

# 関東圏オゾン・PM2.5 発生シミュレーションによる 火力発電所の外部費用推計

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 (2014年3月終了予定)

47-126713 平山 智樹 (指導教員: 吉田 好邦 教授)

キーワード: 火力発電, オゾン, PM2.5, 健康リスク

## 1. はじめに

福島第一原発の事故を境に、安定したベース電源であった原子力に代替する形で、火力発電所の増設が計画されている。火力発電由来の種々の問題の中でも、本研究では、増設した火力からの前駆物質排出に起因する、オゾンとPM2.5(2次生成の硝酸塩・硫酸塩を対象とした)の濃度上昇によってもたらされる、健康被害額を推算することを目的とし、関東地方を対象とした環境リスク評価を行う。

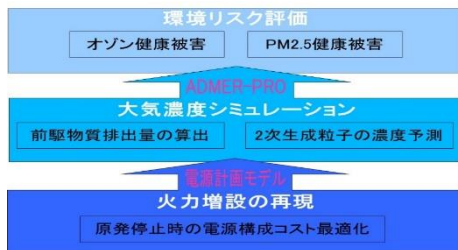


図1: 研究のフローチャート

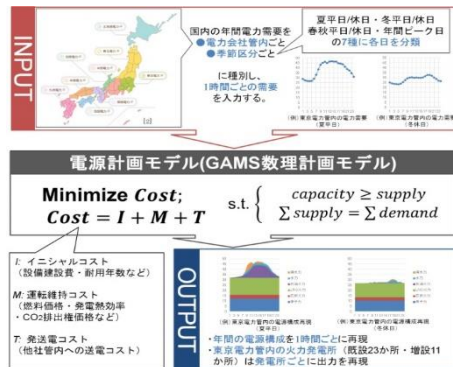


図2: 最適電源計画モデルの概略図

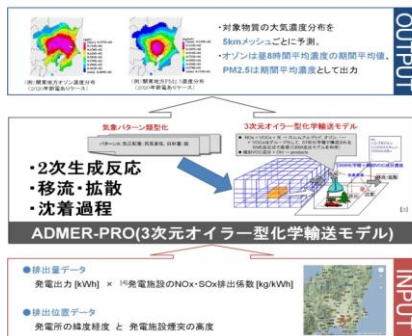


図3: ADMER-PROの概略図

## 2. 研究のフロー

本研究のフローチャートが図1である。研究の目的は、火力増設がもたらすオゾン・PM2.5濃度上昇による外部費用を推算することである。その計算に必要な大気濃度のシミュレーションを行うツールとして、産業技術総合研究所開発の広域大気モデル ADMER-PRO を用いた。またシミュレーションに必要な、オゾン PM2.5 の前駆物質である NO<sub>x</sub>・SO<sub>x</sub> の排出量データを作成するには、各火力発電所の稼働状況を再現する必要がある。本研究では東京大学・松橋吉田研究室で研究が行われていた最適電源計画モデルを用いて、東電管内の火力発電所の稼働状況を再現した。なお ADMER-PRO は図3に示すようなオイラー型の大気モデルで、電源計画モデルは図2に示すような1時間ごとの各電力会社管内電源構成を費用最小化によって決定する数理計画モデルである。

## 3. 想定するモデルケース

火力発電所の増設前後でどれだけ大気濃度に差異が生じるかを主として研究するため、表1のような3ケースを想定した。

表1: 想定するモデルケース

	電力需要	原子力発電	既存火力発電	新設火力発電
2010年 base ケース	2010年需要	○	○	×
2020年 節電ありケース	2010年需要 × 節電率90%	×	○	○
2020年 節電なしケース	2010年需要	×	○	○

### ○2010年 base ケース

福島原発事故前である2010年の電力需要と、それに伴う電力供給を再現した。

### ○2020年節電ありケース

原発はすべて停止し、その代替として増

設火力発電所が一通り完成する。一方で需要側は節電を行い、通年で2010年需要比10%の需要カットを達成する。

○2020年節電なしケース

2020年節電ありケースと同様の稼働条件で、節電を行わずに2010年の需要が満たされるように発電所を稼働させる。2020年節電ありケースと比較することで、節電を実施することの影響を評価することができる。

