

環境基準の設定に当たっての指針値に関する検討

環境基準の設定に当たっての指針値について、長期曝露及び短期曝露による健康影響に関する知見の定量的評価の作業を踏まえ、以下のとおり検討を行った。

1. 長期基準及び短期基準の必要性

中央環境審議会大気環境部会微小粒子状物質リスク評価手法専門委員会報告において示されているように、長期曝露では、より低濃度で慢性影響が起こり、短期曝露では、より高濃度で急性影響が起こると考えられる場合には、それぞれの健康影響について環境基準を定めることが妥当であると考えられる。

死亡のように短期曝露と長期曝露に共通してみられる健康影響をエンドポイントとする場合には、長期曝露影響に関するコホート研究から得られる健康リスクの上昇には、長期曝露の累積による影響に短期曝露による影響が重なっているとみなすことができる。微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書等で示されているように、微小粒子状物質による長期曝露影響と短期曝露影響について死亡リスクの大きさを比較した場合、一般に長期曝露影響の方が大きいことが示されている。これは、微小粒子状物質総体と関連したとしての健康リスクのうち、短期曝露影響として検出できるのは、基本的に短期的な濃度変動と関連する部分のみであるということに起因する。例えば、短期的に変動の少ない定常的・持続的な曝露による影響は、濃度変動による健康リスクの上昇をみる時系列解析等の短期曝露影響に関する解析手法では抽出できない。

一方で、高濃度の微小粒子状物質への短期的な曝露に伴って発現すると考えられる呼吸器系や循環器系に関する種々の症状や機能変化が存在する。これらの症状や機能変化が、微小粒子状物質への曝露の短期的変動と関連がみられることは、毒性学知見や疫学知見から示されている。具体的には、短期曝露影響の知見において、高濃度出現時に健康リスクが上昇する傾向がみられている。長期曝露影響が短期曝露影響の発現に関わる個人の感受性に関与している可能性はあるものの、長期曝露影響と区別されるこれらの短期的な曝露に伴って発現する種々の影響が存在する。したがって、公衆衛生上の観点からは、長期曝露と短期曝露の両者による健康影響からの保護を目的とした環境基準を設定することが必要である。

一般に、地域における微小粒子状物質の長期平均濃度(年平均値等)と短期平均濃度(日

平均値等)の高濃度出現頻度の間には、経験的に高い相関が観察される。すなわち、長期平均濃度又は短期平均濃度に関する一方の基準を定めて、一方の平均濃度をその基準以下に低減する対策を図ることにより、もう一方の平均濃度に関しても低減効果が一定程度作用し、濃度分布全体が引き下げられることが期待される。しかしながら、両者の関連性には統計学的な誤差変動が含まれること、短期曝露と長期曝露による健康影響の発生パターンには差があると考えられること、また、微小粒子状物質濃度は発生源条件や気象条件等の要因によって変動するが、地域によっては長期平均濃度の変動を規定する要因と短期平均濃度の変動を規定する要因が異なる場合がある。図1に概念的な説明を示したように、曝露濃度分布全体を平均的に低減する意味での長期平均濃度に関する基準(以下、「長期基準」という。)のみを設定した場合には、長期基準以下に低減しようとする効果が高濃度領域にも及ぶ地域があるとともに、高濃度領域の低減効果が不十分な地域が残る可能性(図中赤丸箇所)がある。曝露濃度分布のうち、高濃度領域の濃度出現を減少させる意味での短期平均濃度に関する基準(以下、「短期基準」という。)を長期基準と併せて設定することによって高濃度領域の低減効果をより確実に担保することができると考えられる。長期基準と短期基準の両者の基準を設定することによって、微小粒子状物質の長期曝露影響及び短期曝露影響に関して十分な健康の保護が図られるものとする。

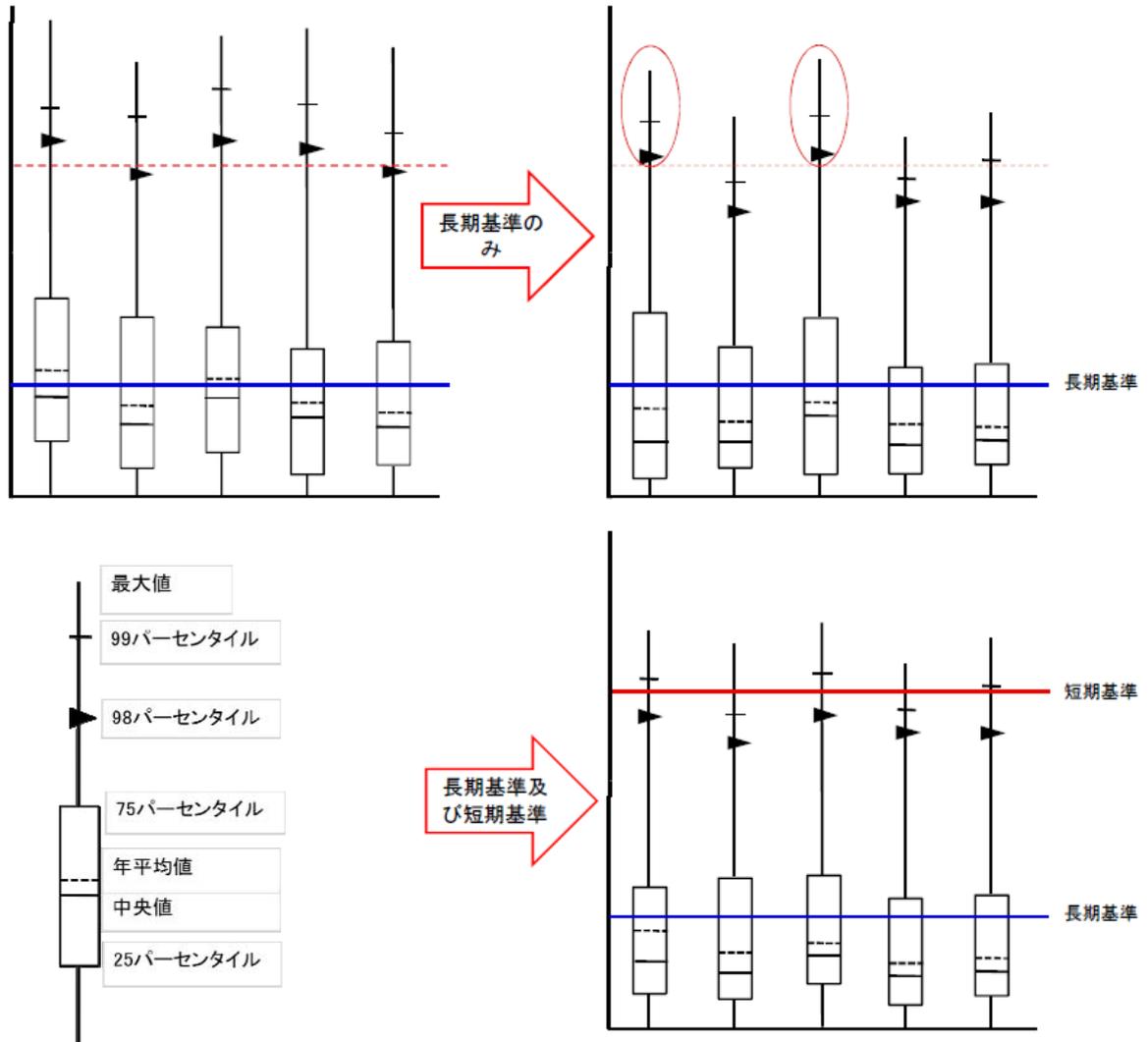


図 1. 長期基準のみの場合と長期基準と短期基準両者の場合 (箱ひげ図は各仮想地域の PM_{2.5} 濃度日平均値の分布を表す。赤点線は短期基準値に相当する水準を示す。)

2. 長期基準の考え方

先に述べたように、長期平均濃度と短期平均濃度の高濃度出現頻度の間には高い相関が観察されることから、長期基準は短期曝露による健康影響に関しても一定の低減効果を持つことが期待できるが、長期曝露による健康影響を低減することが第一義的な役割である。

これまで行われてきた微小粒子状物質への長期曝露影響に関する疫学研究では、数年から十数年という調査期間における曝露と健康影響との関連性が検討されてきた。どの程度の長さの曝露によって健康影響が生ずるのか、また、どの程度の期間の曝露が最も健康影響と関連するかについては明確とはなっていない。しかしながら、長期基準として年平均値を採用した場合には、1年を超える期間の累積的な曝露による健康影響についても保護することができ

ると考えられる。一方、長期基準として1年よりも長い平均化時間を採用することは、大気汚染状況の評価に時間的な遅れを生じさせることになる。また、1年よりも短い季節や数ヶ月間の曝露による健康影響に関する知見は現時点では限られており、長期基準として1年よりも短い平均化時間を採用することは困難である。したがって、長期基準としては年平均値を採用することが妥当であると考えられる。

今般、統計学的に有意な相対リスクを示す疫学知見において、対象地域の濃度の平均値又は濃度範囲の中間付近の領域は、研究対象のデータが最も集中するため、最も健康影響が確からしいと水準と考えられるが、これらの水準と併せて、濃度－反応関係の統計学的信頼区間の幅の広がりや相対リスクの上昇についても留意して、複数の知見から健康影響が確からしい濃度を見いだすための評価を行った。

なお、日米の疾病構造の相違の特徴や大気中濃度の相違の特徴に関する以下の考察から、国外の疫学知見も含めて評価することは公衆衛生の観点からも妥当と考え、評価を進めることとした。

- 循環器疾患については、国内知見と米国知見の結果が異なっている可能性が示されているが、リスクファクターの分布や疾病構造の違いによって結果に差が生じていると解釈できる。現時点において、日本では長期曝露影響が顕在化していないものの、米国の疫学知見の結果、日本国内の20都市研究における急性心筋梗塞死亡に限った解析による死亡リスク上昇を示す結果や、種々の毒性学知見の結果(心筋梗塞モデルによる不整脈誘発、自律神経機能への影響、呼吸器刺激、血管系の形態的な変化や血液性状の変化等)を踏まえれば、心疾患に関するリスクが高い者に関して、微小粒子状物質による影響を受けている可能性を否定するものではない。さらに、短期曝露と死亡に関する疫学知見では、国内知見においても国外知見と同様にリスクの上昇がみられている。
- 肺がん死亡については、国外知見において統計学的に有意な影響がみられる知見と有意ではないが影響がみられる知見の両者があるが、いずれの場合も単位濃度あたりのハザード比の大きさは類似しており、日本における疫学知見とも一致していた。死亡以外の呼吸器系に対する影響については国内外の知見に大きな相違はみられていない。

