2013年11月1日
「越境大気汚染への挑戦2013 – 国際協調による取組に向けて –」

東アジアの大気汚染によって影響を受けている私たちの健康

(成果報告③)

山下　研
（日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター)

Source:Uchiyama

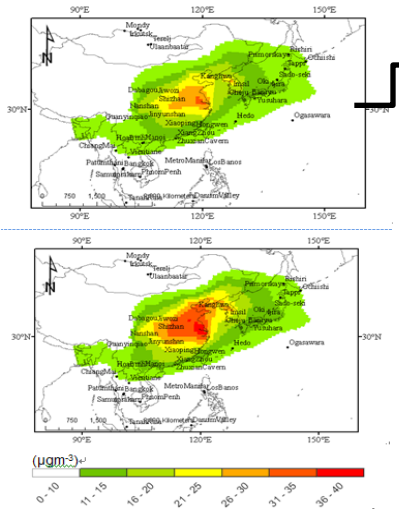
Source: 共同

今日のお話の内容

- PM2.5とオゾンによる人の健康影響評価
- 健康リスクの経済評価 – 改善のための費用と便益(費用･便益分析)
- 作物影響の経済評価
- 国際協調による大気環境改善

PM2.5とオゾンによる人の健康影響評価

早期死亡率の推定フロー



気象データ(RAMS)、排出インベントリ(REAS)

輸送モデル(CMAQ)

汚染物質濃度: O_3, $PM_{2.5}(SO_4^{2-}+NH_4^{+}+NO_3^{-}+EC+OC)$

濃度範囲の計算
O_3: 8-hr max. > 35 ppb
PM2.5: 年平均値 > 10μg/m^3

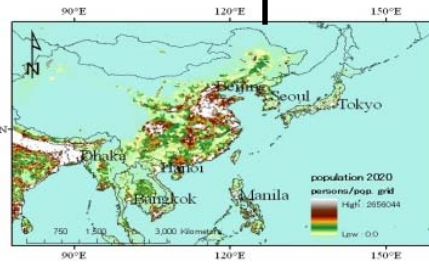
人口分布: GPWv3

30歳以上の割合
基礎死亡率

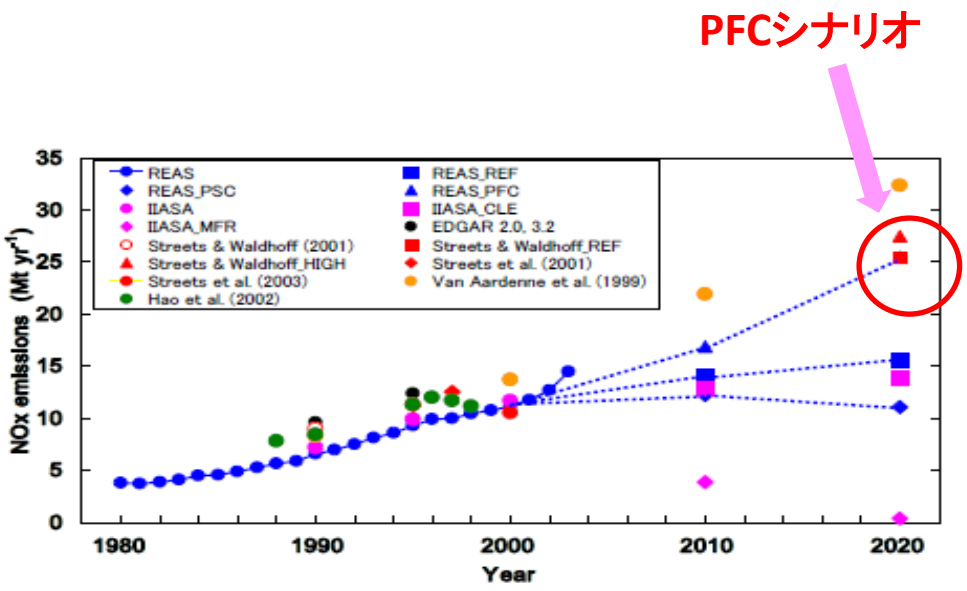
相対リスク(RR)

GISシステム: 式(1), (2)

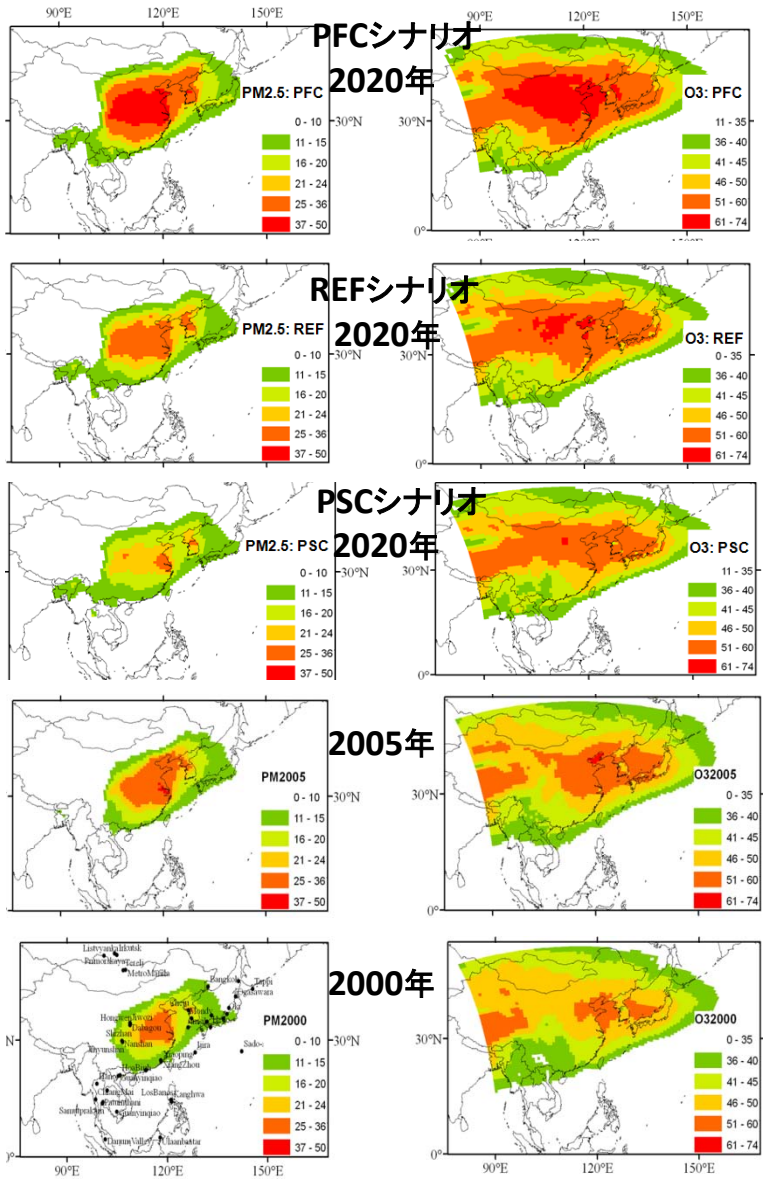
早期死亡の分布



CMAQ/REAS



(Source: Ohara)



CMAQ:

