	12.8	16.3	2012/3/22	34.4	22.3	47.9
2011年11月標準偏差	11.5	2.5	1.9	2012/3/23	—	16.1	—
2011/12/5	29.4	15.1	21.5	2012/3/26	26.8	22.3	17.2
2011/12/6	42.4	17.6	19.2	2012/3/27	38.7	57.4	59.2
2011/12/7	35.9	25.9	11.0	2012/3/28	72.7	39.4	52.6
2011/12/8	28.8	14.0	6.2	2012/3/29	90.6	38.1	67.9
2011年12月平均	34.1	18.1	14.5	2012/3/30	—	38.2	—
2011年12月標準偏差	6.4	5.4	7.1	2012年3月平均	47.4	30.1	32.8
				2012年3月標準偏差	24.0	13.3	17.7

表(4)-2 福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町及び富山県射水市の大气粉塵濃度 (2012年4月～2013年3月)

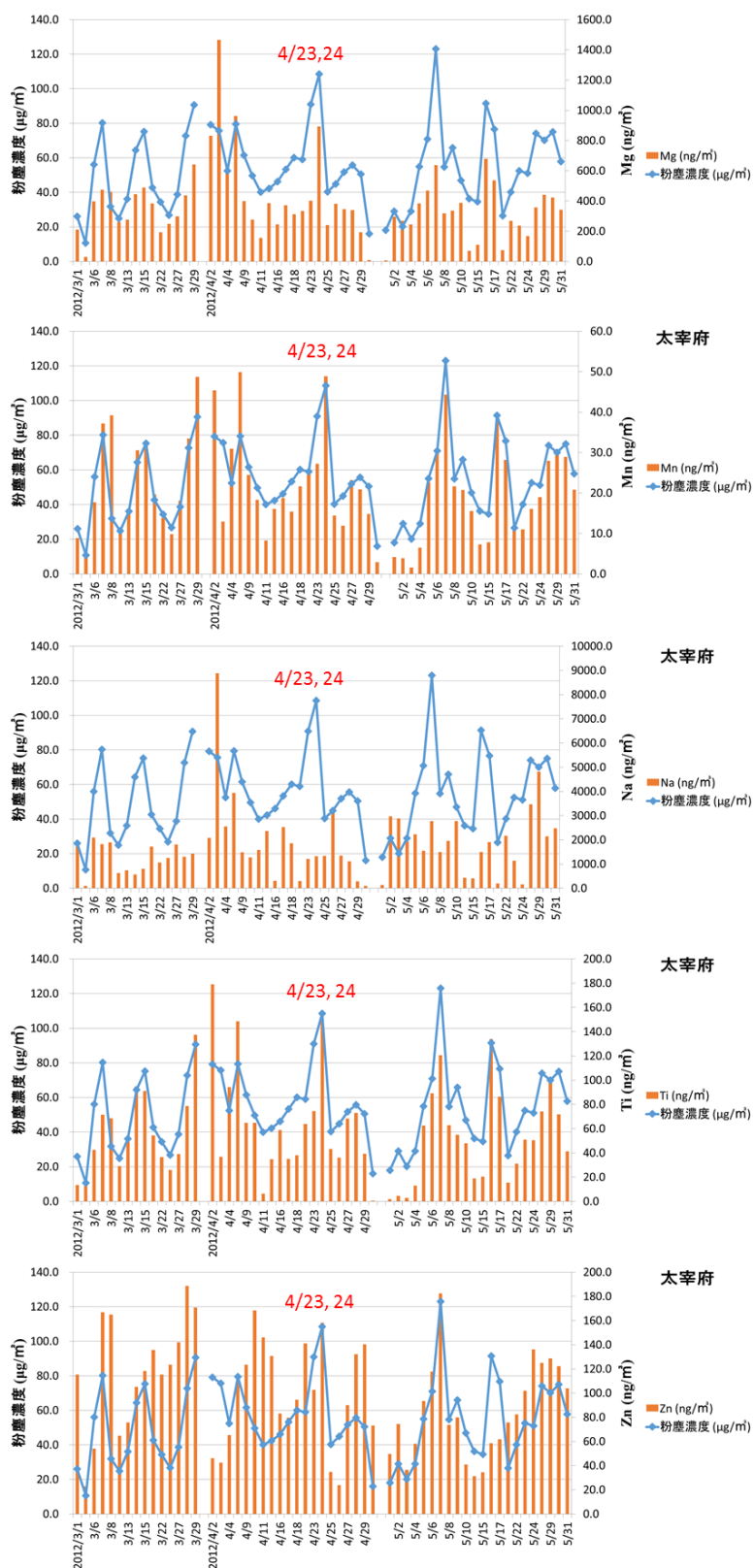
(μg/m ³)				(μg/m ³)			
捕集日	太宰府	湯梨浜	射水	捕集日	太宰府	湯梨浜	射水
2012/4/2	79.2	66.9	61.7	2012/9/3	37.1	22.0	16.8
2012/4/3	75.7	34.3	59.7	2012/9/4	29.0	37.4	17.9
2012/4/4	52.5	94.1	52.4	2012/9/5	16.1	25.3	21.7
2012/4/5	79.4	48.8	29.3	2012/9/6	21.4	21.0	17.4
2012/4/6	-	32.6	-				
2012/4/9	61.5	65.2	76.2	2012年9月平均	25.9	26.4	18.4
2012/4/10	49.7	50.1	76.7	2012年9月標準偏差	9.1	7.6	2.2
2012/4/11	40.1	23.1	16.3				
2012/4/12	42.3	39.2	42.8	2012/10/15	46.7	41.1	34.5
2012/4/13	-	40.1	-	2012/10/16	45.5	30.6	28.3
2012/4/16	46.2	31.9	25.3	2012/10/17	34.8	24.1	17.6
2012/4/17	53.4	26.9	35.0	2012/10/18	30.0	24.9	20.8
2012/4/18	60.1	27.5	30.2				
2012/4/19	59.0	27.4	35.6	2012年10月平均	39.3	30.2	25.3
2012/4/20	-	24.9	-	2012年10月標準偏差	8.2	7.9	7.6
2012/4/23	90.9	75.6	28.7				
2012/4/24	108.5	77.9	90.7	2012/11/5	73.8	18.3	21.2
2012/4/25	40.4	57.9	68.6	2012/11/6	40.8	28.9	17.7
2012/4/26	44.9	23.2	17.2	2012/11/7	41.0	37.8	15.2
2012/4/27	51.8	23.1	-	2012/11/8	58.9	40.4	18.4
2012/4/28	55.7	41.8	40.5				
2012/4/29	50.5	52.8	62.1	2012年11月平均	53.6	31.3	18.1
2012/4/30	16.0	34.0	64.7	2012年11月標準偏差	15.9	10.0	2.5
2012年4月平均	57.9	44.3	48.1	2012/12/3	43.0	13.2	13.6
2012年4月標準偏差	20.6	20.2	21.9	2012/12/4	25.0	34.0	8.3
				2012/12/5	36.9	19.5	11.6
2012/5/1	18.0	19.5	51.4	2012/12/6	24.6	15.3	5.9
2012/5/2	29.0	13.2	38.8				
2012/5/3	20.1	21.7	-	2012年12月平均	32.4	20.5	9.9
2012/5/4	29.0	40.5	-	2012年12月標準偏差	9.1	9.4	3.4
2012/5/5	55.0	68.6	-				
2012/5/6	70.9	55.7	-	2013/1/7	52.1	20.1	16.4
2012/5/7	123.1	72.5	63.4	2013/1/8	40.1	20.8	11.9
2012/5/8	54.8	84.5	64.2	2013/1/9	42.7	22.2	11.6
2012/5/9	65.9	52.0	43.7	2013/1/10	21.2	11.8	15.3
2012/5/10	46.9	16.8	14.9				
2012/5/11	-	19.5	-	2013年1月平均	39.0	18.8	13.8
2012/5/14	36.3	28.6	22.8	2013年1月標準偏差	13.0	4.7	2.4
2012/5/15	34.6	27.8	16.5				
2012/5/16	91.5	95.0	86.0	2013/2/4	27.0	29.2	25.0
2012/5/17	76.7	48.6	46.4	2013/2/5	22.3	17.9	17.9
2012/5/18	-	26.5	32.9	2013/2/6		13.3	11.0
2012/5/21	26.5	30.6	35.3	2013/2/7	31.1	27.2	17.0
2012/5/22	40.1	29.9	37.7	2013/2/12	46.6	32.1	19.8
2012/5/23	52.5	26.5	28.5	2013/2/13	32.4	16.7	13.5
2012/5/24	51.1	27.8	39.6	2013/2/14	34.8	14.3	26.6
2012/5/25	-	20.4	-	2013/2/18	15.3	30.3	24.6
2012/5/28	74.1	30.3	40.3	2013/2/19	22.0	19.4	19.8
2012/5/29	70.1	25.5	23.7	2013/2/20	19.7	29.1	9.6
2012/5/30	75.0	22.1	20.7	2013/2/21	62.0	33.4	13.0
2012/5/31	57.8	27.2	23.4	2013/2/25	49.0	21.5	8.6
				2013/2/26	38.8	26.1	21.0
2012年5月平均	54.5	37.2	38.4	2013/2/27	51.5	32.3	36.8
2012年5月標準偏差	25.5	22.1	18.2	2013/2/28	72.2	54.5	30.0
2012/6/11	58.2	21.5	17.3	2013年2月平均	37.5	26.5	19.6
2012/6/12	19.7	21.6	17.7	2013年2月標準偏差	16.8	10.3	8.0
2012/6/13	41.8	26.9	19.5				
2012/6/14	38.5	20.1	21.6	2013/3/4	133.5	78.5	26.2
				2013/3/5	73.9	40.1	27.8
2012年6月平均	39.6	22.5	19.0	2013/3/6	49.2	85.1	64.1
2012年6月標準偏差	15.8	3.0	2.0	2013/3/7	97.1	110.8	93.6
				2013/3/8	128.8	182.2	120.3
2012/7/9	37.7	21.3	18.9	2013/3/9	96.4	200.7	103.3
2012/7/10	47.2	24.2	18.6	2013/3/10	79.0	37.6	38.3
2012/7/11	18.3	13.8	12.2	2013/3/11	45.8	24.1	36.8
2012/7/12	34.3	57.2	29.3	2013/3/12	67.8	46.5	119.0
				2013/3/13	23.6	37.5	32.7
2012年7月平均	34.4	29.1	19.8	2013/3/14	25.7	20.0	22.6
2012年7月標準偏差	12.0	19.2	7.1	2013/3/18	27.2	32.8	34.5
				2013/3/19	169.2	104.4	86.4
2012/8/6	21.6	14.6	20.9	2013/3/20	55.0	55.4	61.6
2012/8/7	29.2	13.6	14.5	2013/3/21	34.1	21.9	22.5
2012/8/8	29.0	19.0	14.7	2013/3/25	38.7	20.9	21.5
2012/8/9	28.7	11.0	14.3	2013/3/26	26.7	22.7	23.6
				2013/3/27	29.2	13.4	37.1
2012年8月平均	27.1	14.6	16.1	2013/3/28	45.0	28.1	33.5
2012年8月標準偏差	3.7	3.3	3.2				
				2013年3月平均	65.6	61.2	52.9
				2013年3月標準偏差	42.2	54.3	34.4

表(4)-3 福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町及び富山県射水市の大気粉塵濃度 (2013年4月～2014年2月)

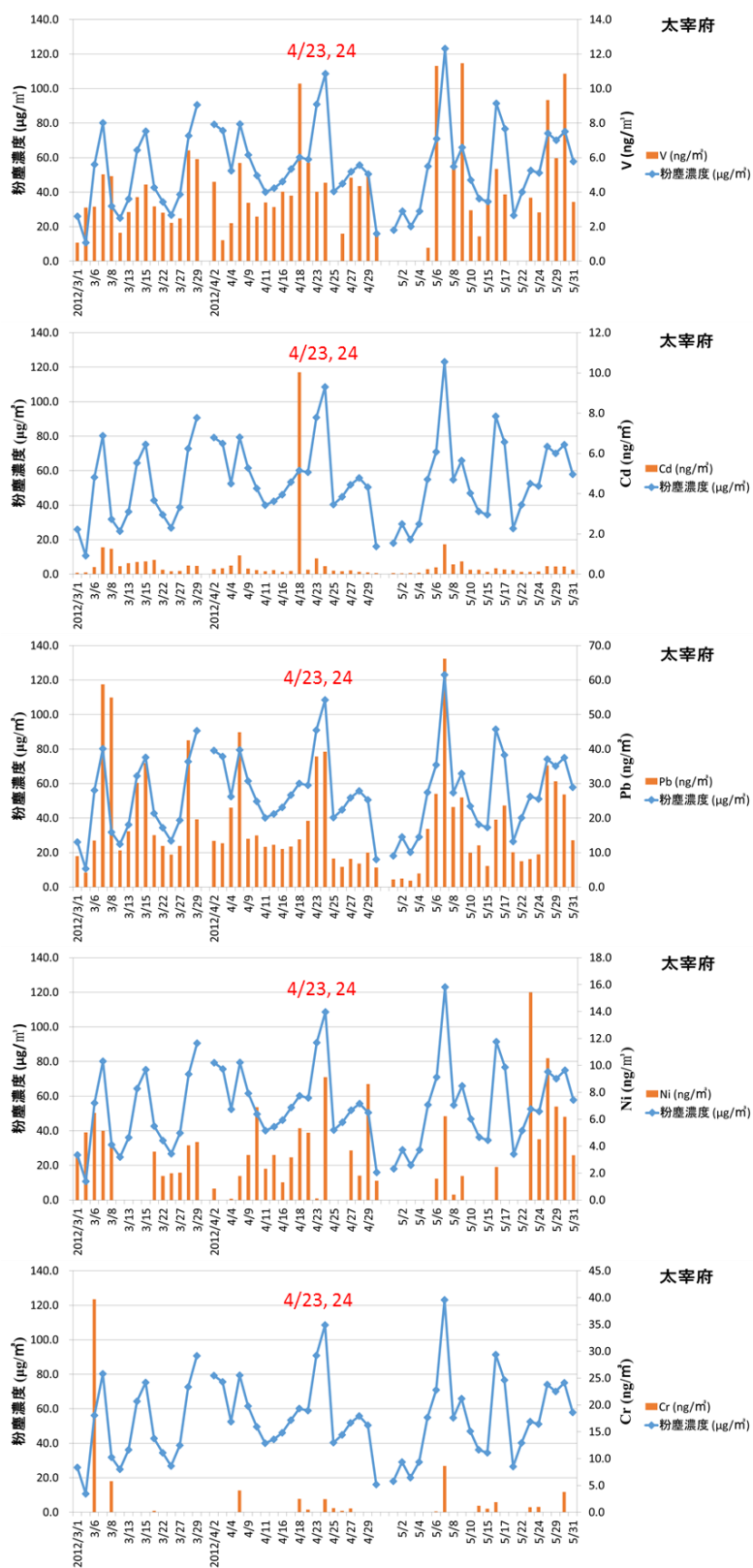
(μg/m ³)				(μg/m ³)			
捕集日	太宰府	湯梨浜	射水	捕集日	太宰府	湯梨浜	射水
2013/4/1	53.5	43.8	27.4	2013/8/4	27.1	-	-
2013/4/2	41.3	30.5	34.5	2013/8/5	36.8	29.0	18.1
2013/4/3	37.4	27.3	17.1	2013/8/6	39.1	39.9	28.4
2013/4/4	46.1	34.2	53.2	2013/8/7	36.7	43.0	34.4
2013/4/8	44.7	42.3	22.3	2013/8/8	-	46.0	40.5
2013/4/9	99.3	76.4	40.3				
2013/4/10	39.8	24.8	15.8	2013年8月平均	34.9	39.5	30.4
2013/4/11	52.5	29.4	18.2	2013年8月標準偏差	5.3	7.4	9.5
2013/4/15	54.4	66.7	45.7				
2013/4/16	63.9	88.7	71.5	2013/9/1	11.7	-	-
2013/4/17	49.2	34.9	51.8	2013/9/2	4.7	14.7	12.0
2013/4/18	50.7	32.4	26.0	2013/9/3	18.8	9.3	13.7
2013/4/22	40.6	23.8	18.3	2013/9/4	23.8	9.4	7.4
2013/4/23	25.2	20.1	21.7	2013/9/5	-	16.9	7.9
2013/4/24	32.4	28.1	13.6				
2013/4/25	63.8	32.9	31.5	2013年9月平均	14.8	12.6	10.3
2013/4/30	45.6	91.0	51.2	2013年9月標準偏差	8.3	3.8	3.1
2013年4月平均	49.4	42.8	32.9	2013/10/28	30.7	17.5	20.2
2013年4月標準偏差	16.3	23.0	16.7	2013/10/29	32.8	20.9	21.2
				2013/10/30	49.2	35.4	25.5
2013/5/1	38.2	30.4	6.6	2013/10/31	44.7	26.8	35.1
2013/5/2	-	12.2	-				
2013/5/7	39.8	16.2	14.5	2013年10月平均	39.4	25.2	25.5
2013/5/8	47.8	18.6	14.1	2013年10月標準偏差	9.0	7.8	6.8
2013/5/9	60.4	41.4	38.2				
2013/5/13	85.9	75.7	89.9	2013/11/11	20.1	12.1	5.3
2013/5/14	71.3	58.5	74.7	2013/11/12	20.3	11.5	4.5
2013/5/15	49.0	46.3	65.0	2013/11/13	21.7	11.0	8.3
2013/5/16	62.7	21.9	27.6	2013/11/14	28.5	11.5	11.0
2013/5/20	48.6	33.8	23.4				
2013/5/21	107.6	58.5	49.7	2013年11月平均	22.6	11.5	7.3
2013/5/22	104.2	49.2	50.1	2013年11月標準偏差	4.0	0.4	3.0
2013/5/23	72.2	21.5	20.6				
2013/5/27	38.3	54.8	45.2	2013/12/9	43.5	11.9	11.0
2013/5/28	22.0	13.8	35.7	2013/12/10	34.4	30.1	14.2
2013/5/29	67.9	41.6	17.5	2013/12/11	23.0	16.0	6.7
2013/5/30	75.9	47.2	23.9	2013/12/12	25.0	15.5	5.6
2013/5/31	-	-	61.9				
				2013年12月平均	31.5	18.4	9.4
2013年5月平均	62.0	37.7	38.7	2013年12月標準偏差	9.4	8.1	4.0
2013年5月標準偏差	24.0	18.6	23.7				
				2014/1/20	71.2	39.0	9.9
2013/6/10	15.9	22.0	28.9	2014/1/21	33.5	29.2	23.1
2013/6/11	18.8	-	33.9	2014/1/22	31.1	20.0	10.6
2013/6/12	33.1	17.1	26.5	2014/1/23	42.5	18.0	18.0
2013/6/13	37.9	23.5	26.0				
				2014年1月平均	44.5	26.5	15.4
2013年6月平均	26.5	20.9	28.8	2014年1月標準偏差	18.4	9.6	6.3
2013年6月標準偏差	10.7	3.4	3.6				
				2014/2/17	28.3	36.7	27.8
2013/7/8	16.4	24.8	14.1	2014/2/18	27.6	29.4	19.0
2013/7/9	17.7	22.5	16.3	2014/2/19	33.4	27.1	18.9
2013/7/10	20.6	24.9	14.6	2014/2/20	28.0	15.9	24.1
2013/7/11	24.1	29.2	17.9				
				2014年2月平均	29.3	27.3	22.4
2013年7月平均	19.7	25.3	15.7	2014年2月標準偏差	2.8	8.6	4.3
2013年7月標準偏差	3.4	2.8	1.7				