- 日本と米国では、硫酸塩濃度等の粒子状物質中の成分にはやや違いがみられることが報告され、硫酸塩が微小粒子状物質の健康影響に関して重要な成分である可能性を示唆する知見も存在するものの、現在の知見では特定の成分が健康影響と関連していることを示す明確な証拠はない。

環境基準の設定に当たっての指針値を検討するための出発点として、まず、第6章の「微小粒子状物質の健康影響に関する定量的評価」で示した死亡やその他の種々のエンドポイントについてPM_{2.5}への長期曝露との関連性を報告している個々の疫学研究(コホート研究等)における対象地域の平均濃度や濃度－反応関係に関する情報に基づいて、健康影響が生ずることが確からしい濃度水準を整理した。

死亡をエンドポイントとするコホート研究のうち、米国6都市研究のオリジナル研究における6都市全体の全調査期間のPM_{2.5}平均濃度は18.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (6都市の濃度範囲11.0～29.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)であった。米国6都市拡張研究では、6都市全体の全調査期間のPM_{2.5}平均濃度は16.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (6都市の濃度範囲10.8～24.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)であった。ACS研究のオリジナル研究では、全体のPM_{2.5}平均濃度は18.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (各都市の濃度範囲9.0～33.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)であった。ACS拡張研究では、全体のPM_{2.5}平均濃度は17.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (各都市の濃度範囲7.5～30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)であった。これらの研究において、対象地域の全調査期間のPM_{2.5}濃度は、概ね年平均値16～18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。米国6都市研究及び米国6都市拡張研究では、対象地域数が少ないために濃度－反応関係について精密な検討を行うことに制限があるが、PM_{2.5}濃度が概ね15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下の地域と比較して、20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える地域で死亡リスクの上昇がみられているとみなすことができる。ACS拡張研究では、PM_{2.5}濃度と相対リスクの関係について平滑化された濃度－反応関係とその信頼区間が示されている。米国EPA等の健康影響評価文書では、この図に基づいて濃度－反応関数の信頼区間の幅が広がることが示されたのは、12～13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を下回る領域からであったとされている。しかしながら、低濃度領域における信頼区間の幅の広がり、低濃度領域における対象地域数にも依存するものであり、濃度－反応関係の統計学的信頼性のみを反映するものではない。

日本における三府県コホート研究では、調査期間10年(1984～1993年)の6地域のSPM平均濃度は35.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、濃度範囲は22～45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、PM_{2.5}/SPMの比を0.7として推計されたPM_{2.5}平均濃度は24.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、濃度範囲は15～32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。調査期間15年

(1984～1998年)の6地域のSPM平均濃度は $35.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、濃度範囲は $21\sim 44\mu\text{g}/\text{m}^3$ あり、 $\text{PM}_{2.5}/\text{SPM}$ の比を0.7として推計された $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度は $24.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、濃度範囲は $14\sim 31\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。三府県コホートにおいてはSPM濃度に基づいた $\text{PM}_{2.5}$ 濃度推計の誤差を約 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ と見積もっていることから、対象地域の $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度は $20\sim 30\mu\text{g}/\text{m}^3$ と考えることができる。三府県コホート研究では対象地域数が少ないために、米国6都市研究と同様に濃度－反応関係について精密な検討を行うことに制限があるが、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度が概ね $27\sim 31\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える地域で死亡リスクの上昇がみられているとみなすことができる。三府県コホート研究における $\text{PM}_{2.5}$ 推計濃度の誤差を考慮すれば、概ね $22\sim 36\mu\text{g}/\text{m}^3$ と考えられる。

死亡以外のエンドポイントに関する疫学研究のうち、カルフォルニア子供研究からいくつかの報告があり、対象12地域の1994年の $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度は $15.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (濃度範囲 $6.7\sim 31.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)、1996～1999年の $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度は $13.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ (濃度範囲 $5.5\sim 28.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)、1994～2000年の $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度は $13.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ (濃度範囲 $5.6\sim 28.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)であった。カリフォルニア子供研究では、対象12地域の全体的な傾向として、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度と肺機能の成長に関連がみられているが、平均濃度が $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ を下回る複数の地域と、平均濃度が $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 付近の地域において肺機能の成長に差があると結論づけることは困難である。

米国6都市研究において、子供の呼吸器症状との関連性に関する報告では、対象地域の $\text{PM}_{2.5}$ の調査前1年平均値(1980～1981年)は $21.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ (濃度範囲は $11.8\sim 36.7\mu\text{g}/\text{m}^3$)であった。米国・カナダ24都市研究では1988～1991年の $\text{PM}_{2.1}$ 平均濃度は $14.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ (濃度範囲 $5.8\sim 20.7\mu\text{g}/\text{m}^3$)であった。

我が国における微小粒子状物質曝露影響調査の全国7地域の $\text{PM}_{2.5}$ 濃度は、ベースライン調査時で平均濃度 $25.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ (濃度範囲 $19.2\sim 28.4\mu\text{g}/\text{m}^3$)であった。

$\text{PM}_{2.5}$ への長期曝露との関連性を報告している死亡に関するコホート研究や死亡以外の呼吸器系への影響に関する横断研究における対象地域の濃度範囲のうち、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度が $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の範囲については、国内外の多くの疫学知見において対象地域の濃度範囲の平均を超える水準であり、濃度－反応関係に関する検討においても健康影響が生じることが確からしいとされる濃度水準とみなせる。

$\text{PM}_{2.5}$ への長期曝露との関連性を報告しているコホート研究の中で、対象地域の $\text{PM}_{2.5}$ 平均濃度が $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ を下回っているものにWHI研究があるが、この研究の対象集団における心血管疾患死亡率は日本における一般集団とは大きく異なっており、リスクファクターの分布も異なっている。また、曝露濃度として2000年の $\text{PM}_{2.5}$ 濃度のみを用いていることから、曝露濃

度に関する不確実性が大きいと考えられる。

ACS 拡張研究やカリフォルニア子供研究について、PM_{2.5}濃度が15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を下回る濃度領域での健康影響を示すものではないかという議論もあるが、この濃度領域に関する疫学知見は非常に限られており、濃度－反応関係に関する不確実性も大きいと考えられ、現時点では健康影響が生じることが確からしいとされる濃度水準と見なすことはできない。

国外知見において、死亡以外の呼吸器症状や肺機能変化等のエンドポイントの健康影響に関して関連を報告している知見の平均濃度は、概ね年平均値15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えており、死亡をエンドポイントとする知見と概ね同じ濃度領域において健康影響を示していた。疫学研究においては、死亡より重篤度の低い呼吸器症状や肺機能変化等の健康影響が、常に死亡のような重度の健康影響より早期に、又は低濃度で検出できるとは限らない。これはエンドポイントを評価する手法の精度等にも関連することである。今回の評価では、死亡をエンドポイントとして見いだされた健康影響が生じることが確からしい濃度水準よりも低い濃度で、死亡以外の健康影響が生じている確かな知見はなかった。

国内知見については、死亡及び死亡以外のエンドポイントのいずれにおいても20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える濃度水準で影響がみられ、20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下の濃度領域において、現時点では健康影響が顕在化していないものと考えられる。PM_{2.5}への曝露による健康影響に関して、人種差や微小粒子状物質の成分の違いによって影響が異なることは明らかでないことから、平均濃度20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下の濃度領域において健康影響を示している国外知見も含めて評価することは妥当と考える。

以上に示した死亡及び死亡以外の呼吸器症状や肺機能など種々のエンドポイントの健康影響に関する国内外の疫学知見において、健康影響が生じることが確からしいとされる濃度水準を出発点として総合的に評価し、長期基準の指針値を設定するにあたっては、疫学知見の濃度－反応関係に関する安定した関連性や、感受性の高い集団を適切に保護することも十分に考慮して、年平均値15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ が最も妥当であると判断した。

また、PM_{2.5}への短期曝露による死亡、並びに死亡以外の種々のエンドポイントとの有意な関連性を報告している疫学研究の対象地域における年平均値の水準からみれば、年平均値15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を長期基準とした場合には、濃度分布が平均的に引き下げられることによって短期的な濃度変動幅が低減し、短期曝露影響についても一定程度の健康保護の効果が期待できる。

3. 短期基準の考え方

微小粒子状物質への高濃度の短期曝露に伴って発現すると考えられる呼吸器系や循環器系における種々の症状や機能変化をはじめとするさまざまな健康影響が示されている。短期基準は、これら健康影響からの保護が第一の役割と考えられる。そのため、長期平均濃度と短期平均濃度の高濃度出現頻度に関する統計学的な関連性を考慮したうえで、長期基準のみでは十分に制御することが困難である短期的な高濃度曝露による健康影響を防止する観点で、短期基準を設定することが考えられる。

多くの微小粒子状物質への短期曝露の疫学研究では日平均値、若しくは数日平均に基づいた関連性が報告されている。24時間よりも短い1時間から数時間の曝露による影響を報告している疫学研究も存在するが、これらの知見は限定的であり、かつ、日平均値基準によっても、それより短い平均化時間の曝露による健康影響からも一定程度保護できると考えられる。さらに、数日間持続するエピソードによる健康影響についても、日平均値基準によって保護することが可能である。したがって、短期基準として日平均値を採用することが妥当であると考えられる。

1 年間の日平均値の頻度分布を考慮した場合、年平均値を一定水準以下に保つためには、日平均値の分布全体が低濃度方向に移行し、その際、高濃度領域も同時に低下傾向を示すことが期待できる。一方で、日平均値の年間最高値やそれに近い高濃度領域の変動傾向は分布全体の挙動とは異なる場合がある。

日本の20都市研究の結果において、98パーセンタイルを超える濃度領域でリスクがより大きく上昇している傾向がみられる等、長期基準のみでは十分に制御することが困難な高濃度出現時において健康リスクが上昇することが考えられる。その一方、統計学的な安定性をみると、年平均値と98パーセンタイルを超える濃度領域との関係は不安定となる。全国の大気測定局におけるPM_{2.5}濃度の解析結果によると、日平均値の年間98パーセンタイル値(以下、「98パーセンタイル値」という。)と年平均値との関連性については、全ての年度で決定係数が0.8以上となり、パーセンタイルが小さくなるに従って関係が安定してくる。環境基準の評価において、地域における大気汚染に対する施策の効果等を的確に判断することが求められることから、統計学的な安定性の観点は重要である。したがって、これらの健康リスクの上昇や統計学的な安定性を踏まえれば、短期基準は98パーセンタイルの高濃度領域を制御することを目的に設定することが適切であると考えられる。すなわち、長期基準(年平均値)を設定することによって濃