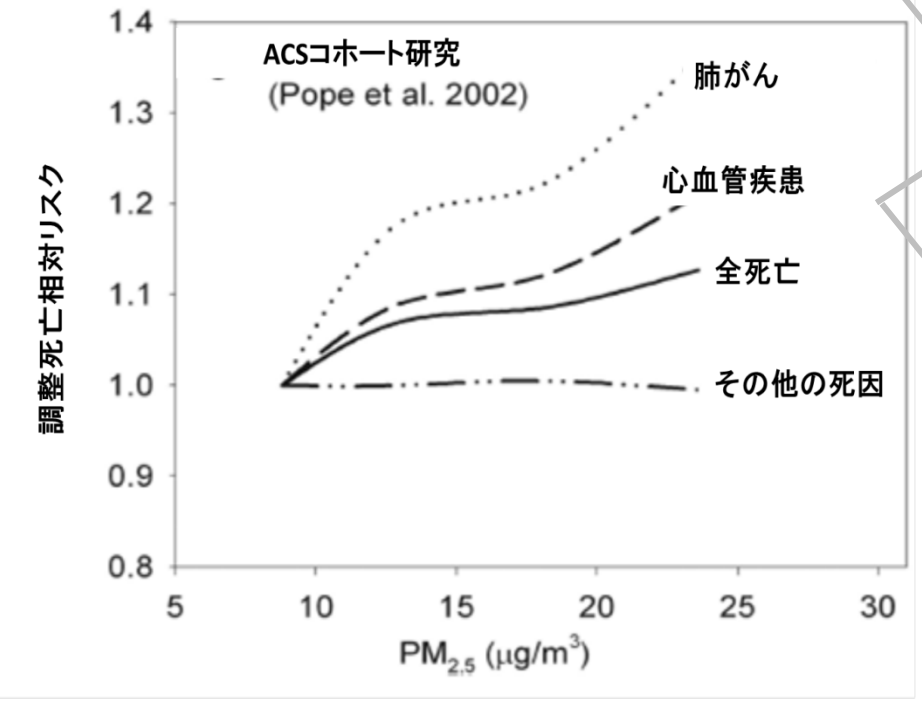
- 対象領域: 6,240 × 5,440 (km)

- グリッド: 80 km × 80 km x 150 m(高さ)

オゾン

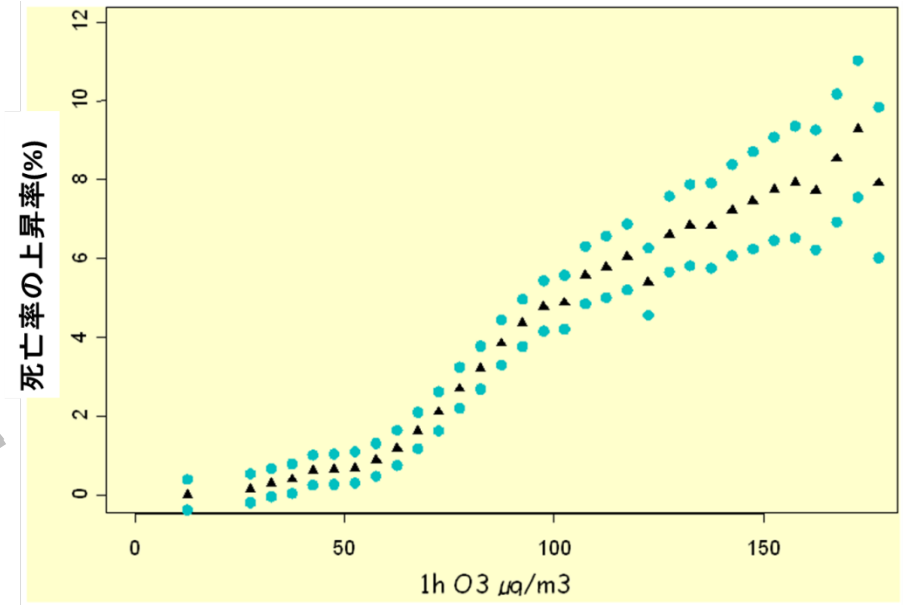
$PM_{2.5}$

細気管支、肺胞レベルで影響
(呼吸器系、循環器系)



PM2.5濃度と相対リスク(Pope and Dockery, 2006より筆者作成)

炎症性変化(呼吸器系に影響)



夏のオゾン(日最高1時間値)の暴露-反応と日死亡数(平均遅延0-1日)。●は95%信頼区間。データはAPHEA2研究の欧州23都市(Gryparis et al., 2004)。

オゾン濃度と死亡率(WHO, 2008より筆者作成)

暴露と早期死亡率の解析

- $PM_{2.5}$ > 10μg/m^3 (年平均値)で解析

  ⇒長期的(慢性)影響(年単位)

- O_3 > 35 ppb (日8時間平均値の最大値)で解析

  ・・・SOMO35

  ⇒短期的(急性)影響の積み重ね(年単位)

PM2.5: 暴露と早期死亡率の解析

$$mortality_{PM2.5} = pop M_b \beta_{PM2.5} \Delta PM2.5 \cdots (1)$$

$$\beta = \ln(RR)/\Delta C$$

pop:暴露人口、Mb:基礎死亡率、RR:相対リスク、ΔC:濃度変化

- 30歳以上の年齢グループに対して、PM2.5の年平均値濃度が10μgm^{-3} 以上が対象

- 7.5 から 30μgm^{-3} までの範囲で、PM2.5が10μgm^{-3} 上昇すると、30歳以上の年齢のグループの死亡率が4%上昇し、(95% CI: 1.01-1.08) 、その時のβは約 0.004 (Pope III et al., 2002)
- △PM2.5は、10μgm^{-3} 以上の年間平均値濃度の変化
- 本研究では30μgm^{-3} 以上の年平均値に対しても同じ値を使用。Cohen et al., (2005)がPM2.5のCR関数をより広い範囲に適用するために直線で外装した方法と同様。

オゾン: 暴露と早期死亡率の分析

$$mortality_{O3} = Y_o\{1-\exp[-\beta_{O3}\Delta O_3]\} \cdots (2)$$

$$\beta = \ln(RR)/\Delta C$$

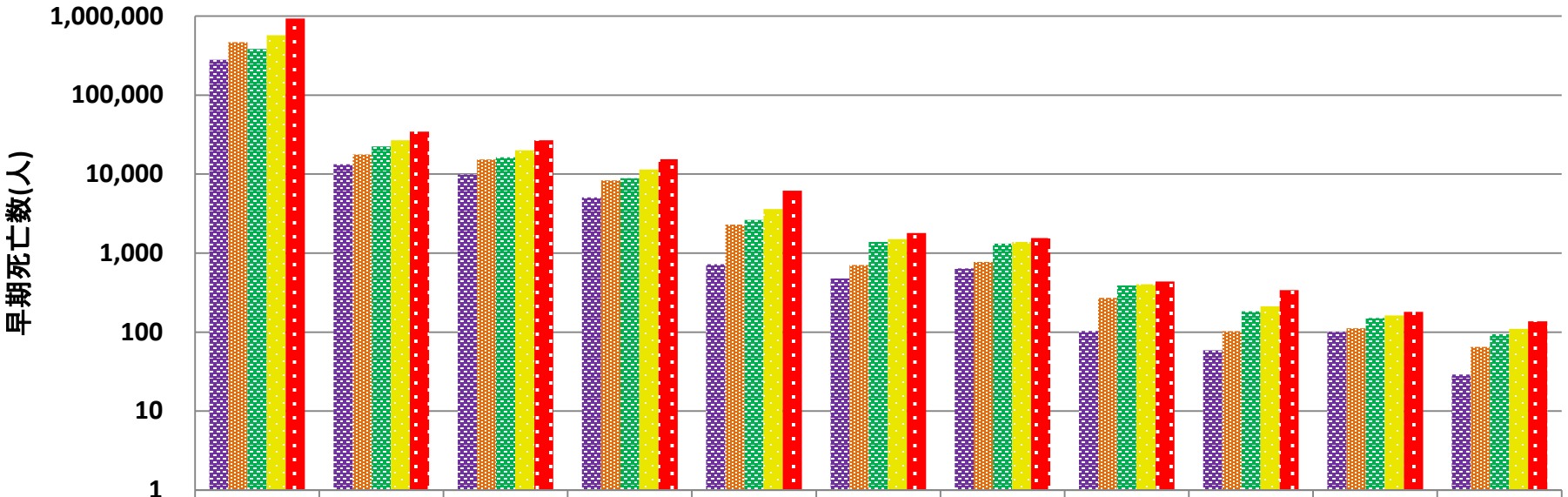
SOMO35=[日8時間平均値の最大値 – 35(ppb)]