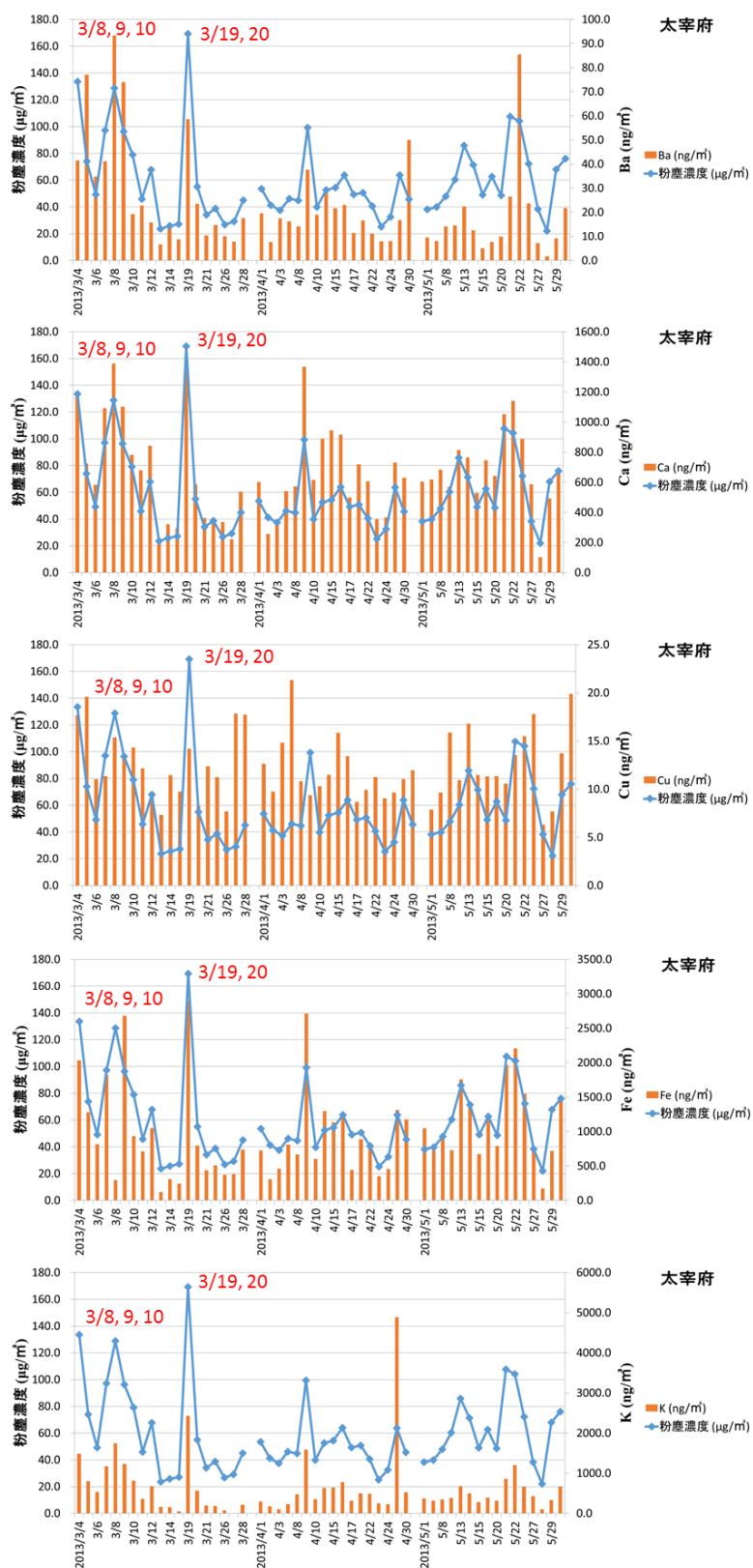
図(4)-1-1 福岡県太宰府市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



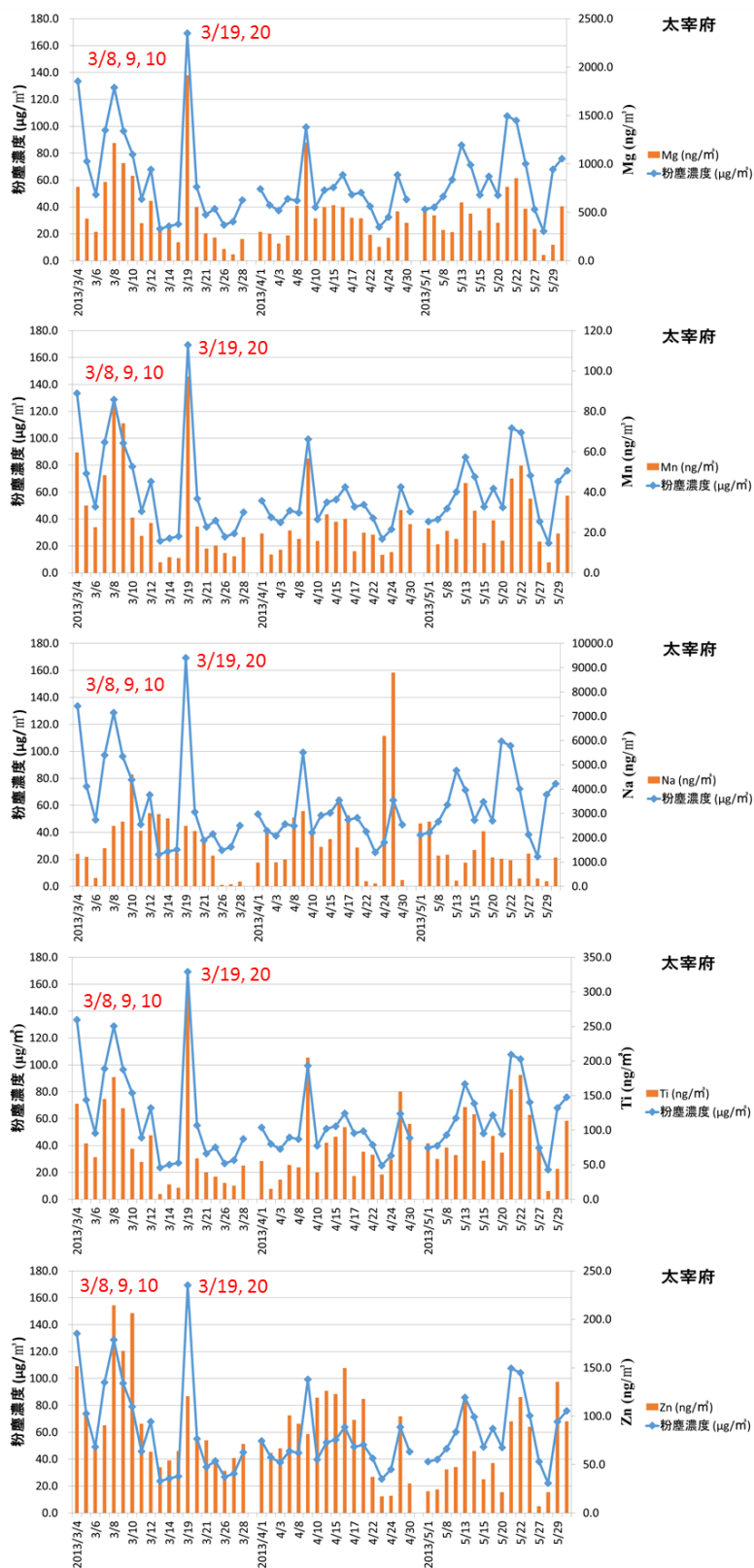
図(4)-1-2 福岡県太宰府市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



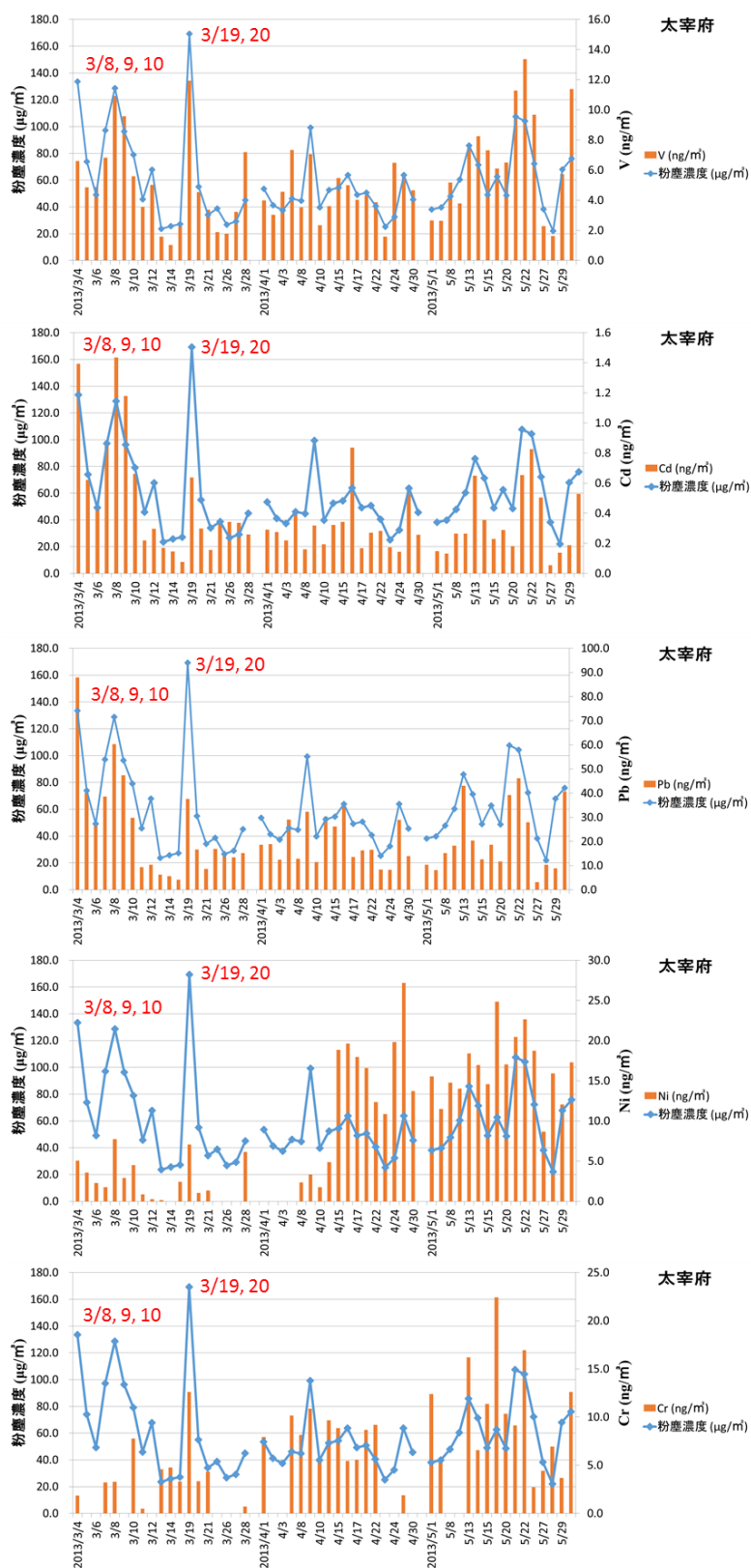
図(4)-1-3 福岡県太宰府市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



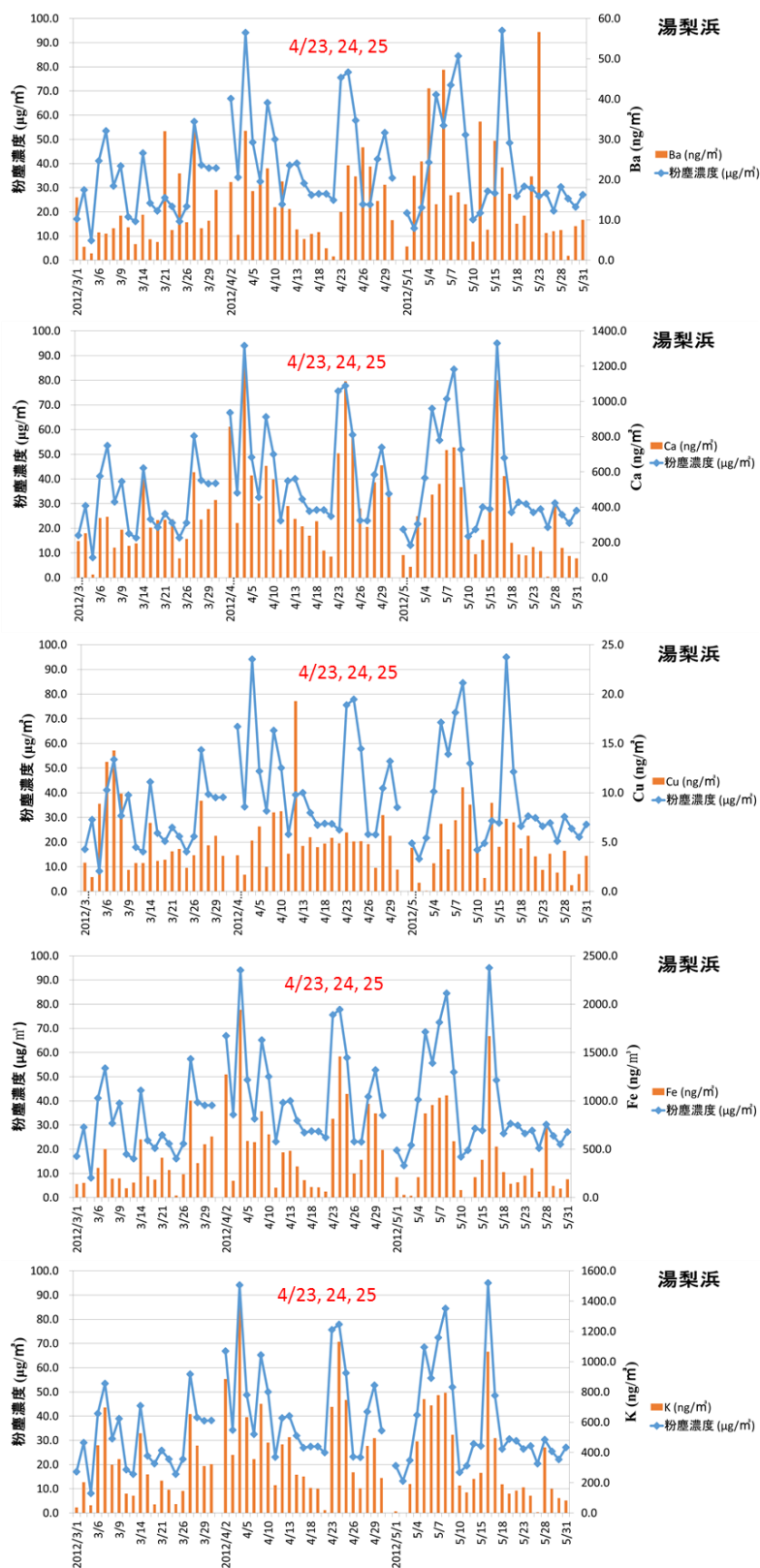
図(4)-2-1 福岡県太宰府市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



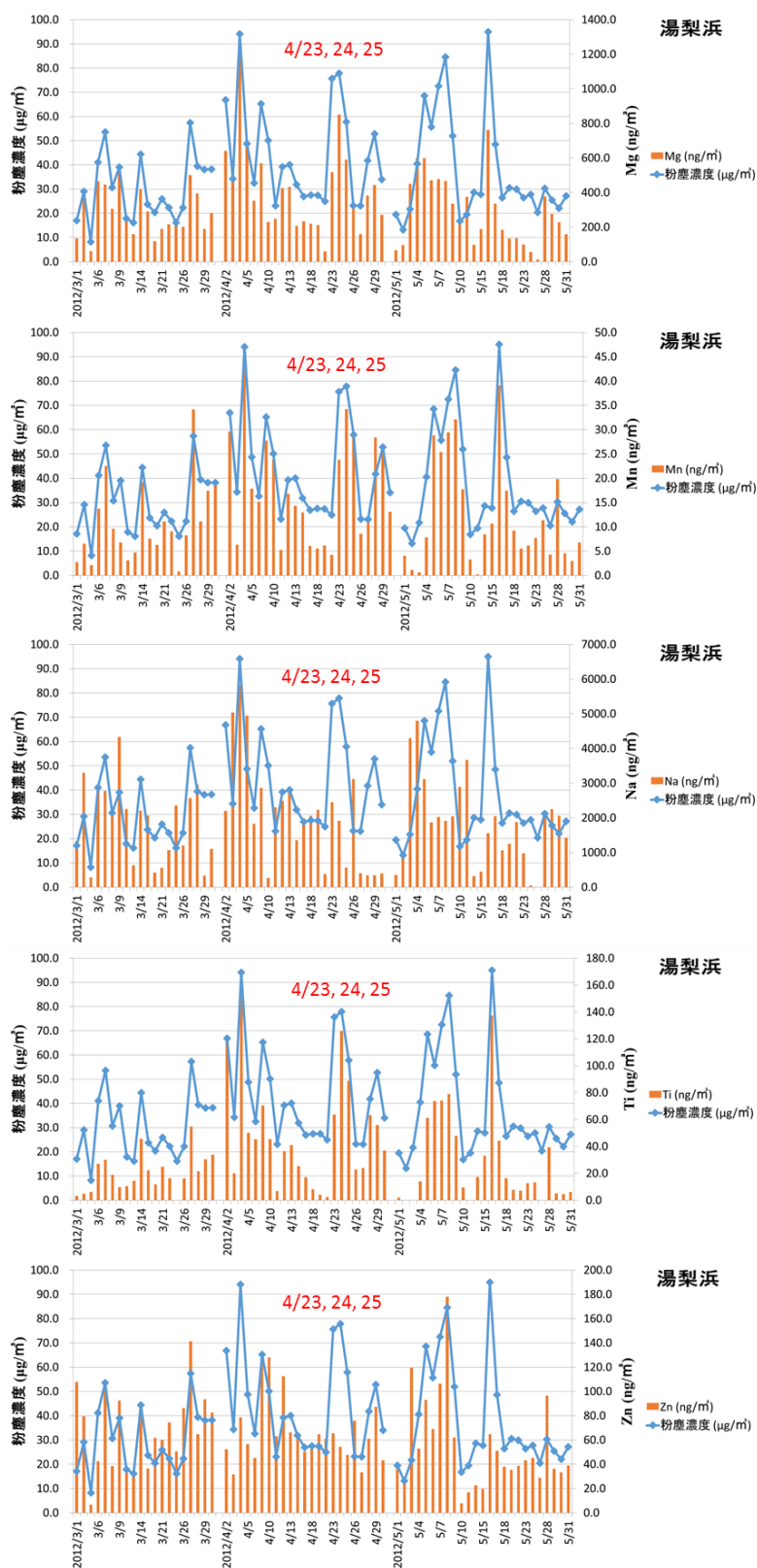
図(4)-2-2 福岡県太宰府市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