度分布の大部分を制御するとともに、健康リスクの上昇のみられる高濃度領域を制御するために 98 パーセンタイル値を目安として短期基準を設定することによって、長期及び短期曝露による健康影響をそれぞれ適切に防止することができると考えられる。

その観点から、まず短期曝露影響に関する健康影響がみられる疫学知見において 98 パーセンタイル値を算出した。次に年平均値の指針値に対応する 98 パーセンタイル値を算出し、その 98 パーセンタイル値を下回る濃度領域で健康影響がみられるか検証することによって、日平均値の指針値を定めることが考えられる。

この短期基準の考え方は米国の環境基準設定の日平均値の考え方と類似しており、米国の $PM_{2.5}$ の日平均値の基準値は、 $PM_{2.5}$ への短期曝露影響に関する疫学知見を検討し、有意な関係を報告した疫学研究では、98 パーセンタイル値が約 $39\mu\text{g}/\text{m}^3$ を上回る研究が多数を占め、 $30\sim 35\mu\text{g}/\text{m}^3$ の範囲内では有意な関係を示す疫学知見は少数で、この濃度範囲を下回る水準における研究は極めて限られていることから、24 時間基準値を $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ としている。

なお、年平均値と 98 パーセンタイル値との統計学的な関連性は地域によって異なり、米国における両者の関係が日本においても保たれているという保証はない。また、両者の関係は経年的にも変動する等、発生源やエピソード的な高濃度出現の影響を受けていることも考えられることから、年平均値の指針値に対応する 98 パーセンタイル値の算出にあたっては、日本の大気環境を反映することが妥当である。具体的には、気象等の要因による年毎の変動やその他の誤差要因も考慮して、これまで日本国内の各地で実測されてきた $PM_{2.5}$ 濃度に関する測定値をすべて用いて算出された回帰式に基づいて、統計学的な信頼区間も考慮することによって、最も安定した 98 パーセンタイル値を見いだすことができると考えられる。

日死亡及びその他のエンドポイントと $PM_{2.5}$ への短期曝露に関して有意な関連を示した国内外の複数都市研究において、各都市の年平均値は概ね $13\sim 20\mu\text{g}/\text{m}^3$ の範囲であり、対応する 98 パーセンタイル値は $39\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えていた。有意な関係を示す単一都市研究における 98 パーセンタイル値は $32\sim 59\mu\text{g}/\text{m}^3$ の範囲であった。

日本における日死亡に関する疫学知見においても、各対象地域の調査期間中の 98 パーセンタイル値は $31\sim 55\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。また、地域別にみた場合に、統計学的に有意な日死亡リスクの上昇を示した地域の調査期間中の 98 パーセンタイル値は概ね $44\sim 47\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。多くの地域で、これらの濃度を超える領域において死亡リスクの上昇が示されていた。また、肺機能に関する研究において、ピークフロー値の有意な低下を示した地域の 98 パーセンタイル

値はこれらの濃度を超える水準であった。毒性学知見において、低濃度領域においても呼吸器系及び循環器系への影響に関する用量－効果関係を示す結果から、これらの濃度を超える領域において各種指標の影響がみられていた。

我が国の測定値に基づく長期基準に関する指針値である年平均値 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ に対応する 98 パーセンタイル値は、年平均値の測定誤差及び回帰式の 95%信頼区間も考慮すると $35\sim 38\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。また、個々の測定値の 95%信頼区間で推定すると、年平均値 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ に対応する 98 パーセンタイル値は $28\sim 44\mu\text{g}/\text{m}^3$ となっており、相当程度の変動があることが示されている。このことは、長期基準のみの設定では 98 パーセンタイル値が高濃度領域に広がる状況があり得ることを示している。

これらの国内外の複数都市研究から導かれた 98 パーセンタイル値は $39\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えると考えられ、この数値は長期基準に関する指針値である年平均値 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ に対応する 98 パーセンタイル値の推定範囲 ($28\sim 44\mu\text{g}/\text{m}^3$) に含まれている。有意な関係を示す単一都市研究における 98 パーセンタイル値の下限は $30\sim 35\mu\text{g}/\text{m}^3$ の範囲と考えられた。

このことから、長期基準の指針値である年平均値 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ と併せて、 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ を短期基準の指針値とすることが最も妥当であると考えられる。このことにより、微小粒子状物質の長期曝露影響及び短期曝露影響に関して十分な健康の保護が図られるものとする。

年平均値に対応する98パーセンタイル値の推計について

PM_{2.5} 質量濃度の年平均値に対応する日平均値の年間 98 パーセンタイル値について、PM_{2.5}濃度の測定データを用いて検証した。日平均値の年間 98 パーセンタイル値の算出に当たっては、これまでの PM_{2.5} 質量濃度測定結果(50℃加熱方式 TEOM)によって算出された回帰式に基づいて行うこととした。

また、年平均値と日平均値の 98 パーセンタイル値との関連性に係る回帰式の導出に当たっては、2001 年度から 2008 年度における全国の PM_{2.5} 質量濃度測定結果(50℃加熱方式 TEOM)を用いて、切片を有する回帰式(y=ax+b)だけでなく、切片を有しない回帰式(y=ax)について解析を実施した。回帰式の導出に当たっては、回帰式や測定結果の有する誤差要因にも考慮し、回帰式の傾きや切片について 95%信頼区間の幅についても算出した(表 2、図 6)。

回帰式の精度を表す決定係数は切片を有する回帰式の方が高いこと、低濃度領域においては濃度の高い方に、また、高濃度領域においては濃度の低い方に測定結果が検出される傾向にあることから、経験的に切片を有する回帰式の方が適切と考えられる。

これらのことから、表 2 に示す切片を有する回帰式を用いて、年平均値を 15μg/m³と仮定し、かつ年平均値の測定誤差*1を考慮して年平均値を 14.65~15.35μg/m³とした場合の日平均値の年間 98 パーセンタイル値を試算すると 35.8~36.9μg/m³となり、回帰式の 95%信頼区間を考慮して試算すると 35.1~37.6μg/m³となった。また、個々の観測値についても 95%信頼区間*2を考慮して試算すると 28.4~44.3μg/m³となった。

表 2 年平均値と日平均値の年間 98 パーセンタイル値の統計的関連性
(2001~2008 年度、全国、一般局+自排局)

	N	回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²	t(fe, α)	標準誤差 D[a]	傾き(a) 95%信頼区間		標準誤差 D[b]	切片(b) 95%信頼区間	
						最小	最大		最小	最大
切片を有する回帰式(y=ax+b)	245	y= 1.613 x +12.154	0.851	1.970	0.043	1.528	1.698	0.929	10.324	13.984
切片を有しない回帰式(y=ax)	245	y= 2.161 x	0.745	1.970	0.014	2.133	2.189	—	—	—

※t(fe, α) : 自由度 fe の t 分布で、両側確率 α となる t の値。自由度は fe=N-2 (y=ax+b)、fe=N-1 (y=ax)、α=0.05 とした。

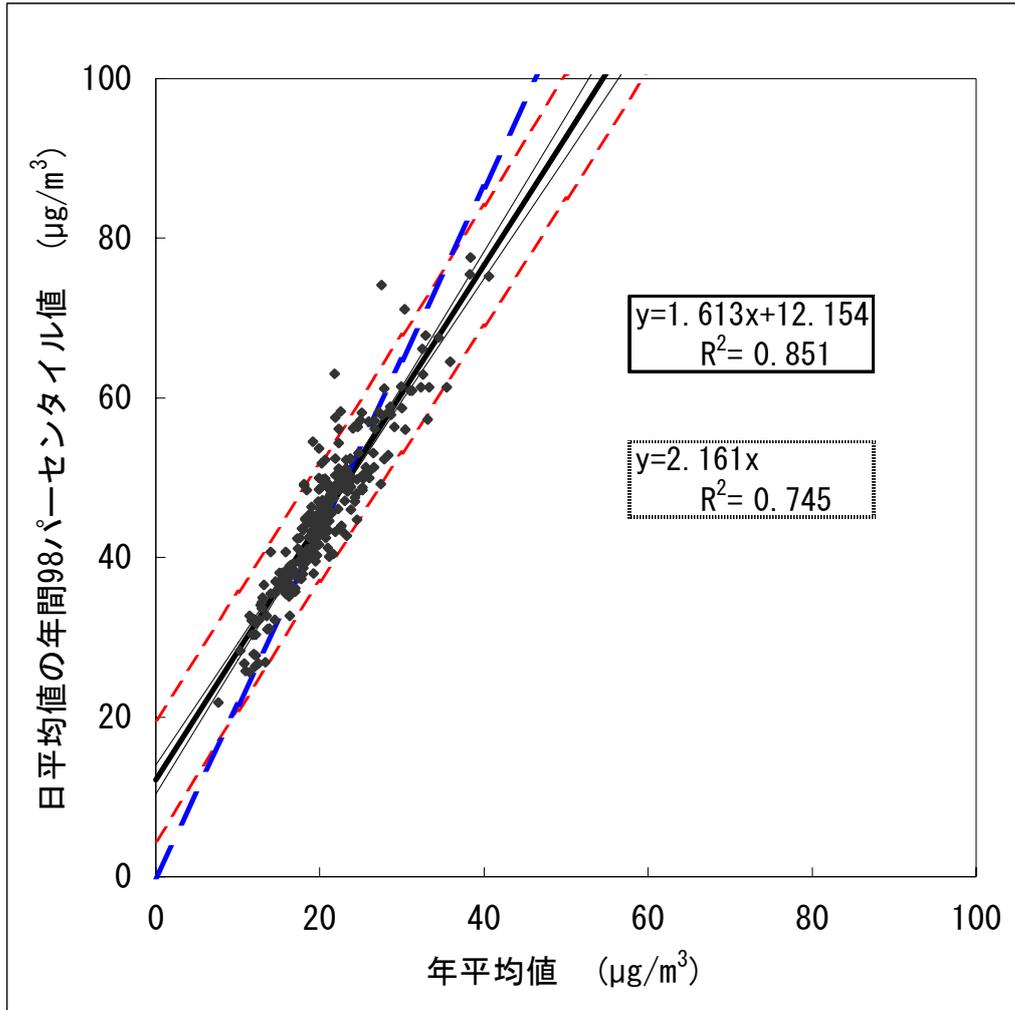
※傾き(a)と切片(b)の信頼区間については次のとおり。

傾き(a) : 最小=a-t(fe, α)*D[a]、最大=a+t(fe, α)*D[a]、切片(b) : 最小=b-t(fe, α)*D[b]、最大=b+t(fe, α)*D[b]

