

RF-073 浮遊粒子状物質（SPM）および大気汚染物質の脳型多変量解析技法の開発

江戸川大学メディアコミュニケーション学部

神部 順子

〈研究協力者〉	独立行政法人産業技術総合研究所	長嶋 雲兵
	宮崎大学工学部	青山 智夫
	昭和女子大学大学院	中山 榮子

平成19～20年度合計予算額 5, 855千円

(うち、平成20年度予算額 2, 755千円)

※上記の合計予算額には、間接経費 1, 350千円を含む

〔要旨〕 環境問題への関心の高まりとともに大気汚染問題が注目されている。大気汚染物質と現象の関係は複雑であり、例えば現代のスモッグは太陽光、NO_x（窒素酸化物）、エアロゾル(含SPM)など多様な指標を組み合わせて評価しないと健康に関与する要因がわからない。東南アジアの大都市では大気汚染に関心が集まっている。ところが大域的な環境データは、測定者や測定方法などが異なるため、データを均質なものとして取り扱うことができない。また広域の定量的な測定はない。データの均一化には、標準化の方法を確立する必要がある。今後、東アジア・東南アジアという大域的な地域を関連付けるためには、多様なデータを柔軟に取り扱うことのできるデータ解析技法の開発が必要である。

本研究は、浮遊粒子状物質（SPM）および窒素化合物（NO_x）といった大域的な大気汚染物質の生活空間に対する影響を解析するために、環境データに対する脳型情報処理による多変量解析技法を開発し、多様な大気環境指標の総合的・複合的評価を可能とすることを目的とする。そのために、東南アジアの大都市に出向き、環境指標であるSPMを簡易装置を用いて測定し、大域的データの標準化を行うための基礎データを得た。同様に、江戸川大学（流山市）でも測定し、SPM測定値と公的機関により測定されたデータとの関係を解析した。そこではSPM簡易測定と同時に、デジタルカメラによる撮影を行い、デジタル画像を解析した。SPM簡易測定との対応をみることで、SPM等の大気汚染物質の超簡易測定技術を開発することを目指しており、可視化する方法を確立した。さらに、これらのデータ収集と同時に、ニューラルネットワークを用いて格子点上のデータ補完を行い、そのデータを用いて分布図を書くことを試みた。

〔キーワード〕 SPM、デジタルカメラ、大気汚染、多変量解析、ニューラルネットワーク

1. はじめに

環境問題は個別の地域を研究する時代から、大域的な地域を関連付けて考えなければならない時代になっている。東南アジアは経済発展の著しい地域であり、大気汚染はかなり憂慮される状況である。特に2008年の北京オリンピックでも注目されたように、大気汚染は複雑化し、かつ広域化しており、その観測密度および観測精度の向上と長期間に渡る継続的なデータ解析が必要とされている。

東南アジアの大都市では大気汚染に関心が集まっているが、例えば、現代のスモッグは太陽光、NO_x（窒素酸化物）、エアロゾル（気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子、SPMも含む）など多様な指標を組み合わせて評価しないと健康に関与する要因がわからない。また、環境データには欠測が多く、従来の多変量解析技法では欠測を含むデータのほとんどが捨て去られるため、多くの情報が失われる。さらに大域的な環境データは、測定者や測定方法などが異なるため、データを均質なものとして取り扱うことができない。そして、これまで街路付近の気流性状や自動車から排出されるSPMの拡散については様々な解析や考察がなされているが、沿線の住宅地域を含めた“生活空間”といった視点で考える研究、つまり生活空間を考慮した面測定とそのシミュレーション研究はまだ充分ではない。また、こういった視点からの国際比較もあまり例がない。

SPM測定は大掛かりな装置を必要とする精密なものから簡易的な測定までさまざまである。それらは精度も違い目的も違う。SPM汚染は局所的な場合が多く、精度はそれほどなくとも簡易測定が大掛かりな精密装置に劣るとは言えないのではないかと考えられる。むしろ大掛かりな装置で精密測定を行い平均値を取り、「XX市のSPM汚染は環境基準を満たしている」と結論を出してしまうのは危険なことである。その理由は以下の通りである。

(1) 公表されている大気測定で常々疑問に思う点は、いわゆる「欠測」が必ず10%前後あることである。甚だしい場合は欠測50%という場合もある。そういう場合の平均値がその地域の適正値を表しているとは思えない。

(2) 一都市のSPM汚染平均値という概念そのものがSPM汚染の地域的および時間的局所性を無視している。SPMの健康への影響という点を評価するのであれば、都市の小地域の、特定時間帯の最大SPM量が重要であって、その測定が必須である。

さらに、持ち運びが可能なデジタル粉塵計によるSPM測定の現状として以下の点を挙げることができる。

(1) 簡易測定機といっても価格は30万円前後で一般に使用できる価格帯ではない。使用法も「簡単、誰でも可能」とはいえない。

(2) 1測定地点の計測に10分以上かかるため、測定地点の数の確保には限界がある。

(3) SPM測定は1つの観測値だけでは有用ではなく、ある程度の時間は継続観測しなければならない。

(4) 外国での測定を想定すると、コンパクトであることが求められる。

そこで、デジタル粉塵計による計測以外でSPMを測定できる方法はないかと考えた。空中に浮遊している粉塵は光を散乱し、風景を霞ませることは経験的に知っている。この光を散乱している、

風景を克明に記録すれば、空中の粉塵量は測定できるのではないかと考え、本研究ではデジタルカメラでの撮影による画像解析を検討することとした。

2. 研究目的

本研究は、SPMおよびNO_xといった大域的な大気汚染物質の生活空間に対する影響を解析するために、欠測を含む環境データに対して脳型情報処理（人間が行っている情報を処理方法に取り込んだ手法）による多変量解析技法を開発し、多様な大気環境指標の総合的・複合的評価を得ることを目的とする。

3. 研究方法

東南アジアの大都市に出向き、環境指標であるSPMを簡易装置を用いて測定し、大域的データの標準化を行うための基礎データを得る。同様に、江戸川大学（流山市）でも測定し、SPM測定値と千葉県環境測定データとの関係を解析する。ここではデジタル粉塵計によるSPM簡易測定と同時に、デジタルカメラによる撮影を行い、デジタル画像を解析する。SPM簡易測定との対応をみることで、SPM等の大気汚染物質の超簡易測定技術を開発することを目指す。これらのデータ収集と同時に、大域的な異なる手法によって測定されたデータの標準化を行う。そこで、以下のように研究を進めていく。

（1）欠測のあるデータを含む脳型多変量解析技術の開発に関する研究

公的機関による公表データ収集し、記述統計量を求め、多変量解析（主成分分析とクラスター分析）を行い、それぞれの測定地点の関連と月別の特徴をみる。用いるデータは、2005年に東京都¹⁾、千葉県²⁾、埼玉県³⁾、川崎市⁴⁾の各公的機関より発表された計314測定地点での1時間毎のSPMとNO_xのデータである。主成分分析とクラスター分析にはSPSSを用いた。

また、本研究では、欠測データ集合を扱う神経回路網法（CQSAR: Compensation Quantitative Structure Activity Relationships⁵⁾）を採用する。CQSARは、欠測データを補完して行う手法であり、例えば多変量解析では欠測率約50%までの欠測部を補完して、解析を可能にする。まずCQSARを用いて格子点上のデータ補完を行い、分布図作成の妥当性を検討するための模式的分布図を用いた解析を行う。実際の計測データでの検討は後述の（4）で行う。

（2）東南アジアの大都市のSPM簡易測定とデータの標準化技法の開発に関する研究

東南アジアの複数の大都市でのSPM簡易測定とデジタル画像撮影を実施する。また、江戸川大学（流山市）でSPM、気圧、気温、湿度を測定し、千葉県環境測定データとの関係を解析する。本研究でSPM簡易測定結果として報告する東南アジアの都市は、中国の上海、天津、タイのバンコク、韓国のソウルである。ただし、韓国のソウルについては自ら計測は行っておらず、研究協力者の中山榮子によりデータを提供していただいた。

(3) デジタル画像によるSPM簡易測定法の開発に関する研究

従来のデジタル粉塵計を用いたSPM簡易測定では、各地点の個々の時刻でのSPMの量を計測することはできるが、その種類や空間分布の情報を得ることは非常に難しい。そこで、デジタルカメラにフィルターを付けて特別な波長を持つ光を撮影する。得られた画像の特徴抽出を行い、それとSPM測定値との比較から、画像の特徴とSPM測定値の関係を見出し、デジタル画像から環境データ測定技術の開発指針を得る。これは、宮崎大学工学部青山智夫によって開発された「rgbBRプログラム」を利用することで、散乱光分布異常性を見ることが可能となる。大気分子はRayleigh散乱を起こし、粒子径 $1\sim 10\mu\text{m}$ のSPM粒子はMie散乱を起こすことを利用するものである。デジカメRAW形式で空を撮影し、画素の赤, 緑, 青色情報 (R, G, B) を得るものである。デジタルカメラでの画像はRAW形式で保存した。コントラスト強調処理を行うことと、画像中の垂直あるいは水平に線を設定し、その一線上のR, G, B値を分析する。

(4) 離散的データからの等濃度線描画技術の開発に関する研究

環境汚染物質の分布を直感的な表現とするためには、等高線による分布図の作成は不可欠である。だが、大気汚染指標であるSPMやNO_xなどのデータの測定点は離散的であり、かつ疎であり、また一部に偏っている。さらにそれらは欠測が多く、従来の統計的解析では欠測を含むデータのほとんどが捨て去られるため、多くの情報が失われている。この結果、環境汚染物質の広がりを見るための分布図をなだらかに表現することは難しい。つまり、通常の方法では分布図の作成は難しい。そのため本研究では、欠測データ集合を扱う神経回路網法 (CQSAR: Compensation Quantitative Structure Activity Relationships) を用いて格子点上のデータ補完を行い、そのデータを用いて分布図を書くことを試みた。

4. 結果・考察

(1) 欠測のあるデータを含む脳型多変量解析技術の開発に関する研究

東京都、千葉県、埼玉県、川崎市の各公的機関より発表された計314測定地点のSPMとNO_xについて、2005年の年間平均値 {最小値, 最大値} を[0.1]で標準化したものを図1に示す。回帰直線とその相関係数は、それぞれ $y=0.49X-0.04$, $R^2=0.28$ である。SPMの分布とNO_xの分布にほとんど相関はみられない。NO_xは道路沿い、特に東京都と川崎市にある測定地点の値が大きい。SPMはNO_xが小さいところでも値の大きな測定地点がみられる。

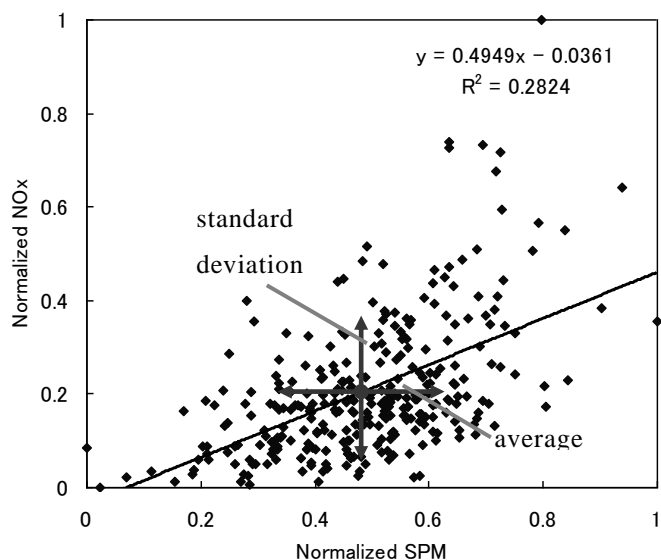


図 1. 各測定地点でのSPMと NO_x の年間平均値の相関図

SPMの主成分分析の寄与率は、第1主成分が73.1%、第2主成分が9.7%であった。NO_xの主成分分析の寄与率は、第1主成分が85.0%、第2主成分が5.4%であった。第1主成分は汚染の度合を、第2主成分は月別の特徴を示している。SPMの各測定地点の第1主成分と第2主成分のK-Lプロットを図2に示す。主成分得点の値は全て第I象限と第IV象限に分布している。SPMについては第1主成分の係数が0.80以上は292測定局で全体の93.0%である。第2主成分の絶対値が0.50以上の8つの測定地点は、11月のデータが他の測定地点とは異なる傾向を持つことがわかった。NO_xについては第1主成分の係数が0.80以上は292測定局で全体の93.6%である。第2主成分の係数が0.5以上は6測定局である。

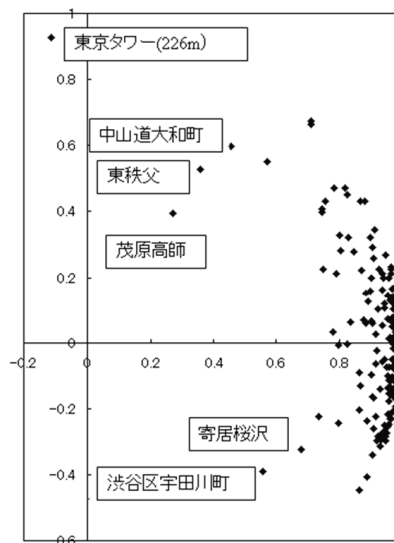
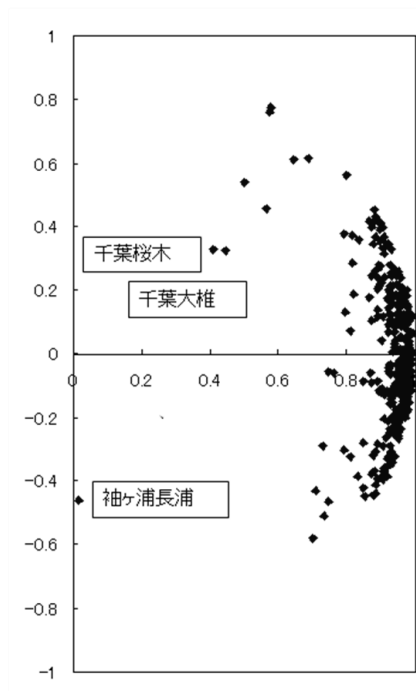


図2-1. SPMの測定地点のK-Lプロット

図2-2. NOxの測定地点のK-Lプロット

クラスター分析による月別のデンドログラムを図3に示す。SPMでは大きく2つのグループに分類されたが、5月と11月はこの2つのグループの中では特異な月であることがわかった。また、NOxでは11月から3月までと、4月から10月が同じグループである。

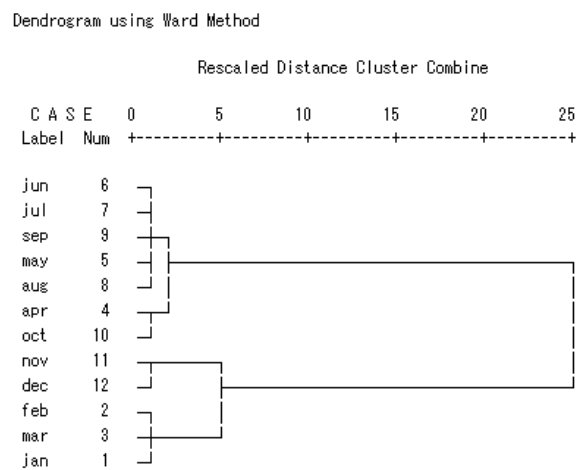
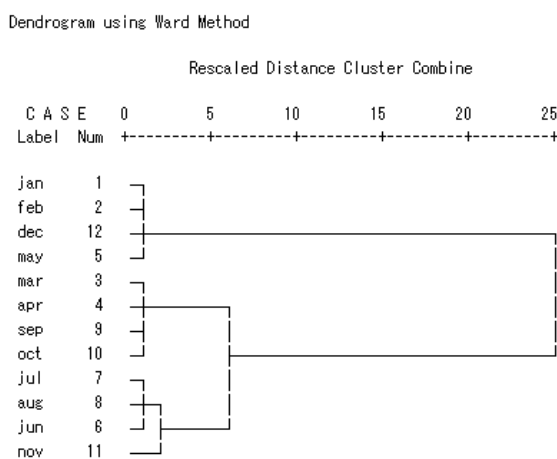


図 3-1. SPMの月別デンドログラム

図 3-2. NOxの月別デンドログラム

ところで、大気汚染指標である窒素酸化物（NOx）や浮遊粒子状物質（SPM）などのデータの実際の測定点は、離散的、かつ疎であり、また一部に偏っている。さらにそれらは欠測が多く、従

来の統計的解析では欠測を含むデータのほとんどが捨て去られるため、多くの情報が失われている。

図4に2005年4月の東京都、千葉県、埼玉県、川崎市のSPMの月間平均測定点を示す。この例では測定点が東京湾岸に集中していることがわかるが、SPMの濃度分布を直感的に理解することは難しい。この種の分布を直感的な表現とするためには、等高線による分布図が用いられる。ところが、先にも述べたように、大気環境データの測定点は離散的、かつ疎であり、また一部に偏っているという性質があるため、通常の三角格子を用いる等高線作図法では、分布図の作成は難しい。