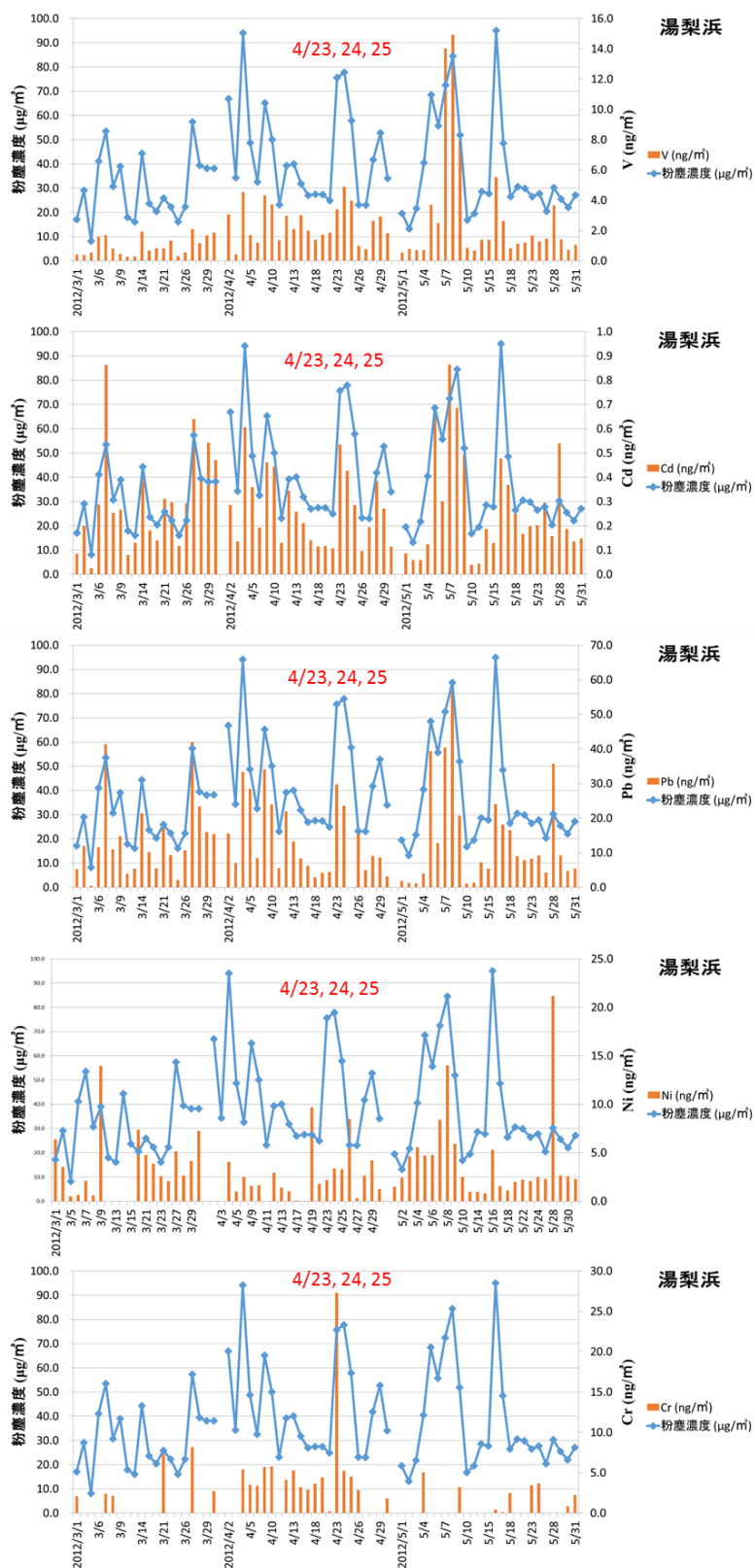
図(4)-2-3 福岡県太宰府市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



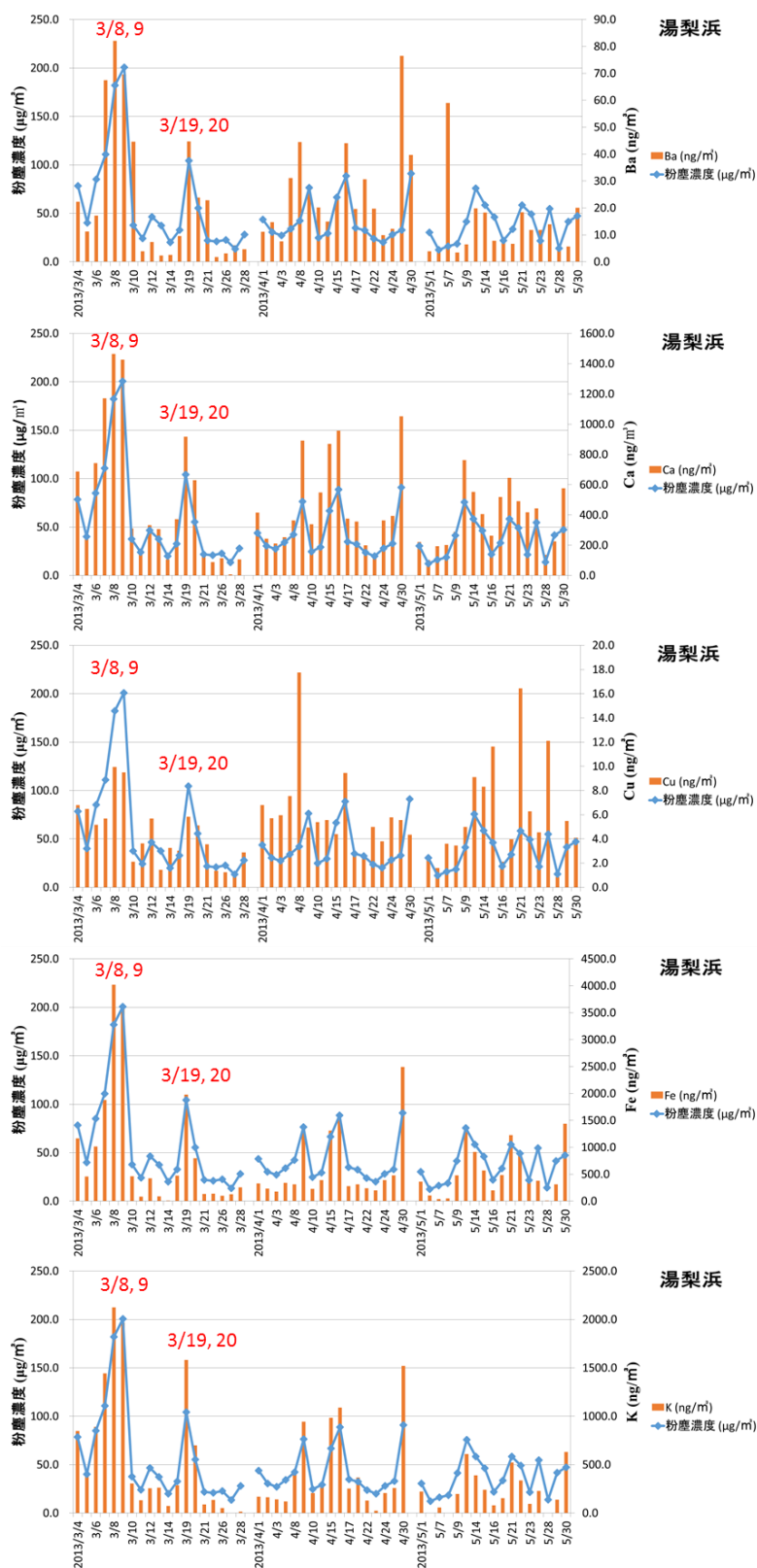
図(4)-3-1 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



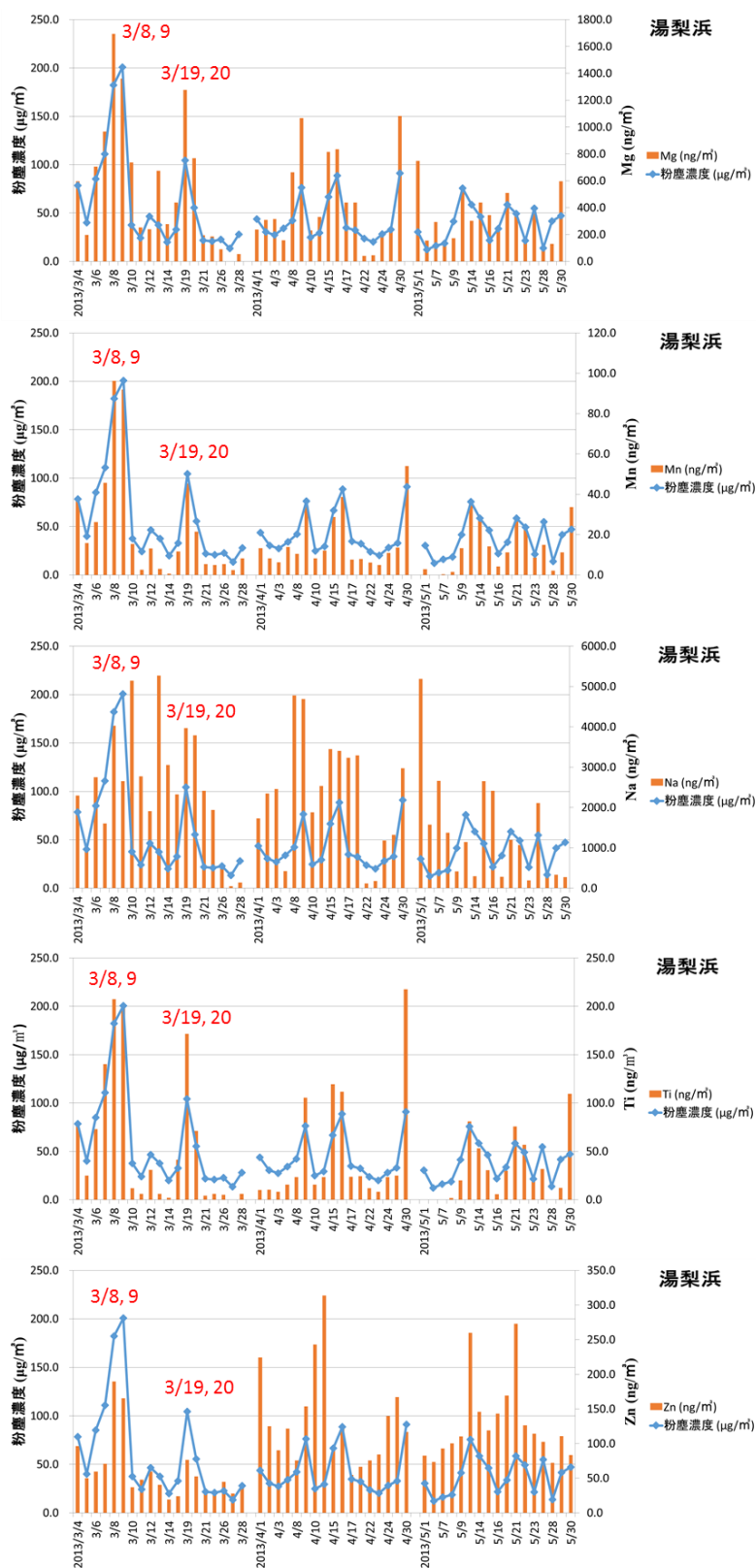
図(4)-3-2 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



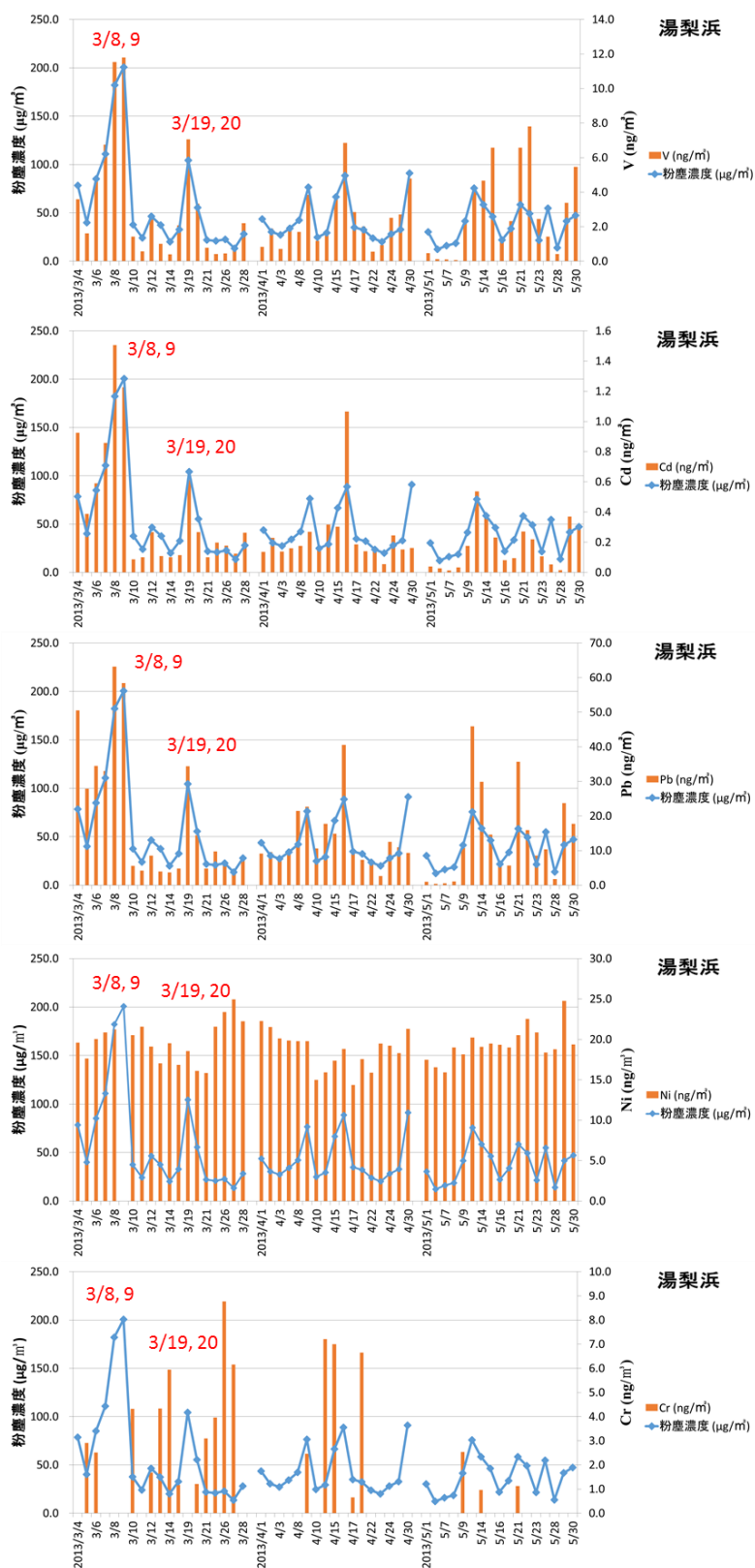
図(4)-3-3 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



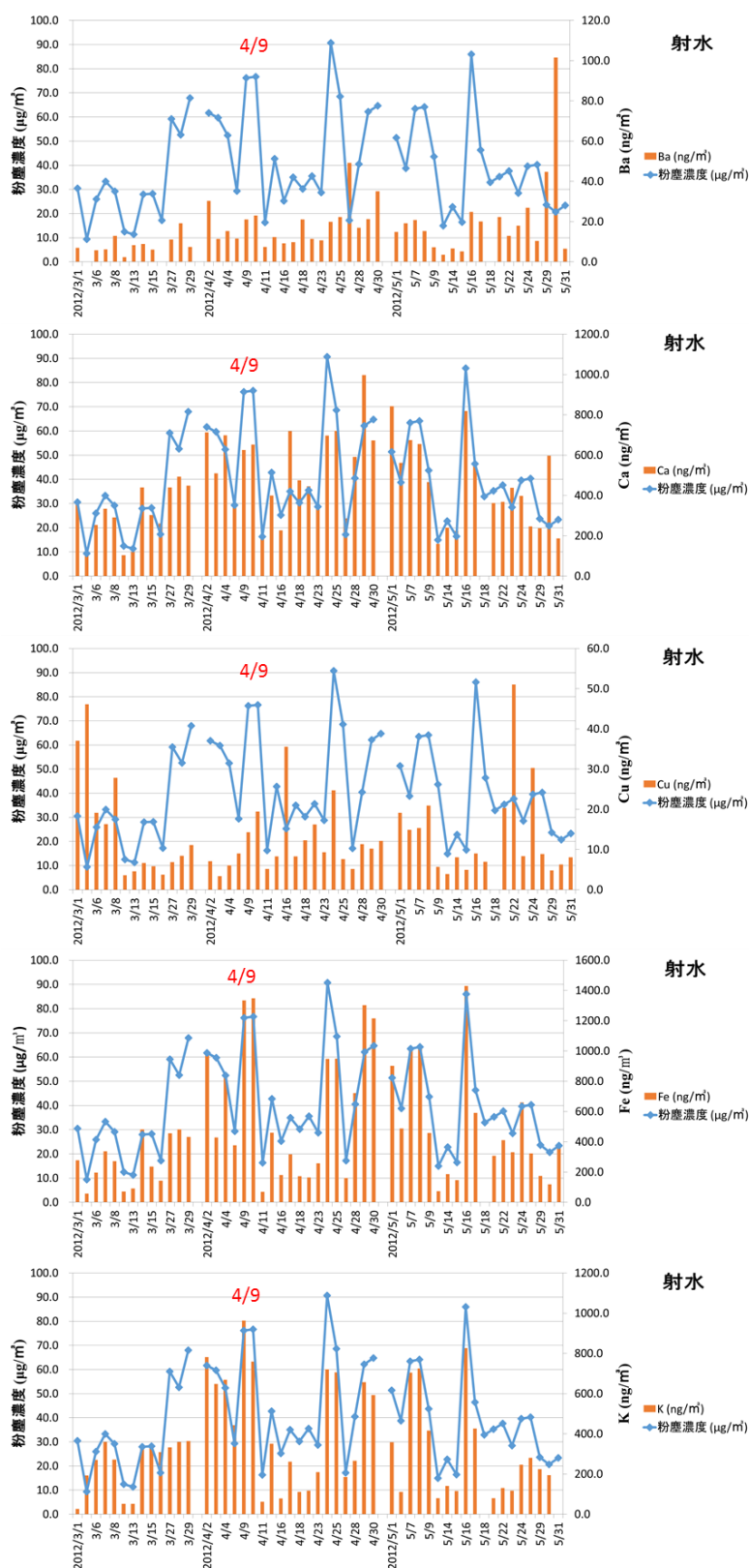
図(4)-4-1 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



