

大気環境基準から見た東アジアの大気環境の変化

Atmospheric Environment in East Asia Inferred from Environmental Quality Standards for Air Quality

洪 邦夫

Pangbu HONG

大阪経済法科大学 教養部

目 次

- I. はじめに
- II. 大気汚染物質と大気環境基準
- III. 日本の大気環境と環境基準
- IV. 韓国の大気環境と環境基準
- V. 中国の大気環境と環境基準
- VI. おわりに

キーワード：東アジア、大気環境、大気汚染物質、大気環境基準値、大気汚染指数

I. はじめに

2012年1月10日未明、北京の米国大使館で空气中を漂い健康被害を及ぼす可能性のある直径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小粒子状物質 $\text{PM}_{2.5}$ の濃度が $534\mu\text{g}/\text{m}^3$ を記録し、同大使館が最も深刻な汚染とする指標「危険」($301\sim 500\mu\text{g}/\text{m}^3$)を超え、日本の環境基準値である年平均値($15\mu\text{g}/\text{m}^3$)の30倍以上であることが報じられた¹。近年経済成長の著しい中国では経済発展と共に大気汚染が深刻化しているが、 $\text{PM}_{2.5}$ についての大気環境基準値が存在せず、 $\text{PM}_{2.5}$ と、光化学スモッグの原因となるオゾンを通常の大気レベル評価に組み入れ、浮遊粒子状物質(PM_{10})や窒素酸化物の既存基準値についても見直すことが検討されている²。

大気環境基準は、人の健康の保護と生活環境の保全のうえで大気汚染物質が維持されることが望ましい基準であり、その時々の大気汚染状況の課題解決のための政策的目標値でもある。

そのため、経済発展状況やそれに伴う大気汚染状況の異なる国々では対象となる大気汚染物質やその基準値が異なる場合がある。

例えば、日本では1960年代以降の高度経済成長による産業の重工業化と共に二酸化硫黄による大気汚染と酸性雨が深刻化し、1969年に始めて二酸化硫黄の環境基準値が設定された。さらに自動車の爆発的な普及とともに光化学スモッグが頻発し、その原因となる窒素酸化物、一酸化炭素、オゾン、浮遊粒子状物質PM₁₀への関心が高まり、その規制のため環境基準値が1973年に出揃った。その後も、大気汚染物質の健康におよぼす影響についての科学的解明が進み、大気汚染防止技術の進展と共に、これらの基準値も改定されていった。また2009年には、疫学調査によりかなりのリスクがあることが判明した微小粒子物質PM_{2.5}の環境基準値が定められた。

韓国では、1970年代に始まった重化学工業化政策と、先進国からの公害産業の導入やエネルギー多消費産業の育成に伴い、大気汚染が深刻化し、最初の二酸化硫黄の環境基準が1978年に制定された。その後、日本と同様に自動車の排気ガスによる大気汚染が問題となり、1983年に一酸化炭素、粒子状物質の総量、オゾンの大気環境基準が決められ、1993年PM₁₀、2011年PM_{2.5}と、新しい大気環境基準が設定されている。

中国でも、大気汚染は最も深刻な問題になっており、その対策が大きな課題になっている。そのため、大気環境基準の設定が重要であるが、日本や韓国のように全国一律に設定されておらず、都市部と農村部などでの環境状況の大きな格差を考慮し、地域の汚染度に応じて3段階に分け、二酸化硫黄、二酸化窒素、浮遊粒子状物質、一酸化炭素、オゾンについて基準値を設けている。また、中国では、これらの基準値から大気汚染の度合いを示す大気汚染指数を算出し、これを毎日公表して大気汚染の程度に応じて、屋外での長時間の激しい運動や外出を避けるように呼びかけている。

東アジア地域は世界人口の30%以上が密集して生活し、最近の著しい経済発展と共に大量の大気汚染物質を発生させている。大気汚染物質は汚染物質の排出地域だけで影響するのではなく、長距離輸送現象により国境を越えた国際的な環境問題になっており、現実に大きな課題となっている。ここでは、日本、韓国、中国の大気環境基準の変遷から東アジアの大気環境の変化について考察する。

II. 大気汚染物質と大気環境基準

1) 大気と大気汚染

地球大気の99.9%は窒素分子 (N₂、78.1%)、酸素分子 (O₂、20.9%)、アルゴン (Ar、0.9%) で占められ、残りの0.1%を構成するさまざまな化学物質が微量ながらも大気の中でそれぞれの物理化学的特性に応じて多様な影響をおよぼしている。

たとえば、オゾン (O₃) は成層圏に存在して太陽からの有害な紫外線を吸収し、地表の生物を守っているが、地表付近に高濃度で存在すると逆に人体や生態系に有害な大気汚染物質とみ

なされる。オゾンは独特の臭気をもつ気体であり、強い酸化力とそれに起因する高い毒性を持つためである。この対流圏オゾンは人間活動により直接大気中に放出されるわけではなく、放出された前駆体物質から光化学反応により二次的に生成してくるものである。その濃度は、ヨーロッパで1880年に0.01ppmであったが、2000年には0.05 ppmとなり、120年で5倍の濃度になっている。日本の環境基準は1時間値として0.06 ppmであり、現在の濃度はその値に肉薄している³。

オゾン以外に、大気中に存在して人体や生態系に有害な影響を与える大気汚染物質として、硫黄酸化物 (SO_x)、窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、浮遊粒子状物質 (PM₁₀)、微小粒子物質 (PM_{2.5})、鉛などの有害重金属、ダイオキシン類、揮発性炭化水素 (VHC)、揮発性有機化合物 (VOC) などがある。

2) 大気汚染物質の発生⁴

大気汚染物質の発生源には自然発生源と人為的発生源がある。自然発生源には、火山噴火、森林火災、風による砂塵・黄砂などの地面からの巻き上げ、海塩粒子、成層圏から対流圏に沈降するオゾンなどがある。一方、人為的発生源によるものは人間の社会経済活動に伴うものであり、固定発生源と移動発生源に分けられる。固定発生源は、工場や火力発電所などでの化石燃料の燃焼過程、原材料や化学物質を取り扱う生産・貯蔵過程、廃棄物の処理過程である。また移動発生源は自動車や船舶、航空機などである。

固定発生源から排出される大気汚染物質は、SO_x、NO_x、煤塵、粉塵、有害物質 (カドミウム、鉛、フッ素、有機塩素系溶剤など)、炭化水素 (HC) などであり、産業公害型の大気汚染として深刻な社会問題となっている。一方、移動発生源では、排気ガス中にCO、NO_x、HC、ベンゼン、ディーゼル排気微粒子が含まれ、都市・生活型の大気汚染の原因となっている。