年平均値に対する日平均値の推定

	年平均値 (μg/m ³)	年平均値に対する日平均推定値 (μg/m ³)				
		推定値	回帰式95%信頼区間		観測値95%信頼区間	
			最小	最大	最小	最大
切片を有する回帰式 (y=ax+b)	14.65	35.78	35.08	36.48	28.41	43.15
	15	36.34	35.67	37.02	28.97	43.72
	15.35	36.91	36.25	37.56	29.54	44.28
切片を有しない回帰式 (y=ax)	14.65	31.65	31.24	32.07	22.08	41.23
	15	32.41	31.98	32.84	22.84	41.98
	15.35	33.17	32.73	33.60	23.60	42.74

※年平均値(N=245)の標準誤差σ=0.35



太線 : 切片を有する回帰式 $y=ax+b$
 細線 : 回帰式の95%信頼区間
 太破線 : 切片を有しない回帰式 $y=ax$
 破線 : 観測値の95%信頼区間

図5 年平均値と日平均値の年間98パーセンタイル値の統計的関連性
(2001~2008年度、全国、一般局+自排局)

※1 年平均値の測定誤差 :

各測定局における2001~2007年度の年平均値を用いて標準誤差を算出し、測定誤差 $0.35\mu\text{g}/\text{m}^3$ とした。

※2 観測値の95%信頼区間 :

実際の測定(観測)においては、年平均値に対する日平均値の年間98パーセンタイル値にはばらつきが存在する。得られた回帰式に対して観測された日平均値のばらつきを考慮し、日平均値の収まる区間を推定したものである。表2に示すように年平均値を $14.65\sim 15.35\mu\text{g}/\text{m}^3$ とした場合、日平均値の年間98パーセンタイル値が $28\sim 44\mu\text{g}/\text{m}^3$ に入る確率は95%であることを示している。

微小粒子状物質濃度変動に関する統計学的特性について

大気汚染物質の環境濃度は、発生源条件、気象条件、地形条件等の影響を受け、一定の地域内でも時間的に変化する。こうした環境濃度の時間的変化を把握するためには、異なる平均化時間における測定値の統計学的な相互関連性の解析や異なる地域の測定結果によるトレンド分析を行う必要がある。

このため、2001 年度から実施している微小粒子状物質曝露影響調査等において、一般局及び自排局で測定を行っている PM_{2.5} (50°C加熱方式 TEOM) の年平均値や日平均値の測定結果を用いて、異なる平均化時間における統計学的特性を把握するための整理・解析を行った。

具体的には、測定局における年平均値と日平均値(日平均値の年間最大値、99 パーセンタイル値、98 パーセンタイル値等)の統計学的関連性をみるため、全測定局、地域別、測定局種別に経年的な解析を行った。

また、トレンド分析に当たっては、微小粒子状物質曝露影響調査等の測定結果を用いて、東京都板橋区、大阪府守口市、福岡県福岡市の 2001 年 4 月 1 日から 2008 年 3 月 31 日までの 7 年間にわたり、毎時測定した PM_{2.5} 濃度測定結果から、その期待値、分散の日内変動、週内変動、年内変動について、一般化加法モデルを用いて抽出した。

1. 年平均値と日平均値の統計学的関連性

測定局における年平均値と日平均値の統計学的関連性をみるため、日平均値の高濃度出現頻度(年間最大値、99パーセンタイル値、98パーセンタイル値、95パーセンタイル値、90パーセンタイル値)と中央値を選択して解析を行った(表1、図1)。

全国の測定局(一般局及び自排局)の測定結果によると、年平均値と日平均値の年間最大値との関連については、ばらつきが大きく、2001年度から2004年度にかけての決定係数^{※1}は0.5未満であった。年平均値と日平均値の各パーセンタイル値との関係は、パーセンタイルが小さくなるに従って決定係数が大きくなり、年間98パーセンタイル値との比較では全ての年度で決定係数が0.8以上になり、年間90パーセンタイル値との比較では全ての年度で決定係数が0.9以上となった。一般局、自排局別に見た結果も、パーセンタイルが小さくなるに従って決定係数が大きくなる傾向は同様であり、局種の違いによる特徴は明確ではなかった。

年平均値と日平均値の高濃度出現頻度との関連を示す回帰式の傾きについては、日平均値の年間最大値の場合、年度によって大きく変動し、パーセンタイルが小さくなるに従って年度によるばらつきは小さくなる。年間98パーセンタイル値の回帰式の傾きは、年度によってばらつきがあり、1.2～2.3の範囲内で推移していた。年間90パーセンタイル値の回帰式の傾きは、1.3～1.6の範囲内で推移していた。一般局、自排局別に見た結果も、パーセンタイルが小さくなるに従って年度によるばらつきが小さくなる傾向は同様であり、局種の違いによる特徴は明確ではなかった。

※1 決定係数 (R^2) :

相関係数 R の2乗であり、1に近いほど回帰式の精度が高いこと(測定結果の変動の大部分が回帰式によって説明できること)を意味している。統計学的な基準はないが、一般的には0.8以上で精度が非常によい、0.5以上で精度がややよい、0.5未満で精度がよくないとされている。