4. 電源計画モデルによる電源構成推定

図2に示したような電源計画モデルを用いて、東京電力管内の火力発電所（既設23か所・新規増設11か所）ごとの発電量を、1時間ごとに1年間分再現した。年間の発電量を発電方式ごとにまとめた結果を図4に示した。baseケースと2つの2020年ケースを比較すると、節電実施の有無にかかわらず各火力方式の年間発電量は増加し、特に新しいベース電源としての石炭火力の発電量が大きく増大した。また2020年において節電実施の有無を比較すると、節電は主に石油火力の発電量を削減する効果があるという結果が得られた。

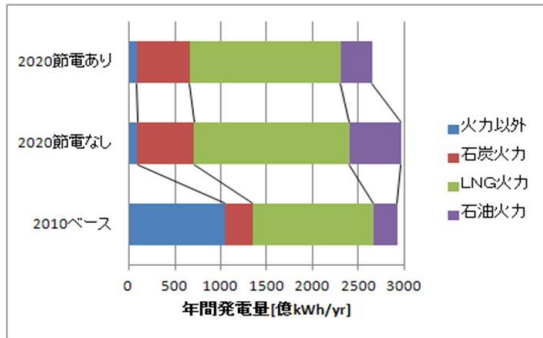


図3: 再現された各方式の電源構成

5. ADMER-PRO 大気濃度分布予測

最適電源計画モデルにより再現された各火力発電の発電量に、排出係数<sup>[1]</sup>を乗じることで、オゾンとPM2.5の前駆物質であるNOxとSOxの排出量を1時間ごとに再現した。気象条件にはADMER-PROの再現性が実証されており、且つ異常気象の少なかった2005年のデータを用いた。対象火力発電所からのNOx・SOx排出量のみを変更し、その他バックグラウンド排出は

2005年(NOx)・2002年(その他46物質)のデータを使用した。以上の条件下で、前駆物質NOx・SOxの排出量からオゾン・PM2.5の濃度予測シミュレーションを行った結果を図4~7に示した。

原発停止前後のオゾン濃度の差分をとって地図にプロットした図4, 5である。節電あり、節電なしのどちらのケースでも茨城県を中心に濃度が上昇している。一方で東京23区周辺の人口過密地域ではオゾン濃度が減少しており、前駆物質の増加に非線形に反応する、オゾンの二次生成の非線形性を表す結果が得られた。また濃度の上昇分減少分ともに、2020年の節電を行わない場合のほうが大きいことがわかった。

同様にPM2.5濃度の差分をとって地図にプロットした図6, 7である。節電あり、節電なしのどちらのケースでも茨城県を中心に濃度が上昇しており、また関東地方すべてのメッシュで濃度が上昇することが分かった。また濃度の上昇分は、2020年の節電を行わない場合のほうが高くなることが示された。

