

課題名	B-074 アジア地域における緩和技術の統一的な評価手法の開発に関する研究		
課題代表者名	遠藤栄一（独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門エネルギーネットワークグループ）		
研究期間	平成19-21年度	合計予算額	53,581千円（うち21年度 16,823千円） ※上記の予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) トップダウン型のエネルギー需給モデルを用いた緩和技術の評価に関する研究（独立行政法人産業技術総合研究所）</p> <p>(2) ボトムアップ型のエネルギーチェーンLCAモデルを用いた、緩和技術評価に関する研究（筑波大学大学院）</p> <p>(3) ライフサイクル影響評価モデルを用いた、緩和技術導入による影響低減評価に関する研究（独立行政法人産業技術総合研究所）</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序（研究背景等）</p> <p>我が国の温室効果ガス排出削減の長期目標は2050年までに現状から（2005年比）60～80%削減、中期目標は2020年に1990年比25%削減となっている。</p> <p>中長期目標に示されるような大幅な温室効果ガス排出削減のためには、生活様式や社会システムの変革にまで踏み込んだエネルギー需要の低減とともに、「エネルギー革新技术計画」にみられる革新的なエネルギー技術の導入が不可欠である。しかし、このようなエネルギー需要の低減や技術開発は不確実性を伴い、大きな社会的負担も見込まれている。一方、クリーン開発メカニズム(CDM)を始めとする京都メカニズムは、より確実に費用対効果の高い方策として、既に活用が進んでおり、その基本的な枠組みは、2013年以降の次期枠組み(ポスト京都/第二約束期間)でも維持されるものと考えられる。特にCDMは、技術移転による発展途上国での直接的な温室効果ガス排出削減だけでなく、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん等の大気汚染物質の排出削減によるコベネフィットにも注目が集まっている。ただし、さまざまな地域において、さまざまな技術によるプロジェクトが考えられることから、その技術評価は極めて重要である。</p> <p>国立環境研究所を中心に進められている二つのプロジェクトでは、CDMなど京都メカニズムの利用は対象とされていなかったり、アジア地域のCDMクレジットの評価がなされているものの、エネルギー供給技術は対象となっていない。また、重点的公募研究例として、『緩和技術の実用的技術システムや有効性(LCA、派生的環境影響、社会的受容性等)の統一的評価手法に関する研究』が示され、その具体化が期待されていた。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>以上の背景から、本研究課題では、二つの参画機関(独立行政法人産業技術総合研究所、国立大学法人筑波大学)が個々には豊富な実績を有する各種モデル群を統合的に運用することによって、一連のCDM技術評価手法として開発することを目的とする。また、開発した手法をアジア地域におけるエネルギー供給技術によるCDMのクレジット供給可能量評価および費用便益分析に適用することによって、その有効性を実証することを達成目標とする。これによって、先行研究の補完的・支援的役割を果たすことができるとともに、重点的公募研究の具体化につながる。</p> <p>本研究課題では、エネルギーシステムモデルの日本MARKALモデルとアジアGOALモデルとを用いて、2020年頃に我が国がアジア地域に求めるCDMクレジットの必要量、アジアにおける地域別・技術別CDMクレジット供給可能量を評価する(サブテーマ(1))とともに、ライフサイクルアセスメント(LCA)モデルのエネルギーチェーン多層評価システムと日本版被害算定型ライフサイクル影響評価手法(LIME)とを適用し、2020年頃のアジアでCDMクレジット供給可能量の多い地域・エネルギー供給技術のCO<sub>2</sub>排出削減による影響緩和を、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>等の大気汚染物質の削減によるコベネフィットも含めて、建設費、運転保守費等の追加的費用に対する費用便益として、定量的に評価する(サブテーマ(2)、(3))ことを目指す。ケーススタディでは、中期目標の2020年を念頭に、アジア地域として、中国、インドを、エネルギー供給技術として、風力発電、砂漠太陽光発電、天然ガス複合発電、超々臨界圧石炭火力発電、石炭ガス化複合発電等の先進的火力発電などを対象に研究を進める。本研究課題の基本的枠組みを図1に示す。</p>		