- *n:* 計算対象日数 、Yo : 明確な健康影響が起きないあるオゾン濃度レベルでの早期死亡率の日発生率
- 本研究での推定は、30歳以上の人口にこの年齢グループのベースライン日死亡率を掛けて得られた。
- *β: RR*値 1.003 は、約 0.0003に相当(USEPA, 2006)

東アジア地域の人口統計

	2000年	2005年	2015年	2020年
総人口 (千人)	1,472,443	1,520,717	2,227,350	2,236,705
30歳以上人口(千人)	748,632	838,554	1,403,231	1,409,124
30歳以上の人口割合 (%)	50.8	55.1	63	63
全死亡数 (千人)	10,063	10,063	*	*
基礎死亡率	0.0068	0.0066	*	*
30歳以上の基礎死亡率	0.0103	0.0102	(0.0102)	(0.0102)

東アジアの国々の早期死亡の推定
- $PM_{2.5}$とオゾン影響 -



	中国	韓国	日本	北朝鮮	ベトナム	タイ	ミャンマー	フィリピン	ラオス	モンゴル	カンボジア
2000年	281,000	13,300	9,890	5,070	722	480	638	103	59	101	29
2005年	467,000	17,800	15,300	8,350	2,290	704	773	271	102	112	65
2020年 (PSC)	384,000	22,500	16,300	8,880	2,630	1,380	1,320	389	183	151	94
2020年 (REF)	571,000	26,800	20,000	11,400	3,600	1,500	1,380	403	213	162	110
2020年 (PFC)	935,000	34,400	26,900	15,500	6,170	1,790	1,550	437	340	180	137

東アジアの健康リスク評価に関する他の研究

- Saikawa et al. (2009)
  ⇒中国で$PM_{2.5}$により50万人の早期死亡(2000年)
- WHOのPMによる健康リスク研究: Risk of Health Study on PM by WHO
  ⇒西太平洋准地域で、大気汚染により37万5千人の死亡(2000年)
- Anenberg et al (2010)
  ⇒アジア地域全体で、O_3、$PM_{2.5}$により248万人の早期死亡(2000年)
- OECD “Environmental Outlook to 2050” (2012)
  ⇒2020年の中国の早期死亡($PM_{2.5}$, O_3)・・・合計約68万人
- 北京大学公共卫生学院、「危险的呼吸」(2012)
  ⇒北京、上海、広州、西安の$PM_{2.5}$早期死亡数・・・計8,571人(2012年)
- West et al. (2013)
  ⇒温室効果ガス削減の2つのシナリオ間での$PM_{2.5}$の早期死亡の削減数
  ・・・世界で49万人、中国で33万人(2030年)
- Chen et al.(2013)
  ⇒中国淮河北部は南部に比べて平均余命が5年短い

不確実性

この研究におけるリスク評価に使用した$PM_{2.5}$とオゾンへの暴露による早期死亡は、他の研究と同程度以下

- *CMAQ/REAS モデルによる地表オゾンと$PM_{2.5}$濃度:*
  - オゾン濃度(遠隔地、都市域)の再現性
  - $PM_{2.5}$(東南アジア)の再現性
- *人口分布:*
  - 内挿法、調査実施年、推定法、正確性、境界(CIESIN, 2005)
- *基準死亡率:*
  - 2000年と2020年で東アジアの基準死亡率は一定と仮定
- *$PM_{2.5}$ とオゾンのRR値:*
  - オゾンとPMの相乗効果
  - 人種間の差異
  - 東アジアにおける少ない疫学研究(例：バンコク、香港、上海、武漢(HEI, 2008))

健康リスクの経済評価

- 改善のための費用と便益(費用･便益分析) -

早期死亡(Premature Mortality)と損失余命(YLL)の意味

- **死亡統計(Mortality statistics)**
  - 国の保健統計の結果
  - 死亡の時間的変化(意味/価値)を示すことができない(若い年齢、高齢者グループの違いに対して)
- **早期死亡(Premature Mortality)**
  - 若い年齢グループの死亡傾向に、高齢者グループよりも重みを付けることによって死亡の時間的変化(意味/価値)を反映

[YLL計算の例]:

- 70歳のグループ1の100人の死亡
- 30歳のグループ2の20人の死亡
- 死亡総数=120人(死亡の時間的変化に関する概念がない)
- 平均寿命が75歳と仮定すると:

  グループ1の損失余命(YLL) = 100 × (75-70) = 500 年・人

  グループ2の損失余命(YLL) = 20 × (75-30) = 900 年・人

確率的生命の価値評価

Value of a Statistical Life (VSL)

確率的生命の価値⇐異なる⇒個別の損害補償額

確率的生命価値=リスク削減幅(ΔR)に対する支払い意志額÷リスク削減幅(ΔR)

1. 顕示選好法:間接的市場

   賃金リスク法(ヘドニック賃金法)

2. 表明選好法:仮想的市場

   仮想評価法(CVM): 支払意思額(WTP: willingness to pay)

   受入補償額(WTA: willingness to accept)

3. 人的資本法(**human capital approach**):実際の市場

   損失余命における賃金から計算

確率的生命の価値(VSL): 米国環境規制庁

VSL: 740万USドル (2006年)・・・1990年 収入レベル

890万USドル (2006年)・・・2010年 収入レベル

(26の賃金-リスク法とCVM研究に基づく数値)

