

死亡リスクに関する選好調査に基づいた発電の外部費用の推計

2013年3月修了

環境システム学専攻 47-106674 中島穂

指導教員：松橋隆治 教授

Keywords 電源構成 原子力発電 外部費用 微小確率の認識 ゼロリスク コンジョイント分析 ハザードマップ

1. 背景と目的

東日本大震災によって巻き起こった福島第一原子力発電所事故により、我が国の電力の供給安定性が欠如していることが表面化した。その理由として、国土が急峻で化石燃料や再生可能エネルギーにも恵まれていない島国であることや、送電網も他国と連系されておらず国内の主要な連系線は直線的で面的な連系線がないなどの事由が挙げられる。

当面の我が国の課題として、昨今の「脱原発」の潮流の中でどのように電源構成を変化させていくのかを考えるため、今まで考慮されていなかった発電の外部費用について検討し、電源構成を変化させる政策を検討する際には外部費用を含む包括的で社会的な経済影響を考える必要がある。

これらを背景として、本研究では各発電方法について主要な外部費用項目を取り上げ、コンジョイント分析を用いて人々の外部費用要因の削減に対する支払意思額(WTP)を推定し、その上で求められる外部費用を発電単価に内部化することで、発電の総費用を推計する。

2. 外部費用

経済活動の中で市場での取引を経由せずにある主体の活動が直接外部の主体に対してプラスあるいはマイナスの経済的影響を与えることがある。これを外部性または外部効果と呼ぶ。外部費用とは、マイナスの外部効果によってもたらされる費用を指す。

各発電における外部費用の中で主要なものは表1にあるように原子力と火力の発電によるものである。

発電方式	主要な外部費用項目
原子力	○過酷事故による損失(下記6項目) ・避難及び移転 ・食物摂取制限 ・健康影響 ・除染 ・各種の固定費 ・その他
火力	○大気汚染物質放出による健康影響 ○温室効果ガス放出による気候変動影響

表1 原子力及び火力発電の主要な外部費用要因

3. 外部費用推定の方法

コンジョイント分析は、計量心理学やマーケティング調査で開発され、発展してきた個人の効用を分析する手法である。コンジョイント分析では全体効用と共に対象の属性の部分効用を評価できるという特徴がある。

代表的な手法である選択型コンジョイント分析は、アンケート調査を用いて人々に複数の属性(特徴)を持つ財を複数提示して、どれなら購入するか尋ねるものである。

本研究では、公共財としての死亡リスク削減に対するWTPを問う、すなわち、政策として死亡リスクを削減する場合にどの程度の税金の上昇を許容できるか、というシナリオ形式のアンケートを実施した。

選択型コンジョイント分析では、プロフィール j を選択した時の全体効用 U_j を表すのに、ランダム効用モデルを用いる。

$$U_j = V_j + e_j = \beta X_j + e_j$$

ここで、 V_j : 効用のうち観察可能な部分

e_j : 観察不可能な部分

X_j : プロフィール j の属性ベクトル

β : 推定されるパラメータ

ここで、誤差項がガンベル分布に従うと仮定すると、プロフィール j が選択される確率 P_j は、以下のように表すことができる。

$$P_j = \frac{\exp(V_j)}{\sum_k \exp(V_k)} \quad (k: \text{一度に提示するプロフィールの数})$$

限界WTPは、最尤法を用いてパラメータを推定した後に、以下の式のようにパラメータ行列 β の価格パラメータ β_p と、属性 x_1 のパラメータ β_{x_1} との限界代替率で示される。ここで右辺に負の符号がつくのは価格パラメータが価格に対する負の効用を反映し、負の符号を持つと考えられるからである。

$$\text{属性 } x_1 \text{ に対する限界WTP} = -\beta_{x_1} / \beta_p$$

この限界WTPを用いて、実際に想定されるリスク量について外部費用を計算することができる。

4. 実施した社会調査

まず、回答者への説明として、死亡の種類を二つに分ける。死亡Aは原子力発電所の過酷事故発生時の死亡影響にあたるものであり、死亡Bは火力発電所の平常運転による死亡影響を想定している。

死亡A : めったに発生しない死亡(大事故・大災害による)

死亡B : 毎年発生する死亡(病気による死亡)