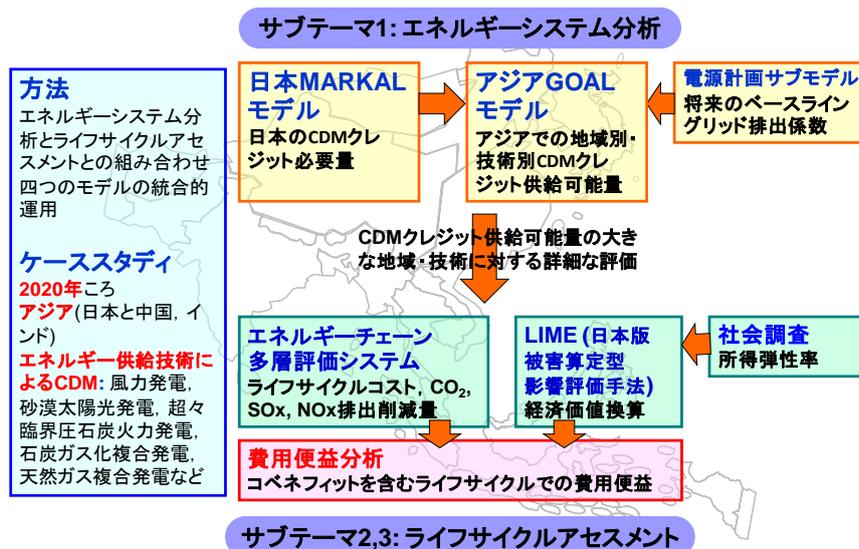


図1 本研究課題の基本的枠組み

### 3. 研究の方法

#### (1) トップダウン型のエネルギー需給モデルを用いた緩和技術の評価に関する研究

サブテーマ(1)では、二つのエネルギーシステムモデル、日本MARKALモデルとアジアGOALモデルとを用いて、我が国がアジア地域に求めるCDMクレジット必要量、アジアにおける地域別・技術別CDMクレジット供給可能量を評価する。

我が国がアジア地域に求めるCDMクレジット必要量については、2020年におけるわが国のエネルギー起源二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量と、2020年の我が国の中期目標との差分として求めることとし、日本MARKALモデルを用いて、エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量削減の可能性を分析する。

日本MARKALモデルは、IEA ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme)で開発された線形計画法による最適化型エネルギーシステムモデルMARKALを用いて、わが国の一次エネルギー供給から最終エネルギー消費までのエネルギーシステムを1990年ころから2050年ころまでの45年(1期5年、9期)にわたってモデル化したエネルギーシステムモデルである。エネルギー需要は「長期エネルギー需給見通し」の部門別活動指標に基づいて、化石燃料価格はIEA World Energy Outlook 2009に基づいて設定する。エネルギー供給技術については、主に「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」や「長期エネルギー需給見通し(再計算)」に基づいて、エネルギー需要技術については、「中期目標検討委員会」配付資料などに基づいて、エネルギー技術の変換効率、設備利用率、設備容量上限値を設定する。

また、対策費用の違いによるCO<sub>2</sub>排出削減効果を把握できるようにするため、システムコストとCO<sub>2</sub>排出量の二つの目的関数のトレードオフ係数をパラメータとして感度解析を実施する。システムコストとは異なり、CO<sub>2</sub>排出量の割引は考慮していないため、期が進む(1990年前後の第1期から年を経る)に従って、モデル内での実効的炭素税税率は高くなっていくが、CO<sub>2</sub>排出削減の可能性を把握することが目的であるため、この方法を採用する。

アジアにおける地域別・技術別CDMクレジット供給可能量の評価は、アジアGOALモデルを用いて、中国とインドとに対して実施する。アジアGOALモデルは、線形計画法による最適化型の多地域エネルギーシステムモデルで、図2に示す、日本、中国、東南アジア、インドの、1998年～2055年(8期、1期5年～10年(1期の長さは可変))を対象範囲とし、CO<sub>2</sub>排出制約下でシステムコストを最小化する。エネルギー需要は、日本エネルギー経済研究所の「世界/アジアエネルギーアウトック」に準拠する。

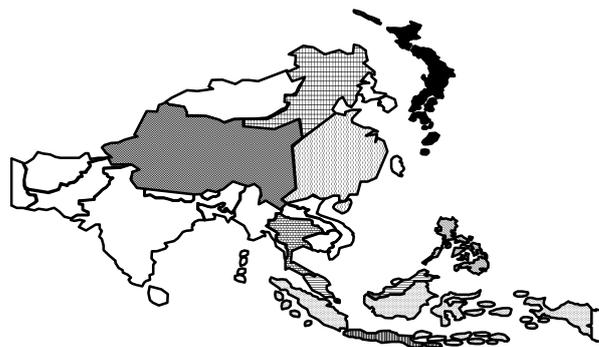


図2 アジアGOALモデルの対象地域(ハッチのある7カ国とインド)

アジアGOALモデルを用いてCDMクレジット供給可能量を評価できるようにするために、実際のCDMプロジェクトと同様に、追加性と収益性の二つの要件をモデル化する。これによって、ベースラインではコスト競争力がなく導入されないが、クレジットの販売収入で初めてコスト競争力が出て事業として成立し、温室効果ガスの排出量を削減できる技術のみがCDMとして扱われる。