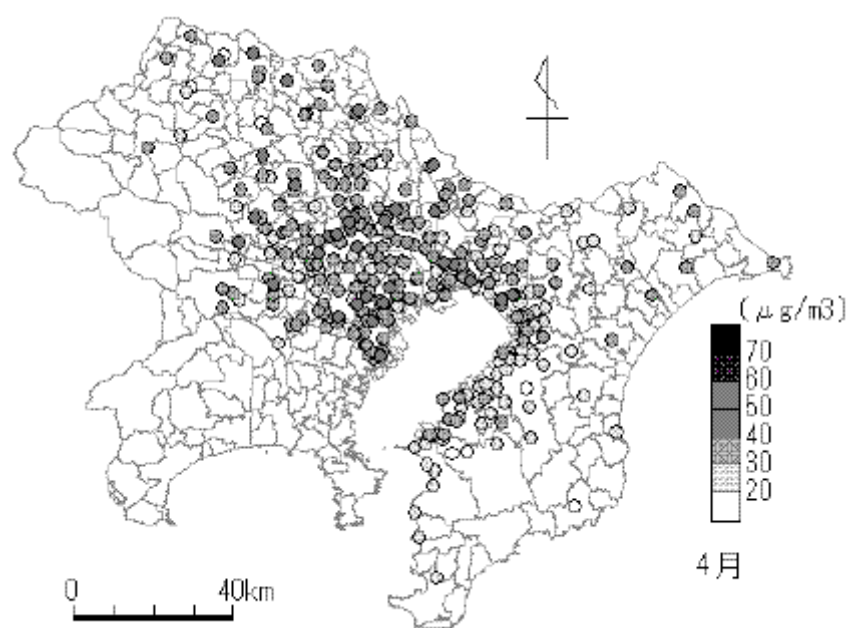


図4. 2005年4月の東京都、千葉県、埼玉県、川崎市のSPMの月間平均測定点

そのため本研究では、欠測データ集合を扱う神経回路網法（CQSAR: Compensation Quantitative Structure Activity Relationships）を用いて格子点上のデータ補完を行い、その補完データを用いて分布図を書くことを試みた。実際のデータを用いた分布図については（4）で述べる。ここでは、欠測データ集合を扱う神経回路網法CQSARの特徴と、模式的な分布図を用いてCQSARでの分布図作成の妥当性を検討した結果を述べる。

CQSARは階層型神経回路網を用いた新しいデータ補完法として使うことができる。階層型神経回路網は因果関係が不明な現象の多変量解析に用いられ、主な用途は環境問題解析、薬理活性解析などである。しかし、それらには測定点のデータが一部存在しないという、欠測問題がしばしば存在する。このようなデータを用いて多変量解析などの統計解析を行う場合、データの欠測はその測定点を表す説明変数が単に減少するというだけでなく、複数の説明変数の組の中の一変数が部分的に欠測していることで、そのデータの組を棄却する必要があるため、値が存在する他の説明変数の該当部分すべてを使用できなくなり、情報の大幅な減少を引き起こす。CQSARは欠測データを補完して解析を行う手法であり、例えば多変量解析では欠測率約50%までの欠測部を補完して、解析を可能にする。

CQSAR処理はおおまかに2つのステップで構成されている。その第1ステップでは、欠測部を各説明変数と、対象現象の観測値についてそれぞれ独立に補完する。補完法の選択は観測数に依存し、観測値の分布と不連続点の有無に関係する。このステップでの補完法には、次に示す3種類の手法を用いて比較を行った。(1) それぞれの状況に応じた可変絶対値関数法、(2) 過去の測定データを関数の離散表現としてパラメータを付加した観測ベクトル補間法、(3) 神経回路網と等差数列を使う補完法の3種である。本報告では詳細な比較の結果は示さないが、誤差の平均値と総和が最小であった(3)を用いた結果を報告する。

CQSAR処理の第2ステップは第1ステップで完全化したデータを用いて、神経回路網によるQSARをおこなう。第1ステップでの補完誤差が第2ステップでのQSARの結果に与える影響は小さい。第2ステップでのQSAR用の神経回路網学習ではsimulated annealing操作を行った。

極大点が複数ある多峰性関数で値の変化が急激な場合には、階層型神経回路網を用いたデータ補完は信頼性に欠けることが知られている。しかし今回注目している環境汚染物質であるSPMの分布は、極端な多峰性ではなく緩やかな変化を示す。このため、階層型神経回路網を用いた解析が有効であると考えられる。また、多峰性関数において値の変化が緩やかであったとしても、データの欠損がある場合には一般に補完法の適用は困難であるが、CQSARを用い、欠損データを補ってフィッティングを行うことにより、通常の階層型神経回路網による関数フィットと同等の解析結果が得られる。今回は環境汚染物質のような、なだらかな変化を見るために、巾関数へのフィッティングで低次の関数を用いる事に習い、学習は一般的なバックプロパゲーション学習よりもニューロン間結合強度消去操作により神経回路網構造を最小化する再構築学習法reconstruction learning⁶⁾を用いた。

学習用サンプルデータは、仮想的に作成した鞍点を持つ2峰2谷型のデータ961点(=31×31)(図5)から10点をランダムにサンプルした。(図6上)

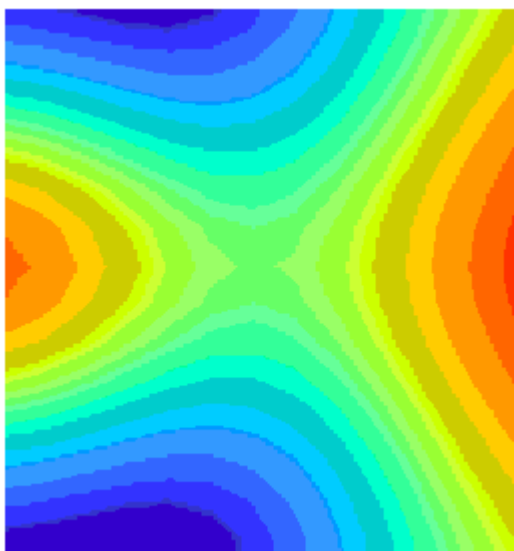


図5. 模式図

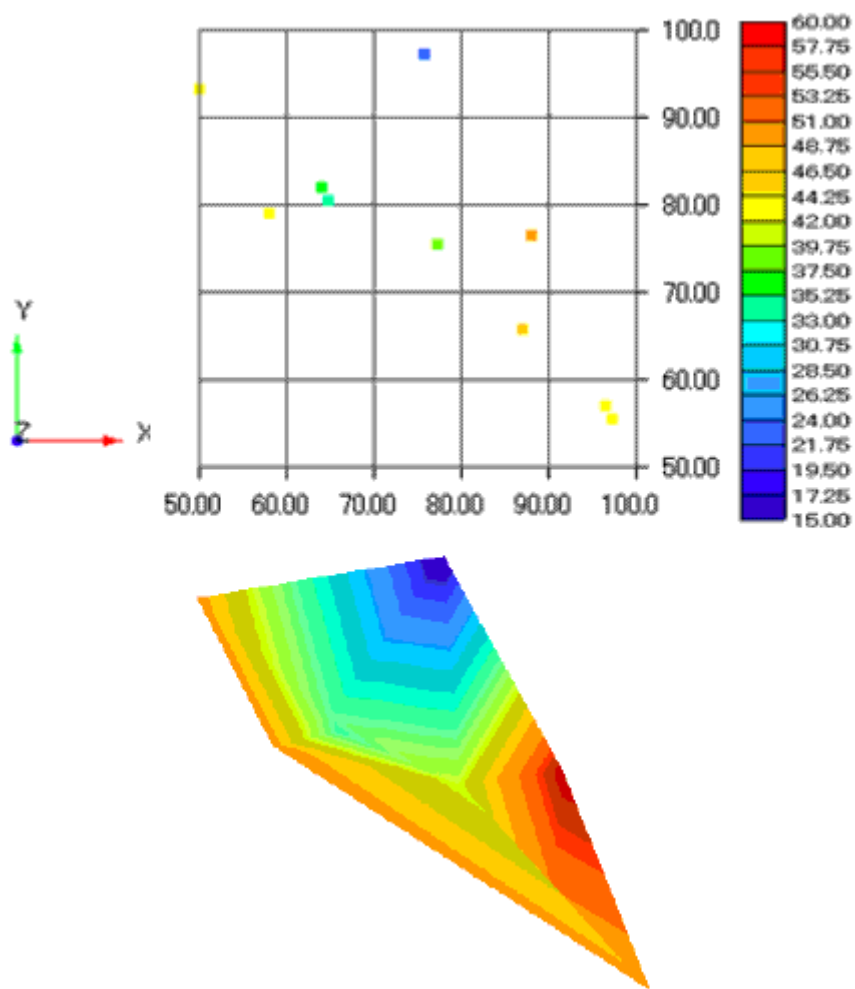


図6. 学習用サンプルデータとBi-Linear法で作成した分布図

学習用サンプルデータと学習結果を表1に示す。左から測定点の座標(x, y)とその点での観測値(given)を示している。その右のest. およびerrorは学習結果である。表1に示した10点(図5のデータからランダムに採取された点)を学習用サンプルデータとした。

表1. 学習用サンプルデータと学習結果

x	y	given	est.	error	
				abs.	rel %
50	93.2	43.7	43.95	0.25	0.58
64.8	80.4	27.9	34.64	6.74	24.17
77.3	75.4	37.2	39.07	1.87	5.02
87.1	65.7	34.4	45.38	10.98	31.92
96.5	56.9	41.3	43.99	2.69	6.51
57.9	79	44.2	43.98	0.22	0.50
63.9	81.9	34.8	35.41	0.61	1.75
75.7	97.2	20.5	22.19	1.69	8.23
88.1	76.6	57.3	49.74	7.56	13.19
97.2	55.6	46.3	43.49	2.81	6.06
			aver.	3.54	9.79

図6に学習用サンプルデータの2次元表示（上）と通常の方法である与えられた点のみを用いたもっとも単純な非格子三角法（Bi-Linear法）で作成した分布図（下）を示した。この時、非格子三角法の点間の補間は直線補間である。このサンプル教師データは離散的で偏りがあり、これらの点から単純な非格子三角法（Bi-Linear法）で作成された分布図（図6下）はきわめて表示範囲が狭く、奇妙な図となる。

学習用サンプルデータを学習することによって得られた近似曲面から補完（補間）する点は、 $50.0 \leq x, y \leq 100.0$ の範囲で、それぞれ0.5おきに合計121点（ $=11 \times 11$ ）である。（図7上）

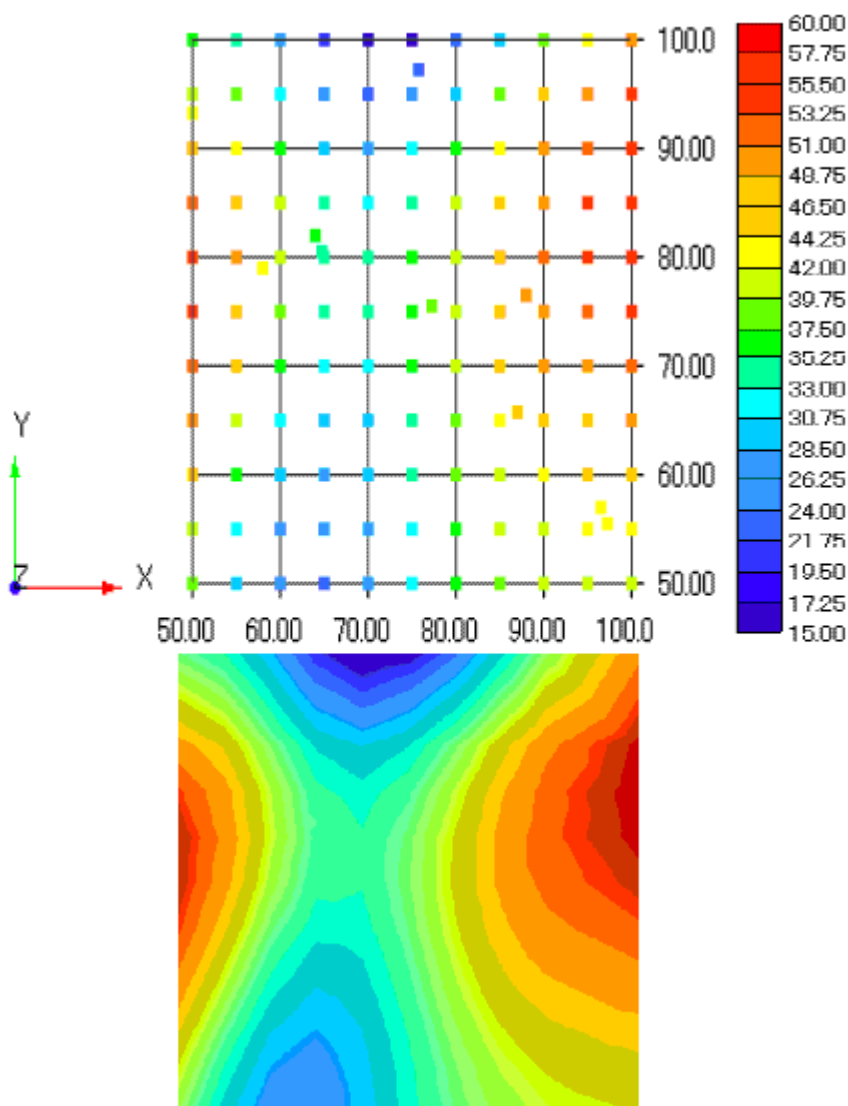


図7. CQSARによる補完点12点と教師データ10点から作られる分布図

CQSARで用いた階層型ニューラルネットワークは3層構造であり、入力層は座標(x, y)に対応する入力を2個、出力層はその点の値に対応する出力を1個とした。中間層のニューロン数は再構築学習法⁷⁾によって最小化した。学習の閾値は0.01とし、1000回の試行毎に、ネットワークの結合重みを調べ、0.01以下の重みしか持たない中間層ニューロンを削除した。最終的な中間層のニューロン数は3個となった。

学習の閾値は0.01であるが、表1を見ると平均10%程度の相対誤差で与えられた学習データを再現していることがわかる。誤差の大きい学習点は2点有るが、そこが大きなエラーをもつ原因は不明である。

図6に描画に用いた131点(CQSARによる補間点121+教師データ10点)とそれらから作られる分布図を示す。図6上の図で格子点の上(図の格子と一致しない点)にない10点が教師データである。図5と比較してみると、教師データ周辺は良く再現されており、全体的にたかだか10点のサンプリ

ングと、CQSARの補完によって鞍点を持つ谷の形状が良く再現されていることがわかる。サンプリングが全く無い左下および右上側に見られるように、外挿点の精度は悪いが、大まかな形は良くとらえられている。

本方法による分布図描画の限界は、CQSARによる補完データを用いた階層型神経回路網による関数フィットの能力に依存する。よく知られているように、階層型神経回路網による関数フィットは、微分不能な点がいくつかあるような急激な変化を起こす場合、その変化への追従が難しいという傾向を持つ。またFFTや多項式フィットなどに見られるような、外挿点での特異な振る舞いは見られないが、内挿に比べ外挿の精度が落ちることなどもよく知られている。しかし、今回の例のように、比較的なだらかな変化をするデータに対しては、CQSARを用いて分布図の傾向を再現可能であることがわかった。さらに学習の閾値が小さすぎると過学習の恐れがあるが、学習の閾値を適当に選ぶことにより適当な平滑化を行うこともできる。この結果を踏まえ、(4)では実際に計測して得られたデータを用いて解析を行うこととした。

(2) 東南アジアの大都市のSPM簡易測定とデータの標準化技法の開発に関する研究

2007年8月クアラルンプール、2008年2月バンコク、3月上海、4月天津、10月鄭州において、デジタル粉塵計を用いてSPMを測定し、東南アジアの大気汚染が深刻化していることを確認した。ここでは、同じ場所で連続してデジタル粉塵計を稼働して計測することが可能であったバンコク、上海、天津、鄭州での結果を示す。これらについてはデジタル粉塵計(柴田科学製LD-3K2)によるSPMの測定と、同時にサーモスタ高分子センサ方式ロガー(T&D製TR-73U)による気温、大気圧、湿度といった気象データを測定した。

図8にバンコクでの結果を示す。ここでは、変化の比較を容易にするために、横軸は時刻で、縦軸はSPM[$\mu\text{g}/\text{m}^3$](実測値のまま)、温度[$^{\circ}\text{C}$](実測値を2倍する)、気圧[hPa](実測値から1000を引き、10倍する)、湿度RH[%](実測値を100から引く)で示す。バンコクでは滞在したホテルのバルコニーにて連続した計測が可能であった。ここでは気圧変化より、空気が日本のように流動していない様子がわかる。測定期間中、風はほとんど吹いていなかった。さらに、バンコクでは気温変化があまりないため、SPMが滞留しやすい傾向があるようである。図中のAは降雨によるSPM洗浄、Bは夕刻の人工的なSPM発生、Cは低圧部へのSPM吹き寄せが観測できた。

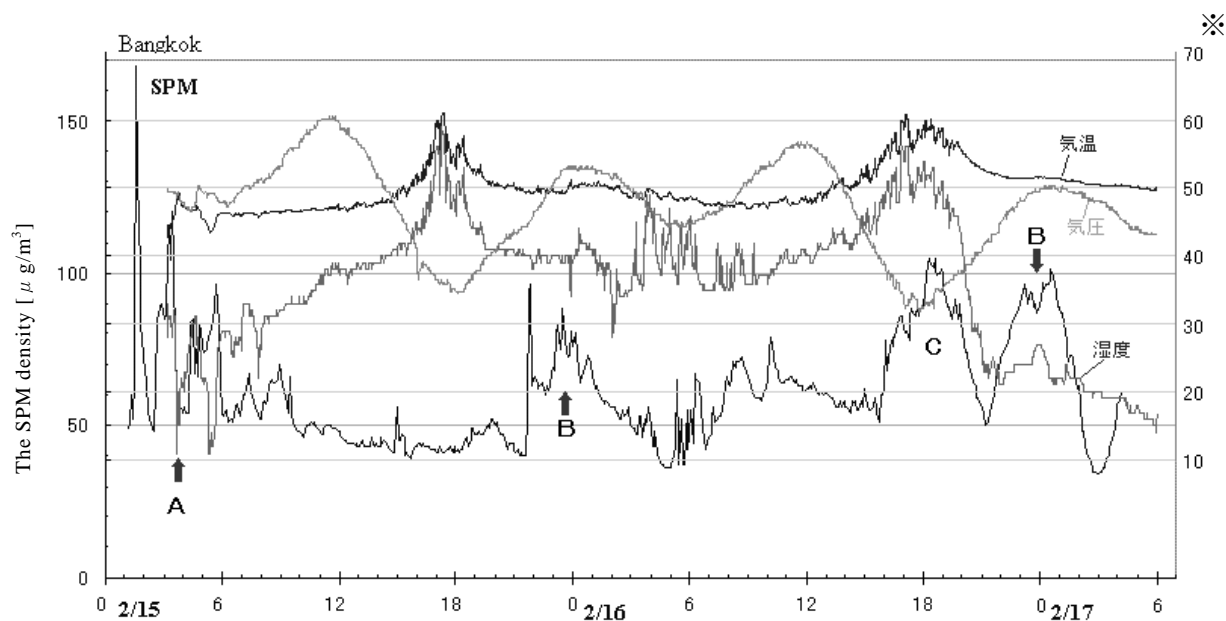


図8. バンコクでのSPMと気象データの計測結果（2008年2月15日～2月17日）

※グラフ縦軸の右側の数値は、温度[$^{\circ}\text{C}$]は実測値を2倍、気圧[hPa]は実測値から1000を引いた後10倍、湿度RH[%] は実測値を100から引いた相対的な値である。