死亡Aでは、一度の大事故によって多くの人が死亡するが大事故が起こる確率は非常に低い。死亡Bでは、毎年ほ

ほぼ同じ数の死亡者が出る。それぞれについて、コンジョイント分析のプロファイルとして用いる場合には、

- (a)死亡 A の年間発生確率
- (b)死亡 A が起きた場合の死亡者数
- (c)死亡 A によって年間あたり死亡する人数(平均値)
- (d)死亡 B によって年間あたり死亡する人数

が属性として考えられる。ただし、(c)は(a)と(b)の積で与えられるので変数ではない。これに

- (e)年間の 1 世帯あたりの税金上昇額

を加えて、本研究のコンジョイント分析に用いるプロファイル要因とした。これらのコンジョイント要因の数値的水準について検討する。

(a)死亡 A の年間発生確率については原子力発電所の過酷事故発生確率と同程度とする。また、表現としては(a)年間の大事故発生確率、とする。過去の運転実績からその確率を推定する。世界の運転実績は 14400 年・基であり、過酷事故はチェルノブイリ、スリーマイル、福島 の 3 つとして過酷事故発生確率は $3/14400 \approx 1/5000$ (年・基) となる。国内の運転実績は 694 年・基であり、過酷事故は福島 の 1 つとして過酷事故発生確率は $1/694$ (年・基) となる。これら二つの確率の両方を、回答者サンプルを分けてそれぞれにプロファイル水準のベースラインとして用いた。(1/5000, 1/500)

(b)死亡 A が起きた場合の死亡者数については、原発過酷事故が発生した場合に原発 1 基あたりの死亡者数と同程度とする。原発 1 基の被害が及ぶ範囲はおおよそ 100 万人程度(面積としては都道府県 1 つ程度)を対象と仮定する。よって表現として (b)大事故が起きた場合の回答者の周囲 100 万人における死亡者数 と改める。その数値に関しては、谷口・尾本の PSAM (確率的安全性評価・管理) 第 5 回国際会議発表論文^[1](2000 年)においてシミュレーションされており、おおよそ 4000 人程度である。この数値は、原子力発電所の 1 回の事故がもたらす、事故から 100 年内の死亡者数で、放射性物質が環境中に長期間残ることによる次世代への影響も含んでいる。

(d)死亡 B によって年間あたり死亡する人数 については火力発電所から放出される有害物質の影響によって一年間に死亡する人数と同程度とする。この数値に関しては富士総研研究所の社内研究においてシミュレーションされており、全国でおおよそ 600 人程度と推定されている。よって、(a)と同じように火力発電所 1 基あたりの被害範囲の中での 1 年間の死亡者数に換算すると、おおよそ 6(人/年・基)程度となる。表現としては (d)死亡 B による、回答者の周囲 100 万人の中での死亡者数 とする。

(e)年間の 1 世帯あたりの税金上昇額 については、現実の想定とかけ離れた値を用いて WTP を推定したところで

現実の外部費用評価に生かすことができないため、一世帯が負担してもよいと予想されるベースラインの幅で設定する(400 円~15000 円)。この幅に関して、(a)と同じように回答者のサンプルを分けて、税金上昇額の大きいグループと小さいグループで差異が生じるかを調査する。

項目		福島原発事故以前の状況	数値のもとになった資料、研究	
原子力	大事故時の影響	(a)年間の大事故発生確率	5000 分の 1 / 500 分の 1	世界及び国内の運転実績
		(b)大事故が発生したとき、あなたを含む 100 万人での死亡者数	4000 人	谷口・尾本 2000 年 PSAM 第 5 回国際会議発表論文
		(c)1 年あたりの死亡者数 (b)×(a)の計算をした結果	0.8 人	
火力	平常運転時の影響	(d)あなたを含む 100 万人での 1 年あたりの死亡者数	6 人	富士総研 研究所社内研究結果
世帯あたりの年間税金上昇額		400 円~15000 円	-	