3) 大気汚染物質の健康への影響⁴

日本では、二酸化硫黄 (SO₂)、二酸化窒素 (NO₂)、CO、浮遊粒子状物質 (PM)、光化学オキシダント (Ox)、ベンゼンなどの有害大気汚染物質、ダイオキシン類、揮発性炭化水素 (VHC)、揮発性有機化合物 (VOC) などを大気汚染物質として環境基準値を設定しており、これらの大気濃度を定期的または常時計測している⁵。ここでは国際的に主要6大気汚染物質として認識されているSO₂、NO_x、CO、PM、オゾン (O₃)、鉛について人体に与える影響などについて述べる。

(1) 二酸化硫黄 (SO₂)

硫黄分を含む石油や石炭の燃焼により主に発生する。工場や事業場の燃焼施設や硫化鉱を用いた生産工程などの固定発生源とともに、硫黄を含む軽油・重油を燃料とするディーゼル自動車や船舶などの移動発生源がある。急性、慢性の呼吸器疾患を引き起こし、四日市喘息事件のように地域住民の間で喘息などの呼吸器症状の有症率が増加することが知られている。また大気中での滞留期間が長いため、長距離輸送され、酸性雨として広い範囲に影響を及ぼすことが

知られている。

(2) 窒素酸化物 (NO_x)

石炭や石油などを燃焼するとき、空気中の窒素や燃料中の窒素が酸化され、主として一酸化窒素 (NO) が生成し、さらに酸化されて二酸化窒素 (NO₂) に変化する。NOとNO₂の混合物を窒素酸化物 (NO_x) として取り扱う。光化学スモッグや酸性雨などを引き起こす大気汚染原因物質であり、現在の主な発生源は、自動車の排気ガスである。特に、毒性の高い二酸化窒素 (NO₂) に環境基準が定められている。

(3) 一酸化炭素 (CO)

自動車が主な発生源であり、ガソリンや軽油などの燃料の不完全燃焼により生じる。COは毒性の高いガス状物質であり、血液中のヘモグロビンと結合して酸素運搬機能を阻害し、頭痛、めまい、酸欠状態など健康への影響は大きい。また、温室効果ガスであるメタンの寿命を長くする。

(4) 粒子状物質 (PM)

大気中に浮遊して存在する固体 (粉じん) および液体 (エアロゾル) の粒子である。発生源から直接排出される一次粒子とその後生成する二次粒子がある。二次粒子には、NO_x、SO₂、アンモニアなどのガス状物質が大気中で粒子化するものや、空气中で凝固して生成する凝縮性ダストなどがある。PMは、ガス状の大気汚染物質と共存して肺や気管などに沈着して呼吸器に悪影響を及ぼす。

粒径10 μ m以下のものをPM₁₀、粒径2.5 μ m以下のものをPM_{2.5}という。PM_{2.5}は石炭や石油の不完全燃焼によって生じる煤煙や、ディーゼルエンジンの排ガス中に含まれ、PM₁₀よりも小さいため、肺胞の奥深くに沈着し、同時に発生した多くの有害物質が付着しているため、健康に対する影響は非常に大きいといわれている。

(5) オゾン (O₃)

工場・事業場や自動車から排出される窒素酸化物 (NO_x) や揮発性有機化合物 (VOC) などが太陽光線を受けて光化学反応を起こすことにより生成する光化学オキシダント中に含まれ、光化学スモッグの正体である。強い酸化力を持ち、高濃度では眼やのどへの刺激や呼吸器に影響を及ぼす恐れがあり、稲などの収量減など農作物への影響も大きい。

(6) 鉛 (Pb)

鉛は重金属で、人体にとって蓄積性のある毒性物質である。大量の鉛が人体に入ると急性中毒を起こし、腹痛、嘔吐などが表れて死亡することもある。少量の鉛が長期にわたって人体に入ると、食欲不振、便秘、腹痛などが起こる。1970年代は、自動車が主な排出源であったが、ガソリンのオクタン価向上剤として加えられた四エチル鉛の使用が禁止されたため、現在の排出源は、金属精錬、廃棄物焼却炉、発電所などになっている。

4) 大気環境基準

上記の6大気汚染物質について現在設定されているWHO、米国、日本、韓国、中国の大気環境基準値を表1に示した。WHO、米国、日本、韓国では一律の基準値が設定されているが、中国では都市部と農村部の大気環境の違いが非常に大きいため、3段階の基準が設けられている。また、大気汚染物質によって、年平均値、日平均値、8時間平均値、1時間値の別に環境基準が設定されている。これらは健康に与える影響の違いを考慮したものである。例えば、SO₂やO₃、COは急性症状を起こしやすいので、1時間値を基準値としている。基準値の濃度単位はppmまたはμg/m³で表記されているが、相互に変換は可能である。表1をみると、基準値に違いが認められるが、これはそれぞれの国の事情を反映したものである。

表1 国別大気環境基準の比較

項目	国名	基準値							
		年平均		日平均		8時間平均		1時間値	
		ppm	μg/m ³	ppm	μg/m ³	ppm	μg/m ³	ppm	μg/m ³
SO ₂	WHO		50		125				500
	米国	0.03	80	0.14	365			0.5* ¹	1300* ¹
	日本			0.04				0.1	
	韓国	0.02		0.05				0.15	
	中国1級基準		20		50				100
	中国2級基準		60		150				250
	中国3級基準		100		500				700
NO ₂	WHO		40						200
	米国	0.053	100						
	日本			0.04-0.06					
	韓国	0.03		0.06				0.1	
	中国1級基準		40		80				80
	中国2級基準		80		120				120
	中国3級基準		120		240				240
PM ₁₀	WHO		70		150				
	米国		50		150				
	日本				100				200
	韓国		50		100				
	中国1級基準		40		50				
	中国2級基準		100		150				
	中国3級基準		150		250				
PM _{2.5}	WHO		35		75				
	米国		15		35				
	日本		15		35				
	韓国		25		50				
オゾン	WHO						120		
	米国					0.075	157	0.12	235
	日本							0.06	
	韓国					0.06		0.1	
	中国1級基準								120
	中国2級基準								160
	中国3級基準								200
CO	WHO						10,000		30,000
	米国					9	10,000	35	40,000
	日本			10		20			
	韓国					9		25	

	中国1級基準				4,000			10,000
	中国2級基準				4,000			10,000
	中国3級基準				6,000			20,000
Pb	WHO		0.5					
	米国		0.15					
	日本							
	韓国		0.5					
	中国1級基準		1					
	中国2級基準		1					
	中国3級基準		1					

*1 3時間平均値

<http://www.epa.gov/air/criteria.html>

Ⅲ. 日本の大気環境と環境基準

1) 硫黄酸化物による大気汚染と環境基準値の設定

日本では、明治時代の殖産興業政策により鉱山や工場からのばい煙が多く発生し、大気汚染が始まり、足尾銅山鉱毒事件、別子銅山煙害事件、日立鉱山煙害事件などが起こった。第二次世界大戦後は、経済優先、高度経済成長に向けて産業発展を目指した時期に大気汚染が深刻な社会問題となった。