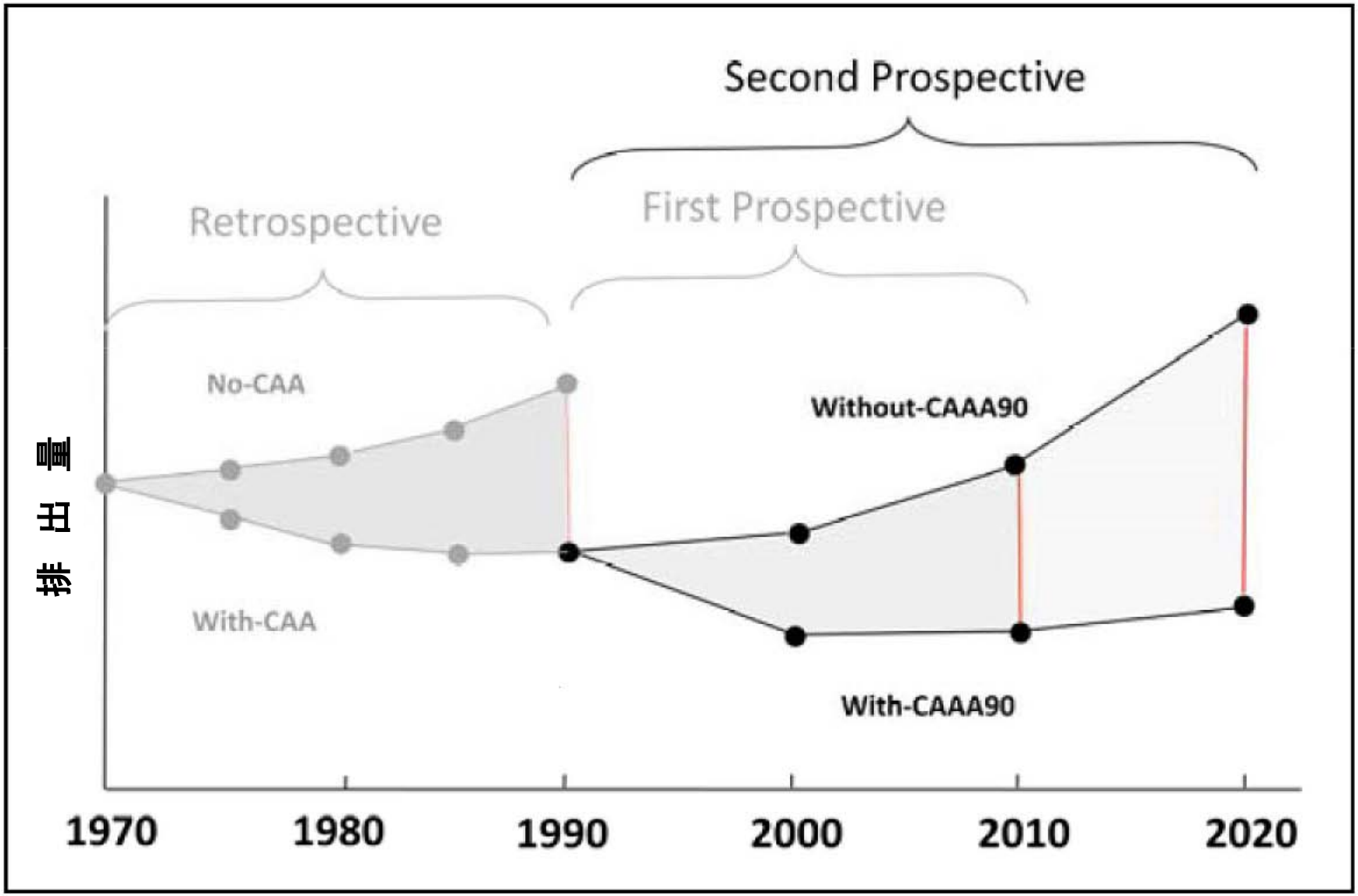
Health Effect Reductions (PM2.5 & Ozone Only)	Pollutant(s)	Year 2010	Year 2020
PM2.5 Adult Mortality	PM	160,000	230,000
PM2.5 Infant Mortality	PM	230	280
Ozone Mortality	Ozone	4,300	7,100
Chronic Bronchitis	PM	54,000	75,000
Acute Bronchitis	PM	130,000	180,000
Acute Myocardial Infarction	PM	130,000	200,000
Asthma Exacerbation	PM	1,700,000	2,400,000
Hospital Admissions	PM, Ozone	86,000	135,000
Emergency Room Visits	PM, Ozone	86,000	120,000
Restricted Activity Days	PM, Ozone	84,000,000	110,000,000
School Loss Days	Ozone	3,200,000	5,400,000
Lost Work Days	PM	13,000,000	17,000,000

改正大気清浄法(1990年)がなかった場合と実施されてきた場合とのPM2.5とオゾンの主要な健康影響の2010年と2020年での差異

※VSLの値は研究によって異なる
例：180万USドル
(欧州)

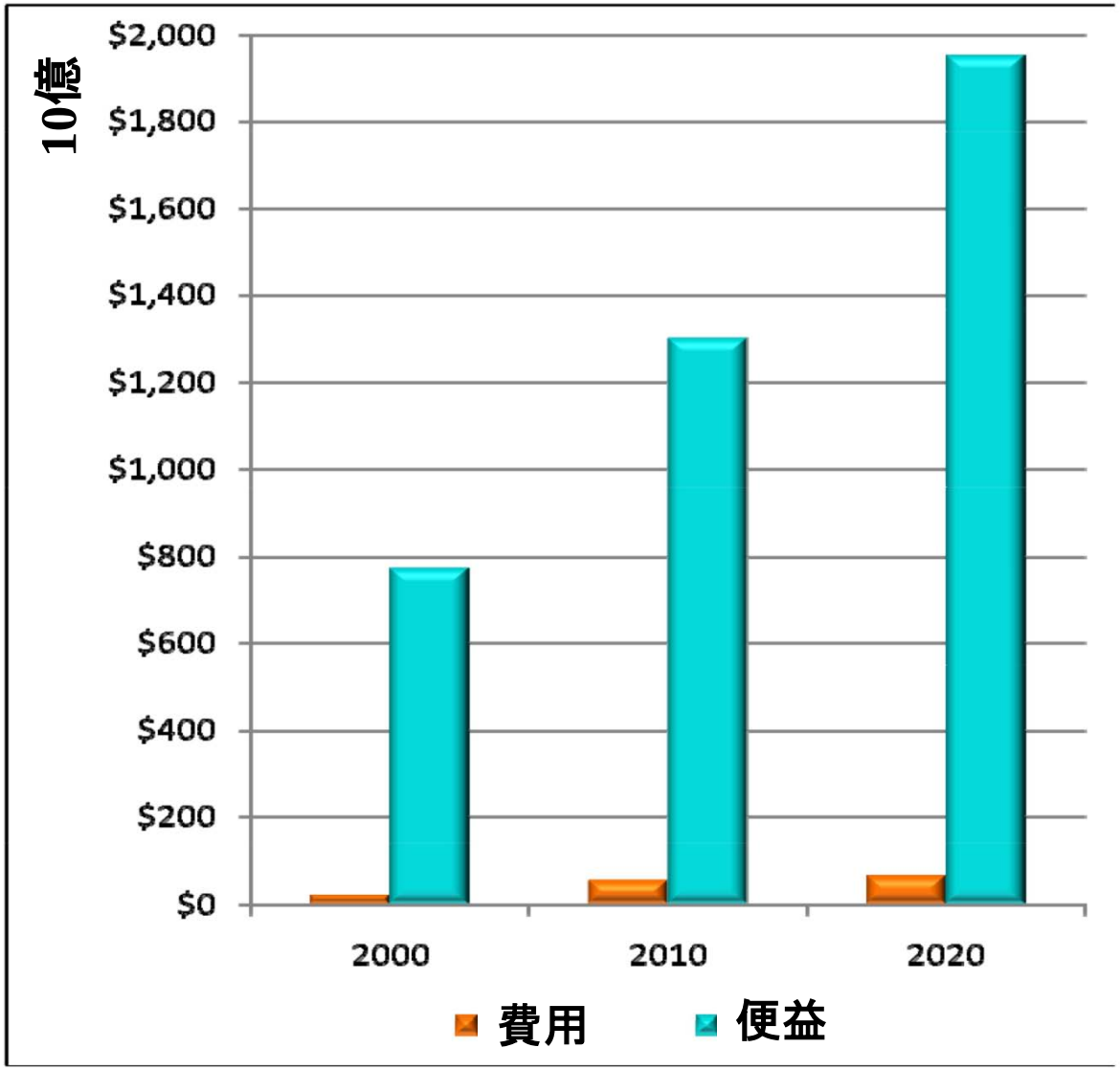
(source: USEPA, 2011)

1990年 米国改正大気清浄法 (CAAA90)