表 2 コンジョイント分析のプロファイル水準

先述した通り、(a)年間の大事故発生確率と(e)年間の 1 世帯あたりの税金上昇額についてはそれぞれのプロファイルに用いる数値に不確実性が高いため、回答サンプルを分けて、それぞれのサンプルのコンジョイント質問の(a)及び(e)に、違った数値をおくことでサンプルごとに違いが出るかを調査する。また、コンジョイント質問において、“発電”というキーワードを入れて説明するか否かによっても違いを調査した。よってサンプルは全部で 8 種類に分けられ、それぞれを Leg1、Leg2、・・・Leg8 とした。それぞれの違いは以下。

leg	発電ラベル	ベースライン	
		(a)大事故発生確率	(e)世帯当たり年間税金上昇額
1	無	5000 分の 1	4000~15000 円
2		5000 分の 1	400~1500 円
3		500 分の 1	4000~15000 円
4		500 分の 1	400~1500 円
5	有	5000 分の 1	4000~15000 円
6		5000 分の 1	400~1500 円
7		500 分の 1	4000~15000 円
8		500 分の 1	400~1500 円

表 3 コンジョイント質問の Leg による違い

調査は web アンケートによって実施した。調査期間は 2013 年 1 月 18 日～22 日の 5 日間であり、合計 4578 の回答が得られた。それらに対して 2 種類のスクリーニングを行ってサンプルを精査した。(1)練習問題などで明らかに回答者にとって不利な回答を続けて選んだ回答者、(2)コンジョイント質問の回答理由が妥当でなく効果を考慮せず、倫理的な理由だけで回答を行っていた回答者、である。結果として、有効サンプルは 3067(67.0%)となった。

5. 分析

死亡リスク削減に対する WTP の推定のために、2 つの分析モデルを用いる。

①効用関数の説明変数が 3 つとする場合 (外部費用を VSL※を用いて計算するのに用いる)

$$U = V_Cost \cdot Cost + V_NL \cdot NL + V_FL \cdot FL$$

V_X: 各項目 (ここでは X で代表) の係数

NL: 原子力発電所の 1 年あたりの死亡者数 (期待値)

FL: 火力発電所の 1 年あたりの死亡者数

Cost: 税金の上昇額

②効用関数の説明変数が 4 つとする場合 (各コンジョイント要因の特性を分析する場合に用いる)

$$U = V_Cost \cdot Cost + V_P \cdot P + V_L \cdot L + V_FL \cdot FL$$

P: 原子力発電所の大事故発生確率

L: 原子力発電所事故が発生した場合の死亡者数

※VSL(Value of Statistical Life:統計的生命の価値)とは数多くの個人の選好を基に、ある量の死亡リスク削減に対する社会の代表的な支払意思額(Willingness to Pay:WTP)を算出し、死亡リスク削減量で除したものである。

分析から推定されたパラメータ及び限界 WTP は右図。

変数		leg1	leg2	leg3	leg4	
ラベル無し	Cost	-0.00018 -5.36	-0.00131 -4.20	-0.00016 -5.14	-0.00143 -4.25	
	原子力	NL	-1.478 -3.04	-1.736 -3.56	-0.150 -3.22	-0.257 -4.89
		限界 WTP(円/人)	8386.2	1326.2	914.2	179.4
	火力	FL	-0.164 -3.19	-0.196 -3.66	-0.116 -2.38	-0.152 -2.92
		限界 WTP(円/人)	932.5	149.6	706.4	106.0
	対数尤度	-1195.80	-1116.08	-1292.38	-1170.06	
Rho 2 乗	0.05485	0.04036	0.04795	0.06050		

変数		leg5	leg6	leg7	leg8	
ラベル有り	Cost	-0.00013 -3.76	-0.00150 -4.11	-0.00013 -3.55	-0.00142 -3.81	
	原子力	NL	-2.671 -4.85	-3.938 -6.40	-0.285 -4.98	-0.399 -6.59
		限界 WTP(円/人)	19835.6	2629.5	2127.7	281.3
	火力	FL	-0.00856 -0.18	-0.1295 -2.27	-0.00445 -0.091	-0.06804 -1.23
		限界 WTP(円/人)	63.6	86.4	33.3	47.9
	対数尤度	-1214.05	-1064.38	-1177.64	-1108.31	
Rho 2 乗	0.05276	0.13228	0.05970	0.13107		

変数		leg1	leg2	leg3	leg4	
ラベル無し	Cost	-0.00018 -4.99	-0.00135 -3.67	-0.00016 -4.67	-0.00142 -3.59	
	死亡 A	P	-8703.64 -3.77	-9747.35 -5.30	-739.96 -3.38	-1063.36 -5.87
		L	0.00013 1.60	0.00014 1.55	0.00009 1.13	0.00006 0.66
	死亡 B	FL	-0.203 -3.64	-0.260 -3.79	-0.157 -2.96	-0.265 -3.61
		対数尤度	-1184.61	-1098.73	-1288.45	-1165.17
	Rho 2 乗	0.06369	0.05528	0.05084	0.06443	