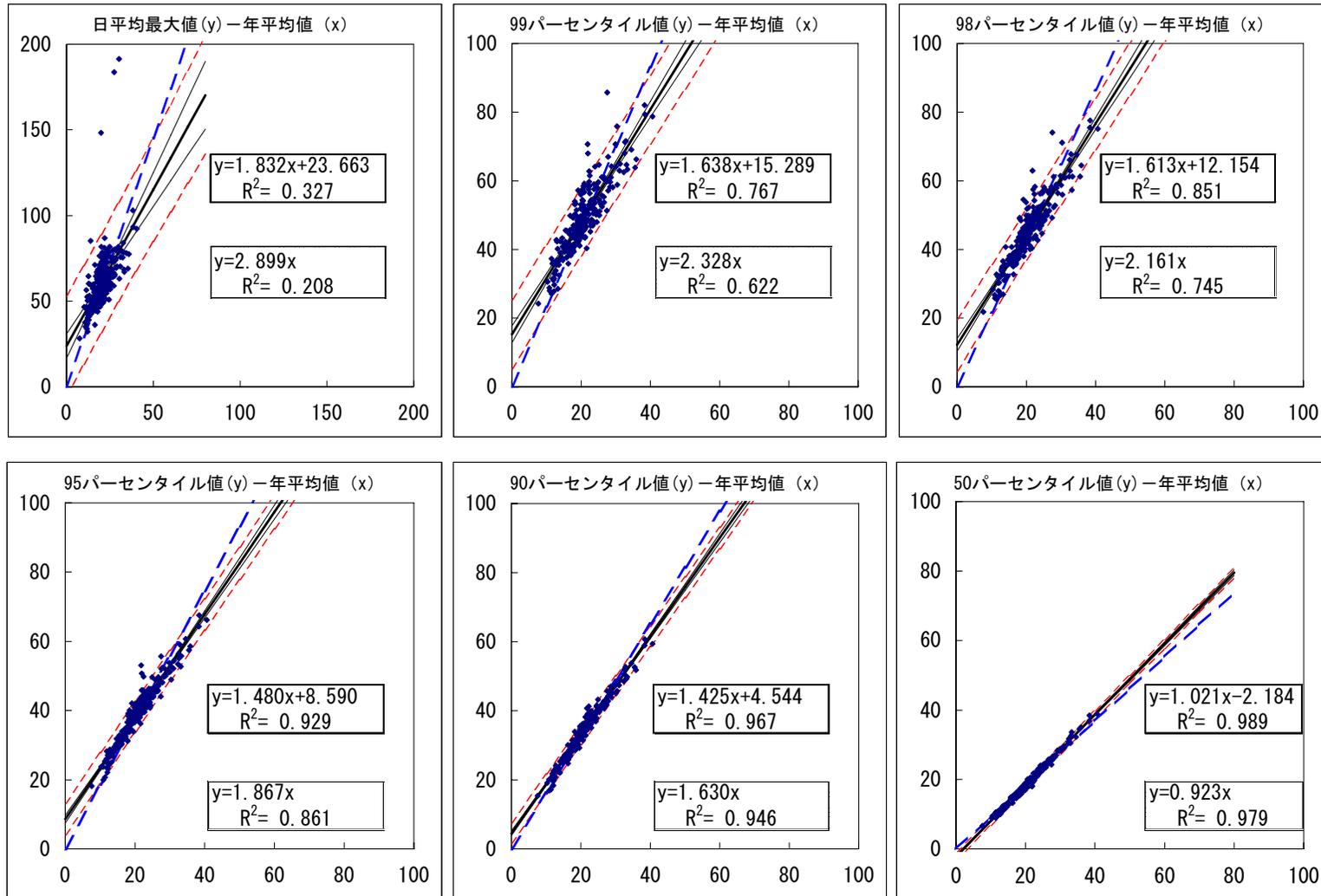
表1 年平均値と日平均値の関係

PM _{2.5} (50°C加熱方式TEOM)		全国		一般局+自排局									
年度	N	日平均値最大値		日平均値99パーセンタイル値		日平均値98パーセンタイル値		日平均値95パーセンタイル値		日平均値90パーセンタイル値		日平均値50パーセンタイル値	
		回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²	回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²	回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²						
2001	28	y=1.905 x +24.417	0.230	y=1.723 x +13.641	0.832	y=1.717 x +9.824	0.911	y=1.469 x +8.989	0.963	y=1.381 x +5.415	0.974	y=1.003 x -1.839	0.996
2002	33	y=1.966 x +28.818	0.312	y=1.649 x +18.581	0.786	y=1.605 x +14.786	0.867	y=1.451 x +10.480	0.929	y=1.407 x +5.747	0.977	y=1.058 x -3.464	0.993
2003	33	y=1.162 x +32.472	0.486	y=1.240 x +21.835	0.801	y=1.260 x +18.301	0.908	y=1.302 x +11.678	0.965	y=1.322 x +6.455	0.970	y=1.050 x -2.490	0.986
2004	33	y=0.972 x +39.565	0.268	y=1.595 x +13.432	0.916	y=1.489 x +12.755	0.897	y=1.395 x +9.370	0.974	y=1.414 x +4.365	0.983	y=1.048 x -2.448	0.996
2005	33	y=1.191 x +32.446	0.518	y=1.307 x +20.672	0.806	y=1.429 x +15.137	0.896	y=1.406 x +9.668	0.937	y=1.379 x +5.828	0.967	y=1.038 x -2.442	0.993
2006	33	y=2.594 x +7.760	0.671	y=1.814 x +11.051	0.829	y=1.843 x +7.282	0.899	y=1.700 x +4.776	0.931	y=1.568 x +2.202	0.960	y=0.975 x -1.267	0.990
2007	33	y=2.844 x +10.571	0.275	y=2.529 x +3.183	0.784	y=2.301 x +2.298	0.801	y=1.818 x +3.247	0.833	y=1.551 x +1.894	0.914	y=0.939 x -0.957	0.973
2008	19	y=0.729 x +36.968	0.159	y=1.133 x +22.085	0.647	y=1.195 x +17.993	0.835	y=1.339 x +10.050	0.901	y=1.391 x +4.639	0.952	y=1.026 x -2.070	0.986
全年度	245	y=1.832 x +23.663	0.327	y=1.638 x +15.289	0.767	y=1.613 x +12.154	0.851	y=1.480 x +8.590	0.929	y=1.425 x +4.544	0.967	y=1.021 x -2.184	0.989
PM _{2.5} (50°C加熱方式TEOM)		全国		一般局									
年度	N	日平均値最大値		日平均値99パーセンタイル値		日平均値98パーセンタイル値		日平均値95パーセンタイル値		日平均値90パーセンタイル値		日平均値50パーセンタイル値	
		回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²	回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²	回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²						
2001	17	y=1.456 x +32.221	0.197	y=2.291 x +2.713	0.839	y=2.020 x +3.950	0.896	y=1.672 x +5.178	0.954	y=1.552 x +2.034	0.960	y=0.994 x -1.655	0.987
2002	17	y=2.794 x +12.720	0.642	y=2.383 x +5.052	0.796	y=2.039 x +6.685	0.829	y=1.985 x +0.850	0.904	y=1.739 x -0.231	0.975	y=0.944 x -1.406	0.978
2003	17	y=2.007 x +17.522	0.380	y=1.673 x +14.090	0.637	y=1.699 x +10.476	0.880	y=1.556 x +7.114	0.944	y=1.508 x +3.148	0.918	y=1.072 x -2.950	0.956
2004	17	y=1.082 x +38.179	0.096	y=1.382 x +17.576	0.764	y=1.503 x +13.082	0.840	y=1.525 x +7.366	0.962	y=1.565 x +1.862	0.983	y=1.019 x -2.062	0.994
2005	17	y=0.865 x +39.286	0.177	y=1.224 x +22.800	0.600	y=1.587 x +12.842	0.880	y=1.598 x +6.318	0.925	y=1.561 x +2.548	0.955	y=1.049 x -2.688	0.984
2006	17	y=3.529 x -6.529	0.734	y=2.454 x +1.074	0.851	y=2.404 x -1.761	0.924	y=2.163 x -2.618	0.960	y=1.912 x -3.492	0.987	y=0.907 x -0.214	0.986
2007	17	y=3.008 x +7.629	0.739	y=3.265 x -7.254	0.900	y=3.086 x -9.723	0.880	y=2.503 x -7.103	0.931	y=1.896 x -3.458	0.940	y=0.836 x +0.569	0.969
2008	14	y=0.698 x +37.439	0.096	y=1.440 x +17.375	0.682	y=1.297 x +16.348	0.784	y=1.360 x +9.881	0.893	y=1.435 x +4.153	0.953	y=1.032 x -2.164	0.979
全年度	133	y=2.103 x +19.362	0.378	y=2.051 x +8.572	0.695	y=1.978 x +6.081	0.804	y=1.809 x +3.119	0.896	y=1.655 x +0.648	0.952	y=0.977 x -1.476	0.970
PM _{2.5} (50°C加熱方式TEOM)		全国		自排局									
年度	N	日平均値最大値		日平均値99パーセンタイル値		日平均値98パーセンタイル値		日平均値95パーセンタイル値		日平均値90パーセンタイル値		日平均値50パーセンタイル値	
		回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²	回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²	回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²						
2001	11	y=1.674 x +33.060	0.065	y=1.455 x +21.097	0.642	y=1.554 x +14.469	0.789	y=1.426 x +9.930	0.922	y=1.253 x +9.227	0.952	y=1.012 x -2.113	0.994
2002	16	y=1.407 x +45.275	0.080	y=1.406 x +25.245	0.598	y=1.427 x +19.809	0.739	y=1.342 x +13.234	0.914	y=1.345 x +7.255	0.971	y=1.085 x -4.165	0.991
2003	16	y=1.063 x +34.238	0.633	y=1.161 x +23.561	0.849	y=1.190 x +19.781	0.901	y=1.245 x +13.012	0.958	y=1.294 x +7.014	0.978	y=1.025 x -1.779	0.984
2004	16	y=1.065 x +36.807	0.468	y=1.764 x +9.021	0.938	y=1.621 x +9.039	0.891	y=1.419 x +8.486	0.971	y=1.399 x +4.546	0.977	y=1.028 x -1.824	0.995
2005	16	y=1.518 x +24.129	0.780	y=1.467 x +16.436	0.897	y=1.474 x +13.525	0.900	y=1.348 x +10.809	0.933	y=1.304 x +7.476	0.973	y=1.024 x -2.085	0.994
2006	16	y=2.489 x +7.570	0.695	y=1.705 x +11.936	0.920	y=1.692 x +9.552	0.944	y=1.587 x +6.324	0.963	y=1.448 x +4.339	0.968	y=0.984 x -1.264	0.993
2007	16	y=2.660 x +14.367	0.137	y=2.431 x +2.962	0.787	y=1.964 x +7.571	0.824	y=1.561 x +6.980	0.894	y=1.384 x +4.671	0.937	y=0.970 x -1.353	0.982
2008	5	y=0.760 x +36.477	0.309	y=0.685 x +29.850	0.697	y=0.931 x +22.962	0.975	y=1.555 x +5.473	0.913	y=1.616 x -0.249	0.990	y=1.021 x -1.992	0.990
全年度	112	y=1.848 x +22.569	0.244	y=1.626 x +14.740	0.776	y=1.576 x +12.419	0.847	y=1.445 x +8.879	0.947	y=1.385 x +5.230	0.973	y=1.019 x -2.021	0.991

PM_{2.5} (50°C加熱方式TEOM)

単位 : μg/m³

全年度
[N=245]



※N=地点数 ※ 太線 : 切片を有する回帰式 $y=ax+b$ 細線 : 回帰式の95%信頼区間 ※決定係数が負の値となった場合には、 $R^2=0$ とした。
 太破線 : 切片を有しない回帰式 $y=ax$ 破線 : 観測値の95%信頼区間

図1 年平均値と日平均値との関係 (2001~2008年度、全国、一般局+自排局)

2. 年平均値と日平均値の経年変化の比較

測定局における年平均値と日平均値の関係をみるため、全国の測定局の年平均値、日平均値の高濃度出現頻度(年間最大値、99パーセンタイル値、98パーセンタイル値、95パーセンタイル値、90パーセンタイル値)と中央値の経年変化に関する形状を比較した。

全国の測定局の結果(図2 一般局及び自排局)によると、2001年度から2008年度にかけて年平均値が $7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 減少したのに対して、高濃度出現頻度を代表した年間98パーセンタイル値は $13\mu\text{g}/\text{m}^3$ 減少しており、高濃度出現頻度の減少が見られた。

全国的な測定結果から、日平均値の最大値は、年平均値や他の高濃度出現頻度における日平均値の経年変化と比較して、年度ごとの変動が激しく、経年変化のグラフの形状が異なっていた。99パーセンタイル値より小さい高濃度出現頻度の経年変化のグラフの形状は年平均値のグラフの形状と近似していた。

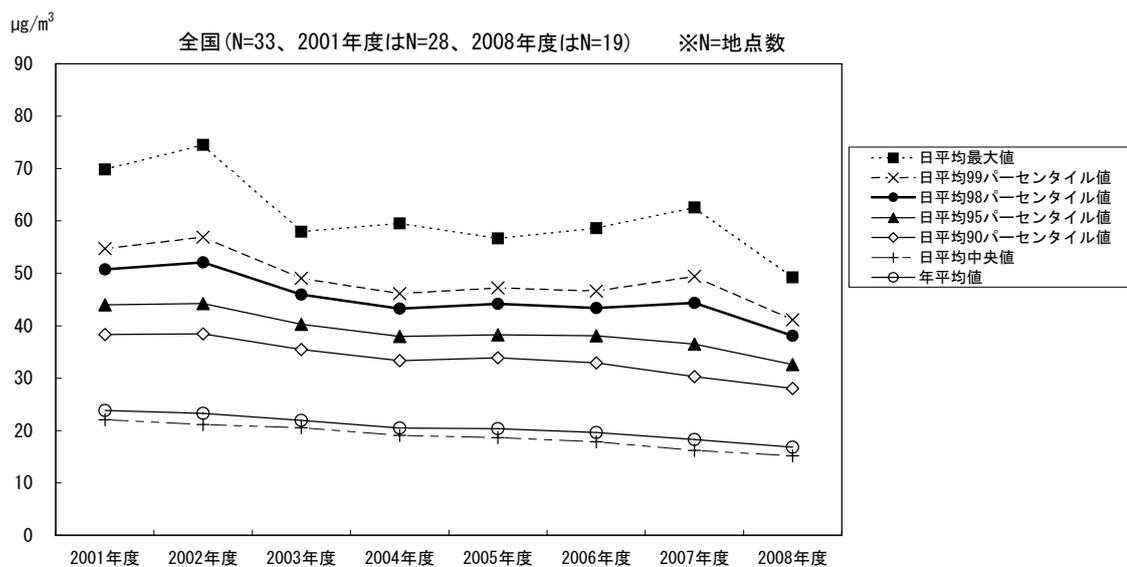


図2 年平均値と日平均値の経年変化の比較

3. 微小粒子状物質濃度変動の地域別トレンド分析結果

北海道札幌市、東京都板橋区、大阪府守口市、福岡県福岡市の4地域における $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の2001年4月1日0時から2007年3月31日23時までの7年間の1時間値測定結果から得られた時系列データからトレンド(系統的変動)を分析した。いずれの地域においても $\text{PM}_{2.5}$ 濃度時系列データの立方根変換が正規分布に近いことが確認された。そこで、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度立方根変換データに対して一般化加法モデル(GAM)を当てはめ、その結果、日内変動成分(24時間周期トレンド)、週内変動成分(7日間周期トレンド)、年内変動成分(365.25日周期トレンド)、長期トレンドが統計的に有意な系統的変動となっていることが確認された。すなわち、

PM_{2.5}濃度は平均的には、日中、土曜・日曜、12月から1月にかけては低い水準となっていることを示せた。さらに、4地域のPM_{2.5}濃度立方根データから、ここで抽出した上記4つのトレンドを引き去った残差を不規則変動成分とした。この不規則変動成分の分散についても、同様の方法でトレンドを抽出し、概ね日中、土曜・日曜は分散が大きくなっている傾向を確認した。算出したトレンド成分を基に各地域のPM_{2.5}濃度立方根変換データの平均値及び標準偏差の予測値を求め、これを基に平均0、分散1に標準化したデータの時系列プロットを4地域について算出した(図3)。図3から平均値±3標準偏差の外に分布する測定値は、いずれの地域においても低濃度側に偏っている測定値[縦軸の値が-3未満]が多いという特徴がみられた。

