

大気汚染が運動する人の健康に及ぼす影響に関する総説

青木 豊明¹⁾

A Review on the Influence of Air Pollution on the Health of People Exercising

Toyoaki AOKI

Abstract

The aim of this review is to examine the influences of air pollution on exercisers. The major urban air pollutants such as particulate matter, ozone and other pollutants, were examined. This review of the reports published from January 2000 to April 2017, resulted in a significant number of studies. Although it is logical to study air pollutants singly, the air pollutants do not exist in isolation. They constitute a mixture, and synergism may exist between them.

Key words : air pollution, exerciser, health effect, review

キーワード：大気汚染，運動家，健康影響，総説

1. 緒言

現在，日本は高齢化社会に向かっていて，それとともに国民の健康志向が強くなっている．我々の周りでもウォーキングやサイクリングをする人を見ることが多くなってきた．厚生労働省の報告では，健康関連機器の中で，歩数計を実際に使用している者は20才以上の16.7%を占め，特に中高年では3 - 4名に1人になっている（厚生労働省，2017）．このような状況の基，2011年8月24日に施行された「スポーツ基本法」において，「スポーツは，世界共通の人類の文化である」との理念から，国民生活におけるスポーツの多様な役割の重要性から，スポーツ立国の実現をめざし，国家戦略の一環として，スポーツに関する施策を総合的かつ計画的に推進することを

目的とする，と謳われている（文部科学省，2015）．その目的を推進するため2015年10月にスポーツ庁が創設された．その目標として，全ての国民のスポーツ機会の確保，健康長寿社会の実現，などが掲げられている．

しかしながら，運動する環境大気中の浮遊粒子状物質（Suspended Particulate Matter : SPM）やオゾンの濃度の増大が近年，懸念されるようになってきた．特にSPMのうち粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の $\text{PM}_{2.5}$ が中国からの越境汚染などで問題になってきている．粒径が小さいほど大気中に浮遊しやすく，呼吸により体内に取り込まれると気管支や肺胞にまで入り込み，健康への影響が懸念される．

本報告では，SPMやオゾンなどの大気汚染物質が運動する人の健康に及ぼす影響についての国内外の論文を紹介する．発表年として

1) びわこ成蹊スポーツ大学名誉教授

は、2000年1月から2017年4月までの研究論文を主とした。紹介した論文の多くが大気汚染物質の1つとしてSPMの運動への影響を報告しているため、最初にSPMの基礎的な内容を報告する。

2. SPM について

SPMの粒径は健康影響を考える際、特に重要な特性である。健康影響の観点では、呼吸器系への沈着率が粒径に関係する。新田(2016)は大気中のSPMの粒形分布など基礎的なことを報告している。SPMの粒径分布は一般的に二峰性の形を示すことが多く(図1)、小さい方の山は微小粒子、大きい方の山は粗大粒子と呼ばれている。PM_{2.5}は、この小さい方の山の指標となる。

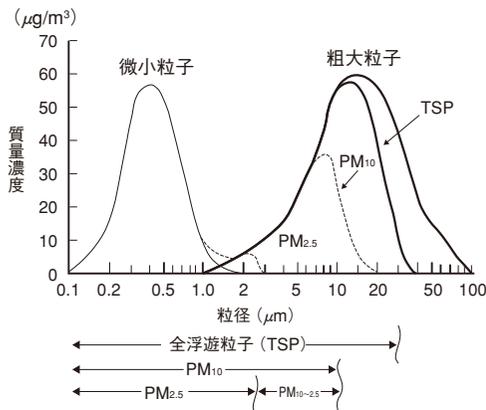


図1 大気中粒子状物質の粒径分布

図2は国内で測定されているPM_{2.5}の成分割合を示している。OCは有機炭素であり、その生成過程については不明なところが多いが、ディーゼル排気やボイラー燃焼由来の粒子などの一次粒子と、揮発性有機化合物が大気中で粒子化した二次生成粒子の両者からなっていると考えられる。ECは元素状炭素であり、都市部ではディーゼル排気粒子の寄与がほとんどであり、ディーゼル粒子の指標とされている。硝酸イオンと硫酸イオンは、大気中に排出された窒素酸化物とイオウ酸化物

