

# 大気汚染の原因・影響とその解決方法

PBL 演習 6 班

林 恵慈、大野 弘佑起、大西優貴夏、Rendi Ahmad Rustandi

アドバイザー教員：羽田野裕子

## 1.背景

近年大気汚染は先進国の工業地域や都市部だけでなく、経済成長著しい新興国においても課題となっている。スイスの企業、IQAir は、131 の国と地域、30000 を超えるセンサで PM2.5 の大気中の平均密度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) を測定し、大気汚染のランキングを国別に発表した[1]。ここから発展途上国の大気汚染が深刻であることがわかる。また、大気汚染の健康に対する影響は特に途上国での被害は深刻である。早期死亡の負担は主に途上国で発生し、アジアだけで 65% を占めている[2]。また、世界銀行は 2013 年に大気汚染によって早期に死亡した人は約 550 万人と推定しており[3]、大気汚染に起因する早期死亡による労働所得の損失は、全世界で総額約 2250 億ドルと算定されている[4]。

## 2.目的

上述の通り大気汚染は、発展途上国で特に深刻化している。本研究では、発展途上国の中でも特に深刻な国を特定したうえで、大気汚染の原因を詳細に調査し、その他の発展途上国も含めて適応できる解決策を提案することである。

## 3.手法

第一に、IQAir のレポート、「2022 Country/region ranking」から、大気汚染ワースト 5 の国に注目する。第二に、国ごとに大気汚染の原因を詳細に調査し、その他の途上国にも幅広く適応可能な対応策を考えるため、共通項を抽出する。その共通項に焦点を当て、さらに深く調査したうえで、その結果から対策を考える。

## 4.大気汚染が深刻化している国

IQAir のレポートから、最も大気汚染が深刻な 5 か国、バングラデシュ人民共和国、パキスタン・イスラム共和国、イラク、バーレーン王国、チャド共和国を取り上げた。

## 5.汚染されている原因

### 5.1 バングラデシュ

同国環境省の 2019 年の資料[5]によれば、首都ダッカの微粒子排出源は、レンガ窯が約 58%、車両が約 10%、粉塵が約 15% となっている。

#### 5.1.1 レンガ窯

同国では他建材の材料不足のためレンガ需要が高い。しかし窯の 90% 以上は雨季に浸水する低地にあるため低コストだが非効率な方式が普及している。また政府はこれまでに規制による対策をしてきたが、実際には法律が守られていない。罰則強化から逃れるため窯の所有者は政治家や警察官に賄賂を支払っている[6]。このような汚職問題は規制の機能不全を引き起こしている。

#### 5.1.2 車両

ダッカの人口は約 2000 万人、人口密度は東京 23 区の倍以上だが、地下鉄は 2022 年末に開通した 1 路線のみである。市民はオートバイで通勤するため汚染と渋滞が起きている。渋滞はさらなる汚染を引き起こす。CO2 の場合、平均時速が 40 から 20 に下がると排出量は 1.43 倍になる[7]。また、ここでも規制が守られておらず、ダッカ市内の排出制限を満たす車両の割合は自動車 87.8%、オートバイ 22.2% である。汚職の問題もある。例えば環境性能の低い 2 ストローク 3 輪車は禁止さ

れているが、所有者が警察に賄賂を渡して取り締まりを逃れている[8]。ハード整備のみならず、汚職対策のようなソフト対策が必要である。

### 5.1.3 粉塵

建設現場からの排出が問題である。法律では建物所有者は建設中の粉塵の拡散の防止が必要とされているが、建設会社や建物所有者は、費用と時間を理由に粉塵の拡散防止策を講じていない。道路脇にも砂等の建設資材が放置され、それが車両に巻き上げられている。ダッカ市北公社は2台の放水トラックで散水による対応をしているが明らかに不足している。放水等の対応以外にルールを守らせる工夫が必要である。