図9に上海でのSPM測定値の結果を示す。上海での計測には複数のデジタル粉塵計を持ち込むことが可能であったため、同じホテルで異なる階での計測結果を同時に示している。滞在した上海でのホテルでは窓の開閉が可能であったため、窓の側にデジタル粉塵計を設置し、ホテルから離れて街中での計測中にも連続で計測した。だが、ホテルではベットメイキングのため掃除担当者が部屋に入り、窓を閉められてしまった。そこで、SPM値が急に上昇するところまでは窓が開いていると仮定した。その後、窓が閉まっていたと思われる時間中はSPM=0とした。そういった結果を踏まえたものが図9下である。横軸は3月19日からの積算時間を示している。Aは5階での結果、Kが9階での結果である。

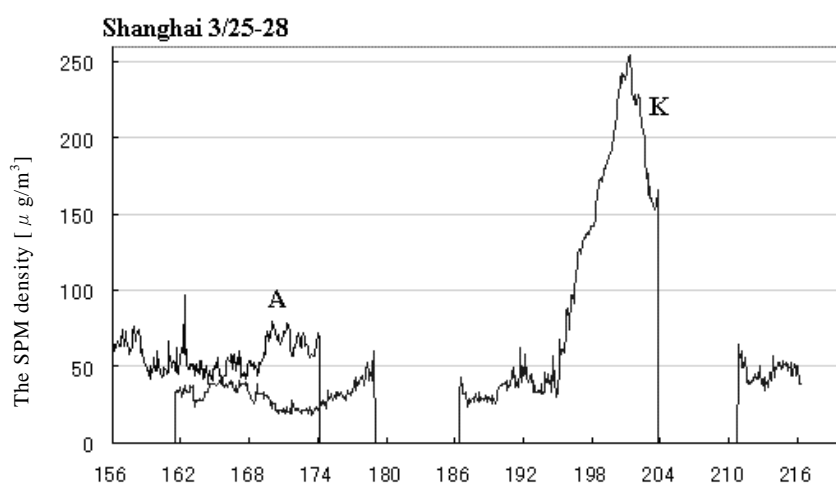
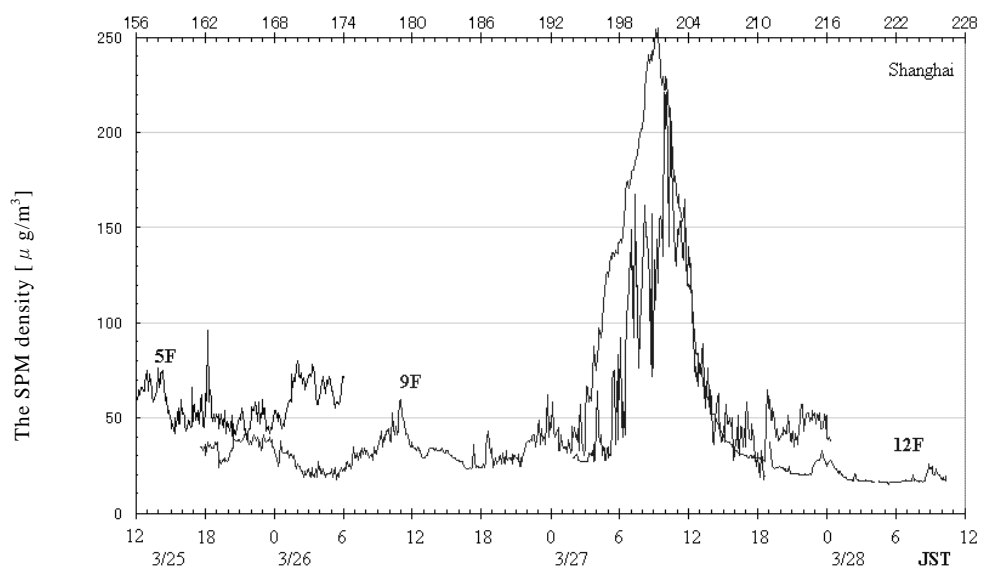


図9. 上海でのSPMの計測結果（2008年3月25日～3月28日）

ここで、上海で測定した階毎のSPM濃度と大気圧の相関を図10と図11に示す。また、SPM濃度と湿度の相関を図12に示す。図10中の丸で囲われた部分は5階での計測を示す。上海の200CPMを超えるSPMは気圧との相関から大気の流動(高気圧)により流れてきたものと考えられる。図12中に四角で囲われた部分は27日10時過ぎの部分である。他の部分とは異なる値を示していることから、窓を閉めたあとの室内の気流の乱れで起こったとも考えられる。また、上海の場合、SPMと湿度との相関は見られない。

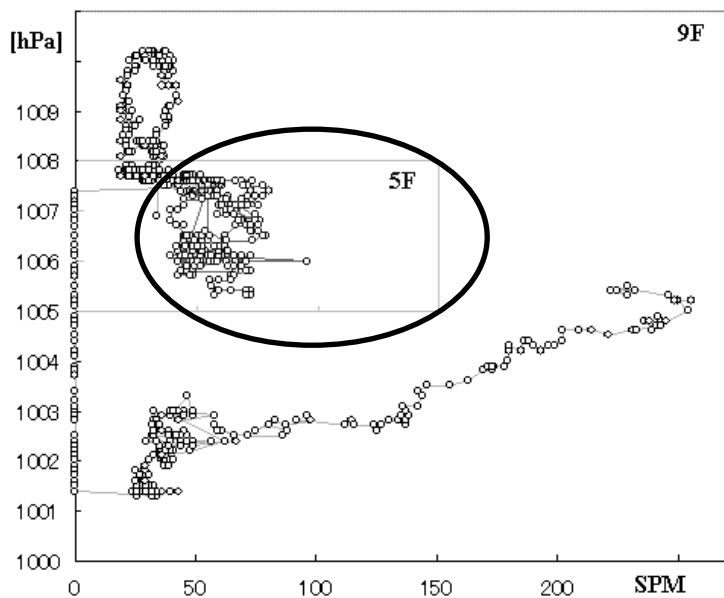


図10. SPMと大気圧との相関（上海のホテル5階（丸で囲った部分）と9階）

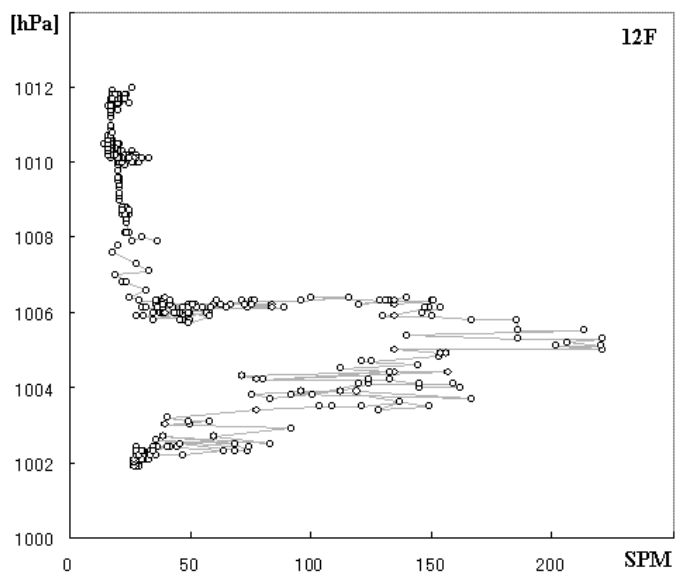


図11. SPMと大気圧との相関（上海のホテル12階）

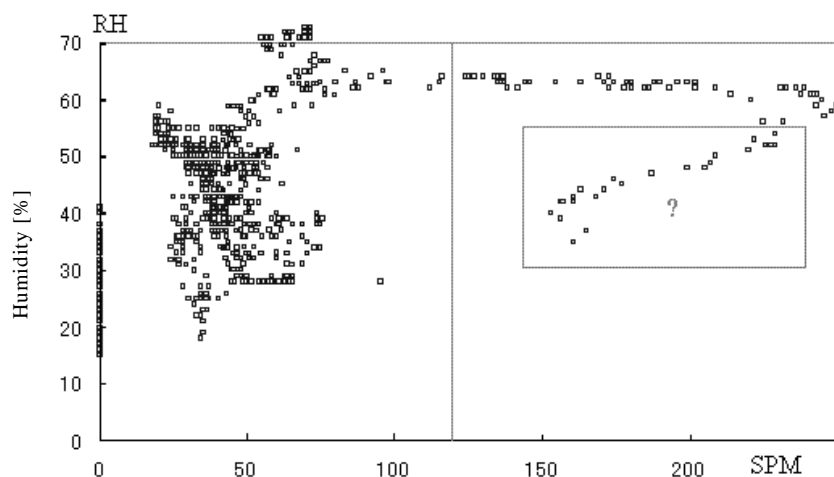


図12. SPMと湿度との相関（12階）

図13に天津でのSPM測定値の結果を示す。

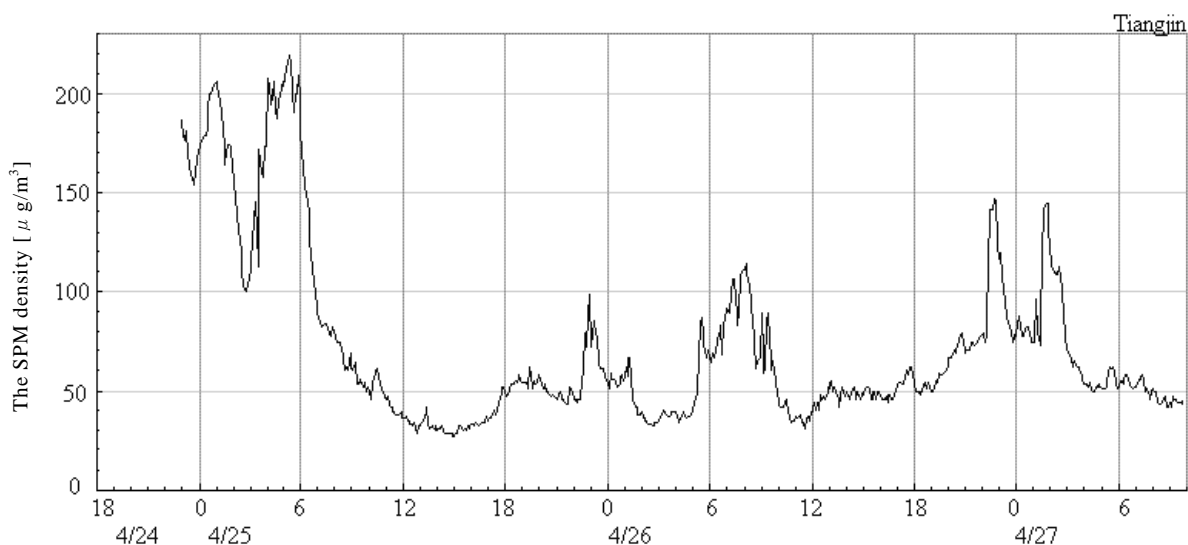


図13. 天津でのSPMの計測結果（2009年4月24日～4月27日）

ここで、4月24日23時の測定開始時から16時間後の4月25日15時までと、4月25日15時から4月27日測定終了時までの2つに分割し、それぞれについてSPMと気象データとの相関をみた。図14と図15にそれぞれを示す。図14の4月24日23時から4月25日15時までのデータでは、湿度と気圧との相関がみられる。つまり、低気圧通過に伴い水滴を伴って移流してきたSPMのように思える。ここでは温度との相関はみられない。一方、図15では、湿度との相関はほとんどない。気圧との関係を見ると、気圧変化にともなって大気境界面が通過し、その境界面にあるSPMを反映しているようである。夜間の短時間の通過なので温度との相関もみられない。この日の天気図からは150CPMの

SPMは高気圧に伴って来たように見える。気象庁によれば、4月25日から26日に黄砂は天津の南を通過し、九州北部に達している。そこで、その黄砂の残りの一部が4月27日未明の $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ のSPMピークのように考えられる。

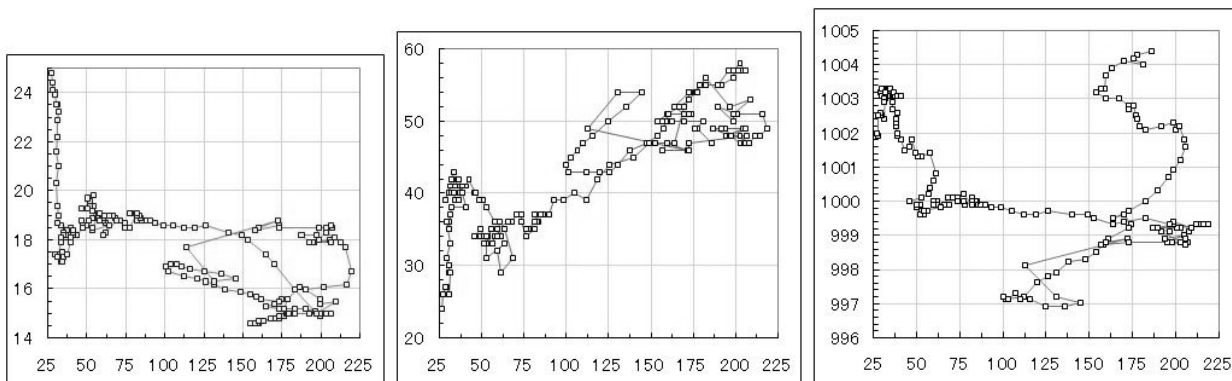


図14. SPM[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]と気象データとの相関（4月24日23時～4月25日15時、縦軸は左より気温[$^{\circ}\text{C}$]、湿度RH[%]、大気圧[hPa]）

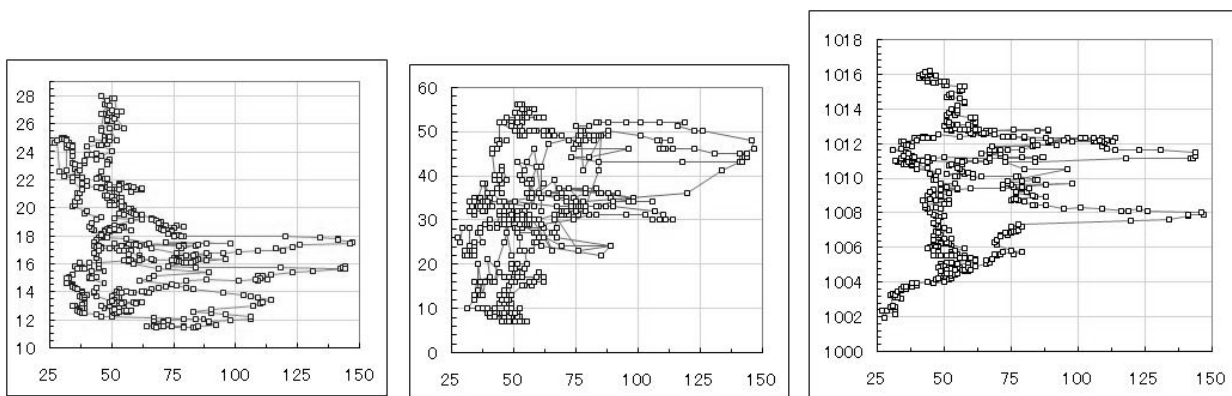


図15. SPM[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]と気象データとの相関（4月25日15時～4月27日10時、縦軸は左より気温[$^{\circ}\text{C}$]、湿度RH[%]、大気圧[hPa]）

2008年2月7日から14日までの江戸川大学（流山市）で測定したものを図16に示す。ここでは、変化の比較を容易にするために、横軸は時刻で、縦軸はSPM[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]（実測値のまま）、温度[$^{\circ}\text{C}$]（実測値を12倍する）、気圧[hPa]（実測値から-1000を引き、10倍する）、湿度RH[%]（実測値を100から引き、1.2倍する）で示す。湿度は逆向きに描いたものである。SPMピークA～Dはいずれも湿度が上昇していることから、水滴のSPMである。また、12日15時のピークCが最も汚れていることがわかる。これらは公的機関による千葉県我孫子市のデータと似た傾向を示しているが、SPMについては、公的機関での β 線照射法と江戸川大学でのレーザー光散乱方式という計測機器の種類の違いが影響していることがわかった。つまり、江戸川大学でのSPM計測機器では湿度の影響を大きく受けている。今後、この点に考慮しながら分析する必要がある。