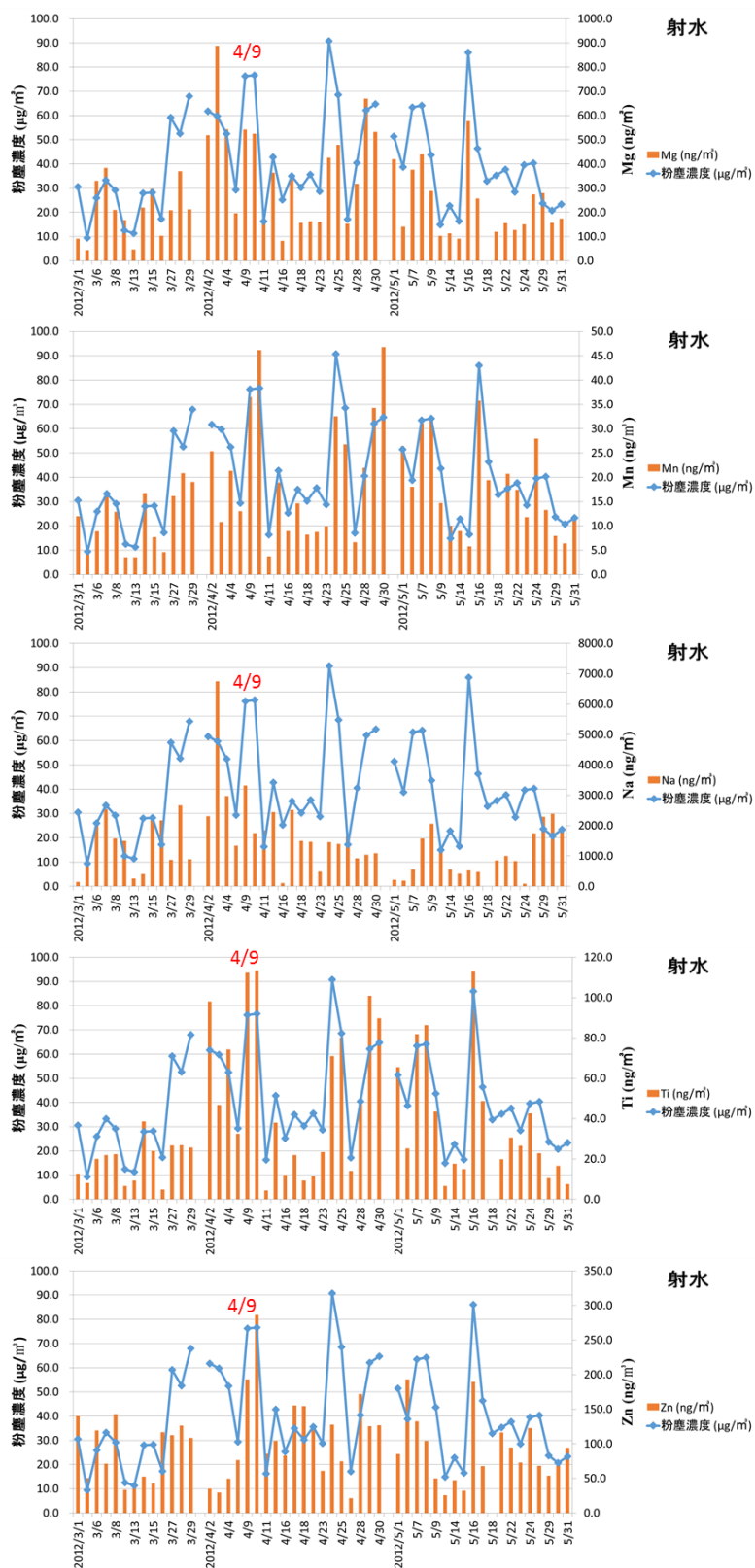
図(4)-4-2 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



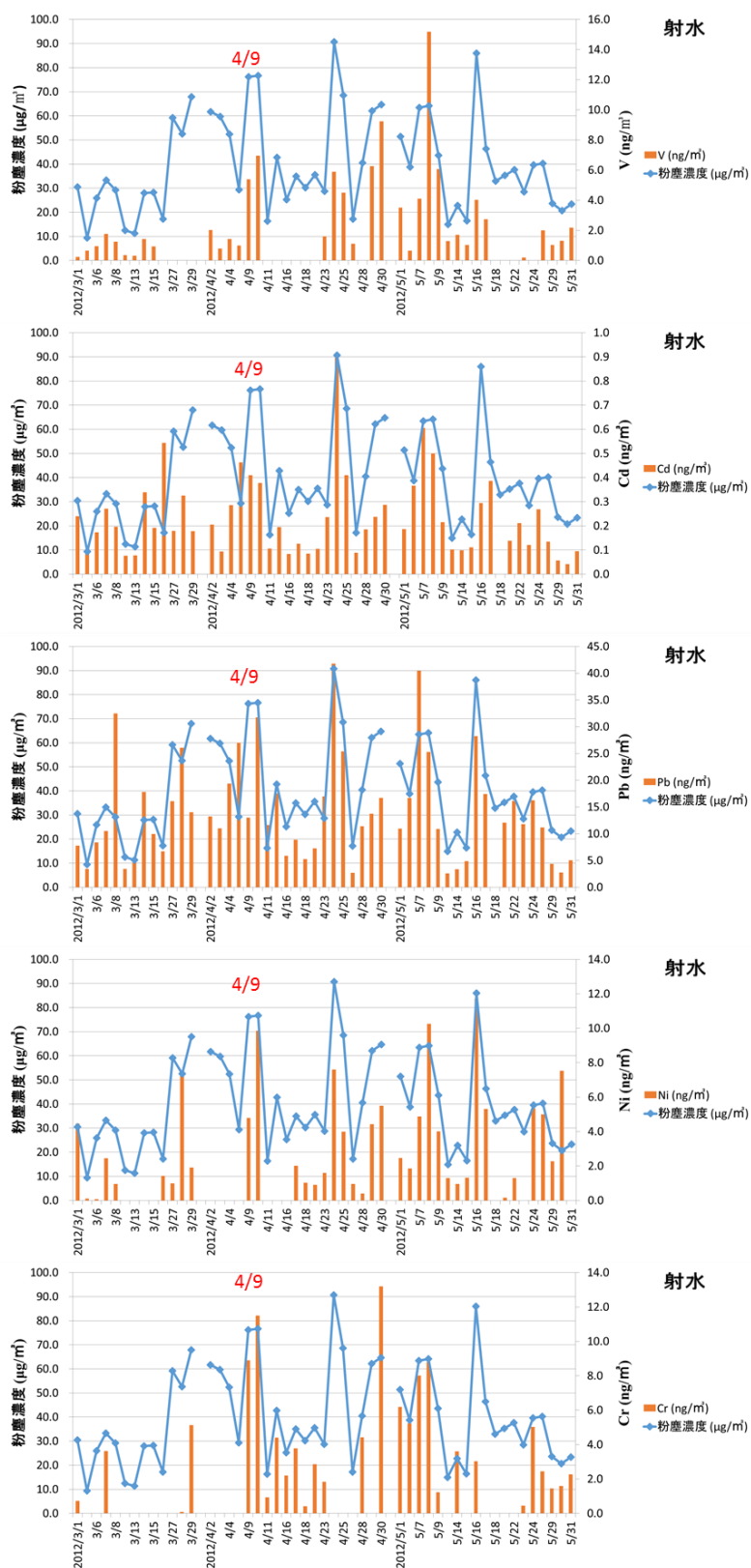
図(4)-4-3 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



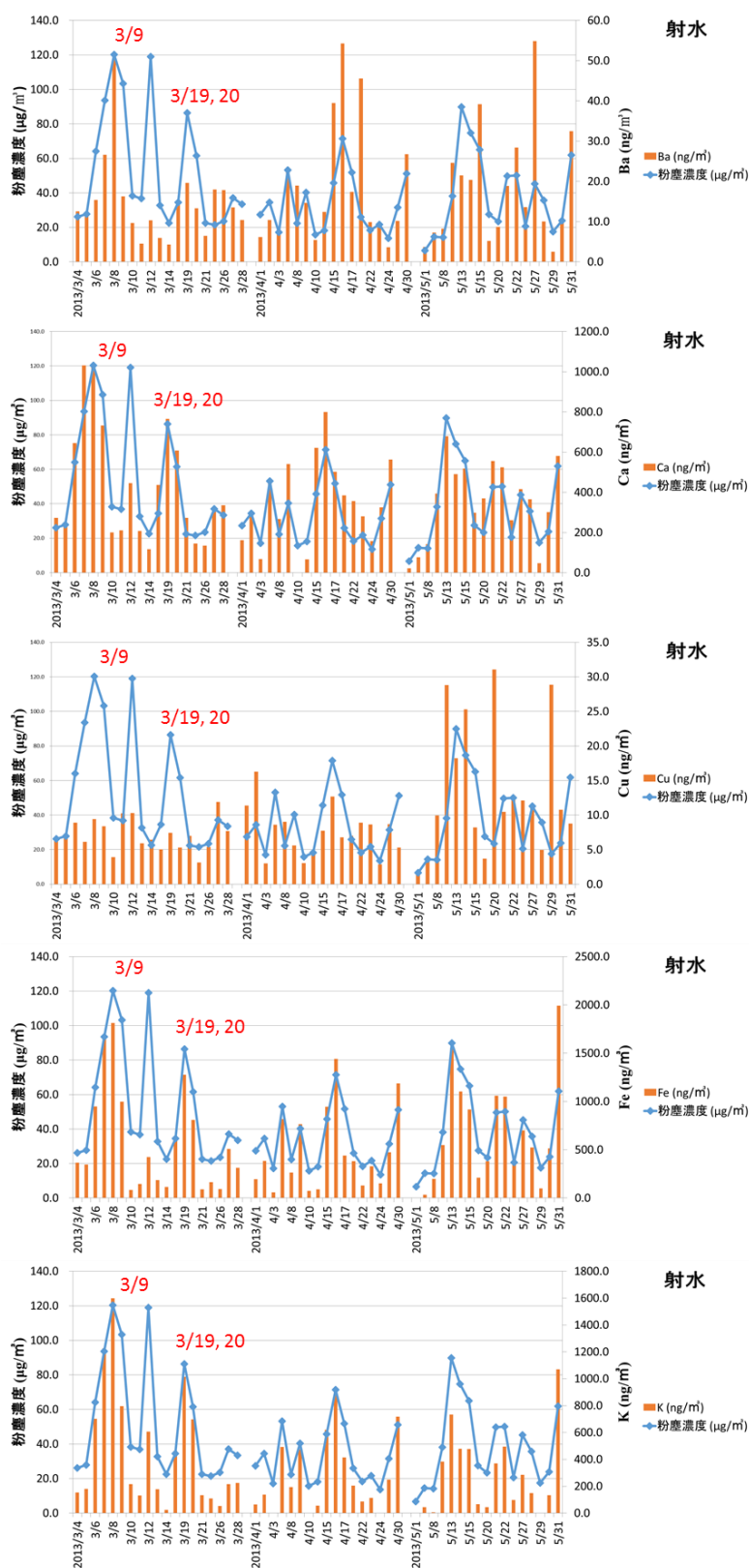
図(4)-5-1 富山県射水市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



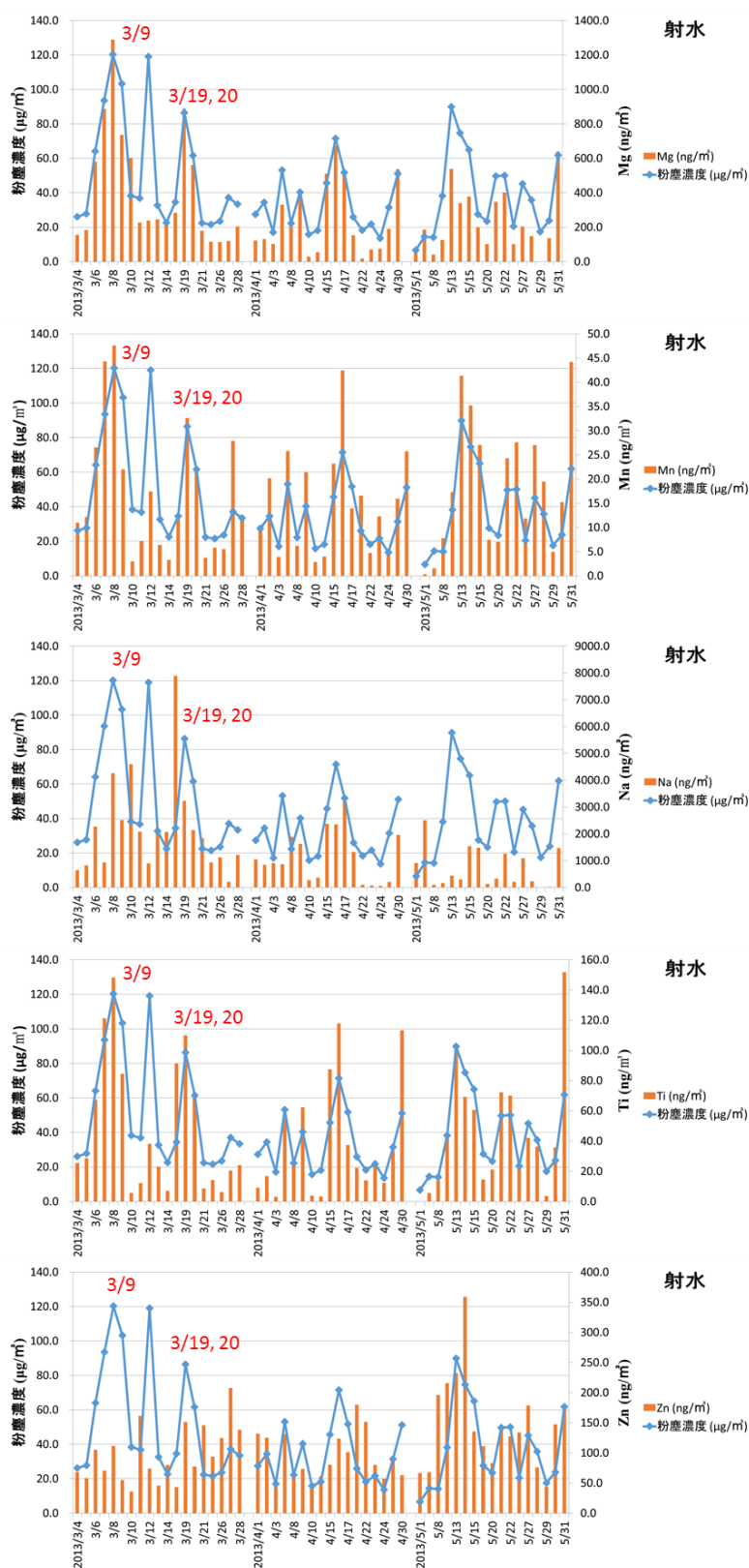
図(4)-5-2 富山県射水市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



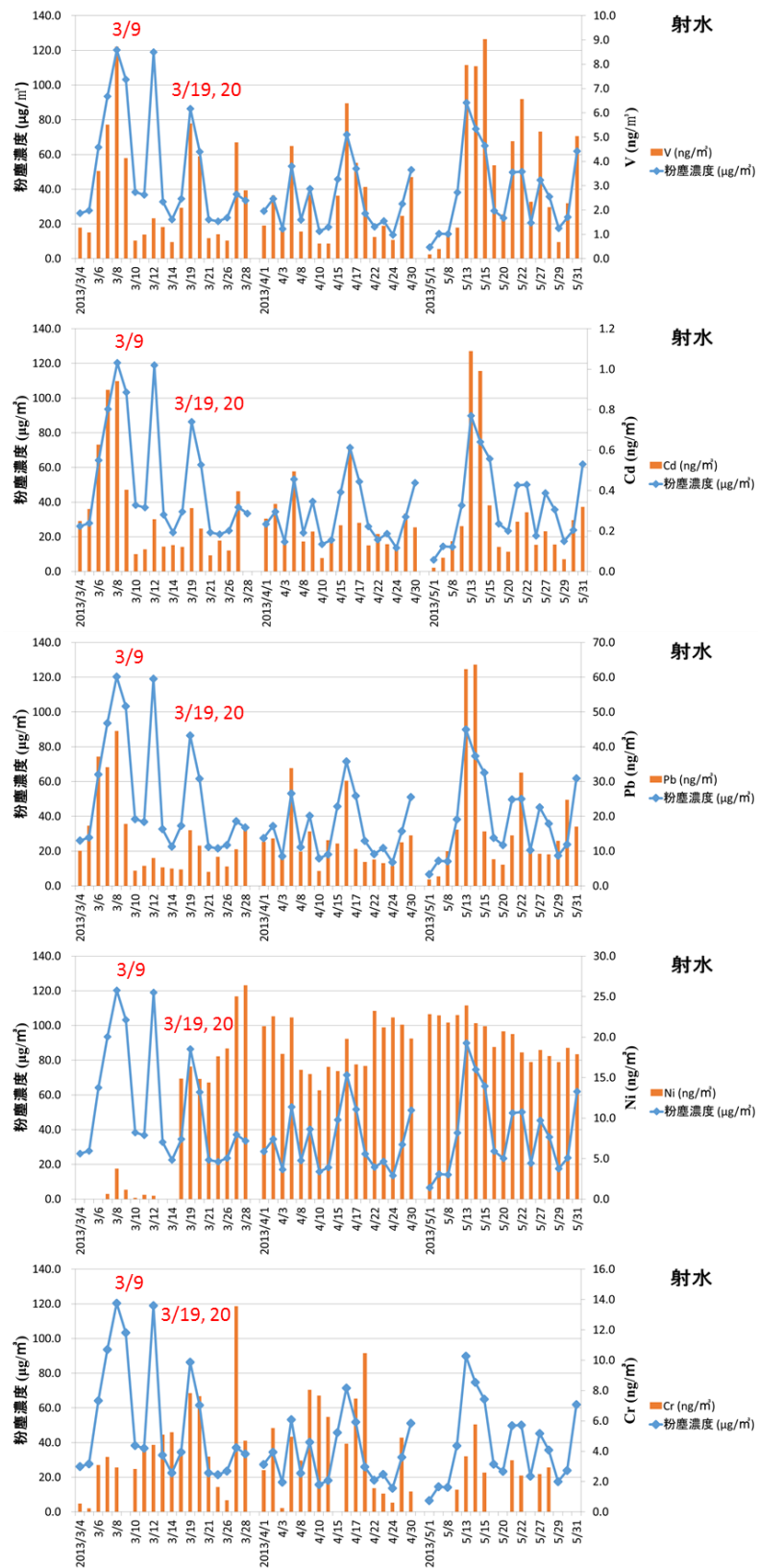
図(4)-5-3 富山県射水市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2012年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



図(4)-6-1 富山県射水市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



図(4)-6-2 富山県射水市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）



図(4)-6-3 富山県射水市の大気粉塵濃度及び大気分塵中の金属元素濃度（2013年3月～5月）
 グラフ中の日付は気象庁による黄砂観測日（気象庁ホームページ[地球環境のデータバンク]）

表(4)-4 福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町、富山県射水市の大气粉塵濃度と金属元素濃度の相関係数

福岡県太宰府市(2012年3月～5月)

金属元素	相関係数
Ba	0.13
Ca	0.79
Cu	0.13
Fe	0.83
K	0.80
Mg	0.70
Mn	0.84
Na	0.30
Ti	0.83
Zn	0.42
V	0.45
Cd	0.16
Pb	0.70
Ni	0.31
Cr	0.13

福岡県太宰府市(2013年3月～5月)

金属元素	相関係数
Ba	0.71
Ca	0.89
Cu	0.40
Fe	0.80
K	0.60
Mg	0.88
Mn	0.95
Na	0.09
Ti	0.90
Zn	0.64
V	0.79
Cd	0.78
Pb	0.82
Ni	0.15
Cr	0.27

鳥取県湯梨浜(2012年3月～5月)

金属元素	相関係数
Ba	0.28
Ca	0.90
Cu	0.41
Fe	0.91
K	0.95
Mg	0.81
Mn	0.93
Na	0.28
Ti	0.90
Zn	0.50
V	0.70
Cd	0.77
Pb	0.74
Ni	0.22
Cr	0.35

鳥取県湯梨浜町(2013年3月～5月)

金属元素	相関係数
Ba	0.67
Ca	0.93
Cu	0.43
Fe	0.96
K	0.95
Mg	0.86
Mn	0.97
Na	0.30
Ti	0.90
Zn	0.26
V	0.88
Cd	0.88
Pb	0.86
Ni	-0.35
Cr	-0.18