## 5.2 パキスタン[9]

### 5.2.1 バイオマスストーブを使った調理

屋内大気汚染は世界の他の地域よりもかなり高い。人口の60%以上がバイオマスストーブを使った調理をしており、バイオマス燃料による屋内大気汚染にさらされている。

### 5.2.2 作物残渣の焼却

5つの主要作物（小麦、米、トウモロコシ、綿花、サトウキビ）の残渣の焼却が原因の1つである。

## 5.3 イラク

大気汚染の主な原因は、石油産業（フレアリング）、工業（レンガ・セメント産業）である[10]。

### 5.3.1 石油精製所

イラクは石油輸出国であり、この産業が主な汚染源である。巨大な製油所が存在する地域で国の基準およびWHOの許容限度値を超えていた。

### 5.3.2 レンガ製造

レンガ産業の窯の燃料に原油が使用されており、ガス状廃棄物による汚染の原因となっている。

### 5.3.3 セメント工場

セメントを製造する段階で粉塵が発生しており、大気汚染の要因になっている。

## 5.4 バーレーン

バーレーンの主な汚染原因は、自動車、粉塵（砂嵐）、工業や発電などによる廃棄物が考えられる。

### 5.4.1 自動車

バーレーンの主要な交通手段は自動車であり、最大の汚染原因である[11]。また公式環境統計では、大気汚染の49%は自動車の排気ガスによるものであると述べている。

### 5.4.2 工業

バーレーンの工場(特に古い工場)から排出されるガスが大気汚染を引き起こしている。汚染源となりうる工場などは、汚染物質が排出されない方法で管理することが義務付けられているが、全ての工場がこの規制を遵守できているわけではないのが現状である。

### 5.4.3 粉塵（砂嵐）

バーレーンは砂漠気候であり、国土の大半が砂漠と石灰岩に覆われている。バーレーンの位置するアラビア半島は常に強風、乾燥した土壌、高い気温にさらされており、これらが組み合わせられて砂嵐が引き起こされる。

## 5.5 チャド

チャド共和国の汚染は、主に砂漠化とバイオマス燃焼に起因するものと推測されている。

### 5.5.1 砂漠化

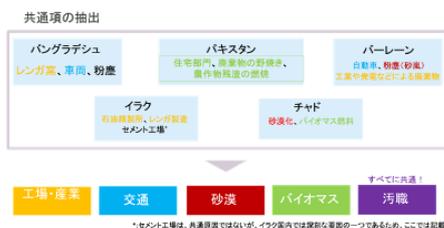
アフリカ大陸には、ハルマッタンという極めて乾燥した貿易風が吹いており、サハラ砂漠中部、チャド国内のボデレ低地から膨大な量の砂塵を巻き上げている。

### 5.5.2 バイオマス燃料

家庭での調理などの際に伝統的なバイオマス燃料を使用している。これらの燃料は質が悪く、大気汚染を深刻化させる要因の一つとなっている。

### ・観測の不足

大気汚染の記録は、首都のンジャメナの大気監視局の1カ所である。大気汚染の解決にはリアルタイムに正確な汚染状況を確認する必要がある。



## 6. 解決策

### 6.1 工場・産業

#### 6.1.1 レンガ窯

高効率な方式への置き換えが求められる。例えば固定式煙突窯(FCK)に代わりハイブリッド Hoffman 窯(HKK)を導入すれば、汚染を半減しつつ、年間のレンガ生産量も約 4 倍弱に改善できる [12]。しかし建設費用が FCK に比べ 30 倍以上になる [13]。そこで既存の FCK から改造可能な改良ジグザグ窯(IZK)が期待される。低コストで PM 排出量を 9 割減少させることが可能である。鉄鋼やセメント等の生産を拡大することで窯の数を減らす方法も考えられる。乾季にしか稼働できない FCK のレンガ窯を、他建材の、環境基準に適合した工場の建設を推進することで、安定した雇用を創出しつつ、大気汚染の改善につながる。

#### 6.1.2 セメント [14]

セメント産業による気候被害を軽減方法には、次のようなものがある。

##### ・よりクリーンな燃焼炉燃料

残留油や溶剤、汚染木材や木材からの加工廃棄物、使用済みタイヤやゴム廃棄物、プラスチック廃棄物、家庭廃棄物の熱留分、下水汚泥、動物糞などの代替燃料を使用する。セメントを部分的に置き換えるために、石灰石充填剤またはその他の低影響鉱物添加剤の使用を増やす [15]。

##### ・風力などのクリーンエネルギー

炭素回収貯蔵の一形態であるアミンスクラビングとカルシウムループは、気候被害コストをそれぞれ 50% と 65% 削減できる可能性がある。これらは将来的には実装可能性がある。

### 6.1.3 フレアリング [16]

フレアリングが多い国には、油田に大量のガスがあり処理が難しいこと、天然ガスの地元市場は未開発であるか、ガスの価格が低くなっていることの二つの理由がある。

#### ・解決策 1；ガス市場の開発

ガス市場には最終用途が必要であり、それには発電が考えられる。あるいは石油化学、セメント製造など、大規模な産業用途でのガス利用を拡大する方法も考えられる。天然ガスは、石炭等に比べて環境面でも利点がある。