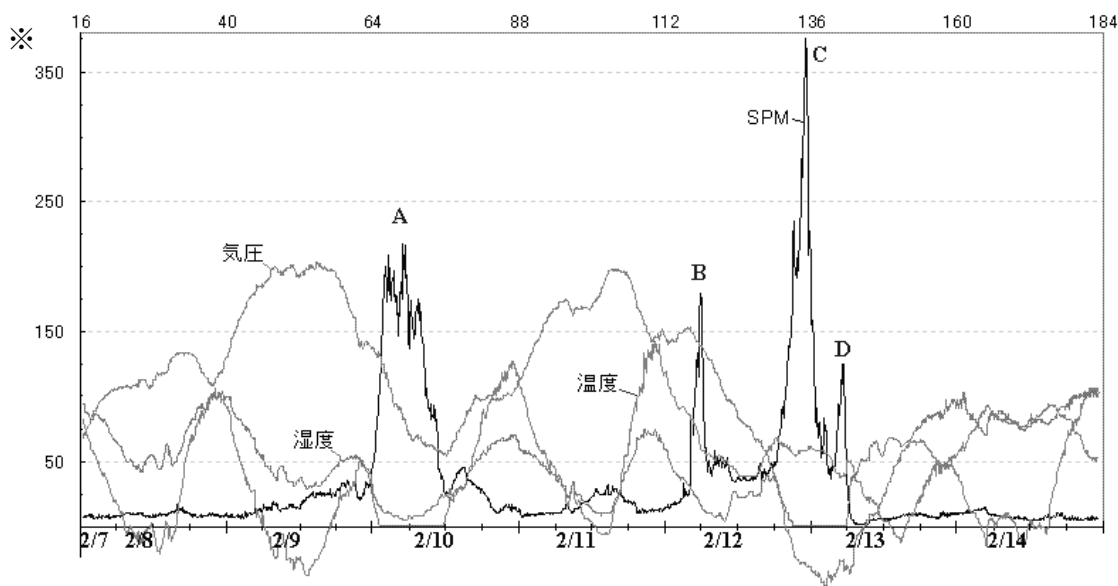


図16. 江戸川大学での観測結果（2008年2月7日から14日）

※グラフ縦軸の左側の数値は、SPM[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]は実測値そのままである。温度[$^{\circ}\text{C}$]は実測値を2倍した。気圧[hPa]は実測値から1000を引いた。10倍湿度RH[%]は実測値を100から引いた。つまり、SPM以外は全て相対的な値である。

（3）デジタル画像によるSPM簡易測定法の開発に関する研究

画像ファイルを得る手段は、冷却CCDカメラからCMOS webカメラまで多種多様である。その中で画素数、画素のビット数、電源の可搬性、画像処理ソフトウェアの完備を考慮するとデジタル一眼レフカメラが最適と思われる。よく知られているように市販のデジタルカメラに使われている受光素子部CCDは、人の目に比べ観測波長で紫外、赤外を含み約2倍、その感度は平均5倍となっており、デジタルカメラで撮影されたデジタル画像に内在する多量のデータを可視化することで、身近なSPM観測を容易なものとするのが期待できる。

RAWファイルのビット数は12である。しかし、RAWファイルは直接自作ソフトウェアからアクセスできない(ファイル形式の詳細が公表されていない)。そこで、各社から提供されているRAW現像ソフトウェア(たとえばPentax Photo Browser)を使用し、画像に様々な変換(ホワイトバランス、色温度設定、noise reduction、コントラスト強調、ヒストグラム調整)を行う。変換後一般的な画像フォーマット(TIFFなど)に変換する。最終的な画像のビット数は8であるが、編集は12ビットで行う。

空を撮影しRAW現像ソフトウェアでコントラスト強調処理を試みたが、SPMの可視化は十分には出来なかった。SPMはppbオーダの濃度であり、ほとんど透明である。またエアロゾルであるため輪郭は明瞭でなく、径数十 μm 以上の粒子と違い虹のような色彩を伴う現象を起こさない。画像化

は極めて困難である。映像としてはかすかな霧であるがSPMを可視化するために、次のような条件下で処理した。

- 1) 背景が均一である、
- 2) 太陽光球の近傍である、
- 3) SPMが水蒸気の豊富な大気中に進入してきたとき。

カメラ側では、

- 4) 長波長の画像成分を抽出する、
- 5) 受光素子の熱雑音を極小化する。

現実には撮影時に条件1)、2)を満たすようにカメラの角度を定めた。また、SPMの挙動を捉えようとする際には、条件3)を満たすよう海に向かって風が吹いているときの空を狙って撮影した。そして、カメラの撮影情報設定時に感度最低に設定する(条件5))。条件4)は画像処理の段階でR成分を抽出した。さらに、条件2)を満たすように日中の南方向の人工的SPM排出源がない地帯を撮影するようにした。

図17はRAW現像ソフトウェアでコントラスト強調処理が施されている。その上にモノクローム化時にRGB成分を $Z=(B+2G+R)/4$ とし、このZ(16ビット)をRGB成分に代入し8ビットとした。その操作は受光素子の熱雑音を減じ、かつB成分の寄与が減るため解像度とコントラストが向上する。一般のレンズはB領域の収差補正がG領域に比べて悪いので上記の効果が現れる。したがって眼視よりもSPMの存在は明らかである。しかしまだ明瞭ではない。そこで、より明瞭な画像を得るため、次のようにピクセル値を変換した。

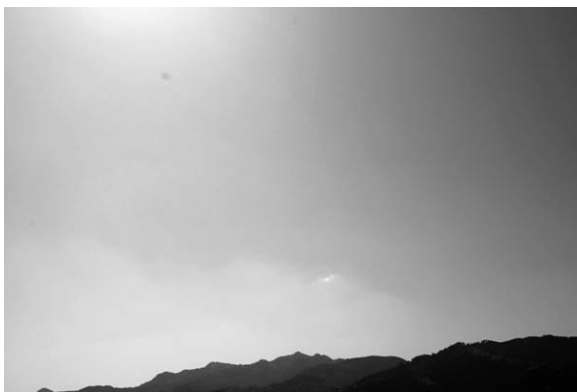


図17. RAW現像ソフトウェアでコントラスト強調処理した画像（宮崎大学での撮影、2007年3月28日11時24分）

1) RAW現像ソフトの出力画像をTIF8ビット形式とし、ファイル・コンバータでRGB形式に変換し、Fortranプログラムでbinary形式でopenし、書式なしREAD文で読みRGB 3成分からR成分を抽出した。

2) ピクセルのR成分値を $\{X_i\}$ と書くと、

$$0 \leq X_i \leq 28-1=255, \quad (1)$$

である。画像のどの部分に写っているか分からないSPMを強調するために、画面の至る所コントラスト強調処理を施す。すなわち、

$$\{Y_i\} = \{\text{mod}(X_i^n, 256)\}, \quad 0 \leq Y_i \leq 255, \quad (2)$$

とする。ここでnは経験的に決定する定数である。有効数字は目的の画像の調子により変化する。当然撮影機材によっても変わる。経験ではn=1.2~1.6が適切であった。X_iⁿではなくaX_i(aは定数)でも良いが、デジタルカメラの高輝度部は実照度に比べ輝度値の増加が抑制されているのでコントラスト強調効果は低下する。

3) 式(3, 4)により画像の規格化を行い、{Y_i'}をファイルに出力する。

$$Y_{\text{max}} = \max(Y_i), \quad Y_{\text{min}} = \min(Y_i), \quad (3)$$

$$\{Y_i'\} = F\{Y_i - Y_{\text{min}}\}, \quad F = 255 / (Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}), \quad (4)$$

この規格化は式(2)より不要に思われるかも知れないが、右辺のX_iの値によっては[Y_{min}, Y_{max}]が[0, 255]にならない場合がありうる。僅かな確率で、効果も画素値の範囲を小拡大するだけであるが悪影響はないので使用した。

図17のR成分をn=1.51で画像化したものを図18に示す。



図18. 図17をR成分について強調した画像

式(2)による画像強調処理は有効に作用し、黄砂は低空の霧のように明確になった。丘陵を越えて流入してきた黄砂は不定形で高濃度の中心部と周辺部からなる。その分布はさらに詳細な構造があるように見える。

希薄な周辺部では小さな雲(矢印)の生成が見られた。雲は5分で消滅した。雲生成はその付近の大気が湿潤であることを示すが、湿潤な大気もまたSPMと一緒に流動している。雲が生成した理由は湿潤なSPMを含む大気が丘陵地帯の稜線にあると考えられる。図18の画角は横58.5度、縦41.0度である。丘陵は国土地理院1/25000地形図「日向青島」のくん鉢山(標高500m)の東尾根で標高178~388mである。尾根の中央部(標高260m)までの撮影点宮崎大学工学部E棟7Fからの距離は2.5kmである。図18の中央下部の小さな雲の高度は仰角(7.62度)から計算すると590mである。

式(2)の剰余関数によりpixel値255を超える高輝度部はいったん0に戻る。それゆえ画面に白黒の不連続曲線が描かれる。そのような曲線は一般写真では有害であるが、SPMの分布を知るためには有用である。線が滑らかであるときSPMは均一分布である。曲線が急激に曲がり波打っているときは特徴的なSPM分布がある。図18の丘陵部に近い空では曲線が波打っている。そこでは画像では明確ではないがSPMが存在する。

同日の黄砂は西風により宮崎平野に流入し日向灘に抜けた。黄砂の背面を図19に示す。



図19. 宮崎大学工学部E棟7Fから東方向に撮影したもの

同様の手法を用いて、千葉県流山市の夕方、西方向の空の画像からR成分を抽出し、強調した画像を図20に示す。白い円で囲った部分に霧状の何かが存在することがわかる。



図20. 流山市上空のコントラスト強調R画像（2007年7月9日18時35分）

さらに、流山市から筑波山の方角に向かって撮影した画像を図21に示す。この画像を筑波山周辺でトリミングした画像が図22である。筑波山に向かい、左から右の方向へSPMが流れている様子がわかる。上下の黒線は同一輝度線である。線が波打っているのは大気中の乱流を示す。両線

の間はポジ領域でかすかにSPMが黒く見える。

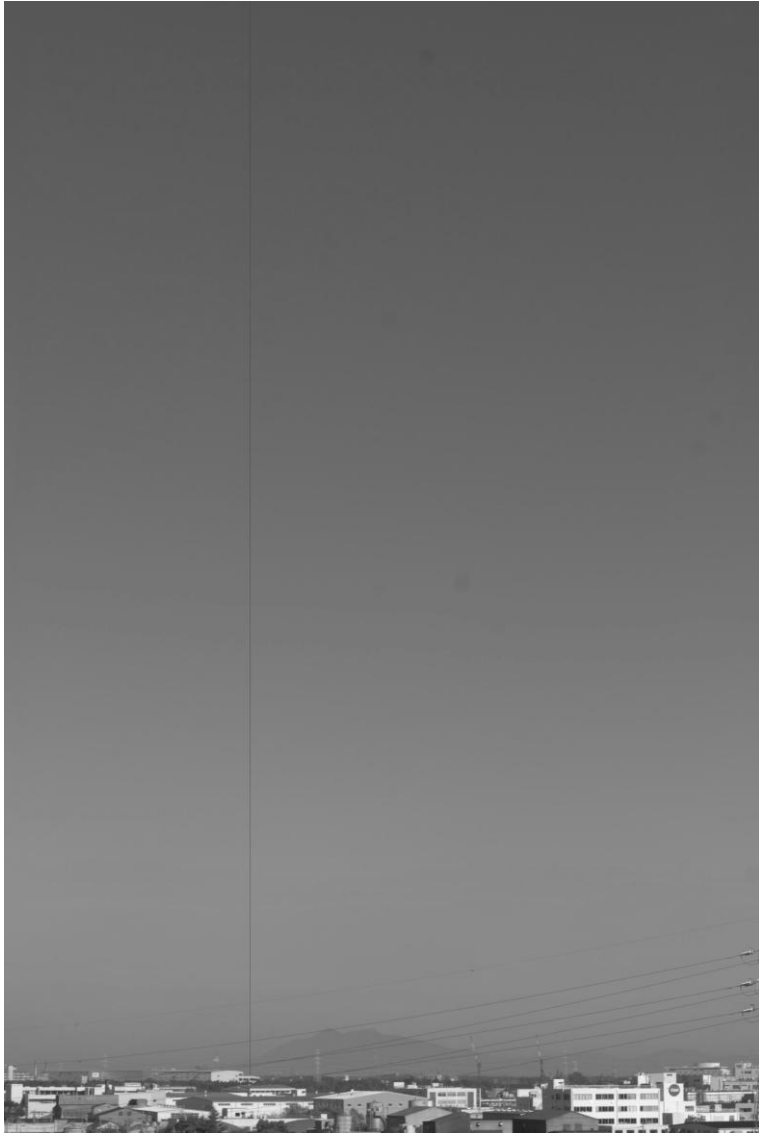


図21. 流山から筑波山に向かって撮影した画像（2008年11月21日10時23分）



図22. 図21をトリミングし、コントラスト強調した画像

マレーシアのクアラルンプール上空での朝の画像をコントラスト強調したものを図23に示す。左の画像の30分前に撮影したものには、右側のような霧状のものは見られず、交通渋滞が始まった後に発生した大気状況の変化をデジタルカメラで捉えることが可能である。

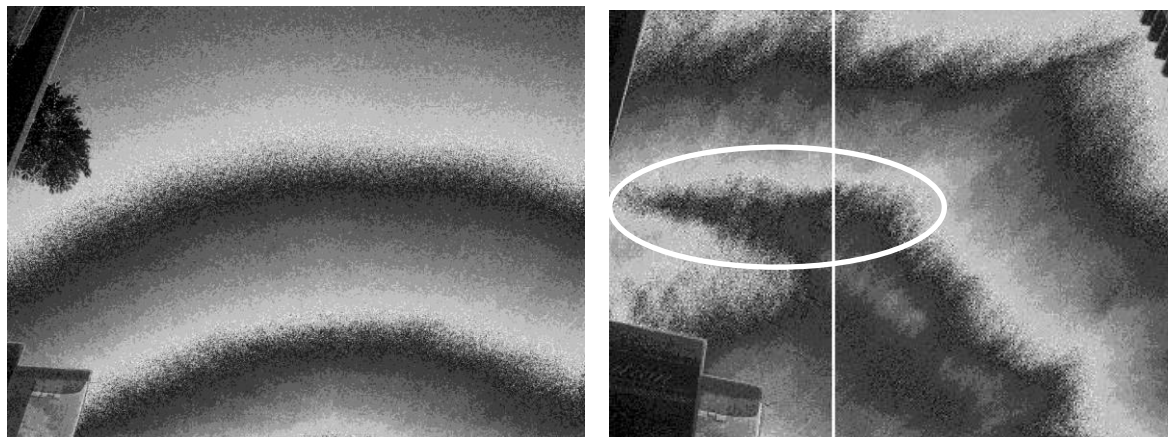


図23. クアラルンプール上空のコントラスト強調R画像（2007年8月8日左は8時35分、右は9時6分撮影）

図24は図23右の縦軸に平行に引いた線の部分を処理したものである。この図の{B/R}曲線の変化は、図23の円で囲った部分にMie散乱の多い部分があることを示す。すなわち、SPMが存在することを示している。

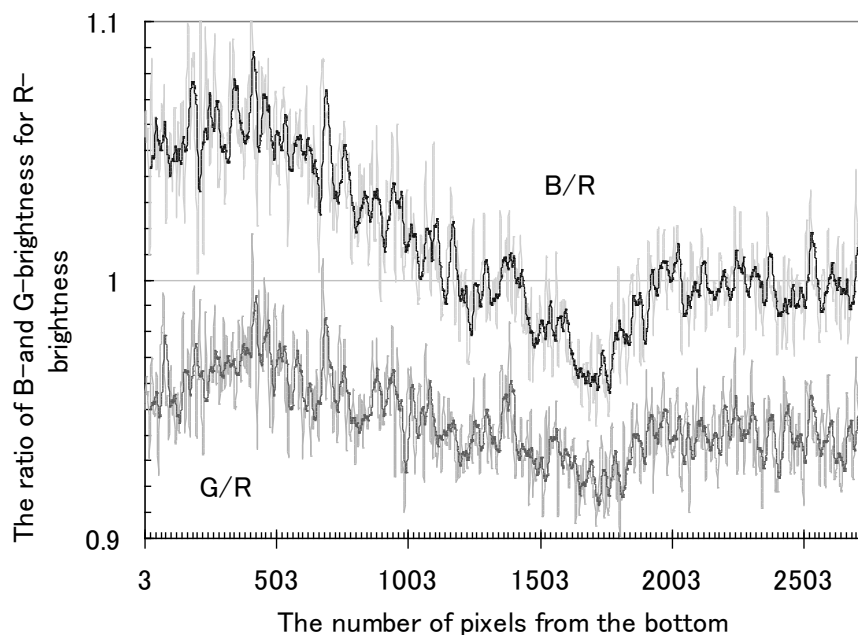


図24. 図23に示した画像のG/R,B/R, B/G（画像縦線上）

図25に鄭州で撮影した画像をコントラスト強調画像とともに示す。また、同様に図26に登封で撮影した画像を示す。鄭州も登封も直接観察している際には気が付かないが、デジタル画像での解析によって、空気が清浄ではないことがわかる。登封はこの写っている山の向こうが中国の中でも大都市の洛陽である。山を越えて汚染が広がっている状況がうかがえる。



図25. 鄭州で撮影したもの（2008年10月24日10時13分）



図26. 登封で撮影したもの（2008年10月25日9時48分）

ここで、大気汚染観測の標準を決めるために晴天のデジタル画像の解析を行った。撮影方法は、広角レンズを用いて太陽を背にし、画像下部に地表の目標物を入れ、地表から天頂までを撮影した。画像はRAW形式で保存した。RGB 3成分からR、G、B成分を抽出した際の縦前後3行（つまり7行分）、横左右3列（つまり7列分）のデータを平均し、そのピクセルでの代表値とした。さらにカメラの機種依存性を除くために、G/R、B/R、B/Gの比を比較した。