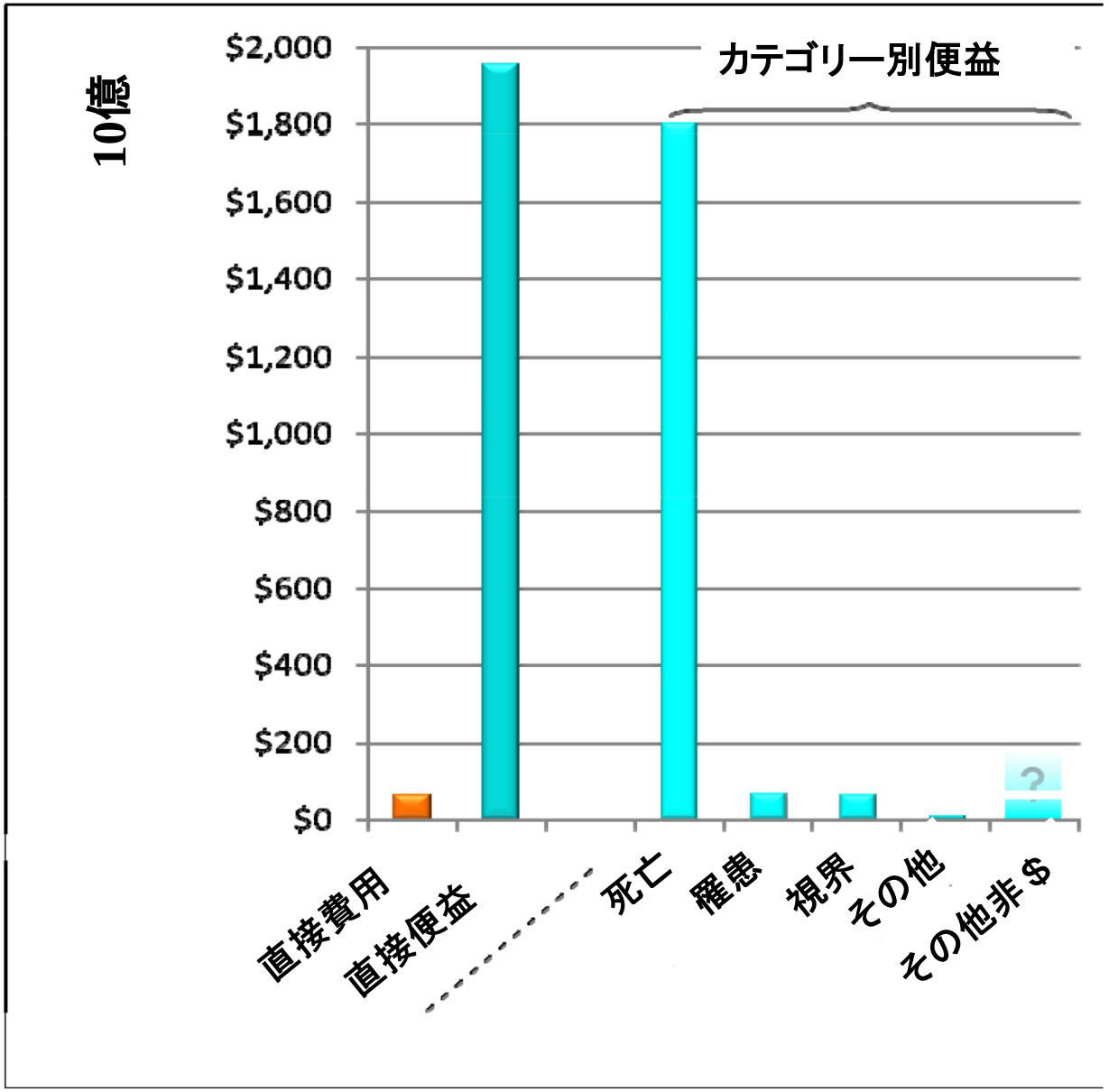
(USEPA, 2011)

2000, 2010, 2020年の直接便益と費用の主要中央推定値



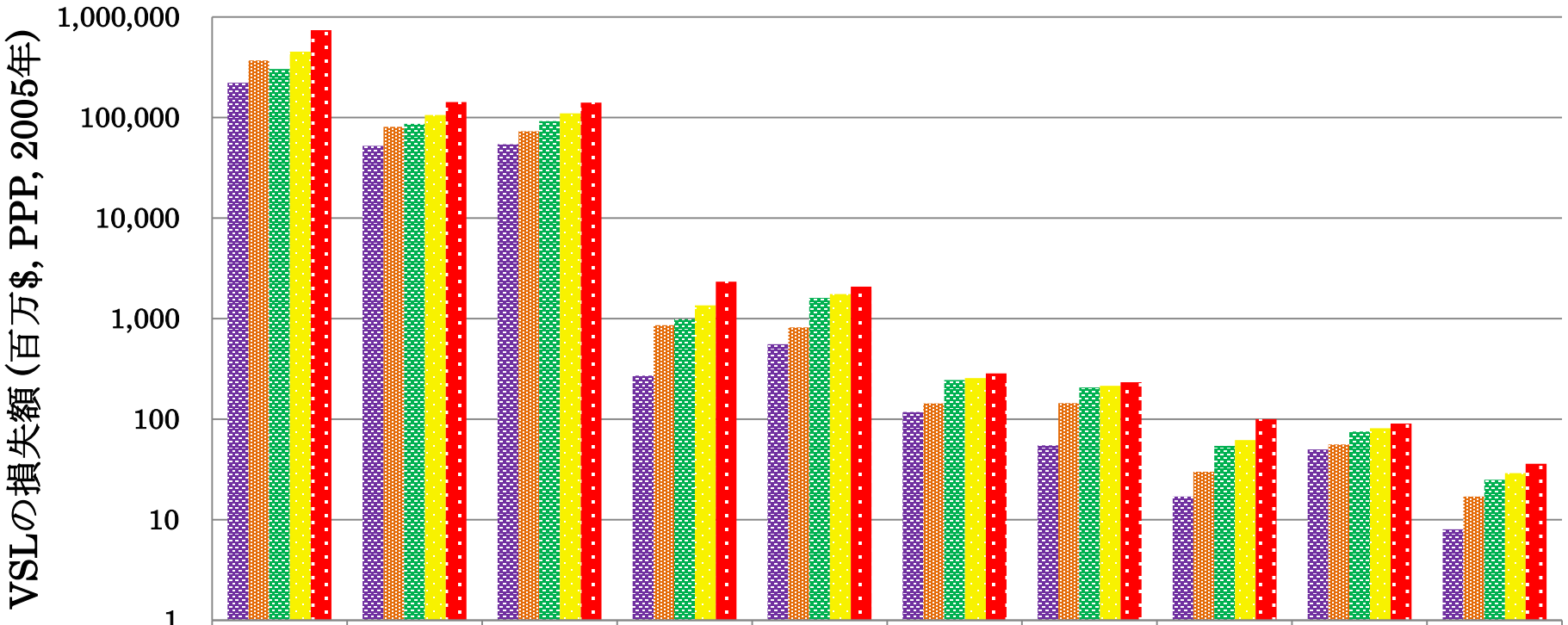
(USEPA, 2011)