#### ・解決策 2：発生源周辺でのガスの小規模利用

パイプを使って熱や発電のためのガスを地元企業に供給することや、車両向け CNG 燃料供給ステーションを建設することが考えられる。例えば、GE の「CNG in a Box」はフレアリングの発生場所ならどこでも配備可能な移動式給油ステーションである。ただし、これらの小規模アプリケーションは、コスト競争力を高めるスケールメリットの達成が難しいというデメリットもある。

## 6.2 交通

交通分野の対策を、適切な車両整備と交通インフラの整備の 2 つの視点から考える。

### 6.2.1 車両整備

バングラデシュでは車検制度の整備が進められているが [17]、これだけでは車両からの微粒子排出の解決は難しい。その理由としてはオートバイの存在がある。ダッカで排出基準を満たす車両の割合は自動車は 87.8% である一方、オートバイは 22.2% であった。そして 2022 年の登録車両数は自動車約 1.5 万台に対して、オートバイは約 12 万台だった。オートバイの排気量が 100cc 程度で、日本でも車検の対象外である。そこでオートバイを減らす方法と置き換える方法が考えられる。減らす方法は公共交通の整備であり 6.2.2 で述べる。置き換えは、都市内部で汚染物質を排出

しない電動オートバイの推進である。しかし価格面では課題もある。Honda の EM1e の場合は同程度のエンジン車より約 5 万円高い。ただし日本では国や自治体の補助を組み合わせることで同程度の価格で購入できる場合もある。また途上国のインドでも電動二輪車は 2022 年の登録車数が前年比 4 倍の 62 万台と増加しており[18]、補助金次第では普及の可能性はあると考える。

### 6.2.2 インフラ整備

ダッカなどの大都市において、渋滞と汚染に効果的なのは地下鉄などの整備であろう。調査国では現状、人口約 2000 万のダッカに 1 路線、人口約 1000 万のラホールに 1 路線が開通したのみである。人口約 1000 万人のソウル特別市では、地下鉄 9 路線 300km が整備されており、不足は明らかである。そこでこのような国々の整備方法として、先進国の支援を引き出すことが考えられる。実際にダッカでは日本が、ラホールでは中国が建設の支援をした。この両国はインドネシアの高速鉄道建設においては受注競争をしており、政治的・経済的理由から支援する側も積極的な姿勢が窺える。先進国を上手に利用して自国の利益を確保すればよい。ただしハード整備だけで渋滞を解消できるとは限らない。例えば中東バーレーンでは、産油国であり経済面での課題はなく 4 路線 100 km にわたる地下鉄整備計画が進められているが、産油国ゆえにガソリンが安く、公共交通への転換が進みにくいのではと考えられる。そこで過度な自動車利用を抑制するモビリティ・マネジメント(MM)という施策がある[19]。市民に自動車の長短を知ってもらったうえで、路線図や時刻表等の情報提供をし、アンケートの形式を利用して自動車以外の手段での通勤プランを考え行動変容を促すような取り組み例があり、渋滞長の削減や通勤通学の自動車分担率の低下に貢献した例もある。市民の交通行動変容を促す MM は、新線開業

を控える途上国の都市において必要な取り組みだと考えられる。

## 6.3 バイオマス燃焼

バイオマス燃焼は主に、農業における野焼きと家庭での燃焼の 2 種類に分けられる。

### 6.3.1 農業に関連するバイオマス燃焼

途上国の農村部では、作物の収穫後に田畑に残った非食用植物部分である作物残渣を大量に燃やす、野焼きが行われている。野焼きを行う理由として、最も効率的に低コストで作物残渣を処理でき、害虫や雑草も除去できることが挙げられる。

多くの国で野焼きが禁止されているが、その規制が必ず遵守されるわけではなく、農家と協力して作物残渣の使用の代替策を提供する必要がある。例えば、機械式稲藁梱包機を使用すれば、バイオマスを圧縮藁梱包に変換し再利用する事ができ、農家は次の作物収穫サイクルのために土地を迅速に準備できる。インドでは、農家から農業廃棄物を購入し、石炭と一緒に燃焼できるバイオマスペレットに変換するよう電力会社に依頼したり、バイオマスのガス化、残渣をマルチとして埋め込むシーードドリルの使用(マルチとは土壌表面を被覆すること)など、農業残渣の生産的な用途に利用をしたりして、野焼きの禁止の有効性の向上を図っている。[20]また、作物残渣の効率的なバイオ燃料化の研究は広く行われており、野焼きによる汚染の改善のみならず、化石燃料の消費を抑える手段としても期待されている。バイオ燃料のポテンシャルについて、バングラデシュでは 5 つの主要作物の農業残渣に基づくと、合計 4,440 万 t のバイオエタノールを抽出できる可能性がある[21]。