1950年代終盤に、石油化学産業の発展を目指して臨海石油化学コンビナートが誕生し、大量生産、大量消費の時代に徐々に移行していき、人口の都市集中化現象も始まった。この近代化された臨海工業コンビナートの周辺で1960年頃に硫黄酸化物(SO_x)を中心とする大気公害問題が発生した。その代表的なものが四日市喘息公害事件である⁶。

日本最初の大規模石油コンビナート都市である三重県四日市市で、コンビナート操業を始めて1年経つか経たぬかの頃に喘息患者が増加し始め、その後四日市市民の3%に当たる約5000人が軽度から重度の喘息症状を発症し、その内2216人が四日市喘息公害患者と認定された。

喘息症状は、コンビナートで高濃度の硫黄を含む重油や原油を取り扱ったために生成したSO_xによる大気汚染が原因となったものである。1965年にコンビナート全体で排出されたSO₂は412t/日、14万t/年という莫大な量であり、その業種別排出状況は火力発電と石油精製が55.3%、20.3%であった。石油精製での排出が多いのは低沸点硫黄化合物を多く含む高濃度硫黄原油を処理したためである。このためコンビナートに隣接する磯津地区でのSO₂濃度は時には1ppmに達し、これが12時間以上も継続したり、最高2.5ppmになることもあった。この地域での日常的数値は0.2~0.4ppmであったが、このような高濃度現象は日本では初めて報告されたものであった。

四日市では高濃度SO₂だけでなく、日本で最初の酸性雨も観測された。1962年頃からpH4台を示す観測例が見られるようになり、1965年には一部でpH3台が観測された。そのため、コンビナートの周辺地域で酸性雨による朝顔の脱色班や銅薄膜に刻まれた硫酸ミストの微小孔が観察されるようになった⁶。

1965年頃からコンビナート周辺での大気汚染による被害は四日市以外でも出始めた。千葉県市原、五井、袖ヶ浦の京葉地区で硫黄酸化物を含む霧などによる農作物被害、激しい痛みを伴う酸性雨降下事件、コンビナート周辺での金属腐食現象などが起こり、四日市と同様の住民の喘息問題も発生した⁷。

このように硫黄酸化物などによる大気汚染の進行は拡大する傾向が見られたため、公害対策基本法（1967年）、大気汚染防止法（1968年）が制定され、それに基づきSO₂の環境基準が1969年に設定され、その達成に向けた対応策が講じられるようになった。

SO₂の環境基準については、日本公衆衛生学会が1955年にその許容濃度として「生活環境におけるSO₂については0.1ppmを超えてはならない」という指針を出していたが、1969年の環境基準値設定に当たっては、環境庁発足以前の厚生省生活環境審議会が「1時間値0.1ppm、1日平均値0.05ppm、達成率99%で年平均値0.018ppm前後」という答申を示した。しかし、産業界の抵抗があり、達成率を緩和することになり、「1時間値に88%、日平均値には70%の達成率がつき、年間の平均値は0.05ppm」となった⁶。

この環境基準値はその後、「四日市での喘息患者の多発の原因は硫黄酸化物を主として、これと煤塵などとの相乗効果をもつ大気汚染である」とした四日市判決（1972年）を受けて見直しが図られ、1973年に四日市喘息の解消を目指すための目標値の正当性を確認する「1時間値0.1ppm、1日平均値0.04ppm」に改正された。

環境基準の設定とともに、その達成に向けた対応策が重要である。四日市で硫黄酸化物の大気汚染が明らかになる中で、1964年に高煙突集合化勧告が出せられ、100～200m級の高煙突を集合化して設置し、汚染物質を拡散・希釈して低濃度化することが実施された。しかしこの高煙突化は大幅な着地濃度の低下をもたらしたが、同時により広い範囲に汚染物質を拡散させ、コンビナートから離れた地域で汚染濃度が上昇する新たな問題を発生させた。

この問題の本質的解決のためには、SO₂の排出総量の低減（規制）が必要であった。そのために、燃料自体の硫黄成分を減少させるための燃料脱硫（直接脱硫、間接脱硫）⁸や、燃焼後の排煙中の硫黄成分を除去する排煙脱硫⁹などの技術開発が行われるようになった。

2) 自動車の排ガス規制と環境基準

1970年7月東京杉並で、運動中の女子中学生が突然気分を悪くしてバタバタと倒れる光化学スモッグ事件が発生した。自動車超大国米国ではすでに1950年代に起こっていた光化学スモッグが日本で始めて発生し、光化学オキシダント、そしてその前駆物質である窒素酸化物と炭化水素が新たな汚染物質として注目されるようになった。この頃の日本の大気は図1に示したように硫黄酸化物の濃度も高く、そこにオキシダント、窒素酸化物が新たな大気汚染物質に加わったため、異常な被害事件はこれらの複合大気汚染によるものとの見方も出た。

自動車の排気ガスには燃料の不完全燃焼により発生するCO、未燃焼の燃料・炭化水素（HC）、空気中の窒素を燃焼して生成するNO_xが含まれ、オゾンなどを含む光化学オキシダントの前

駆体になることが明らかになるとともに、自動車排気ガス規制が行われるようになった。

ガソリン自動車に対するCO濃度規制（1966年）が始まった後、1970年にCOの環境基準が設定された。その後、NO_xやHCを含めた自動車排気ガス規制の強化が検討される中で、米国で排出ガス中のHC、CO、NO_xをそれぞれ90%削減を目指した大気清浄法（マスキー法、1970年）が登場し、1976年までにこの規制値を達成することになった¹⁰。

日本ではガソリン自動車に対するCO濃度規制（1966年）、NO_xの90%削減規制（1973年）、ディーゼル自動車に対する黒煙（1972年）、HC・CO・NO_x（1974年）の規制に向けた対策が開始された。これらに関連して、1973年にNO₂（1日平均0.02ppm）と光化学オキシダント（1時間値0.06ppm）の環境基準値が設定された。

この基準値は、四日市喘息公害を防止できなかったことを省み、人の健康を最優先した事前対策的なものでなければならないという当時の関係者の強い見解から、まず絶対安全を踏んだ努力目標値を設定すべきとして厳しいものになった経緯がある。NO₂の環境基準値は1978年に現在施行のもの（1日平均0.04～0.06ppm）に緩和され改定された。しかしこのような厳しい基準の設定が世界に先駆け日本の窒素酸化物対策技術の成功に導く結果になったといわれている。

脱硫、脱硝技術などの開発が進み、主要工場ではこれらの技術を取り込み、排出基準を遵守するようになったが、経済発展に伴って、従来の方式による発生源の濃度規制だけでは環境基準を達成することができない事態が生じてきた。このため三重県や大阪府などで総量規制の検討がなされ、1974年には大気汚染防止法が改正され、SO_xに関する従来の規制方式に加えて、新しい総量規制方式を導入することになった。このような規制によって、1981年には一部の地域を除きほぼ環境基準を達成することになった¹¹。