がそれぞれ酸化され、アンモニアとの反応によって生成した二次生成粒子のイオン成分である。窒素酸化物は自動車や、ボイラ等の燃焼施設から排出される。国内でのイオウ酸化物の排出量は少なく、多くが越境大気汚染由来と考えられている。地表付近の環境大気中のPM_{2.5}の平均的な寿命は、数日から1週間程度といわれている。

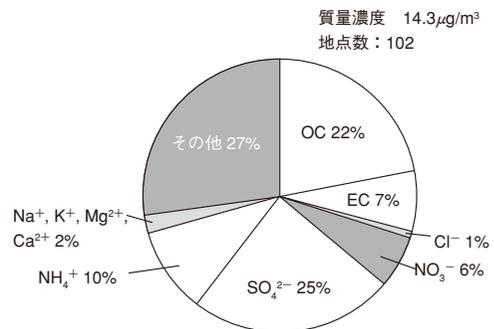


図2 PM_{2.5}の主要な成分(一般環境)

OC:有機炭素, EC:元素状炭素, Cl⁻:塩化物イオン, NO₃⁻:硝酸イオン, SO₄²⁻:硫酸イオン, NH₄⁺:アンモニウムイオン, Na⁺:ナトリウムイオン, K⁺:カリウムイオン, Mg²⁺:マグネシウムイオン, Ca²⁺:カルシウムイオン

内山(2016)はPM_{2.5}の環境基準などを報告している。日本では1968年に大気汚染防止法が成立し、SPMの大気環境基準が制定された。粒径10μm以下のSPM基準値は1時間値の1日平均値が0.10mg/m³以下であり、かつ、1時間値が0.20mg/m³以下であること。近年では、この基準達成率は90%を超えるようになった。また、2009年9月にはPM_{2.5}の環境基準が策定された。以下に基準値を記載する。

- ・長期基準 : 年平均値15μg/m³以下
- ・短期基準 : 日平均値35μg/m³以下

さらに中国からの越境汚染により、特に西日本でPM_{2.5}濃度の上昇が観測され、環境省は2013年2月末に注意喚起のための暫定指針を公表した。米国の大気質指標(Air Quality Index: AQI)では65.5μg/m³以上を「全ての

人に対してある程度の健康への影響を与える可能性があるPM_{2.5}濃度」としている。この数値等を考慮して、注意喚起のための暫定指針となる値として、「日平均値70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 」が提案された。

3. 大気汚染物質と運動

CarlisleとSharp (2001) は大気汚染が人の健康、特に運動する人に、どのくらい影響するか。また、アスリートへのリスクがイギリスにおいてどの程度かを総説している。調べた大気汚染物質は一酸化炭素 (CO)、窒素酸化物 (NO_x)、オゾン (O₃)、粒子状物質 (PM₁₀)、二酸化硫黄 (SO₂)、そして揮発性有機化合物 (VOCs) である。表1に以上の主要な大気汚染物質のイギリスにおける上限暴露規制値を示した。

以下に各大気汚染物質の影響をまとめた。

・CO

COの血液中のヘモグロビンへの親和力は酸素 (O₂) の200倍の大きさである。交通量の激しい場所での30分間の強い運動は、COとヘモグロビン (Hb) が結びついたCOHbは10倍増加して、10本のタバコを吸った場合と同程度である。COはアスリートに悪影響を及ぼす。

・NO_x

車から排出されたNOは酸化されNO₂に変化する。これらNOとNO₂を総称してNO_xと称される。NO₂の方が、より毒性が強い。

呼吸で鼻咽頭に入り、亜硝酸と硝酸に変化する。NO₂の5-10ppmの急性暴露で呼吸器系の病気の原因になる。都市におけるNO₂濃度は通常150ppb (0.15ppm) 以下である。

・O₃

オゾンは光化学的酸化で生成する。O₃は運動中のアスリートに潜在的に厳しいリスクをもたらす。120ppb以上のO₃暴露で健康に悪影響がもたらされる。症状としては鼻や喉の刺激や咳や胸の痛み等がある。肺機能にも影響する。