2020年の直接便益と費用の主要中央推定値



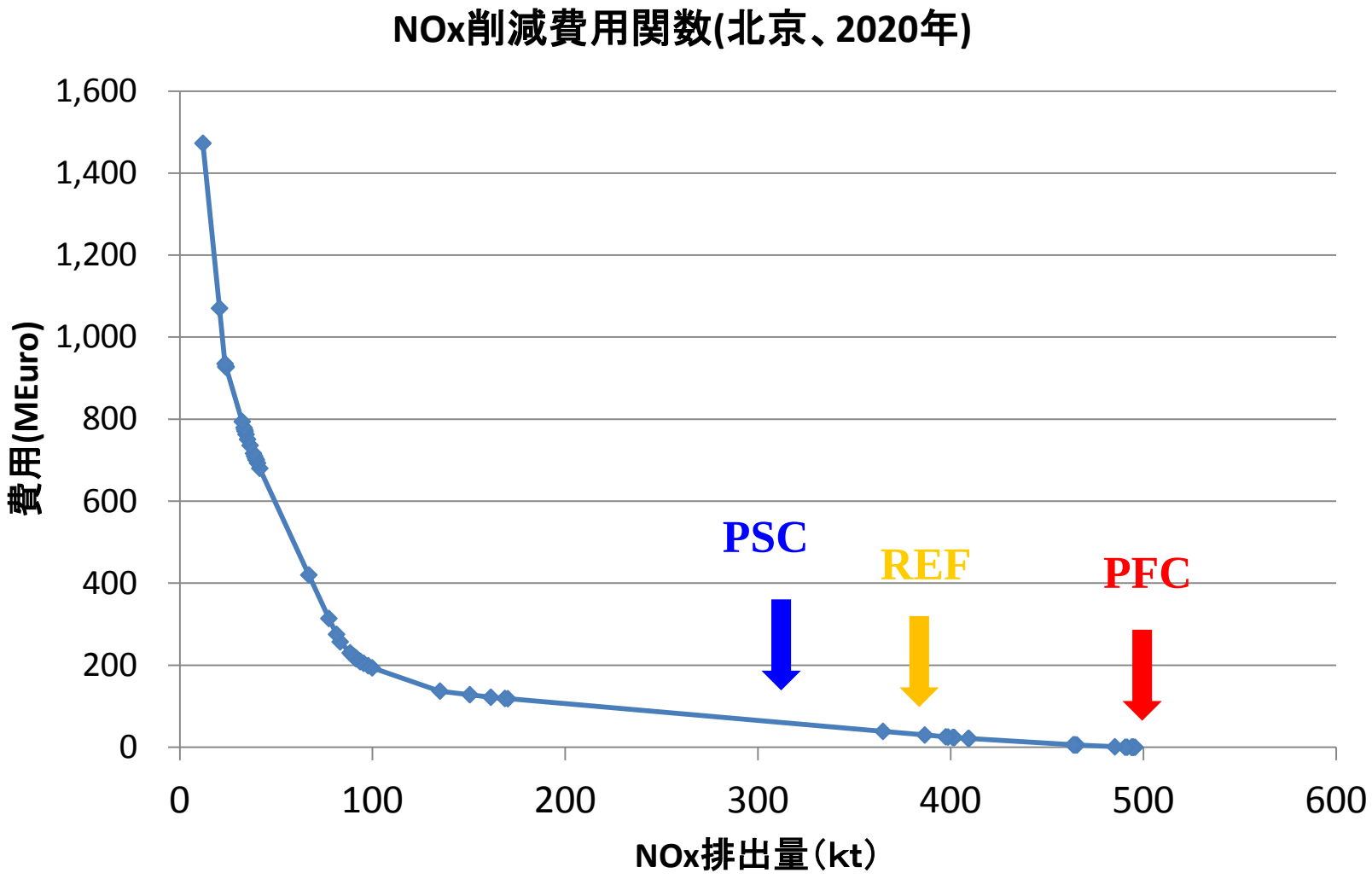
(USEPA, 2011)

$PM_{2.5}$とオゾンの暴露に伴う各国の早期死亡による確率的生命価値(VSL)の損失額

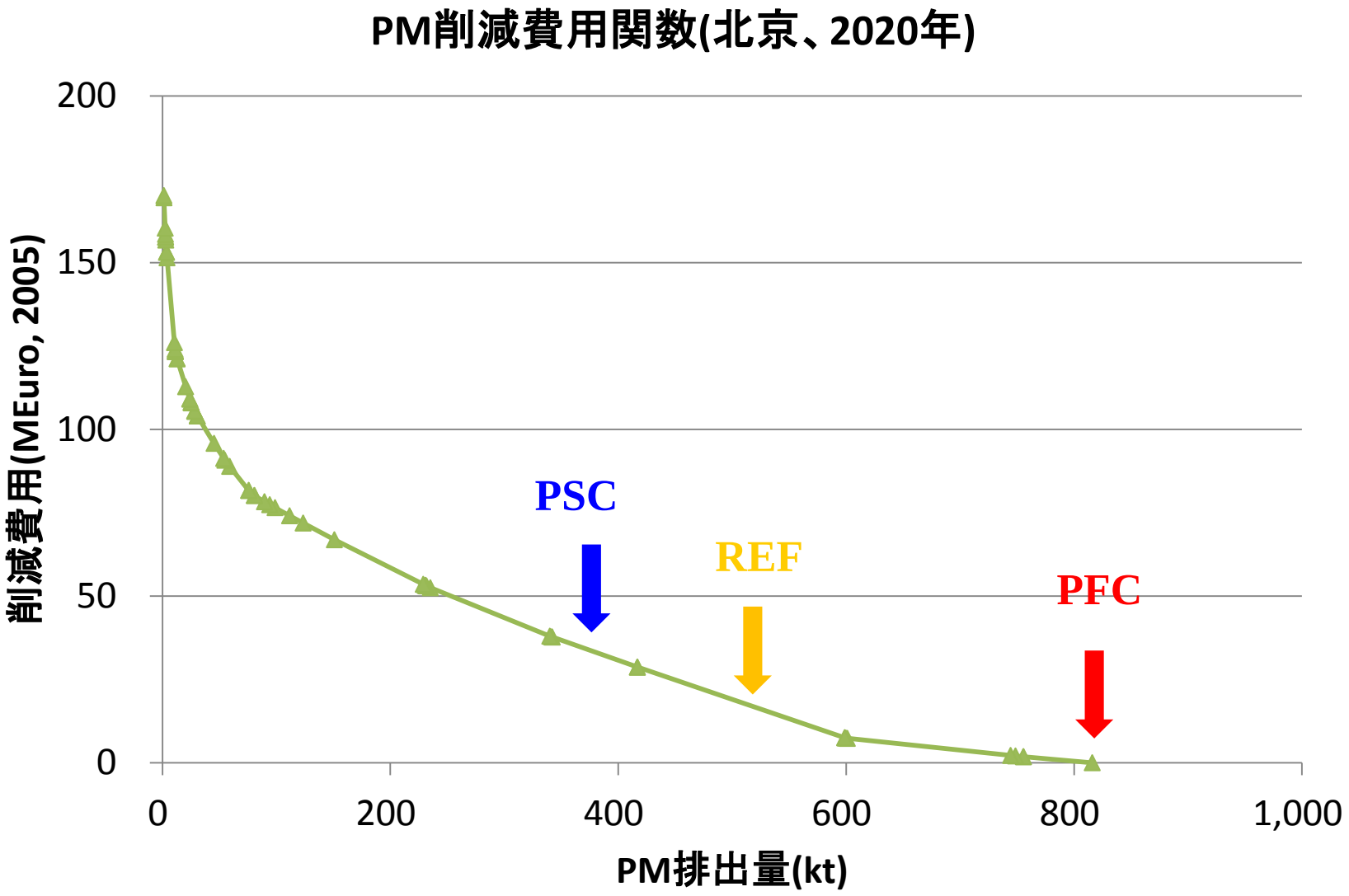


	中国	日本	韓国	ベトナム	タイ	ミャンマー	フィリピン	ラオス	モンゴル	カンボジア
2000年	221,000	52,300	54,100	271	557	118	55	17	50	8
2005年	368,000	80,800	72,700	861	817	143	144	30	56	17
2020年(PSC)	303,000	86,200	92,000	986	1,600	245	206	54	75	25
2020年(REF)	450,000	106,000	110,000	1,350	1,750	256	214	62	81	29
2020年(PFC)	737,000	142,000	140,000	2,320	2,080	285	232	100	90	36

GAINS-Chinaの費用関数(NOx)