3) 微小粒子状物質PM_{2.5}の環境基準^{12,13}

米国ハーヴァード大学では、SO₂、硫酸塩、吸入性粒子状物質の健康への影響を調べるコホート調査を1970年代中盤から行ってきたが、1993年に主要6汚染物質の環境基準を満たしている地域でも、2.5μm以下の微小粒子（PM_{2.5}）が呼吸器のみならず心血管系にも悪影響を及ぼしていることを明らかにした。その後、米国癌学会と米国肺学会でもPM_{2.5}による大気汚染と死亡率増加の因果関係を認定した。これを受けて米国では、1997年にPM_{2.5}の基準が制定され、2005年にはWHOのガイドライン値が定められ、EUでも限界値に関する指令が交付された。

日本では、PM_{2.5}の健康に与える影響に関する研究が遅れていたが、1999年から「微小粒子状物質（PM_{2.5}）暴露影響研究」が開始され、2009年にPM_{2.5}に係わる環境基準として、米国と同様の「年平均値15μg/m³以下であり、かつ日平均値35μg/m³以下」とすることになった。

最近の研究によれば、PM_{2.5}を含む大気汚染物質は、タバコ煙に類似して呼吸器系、心血管系、神経精神系、生殖系などに影響を与えることが示されている。1970年代のSO₂やNO_xによる大気汚染は誰の目にも健康影響との関係は明らかであったが、PM_{2.5}の健康影響は一般には明確な因果関係が実感できないものである。また、PM_{2.5}は発生源からの一次粒子よりも、大気中

の光化学反応や中和反応によってガス状物質から生じる二次粒子の寄与が大きく、従来の事象よりも複雑であるため、科学的知見を蓄積することが必要であると思われる。

4) 大気環境の現状

日本の大気環境基準値の変遷を表2に示した。現在適用されている環境基準値は、表に示したSO₂（日平均値0.04ppm、1時間値0.1ppm）、NO₂（日平均値0.04-0.06ppm）、CO（日平均値10ppm、1時間値20ppm）、PM₁₀（日平均値100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、1時間値200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、PM_{2.5}（年平均値15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均値35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、光化学オキシダント（1時間値0.06ppm）以外に、ベンゼン（年平均値0.003 mg/ m^3 ）、トリクロロエチレン（0.2mg/ m^3 ）、テトラクロロエチレン（0.2mg/ m^3 ）、ジクロロメタン（0.15g/ m^3 ）、ダイオキシン類（0.6pg-TEQ/ m^3 ）について設定されている¹⁴。次に、このような環境基準に対する現状について述べる。

表2 日本の大気環境基準値の変遷

		1969	1973	1976	1978	2009
SO ₂ (ppm)	年平均	0.05				
	日平均		0.04	0.04	0.04	0.04
	1時間値		0.1	0.1	0.1	0.1
NO ₂ (ppm)			0.02	0.02	0.04~0.06	0.04~0.06
CO (ppm)		日平均	10	10	10	10
		8時間平均	20	20	20	20
浮遊粒子状物質 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀	日平均	100	100	100	100
		1時間値	200	200	200	200
	PM _{2.5}	年平均				15
		日平均				35
光化学オキシダント (ppm)			0.06	0.06	0.06	0.06

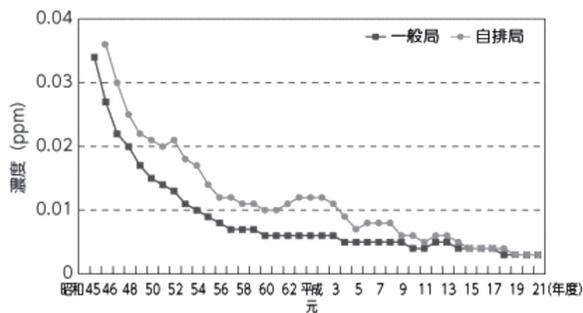


図1 SO₂の年平均値の推移（昭和45年度～平成21年度）¹⁵

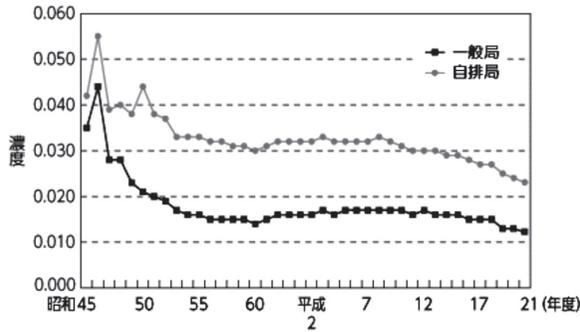


図2 NO₂の年平均値の推移 (昭和45年度～平成21年度)¹⁵

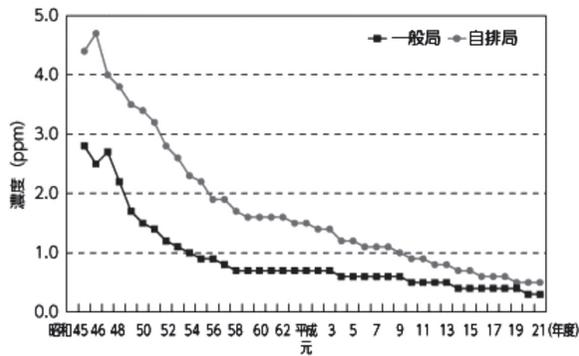


図3 COの年平均値の推移 (昭和45年度～平成21年度)¹⁵

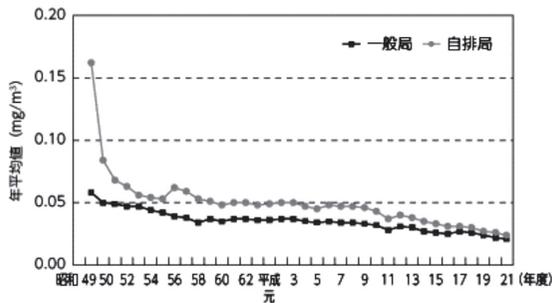


図4 浮遊粒子状物質の年平均値の推移 (昭和49年度～平成21年度)¹⁵

1970年(昭和45年度)から2009年(平成21年度)までのSO₂の年平均値の推移を図1に示した。1970年代初めのSO₂の年平均値は、一般環境大気測定局(一般局)と自動車排出ガス測定局(自排局)のいずれも0.035ppm前後であったが、その後は漸次下降し、1996年(平成4年)以降は0.01ppm未満になっている。その間、自排局の値が一般局より大きいのが、ディーゼル車の燃料(軽油)によるものと考えられる。2009年の年平均値は一般局、自排局ともに0.003ppmで、近年は、