・PM

アムステルダムでボランティアのサイクリスト、車の運転手、そして歩行者にパーソナル・エア・サンプリングを取り付けてPM₁₀を調べた。胸部の部分のサンプリングで、PM₁₀に鉛や6種の発がん性の多環芳香炭化水素が定量された。PM₁₀濃度は郊外よりも都市部で7倍高かった。PM₁₀と結びついた毒性物質が個人の暴露で増大する可能性があるのではと、懸念される。

・SO₂

正常な健康的な成人の肺機能に影響するSO₂の閾値は1-2ppmである。喘息患者は正常者に比べSO₂の感受性は一般に十倍程たかい。喘息の症状はSO₂によって悪化する。現在は浄化技術の法制化により、イギリスではSO₂の排出は閾値濃度を十分に下回っている。

・VOCs

イギリスのVOCsの環境への排出量は200

表1 Summary of upper exposure limits of the UK National Air Quality Strategy

Pollutant	Upper exposure limit or "standard"	
	Concentration	Measured as
Benzen	5 ppb	Running annual mean
1,3-Butadiene	1 ppb	Running annual mean
Carbon monoxide	10 ppm (10 000ppb)	Running 8 h mean
Lead	0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual mean
Nitrogen dioxide	150 ppb	1 h mean
	21 ppb	Annual mean
Ozone	50 ppb	Running 8 h mean
Fine particles (PM ₁₀)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Running 24 h mean
Sulphur dioxide	100 ppb	15 min mean

万トンを超え、NO_xとSO₂の排出量と同程度である。オランダでの測定で、サイクリストの都市部と郊外部での暴露量はベンゼンとトルエンで5:1、キシレンで10:1の計算値になった。VOCsは健康影響にとって重要で、しばしば汚染物として見落とされており、発がん性があるものもある。

まとめとしては、アスリートや運動する人はイギリスのように大気汚染物が規制されていても、できる限り道路近くでの運動は避けるべきである。オゾンは特に悪影響が大きい。

GilesとKoehle (2014) は粒子状物質 (particulate matter:PM)、オゾン、一酸化炭素などの大気汚染物が運動中に肺、心血管、認知力などに影響するか、また運動が大気汚染物暴露の体への悪影響を和らげるかについても総説している。

世界の人口の52%が都市部で生活しており、先進国では78%にも及んでいる。都市で運動することは都市大気汚染に曝されることになる。WHOのPM、オゾン、一酸化炭素の屋外大気質のガイドラインを表2に示す。

表2 World Health Organization air quality guidelines

Pollutant	Averaging period		
	Annual	24 h	8 h
PM _{2.5}	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM ₁₀	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Ozone			50 ppb
Carbon monoxide			9 ppm

PM particulate matter, ppb parts per billion, ppm parts per million, PM₁₀ PM with a mean aerodynamic diameter of 10 μm or less, PM_{2.5} PM with a mean aerodynamic diameter of 2.5 μm or less

運動前および運動中の急性および長期のPM_{2.5}とオゾンの暴露は肺機能を損傷させ、肺炎症を促進する。運動中のオゾン暴露の肺炎症に関する研究はなされているが、一酸化炭素やPMの共存しないデータはない。PMとオゾンは酸化ストレスと炎症の原因とな

る。動物を用いた研究では、日常的な運動は大気汚染に起因する肺炎症を減少させる。抗酸化剤は大気汚染の健康への悪影響を和らげ、さらにオゾンの肺炎症と肺傷害などの急性影響を減じる。運動中のオゾンの心血管への影響を研究している論文は少なく、研究の多くはPMと一酸化炭素に集中している。またオゾンもしくは一酸化炭素共存下での運動の認知力への影響に関するデータはない。実験室レベルの研究から、汚染物の共存下での運動に関する理解の必要性が問われている。

運動パフォーマンスと酸素消費は都市環境に影響されることから、運動する場所は運動パフォーマンスを決定する重要な要因である。高レベルのオゾンと一酸化炭素は運動下で症状を悪化させるので、このような状況下での運動は勧められない。しかし、大気汚染下での運動は悪影響を及ぼすが、運動の効用は大気汚染の悪影響を相殺し、大気汚染関連の死亡率を減じると報告する多くの研究がある。

以下に筆者らの推薦する事を箇条書きにする。

- ・各人は地域の気象予報に従い、良いプランを立てる。
- ・夏季は午前中に運動し、午後のオゾンの暴露を最小限にする。
- ・可能な限り、運動は交通量の多い所から離れる。
- ・運動する環境場を考え、大気汚染の暴露を少なくする。