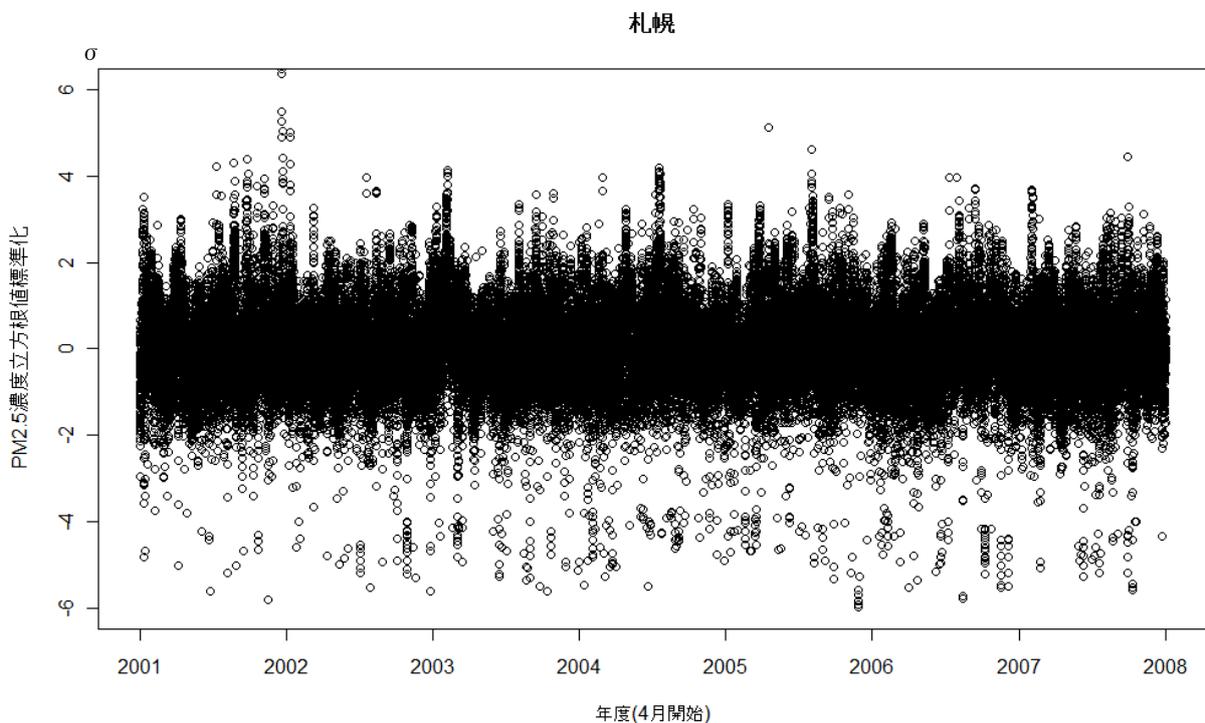


図3a 札幌の残差を標準化したデータの時系列プロット

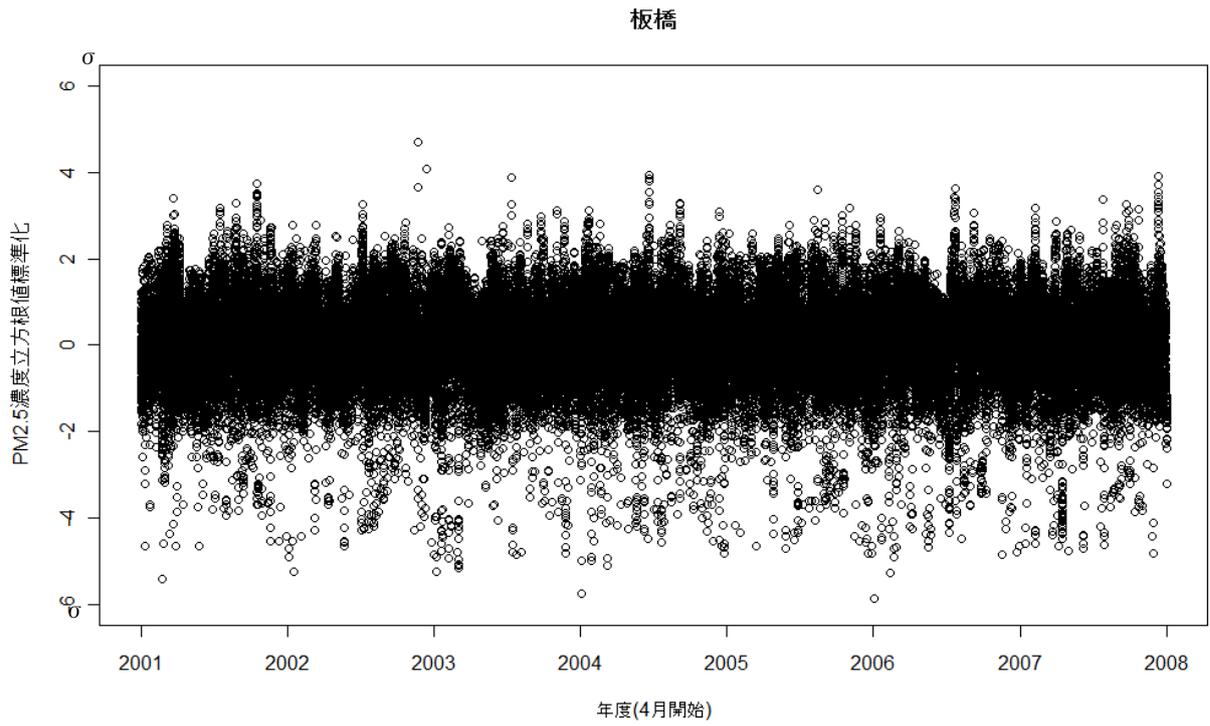


図3b 板橋の残差を標準化したデータの時系列プロット

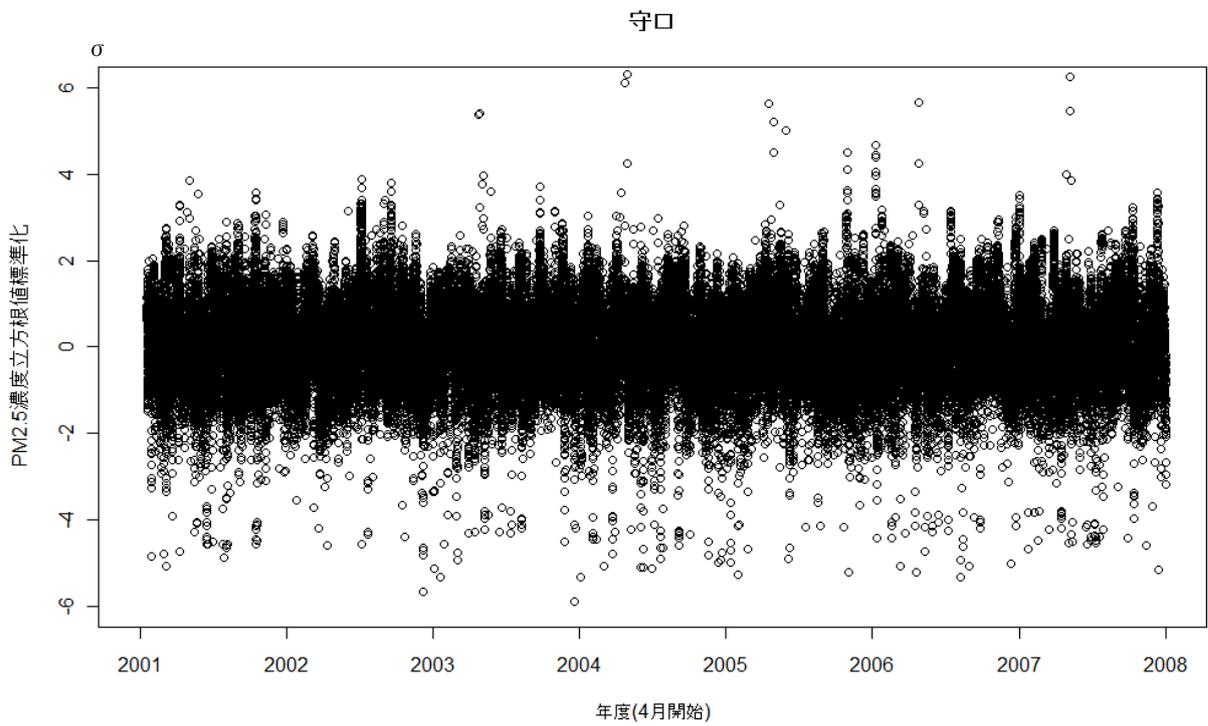


図3c 守口の残差を標準化したデータの時系列プロット

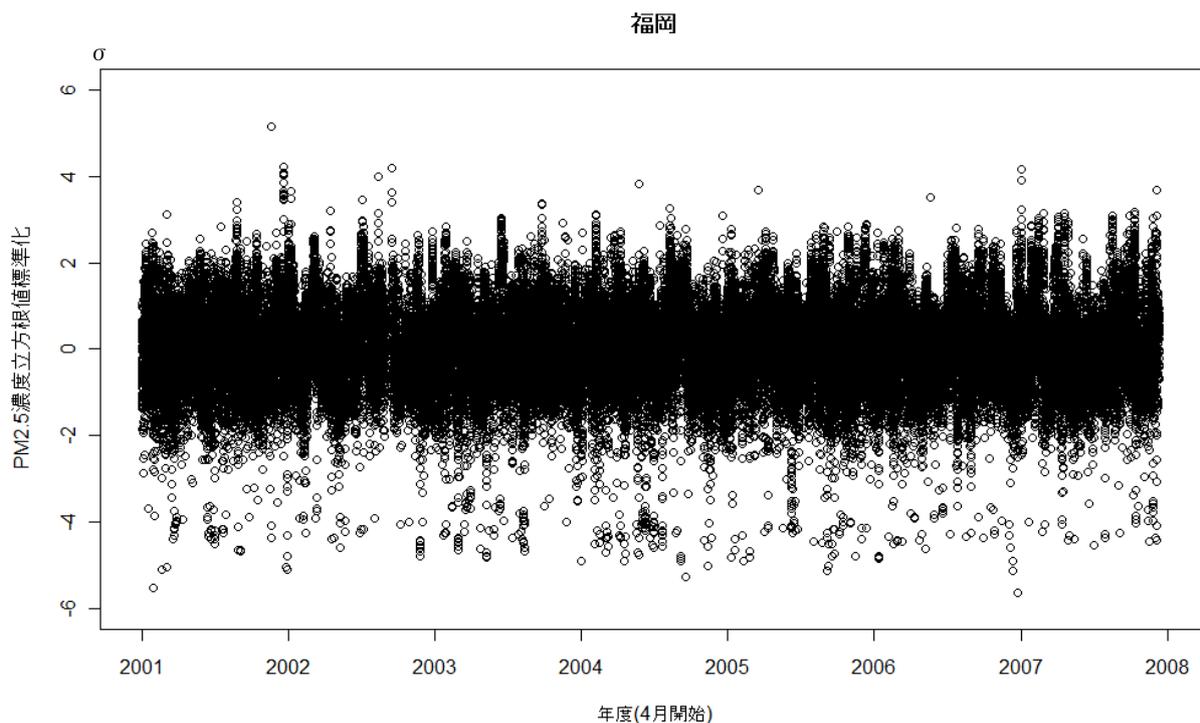


図3d 福岡の残差を標準化したデータの時系列プロット

以上のトレンド分析から求められた $PM_{2.5}$ 濃度立方根変換時系列データの予測値とその上限値に関する区間推定(予測値+2標準偏差)を3乗することで、 $PM_{2.5}$ 濃度時系列データの予測値(赤)、予測値+2標準偏差(緑)を求め、更に参照用に全データの98パーセンタイル値[青]を示した(図4 a, b, c, d)。これによると、いずれの地域においても、98パーセンタイル値はこの予測上限値とほぼ一致していることがわかる。同様の一致性は、日平均値の解析においても再現され、日平均値の年間98パーセンタイル値は、トレンドに基づく予測値+2標準偏差の代替として有効である。言い換えれば、 $PM_{2.5}$ 濃度の週間や季節的な傾向変動の存在を加味しても、日平均値の年間98パーセンタイル値を超える値は、概ね当該地域の予想される日常的な変動とは異なる値に相当する。