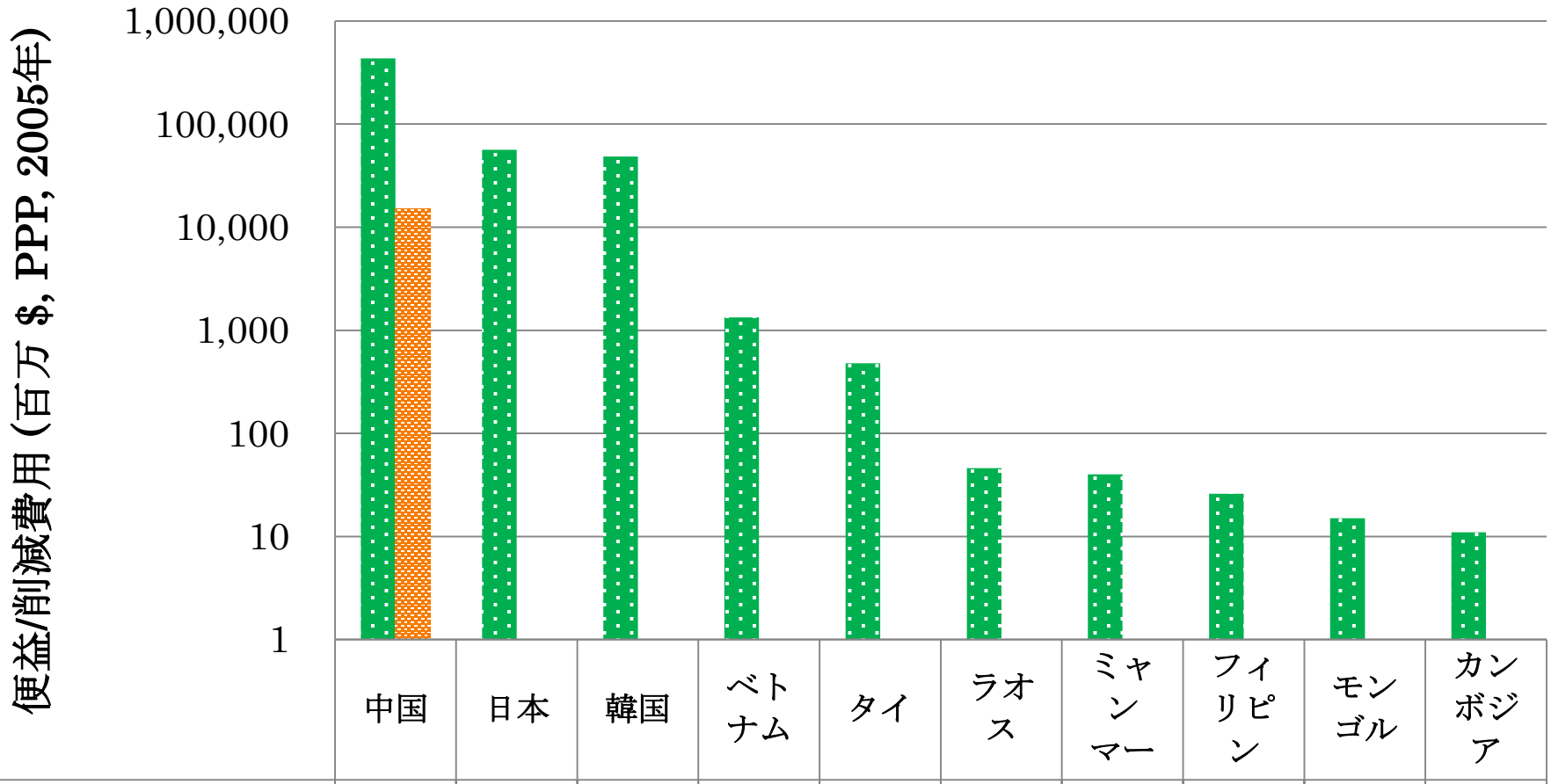
GAINS-Chinaの費用関数(PM)



排出削減費用と早期死亡減少の便益

	PFC-PSC (2020年)			PFC-REF (2020年)			REF-PSC (2020年)		
国	早期死亡数 (O3+PM2.5)	VSL (in 2005 int million $)	削減費用 (in 2005 int. million $) (NOx+PM)	早期死亡数 (O3+PM2.5)	VSL (in 2005 int million $)	削減費用 (in 2005 int. million $) (NOx+PM)	早期死亡数 (O3+PM2.5)	VSL (in 2005 int million $)	削減費用 (in 2005 int. million $) (NOx+PM)
中国	550,637	434,069	15,063	363,905	286,868	7,423	186,732	147,201	7,640
日本	10,631	56,216		6,895	36,460		3,736	19,756	
韓国	11,859	48,421		7,545	30,807		4,314	17,614	
カンボジア	43	11		27	7		16	4	
ラオス	157	46		127	38		30	8	
モンゴル	29	15		18	9		11	6	
ミャンマー	221	40		161	29		60	11	
フィリピン	48	26		34	18		14	8	
タイ	414	480		285	331		129	149	
ベトナム	3,547	1,333		2,577	968		970	365	
合計	577,586	540,657	15,063	381,574	355,535	7,423	196,012	185,122	7,640

便益(確率的生命価値:VSL)と大気汚染物質(NO_x, $PM_{2.5}$)削減費用

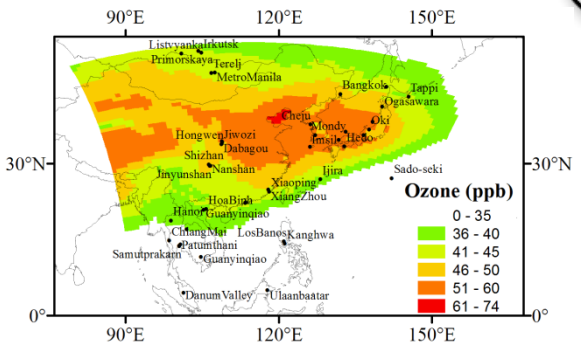


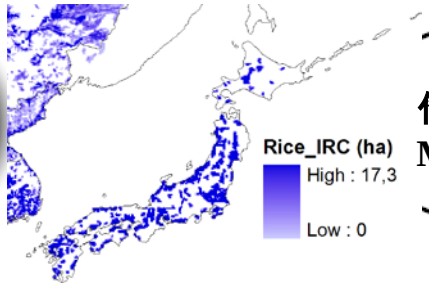
	中国	日本	韓国	ベトナム	タイ	ラオス	ミャンマー	フィリピン	モンゴル	カンボジア
便益(VSL)	434,000	56,200	48,400	1,330	480	46	40	26	15	11
削減費用 (NOx+PM)	15,100									

オゾンによる
作物影響の経済評価

オゾン暴露による作物影響の評価

気象データ(RAMS)、排出インベントリ(REAS)
輸送モデル(CMAQ)