宮崎県南宮崎駅の画像をコントラスト強調画像(右)とともに図27に示す。撮影はPentax *ist DS2を用い、レンズはDA21/3.2、絞りF8である。

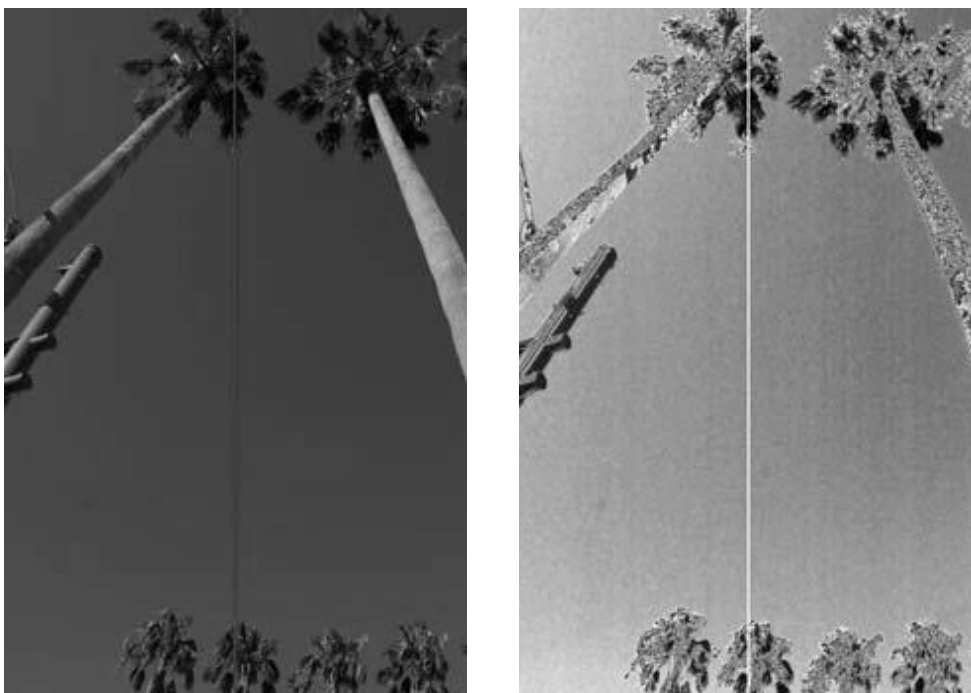


図27. 南宮崎駅で撮影したもの（2007年8月6日, 16時25分）

とても均一な空の画像であることは直接観察上でもよくわかる。図28に図27に示した画像のG/R, B/R, B/Gを示した。表2にそれぞれの平均値を示した。平均は上空1000ピクセルを取った。

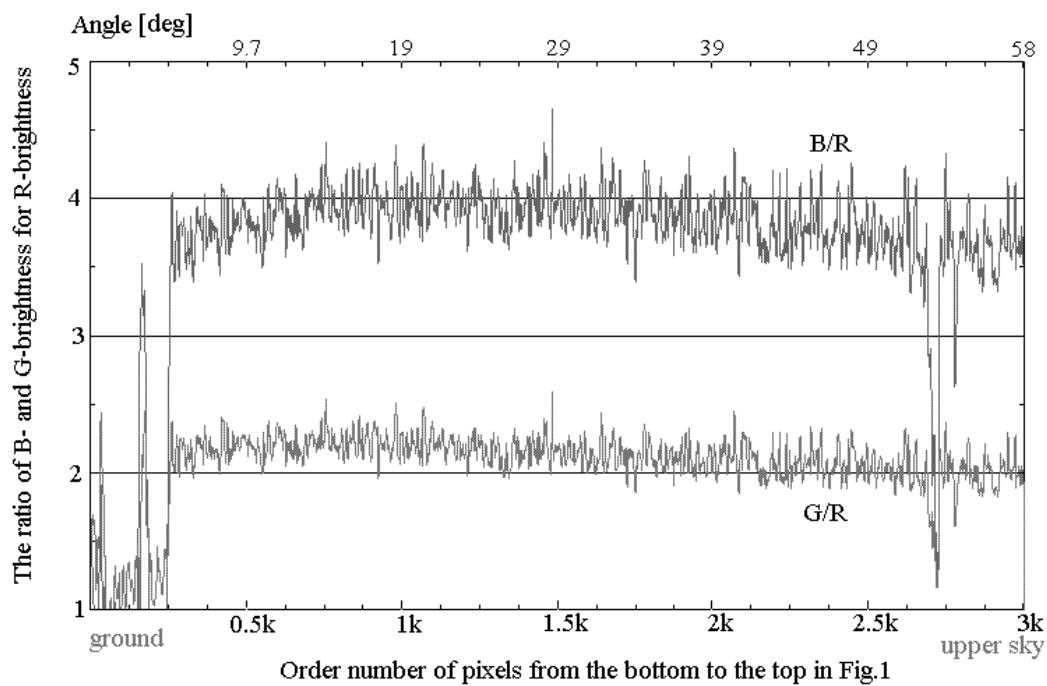


図28. 図27に示した画像のG/R, B/R, B/G（画像中央の線上）

表2. G/R, B/R, B/G比の平均値（図27中の縦線の部分）

	G/R	B/R	B/G
Average	2.14	3.94	1.84
STDEV	0.05	0.09	0.03

本画像はB/R が4.0に近く、この画像がこれまで撮影した画像の中で一番B/Rの平均値が大きく、青く晴れ渡った空の画像である。

さらに、複数の都市で撮影した晴天のデジタル画像を解析した結果を示す。晴天はデジタル画像解析でどのようにとらえられるかを、オーストラリアのシドニー、日本の九州南東部（宮崎市）、美ヶ原（松本市）、及び関東東北部（水戸、土浦、つくば）そして都内（三軒茶屋）で撮影したデジタル画像を解析することによって明らかにすることを試みる。撮影方法は、広角レンズを用いて太陽を背にし、画像下部に地表の目標物を入れ、地表から天頂までを撮影した。画像はRAW形式で保存した。

まず、図29は美ヶ原高原（松本市）、図30は土浦駅前（土浦市）での画像である。



図29. 美ヶ原高原で撮影したもの（2008年11月6日）

美ヶ原高原の撮影はオリンパスE-410にZUIKO DIGITAL ED 14-42mmF3.5-5.6レンズで行った。絞りはF16である。美ヶ原高原は長野県松本市の東に位置し、主峰王ヶ頭（2034m）を中心に北に武石峰、南に茶臼山、東に物見石山、西に王ヶ鼻（2008m）など標高2000m近い熔岩台地で多くの亜高山植物が咲き競い、遠く富士山をはじめ、北アルプス、中央アルプス、南アルプス、八ヶ岳の雄大な360度のパノラマが壮麗な美しい高原である。撮影日時は2008年11月6日12時過ぎである。



図30. 土浦駅で撮影したもの（2008年10月30日）

図29と図30のG/R、B/R、B/Gの比を図31に示す。比=1.0が白色を表す。上の美ヶ原（図29）は線が横に走っているのので、東に向かって緩やかにG/R、B/Rの値が小さくなっていることがわかる。下の土浦（図30）は天頂（左端）から地上（右端）に向かって比が小さくなっている。これは、地表に近くなるとSPM等の影響が強くなるため白くなってくるためである。

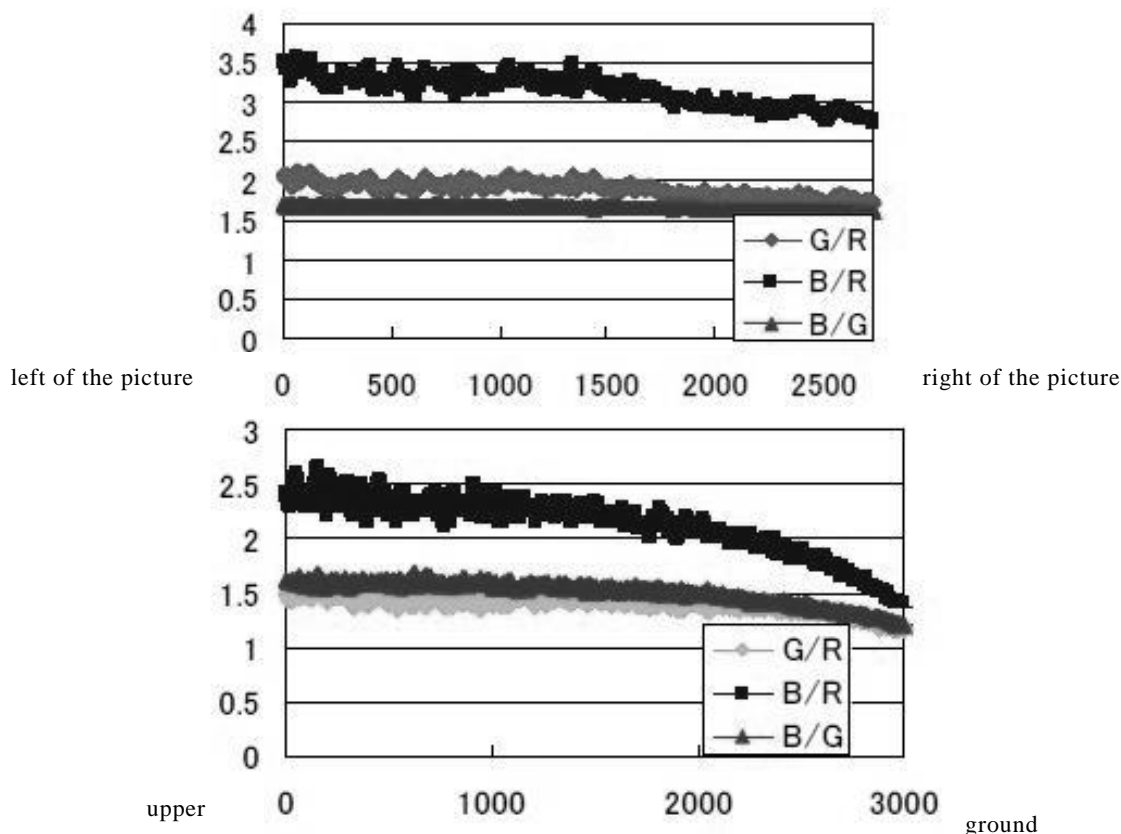


図31. 図29と図30画像のG/R, B/R, B/G (各図中の線の部分)

G/R、B/R、B/G各値の平均値と標準偏差を表3に示す。美ヶ原のB/R=3.15は常に赤と青の値の比が大きく、清浄な空を示している。もちろん、土浦の2.27もとても綺麗な青空であることを示している。大まかに言えば晴天のデジタル画像はカメラによる差があるとはいえB/Rが2より大きく、またG/RとB/Gがほぼ等しく、それぞれ1.5程度の値を持つということが出来る。

表3 美ヶ原と土浦の平均値と標準偏差

Utsukushigahara	G/R	B/R	B/G
Average	1.90	3.15	1.66
Deviation	0.09	0.19	0.03

Tsuchiura	G/R	B/R	B/G
Average	1.47	2.34	1.60
Deviation	0.06	0.09	0.03

図29と図30のR成分をn=1.41で画像化したものを図32に示す。白い線が解析されたピクセルである。解析するピクセルが均一な空間を切っていることが判る。均一に光度が変化している場合の典型的な縞模様が現れており、このときの土浦上空には特にSPM塊等は見られない。

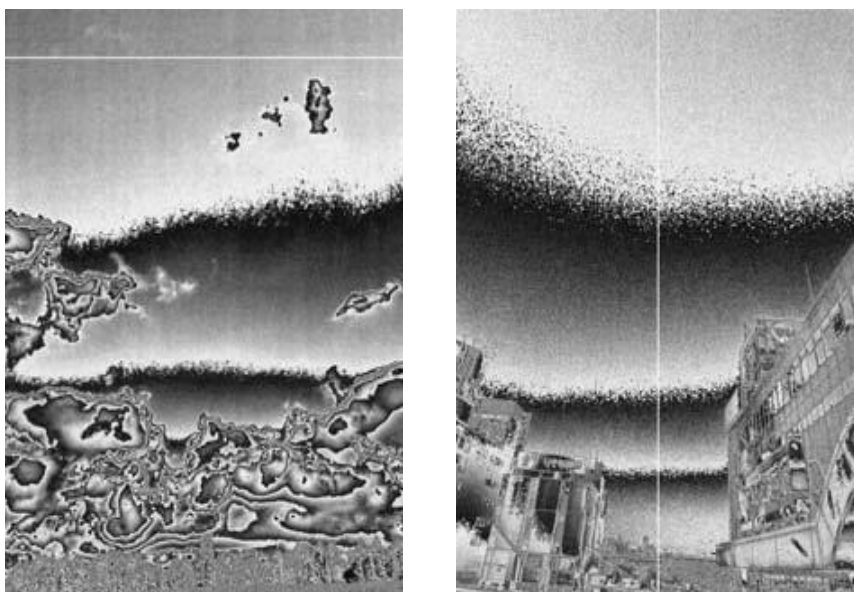


図32. 図29（美ヶ原高原）と図30（土浦）のコントラスト強調R画像

参考までに、つくば市での曇天の空の画像とコントラスト強調画像を図33に、G/R, B/R, B/Gを図34にそれぞれ示す。この撮影にはハンディーカメラのリコーGX100で行った。各値の平均値と標準偏差を表4に示す。



図33. つくば市での曇天の空の画像（左）とコントラスト強調画像（右）（2008年12月8日）

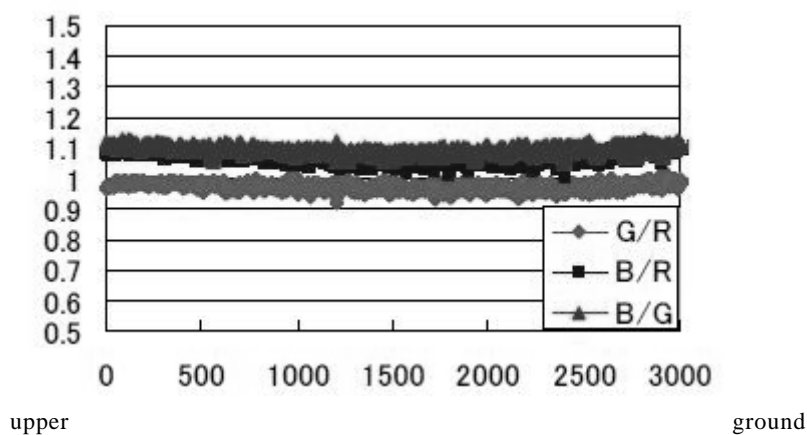


図34. つくば市曇天画像のG/R, B/R, B/G (図33中の縦線の部分)

表4. つくば市曇天画像の平均値と標準偏差 (図33中の縦線の部分)

Cloudy Sky	G/R	B/R	B/G
Average	0.97	1.06	1.09
STDEV	0.01	0.02	0.01

この空が上空から地上まで、非常に均一な曇り空であり、図34 と表4からは、このときのG/R, B/R, B/G の値がほぼ1.0であることがわかる。

図35にシドニー湾で撮影した画像をコントラスト増強画像とともに示した。撮影場所は、シドニー水族館の前である。撮影はハンディーカメラのリコーGX100で行った。下部に海面が見えている。コントラスト増強画像からは、この時の空が非常に均一でSPM塊等が見られないことがわかる。

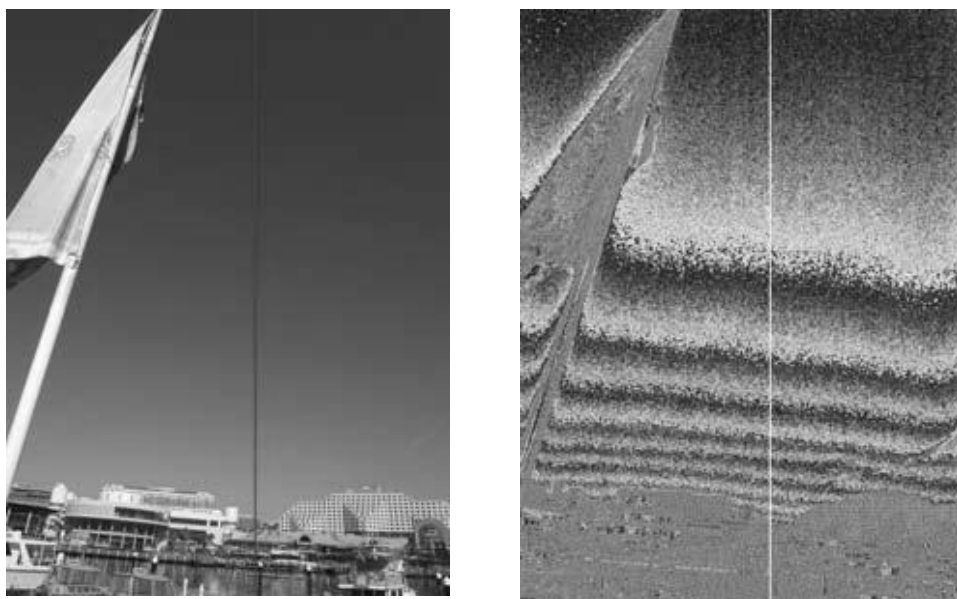


図35. シドニー湾での晴天の空の画像 (左) とコントラスト強調画像 (右) (2008年9月12日)

図36に 図35に示した画像のG/R, B/R, B/G を示した。シドニーは大都市であるため右側の地上(2000 ピクセルより大きな部分)はSPMのため急速に白に向かっているが、上空は非常に青い。表5にG/R, B/R, B/G の平均値を示した。平均は上空1000ピクセルを取った。B/R が2.8であり青く澄み渡った晴天であることがわかる。ほぼ霞ヶ浦が近い土浦はシドニーとほぼ同様な環境のように思えるが、図31のB/R は2.3であった。海拔0メートルで、シドニーのような大都市でこのように澄み渡った空が見られるのは驚きである。土浦にはSPM が流れ込んできているのかもしれない。

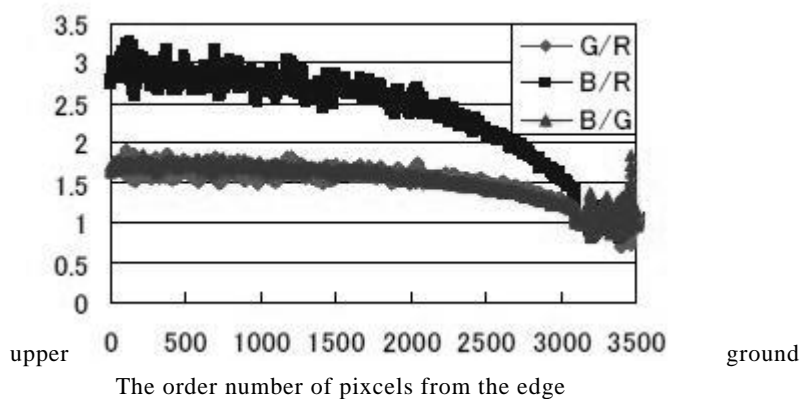


図36. シドニー晴天画像のG/R, B/R, B/G (図35中の縦線の部分)