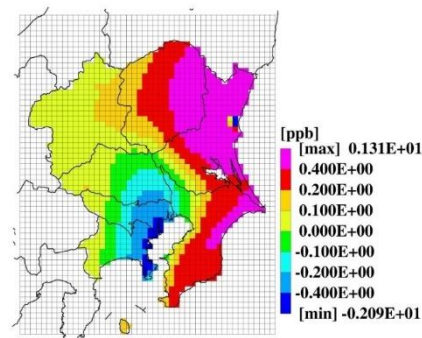


図4: オゾン平均濃度 節電なし-base

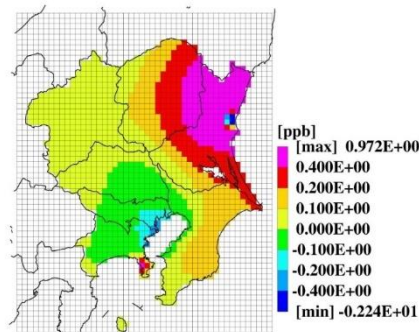


図5: オゾン平均濃度 節電あり-base

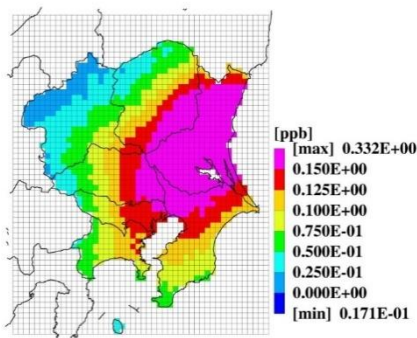


図 6:PM2.5 平均濃度 節電なし-base

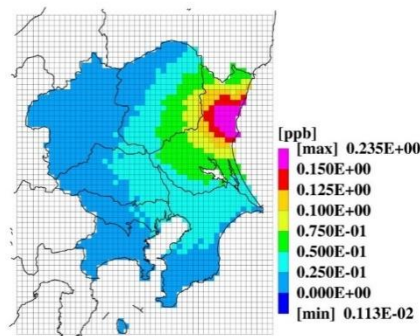


図 7:PM2.5 平均濃度 節電あり-base

## 6. 健康被害者数の推計

5章で大気濃度シミュレーションの結果から、関東地方各地域における大気濃度の、原子力発電所停止前後での変分がメッシュごとに求まった。この結果を受けて、オゾンとPM2.5の濃度増分による短期曝露による急性死亡者数、および長期曝露による慢性疾病死亡数を推計する。

オゾンおよびPM2.5による健康被害者数は、単位濃度上昇に対する死亡率・疾患獲得率の相対比率により算出され、この比率を相対リスクと呼ぶ。この相対リスク値Rを用いることで、メッシュ番号*i,j*のメッシュ内における、健康被害者数 $D_{ij}$ は次の式で求まる。ただし*i,j*をメッシュ番号、Pを相対リスクによって高められるリスクを被る人口とする。また $\Delta c_{ij}$ は大気濃度の増加・減少分、*c*は相対リスクの単位濃度上昇分である。これらのパラメータを用いて被害者数を算出する式が以下である。

$$D = \sum_{i,j} \text{sgn}(\Delta c_{ij}) \cdot (P_{ij} \cdot R^{|\Delta c_{ij}|/c} - P_{ij})$$

オゾンの急性死亡相対リスクは1.009/10ppbであり、これは平均曝露濃度が10ppb上昇したときに急性死亡率が0.9%上昇することを意味する。同様にPM2.5の急性死亡相対リスクは1.006/10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、この数字は平均曝露濃度が上昇したときに急性死亡率が0.6%上昇することを意味する。

また、PM2.5を数か月から数年程度、長期にわたり曝露し続ける場合、肺がん獲得リスクが増大することが知られている。肺がん獲得の相対リスクは1.22/10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ という値を使用した。

これらの相対リスク値を用いて、大気濃度予測により算出された原発停止前後のオゾン・PM2.5大気濃度差分を被害者数算出式に代入し、全メッシュで総和をとって被害者数を算出し、結果を図8に示した。

オゾンの急性死亡数は関東地方で総和をとると減少した。特に節電を行わなかった場合の死亡数の減少分のほうが大きい結果となった。すなわち、火力の新設と稼働増大をより行ったにも拘らず、オゾンの急性死亡被害の削減効果が大きくなる結果が得られた。図から人口の多い東京都心部でオゾンが減少する傾向が覗いたが、その結果を如実に反映しており、都心部で大きく人口が減少するため、関東地方全域でのオゾンによる急性死亡者数はマイナスに見積もられたと考えられる。

PM2.5の急性死亡数は関東地方一都六県で増加し、一方で節電を行うことによって急性死亡被害を削減することができることがわかった。またPM2.5の肺がん被害者数についても、PM2.5の急性死亡と同様の結果となった。