変数		leg5	leg6	leg7	leg8	
ラベル有り	Cost	-0.00015 -3.82	-0.00158 -2.98	-0.00014 -3.39	-0.00142 -2.83	
	原子力	P	-11146.56 -5.82	-14260.32 -6.96	-1160.02 -5.98	-1375.17 -7.05
		L	0.02989 0.34016	-0.03255 -0.27272	0.04829 -1.44572	-0.04045 -0.36589
	火力	FL	-0.00013 -2.05	-0.00035 -3.19	-0.00013 -1.86	-0.00027 -2.74
		対数尤度	-1203.14	-1061.52	-1169.86	-1112.89
	Rho 2 乗	0.06127	0.13461	0.06592	0.12747	

表 5(上)6(下) モデル①(上)、②(下)を用いた
多項ロジット分析(注) 斜字体表示は T 値

表 4 実際に調査で用いたコンジョイント質問例

(1) 現状のまま維持、対策 1、対策 2 のうち、あなたはどれを選びますか。

項目	現状	対策 1	対策 2	
「死亡 A」の各項目	(a)年間の大事故発生確率	5000 分の 1 (事故確率は 5000 年に 1 回程度)	10000 分の 1 (事故確率は 10000 年に 1 回程度に減少)	8000 分の 1 (事故確率は 8000 年に 1 回程度に減少)
	(b) 大事故が発生したとき、あなたを含む 100 万人での死亡者数	4000 人 (100 万人のうち 4000 人が死亡)	4000 人 (100 万人あたりの死亡者は現状と同じ)	3000 人 (100 万人あたりの死亡者が 1000 人減少)
死亡 A	(c)一年あたりの死亡者数 (a)×(b)=(c)の計算をした結果	0.8 人 (平均すると 1 年あたりでは 100 万人中 0.8 人の死亡)	0.4 人 (100 万人あたりの死亡者が平均で 0.4 人減少)	0.38 人 (100 万人あたりの死亡者が平均で 0.42 人減少)
死亡 B	(d)あなたを含む 100 万人における毎年の死亡者数	6 人 (平均で毎年 100 万人中 6 人が死亡)	4 人 (100 万人あたりの死亡者が平均で 2 人減少)	2 人 (100 万人あたりの死亡者が平均で 4 人減少)
1 年あたりの死亡者数削減の合計		—	100 万人あたり 2.4 人削減	100 万人あたり 4.42 人削減
世帯あたりの年間の税金の上昇 (新たな対策のための費用)		1 年あたり 0 円	1 年あたり 8000 円	1 年あたり 15000 円
あなたが支持するものに○をつけてください				

これらに関して示唆されることは以下の3つである。

- A. 3変数・4変数ともにベースラインの違いがパラメータの推定に大きく影響した。本来であれば回答者がベースラインの違いをしっかりと把握することで、回答傾向に違いが生じ、それによってパラメータは同程度の数値となる。しかし、今回のケースでは回答者が原発事故のような微小確率についてその数値の小ささをしっかりと把握できていない、もしくはコストの上昇額について並列された3つのプロファイルの中での比較しかしていないと考えられる。
- B. 4変数のモデルにおいて、(a)大事故発生確率、及び(d)火力発電による死亡のような毎年発生する死亡人数の削減には有意にパラメータが推定される一方で、(b)大事故が起きた場合の死亡者数の削減に対するパラメータは有意ではなかった。これは、福島原発事故においても現在のところ被曝による死亡者は認められていないため、原発事故による死亡について回答者がうまく認識できなかったことが原因かと考えられる。