表5. シドニー晴天画像の平均値と標準偏差 (図35中の縦線の部分)

	G/R	B/R	B/G
Average	1.65	2.84	1.73
STDEV	0.07	0.12	0.03

水戸は東北関東の中堅都市であり、北と西が山地に遮られ、南と東が開けている。水戸市中心部の茨城大構内で撮影した画像をコントラスト強調画像とともに図37に示す。撮影はハンディカメラのリコーGX100で行った。とても均一な空の画像であることがわかる。図38に図37に示した画像のG/R, B/R, B/Gを示した。表6にそれぞれの平均値を示した。平均は上空1000ピクセルを取った。

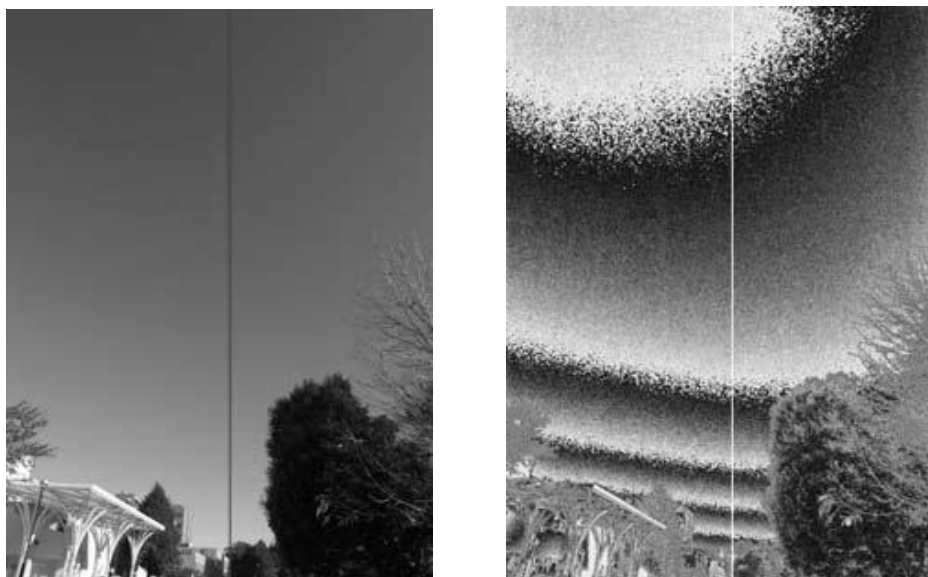


図37. 水戸での晴天の空の画像（左）とコントラスト強調画像（右）（2008年11月20日）

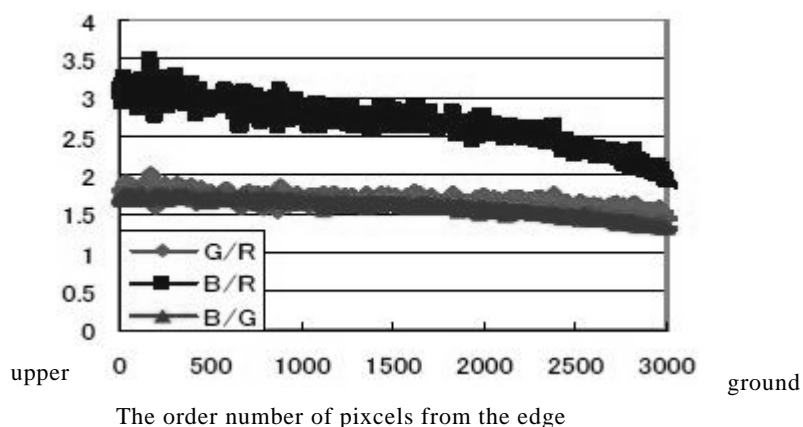


図38. 水戸晴天画像のG/R, B/R, B/G（図37中の縦線の部分）

表6. 水戸晴天画像の平均値と標準偏差（図37中の縦線の部分）

	G/R	B/R	B/G
Average	1.74	2.96	1.70
STDEV	0.07	0.13	0.03

B/R 値は、上空の平均が2.9であり、上空はシドニーや土浦より清浄である事を示している。図36を見ると地上すれすれで2.0を切るほどであり、SPMの滞留等も観測されない。県庁所在地の30万都市としてはずいぶん清浄な空である。

つくばは東北山系の南端に位置した、関東平野の小都市である。中心地のつくばバスセンター付近の画像をコントラスト強調画像とともに図39に示す。撮影はハンディーカメラのリコーGX100

で行った。とても均一な空の画像であることがわかる。図40に図39に示した画像のG/R, B/R, B/Gを示した。表7にそれぞれの平均値を示した。平均は上空1000ピクセルを取った。

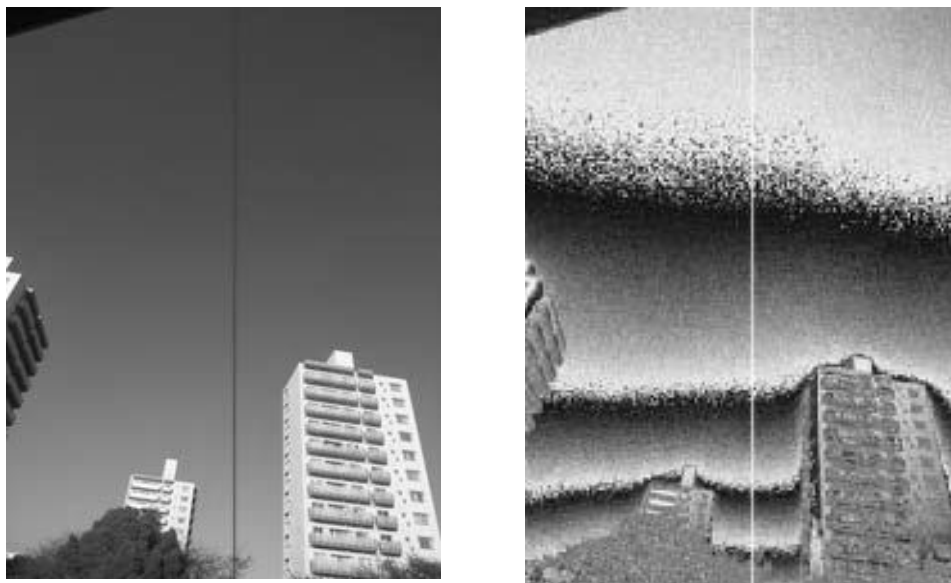


図39. つくばでの晴天の空の画像（左）とコントラスト強調画像（右）（2008年11月1日）

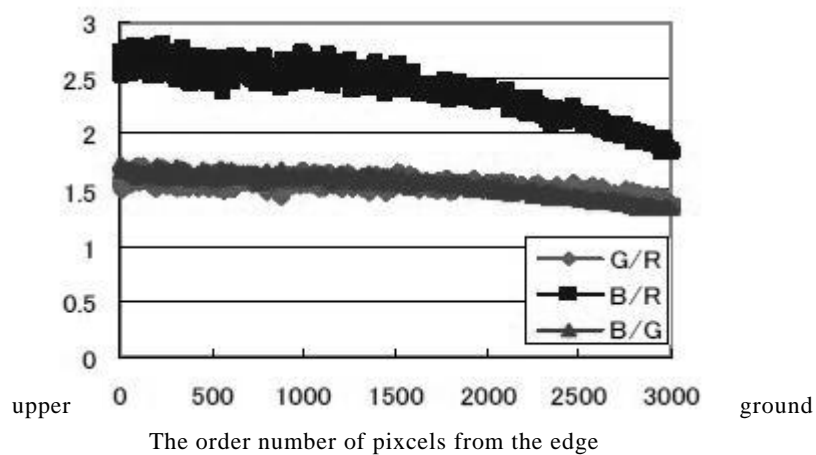


図40. つくば晴天画像のG/R, B/R, B/G（図39中の縦線の部分）

表7. つくば晴天画像の平均値と標準偏差（図39中の縦線の部分）

	G/R	B/R	B/G
Average	1.58	2.59	1.64
STDEV	0.05	0.08	0.03

B/R の平均値は2.6であり、水戸の3.0に比べると小さい。これは水戸に比べて青さが弱い事を意味している。SPMの量の違いが示唆されるが、これはつくばが都心に近いためなのだろう。両者

を比較するためには、より観測密度を高め、きめ細やかな観測をすることが必要である。

三軒茶屋の昭和女子大から北東を見た画像をコントラスト強調画像とともに図41 に示す。撮影はハンディカメラのリコーGX100で行った。上空はとても均一な空の画像であることがわかる。コントラスト強調画像の右側の白点は、レンズの汚れかCCD の欠陥である。左の通常の画像でもよく見ると判るが、見つけにくい画像の欠陥である。このようにコントラスト強調を行うことで、レンズの汚れやCCD の欠陥を明確に表現することができる。

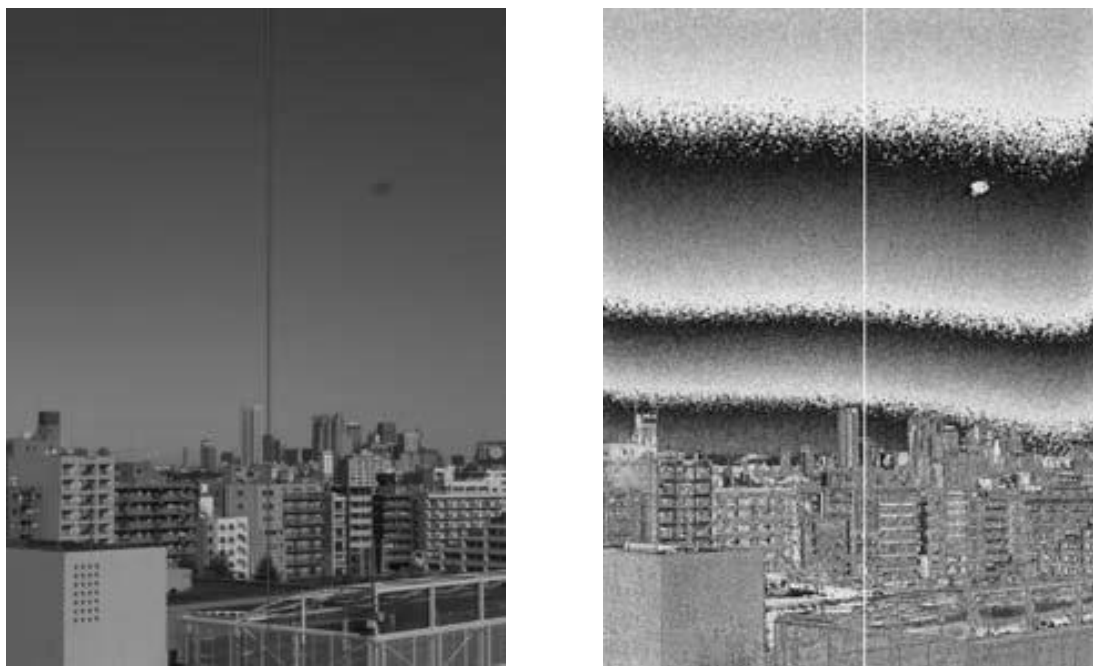


図41. 三軒茶屋での晴天の空の画像（左）とコントラスト強調画像（右）（2008年11月20日）

図42 に図41に示した画像のG/R, B/R, B/G を示した。左端の値は、つくばや土浦と大きく変わらないが、各線の負の傾きが水戸や土浦、つくばのそれに比べ大きく、1500 ピクセル付近でB/R が2.0 より小さくなっている。三軒茶屋では上空は清浄であるが、急激に清浄さが減少している様子がわかる。都心はやはりSPMの濃度が高いためであろう。

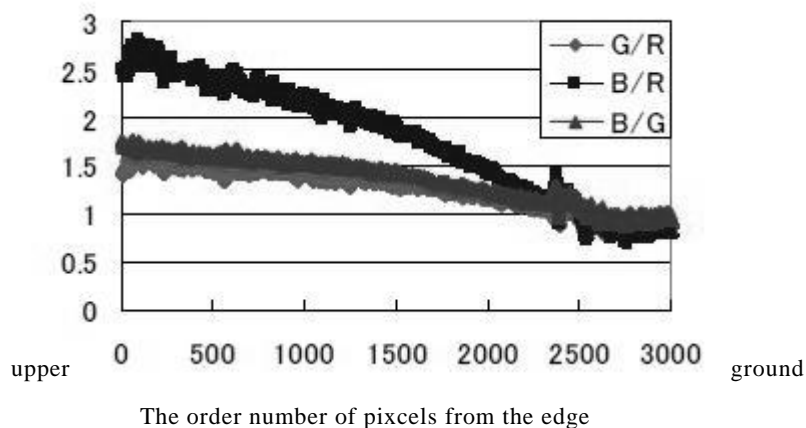


図42. 三軒茶屋晴天画像のG/R, B/R, B/G (図41中の縦線の部分)

表8. 三軒茶屋晴天画像の平均値と標準偏差 (図41中の縦線の部分)

	G/R	B/R	B/G
Average	1.49	2.41	1.62
STDEV	0.07	0.11	0.04

表8にそれぞれの平均値を示した。平均は上空1000ピクセルを取った。平均値は上空のそれであるため、つくばや土浦とほぼ同等であるが、標準偏差が大きいつくばや土浦とは大気の様子が違うことがうかがわれる。

赤道付近のグレートバリアリーフ上空で飛行機より撮影した外部の画像をコントラスト強調画像とともに図43に示す。撮影はハンディーカメラのリコーGX100で行った。本観測は可視光の観測であるので、透明なアクリルの窓の存在は本画像解析には大きな影響を与えない。

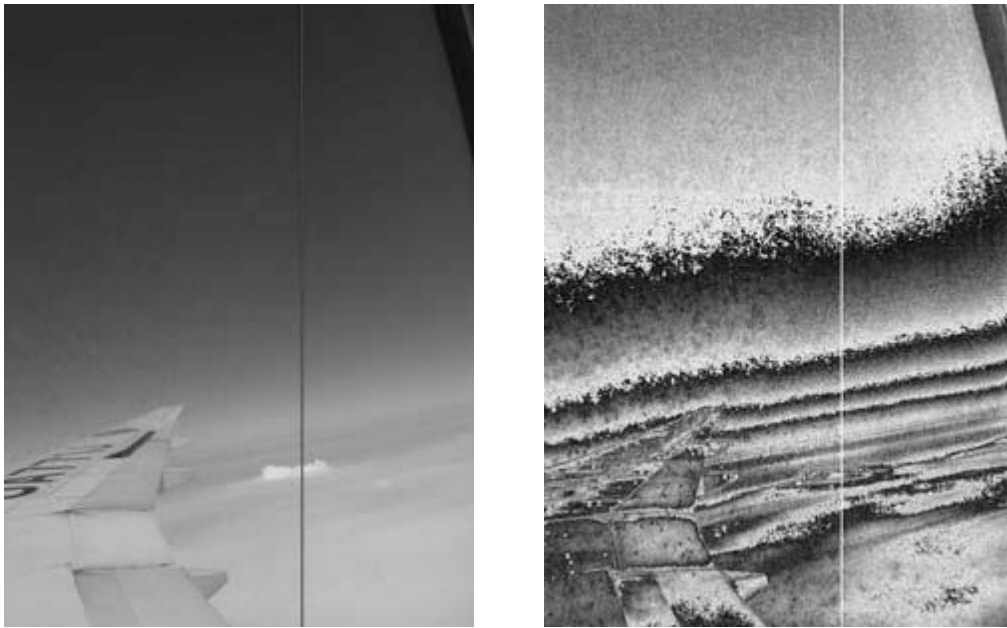


図43. グレートバリアリーフ上空の画像（左）とコントラスト強調画像（右）（2008年9月18日）

上空は、とても均一な空の画像であることがわかる。下側は成層圏の下側の対流圏上部に存在する雲である。右側の白い固まりはもし本来の水主成分の雲であるならば、観測されるであろう白さを持つ雲の固まりであるが、その雲の上を灰色の雲が覆っていることがわかる。赤道付近の対流圏上部に水主成分ではないSPMの層があることがわかる。

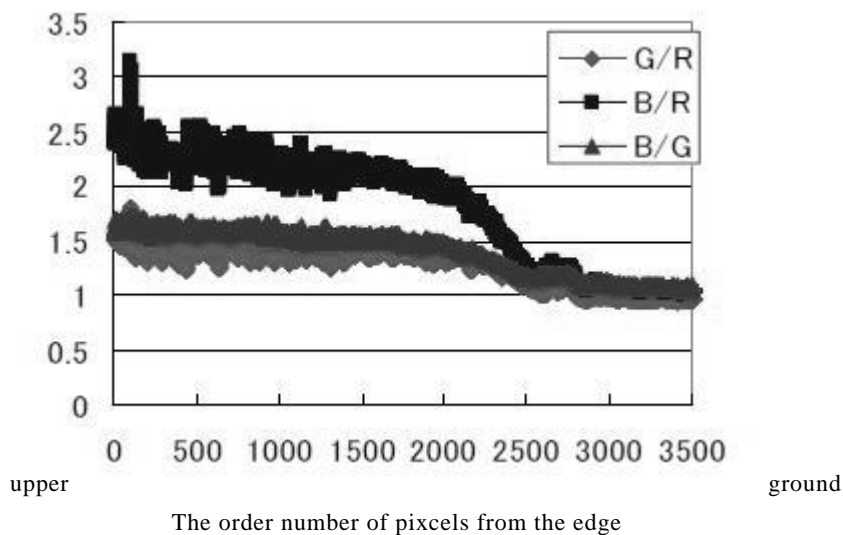


図44. グレートバリアリーフ上空画像のG/R, B/R, B/G（図42中の縦線の部分）

表9. グレートバリアリーフ上空画像の平均値と標準偏差（図42中の縦線の部分）

	G/R	B/R	B/G
Average	1.43	2.30	1.61
STDEV	0.08	0.15	0.04

図44に図43に示した画像のG/R、B/R、B/Gを示した。また表9にそれぞれの平均値を示した。平均は上空1000ピクセルを取った。B/Rの値が2000ピクセル辺りで2.0を切り始め、2600辺りで1.0を切り、2700で丁度白い部分となる。図43に見られる輝く白い雲は、B/R、G/R、B/Gが1.0をわずかに超える値の小山となって観測されている。先にも述べたが、対流圏と成層圏の間に黒いSPMの層が存在している。このSPMについては、さらに分光器を用いてスペクトルを観測するなど詳しい観測が必要である。