大気環境基準から見た東アジアの大気環境の変化

一般局、自排局とも横ばい傾向にある。環境基準達成率は、一般局99.6%、自排局100%であり、近年ほとんどすべての測定局で環境基準を達成している。

1970年（昭和45年度）から2009年（平成21年度）までのNO₂の年平均値の推移を図2に示した。1971年（昭和46年）のNO₂の年平均値は、自排局0.055ppm、一般局0.044ppmと、共に最も高い値を示し、その後、漸次減少しているが、SO₂のような顕著な減少が見受けられない。自排局の値が一般局より0.01ppmも高いことを含めて自動車など移動発生源の影響が大きいことを示している。2009年の年平均値は、一般局0.012ppm、自排局0.023ppmであり、一般局では、自排局ともに近年ゆるやかな改善傾向がみられる。環境基準達成率は、一般局100%、自排局95.7%であり、一般局では近年ほとんどすべての測定局で環境基準を達成している。

1970年（昭和45年度）から2009年（平成21年度）までのCOの年平均値の推移を図3に示した。自排局でのCOの年平均値は、1971年（昭和46年）に4.7ppmを示した後、漸次減少し、一般局では1972年（昭和47年）に2.7ppmを示し、その後、漸次減少している。自排局と一般局との差が1971年に2.7ppmであったが、近年では0.2ppmと小さくなっている。2009年は一般局0.3ppm、自排局0.5ppmで、自排局の値が一般局よりも大きいことは自動車の排ガスの影響を示すものである。2009年の環境基準達成率は、近年は一般局、自排局とも100%であり、すべての測定局において環境基準を達成している。

1974年（昭和49年度）から2009年（平成21年度）までの浮遊粒子状物質の年平均値の推移を図4に示した。自排局での浮遊粒子状物質の年平均値は、1974年（昭和49年）に0.165 mg/m³を示した後、翌年0.085 mg/m³に急減し、その後漸次減少している。一般局では1974年（昭和49年）に0.06 mg/m³を示し、その後、漸次減少している。2009年は、一般局0.021mg/m³、自排局0.024mg/m³であり、一般局、自排局とも近年ゆるやかな改善傾向がみられる。環境基準達成率は、一般局98.8%、自排局99.5%であり、2008年と比べて一般局、自排局とも改善している。

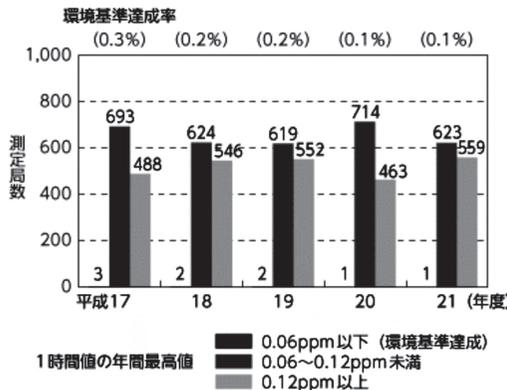


図5 昼間の日最高1時間値の光化学オキシダントの濃度レベル毎の測定局数（一般局と自排局の合計）の推移（平成17年～21年）

光化学オキシダントについては、1日のすべての時間帯ではなく、昼間（5時～20時）の1時間値について集計している。その最高値の濃度レベル毎の測定局数（一般局と自排局の合計）の推移を図5に示した。環境基準（1時間値0.06ppm）を達成した測定局は0.1%に過ぎず、99.9%の測定局が未達成である。韓国などでは8時間平均を採用しているが、1時間値の採用が厳しすぎるためかもしれない。なお、昼間の濃度別の測定時間の割合でみると、1時間値が基準値以下である割合は全測定局で91.5%であった。

2010年の光化学オキシダント注意報の発令延日数は182日（22都府県）で、2009年の123日（28都府県）と比べて発令日数は増加した。都道府県別にみると、埼玉県が25日と最も多く、次いで東京都が20日、栃木県が16日となっている。月別にみると、8月が最も多く60日、次いで7月の53日、9月の35日の順であった。

光化学オキシダントはNO_xと揮発性炭化水素との光化学反応によって二次的に生成するものである。揮発性炭化水素として、非メタン系炭化水素（NMHC）の濃度が測定されている。NMHCは午前6時から9時までの3時間平均値として0.20ppmCから0.31ppmCの範囲にあることが要求されているが、2009年の測定値は、一般局0.17ppmC、自排局0.22ppmCであり、近年では一般局、自排局とも改善傾向がみられる。

Ⅳ. 韓国の大気環境と環境基準

1) 大気環境基準の設定

韓国では、1970年代に始まった重化学工業化政策と、先進国からの公害産業の導入やエネルギー多消費産業の育成に伴い、大気汚染が深刻化した。この時期、工場から排出された燃焼排ガスと化学物質により、工業団地周辺の環境が破壊され、周辺住民に被害をおよぼした。また、都市地域では無煙炭や重油による暖房を行っていたため、燃料の燃焼により発生するSO_xによる大気汚染が発生していた。このような状況を改善するため、環境保全法（1977年）が制定され、最初のSO₂環境基準（0.05ppm/年、0.15ppm/日）が1978年に設定された。この基準値は1995年に0.03ppm/年、0.14ppm/日、0.25ppm/時）に改定されるが、日本の基準値（1969年0.05ppm/年、1973年0.04ppm/日、0.1ppm/時）よりも緩く、日本に比較して当時の大気汚染が深刻であったことを示すものである。

1980年代に入って、急速な生活水準の向上に伴う自動車の増加と冷暖房需要の増加、産業の高度化に伴い、NO_x、CO、浮遊粒子状物質、オゾンなどを原因とする大気汚染がさらに拡大し、1983年にNO₂（0.05ppm/年）、CO（8ppm/月、20ppm/8時間）、粒子状物質（総量0.15 mg/m³/年、0.30 mg/m³/日）、O₃（0.02ppm/年、0.1ppm/日）の大気環境基準が設定された。その後、1990年代に入ると、大都市の大気汚染、四大河川の水質汚染、生活廃棄物問題が表面化するなど、環境問題が深刻化、多様化し、主な社会問題の一つとなった。このような中で、大気汚染自動測定網が整備され始め、1995年にはソウルの20か所を含めて全国35都市の84か所で大気汚染物質が計

大気環境基準から見た東アジアの大気環境の変化

測されるようになった。その過程で1995年にPM₁₀の環境基準が設定され、さらに2001年に先進国並の基準に強化されて施行され、2011年にはPM_{2.5}の基準も設定された。これらの環境基準の変遷¹⁶を表3に示した。