富山県射水市(2012年3月～5月)

金属元素	相関係数
Ba	-0.21
Ca	0.80
Cu	0.03
Fe	0.88
K	0.85
Mg	0.76
Mn	0.86
Na	0.15
Ti	0.86
Zn	0.50
V	0.58
Cd	0.60
Pb	0.70
Ni	0.63
Cr	0.46

富山県射水市(2013年3月～5月)

金属元素	相関係数
Ba	0.50
Ca	0.85
Cu	0.13
Fe	0.78
K	0.88
Mg	0.82
Mn	0.80
Na	0.29
Ti	0.77
Zn	0.20
V	0.74
Cd	0.73
Pb	0.61
Ni	-0.33
Cr	0.18

表(4)-5 福岡県太宰府市の大気粉塵中のイオン濃度(2012年3月～5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ng/m ³)							
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
2012/3/1	26.0	820.6	1297.6	3409.1	1535.1	642.5	48.0	93.6	378.4
2012/3/5	10.7	145.6	2599.2	1996.2	98.1	1397.9	41.3	10.1	56.5
2012/3/6	56.1	971.2	3751.6	17649.7	1787.0	4871.2	295.1	234.2	535.5
2012/3/7	80.2	635.0	10065.1	18624.4	1309.1	6701.8	590.8	223.3	802.4
2012/3/8	31.9	679.4	7209.1	20144.0	1489.4	6201.9	582.6	248.7	840.4
2012/3/12	24.9	1086.5	2811.6	2531.9	57.1	1361.9	128.1	135.4	273.4
2012/3/13	36.2	671.5	5857.4	3109.3	45.4	2280.8	147.2	102.3	540.7
2012/3/14	64.4	353.4	7082.2	12561.7	0.0	5008.2	339.5	134.4	1389.1
2012/3/15	75.3	788.7	10288.9	13134.7	62.2	5641.7	362.1	199.9	1282.7
2012/3/21	42.7	780.3	4808.0	3815.7	1278.3	1498.6	138.7	123.6	1057.4
2012/3/22	34.4	159.7	3879.2	4388.8	404.0	1976.1	93.4	56.5	387.5
2012/3/26	26.8	778.9	3158.0	4561.6	1244.6	1485.3	98.4	119.5	644.4
2012/3/27	38.7	472.1	5562.0	5370.7	1021.4	2476.4	76.6	85.2	572.3
2012/3/28	72.7	220.8	6618.8	10367.1	738.6	6911.1	265.6	166.1	1373.0
2012/3/29	90.6	384.6	4029.5	8012.9	432.9	4714.0	255.9	100.0	925.8
2012年3月平均	47.4	596.5	5267.9	8645.2	766.9	3544.6	230.9	135.5	737.3
2012年3月標準偏差	24.0	293.2	2630.7	6325.9	643.7	2227.3	178.1	67.8	407.5
2012/4/2	79.2	76.4	0.0	5217.7	310.4	307.7	67.6	74.3	495.8
2012/4/3	75.7	17539.0	1415.9	5489.0	4803.0	203.2	240.3	493.7	302.7
2012/4/4	52.5	790.0	2936.4	4506.5	813.7	296.4	137.1	116.7	389.3
2012/4/5	79.4	873.5	4890.8	8724.6	1198.9	688.8	237.2	171.8	631.5
2012/4/9	61.5	127.7	3679.8	13793.3	1187.0	3769.1	164.8	104.7	971.7
2012/4/10	49.7	50.0	1491.6	6753.0	716.2	2808.8	150.9	60.0	631.2
2012/4/11	40.1	48.6	2160.9	9571.3	1239.5	4755.8	65.7	101.1	362.3
2012/4/12	42.3	230.5	3485.8	5077.8	2040.8	958.3	161.0	211.9	405.7
2012/4/16	46.2	9.7	775.8	7515.6	249.2	3650.1	77.4	46.8	287.8
2012/4/17	53.4	216.6	3313.7	8786.6	2174.1	1736.4	142.1	109.1	608.9
2012/4/18	60.1	66.6	3455.8	8654.0	1429.7	2761.2	143.4	162.1	761.2
2012/4/19	59.0	11.1	3141.6	12013.9	274.3	4552.0	162.3	183.1	915.4
2012/4/23	90.9	42.7	2880.3	22782.1	442.9	7584.6	427.4	176.2	1170.0
2012/4/24	108.5	65.7	2535.1	17398.8	327.2	5555.7	347.3	246.6	2210.4
2012/4/25	40.4	73.5	765.4	4898.4	400.0	1710.6	156.5	99.7	516.7
2012/4/26	44.9	1559.1	2070.4	4037.1	2301.8	431.5	180.4	279.4	381.1
2012/4/27	51.8	64.1	3262.7	4439.0	886.4	1691.2	86.7	100.5	742.3
2012/4/28	55.7	42.3	1154.2	7604.0	401.8	3415.2	26.6	78.0	509.5
2012/4/29	50.5	31.4	698.4	8687.1	312.9	3400.1	98.9	42.6	525.6
2012/4/30	16.0	34.1	154.6	2278.3	80.3	902.5	0.0	7.5	109.5
2012年4月平均	57.9	1097.6	2213.5	8411.4	1079.5	2559.0	153.7	143.3	646.4
2012年4月標準偏差	20.6	3889.9	1349.9	4947.8	1107.4	2032.0	101.7	108.4	447.5
2012/5/1	18.0	17.7	191.9	1959.6	82.8	585.7	15.1	11.4	153.7
2012/5/2	29.0	2406.9	1362.1	2892.3	3120.7	237.6	75.3	196.0	294.7
2012/5/3	20.1	2595.2	602.4	3018.5	3081.1	36.9	59.6	158.8	163.4
2012/5/4	29.0	331.6	1706.0	3059.2	1881.7	259.7	81.8	111.2	244.4
2012/5/5	55.0	64.1	2561.7	5294.1	541.6	2621.2	197.6	148.4	792.4
2012/5/6	70.9	30.0	3694.5	8112.4	841.2	3387.7	173.8	90.7	655.6
2012/5/7	123.1	86.2	8373.8	27491.6	1748.5	8755.4	553.3	397.7	1679.2
2012/5/8	54.8	23.3	1482.8	13306.6	803.3	3318.5	202.7	147.3	628.1
2012/5/9	65.9	33.1	1946.1	16710.5	1077.3	5108.5	216.5	209.3	653.7
2012/5/10	46.9	451.1	2173.4	6126.7	1890.2	968.8	173.3	263.4	592.1
2012/5/14	36.3	17.7	614.9	6251.8	30.3	1091.3	62.6	18.7	76.6
2012/5/15	34.5	0.0	1621.7	4421.8	83.4	862.7	54.7	21.2	88.8
2012/5/16	91.5	17.3	3105.9	11712.5	252.4	1280.0	161.0	84.5	879.3
2012/5/17	76.6	258.6	3001.1	9296.2	591.7	875.3	177.0	113.7	622.5
2012/5/21	26.5	193.8	6725.3	5699.0	214.1	1911.7	82.2	52.1	279.3
2012/5/22	40.1	94.1	2396.4	4734.2	1681.2	964.1	79.5	98.2	505.6
2012/5/23	52.5	10.9	2428.4	4741.5	720.0	2529.2	108.7	86.2	650.8
2012/5/24	51.1	10.9	1578.0	7211.5	175.8	2866.6	166.5	52.8	504.7
2012/5/28	74.1	0.0	2766.9	17893.7	470.4	6853.5	259.7	73.9	754.4
2012/5/29	70.1	57.3	3723.9	14633.3	597.4	5219.6	232.5	174.2	919.7
2012/5/30	75.0	24.6	5339.2	14511.7	1123.7	5317.7	273.9	172.6	1107.1
2012/5/31	57.8	88.7	3761.2	8631.9	1601.4	2721.9	160.0	172.0	786.7
2012年5月平均	54.5	309.7	2779.9	8986.8	1027.7	2626.1	162.2	129.7	592.4
2012年5月標準偏差	25.5	719.5	1968.7	6280.7	905.8	2342.6	113.4	89.4	376.2

表(4)-6 福岡県太宰府市の大気粉塵中のイオン濃度(2013年3月～5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ng/ m^3)							
		Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
2013/3/4	133.5	1630.8	26781.6	15082.4	1629.8	9670.9	594.1	328.5	2617.6
2013/3/5	73.9	837.5	13089.3	7239.1	1547.6	4991.5	491.7	193.7	1315.2
2013/3/6	49.2	296.5	5639.5	4825.6	790.0	2584.3	223.4	103.4	720.1
2013/3/7	97.1	1030.4	7183.3	12540.7	2006.2	3840.7	505.0	318.2	2225.2
2013/3/8	128.8	1041.3	10698.0	14628.8	1882.0	4829.2	369.0	443.4	2517.6
2013/3/9	96.4	948.0	5536.4	14426.3	2301.1	3383.9	327.4	429.9	2173.8
2013/3/10	79.0	5030.3	6653.3	10946.9	5584.4	2979.0	511.1	672.7	1303.9
2013/3/11	45.8	1177.0	2908.3	3850.6	2011.6	978.4	259.6	210.8	872.5
2013/3/12	67.8	1039.8	2149.5	8741.6	2646.8	1566.5	241.3	305.5	1110.4
2013/3/13	23.6	2340.6	802.2	3740.0	2849.5	595.8	705.1	238.2	298.5
2013/3/14	25.7	2395.4	802.6	3209.2	2728.7	515.2	165.0	248.9	380.4
2013/3/18	27.2	372.4	1761.9	2172.9	1203.7	522.6	159.1	110.9	290.9
2013/3/19	169.2	555.5	10120.6	14811.7	1834.6	3499.1	525.4	549.6	3848.1
2013/3/20	55.0	1115.4	3465.7	8863.2	1991.8	2748.9	284.1	263.6	907.0
2013/3/21	34.1	486.7	3548.1	3132.3	1715.2	1006.0	163.0	188.6	513.2
2013/3/25	38.7	221.1	3561.2	6727.2	1110.1	2285.1	93.0	81.2	336.9
2013/3/26	26.7	67.2	1295.0	4040.3	243.0	1719.7	55.1	34.3	293.1
2013/3/27	29.2	56.0	3977.5	5962.7	49.4	4001.5	18.9	9.4	136.7
2013/3/28	45.0	72.8	4795.5	6864.0	241.9	3816.5	43.1	26.0	430.9
2013年3月平均	65.6	1090.2	6040.5	7989.8	1808.8	2922.9	301.8	250.4	1173.3
2013年3月標準偏差	42.2	1175.8	6081.7	4483.0	1230.5	2173.9	203.6	180.2	1034.7
2013/4/1	53.5	124.5	3066.9	13154.0	492.6	4793.1	80.1	43.0	504.4
2013/4/2	41.3	1242.6	3234.6	13361.7	1898.0	4355.4	61.1	150.0	223.8
2013/4/3	37.4	106.3	4526.7	6055.5	566.9	3172.9	68.9	50.6	295.0
2013/4/4	46.1	212.7	6544.3	6351.1	703.3	3138.8	104.2	55.4	435.8
2013/4/8	44.7	2315.4	5364.0	4847.3	2808.9	1612.3	251.7	377.9	789.3
2013/4/9	99.3	3196.6	3977.0	6928.5	2729.7	1804.8	346.5	386.3	2664.1
2013/4/10	39.8	2374.1	2792.1	5211.0	2169.9	1732.1	256.7	257.7	800.1
2013/4/11	52.5	944.0	4473.7	5688.3	1360.3	1681.8	343.4	240.3	1422.8
2013/4/15	54.4	813.1	4502.6	4394.1	1597.3	982.7	319.0	264.8	1381.1
2013/4/16	63.9	490.9	3220.0	13054.0	1532.7	2764.5	310.7	291.0	1716.5
2013/4/17	49.2	1839.8	5898.9	8909.2	2799.6	2865.1	245.5	320.0	727.5
2013/4/18	50.7	574.9	2799.3	10237.0	1401.7	2544.4	247.1	248.6	1128.4
2013/4/22	40.6	98.0	3038.0	4362.7	241.5	2245.3	119.7	33.6	516.5
2013/4/23	25.2	78.4	922.1	3388.0	244.5	1433.6	67.2	39.7	274.1
2013/4/24	32.4	355.4	4275.2	4394.4	980.0	2245.2	24.5	70.8	411.9
2013/4/25	63.8	517.7	4723.2	9917.4	1267.4	4906.8	135.6	215.6	756.1
2013/4/30	45.6	158.1	2696.9	3686.1	207.7	1404.6	78.4	58.5	653.4
2013年4月平均	49.4	908.4	3885.6	7290.6	1353.1	2569.6	180.0	182.6	864.7
2013年4月標準偏差	16.3	960.1	1372.3	3460.8	896.8	1193.1	113.4	126.5	633.5
2013/5/1	38.2	3453.4	1586.9	2076.3	3292.9	51.5	116.7	173.8	461.1
2013/5/7	39.8	2443.2	1974.3	2054.3	3266.5	60.7	181.3	129.1	748.7
2013/5/8	47.8	208.5	4486.2	3590.8	888.6	1283.6	127.5	64.2	811.3
2013/5/9	60.4	121.7	2682.5	10357.1	792.6	4530.6	136.1	90.5	371.6
2013/5/13	85.9	114.7	2384.7	21666.9	117.8	8994.2	93.9	103.1	1012.9
2013/5/14	71.3	92.4	2165.1	17123.4	253.1	6445.6	36.2	57.4	574.3
2013/5/15	49.0	71.4	1760.4	12860.9	956.0	4088.9	22.0	68.3	432.8
2013/5/16	62.7	264.5	3009.1	11285.3	1714.3	2842.2	112.8	129.7	763.9
2013/5/20	48.6	67.2	3272.1	6693.0	794.5	2424.7	18.1	77.7	532.5
2013/5/21	107.6	47.6	5477.7	26503.5	368.0	11933.5	52.1	141.7	1532.0
2013/5/22	104.2	40.6	3983.2	28919.3	123.1	10912.2	123.6	132.3	1852.9
2013/5/23	72.2	14.0	2757.6	15047.1	199.7	5976.9	122.3	88.8	1468.6
2013/5/27	38.3	659.1	604.1	1262.9	1118.5	67.7	153.7	52.2	353.9
2013/5/28	22.0	44.8	650.4	5093.1	206.5	2049.0	7.8	16.6	197.1
2013/5/29	67.9	70.0	728.4	29117.2	133.9	11373.8	8.6	33.9	574.9
2013/5/30	75.9	23.8	4948.7	13276.2	295.6	5987.0	74.9	116.3	669.4
2013年5月平均	62.0	483.5	2654.5	12933.0	907.6	4938.9	86.7	92.2	772.4
2013年5月標準偏差	24.0	992.0	1494.8	9555.2	1029.7	4095.8	55.9	43.0	470.1

表(4)-7 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵中のイオン濃度(2012年3月～5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ng/m ³)							
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
2012/3/1	17.1	1038.5	1136.2	2619.4	1092.4	854.7	41.8	64.7	119.9
2012/3/2	29.1	2603.7	1424.8	7493.0	3824.3	994.7	215.4	263.7	246.1
2012/3/5	8.2	520.8	615.5	420.6	429.2	136.0	48.4	27.7	8.4
2012/3/6	41.1	2633.5	3176.7	9778.6	2803.3	2495.4	252.4	334.4	297.5
2012/3/7	53.5	1454.3	5474.3	17223.1	2504.8	4756.2	508.7	329.8	364.8
2012/3/8	30.7	881.5	1515.7	11448.0	2191.0	2345.6	265.6	241.5	170.4
2012/3/9	39.0	3777.2	1062.7	8819.7	5102.7	1196.1	223.7	347.0	176.0
2012/3/12	17.9	2758.8	435.8	3507.1	174.8	1062.6	145.5	197.9	109.0
2012/3/13	16.1	788.4	1275.2	2532.0	70.6	911.6	75.3	80.3	104.8
2012/3/14	44.4	1703.0	4376.0	7999.4	157.5	2933.7	317.2	248.4	519.0
2012/3/15	23.7	1927.5	1610.1	4157.4	156.9	1326.3	200.6	197.4	188.6
2012/3/16	20.4	518.5	1044.3	3710.4	646.6	748.7	35.2	76.0	302.0
2012/3/21	25.9	466.9	1739.7	3472.7	729.9	1036.1	106.9	104.9	454.2
2012/3/22	22.3	826.8	2596.0	3656.9	1277.9	1165.0	87.4	107.5	331.7
2012/3/23	16.1	3327.4	689.2	1695.8	2749.8	306.5	84.8	151.6	417.6
2012/3/26	22.3	702.4	2377.6	4689.8	1034.6	1488.0	114.5	137.7	413.5
2012/3/27	57.4	2017.6	6284.5	7026.0	1891.2	3806.6	197.5	255.1	1185.3
2012/3/28	39.4	2265.0	4092.3	7822.0	2989.8	1885.1	253.9	234.3	484.9
2012/3/29	38.1	279.0	1954.6	6066.8	386.1	2022.0	144.0	67.6	398.1
2012/3/30	38.2	705.1	1613.8	5890.4	718.5	2239.8	141.4	103.2	573.7
2012年3月平均	30.1	1559.8	2224.7	6001.4	1546.6	1685.5	173.0	178.5	343.3
2012年3月標準偏差	13.3	1049.4	1644.8	3907.1	1407.0	1157.9	114.1	99.5	252.2
2012/4/2	66.9	1188.9	2395.6	5688.0	658.4	655.8	127.5	89.0	481.6
2012/4/3	34.3	6273.8	1084.9	3440.2	1989.8	375.8	151.3	176.0	177.1
2012/4/4	94.1	7216.8	3769.4	6770.0	2272.0	731.2	281.1	261.5	745.6
2012/4/5	48.8	5401.8	3642.3	5733.7	1947.8	802.4	228.4	202.6	318.8
2012/4/6	32.6	1951.4	1351.7	3069.3	1648.8	410.3	168.5	137.0	514.9
2012/4/9	65.2	1236.5	5105.6	14687.1	2759.7	4310.7	367.8	388.6	1061.9
2012/4/10	50.1	16.9	1162.2	10777.8	399.3	3534.5	234.7	113.7	651.4
2012/4/11	23.1	1186.0	1081.3	4575.9	1889.1	1187.7	152.5	168.9	197.2
2012/4/12	39.2	1275.4	3070.3	6923.1	2354.0	2130.7	272.3	292.9	470.2
2012/4/13	40.1	2097.0	2845.5	3286.2	2441.3	1173.8	252.3	292.1	435.4
2012/4/16	31.9	311.0	1964.9	4917.5	975.3	1747.8	161.6	133.6	304.5
2012/4/17	26.9	594.1	1382.1	5413.1	1591.0	1457.8	195.9	173.1	278.7
2012/4/18	27.5	628.5	1512.8	4434.6	1645.6	1238.9	174.9	164.9	202.8
2012/4/19	27.4	900.8	2409.1	4729.3	1896.8	1674.1	209.4	189.7	192.8
2012/4/20	24.9	12.7	411.9	5054.2	598.1	1683.6	117.8	67.3	133.4
2012/4/23	75.6	214.0	3309.4	20932.4	1670.8	6502.2	398.8	329.6	1189.9
2012/4/24	77.9	180.1	2337.5	14560.5	891.7	4555.2	268.6	261.3	1984.3
2012/4/25	57.9	154.1	1120.4	7502.3	444.4	2169.1	208.2	172.3	1343.0
2012/4/26	23.2	1684.5	1182.1	2942.9	2073.9	182.0	125.8	217.0	260.0
2012/4/27	23.1	392.8	985.7	2168.5	734.9	421.8	114.5	103.3	300.8
2012/4/28	41.8	231.4	1047.6	5613.7	294.2	1636.9	96.7	74.4	723.6
2012/4/29	52.8	122.9	1304.7	6109.1	309.4	1618.0	92.9	108.0	1223.4
2012/4/30	34.0	77.9	900.4	4014.5	257.1	919.7	56.3	76.1	750.9
2012年4月平均	44.3	1450.0	1972.9	6667.1	1380.1	1787.8	193.8	182.3	606.2
2012年4月標準偏差	20.2	2036.8	1177.2	4509.2	801.2	1555.7	86.2	87.7	472.0
2012/5/1	19.5	230.1	460.3	1457.8	436.6	196.9	87.1	32.6	85.9
2012/5/2	13.2	845.3	400.2	2024.4	1017.2	373.8	28.7	80.9	67.6
2012/5/3	21.7	5562.1	522.0	2850.8	5285.0	12.5	121.4	354.1	202.9
2012/5/4	40.5	6695.9	1707.6	3650.7	6993.7	39.2	318.0	504.6	293.3
2012/5/5	68.5	1152.3	3887.5	8724.1	3166.4	2064.2	296.9	385.0	738.7
2012/5/6	55.7	1414.2	2376.5	4985.4	1484.3	1231.3	198.9	208.5	745.2
2012/5/7	72.5	135.5	2385.5	17395.3	1170.2	4888.2	356.5	286.5	1063.1
2012/5/8	84.5	77.8	4604.0	19700.7	1112.4	6266.4	383.8	271.9	1108.2
2012/5/9	51.9	309.9	3507.3	10619.0	1233.6	3523.4	210.2	228.4	599.4
2012/5/10	16.8	2455.5	628.6	1895.4	2505.5	123.6	100.1	265.9	355.9
2012/5/11	19.5	5138.7	673.4	2321.3	4807.0	0.0	150.1	264.1	189.9
2012/5/14	28.6	60.9	350.9	4339.0	131.0	585.4	73.5	36.7	101.5
2012/5/15	27.8	68.8	615.6	3728.0	134.1	489.5	53.5	31.2	146.6
2012/5/16	95.0	134.6	3377.5	16249.9	329.3	1853.3	250.3	103.3	918.2
2012/5/17	48.5	666.8	1815.7	11899.5	520.8	1502.8	157.0	85.7	290.5
2012/5/18	26.5	141.4	885.1	6289.1	801.4	1193.3	87.0	135.7	337.9
2012/5/21	30.6	96.5	1391.4	6594.5	930.1	1490.9	66.2	96.2	201.0
2012/5/22	29.9	101.8	1858.3	6441.5	1026.0	1476.6	80.8	85.1	189.0
2012/5/23	26.5	21.0	387.4	6325.5	246.3	2067.8	42.4	131.8	313.2
2012/5/24	27.8	22.4	619.4	5021.3	18.0	1865.7	110.8	14.9	224.0
2012/5/25	20.4	25.0	239.9	4863.5	2.6	1827.5	90.0	26.0	309.9
2012/5/28	30.3	582.0	2309.4	13903.4	1325.0	4606.9	124.1	597.4	134.3
2012/5/29	25.5	1109.9	1684.5	5996.5	2209.7	1138.0	103.7	219.3	201.9
2012/5/30	22.1	1012.0	1902.1	5128.4	2344.8	347.0	107.7	133.8	335.8
2012/5/31	27.2	46.2	2151.7	4255.9	1016.2	1542.9	58.8	116.1	129.5
2012年5月平均	37.2	1124.3	1629.7	7066.4	1609.9	1628.3	146.3	187.8	371.3
2012年5月標準偏差	22.1	1870.1	1230.7	5075.3	1770.4	1626.4	101.1	152.2	306.5