### 6.3.2 家庭におけるバイオマス燃焼

世界銀行によると、2021 年において 6 億 7,600 万人が電力へアクセスできず、暖房や調理目的に家庭用ストーブで薪、動物の糞その他のバイオマ

スを燃やしており、大気汚染につながっている[22]。途上国でエネルギー供給が進まない主な原因は、既存の発電施設から遠距離にある辺鄙な場所や海上の島々への、新たな設備や送電線の長距離設置に巨額な資金が必要になるからである。そのため、途上国における電力供給の手段として、オフグリッドを提案する。[23] オフグリッドとは電力会社の送電網とは繋がらず、電力を自給自足している状態であり、太陽光や風力、バイオマスといった自然のエネルギーを電力として使用する。そのため、上記の送電線などの問題を解決し、未電化地域のエネルギーへのアクセスを比較的低コストで実現できる。しかしながら、オフグリッドの発電システムの導入は途上国が自力ですべて完了することはできず、先進国の技術的な支援や出資が必要である。またインフラ整備が整っていない地域では、現状の悪質なストーブの先端的で低排出なストーブとの交換や、燃料を見直しによる、クリーンな調理と暖房を実現も大切である。[20]

#### 6.4 砂漠化

砂漠化は、気候的要因と人為的要因の2種にわけられる。ここでは人為的要因に注目する。

人為的要因としては、過放牧、休耕をしない降雨依存農業、灌漑農業等が挙げられる。

過放牧は、家畜が植物を根こそぎ食べてしまう事で植生の破壊に繋がる。法での禁止することは一見有効に思えるが、モンゴルでは[24]、家畜の餌が足りず、人目につかない夜間や早朝に放牧が行われ、効果がなかった。有効な対策法として、「封育」がある。これは土地の一部を完全に柵で覆い、家畜が侵入できない土地を作る方法である。封育されている土地は一定時間が経過すればまた植生が回復するため、封育する土地を一定期間ごとに変えて植生を維持する。この方法は降水量が300 mm以上の土地では有効である。

休耕をしない降雨依存農業は、雨水にのみ頼つ

た農業形式である。休耕を行わないことによって土壌から水分がなくなり、砂漠化した土地になってしまう。この農業形式は主にアフリカ大陸で実施されている。主な解決法としては、各農家で集水タンクを備えたシステムの導入がある。雨季の降水をタンクにためることによって乾季に貯留した水を使用する。しかし、費用と技術力を要するため、先進国の援助が必要である。

灌漑農業は、塩害を引き起こし、植生が育たなくなってしまうことにより砂漠化したもので、インド、パキスタンで深刻化している。灌漑農業による砂漠化の防止策として、土壌の塩分を除去するための排水システムを整備する方法、土壌改良剤によって塩類を中和させる方法などがある。

#### 6.5 汚職対策[25]

途上国の環境対策が進まない背景に汚職問題がある。バングラデシュの場合には違法なレンガ窯や車両が賄賂によって見逃されていることを紹介した。汚職対策の成功例にはジョージアがある。改革以前はあらゆる行政手続きで賄賂が必要とされ、特に交通警察は違反していない人も取り締まり賄賂を要求していたが、改革後の汚職認識指数はイタリアと同程度、東欧では最善となった。システム面の改革が参考になる。街中に監視カメラを設置し、取り締まりを客観的に行えるようにした。罰金もその場で徴収せずに銀行を経由することで、賄賂のチャンスを減らした。行政面では納税や行政手続き、規制などはシステムが複雑で手続きにも時間と手間がかかる状態であったため、正式な手続きを避けて納税額を交渉で決めるようになり、汚職が蔓延した。そこで税収の少ないものは廃止か簡素化し、少なくなった税収は確実に徴税によって補われた。申告書や手続きも電子申告システムの導入を導入したうえで簡略化され、納税者と職員の接触機会を減らし汚職機会を減らしつつ、正確な記録を残すようにした。このよう