表3 韓国の大気環境基準の変遷

		1978	1983	1991	1995	2001	2007	2011	
SO ₂ (ppm)	年平均	0.05	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	
	日平均	0.15	0.15	0.15	0.14	0.05	0.05	0.05	
	1時間平均				0.25	0.15	0.15	0.15	
CO (ppm)	月平均		8	8					
	8時間平均		20	20	9	9	9	9	
	1時間平均				25	25	25	25	
NO ₂ (ppm)	年平均		0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	
	日平均				0.08	0.08	0.06	0.06	
	1時間平均		0.15	0.15	0.15	0.15	0.1	0.1	
粒子状物質 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	総量	年平均		150	150	150			
		日平均		300	300	300			
	PM ₁₀	年平均				80	70	50	50
		日平均				150	150	100	100
	PM _{2.5}	年平均							25
		日平均							50
オゾン (ppm)	年平均		0.02	0.02					
	8時間平均				0.06	0.06	0.06	0.06	
	1時間平均		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
鉛 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	年平均					0.5	0.5	0.5	
	3ヶ月平均			1.5	1.5				
炭化水素 (ppm)	年平均		3	3					
	1時間平均		10	10					
ベンゼン (ppm)	年平均						5	5	

2) 大気環境の現状^{16,17}

韓国の人口密度は501.5人/km²で、OECD加盟国の中で最も人口過密であり、単位面積当たりの汚染物質の排出量も、OECD加盟国の3～10倍に達する。人口の半分以上が首都圏に住み、90%以上の人々が都市地域に集中している。それとともに、自動車や工業団地も都市に集中して大都市地域の空気質は決して良くない。特に大気汚染物質の濃度が高いのが、ソウル、釜山、大邱、仁川、光州、大田、蔚山の韓国の主要都市である。

図6に測定所別に測定したSO₂の年平均濃度分布を示した。SO₂濃度はこの20年間着実に減少しており、2010年の年平均濃度は0.004～0.008ppmであった。自動車の登録台数が増え、燃料の使用量が増えているにもかかわらず、SO₂濃度が減少していることは、低硫黄燃料とLNGなどのクリーン燃料の供給拡大、排出規制の効果が出ているものである。

NO₂濃度(図7)は、0.023～0.026ppmの間で増減を繰り返しながら安定した状況が続いており、2010年は0.025ppmであった。韓国の主要都市ソウル、釜山、大邱、仁川、光州、大田、蔚山のNO₂濃度の経年変化(図8)をみると、自動車の登録台数と通行量の最も多いソウルが1990年以降増加傾向にあり、最も高い値を示し、首都圏の空気質が未だ改善されていないこと

を示している。釜山、大邱、光州では多少増加したが、増減を繰り返しながら安定した状況が続いている。2010年特別市・道別NO₂年平均値（図9）でもソウルの年平均濃度が0.034ppmと基準値を超えて最も高く、ソウルの月別推移（図10）をみると1, 2, 10, 11, 12月が基準値を超えて高く、7, 8, 9月に基準値よりも低い値を示した。

CO濃度（図11）は、SO₂と同様に着実に減少しており、主要都市の年平均濃度は0.6ppm以下である。1995年にはほとんどの地域が1ppmを超えていたが、2001年以降1ppmを超えることはない低い水準である。2010年の濃度は0.5ppmであった。

オゾン濃度（図12）は1995年以降現在に至るまで増加傾向にあり、2010年には0.023ppmであった。特別市・道別にみると済州道が最も高い値をこの数年続いている。オゾン濃度は汚染物質排出量以外に気温、降水量、汚染物質の拡散状況、大気安定度などの気象条件に大きく影響されることが知られているので、この点での解明が必要である。

1995年から測定されているPM₁₀濃度（図13）は、1998年の55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ から2007年の58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ まで増減を繰り返したが、その後減少し、2010年には51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ になった。しかし、環境基準値よりも少し高い状況である。都市別にみると、2010年では仁川が55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ で最も高く、次いで大邱が51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、ソウルと釜山で49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。

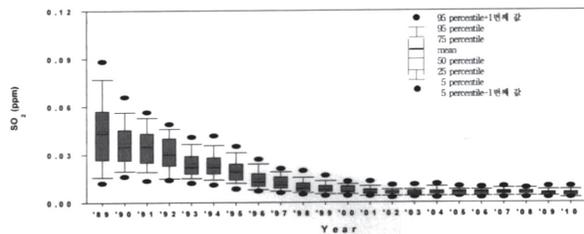


図6 韓国測定所別SO₂年平均濃度分布

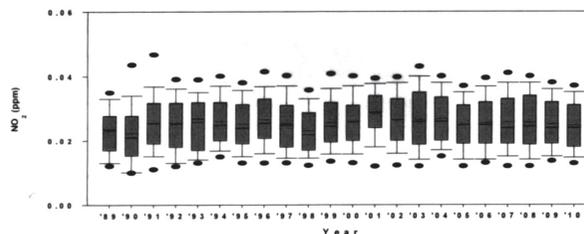


図7 韓国測定所別NO₂年平均濃度分布

大気環境基準から見た東アジアの大気環境の変化

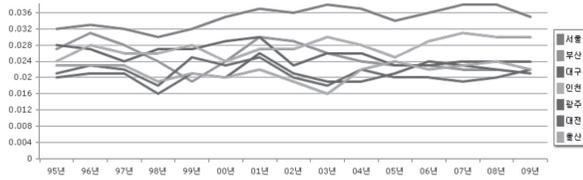


図8 韓国主要都市におけるNO₂の年度別汚染度

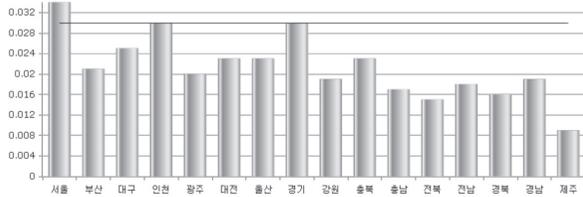


図9 韓国特別市・道別NO₂年平均値 (2010年)

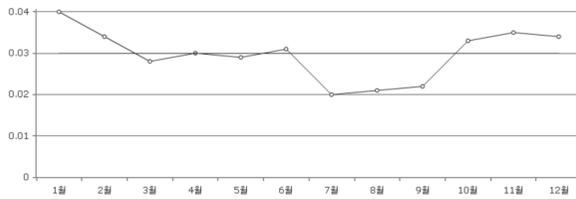


図10 ソウルのNO₂濃度の推移 (2010年)