作物作付分布:
MIRCA 2000

オゾン濃度

AOT40 反応-収量関数
Mills et al., 2007

作物暦

AOT40の計算

GISシステム

相対収量の分布

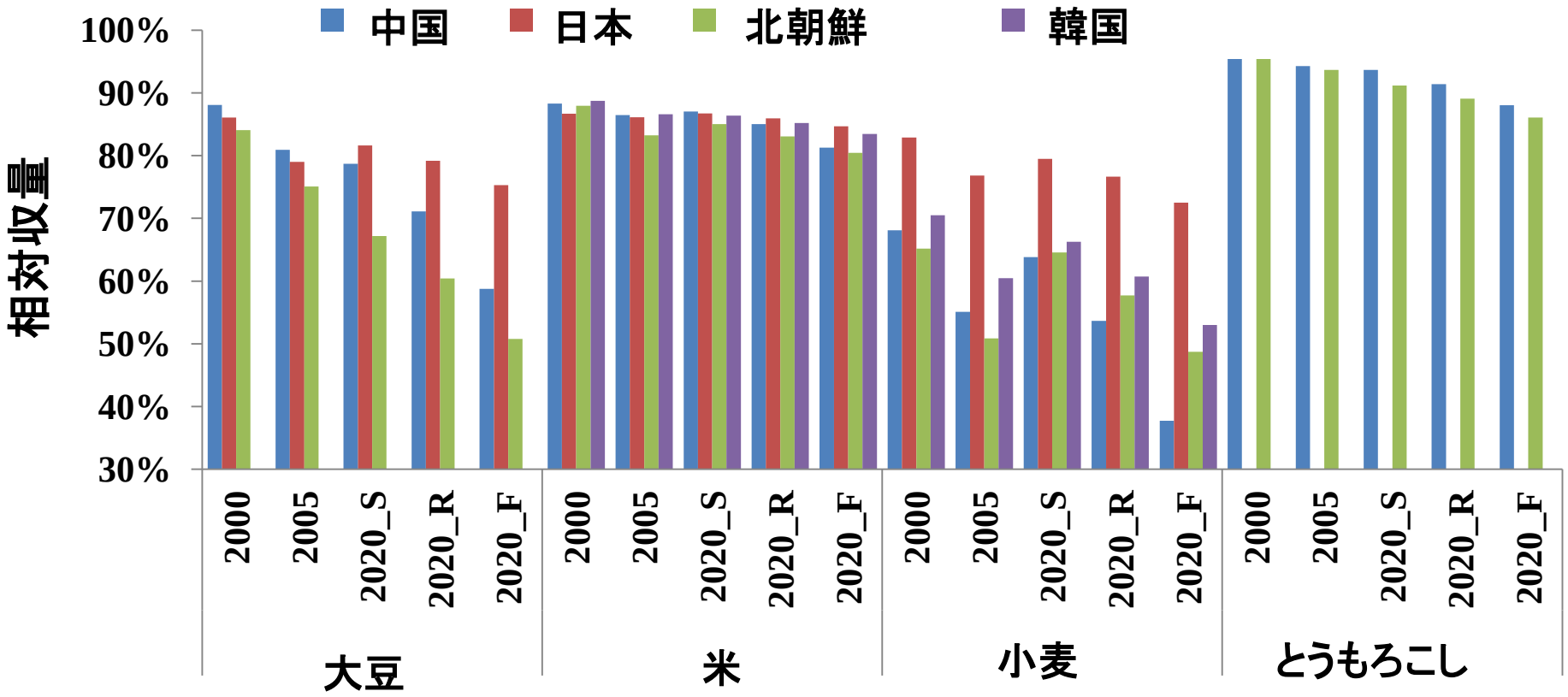
暴露と相対収量の関係

$$AOT40_{CJ} = \sum_{i=1}^{n} [C(O_3) - 40]_i \text{ for } C(O_3) > 40\ ppb$$

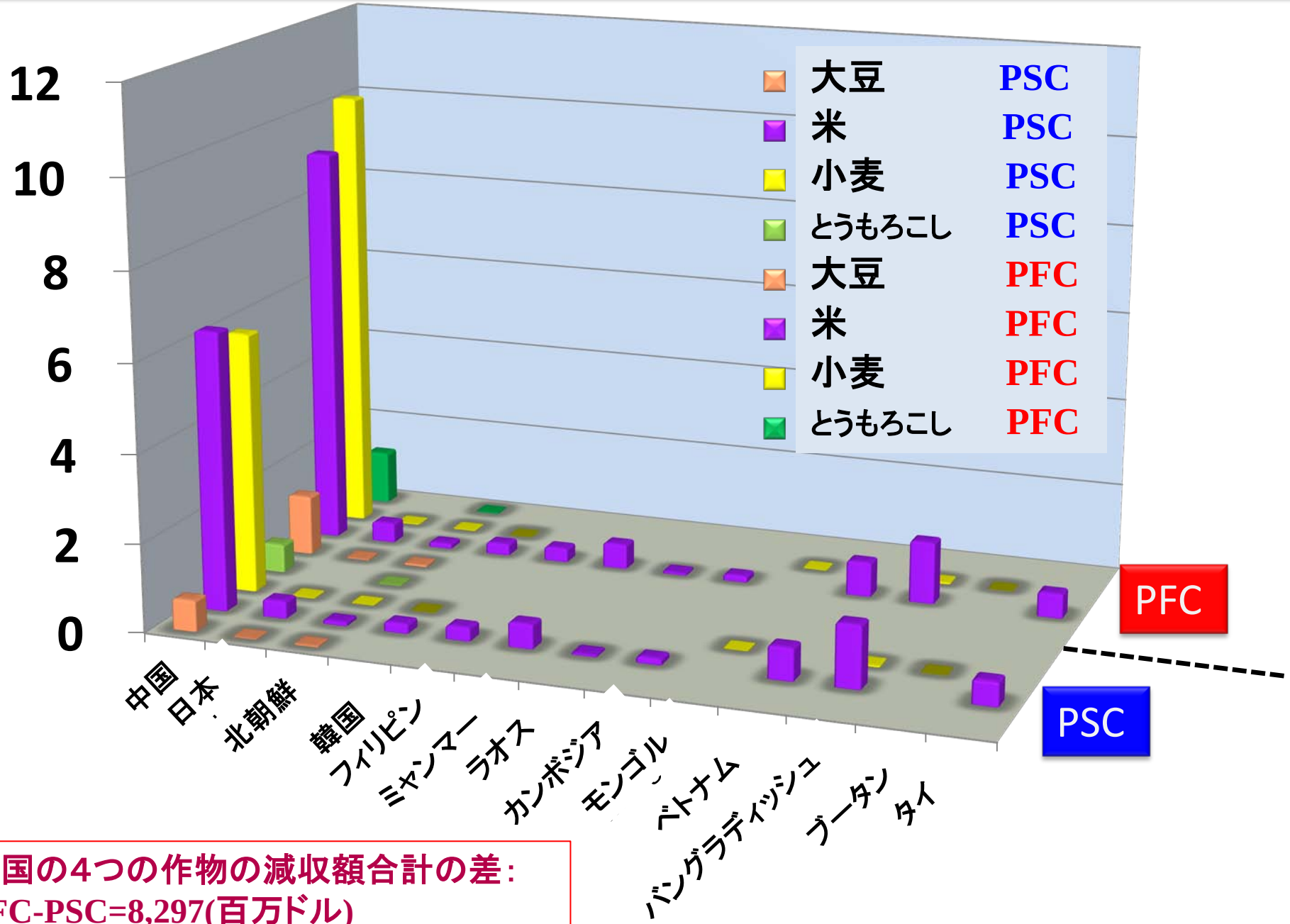
作物	収量-反応関数 y:相対収量 , x:AOT40 (ppm h)	臨界レベル (ppm h, 3ヶ月)
小麦	y=-0.0161x+0.99 (r^2=0.89)	3.3
大豆	y=-0.0116x+1.02 (r^2=0.61)	4.3
米	y=-0.0039x+0.94 (r^2=0.2)	12.8
トウモロコシ	y=-0.0036x+1.02 (r^2=0.35)	13.9

Mills et al, 2007

オゾンによる作物への影響：相対収量の変化



2020年の2つのシナリオによる減収額 (10億ドル, PPP, 2008年)



中国の4つの作物の減収額合計の差:
PFC-PSC=8,297(百万ドル)

国際協調による大気環境改善

このサブテーマの共同研究者

陈芳

オットー・ヘンニネン

アミン・ナワダ

デニセ・モーゼラル

内山 巌

小林和彦

東アジアのPM2.5とオゾンによる健康リスクの経済評価: 結果のまとめと考察

- PM2.5とオゾンの影響により、2000年、2005年、2020年(REFシナリオ)の早期死亡数は、対象地域全体でそれぞれ約31、51、64万人と推定され、地域内では中国が一番多く(28、47、57万人)、次に韓国(1.3、1.8、2.7万人)、日本(1.0、1.5、2.0万人)の順番であった。
- 2020年の PSC、REF、PFCシナリオ別の中国の早期死亡数は、それぞれ38 、57、 94万人であった。
- PM2.5とオゾンによる確率的生命価値(VSL)の損失合計は、2005年の中国、韓国、日本で、それぞれ3,680、727、808億$(PPP, 2005年)と計算された。
- シナリオ分析に基づく費用便益分析の結果、REASのPFC-PSC(2020年)に相当する排出削減により、減少する中国の早期死亡数とそのVSL、及び要する排出削減費用は、それぞれ55万人、4,340億$(PPP, 2005年)、150億$(PPP, 2005年)であった。
- 精度を上げていくためには、都市と地方における原因別死亡率データの整備や、アジア人の濃度-影響関数(C-R関数)などの研究成果が期待される。

御静聴ありがとうございました