C. ゼロリスクの選好及び発電ラベルによる回答傾向の違いについては有意な結果が得られなかった。

6. 外部費用の計算

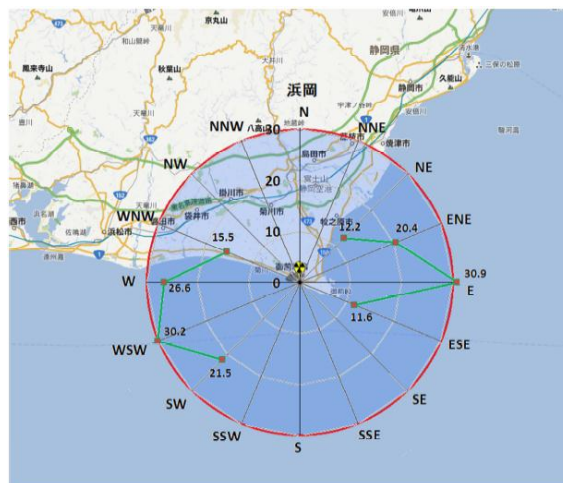
二つの観点から外部費用の推定を行う。一つ目は浜岡原子力発電所をモデルプラントとして、浜岡原子力発電所において過酷事故が発生したと想定した場合の経済損失について検討する方法である。先の分析においてVSLを推定しているが、これは単位人あたりの生命の価値を表す指標であり、同時に一死亡当たりの経済損失を表している指標である。VSLを用いて、原子力発電所の過酷事故発生時の外部費用を計算する式は

$$\Sigma(\text{事故発生原発の周辺住民の被曝線量} \times \text{被曝線量当たりの死亡増加率}) \times \text{VSL}$$

となる。VSLは、モデル①による分析の発電のラベルがある場合のLeg5からLeg8において、Rho2乗値のあてはまりがよく、唯一全てのパラメータが有意に推定されているLeg6の値を採用する。その値は原子力発電所の過酷事故に用いる場合 1.02×10^9 (円/人)となっている。

被曝線量当たりの死亡増加率についてはICRP(国際放射線防護委員会)発行の1990年勧告^[2]に記載されている全年齢平均の 5.2×10^{-2} (/Sv)を用いた。周辺住民の被曝線量は原子力規制委員会の拡散シミュレーション結果^[3]から推定した。その結果、浜岡原発における過酷事故の死亡者の死亡者は3730.7人となり、その削減に対する外部費用はVSLを乗じて3.81兆円となった。これを浜岡原発の年間総発電量と耐用年数で除することで原発過酷事故による死亡者の削減のために人々が許容しうる電気料金の上乗せ発電単価が6.34(円/kWh)と算出される。この数値は多くの仮定のもとに成り立っており実際より大きな値であると考えら

れる。



サイト出力に対応した放射性物質質量を仮定した計算

図7(上)浜岡原発で過酷事故が起きた場合の放射線拡散量を示すハザードマップ

次に、原発事故確率を0にする場合の外部費用を計算する。この際、限界WTPの数値は先ほどと同様、あてはまりのよいleg6の数値を用いる。原発事故のような過酷事故の発生確率を1(つまり100%から0%へ)下げるのに支払ってもよいと考えられるWTPは世帯あたり9049531円である。現在の我が国の運転実績として原発事故の発生確率は全国でみて1/692であるので^[4]、原発事故確率を1/692削減することに対する1世帯あたりのWTPは $9049531 \times 1/694 = 13040$ 円である。この数値に日本全国の世帯数をかけて、福島原発事故前の原子力の全国の年間発電量で除すると、原子力発電を福島原発事故以前の水準に戻す場合の、全国規模での原発事故削減に対する外部費用を発電単価に内部化する場合の上乗せ電気料金が計算できる。その値は2.12円/kWhである。

7. 結論

本研究ではコンジョイント分析を通じて原子力発電によって引き起こされる死亡リスクあるいは事故リスクを発電単価に内部化した。原発事故による死亡者を0にする場合の発電単価の上昇許容額は6.65(円/kWh)となった。原子力発電の稼働を維持しながら原発事故の発生確率を0にする場合の発電単価の上昇許容額は2.12円/kWhとなった。この数値を用いて平均的な原発1基に利用できる「事故確率削減のための対策費用」を計算すると4000億円となる。これだけの金額を用いて、十分に効果の見込める事故対策を行うことは決して不可能ではないと思われる。

参考文献

- [1]Taniguchi, T. and A. Omoto; Public Health Risks of Nuclear and Fossil Power Plants in Japan, PSAM(確率的安全性評価・管理)第5回国際会議発表論文,(2000)
- [2]ICRP1990年勧告(1990)
- [3]原子力規制委員会,拡散シミュレーション結果(2012)