な施策は他国にも導入出来る方法である。取り締まりを適切に行える行政組織作りが大気汚染対策に必要であると考え。

## 7.まとめ

本研究では、特に大気汚染が深刻な国々の汚染原因を調査し、各要因の対策法を提案した。汚染対策に共通して以下の3つのことが言える。第一に、技術や施設面の対策を講じて、それが適切に利用されなければ、効果が発揮されないため、ハード対策だけでなくソフト対策も重要である。第二に、先進国にも積極的に投資するメリットがあるため途上国は、技術的・資金的に難しい課題の解決には先進国を利用するべきである。第三に、汚職は法の拘束力を弱め、環境対策への効力を低下させる。汚職対策など政治への対策も必要であり、政治家を選ぶ国民の意識も大切である。

## 8.参考文献

[1] IQAir, "2022\_World\_Air\_Quality\_Report\_INT", 2022

[2] Aaron J. Cohen, H. Ross Anderson, "THE GLOBAL BURDEN OF DISEASE DUE TO OUTDOOR AIR POLLUTION", 2005

[3] The World Bank, Institute for Health Metrics and Evaluation, "The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action", 8 September, 2016

[4] JAPAN BEYOND COAL, "世銀 2016 年度版レポート、大気汚染による経済的損失を算定", [https://beyond-coal.jp/archives/wordbank-report\\_2016/](https://beyond-coal.jp/archives/wordbank-report_2016/), 2017 年 1 月 11 日

[5] Bangladesh Department of Environment, "SOURCE OF AIR IN BANGLADESH", 2019

[6] THE WORLD BANK, "operationalizing Political Economy"

[7] 国土交通省, "自動車の排出ガスと CO2 の関係", 2002, (閲覧日 2023/10/11)

[8] The Daily Star, "Banned 2-stroke auto-rickshaws still scouring Ctg city", 2015/2/24 (閲覧日 2023/10/11) <https://www.thedailystar.net/city/banned-2-stroke-auto-rickshaws-still-scouring-ctg-city-3626>

[9] Slater et al., Integrated Assessment of Air Pollution and Climate Change Mitigation in Pakistan Report. September 2022.

[10] Mohammed K. Al-Kasser 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 790 012014.

[11] Kingdom of Bahrain Public Commission for the Protection of Marine Resources, Environment and Wildlife, State of the Environment in the Kingdom of Bahrain

[12] The World Bank, "Modern Brick Kilns Yield Development Benefit in Bangladesh", 2016, (最終閲覧 2023 年 10 月 11 日) <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2016/07/20/modern-brick-kilns-yield-development-benefits-in-bangladesh>

[13] IGC, "Health and environment impacts of brick kilns in Bangladesh", 2022 年 11 月 7 日, (最終閲覧 2023 年 10 月 11 日) <https://www.theigc.org/blogs/climate-priorities-developing-countries/health-and-environmental-impacts-brick-kilns>

[14] Concrete Solutions That Lower Both Emissions and Air Pollution. <https://www.ucdavis.edu/climate/news/concrete-solutions-that-lower-both-emissions-and-air-pollution>. Accessed on October 12<sup>th</sup>, 2023.

[15] Zieri, W., Ismail, I. (2019). Alternative Fuels from Waste Products in Cement Industry. In: Martínez, L., Kharissova, O., Kharisov, B. (eds) Handbook of Ecomaterials. Springer, Cham.

[16] Gas Flaring: Why does it happen and what can stop it? <https://energyforgrowth.org/article/gas-flaring-why-does-it-happen-and-what-can-stop-it/> Accessed on September 7th, 2023.

[17] JETRO, "地域レポート：成長期待含みの自動車市場、EVにも可能性(バングラデシュ)", 2022/6/13 (閲覧日 2023/10/11) <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2022/0302/cbfb2b1f64d1fa48.html>

[18] JETRO, "2022 年の EV 登録台数 100 万台超、二輪車は前年比 4 倍以上(インド)" 2023/2/7 (閲覧日 2023/10/11) <https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/02/4800aa8c33f4475c.html>

[19] 国土交通省, "モビリティ・マネジメント 交通をとりまく様々な問題の解決にむけて", 2007

[20] アジア太平洋地域の大气汚染：科学に基づくソリューション・レポート, 国連環境計画 (UNEP), 2019

[21] Shadman Mahmud et al. (2022). Bioethanol and biodiesel blended fuels — Feasibility analysis of biofuel feedstocks in Bangladesh. Energy Reports.

[22] 2023 Tracking SDG7 Chapter 1 Access to Electricity, 2023

[23] Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review, Stefano Mandelli, Jacopo Barbieri, Riccardo Mereu, Emanuela Colombo

[24] 一般社団法人、地球緑化クラブ、<http://www.ryokukaclub.com/siryousitu/kahouboku/kahouboku1.html>

[25] The World Bank, "Fighting Corruption in Public Service", 2012