高輝度を示す図44のピクセル数2300-3000のR、G、B値そのまゝを図45に示す。ピクセル2700-2800が高輝度部分である。この雲は実質的にR=G=Bであり、図45を見てもわかるとおり、真っ白である。ここでRが強くなるのはRICOH GXの特徴である。ピクセル数2500と2600の間で、R曲線がG、B曲線と明らかに違うことがわかる。これは、R成分の多いmistの存在を示唆している。

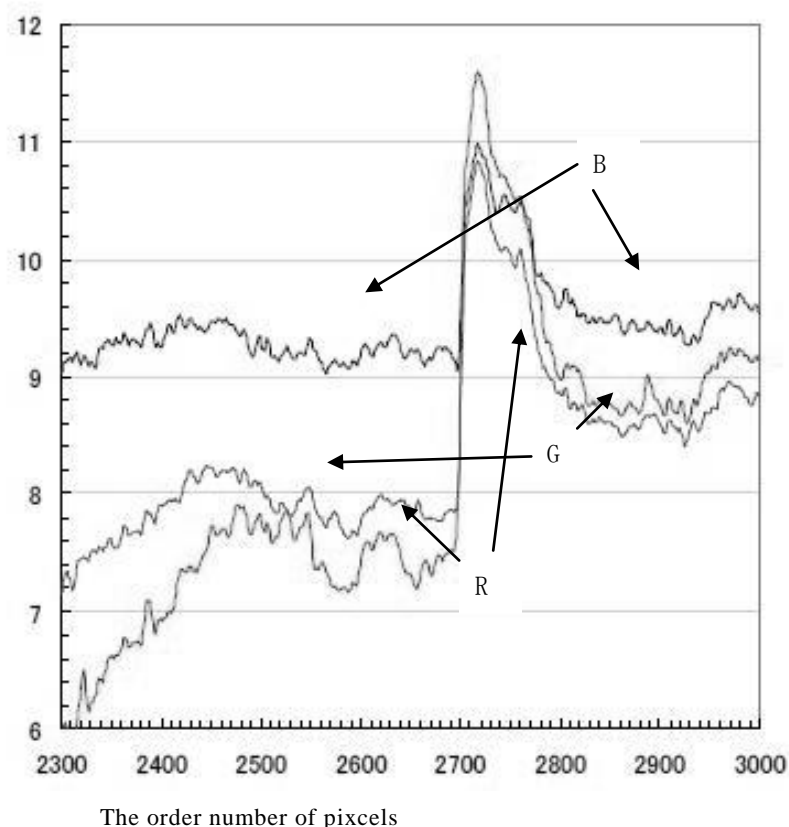


図45. グレートバリアリーフ上空画像のR, G, B値

飛行機からの画像を解析したものとして、図46にニューヨーク行きの飛行機から撮影した画像

を示す。撮影はハンディーカメラのリコーGX100で行った。霧が対流圏と成層圏の境目にかすかに写っている。

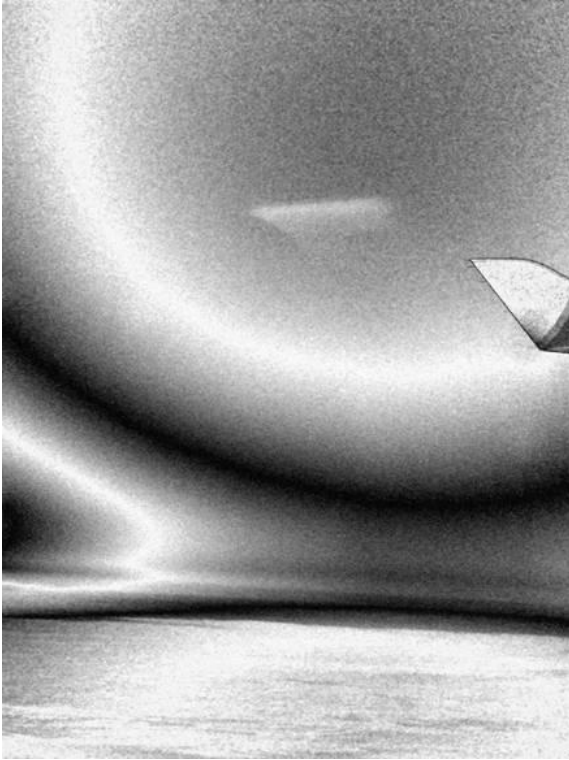


図46. NY行きフライトのコントラスト強調画像（2008年3月18日15時40分）

界面にR成分の多いmistがあるということは、これら以外にも観測されている。2009年2月12日宮崎に飛来した小規模黄砂の画像を図47に、そのRGB値のグラフを図48に示す。天候は快晴である。撮影はPentax K100D superで行った。レンズはsuper multi-coated Pentax FDA 100/2.8である。

図47の横軸は図46の中央部の岡の端を0.0とした仰角であり、解析は図46の中央縦である。これを見るとG, B成分に異常はなく、R成分が不規則に上空まで波打っており、図42、図45に示された黒い霧と様子が似ていることがわかる。この黒い霧の正体はわかっていない。



図47. 宮崎大学より西方向を撮影したもの（2009年2月12日）

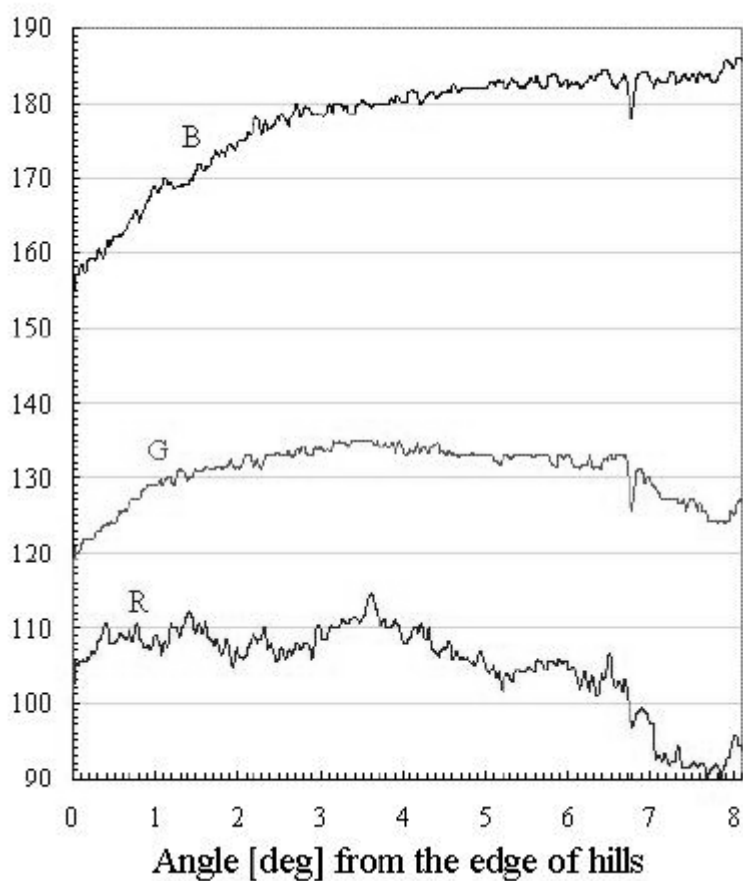


図48. 宮崎大学より西方向を撮影した画像のR, G, B値

このR成分の挙動のみが変化している物質に関しては、より多くの観測データを収集するばかりでなく、分光測定を含む物理化学的測定を行い、雲の構成物質を同定することが必要である。

以上のように、雲一つ見られない晴天は、人間の眼で晴天に感じられる空であっても、デジタル画像のB/R比でみると場所による違いが見られ、デジタルカメラの感度の良さが確認された。デジタル画像のB/R比では宮崎市では3.9、美ヶ原及び水戸では3.0に近い値となり、シドニーやつくばなどの平地では2.0以上の値を取ることがわかった。都心（三軒茶屋）ではSPM濃度が高く、B/Rが2.0を超える晴天の画像は得られなかった。航空機から撮影した画像でも、天頂付近は2.0を超える値となる。大まかに言えば晴天のデジタル画像はカメラに依存するとはいえ、B/Rが2より大きく、G/RとB/Gがほぼ等しく、それぞれ1.5程度の値をもつということができる。

さらに航空機から撮影した画像では、対流圏と成層圏の境にSPMとおぼしき暗い雲が漂っていることがデジタル画像解析からわかった。これは、R成分のみが変化している物質であるが、その詳細は不明である。

今後の課題としては大気観測の観測密度を高めるために、我々の開発した方法をより簡単な操作で実行できる様にし、だれもがいつでもどこでも大気の観測が実行できる状況を作り出すことが必要である。従来法と新たな手法を組み合わせ、観測の量と質を高めていかなければならない。

（４）離散的データからの等濃度線描画技術の開発に関する研究

公的機関によって計測された2008年4月28日12:00の図49に示す千葉県西部の観測点の内からランダムに6点（表10）を選択し、CQSARを用いて91点（7×13）を補完して描いたSPM分布図（図50下）を示す。

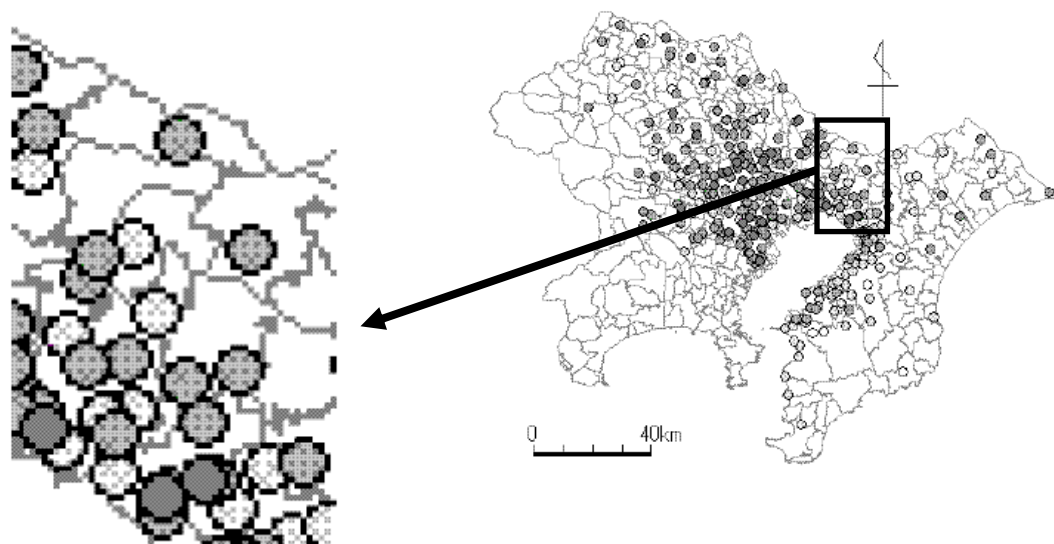


図49. 千葉県西部の観測点

表10. ランダムに選択した千葉県西部の6観測点

pos.	EL	NL	Address
1	35.69309	140.0966	千葉市花見川
2	35.6382	140.1161	千葉市稲毛区天台
3	35.69254	139.9233	市川市富浜
4	35.74537	139.9958	船橋市丸山
5	35.78765	139.9032	松戸市根本
6	35.85707	139.9033	流山市平和台

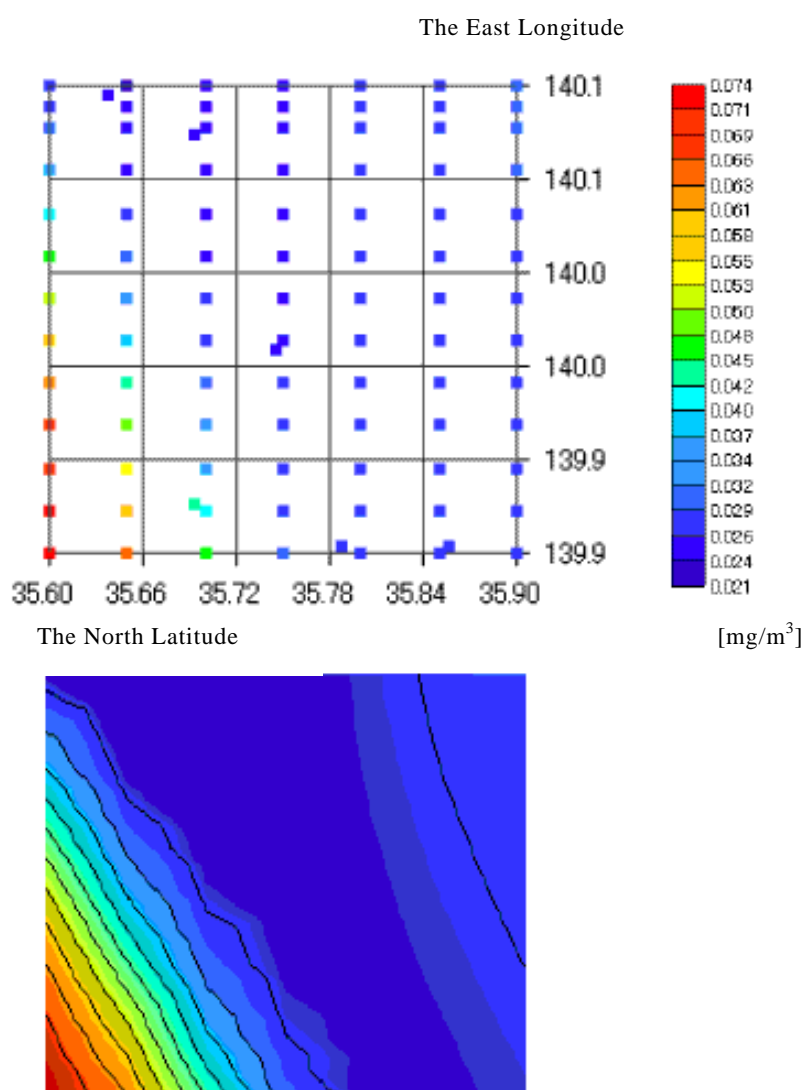


図50. CQSARによる補完点91点と教師データ6点から作られる分布図

図50の上で、格子点上にない(図の格子と一致しない)6点が観測点である。図50下において、下側が東京湾岸で、左側が東京都である。東京都に接する東京湾岸(南西)のSPM濃度が高く、右上

(北東)に向かって緩やかにSPM濃度が低くなっていく様子が直感的にわかる。

表11に、各観測点での観測値と予測値、絶対誤差、相対誤差を示した。最大30%、平均10%のエラーを持つことがわかる。千葉県西部のSPMの分布図の場合、図の端点の誤差が大きい。

表11. 6観測点での観測値と予測値、絶対誤差、相対誤差

pos.	[mg/m ³]		Error	
	Obs.	Est.	abs.	rel. %
1	0.026	0.025	0.0015	5.7
2	0.022	0.024	0.0018	8.2
3	0.043	0.042	0.0007	1.5
4	0.029	0.026	0.0028	9.6
5	0.021	0.027	0.0061	28.8
6	0.029	0.027	0.0022	7.4
		aver.	0.0025	10.2

次に、2008年4月13、14日に研究協力者である中山榮子らがデジタル粉塵計で観測した韓国ソウル市31地点のサンプル教師データを表12に示す。左から測定点の相対的なx、y座標とz座標すなわち観測値である。図51に測定点を示した。図中の番号は表12の番号に対応している。

表12. 教師データ

	x	y	z
1	31.3	35.0	111.54
2	31.3	50.8	107.47
3	36.9	81.0	72.897
4	37.7	63.4	98.729
5	39.5	88.1	74.358
6	45.4	94.3	69.091
7	51.6	66.4	106.57
8	56.3	76.5	77.304
9	61.5	65.8	88.881
10	62.9	56.1	106.47
11	62.9	70.6	113.18
12	64.1	68.0	91.257
13	64.8	40.9	104.25
14	65.6	26.9	83.788
15	66.0	71.9	116.33
16	74.2	41.3	19.622
17	75.6	75.1	100.38
18	77.9	71.9	120.02
19	78.3	36.0	77.761
20	79.3	59.1	125.48
21	86.1	69.4	105.18
22	89.0	89.1	105.44
23	91.6	40.9	95.693
24	94.4	33.8	112.23
25	97.2	94.7	130.71
26	100.1	58.3	102.5
27	103.5	66.8	66.457
28	112.0	45.1	98.756
29	112.2	31.4	148.21
30	120.8	57.9	57.162
31	123.1	23.7	95.112



図51. ソウルの観測点

31 点のサンプル教師データの学習によってCQSAR を用いて補完する点は、 $31.3 \leq x \leq 121.3$ および $23.7 \leq y \leq 93.7$ の範囲でそれぞれ10.0おきに合計80 点、さらに $x=123.1$ の8 点、 $y=94.65$ の10 点を加えた、合計98 点である。

CQSAR で用いた階層型ニューラルネットワークの構造は、3 層であり、中間層のニューロン数は再構築学習法によって最小化された。ニューロン数はそれぞれ、入力層 2、中間層 3、出力層 1 であった。

図52にサンプル教師データの3次元表示として計算機に取り込んだ地図上に等高線を描くことが可能な、早狩が開発した等高線作画プログラムContourMap97.xla⁸⁾で作成したSPMの分布図を示した。