Bosら (2014) は、脳への大気汚染の影響と認知力への身体活動の影響、特に脳由来神経栄養因子 (BDNF) を介して身体活動が認知力にポジティブに作用するのかに焦点を当て総説している。

大気汚染はオゾン、一酸化炭素、二酸化硫黄、窒素酸化物等のガスと粒子状物質 (particulate matter:PM) の不均質状態である。大気汚染の健康影響にPMが関係し、悪影響を及ぼしている場合が多い。多くの疫学

調査から、都市交通関連の大気汚染と認知力との間に逆の関係がある。長期のPM暴露によって子ども、若者、大人、成人で認知力が低下し、老人で弱い認知力の低下があった。

BDNFは学習や記憶に重要な役割を持っていることが認められている。間接的な事実であるが、運動に応じて脳のBDNFが増大する。また運動によって誘起したBDNFの増加は海馬の容積の増大と関連していた。

最近の研究では、脳への身体活動のポジティブの影響と大気汚染暴露のネガティブの影響のバランスを調べている。運動中の大気汚染の暴露は、運動由来のBDNFの血漿中の増大を阻害した。大気汚染暴露は認知力の低下を示唆している。

炎症反応はPMのような外からの物質の防御作用として初期に活性化される。しかしPMの暴露の繰り返しは長期の炎症をもたらし、体や脳に有害になる。しかし、定期的な運動

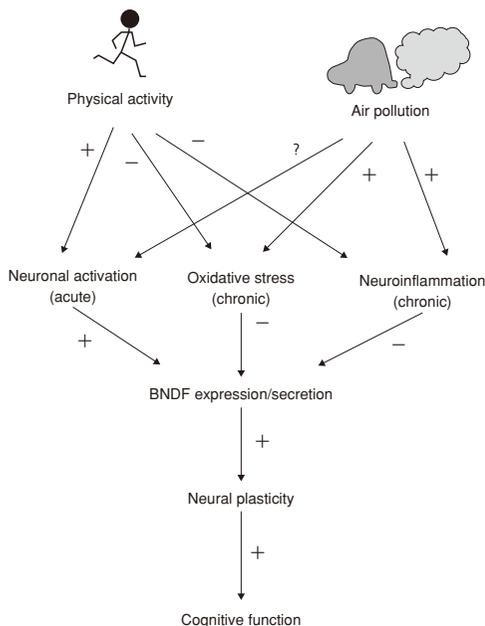


図3 Hypothetical pathways through which physical activity and air pollution may induce opposite effects on cognition. BDNF brain-derived neurotrophic factor, - represents inhibition, + represents induction

は反炎症効果と酸化的損傷の抵抗性を増大し、海馬のBDNFの増加と、認知力を改善する。

図3には身体活動と大気汚染の関連と認知機能に至るまでの推定概念を示した。

最後に筆者らは、大気汚染の神経学的影響と身体活動の間の作用の詳細な研究等が必要と記している。

大気汚染が起こっている中で、屋外で激しい運動をおこなうと気道炎症が生じる可能性がある。Ferdinandsら(2008)はスモッグがピークの季節に、若者アスリートの激しい屋外での運動が気道炎症のバイオマーカーである呼気凝縮液のpH(EBCpH)にどのように影響するかを調べている。

スモッグがピークの季節の10日間に、16人の高校生アスリートにアトランタから風下の郊外で、毎日、長距離走をしてもらい運動前後のEBCpHを調べている。運動後のEBCpHと大気中の粒子状物質(particulate matter: PM)濃度およびオゾン濃度の関係を線形回帰分析で検討している。

16人のランナー(平均年齢14.9才, 56%男

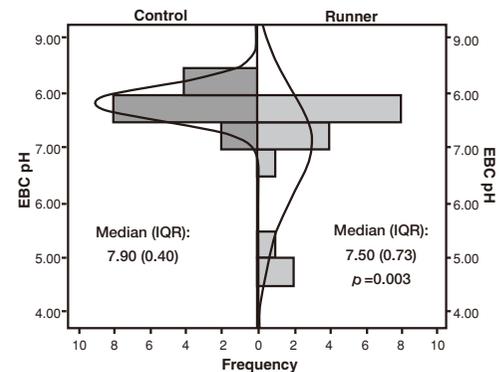


図4 Outdoor resting breath pH was lower in runners (n=16) compared to controls (n=14). Observed outdoor resting breath pH in this group of adolescent runners was lower than that seen in a control group of non-smoking, healthy adults, none of whom were involved in regular long-distance outdoor running (p=0.003 by Mann-Whitney U test).