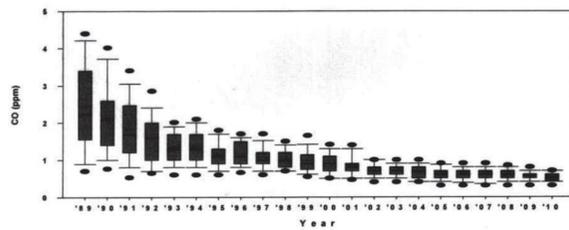


図11 韓国測定所別CO年平均濃度分布

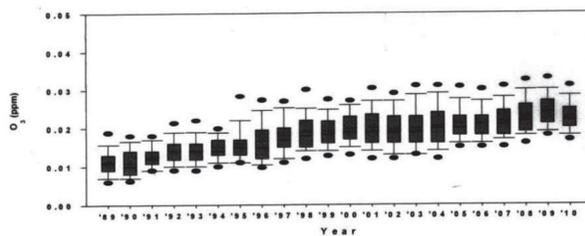


図12 韓国測定所別オゾン年平均濃度分布

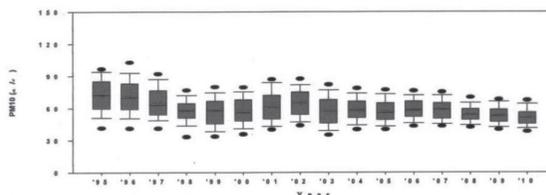


図13 韓国測定所別PM₁₀年平均濃度分布

V. 中国の大気環境と環境基準

1) 大気環境基準の設定

中国の大気環境は、日本や韓国に比較してかなり厳しい状況にあり、一部の地域を除き、改善があまりみられないのが現状である。2000年頃の中国、韓国、日本の一部都市の大気環境を比較した結果（表4）¹⁸をみると、中国都市部のSO₂濃度は日本と韓国の数倍に達しており、北京の数値は東京の1980年代初期の値、ソウルの1990年代初期の値であると報告されている¹⁸。一方、NO₂濃度については各都市で大きな差はなく、経年変化をみると横ばいか、増加傾向にある。これは移動発生源からの排ガスによるためである。また、浮遊粉塵については、中国は総浮遊粒子状物質（TSP）であり、日本と韓国はPM₁₀であるので一概に比較はできないが、中国の浮遊粉塵はかなり高いとみなすことができる。降塵量については黄砂などの自然起源のものもあり、中国北方地域で大きな値を示している。

表4 東アジア地域都市部の大気環境¹⁸

	対象年	SO ₂ mg/m ³	NO ₂ mg/m ³	TSP mg/m ³	PM ₁₀ mg/m ³	降塵量 ton/km ² /月
北京	2000	0.071	0.071	0.353		15.1
吉林	2000	0.067	0.063	0.557		25
蘭州	2000	0.060	0.053	0.668		21.1
上海	2000	0.046	0.061	0.156		8.9
重慶	2000	0.126	0.044	0.261		11.5
広州	2000	0.049	0.068	0.185		7.3
ソウル	2002	0.014	0.074		0.076	
釜山	2002	0.020	0.060		0.069	
東京	2001	0.011	0.066		0.042	4.6
福岡	2001	0.011	0.053		0.033	2.8

このような中国の大気環境の特徴は、エネルギー源として石炭が多く使われていること、SO_xの除去対策が十分でないこと、エネルギーの利用効率が非常に低いことの三点で説明することができる。特に、中国は世界最大の石炭消費国であり、その石炭も平均硫黄含有率が1.35%という低質の石炭を利用するため、中国の主要都市でSO_xによる大気汚染が深刻化しており、北方の都市の1/2以上、南方の都市の1/3以上で、SO₂の年平均濃度が国の基準を上回っ

大気環境基準から見た東アジアの大気環境の変化

ているといわれている。このような中で、大気環境基準（GB3095-1996）が設定された。この環境基準は、日本や韓国のように全国一律に設定されておらず、農村部、都市部居住地域、都市部工業地域の3段階に分けてSO₂、NO₂、浮遊粒子状物質、CO、オゾンについて基準値を設定している。

表5 中国の大気環境基準

		大気環境基準 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		観測時間	1級レベル	2級レベル	3級レベル
SO ₂		年平均	0.02	0.06	0.1
		日平均	0.05	0.15	0.25
		1時間平均	0.15	0.50	0.7
NO ₂		年平均	0.04	0.08	0.08
		日平均	0.08	0.12	0.12
		1時間平均	0.12	0.24	0.24
浮遊粒子状物質	総量	年平均	0.08	0.20	0.3
		日平均	0.12	0.30	0.5
	PM ₁₀	年平均	0.04	0.10	0.15
		日平均	0.05	0.15	0.25
NO _x		年平均	0.05	0.10	0.10
		日平均	0.1	0.15	0.15
		1時間平均	0.15	0.30	0.30
CO		日平均	4	4	6
		1時間平均	10	10	20
O ₃		1時間平均	0.12	0.16	0.2

大気環境基準を遵守するうえで大気環境をモニターリングすることが重要である。中国のモニターリングは、1970年代に方法論を確立するためにいくつかの都市で始められ、1980年代にはSO₂、NO_x、総浮遊粒子状物質（TSP）についての測定マニュアルが作られ、4サンプル/日、5日/季節のデータが収集され、年間報告が作成された。1990年代に入ると人口100万人以上の46都市でモニターリングが行われ、メディアを通じて週間報告が出されるようになった。2000年にはこの計画がスピードアップされ、42都市で自動モニターリングが行われ、毎日のデータと共にSO₂、NO_x、PM₁₀の大気汚染指数（Air Pollution Index; API）が作成され、公表されるようになった。2001年に47都市で毎日のAPI予報が発表され、2003年にはこのモニターリング網が100万人以下の都市にも拡がり、103都市で測定されるようになった。モニターリング網は2006年に国家的に113都市、地方では559都市に拡張されている。

2) 大気汚染指数（API）からみた中国の大気環境

2000年から公表されている大気汚染指数（API）は大気汚染の度合いを示すものである¹⁹。API値は、表6に示されるようにPM₁₀、SO₂、NO₂、CO、オゾンの濃度についてそれぞれに示された値の間を線形に補間して求められる。PM₁₀、SO₂、NO₂の濃度は、前日の正午から当日の正午までの日平均値であり、CO、オゾンについては時間平均値でAPIが定義されている。成分

毎のAPIのうちの最大のものがその日のAPIとして、主要汚染物質名とともに公表され、その程度に応じて、屋外での活動制限などの注意を喚起するものである。なお現在のところ、CO、オゾンについては、APIは定義されているが、報告されている例はない。

表6 大気汚染指数（API）の定義

API	汚染物質の濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
	SO ₂ 日平均	NO ₂ 日平均	PM ₁₀ 日平均	CO 1時間値	O ₃ 1時間値
50	0.050	0.080	0.050	5	0.120
100	0.150	0.120	0.150	10	0.200
200	0.800	0.280	0.350	60	0.400
300	1.600	0.565	0.420	90	0.800
400	2.100	0.750	0.500	120	1.000
500	2.620	0.940	0.600	150	2.000

表7 大気汚染指数（API）による大気汚染の分類

	API	APIの分類	健康アドバイス
I	0-50	優	通常の活動が可能
II	51-100	良	特に敏感な者は、長時間または激しい屋外活動の減少を検討
III1	101-150	軽微汚染	心臓・肺疾患患者、高齢者および子供は、長時間または激しい屋外活動を減少
III2	151-200	軽度汚染	上記の者は、長時間または激しい屋外活動を中止 全ての者は、長時間または激しい屋外活動を減少
IV1	201-250	中度汚染	上記の者は、全ての屋外活動を中止 全ての者は、長時間または激しい屋外活動を減少
IV2	251-300	中度重汚染	同上
V	>300	重汚染	上記の者は、屋内に留まり、体力消費を避ける 全ての者は、屋外活動を中止