表(4)-8 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵中のイオン濃度(2013年3月～5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ng/ m^3)							
		Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
2013/3/4	78.5	2790.2	13850.1	10554.5	3193.1	6015.5	583.9	356.0	1215.7
2013/3/5	40.1	616.8	2707.6	6125.8	1457.0	2089.9	253.8	172.6	425.3
2013/3/6	85.1	2188.5	5397.6	7145.7	4023.7	2184.2	460.4	352.8	1116.2
2013/3/7	110.8	758.6	4519.1	12122.5	1842.9	3268.3	353.6	284.7	2014.6
2013/3/8	182.2	4673.0	13178.8	19057.9	4386.7	4930.8	569.2	838.7	4208.6
2013/3/9	200.7	953.1	7018.8	18727.7	2421.1	3714.9	492.4	533.9	3544.6
2013/3/10	37.6	10738.0	1345.2	4700.3	6814.8	1167.2	230.0	680.1	635.2
2013/3/11	24.1	2866.0	759.6	2392.2	2563.1	611.1	178.4	236.6	209.5
2013/3/12	46.5	478.1	1345.0	5384.9	1238.7	1594.1	158.7	151.1	336.8
2013/3/13	37.5	8682.5	572.7	4061.2	6137.3	507.8	272.3	605.9	403.5
2013/3/14	20.0	2594.2	420.3	2805.7	2589.3	479.3	134.0	245.8	214.4
2013/3/18	32.8	1611.9	1541.9	3100.0	1792.7	760.5	132.4	232.6	499.4
2013/3/19	104.4	2381.4	6928.6	11458.4	3646.2	2896.6	415.7	563.1	1913.9
2013/3/20	55.4	3589.5	2060.9	6519.5	3483.5	1279.3	259.3	425.9	978.4
2013/3/21	21.9	1792.2	1081.1	2373.1	1906.5	653.1	128.9	171.8	264.1
2013/3/25	20.9	1600.8	1073.2	5336.4	1827.9	962.4	90.7	105.2	359.5
2013/3/26	22.7	526.5	1674.1	5351.2	926.4	1291.4	88.7	116.5	495.5
2013/3/27	13.4	33.0	860.7	3226.4	111.7	1151.4	28.6	10.6	69.8
2013/3/28	28.1	0.0	1873.5	10634.5	243.7	2946.5	42.7	44.1	224.2
2013年3月平均	61.2	2572.3	3589.9	7425.2	2663.5	2026.6	256.5	322.5	1006.8
2013年3月標準偏差	54.3	2824.7	4051.7	5078.2	1790.2	1572.1	175.4	229.9	1157.6
2013/4/1	43.8	1071.4	1675.3	3993.2	1925.8	677.8	175.2	142.3	218.4
2013/4/2	30.5	2694.8	1574.5	6634.5	2394.0	2184.4	139.9	166.5	138.2
2013/4/3	27.3	2076.9	1942.2	6672.9	2817.2	1095.0	203.8	228.2	166.9
2013/4/4	34.2	200.9	2113.9	6689.1	852.9	2108.6	139.2	82.3	278.6
2013/4/8	42.3	6638.0	3283.4	5203.5	5574.6	890.8	341.1	590.4	737.8
2013/4/9	76.4	7728.9	3828.3	6979.8	5304.7	1702.3	327.9	658.0	1421.6
2013/4/10	24.8	1475.6	2792.6	5925.5	1710.1	2012.5	178.5	219.4	448.3
2013/4/11	29.4	2714.3	2334.3	5514.1	2486.3	1530.0	279.8	298.4	595.6
2013/4/15	66.7	3799.5	2954.7	4148.5	3282.0	620.0	236.9	429.2	1355.6
2013/4/16	88.7	3054.9	5548.7	15004.3	3088.6	3491.3	428.6	521.8	2071.1
2013/4/17	34.9	3180.9	3022.6	6180.9	3134.0	1386.7	227.1	340.2	771.3
2013/4/18	32.4	2616.2	2018.0	6082.9	3020.9	1196.0	260.5	341.3	659.3
2013/4/22	23.8	117.1	664.7	4311.0	175.8	1501.8	223.7	27.3	170.2
2013/4/23	20.1	16.3	242.4	2495.5	294.3	574.4	102.2	26.5	146.6
2013/4/24	28.1	87.0	1920.4	5138.8	1095.7	1097.8	157.0	90.1	318.6
2013/4/25	32.9	316.1	2778.5	8753.5	1135.7	2790.5	158.4	109.0	306.7
2013/4/30	91.0	3502.5	2119.3	2857.8	2815.2	63.8	211.4	190.7	1882.2
2013年4月平均	42.8	2428.9	2400.8	6034.5	2418.1	1466.1	223.0	262.4	687.5
2013年4月標準偏差	23.0	2221.1	1208.1	2795.6	1516.9	863.4	84.4	193.8	622.7
2013/5/1	30.4	8922.3	1381.1	3521.6	7665.8	48.3	234.8	471.5	270.8
2013/5/2	12.2	935.3	760.0	1679.9	1709.8	5.0	86.5	108.3	173.1
2013/5/7	16.2	3217.1	544.8	2056.3	3208.4	105.5	116.2	240.9	150.9
2013/5/8	18.6	1329.3	836.3	1773.0	1976.5	51.1	210.4	145.0	175.0
2013/5/9	41.4	104.0	896.2	9674.4	832.5	2687.7	231.0	107.0	267.3
2013/5/13	75.7	251.9	2361.7	20826.3	779.1	6986.6	242.8	196.2	937.0
2013/5/14	58.5	18.9	561.2	13135.3	478.3	3703.6	223.3	88.6	667.8
2013/5/15	46.3	206.1	1018.8	14319.3	2502.3	2884.1	182.8	215.1	379.4
2013/5/16	21.9	1133.0	969.8	5717.6	2502.8	587.3	104.7	235.7	170.9
2013/5/20	33.8	67.3	1511.8	6567.7	682.0	1848.3	153.2	111.9	499.6
2013/5/21	58.5	58.2	1593.6	13894.3	847.4	3662.4	216.3	123.2	744.5
2013/5/22	49.2	68.6	2299.1	14046.1	810.9	4327.2	179.7	132.2	464.5
2013/5/23	21.5	79.1	444.0	4179.4	514.7	975.2	95.3	1261.0	233.0
2013/5/27	54.8	2375.3	1231.3	4226.0	2231.6	784.5	216.0	120.5	272.7
2013/5/28	13.8	810.9	386.8	1175.9	992.3	3.0	92.1	55.2	12.5
2013/5/29	41.6	657.8	2571.5	17658.8	673.4	5767.8	183.5	236.6	155.9
2013/5/30	47.2	59.5	1906.8	7251.8	475.5	1696.6	158.8	114.3	699.2
2013年5月平均	37.7	1193.8	1251.5	8335.5	1699.0	2125.0	172.2	233.1	369.1
2013年5月標準偏差	18.6	2187.0	696.1	6192.9	1761.0	2164.1	55.1	281.8	258.8

表(4)-9 富山県射水市の大気粉塵中のイオン濃度(2012年3月~5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ng/m ³)							
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
2012/3/1	30.5	406.5	8417.2	3540.5	288.5	3841.9	19.9	56.3	302.8
2012/3/5	9.4	323.8	1801.1	1176.7	246.9	789.4	32.2	21.0	24.1
2012/3/6	26.0	2267.0	1757.7	5347.5	2050.6	1227.3	148.0	237.0	265.3
2012/3/7	33.3	2273.4	3654.3	7737.9	2299.1	2236.2	220.9	271.8	255.4
2012/3/8	29.2	986.9	3011.6	6881.0	1281.0	2184.0	160.4	149.3	218.7
2012/3/12	12.5	1691.3	489.1	2754.4	102.2	783.2	114.5	125.1	58.3
2012/3/13	11.3	151.9	698.5	2411.2	0.0	986.3	53.0	18.0	32.1
2012/3/14	28.0	527.5	2431.8	4799.1	24.0	1989.7	174.9	94.2	336.6
2012/3/15	28.2	2448.6	1137.0	2919.3	153.0	848.9	211.4	208.6	226.3
2012/3/26	17.2	234.1	693.1	4411.6	825.3	1094.4	59.3	58.3	198.7
2012/3/27	59.2	399.2	3959.3	5119.5	513.9	3104.4	256.6	104.0	437.6
2012/3/28	52.6	1148.0	4136.7	6535.4	1946.5	3085.3	227.5	213.8	597.4
2012/3/29	67.9	70.2	1263.4	4571.3	479.2	1406.7	136.8	43.7	215.2
2012年3月平均	31.2	994.5	2573.1	4477.3	785.4	1813.7	139.6	123.2	243.7
2012年3月標準偏差	18.4	884.5	2166.6	1901.0	829.4	1020.5	79.3	86.1	159.8
2012/4/2	61.7	858.8	2493.1	4643.0	663.9	422.4	111.9	90.1	370.0
2012/4/3	59.7	12561.9	1183.8	3870.9	3310.2	239.5	211.1	331.5	243.5
2012/4/4	52.4	2350.9	2444.7	4347.3	982.5	482.3	174.3	127.5	365.6
2012/4/5	29.3	908.3	2552.0	5177.0	348.1	946.2	97.1	57.1	172.7
2012/4/9	76.2	2153.4	6700.4	10035.4	2793.8	4653.4	254.3	194.2	1144.9
2012/4/10	76.7	231.2	3467.0	9579.5	993.2	4131.4	209.2	189.9	1180.1
2012/4/11	16.3	1247.3	1006.1	2907.2	1638.1	762.4	70.3	91.0	175.3
2012/4/12	42.8	1238.4	3353.0	6145.7	2134.8	1988.7	196.0	172.3	450.2
2012/4/16	25.3	190.9	1186.7	3738.1	306.4	1687.9	101.1	38.3	214.4
2012/4/17	35.0	1286.1	2991.8	5365.2	2070.2	2054.6	211.7	157.9	409.9
2012/4/18	30.2	585.9	4255.6	5207.2	1217.1	2840.0	101.1	80.1	295.9
2012/4/19	35.6	395.0	3483.5	5533.0	1044.5	2685.8	107.5	105.0	283.4
2012/4/23	28.7	128.3	1824.1	7479.0	673.6	2453.7	110.7	87.8	431.8
2012/4/24	90.7	264.6	7114.9	26276.9	836.3	8252.0	260.5	212.2	1207.0
2012/4/25	68.6	48.4	1784.8	21850.8	972.9	5366.5	236.4	233.5	1331.8
2012/4/26	17.2	473.2	1463.6	2111.3	1259.8	548.6	66.7	93.6	230.9
2012/4/28	40.5	219.2	2855.1	3518.3	634.2	1176.9	80.4	78.8	937.8
2012/4/29	62.1	195.7	3368.3	4421.8	398.9	1615.6	104.1	116.9	1593.3
2012/4/30	64.7	200.5	4097.4	6344.3	256.3	2754.4	128.4	135.2	1541.0
2012年4月平均	48.1	1344.1	3032.9	7292.2	1186.0	2371.7	157.5	136.5	662.1
2012年4月標準偏差	21.9	2798.6	1677.7	6287.5	851.7	2039.8	67.9	72.1	506.2
2012/5/1	51.4	143.4	3320.3	6358.2	359.8	2429.6	88.3	73.3	1178.0
2012/5/2	38.8	507.9	3645.9	3509.4	344.7	2270.0	88.0	65.6	408.2
2012/5/7	63.4	117.3	2727.8	10066.7	307.2	3634.3	273.3	147.5	840.0
2012/5/8	64.2	470.2	5158.5	8656.8	800.7	3437.9	283.5	216.2	945.3
2012/5/9	43.7	538.9	3600.6	6796.6	1228.6	2430.6	185.5	193.0	507.4
2012/5/10	14.9	69.9	254.1	4620.1	706.9	627.1	58.1	72.5	87.5
2012/5/14	22.8	129.6	1563.6	2322.7	231.8	362.7	41.1	30.6	100.5
2012/5/15	16.5	45.5	893.9	3360.6	109.2	548.4	46.9	19.4	87.9
2012/5/16	86.0	263.3	4471.5	10057.2	97.9	1483.5	140.8	86.4	639.1
2012/5/17	46.4	166.2	1899.2	10907.4	136.3	1545.0	153.4	49.0	297.7
2012/5/21	35.3	97.2	2780.6	4827.1	535.4	2347.9	104.8	81.0	342.9
2012/5/22	37.7	88.9	2088.0	6740.8	549.6	3123.5	114.3	88.7	462.8
2012/5/23	28.5	37.2	1204.3	4500.0	454.1	1812.6	73.0	59.6	481.2
2012/5/24	39.6	51.6	1142.1	5878.8	136.6	2575.8	148.3	72.1	677.3
2012/5/28	40.3	806.6	2341.4	12104.5	1870.9	3717.4	127.4	128.4	287.7
2012/5/29	23.7	927.8	2051.1	5179.5	2378.4	1007.0	47.1	166.0	151.6
2012/5/30	20.7	278.4	1719.4	4639.3	634.6	1722.1	54.3	111.2	189.3
2012/5/31	23.4	579.5	2684.1	5717.8	1687.8	1763.4	48.3	146.8	124.1
2012年5月平均	38.7	295.5	2419.3	6458.0	698.4	2046.6	115.4	100.4	433.8
2012年5月標準偏差	18.7	276.4	1273.9	2805.3	665.5	1032.1	73.2	55.1	318.6