子)から144検体の運動前,そして146検体の運動後の呼気凝縮液が集められた。運動前のEBCpHの中央値は7.58(四分位数範囲 6.90-7.86)であり,運動後も大きく変化しなかった。運動後のEBCpHと大気中のオゾンもしくはPMの間に有意な相関は認められなかった。しかし,運動前後の参加したランナーのEBCpHは,対象とした定住する14名の健康的な成人,あるいは報告されている健康的な人のEBCpHと比べて,図4に示すようにか

なり低い値であった。

運動中に大気汚染によるEBCpHへの急性の影響は見られなかったが,今回の健康的な長距離ランナーのEBCpHは驚くほど低かった。繰り返しの激しい運動は気道の酸性化をもたらすと思われる。

川田(2016)は,大気汚染と運動についてトピックスしている。その中でAndersenら(2015)の興味深い研究を報告している。彼らは大気汚染の原因の1つである二酸化窒素

表3

Physical activity	Moderate/low NO ₂ ($<19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	High/low NO ₂ ($\geq 19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
Total mortality (n=5,534)		
Sports	0.79 (0.74, 0.85)	0.75 (0.67, 0.83)
Cycling	0.83 (0.77, 0.88)	0.83 (0.75, 0.92)
Gardening	0.85 (0.78, 0.92)	0.85 (0.75, 0.91)
Walking	0.96 (0.86, 1.08)	0.95 (0.80, 1.14)
Cancer mortality (n=2,864)		
Sports	0.84 (0.77, 0.92)	0.77 (0.67, 0.89)
Cycling	0.92 (0.84, 1.01)	0.95 (0.83, 1.10)
Gardening	1.00 (0.89, 1.11)	0.86 (0.77, 1.02)
Walking	1.00 (0.88, 1.22)	1.12 (0.85, 1.48)
Cardiovascular mortality (n=1,285)		
Sports	0.76 (0.66, 0.88)	0.80 (0.65, 0.99)
Cycling	0.83 (0.72, 0.95)	0.70 (0.58, 0.85)
Gardening	0.85 (0.72, 1.00)	0.77 (0.63, 0.94)
Walking	0.86 (0.69, 1.00)	0.91 (0.64, 1.28)
Respiratory mortality (n=354)		
Sports	0.65 (0.46, 0.88)	0.50 (0.32, 0.77)
Cycling	0.55 (0.42, 0.72)	0.77 (0.54, 1.11)
Gardening	0.55 (0.41, 0.73)	0.81 (0.55, 1.18)
Walking	0.67 (0.46, 0.97)	0.89 (0.74, 1.67)

身体活動と死亡の危険性との関係

疾患別ではなく,全体の死亡の危険性(total mortality)では,スポーツへの参加や,サイクリング,ガーデニングは死亡の危険性を低下させ,その効果は二酸化窒素(NO₂)による大気汚染レベルの高低に影響を受けない。呼吸器系疾患による死亡の危険性(Respiratory mortality)では,中低濃度のNO₂の地域では,各種の身体活動は死亡の危険性を低下させるが,高濃度のNO₂の地域では,スポーツ活動以外の身体活動では,その効果が見られなくなっている。

*表の見方

住民の居住地域の大気中のNO₂濃度を高濃度地域(High NO₂, 9.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上)と中低濃度地域(Moderate/low NO₂, 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満)とに分類し,各種身体活動(sports, cycling, gardening, walking)と死亡の危険性との関係を解析している。死亡の危険性は,疾患の種類を考慮しない全体の死亡の危険性(total mortality)と,ガン(cancer mortality),心血管疾患(cardiovascular mortality),呼吸器系疾患(respiratory mortality)といった個別の疾患との関係でも解析している。表の数値は死亡の危険性がどの程度増減しているかを示している。たとえば,数値が0.79であれば,危険性が0.79倍(21%低下)になっていることを示す。括弧内の数値は95%信頼区間を示し,たとえば括弧内の数値が(0.74, 0.85)と記載されていれば,95%信頼区間が0.74~0.85であることを示している。この数値が「1」を跨いでいれば,統計的には有意ではないことを示している。