2012年2月現在、120都市のAPIと92都市のAPI予報が中国環境保護部から公表されている¹⁹。2月6日の北京は、浮遊粒子状物質が原因でAPIが112で、Ⅲ1（軽微汚染）に分類されている。1月8日からの30日間のAPI（図14）をみると、1月19日に浮遊粒子状物質が原因で269の中度重汚染、最も高い値になっている。この間にAPIが100を超えた日数は9日、その原因はすべて浮遊粒子状物質によるものである。一方、最も低いのは海南省三亚市でAPIは16であり、図15に示すように30日間全てが30以下で、非常に清澄な大気環境であることを示す。この1年を通じてAPIが最も悪いのは蘭州である。蘭州の30日間の状況は図16のとおりで、100を超えた日数は半分以上の17日間であった。

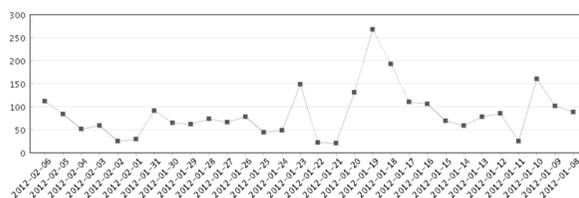


図14 北京のAPI（2012年1月8日～2月6日）

大気環境基準から見た東アジアの大気環境の変化

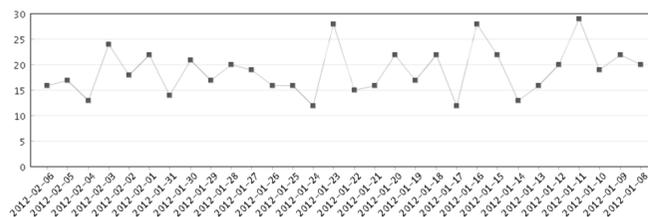


図15 三亜のAPI (2012年1月8日～2月6日)

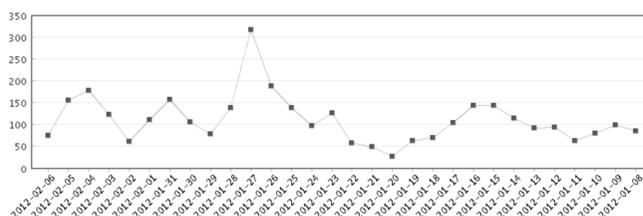


図16 蘭州のAPI (2012年1月8日～2月6日)

2001年から2007年までの7年間のAPIを比較し、中国の大気環境動態を考察した研究がある²⁰。それによると、APIは冬季の1月、11月、12月に高く、夏季に低い傾向が見られる。また、北京、太原、南京、武漢、重慶、西安、蘭州などで改善傾向が見られるが、元々APIの低い厦門や海口については、悪化の傾向が見られるという。

VI. おわりに

東アジアは、急速な経済成長によるエネルギー消費の増加により、現在では欧米を凌駕する大気汚染物質の排出が集中する地域になっており、その影響は発生源地域のみならず、長距離越境輸送により東アジア全域から東アジア外の地域にまで及んでいると考えられている。

たとえば、2007年5月8、9日に日本の広い範囲で高濃度の光化学オキシダントが観測され、北九州を中心として光化学スモッグ注意報が発令された。この高濃度オキシダントがアジア大陸を起源とする越境大気汚染の可能性を示すものとして、連日報道され社会問題となった。しかし、現在までにこの越境大気汚染についていくつかのグループによって検討されているが、解析方法により大陸からの寄与度が大きく異なる結果になっている²¹。

いずれこの問題は解明されることは自明であるが、最も重要なことは発生源での排出量を減らし、清浄な大気環境を維持することである。ここでは、東アジアの大気環境を大気環境基準から眺めてきたが、経済発展と大気環境、環境基準が相互に関連していることは明らかである。今後は、東アジア地域の国々が、それぞれの経験を交流し、相互に協力しながら、次世代に清浄な大気環境を引き継いでいくべきであろう。

- 1 <http://www.yomiuri.co.jp/world/news/20120111-OYT1T01212.htm>
- 2 http://japanese.china.org.cn/environment/txt/2011-11/18/content_23951285.htm
- 3 村橋、御園生編『地球環境の化学』、朝倉書店、2006年
- 4 花岡、柳下、岡崎、宮本、岡田、運輸政策研究、Vol.6、No.2、p34 2003年
- 5 環境省大気汚染物質広域監視システム(そらまめ君)、<http://soramame.taiki.go.jp/>
- 6 吉田、『四日市公害』、柏書房、2002年
- 7 鈴木、大気環境学会誌、第44巻、第6号、p 292、2009年
- 8 直接脱硫法は常圧残油等を分留せず、そのまま脱硫するプロセスで、間接脱硫法は、まず常圧残油を減圧蒸留装置で減圧軽油と減圧残油に分留して、減圧軽油(硫黄分2～3%)のみを脱硫した後(硫黄分0.1～0.2%)、減圧残油に再混合して重油の硫黄分を低下させる方法である。
- 9 排煙中の硫黄酸化物を硫酸、硫安、石膏などにして回収する方法である。乾式法と湿式法とがある。乾式法には、酸化マンガン法、接触酸化法などがある。湿式法には、石灰法、アンモニア法などがあり、石膏や硫安として回収する。現在の排煙脱硫の設置状況から見ると湿式法を採用しているところが多い。
- 10 90%削減は技術的に困難であったり、性能低下の恐れがあったため、達成率が延期され、大気清浄法(1977年)として内容も修正された。
- 11 四日市コンビナートでも各種の脱硫装置が開発導入され、SO₂の排出量は劇的に低下し、SO₂濃度は1975年には環境基準値の1/5に低下した。
- 12 香川、大気環境学会誌、第44巻、第6号、p 303、2009年
- 13 長谷川、上野、大気環境学会誌、第46巻、第2号、p 1、2011年
- 14 「大気汚染に係る環境基準」、<http://www.env.go.jp/kijun/taiki.html>
- 15 平成23年版環境・循環型社会生物多様性白書
http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h23/html/hj11020201.html#n2_2_1_1
- 16 韓国環境研究院、大気環境年報2010。
<http://webbook.me.go.kr/DLi-File/pdf/2011/10/5506169.pdf>
- 17 <http://www.airkorea.or.kr/>
- 18 福嶋、エネルギー経済(日本エネルギー経済研究所)、第29巻、第10号、p1、2003年
- 19 中国環境保護部 <http://datacenter.mep.gov.cn/>
- 20 杉本、大気環境学会誌、第43巻、第5号、p295、2008年
- 21 黒川、CICSJ Bulletin、第29巻、第4号、p66、2011年