表(4)-10 富山県射水市の大気粉塵中のイオン濃度(2013年3月～5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ng/m ³)							
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
2013/3/4	26.2	617.2	2295.0	3826.0	979.0	1463.0	98.8	88.8	458.9
2013/3/5	27.8	744.5	1875.1	1875.1	1318.7	1448.9	186.6	113.4	426.9
2013/3/6	64.1	2683.2	7687.6	7687.6	3400.4	3220.9	435.9	336.3	1226.0
2013/3/7	93.6	548.2	4813.6	4813.6	1132.2	3002.3	453.4	256.0	2065.7
2013/3/8	120.3	3720.0	7340.6	12686.2	3779.1	3737.6	460.5	599.2	1909.7
2013/3/9	103.3	1210.5	1758.7	4669.1	1980.8	759.5	263.3	260.3	974.1
2013/3/10	38.3	7032.5	704.5	3177.4	5006.4	540.0	264.9	439.0	456.3
2013/3/11	36.8	1991.6	1007.9	2350.0	1803.8	773.0	167.7	190.2	230.3
2013/3/12	119.0	420.9	736.6	2375.0	685.8	804.5	223.4	95.7	238.8
2013/3/13	32.7	1553.8	613.8	3759.6	1719.3	1028.0	212.9	160.6	303.0
2013/3/14	22.6	2131.2	748.6	3254.9	1951.0	993.0	156.1	172.2	286.0
2013/3/18	34.5	255.0	930.2	2394.2	709.8	320.1	122.7	153.3	504.5
2013/3/19	86.4	2403.7	7586.6	9540.0	3096.7	2936.2	316.1	482.3	1636.5
2013/3/20	61.6	1969.2	1674.1	5366.0	2075.7	1112.1	293.8	288.4	1048.9
2013/3/21	22.5	1725.3	983.0	2651.1	1674.3	889.4	144.9	153.0	257.8
2013/3/25	21.5	627.2	1738.4	4420.5	1070.4	1183.8	114.6	297.6	544.0
2013/3/26	23.5	1626.9	2637.5	2821.4	1271.7	1174.9	109.0	90.3	171.3
2013/3/27	37.1	336.2	2895.0	3725.0	534.1	1318.9	157.6	92.1	346.5
2013/3/28	33.5	1057.4	3318.1	5993.2	1260.4	1941.6	165.6	114.6	397.7
2013年3月平均	52.9	1718.7	2702.4	4599.3	1865.8	1507.8	228.8	230.7	709.6
2013年3月標準偏差	34.4	1583.6	2401.7	2759.9	1178.5	988.9	116.5	147.1	595.6
2013/4/1	27.4	818.2	3536.7	4749.8	1126.2	1799.4	98.2	96.0	239.2
2013/4/2	34.5	702.9	5611.5	4821.9	805.5	2729.2	83.1	117.1	554.5
2013/4/3	17.1	670.8	1780.9	4469.5	1096.7	1232.6	63.7	64.8	142.2
2013/4/4	53.2	641.5	8164.0	11671.7	595.4	4914.3	115.7	139.1	368.9
2013/4/8	22.3	1272.2	1087.8	2847.4	1720.1	344.0	139.2	200.7	417.0
2013/4/9	40.3	598.9	2743.8	6199.9	1330.9	1449.3	211.6	230.1	827.5
2013/4/10	15.8	151.8	1075.5	3749.2	595.1	1127.0	97.9	64.5	229.9
2013/4/11	18.2	262.8	1071.4	4689.3	622.9	1447.9	134.3	82.9	251.1
2013/4/15	45.7	2141.9	2665.3	3440.9	1927.0	714.1	283.3	264.7	1037.3
2013/4/16	71.5	833.3	4555.1	10000.9	1847.5	2077.3	316.3	349.9	1682.8
2013/4/17	51.8	3100.9	5089.0	8765.0	3412.9	2263.4	268.0	394.8	963.4
2013/4/18	26.0	554.3	1479.3	5150.6	1049.1	1308.1	215.5	158.2	484.2
2013/4/22	18.3	27.9	979.5	3540.6	153.5	1348.4	108.8	22.8	129.8
2013/4/23	21.7	33.7	628.7	2343.3	187.8	898.6	98.2	18.4	159.9
2013/4/24	13.6	51.6	1156.4	2040.1	239.6	527.4	68.9	34.0	247.8
2013/4/25	31.5	157.9	3060.0	5994.0	519.8	2151.1	93.1	60.2	360.5
2013/4/30	51.2	1961.3	2352.5	3660.1	2050.1	325.0	155.5	144.0	598.5
2013年4月平均	32.9	822.5	2766.9	5184.4	1134.1	1568.1	150.1	143.7	511.4
2013年4月標準偏差	16.7	854.2	2064.8	2674.1	849.5	1102.2	79.3	111.7	411.7
2013/5/1	6.6	1303.7	398.4	769.2	1114.8	0.0	65.0	89.7	83.7
2013/5/7	14.5	2911.8	889.0	1947.1	2395.2	81.0	50.2	110.8	85.0
2013/5/8	14.1	427.4	751.3	1022.5	519.0	108.6	47.5	79.1	86.4
2013/5/9	38.2	162.9	1032.8	3073.3	142.4	992.7	156.8	46.3	310.3
2013/5/13	89.9	347.0	6778.4	19776.6	507.0	8402.3	245.9	227.1	1346.7
2013/5/14	74.7	172.2	4596.9	23748.7	436.7	8462.8	238.3	178.8	799.4
2013/5/15	65.0	255.2	2731.8	15015.7	1192.6	4717.9	180.2	135.7	948.1
2013/5/16	27.6	661.9	1475.3	8999.4	1503.8	1953.5	84.5	125.1	403.1
2013/5/20	23.4	16.0	814.7	2336.6	270.4	632.8	80.2	52.1	256.7
2013/5/21	49.7	40.0	2396.8	9458.1	247.2	3153.4	124.5	66.2	827.1
2013/5/22	50.1	212.4	3205.6	11651.2	958.2	3594.2	197.1	128.1	904.2
2013/5/23	20.6	50.3	848.8	4069.7	311.2	1115.7	110.0	54.5	99.0
2013/5/27	45.2	23.1	1877.2	7238.7	697.1	2831.4	149.4	68.5	386.5
2013/5/28	35.7	120.7	287.3	3731.6	317.6	856.8	94.8	32.1	314.3
2013/5/29	17.5	24.3	309.6	1520.1	126.9	455.6	95.2	2.0	105.0
2013/5/30	23.9	46.0	1881.4	3753.5	108.4	1560.3	117.9	19.3	146.7
2013/5/31	61.9	318.8	3430.3	6099.9	623.3	1708.3	172.8	113.3	844.6
2013年5月平均	38.7	417.3	1982.7	7306.6	674.8	2389.8	130.0	89.9	467.5
2013年5月標準偏差	23.7	718.0	1747.9	6782.5	602.7	2634.2	61.3	58.2	394.4

表(4)-11 福岡県太宰府市、鳥取県湯梨浜町、富山県射水市の大气粉塵濃度とイオン濃度の相関係数

福岡県太宰府市(2012年3月～5月)

イオン	相関係数
Cl ⁻	0.06
NO ₃ ⁻	0.36
SO ₄ ²⁻	0.72
Na ⁺	-0.02
NH ₄ ⁺	0.60
K ⁺	0.64
Mg ²⁺	0.47
Ca ²⁺	0.76

福岡県太宰府市(2013年3月～5月)

イオン	相関係数
Cl ⁻	0.05
NO ₃ ⁻	0.63
SO ₄ ²⁻	0.65
Na ⁺	0.09
NH ₄ ⁺	0.58
K ⁺	0.46
Mg ²⁺	0.57
Ca ²⁺	0.90

鳥取県湯梨浜(2012年3月～5月)

イオン	相関係数
Cl ⁻	0.05
NO ₃ ⁻	0.66
SO ₄ ²⁻	0.75
Na ⁺	0.02
NH ₄ ⁺	0.61
K ⁺	0.69
Mg ²⁺	0.34
Ca ²⁺	0.78

鳥取県湯梨浜町(2013年3月～5月)

イオン	相関係数
Cl ⁻	0.12
NO ₃ ⁻	0.75
SO ₄ ²⁻	0.67
Na ⁺	0.23
NH ₄ ⁺	0.53
K ⁺	0.80
Mg ²⁺	0.41
Ca ²⁺	0.95

富山県射水市(2012年3月～5月)

イオン	相関係数
Cl ⁻	0.10
NO ₃ ⁻	0.56
SO ₄ ²⁻	0.64
Na ⁺	0.10
NH ₄ ⁺	0.59
K ⁺	0.68
Mg ²⁺	0.41
Ca ²⁺	0.75

富山県射水市(2013年3月～5月)

イオン	相関係数
Cl ⁻	0.18
NO ₃ ⁻	0.59
SO ₄ ²⁻	0.55
Na ⁺	0.32
NH ₄ ⁺	0.52
K ⁺	0.77
Mg ²⁺	0.59
Ca ²⁺	0.78

表(4)-12 福岡県太宰府市の大気粉塵中のPAHs濃度(2013年3月～5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(pg/m ³)										Total PAHs
		FL	PY	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	DahA	BghiP	IcdP	
2013/3/4	133.5	1054.7	896.3	156.4	730.6	993.1	33.8	273.6	34.9	581.8	459.0	5214.0
2013/3/5	73.9	360.4	298.9	76.2	263.7	357.6	112.2	114.2	13.7	197.9	165.2	1960.2
2013/3/6	49.2	163.4	154.3	32.7	127.3	174.3	55.3	54.9	8.4	149.6	101.7	1021.8
2013/3/7	97.1	165.4	188.7	30.8	134.0	182.5	54.6	51.9	7.5	137.8	92.4	1045.5
2013/3/8	128.8	362.1	342.2	53.8	266.2	362.8	97.3	104.1	15.3	247.5	197.1	2048.4
2013/3/9	96.4	125.0	129.0	22.6	94.6	139.2	43.8	45.6	7.0	126.2	86.1	819.1
2013/3/10	79.0	167.4	201.4	98.7	249.3	396.8	137.9	178.6	24.8	333.9	275.2	2064.0
2013/3/11	45.8	512.8	441.6	79.7	384.7	510.7	133.1	173.1	19.5	419.0	335.8	3010.1
2013/3/12	67.8	75.8	58.5	8.6	48.3	81.3	25.8	27.8	3.1	73.1	56.6	458.7
2013/3/13	23.6	93.4	64.3	13.9	46.6	75.6	25.9	31.1	2.8	61.2	49.5	464.3
2013/3/14	25.7	87.6	94.9	67.1	132.6	359.0	84.5	122.7	20.3	285.5	172.0	1426.2
2013/3/18	27.2	29.8	23.2	10.8	31.4	39.4	11.4	11.5	0.0	38.7	19.0	215.3
2013/3/19	169.2	342.7	329.3	33.6	248.9	414.4	90.9	118.4	12.7	320.1	211.3	2122.4
2013/3/20	55.0	127.5	97.0	20.0	96.1	147.9	41.9	47.6	6.4	118.3	93.0	795.6
2013/3/21	34.1	86.6	66.5	21.7	68.5	102.6	29.5	35.0	4.3	93.7	63.0	571.3
2013/3/25	38.7	147.1	118.1	49.4	109.6	171.8	59.2	86.3	9.1	129.5	96.5	976.5
2013/3/26	26.7	149.0	117.3	29.4	86.7	146.8	50.6	69.3	7.1	127.3	96.5	880.1
2013/3/27	29.2	184.0	148.1	42.0	153.5	289.8	71.0	83.9	13.4	166.7	126.1	1278.4
2013/3/28	45.0	129.2	93.6	18.8	79.8	105.5	30.7	32.2	3.1	82.0	50.3	625.1
2013年3月平均	65.6	229.7	203.3	45.6	176.4	265.8	62.6	87.5	11.2	194.2	144.5	1420.9
2013年3月標準偏差	42.2	234.6	201.9	37.0	164.0	223.3	37.3	65.8	8.8	139.8	111.7	1171.8
2013/4/1	53.5	244.7	206.0	29.6	156.5	158.5	62.9	81.4	9.3	151.8	170.7	1271.5
2013/4/2	41.3	75.5	66.8	14.6	61.8	80.8	22.9	25.7	3.0	51.6	118.0	520.7
2013/4/3	37.4	82.6	83.5	17.3	79.3	119.8	34.4	42.6	5.4	89.3	80.8	635.1
2013/4/4	46.1	652.1	645.1	80.1	457.1	473.5	118.6	221.1	23.0	292.1	610.2	3572.9
2013/4/8	44.7	170.8	145.7	25.2	119.0	150.4	53.5	68.7	8.6	146.7	133.1	1021.7
2013/4/9	99.3	348.6	294.3	41.9	167.5	218.6	61.2	84.1	9.8	152.6	254.3	1632.9
2013/4/10	39.8	92.2	80.0	19.7	72.0	193.2	31.8	37.7	4.8	80.9	198.8	811.1
2013/4/11	52.5	400.4	332.8	35.5	154.1	273.5	61.7	72.1	8.0	135.3	385.7	1859.0
2013/4/15	54.4	98.6	91.0	21.5	78.9	121.4	36.8	50.4	6.1	95.7	287.6	888.0
2013/4/16	63.9	89.9	87.8	20.4	80.0	116.3	36.0	48.5	6.8	92.0	349.9	927.6
2013/4/17	49.2	43.0	46.1	11.2	42.7	59.8	20.9	24.9	3.7	42.4	64.8	359.6
2013/4/18	50.7	110.2	105.7	35.4	79.1	113.7	39.1	56.1	6.5	77.5	137.1	760.4
2013/4/22	40.6	666.4	620.4	56.3	433.2	500.7	85.0	127.7	16.0	349.4	873.1	3728.2
2013/4/23	25.2	70.4	76.4	20.5	56.9	139.4	43.4	57.5	7.9	132.7	419.0	1024.0
2013/4/24	32.4	22.2	26.8	7.1	33.3	49.6	14.5	14.8	2.2	36.5	37.8	244.8
2013/4/25	63.8	144.7	116.9	21.5	89.9	119.5	37.1	45.0	4.6	81.5	100.8	761.7
2013/4/30	45.6	102.7	120.0	42.9	116.7	270.7	58.4	90.3	11.3	190.0	403.7	1406.8
2013年4月平均	49.4	200.9	185.0	29.5	134.0	185.8	48.1	67.6	8.1	129.3	272.1	1260.4
2013年4月標準偏差	16.3	200.6	187.4	18.2	123.5	130.0	25.6	48.4	5.1	84.3	220.0	993.7
2013/5/1	38.2	29.0	78.8	52.2	99.2	291.1	76.8	103.7	22.0	221.6	301.3	1275.8
2013/5/7	39.8	72.1	116.1	51.0	114.5	173.8	66.4	102.6	10.7	134.8	264.6	1106.5
2013/5/8	47.8	917.3	856.4	54.2	588.1	630.1	126.3	353.0	23.0	443.2	684.4	4676.1
2013/5/9	60.4	61.8	59.8	7.6	49.7	82.7	24.6	34.1	5.1	78.0	143.5	547.0
2013/5/13	85.9	359.8	305.7	25.5	162.6	267.1	63.9	91.8	10.0	160.2	278.2	1724.8
2013/5/14	71.3	86.0	82.6	14.2	67.6	87.2	29.9	38.8	4.7	69.2	117.3	597.6
2013/5/15	49.0	75.2	76.4	25.9	77.9	92.5	32.8	51.9	6.9	66.7	164.1	670.3
2013/5/16	62.7	168.5	216.5	89.0	204.2	389.6	108.8	254.1	34.0	330.6	283.3	2078.6
2013/5/20	48.6	30.6	39.0	6.0	26.4	35.6	11.2	13.8	0.0	26.2	38.8	227.6
2013/5/21	107.6	79.5	76.7	14.2	64.0	64.0	27.4	34.9	4.4	65.1	110.3	540.4
2013/5/22	104.2	102.8	107.3	19.3	92.3	120.7	37.1	45.1	5.1	88.9	115.3	733.9
2013/5/23	72.2	88.2	83.4	11.8	67.9	85.5	26.9	30.5	2.8	53.3	108.0	558.2
2013/5/27	38.3	19.9	32.8	2.2	7.0	17.6	7.4	10.2	2.2	41.7	72.1	213.1
2013/5/28	22.0	22.9	34.0	4.3	17.4	21.8	7.0	8.1	0.0	13.2	33.2	162.0
2013/5/29	67.9	109.3	107.4	22.1	75.0	117.0	43.5	54.0	7.4	105.3	126.0	767.0
2013/5/30	75.9	94.6	112.0	26.8	95.5	149.5	44.4	53.7	5.3	91.4	75.0	748.2
2013年5月平均	62.0	144.8	149.1	26.6	113.1	164.1	45.9	80.0	9.0	124.3	182.2	1039.2
2013年5月標準偏差	24.0	221.2	201.1	23.6	136.3	161.5	34.6	93.9	9.4	116.5	159.9	1103.1

表(4)-13 鳥取県湯梨浜町の大気粉塵中のPAHs濃度(2013年3月～5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(pg/ m^3)										
		FL	PY	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	DahA	BghiP	IcdP	Total PAHs
2013/3/4	78.5	668.9	550.5	77.1	335.7	436.2	133.4	139.7	21.2	217.8	217.0	2797.6
2013/3/5	40.1	310.0	300.3	72.2	195.1	254.7	92.6	113.7	15.5	150.6	169.5	1674.1
2013/3/6	85.1	357.9	294.1	51.6	200.6	253.9	83.2	97.2	13.8	159.7	150.8	1662.7
2013/3/7	110.8	413.8	349.3	75.7	229.5	290.9	116.3	143.8	20.6	142.2	135.5	1917.7
2013/3/8	182.2	548.4	492.4	82.3	364.7	504.7	160.8	171.6	26.3	282.3	252.8	2886.3
2013/3/9	200.7	583.8	442.5	76.1	326.6	422.7	131.0	152.9	26.9	229.3	435.0	2826.8
2013/3/10	37.6	129.6	125.9	36.5	124.9	206.2	49.7	48.6	7.1	111.1	466.1	1305.6
2013/3/11	24.1	76.8	76.5	20.9	84.6	107.6	30.4	31.0	4.9	76.6	75.4	584.7
2013/3/12	46.5	109.3	121.3	52.6	141.1	184.6	69.9	89.2	14.3	166.2	142.6	1091.3
2013/3/13	37.5	118.7	121.9	36.6	101.6	125.0	42.4	59.9	8.5	98.1	224.6	937.3
2013/3/14	20.0	118.7	121.9	36.6	101.6	125.0	42.4	59.9	8.5	98.1	147.5	860.2
2013/3/18	32.8	53.8	49.4	9.4	46.6	65.4	19.0	18.7	4.1	54.4	161.5	482.3
2013/3/19	104.4	450.9	443.5	106.4	294.9	366.3	110.1	144.1	27.9	257.4	489.9	2691.4
2013/3/20	55.4	146.6	173.3	34.9	135.4	169.3	53.3	62.6	11.5	132.2	120.3	1039.4
2013/3/21	21.9	108.1	124.5	56.7	127.1	141.1	51.7	72.1	12.4	119.4	244.1	1057.1
2013/3/25	20.9	132.5	117.1	16.5	79.8	107.7	26.1	27.6	4.5	61.1	162.5	735.4
2013/3/26	22.7	152.6	125.9	23.1	78.6	94.1	29.4	31.1	5.0	69.8	99.2	708.7
2013/3/27	13.4	51.6	54.5	6.1	42.0	56.6	17.1	14.5	3.8	49.5	152.2	448.1
2013/3/28	28.1	176.8	163.2	29.8	144.1	163.7	53.3	73.9	13.7	135.2	184.8	1138.4
2013年3月平均	61.2	247.8	223.6	47.4	166.0	214.5	69.0	81.7	13.2	137.4	212.2	1412.9
2013年3月標準偏差	54.3	196.4	159.9	28.1	100.5	133.4	43.3	49.8	8.1	68.6	121.1	834.4
2013/4/1	43.8	94.9	89.6	17.7	68.2	93.2	28.0	29.6	5.5	84.4	78.0	589.2
2013/4/2	30.5	90.1	81.6	10.5	50.2	67.1	21.5	23.3	4.4	57.0	46.6	452.4
2013/4/3	27.3	56.0	49.1	7.6	37.8	48.6	14.8	14.5	2.6	43.0	120.6	394.5
2013/4/4	34.2	94.2	81.6	12.2	56.5	75.2	22.4	18.1	4.0	58.3	35.6	458.1
2013/4/8	42.3	165.0	166.3	32.9	109.6	120.3	43.9	38.3	8.8	93.2	135.6	914.1
2013/4/9	76.4	248.7	160.6	28.3	121.4	151.6	44.9	44.8	9.3	122.6	207.6	1139.8
2013/4/10	24.8	112.8	99.4	14.4	85.6	111.3	32.1	29.3	5.6	74.3	109.3	674.0
2013/4/11	29.4	131.9	119.2	22.2	85.7	112.5	33.6	44.3	6.6	93.1	158.5	807.4
2013/4/15	66.7	125.6	123.8	27.4	123.6	172.7	47.7	48.8	9.6	115.2	128.0	922.3
2013/4/16	88.7	301.6	288.3	52.9	215.0	243.4	75.5	93.8	15.9	166.6	354.3	1807.3
2013/4/17	34.9	34.9	33.4	3.8	24.1	30.1	10.0	9.9	1.7	27.2	88.2	263.3
2013/4/18	32.4	71.1	76.4	11.3	54.2	69.0	19.4	24.0	3.5	46.5	151.8	527.3
2013/4/22	23.8	113.7	100.9	15.7	75.4	90.8	26.4	31.7	4.7	66.3	234.8	760.4
2013/4/23	20.1	60.0	63.2	8.5	35.4	43.1	13.9	15.3	2.1	41.6	121.7	404.8
2013/4/24	28.1	83.5	72.4	9.4	52.5	74.5	21.6	23.2	3.5	52.7	78.0	471.3
2013/4/25	32.9	79.6	75.6	11.2	55.9	70.3	22.8	27.6	4.2	51.5	133.1	531.8
2013/4/30	91.0	68.6	67.7	10.5	55.7	71.6	23.0	26.6	3.8	51.8	150.9	530.1
2013年4月平均	42.8	113.6	102.9	17.4	76.9	96.8	29.5	31.9	5.6	73.3	137.2	685.2
2013年4月標準偏差	23.0	69.0	59.4	12.2	45.9	53.0	16.1	19.4	3.5	35.8	75.7	368.2
2013/5/1	30.4	10.0	13.0	2.8	6.8	8.7	9.9	3.7	0.0	10.5	38.6	103.8
2013/5/2	12.2	7.2	8.2	0.0	2.6	3.2	0.0	0.0	0.0	3.0	12.2	36.5
2013/5/7	16.2	10.5	12.8	0.0	6.2	8.8	2.5	2.9	0.0	6.1	30.3	80.1
2013/5/8	18.6	34.1	56.5	16.8	34.2	52.5	17.0	30.3	2.7	47.5	69.5	361.2
2013/5/9	41.4	296.3	148.4	26.0	126.7	132.5	46.8	57.6	9.4	103.3	450.0	1397.0
2013/5/13	75.7	276.4	247.8	28.5	251.5	282.4	68.9	77.8	11.5	143.2	540.7	1928.5
2013/5/14	58.5	168.9	311.3	30.9	156.0	170.9	63.1	72.5	10.8	168.0	556.8	1709.1
2013/5/15	46.3	45.8	43.6	8.7	53.3	56.0	20.8	19.9	3.3	34.1	89.9	375.3
2013/5/16	21.9	9.8	15.1	1.9	10.3	10.8	3.7	4.5	0.0	6.7	8.9	71.9
2013/5/20	33.8	36.5	36.3	8.9	35.6	47.3	15.3	17.2	2.4	32.4	89.5	321.4
2013/5/21	58.5	75.6	89.7	24.1	87.8	125.7	37.5	39.9	6.7	83.0	295.8	865.7
2013/5/22	49.2	45.2	43.4	7.6	45.3	56.8	18.3	17.0	2.5	41.2	96.9	374.2
2013/5/23	21.5	32.9	44.3	11.0	35.7	51.5	16.1	22.3	2.4	44.7	143.4	404.3
2013/5/27	54.8	14.3	26.3	2.5	10.5	11.5	4.6	7.6	0.0	15.0	25.8	118.2
2013/5/28	13.8	7.5	12.5	2.6	6.4	8.6	3.2	4.6	0.0	12.4	17.9	75.6
2013/5/29	41.6	71.6	74.6	21.2	69.7	104.2	35.1	36.0	6.6	78.2	104.2	601.5
2013/5/30	47.2	40.1	39.7	11.2	52.5	76.4	24.1	21.8	3.6	47.7	157.1	474.2
2013年5月平均	37.7	69.6	72.0	12.0	58.3	71.0	22.8	25.6	3.7	51.6	160.4	547.0
2013年5月標準偏差	18.6	90.6	86.3	10.5	66.2	74.0	21.0	24.2	3.9	48.9	184.5	589.7