札幌

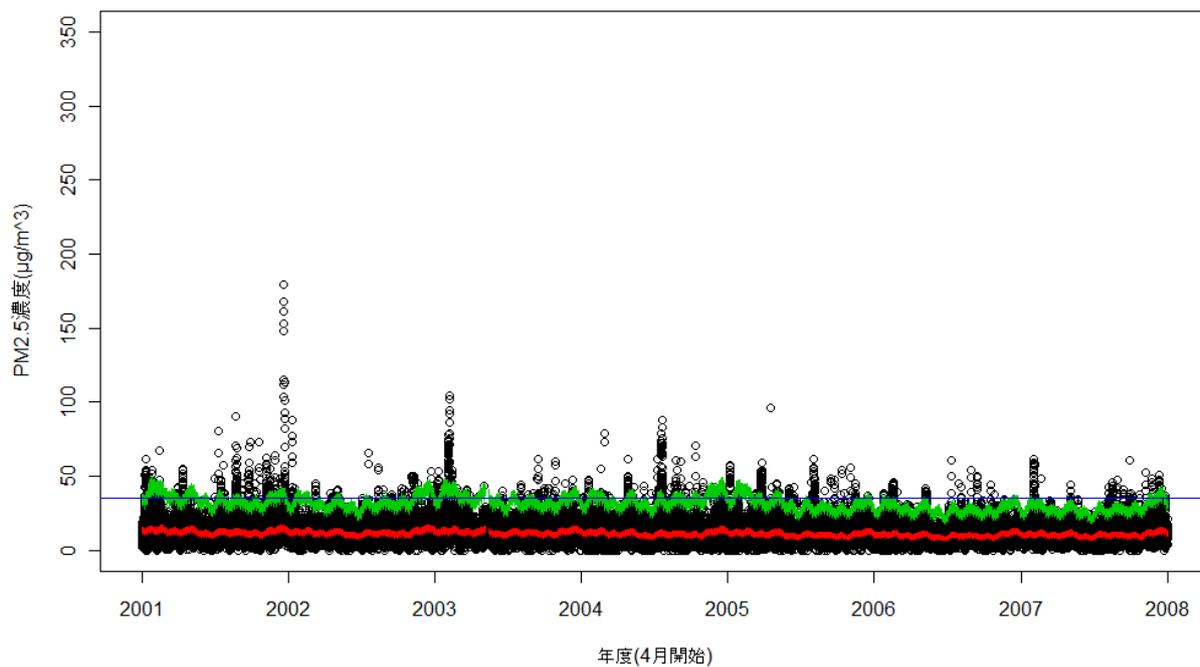


図4a 札幌のPM_{2.5}の変動期待値と上限値

板橋

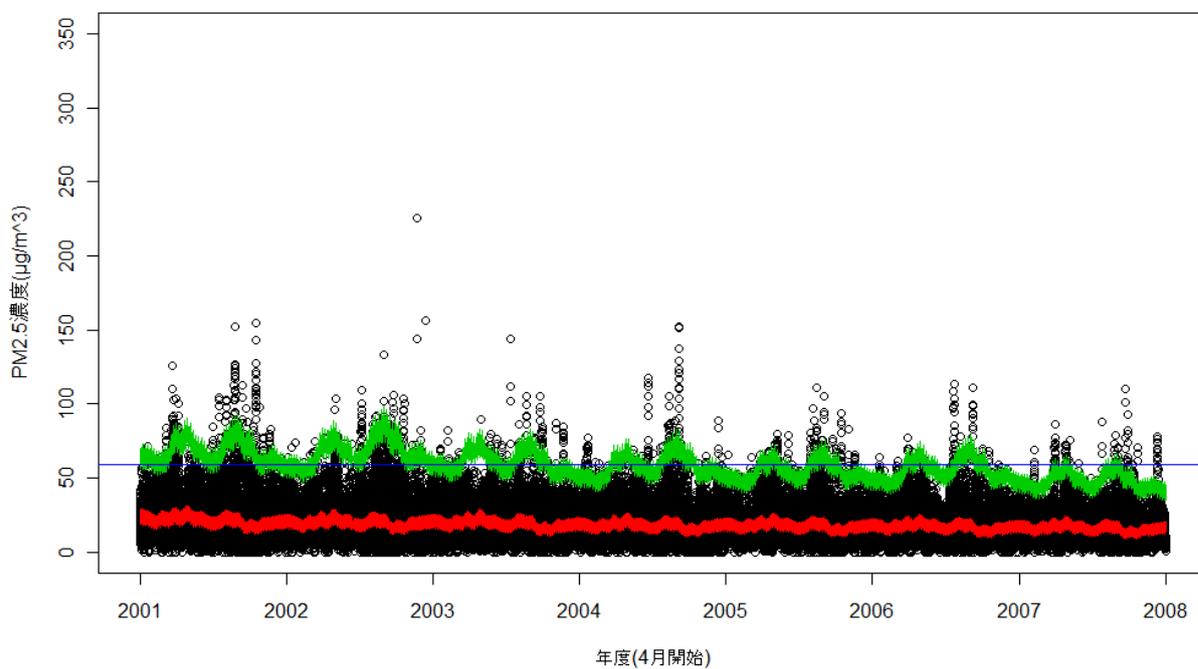


図4b 板橋のPM_{2.5}の変動期待値と上限値

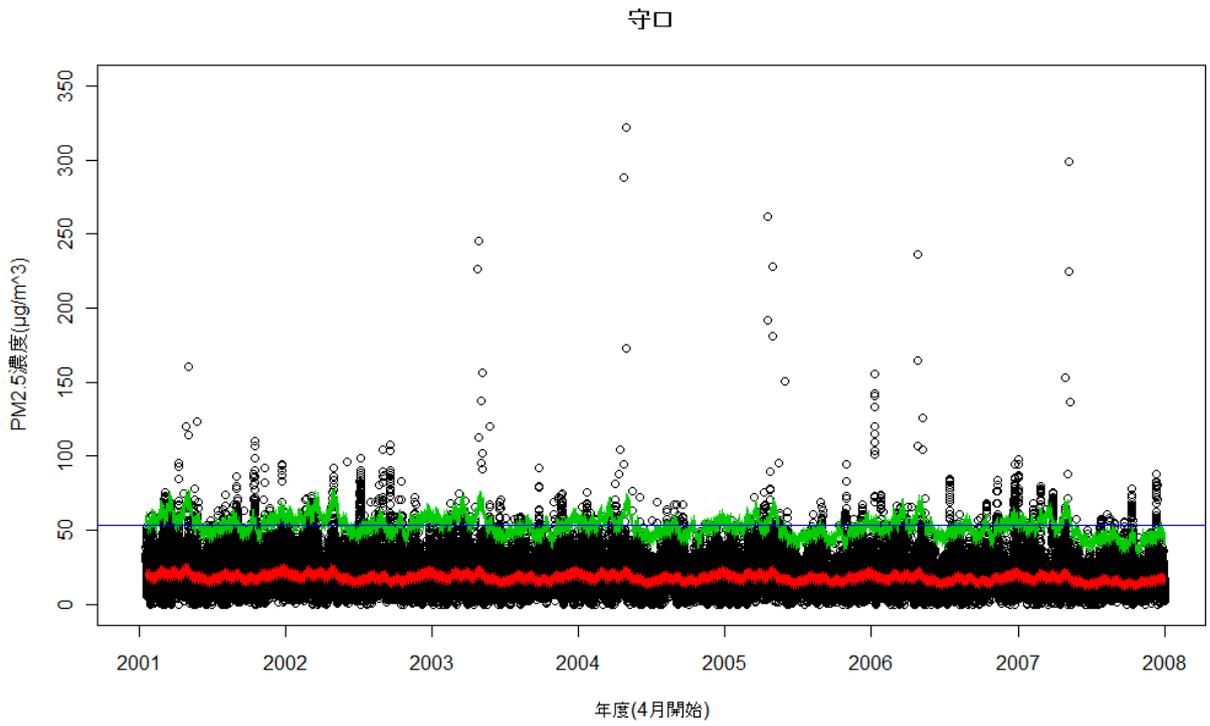


図4c 守口のPM_{2.5}の変動期待値と上限値

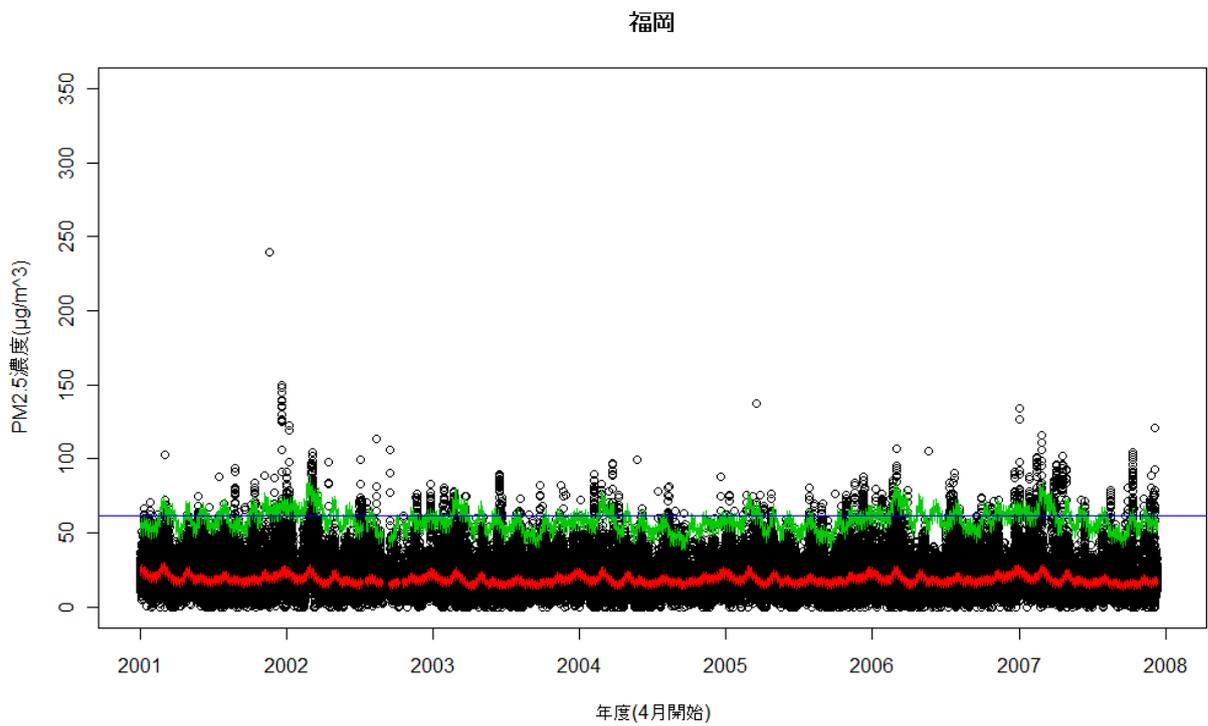


図4d 福岡のPM_{2.5}の変動期待値と上限値

4. 年平均値に対応する 98 パーセンタイル値の推計について

PM_{2.5} 質量濃度の年平均値に対応する日平均値の年間 98 パーセンタイル値について、PM_{2.5}濃度の測定データを用いて検証した。日平均値の年間 98 パーセンタイル値の算出に当たっては、これまでの PM_{2.5} 質量濃度測定結果(50°C加熱方式 TEOM)によって算出された回帰式に基づいて行うこととした。

また、年平均値と日平均値の 98 パーセンタイル値との関連性に係る回帰式の導出に当たっては、2001 年度から 2008 年度における全国の PM_{2.5} 質量濃度測定結果(50°C加熱方式 TEOM)を用いて、切片を有する回帰式(y=ax+b)だけでなく、切片を有しない回帰式(y=ax)について解析を実施した。回帰式の導出に当たっては、回帰式や測定結果の有する誤差要因にも考慮し、回帰式の傾きや切片について 95%信頼区間の幅についても算出した(表 2、図 6)。

回帰式の精度を表す決定係数は切片を有する回帰式の方が高いこと、低濃度領域においては濃度の高い方に、また、高濃度領域においては濃度の低い方に測定結果が検出される傾向にあることから、経験的に切片を有する回帰式の方が適切と考えられる。

これらのことから、表 2 に示す切片を有する回帰式を用いて、年平均値を 15μg/m³と仮定し、かつ年平均値の測定誤差*1を考慮して年平均値を 14.65~15.35μg/m³とした場合の日平均値の年間 98 パーセンタイル値を試算すると 35.8~36.9μg/m³となり、回帰式の 95%信頼区間を考慮して試算すると 35.1~37.6μg/m³となった。また、個々の観測値についても 95%信頼区間*2を考慮して試算すると 28.4~44.3μg/m³となった。

表 2 年平均値と日平均値の年間 98 パーセンタイル値の統計的関連性 (2001~2008 年度、全国、一般局+自排局)

	N	回帰式 y= a x +b	決定係数 R ²	t(fe, α)	標準誤差 D[a]	傾き(a) 95%信頼区間		標準誤差 D[b]	切片(b) 95%信頼区間	
						最小	最大		最小	最大
切片を有する回帰式(y=ax+b)	245	y= 1.613 x +12.154	0.851	1.970	0.043	1.528	1.698	0.929	10.324	13.984