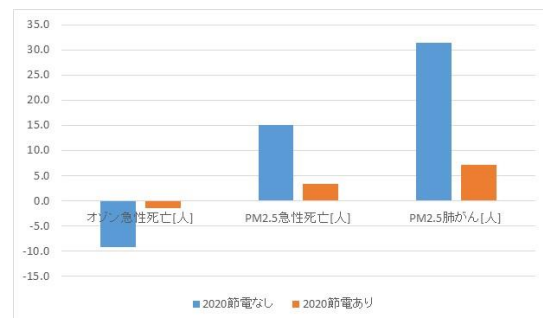


図 8:被害者数推算結果



## 7. 健康被害額の推計

急性死亡および肺がん被害のエンドポイントをどちらも死亡に設定し、死亡に関する貨幣価値換算を行った。本研究では貨幣価値換算を行う指標として、VSL(統計学的生命価値, Value of Statistical Life)を用いた。VSLは端的に述べれば「死亡するリスクを減らすのにいくら払うか」を示す指標である。具体的には、ある量の死亡リスク削減に対する社会の代表的な支払い意思額を算出し、死亡リスク削減量で除した値を指す。

$$VSL = \Delta WTP_{\Delta r} / \Delta r$$

VSLはあくまでも死亡影響を統計的に評価する際の評価単位としての取り扱いの容易さから作成された、便宜的な評価単位であり、一生命の価値を表しているものではないことに注意が必要である。

一方で肺がんなどの疾病被害では、疾病を獲得した時点ですべての余命を失うわけではない。そこでVSLに対し割引率を考慮しながら、その人の平均余命で除したVOLY(Value Of a Life Year lost)と呼ばれる指標を考える。

$$VSL = \sum_{s=0}^{T(t)} \frac{VOLY(t)}{(1+r)^s}$$

rを割引率とし、Tをその人の平均余命とした。VOLYは余命1年あたりのVSLであり、損失余命を乗じることで被害に応じた貨幣価値換算を行うことができる。また本研究のように、急性死亡被害と慢性疾患被害を同時に評価したい場合、どちらも余命損失による死亡をエンドポイントとし、損失余命とVOLYの積を被害額と考えることで、短期曝露と長期曝露を画一的に統合して評価を行うことが可能である。従って急性死亡による総被害額AHDC(Acute Health Damage Cost)は以下の式で算出できる

$$AHDC = \sum_t \sum_{s=0}^{T(t)} T(t) \cdot \frac{VOLY(t)}{(1+r)^s} \cdot D(t)$$

ここでtは年齢、T(t)をt歳における平均余命、D(t)をt歳の被害者数とする。

同様に慢性疾患被害による被害額CHDC(Chronicle Health Damage Cost)は以下のように求まる。

$$CHDC = \sum_t \sum_{s=0}^{[(Yll+Yld \cdot DW)]} (Yll + Yld \cdot DW) \cdot \frac{VOLY(t)}{(1+r)^s} \cdot D(t)$$

ただしYllは疾病による早期死亡年数、Yldは障害を有することで失う年数、DWは障害の重さを示すパラメータであり、

(Yll+Yld・DW)を損失余命と考えられる。

以上の計算式にVSLとして310万ユーロ<sup>[3]</sup>を代入し、健康被害額を図9に示した。



図8: 被害額推算結果

原発を停止して火力の焚き増しおよび新設を行った場合の健康被害額の総額は、オゾンによる被害削減効果もマイナスとして加算した場合、2020年節電なしケースで80.3億円、節電ありケースで20.9億円となった。電力需要側が通年で10%の需要カットを続けた場合、健康被害額にして74%の削減効果を得られることが示された。

## 8. 結論

原発を停止し火力の増設を行った場合、大気汚染による被害額はオゾンではマイナスになったが、トータルでは数十億円のプラスとなった。一方で節電による被害削減効果は大きい。

==参考文献==

- [1] 国立環境研究所,EF-JASS,2002
- [2] 中央環境審議会大気環境部会,2010
- [3] 長期曝露影響検討調査委員会,2009
- [4] EEA,2011