表(4)-14 富山県射水市の大気粉塵中のPAHs濃度(2013年3月～5月)

捕集日	粉塵濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(pg/m ³)										Total PAHs
		FL	PY	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	DahA	BghiP	IcdP	
2013/3/4	26.2	148.1	137.7	34.5	123.7	184.3	55.1	48.6	7.9	122.4	94.8	957.1
2013/3/5	27.8	152.1	146.1	53.8	143.5	196.7	68.3	73.5	9.1	158.3	113.9	1115.5
2013/3/6	64.1	458.1	366.9	89.1	354.6	463.4	129.3	154.4	19.8	217.1	223.0	2475.9
2013/3/7	93.6	465.9	355.4	58.8	261.4	337.6	104.6	126.3	17.1	124.5	172.0	2023.8
2013/3/8	120.3	242.6	226.1	70.7	247.1	346.3	115.1	114.0	20.2	153.4	140.8	1676.3
2013/3/9	103.3	222.0	198.9	47.5	145.8	222.7	74.5	83.2	12.5	121.7	145.0	1273.9
2013/3/10	38.3	157.69	153.40	35.9	130.4	205.02	48.0	44.3	7.3	107.4	85.71	975.0
2013/3/11	36.8	147.3	136.1	45.9	212.01	298.69	65.1	71.3	9.4	180.90	120.87	1287.6
2013/3/12	119.0	143.4	272.99	62.3	277.17	502.12	97.1	129.7	16.1	336.23	229.75	2066.8
2013/3/13	32.7	118.9	107.5	23.9	74.4	113.9	30.8	36.1	5.0	79.6	101.16	691.2
2013/3/14	22.6	133.6	113.9	36.7	122.0	148.1	43.8	50.2	5.6	96.6	91.62	842.1
2013/3/18	34.5	35.6	30.2	6.7	35.8	48.8	13.3	12.4	1.9	25.3	84.6	294.7
2013/3/19	86.4	104.4	96.6	37.5	137.2	321.5	60.7	73.0	11.9	147.2	170.9	1160.9
2013/3/20	61.6	152.5	132.2	26.9	105.2	268.1	47.6	61.9	8.5	129.8	133.9	1066.5
2013/3/21	22.5	107.0	97.0	42.6	133.3	296.7	54.9	68.1	7.7	131.0	126.0	1064.3
2013/3/25	21.5	89.6	75.0	20.2	86.8	184.5	31.6	33.2	4.4	64.0	72.8	662.1
2013/3/26	23.5	90.1	86.1	33.5	100.1	136.5	39.7	50.6	5.4	100.2	102.7	744.8
2013/3/27	37.1	153.3	146.4	38.7	146.5	369.8	74.6	87.4	12.3	318.3	192.7	1540.0
2013/3/28	33.5	79.6	67.8	11.8	59.4	83.3	25.7	31.6	4.3	70.9	53.0	487.4
2013年3月平均	52.9	168.5	155.1	40.9	152.4	248.8	62.1	71.0	9.8	141.3	129.2	1179.2
2013年3月標準偏差	34.4	113.7	92.0	20.2	82.1	123.5	31.3	37.7	5.4	78.7	49.5	566.2
2013/4/1	27.4	83.3	82.1	31.0	96.0	169.6	39.2	57.7	6.8	133.1	86.5	785.4
2013/4/2	34.5	75.8	81.7	15.1	70.3	99.2	27.5	35.4	5.6	77.5	118.8	606.7
2013/4/3	17.1	28.1	27.5	6.4	30.0	47.9	14.4	14.6	2.3	34.1	56.5	261.8
2013/4/4	53.2	94.5	84.9	16.3	93.8	125.1	34.1	36.4	5.6	85.4	146.2	722.3
2013/4/8	22.3	74.8	69.5	23.7	97.5	141.5	38.2	42.3	6.0	81.9	79.6	655.0
2013/4/9	40.3	115.9	99.9	17.1	84.2	108.9	32.1	38.4	5.3	74.1	118.6	694.7
2013/4/10	15.8	73.4	65.2	11.2	54.5	81.4	23.0	24.3	3.7	51.7	118.6	507.0
2013/4/11	18.2	95.0	77.1	13.6	72.5	92.4	25.9	26.9	3.5	54.6	89.8	551.3
2013/4/15	45.7	92.8	80.2	20.9	99.0	147.8	37.2	47.2	6.0	89.3	92.3	712.7
2013/4/16	71.5	300.6	283.0	36.7	124.5	300.2	56.2	86.5	9.7	140.5	136.4	1474.4
2013/4/17	51.8	48.7	41.6	6.6	31.9	44.6	12.9	15.8	2.8	39.7	49.4	294.1
2013/4/18	26.0	41.0	44.5	8.6	34.1	46.0	14.3	18.2	2.3	38.6	48.3	295.8
2013/4/22	18.3	69.5	71.8	24.4	74.6	111.3	31.6	44.2	4.6	83.2	73.9	588.9
2013/4/23	21.7	81.9	94.8	18.6	62.4	105.3	31.2	43.0	5.7	85.1	79.5	607.3
2013/4/24	13.6	38.0	37.9	10.5	46.0	57.7	15.9	16.8	2.2	33.6	60.3	319.0
2013/4/25	31.5	85.5	77.8	12.9	65.4	103.7	28.7	37.5	5.0	79.7	76.5	572.6
2013/4/30	51.2	70.9	67.8	13.4	58.7	84.9	24.4	30.8	4.2	60.7	143.6	559.5
2013年4月平均	32.9	86.5	81.6	16.9	70.3	109.9	28.6	36.2	4.8	73.1	92.6	600.5
2013年4月標準偏差	16.7	59.7	55.7	8.3	26.7	60.9	11.1	17.9	1.9	30.9	32.2	277.5
2013/5/1	6.6	10.4	10.6	2.9	15.2	32.1	8.3	5.9	1.6	25.6	22.1	134.9
2013/5/7	14.5	12.9	14.4	7.1	26.5	39.1	11.6	16.2	1.7	48.4	51.8	229.8
2013/5/8	14.1	27.9	42.0	19.2	59.4	89.8	24.5	37.0	3.7	88.1	139.4	530.9
2013/5/9	38.2	73.6	96.8	31.5	105.7	257.4	54.3	84.8	8.0	154.2	112.7	979.0
2013/5/13	89.9	272.5	238.5	34.6	160.4	306.6	68.1	82.6	11.2	154.9	153.2	1482.7
2013/5/14	74.7	107.1	102.1	16.4	88.4	117.3	37.9	49.9	7.3	123.4	146.6	796.3
2013/5/15	65.0	84.6	76.6	12.8	65.2	78.3	24.8	34.1	4.5	65.7	57.4	504.0
2013/5/16	27.6	21.5	25.0	5.8	20.4	29.6	8.8	11.7	2.0	23.9	9.1	157.9
2013/5/20	23.4	26.7	31.1	10.6	40.4	59.3	16.3	17.4	2.3	28.8	47.0	279.8
2013/5/21	49.7	67.4	65.4	17.4	62.8	99.1	28.3	40.1	6.1	6.1	84.6	477.3
2013/5/22	50.1	74.9	68.7	11.6	53.3	69.2	21.5	27.5	3.7	49.9	75.5	455.8
2013/5/23	20.6	59.1	65.2	13.3	46.4	70.1	19.5	24.7	4.1	55.0	65.4	422.7
2013/5/27	45.2	79.1	82.2	15.5	66.4	81.9	27.2	42.6	5.1	74.3	82.2	556.5
2013/5/28	35.7	28.9	29.9	6.8	20.9	29.7	9.7	15.3	2.1	29.9	25.0	198.2
2013/5/29	17.5	19.0	18.6	5.2	18.6	23.8	8.4	9.8	0.0	17.4	13.7	134.5
2013/5/30	23.9	43.3	45.2	13.6	68.8	127.3	34.5	34.8	6.1	84.9	80.8	539.3
2013/5/31	61.9	26.5	23.7	4.8	22.1	36.8	11.4	13.3	2.2	32.7	28.7	202.2
2013年5月平均	38.7	60.9	60.9	13.5	55.3	91.0	24.4	32.2	4.2	62.5	70.3	475.4
2013年5月標準偏差	23.7	61.8	54.2	8.8	37.7	78.9	16.8	23.2	2.8	45.8	46.0	351.1

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

3月から5月に、黄砂の観測が報告されていないにもかかわらず、黄砂観測日と同様に大気粉塵濃度が高く、粉塵中の成分（金属元素、イオン）も黄砂飛散時と同様の日が多数あることが明らかになった。また、それらの粉塵では長距離輸送汚染の指標となることが報告されている Pb 濃度及び SO_4^{2-} 濃度が高く、越境汚染の影響が大きいことが示唆された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

<行政が活用することが見込まれる成果>

黄砂飛散時に喘息患者で症状の増悪が起こることが報告されている。黄砂の観測が報告されないにもかかわらず黄砂飛散時と同様の大気汚染が起こる日が多数存在することが明らかとなり、喘息患者など感受性の高い人々に対し、黄砂日以外にも健康被害防止のために注意喚起する必要性について検討するための基礎資料となると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 高橋亮平、穀内修、西村幸風、藤田浩祐、秋山雅行、嵐谷圭一、池盛文数、稲葉洋平、片岡洋行、岸川直哉、世良暢之、出口雄也、鳥羽陽、船坂邦弘、洞崎和徳、山口孝子、長谷井友尋、渡辺徹志：第61回日本薬学会近畿支部大会（2011）「全国14地点における大気粉塵の変異原性及び化学成分の年内変動並びにそれらに対する長距離輸送の影響」
- 2) 長谷井友尋、穀内修、クウリバリスレイマン、秋山雅行、浅川大地、嵐谷圭一、池盛文数、稲葉洋平、片岡洋行、岸川直哉、世良暢之、出口雄也、鳥羽陽、船坂邦弘、洞崎和徳、山口孝子、渡辺徹志：日本環境変異原学会第40回大会（2011）「全国14地点における大気粉塵の変異原性及び化学成分の年内変動並びにそれらに対する長距離輸送の影響」

- 3) 渡辺徹志、長谷井友尋、木戸瑞佳、相部美佐緒、湊 沙花、世良暢之、船坂邦弘、浅川大地、池盛文数、渡部仁成：第53回大気環境学会年会（2012）「大気粉塵の化学成分及び生物活性の季節的変動」
- 4) 長谷井友尋、クウリバリ スレイマン、高橋亮平、藤田浩祐、貴志茜衣、坂本みずほ、松井元希、池盛文数、盛山哲郎、木戸瑞佳、世良暢之、船坂邦弘、浅川大地、若林敬二、渡部仁成、渡辺徹志：衛生薬学・環境トキシコロジーフォーラム2012（2012）「日本海沿岸3地点における大気粉塵の化学成分の年内変動」
- 5) クウリバリ スレイマン、長谷井友尋、渡辺徹志：第2回4大学連携研究フォーラム（2012）「大気粉塵の化学成分及び生物活性並びにそれらに対する越境輸送の影響」
- 6) 長谷井友尋、クウリバリ スレイマン、高橋亮平、藤田浩祐、貴志茜衣、坂本みずほ、松井元希、小野遼、南嘉輝、山田真裕、池盛文数、盛山哲郎、木戸瑞佳、世良暢之、船坂邦弘、浅川大地、若林敬二、渡部仁成、渡辺徹志：日本薬学会第133年会（2013）「日本海沿岸における大気粉塵中の成分に対する越境輸送の影響」
- 7) 長谷井友尋、クウリバリ スレイマン、高橋亮平、藤田浩祐、貴志茜衣、坂本みずほ、松井元希、小野 遼、南 嘉輝、山田真裕、池盛文数、盛山哲郎、木戸瑞佳、世良暢之、船坂邦弘、浅川大地、若林敬二、渡部仁成、渡辺徹志：日本薬学会第133年会（2013）「日本海沿岸地域における大気粉塵中の成分に対する越境輸送の影響」
- 8) クウリバリ スレイマン、藤田浩祐、貴志茜衣、坂本みずほ、松井元希、小野 遼、南 嘉輝、山田真裕、長谷井友尋、盛山哲郎、木戸瑞佳、世良暢之、唐 寧、鳥羽 陽、早川和一、船坂邦弘、浅川大地、池盛文数、若林敬二、渡部仁成、渡辺徹志：衛生薬学・環境トキシコロジーフォーラム2013（2013）「日本海沿岸地域における大気粉塵中の成分の比較及び中国大陸からの越境輸送の影響」
- 9) Watanabe T, Coulibaly S, Hasei T, Funasaka K, Asakawa D, Sera N, Seiyama T, Kido M, Toriba A, Hayakawa K, Tang N, Zhao L, Chung HY, Watanabe M, Wakabayashi K: 11th International Conference on Environmental Mutagens, Foz Do Iguacu, Brazil, 2013 “Trans-boundary air pollution with genotoxic compounds in East Asia”
- 10) クウリバリ スレイマン、長谷井友尋、盛山哲郎、木戸瑞佳、世良暢之、唐 寧、鳥羽 陽、早川和一、船坂邦弘、浅川大地、池盛文数、若林敬二、渡部仁成、渡辺徹志：日本環境変異原学会第42回大会（2013）「北京及び日本海沿岸地域における大気粉塵中の変異原性の比較及び中国大陸からの越境輸送の影響」
- 11) クウリバリ スレイマン、長谷井友尋、渡辺徹志：第3回4大学連携研究フォーラム（2013）「日本海沿岸地域の大気粉塵成分に対する中国大陸からの越境輸送の影響」

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

Research to Reveal Association of Human Health and Asian Dust by the Clinical and Basic Study

Principal Investigator: Masanari WATANABE

Institution: Tottori University

Department of Respiratory Medicine and Rheumatology,

Tottori University Hospital

36-1 Nishichou, Yonago 683-8504, Japan

Tel: +81-859-38-6537/ Fax: +81-859-38-6539

E-mail: watanabm@grape.med.tottori-u.ac.jp

Cooperated by: Kyoto Pharmaceutical University

[Abstract]

Key Words: Asian dust, Airborne particles, Asthma, COPD, School children, Pulmonary function, Airway inflammation, Interleukin-8, PM_{2.5}

Recent epidemiological investigations in eastern Asian countries have identified health effects of Asian dust storms (ADS). However, few studies of the association of an ADS with human health have been performed in Japan. The mechanism of exacerbation of asthma by an ADS is also unclear and this prompted us to investigate the effects of an ADS on the respiratory system.

In a telephone survey, we found that 8-22% of patients with asthma but less than 5% of patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD) had worsening of lower respiratory tract symptoms on ADS days. Thus, the ADS had a greater effect on these symptoms in patients with asthma. Adult patients had worsened scores for respiratory tract symptoms on ADS days compared to non-ADS days, based on daily recording of scores for these symptoms.

The morning peak expiratory flow (PEF) of schoolchildren was measured daily from March to May in 2012 and 2013. PEF values in these children were significantly reduced by exposure to the ADS. Increases of 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in SPM and PM_{2.5} were significantly associated with respective decreases in PEF of -2.2 and -2.6 L/min in all children, -2.1 and -2.5 L/min in children without asthma, and -3.1 and -3.7 L/min in children with asthma, respectively. Airborne particles collected on ADS days induced interleukin-8 in THP-G8 cells, but this effect was not observed for the original soil sample of the ADS. We also compared immune adjuvant effects and the influence on airway inflammation between ADS airborne particles and the original ADS soil in asthma model mice. Co-sensitization with ADS airborne particles and *Dermatophagoides farinae* (Df) increased the number of neutrophils and eosinophils in the airway. These results suggest that substances attached to ADS airborne particles, but

not the original soil sample, may play important roles in immune adjuvant effects and airway inflammation. Based on other results, we suspect that endotoxin attached to the airborne particles is a key substance in exacerbation of airway inflammation by an ADS.

In this study, we show that exposure to an ADS aggravates the respiratory tract system in adult patients with asthma and COPD, and in schoolchildren. Substances attached to ADS airborne particles may increase airway inflammation through elevation of interleukin-8.