切片を有しない回帰式(y=ax)	245	y= 2.161 x	0.745	1.970	0.014	2.133	2.189	—	—	—

※t(fe, α) : 自由度 fe の t 分布で、両側確率 α とする t の値。自由度は fe=N-2 (y=ax+b)、fe=N-1 (y=ax)、α=0.05 とした。

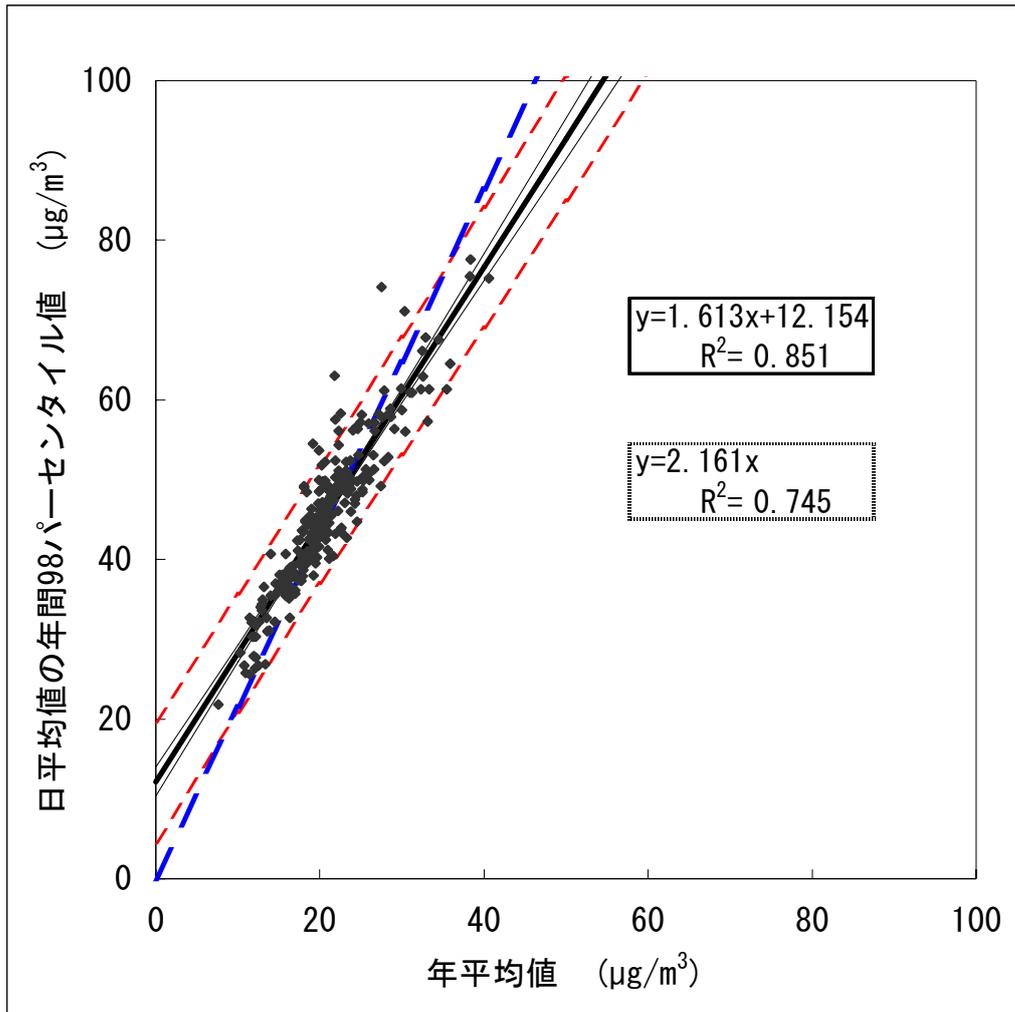
※傾き(a)と切片(b)の信頼区間については次のとおり。

傾き(a) : 最小=a-t(fe, α)*D[a]、最大=a+t(fe, α)*D[a]、切片(b) : 最小=b-t(fe, α)*D[b]、最大=b+t(fe, α)*D[b]

年平均値に対する日平均値の推定

	年平均値 (μg/m ³)	年平均値に対する日平均推定値 (μg/m ³)					
		推定値	回帰式95%信頼区間		観測値95%信頼区間		観測値95%信頼区間 範囲
			最小	最大	最小	最大	
切片を有する回帰式 (y=ax+b)	14.65	35.78	35.08	36.48	28.41	43.15	28.41~44.28
	15	36.34	35.67	37.02	28.97	43.72	
	15.35	36.91	36.25	37.56	29.54	44.28	
切片を有しない回帰式 (y=ax)	14.65	31.65	31.24	32.07	22.08	41.23	22.08~42.74
	15	32.41	31.98	32.84	22.84	41.98	
	15.35	33.17	32.73	33.60	23.60	42.74	

※年平均値(N=245)の標準誤差σ=0.35



太線 : 切片を有する回帰式 $y=ax+b$ 細線 : 回帰式の95%信頼区間
 太破線 : 切片を有しない回帰式 $y=ax$ 破線 : 観測値の95%信頼区間

図5 年平均値と日平均値の年間98パーセンタイル値の統計的関連性
(2001~2008年度、全国、一般局+自排局)

※1 年平均値の測定誤差 :

各測定局における2001~2007年度の年平均値を用いて標準誤差を算出し、測定誤差 $0.35\mu\text{g}/\text{m}^3$ とした。

※2 観測値の95%信頼区間 :

実際の測定(観測)においては、年平均値に対する日平均値の年間98パーセンタイル値にはばらつきが存在する。得られた回帰式に対して観測された日平均値のばらつきを考慮し、日平均値の収まる区間を推定したものである。表2に示すように年平均値を $14.65\sim 15.35\mu\text{g}/\text{m}^3$ とした場合、日平均値の年間98パーセンタイル値が $28\sim 44\mu\text{g}/\text{m}^3$ に入る確率は95%であることを示している。

参考文献

若浦雅嗣(2004)一般化加法モデルを用いた気温過程の平均・分散構造解析, 応用統計学 Vol. 33, pp. 181-200.