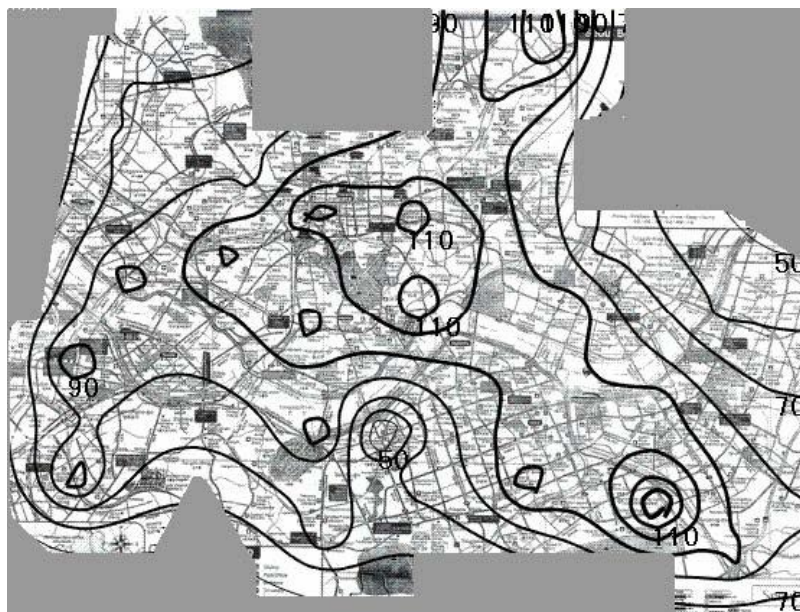


図52. ContourMap97. xlaで作成した分布図

ここで用いている早狩の方法は、早狩によればパソコンの能力の低かった時代に、スプライン法の代わりとなる簡便法としてよく用いられていたものである。

早狩のアルゴリズムを直感的に説明する。まず与えられた観測点にそのデータの高さの棒を立て、それ以外の交点はバックグラウンドデータで埋め尽くしておく。次に観測点はそのままにしてそれ以外の全地点を周囲の値を元に補間する。補間法は、例えば、そのデータの東西南北に接する地点のデータはウェイト3として、斜めに接する地点は2、東西南北の外側を1というウェイトで足し込んで、それらの平均を取るといような方法である。すると、1回目は観測点の周りだけが持ち上がり、それを繰り返すと次第にあたかも棒の上に厚めの布を被せたような形が出来上がる。この反復を繰り返し反復毎の全地点の変形具合が閾値を下回ると反復を終了する。この方法は、観測地点の値は保持されることと、観測点が少ないと独立峰ができやすいという特徴がある。そのため、観測点は多いほど良好である。早狩は、これを簡易スプライン法と呼んでいるが正式な呼称ではないとのことである。

等高線を結ぶ方法は、上記方法で格子点の値が決まると、等高線を引く値を通るグリッドの1マスを探し、その値がそのマスのどの辺から入るか探した後、そこから他の3辺の内どれを横切るかを探索する。それがわかればそのマスを横切る直線を描くことができる。次に出口の辺で接する隣のマスについて次の3辺を探す。それを繰り返して次々と直線を結んでいくと等高線の曲線になる。このような直線の集合体の場合、出来あがった図は非常に重いものになり、図をスクロールするだけでも時間がかかってしまうので、使い物にならない。そこで、実際のプログラムでは交点を結ぶ曲線を、Excelの標準描画作成機能で描いている。

このアルゴリズムでは補外はできないので、図51では、外周の観測点の近傍までは許容するとして、観測点から遠い部分をマスクしてある。この分布図では、ソウル地下鉄環状線にそって繁華街がありそこでの汚染が大きくとなっている印象が得られる。しかし、図52で円状の閉曲線が多くなるのは観測点が少ない、かつ分布が偏在しているからである。

表13にCQSARによる学習結果を示した。16番目の観測点の44%という大きなエラーが観測されているが、それを除けば、平均7.5%程度のエラーで学習が行われている。

16番目の観測点での相対誤差が44%と大きな原因は不明である。特に誤差の絶対値が大きいわけではない。むしろ16番目の観測点の観測値は、他と比べ、極端に小さく、なにか測定に問題があった可能性をうかがわせる。

表13. 学習結果

	z est.	z obs	Δ abs.	Δ rel(%)
1	111.58	111.54	0.04	0.03
2	105.04	107.47	2.43	2.26
3	67.00	72.90	5.90	8.09
4	99.52	98.73	0.79	0.80
5	66.99	74.36	7.37	9.91
6	66.99	69.09	2.10	3.04
7	103.67	106.57	2.90	2.72
8	74.17	77.30	3.13	4.05
9	105.07	88.88	16.19	18.21
10	107.87	106.47	1.41	1.32
11	104.02	113.18	9.16	8.10
12	104.93	91.26	13.67	14.98
13	109.61	104.25	5.35	5.13
14	87.67	83.79	3.88	4.64
15	103.99	116.33	12.34	10.60
16	10.92	19.62	8.70	44.34
17	104.42	100.38	4.03	4.02
18	105.40	120.02	14.63	12.19
19	69.46	77.76	8.30	10.67
20	113.30	125.48	12.18	9.71
21	107.38	105.18	2.21	2.10
22	102.78	105.44	2.65	2.52
23	85.78	95.69	9.91	10.36
24	125.23	112.23	13.00	11.58
25	129.11	130.71	1.59	1.22
26	97.86	102.50	4.64	4.53
27	67.22	66.46	0.76	1.14
28	87.03	98.76	11.73	11.88
29	137.76	148.21	10.45	7.05
30	54.02	57.16	3.14	5.50
31	96.38	95.11	1.27	1.33
		Average	6.32	7.55

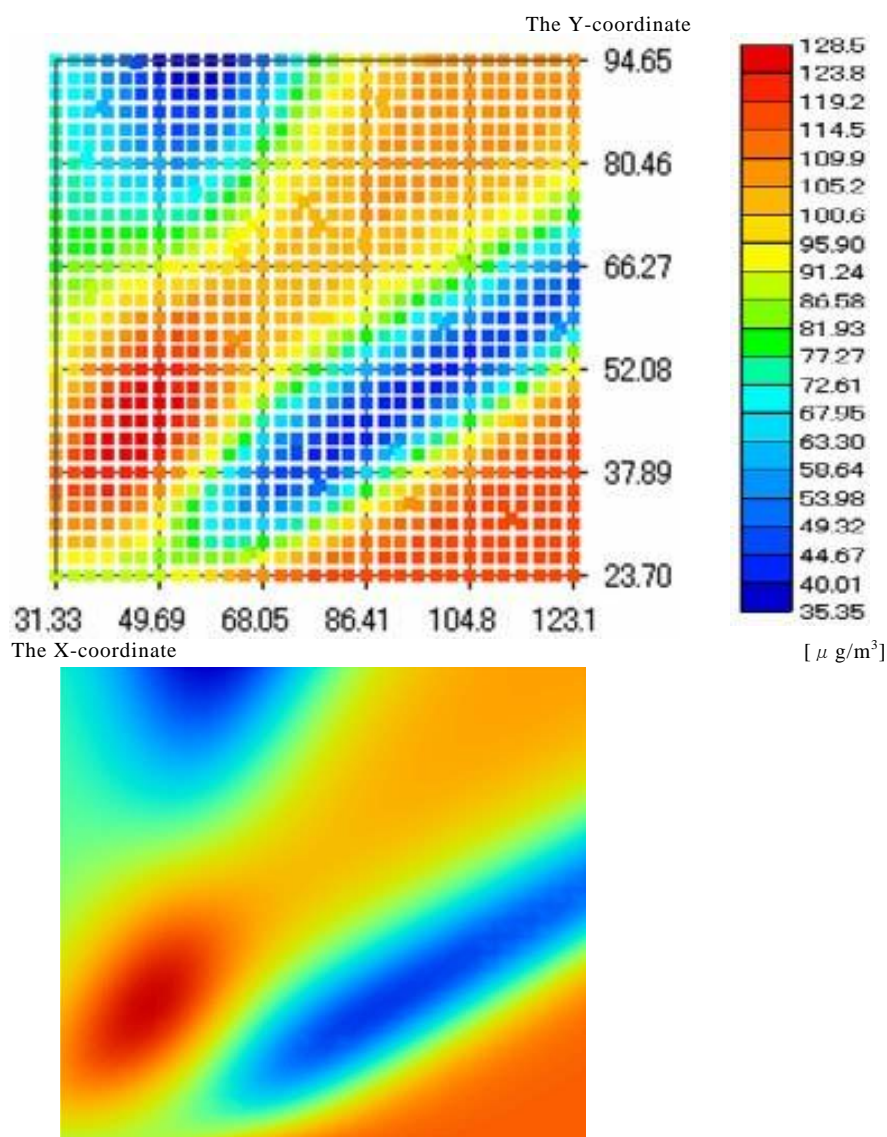


図53. CQSAR によるデータ補完と分布図

CQSAR によるデータ補完と分布図を図53に示した。図52とは印象がだいぶ違うが、補完したデータを使うことにより、図51に見られるような測定点が特に強調されることもなく、なだらかな分布図が得られている。図52を見るとソウル市南西の環状線に沿った繁華街（測定点1, 2, 3 近傍）から北東の方向に帯状にSPMの分布が多い領域があり、繁華街東側の山（ソウル市南の測定点16）から北東に帯状にSPM濃度の低い領域があることがわかる。

どちらの分布図が妥当であるかは、より詳細な測定を行って確かめる必要がある。このように、2008年4月の韓国ソウル市において行ったSPM測定データを用い、測定点が離散的でかつ疎である場合の分布図を、CQSARを用いて補完した点を用いて描くことで、近似的であるが、大まかな分布図を効率よく求めることができることがわかった。

以上のように、SPM 測定結果から欠測データ集合を扱う神経回路網法CQSARを用いて格子点上のデータ補完を行い、そのデータを用いて分布図を書くことを試みた。その結果、実用上問題のない精度でなだらかな分布図を書くことが可能であることがわかった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究の特色は、1) 欠測のあるデータを含む多変量解析技術を確立し、さらに2) 東南アジアの大都市を含む簡易測定と標準測定値を比較することで、大域的な環境指標の標準化および統合化を実現する。これにより局地から大域までの連続的な大気環境解析技術を確立することにある。また、3) デジタル画像によるSPM簡易測定法の開発は、簡易で低コストな測定技術となりうる。4) 得られた離散的なデータを連結し、等濃度線を描くことでSPM汚染源の特定を行う技術は、不定なSPM汚染源の割り出しに大きな役割を果たす。

本研究では、特に、デジタルカメラによる撮影を行い、デジタル画像をコントラスト処理することで、大気汚染物質の視認性を高め、その空間分布を見ることができた。さらに時間経過を見ることによって、その空間分布の時間経過をみることも可能となった。今後、さらにSPMの観測密度および観測精度の向上と長期間にわたる継続的なデータ解析が必要である。SPMを、“いつでもどこでも誰でもが観測可能”とするために、市販のデジタルカメラを用いSPMの簡易測定装置およびデジタル画像解析技術を開発し、デジタル画像解析を行うことで、従来の測定では難しかったSPMの空間分布、量、種類を簡便に測定が可能となることを示唆した。

(2) 地球環境政策への貢献

今後、生活空間を考慮した精度の高い次世代型環境リスク評価技術と、発展途上国にも適用可能な簡易かつ安価な浮遊粒子状物質（SPM）測定のための知見を提供することが期待される。

6. 引用文献

1) 東京都環境局大気汚染常時観測測定結果

<http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/kansi/taik>

2) 千葉県環境生活部大気保全課大気環境常時監視測定結果

<http://www.taiki.pref.chiba.lg.jp/download/download.html>

3) 埼玉県環境部青空再生課大気汚染常時監視システム

<http://www.taiki-kansi.pref.saitama.lg.jp/kankyo/main>

4) 川崎市公害監視センター大気環境測定データ

<http://www.city.kawasaki.jp/30/30kansic/home/html/teikyo/taikidata-tekyou.htm>

5) 青山智夫, 神部順子, 長嶋雲兵, J. Comput. Chem. Jpn., 欠測データ集合を扱う神経回路網法CQSAR: Compensation Quantitative Structure-Activity Relationshipsの開発 Vol. 6, No. 5, pp. 263- 274 (2007).

- 6) Bitou, K., Yuan, Y., Aoyama, T., Nagashima, U., Proceedings of International Conference on Control Automation and Systems 2003, CD-ROM, (TA06-04), 10. 22-25, 2003.
- 7) Aoyama, T., Ichikawa, H., Reconstruction of Weight Matrices in Neural Network, a Method Correlating Output with Input, Chem. Pharm. Bull., 39, 1222-1228 (1991).
- 8) 早狩 進、等高線描画プログラム, ContourMap97.xla, <http://www.jomon.ne.jp/~hayakari/>.

7. 国際共同研究等の状況

特になし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 青山智夫, 神部順子, 長嶋雲兵, 北緯32度, 東経120~130度上空のSPM濃度, Journal of Computer Chemistry, Japan, 7(5), 185-200 (2008).
- 2) 神部 順子, 長嶋 雲兵, 青山 智夫, 欠測データ集合を扱う神経回路網法CQSAR: Compensation Quantitative Structure-Activity Relationshipsを用いた環境指標データの補完と分布図, Journal of Computer Chemistry, Japan, 7(5), 201-206 (2008).
- 3) 青山智夫, 神部順子, 長嶋雲兵, 中山榮子. 浮遊粒子状物質の可視化: 画像的アプローチ, Journal of Computer Chemistry, Japan, 8(1), 13-22 (2009).
- 4) 神部順子, 中山榮子, 長嶋雲兵, 青山智夫. 欠測データ集合を扱う神経回路網法CQSAR: Compensation Quantitative Structure-Activity Relationshipsを用いた環境汚染物質濃度推定と分布図- 韓国ソウル市の場合 - Journal of Computer Chemistry, Japan, 印刷中

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 神部順子, 生活環境としての大気汚染物質の解析技法の開発, 江戸川大学紀要『情報と社会』, 19, 305-309 (2009)

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 神部順子, 他, 生活環境としての大気汚染物質 (SPMとNO_x) に関する分析日本家政学会第59回大会, 2007年5月岐阜
- 2) Kambe, J. et al., Analysis of Air Pollutant: SPM and NO_x - an Example of Metropolis of Tokyo and Chiba prefecture, Japan, MATH/CHEM/COMP 2007, June 2007 (in Dubrovnik).
- 3) Kambe, J. et al., Analysis of Air Pollutant (SPM and NO_x) of Tokyo, Japan. the 14th Biennial International Congress of Asian Regional Association for Home Economics, Aug 2007 (in Malaysia)
- 4) Nakayama, E. et al., The study on the air contaminants. --The factors given in the living environment are investigated. the 14th Biennial International Congress of Asian Regional Association for Home

Economics, Aug 2007 (in Malaysia)

- 5) Ikushima, Y, . et al., Detection of local structure of yellow sand, Proceedings of International Conference on Control Automation and Systems 2007, Oct 2007 (in Korea)
- 6) Zhou, T, . et al., A photographic detection of yellow sand inflow, Proceedings of International Conference on Control Automation and Systems 2007, Oct 2007 (in Korea)
- 7) 神部順子, 中山榮子, 青山智夫, 長嶋雲兵、多変量解析を用いた首都圏の大気汚染物質 (SPMとNO_x) の解析, 日本コンピュータ化学会2007年秋季年会、2007年10月姫路
- 8) 青山智夫, 神部順子, 長嶋雲兵、大気中のエアロゾル分布の可視化, 日本コンピュータ化学会2008春季年会, 2008年5月東工大
- 9) Junko KAMBE, Umpei NAGASHIMA, Eiko NAKAYAMA, Tomoo AOYAMA., Analysis of Air Pollutant (SPM and NO_x) of Metropolis, Japan, 第25回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2008年8月金沢大
- 10) Junko KAMBE, Umpei NAGASHIMA, Tomoo AOYAMA., Visualization of Suspended Particulate Matter (SPM) using digital camera. the 2008 European Aerosol Conference (EAC2008), Aug. 2008 (in Thessaloniki, Greece)
- 11) 神部順子, 長嶋雲兵, 青山智夫、欠測データ集合を扱う神経回路網法CQSARを用いた環境指標データの補完と分布図, 日本コンピュータ化学会2008年秋季年会、2008年9月高知大
- 12) Junko KAMBE, Umpei NAGASHIMA, Tomoo AOYAMA., Visualization of Aerosol using a Digital Camera. the 6th China-Japan Cross over Sciences Symposium, Oct. 2008 (in Zhengzhou, China)

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞 (2009年2月16日、全国版)

デジカメ写真で大気汚染が「見える」!!

デジタルカメラで撮った空の画像を使い、肉眼では見えない大気中の排ガスや工場排煙に含まれる微粒子を見えるように加工する技術を、産業技術総合研究所（茨城県つくば市）などの研究チームが開発した。浮遊粒子状物質（SPM）は健康への悪影響が懸念され、全国約1860カ所で濃度を監視している。大気中にどう分布しているかを把握するには高価な機器が必要だった。大気汚染の程度を可視化する技術として注目を集めそうだ。

研究チームは、SPMが空気を構成

浮遊粒子状物質の可視化技術を開発

する分子より大きいため、波長の長い赤い光を散乱することに注目。雲が少ない日でも太陽光を入れるなど、一定の条件で空を撮影したデジタル画像の赤色成分を強調する処理を施すことで、SPMを黒っぽい霧状の塊として映し出すことに成功した。

この画像を、実際のSPM濃度測定値から推測した分布と比較すると、ほぼ一致した。研究チームの長嶋響兵・産総研主幹研究員は「場所を問わず、誰でも手軽に環境を把握できる」と話す。

【八田浩輔】



浮遊粒子状物質（SPM）
空气中を長時間浮遊する直径10μm以下の粒子の総称。
自動車の排ガスや工場排煙、黄砂なども含まれる。発がん性との因果関係が指摘されている。

(6) その他