(NO₂)の濃度と運動による死亡の危険性との関係を調べた。1993～1997年の間に研究は開始され、デンマークのコペンハーゲンと2番目に大きなオーフスに在住の50～65歳の52,061人を対象にしている。スポーツ活動やサイクリング、ガーデニング、ウォーキング等の身体活動レベルを調査し、その後2010年までの死亡の危険性と、それぞれの居住地域のNO₂濃度との関係を検討している。居住地域のNO₂濃度の高い地域(19 μ g/m³以上)と中低濃度の地域(19 μ g/m³未満)に分けて評価している。表3に示したように、スポーツへの参加はガン、心血管系疾患による死亡の危険性を20%程度下げている。また、呼吸器系疾患による死亡の危険性は35～50%程度下げている。この効果はNO₂濃度の高低に影響されなかった。また、中低濃度の地域ではサイクリング、ガーデニング、ウォーキングは呼吸器系疾患による死亡の危険性を下げているが、高い地域では、その効果が無くなっている。以上の結果から、ある程度、強度の高い運動をおこなった場合は効果が見込めると考えられる。

川田が強調しているのは、NO₂濃度の高い地域であっても、運動することによって死亡の危険性が上がっていないこと。日本の大気汚染のレベルであれば、都心部で大気汚染が気になって屋外での運動を躊躇している場合、少なくとも現時点では問題ないと思われる、屋外での運動を楽しむように、と結んでいる。

4. 結言

種々の大気汚染物質の運動する人への健康影響を調べたが、直接的には呼吸器系への影響が多く報告されていた。運動前および運動中の急性および長期のPM_{2.5}とオゾンの暴露は肺機能を損傷させ、肺炎を促進する。また、長期のPM暴露によって子ども、若者、大人、成人で認識力が低下し、老人で弱い認識力の低下があった。しかしながら、健康影

響への個別の大気汚染物質の寄与の断定は、複合汚染の影響度の見極めが困難なため、難しい場合が多い。

多くの筆者が記載しているように、運動は交通量の多い場所から離れたところでおこなうことが勧められている。さらに近年、越境大気汚染由来のPM_{2.5}の濃度の増大が報告されており、含有が報告されている種々の有害物質の影響が懸念される。

しかしながら、運動による健康増進の効果も大きい。川田も記しているように、日本の大気汚染のレベルであれば、都心部で大気汚染が気になって屋外での運動を躊躇している場合、少なくとも現時点では問題ないと思われる、屋外での運動を楽しむように、と進言している。

引用文献

- Andersen J.Z., et al., (2015) A study of the combined effects of physical activity and air pollution on mortality in elderly urban residents, *Environmental Health Perspectives*, 123:6, 557-563.
- Bos I., et al., (2014) Physical activity, air pollution and the Brain, *Sports Med.*, 44, 1505-1518.
- Carlisle J.A., and Sharp C.C.N. (2001) Exercise and outdoor ambient air pollution, *Br.J.Sports Med.*, 35, 214-222.
- Ferdinands M.J., et al., (2008) Breath acidification in adolescent runners exposed to atmospheric pollution, *Environmental Health*, 7:10, 1-11.
- Giles V.L., and Koehle S.M. (2014) The health effects of exercising in air pollution, *Sports Med.*, 44, 223-249.
- 川田茂雄 (2016) 大気汚染と運動, *Training Journal*, Feb., 68-69.
- 厚生労働省 (2017) http://www1.mhlw.go.jp/topics/kenko21_11/b2.html (参照2017-9-30).
- 文部科学省 (2015) 文部科学白書.
- 新田裕史 (2016) PM_{2.5}とは, *保健の科学*, vol.58, No.9, 580-584.

内山巖雄 (2016) PM_{2.5}の環境基準と注意喚起のための暫定指針, 保健の科学, vol.58, No.9, 585-590.