発電技術のCDMによるクレジットは、電力網ごとに定められたベースライングリッド排出係数か、グリッド内の火力発電の平均的CO<sub>2</sub>排出係数に基づいて評価されることから、これらの将来の値を推定する必要がある。インドについては、データ取得の制約から、アジアGOALモデルのみを用い、一国一地域（一電力網）と仮定して将来の排出係数を推定し、CDMクレジット供給可能量を評価する。一方、中国については、以下に述べる方法で、現状のCDMと同様、電力網ごとにより詳細に将来の排出係数を推定した上で、アジアGOALモデルを用いてCDMクレジット供給可能量を評価する。

まず、6つの主要な電力網（図3のチベットを除く6電力網）ごとに将来の年間負荷曲線を推定するとともに、電源計画サブモデルを開発し、ベースライングリッド排出係数とグリッド内の火力発電のCO<sub>2</sub>排出係数を電力網ごとに2026年まで試算する。ここで、中国政府は大気汚染対策を強力に押し進めており、電力網の最適電源構成、ひいては排出係数等にもその影響が現れる可能性がある。この影響を考慮するために、kWh当たりSO<sub>x</sub>排出量及びNO<sub>x</sub>排出量を低減するシナリオの下でベースライングリッド排出係数等を評価する。具体的には、中国政府の政策を反映してkWh当たりSO<sub>x</sub>排出量を5年ごとにほぼ半減させるシナリオ（ベースシナリオ）と、さらにkWh当たりNO<sub>x</sub>排出量も5年ごとにほぼ半減させるシナリオ（強化シナリオ）を想定して分析を実施し、環境対策シナリオごとに、年間負荷を満足する最適電源構成を明らかにし、将来係数を推定する。

## （2）ボトムアップ型のエネルギーチェーンLCAモデルを用いた、緩和技術評価に関する研究

サブテーマ(2)では、エネルギーチェーン多層評価システムを適用し、サブテーマ(1)で大きなCDMクレジット供給可能量が期待された中国6地点、インド3地点での先進的火力発電、再生可能エネルギー発電によるCDMを対象とし、ライフサイクルコスト、及びライフサイクルCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出削減量を評価する。

エネルギーチェーン多層評価システムは、ボトムアップ型のライフサイクルアセスメント(LCA)モデルであり、燃料採掘から利用までのエネルギーチェーン全体をエネルギー、環境、およびコストの観点から評価する。LCAのシステム境界は製造から運用までで、機器は日本で製造されて現地へ輸送されるものとし、輸送設備製造、廃棄、リサイクルは含まない（ただし灰捨は含む）。評価対象地点を図4に示す、中国・上海、重慶、広東、大連、山西、新疆ウイグル、及びインド・デリー、

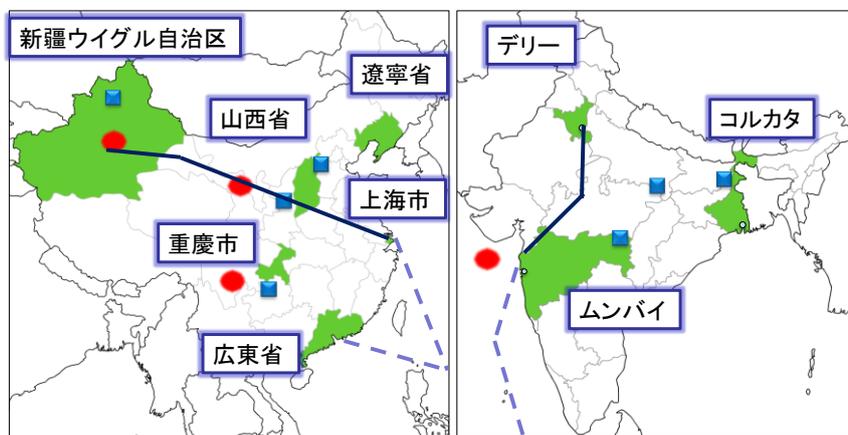


図4 中国、インドのライフサイクルアセスメント対象地点



図3 中国6大電力網

コルカタ、ムンバイである。中国においてCDMで導入されるとした先進的火力発電、石炭ガス化複合発電(IGCC)、超々臨界圧石炭火力発電(USC)、天然ガス複合発電(NGCC)の諸データは文献及びヒアリングを元に設定する。

(3) ライフサイクル影響評価モデルを用いた、緩和技術導入による影響低減評価に関する研究

サブテーマ(3)では、日本版被害算定型影響評価手法(LIME)を適用し、サブテーマ(2)で得られたライフサイクルでのCO<sub>2</sub>排出削減による便益、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出削減によるコベネフィットを経済価値に換算し、さらにサブテーマ(2)で得られているライフサイクルでの費用、建設費、燃料費、運転保守費と合わせて、CDMのライフサイクルでの費用便益分析を実施する。ただし、LIMEは現在の日本を対象として各種の係数が設定されているため、LIMEの各係数をアジアの将来に適合するよう調整する必要がある。LIMEと社会調査、費用便益分析、他のモデルとの関係を図5に示す。

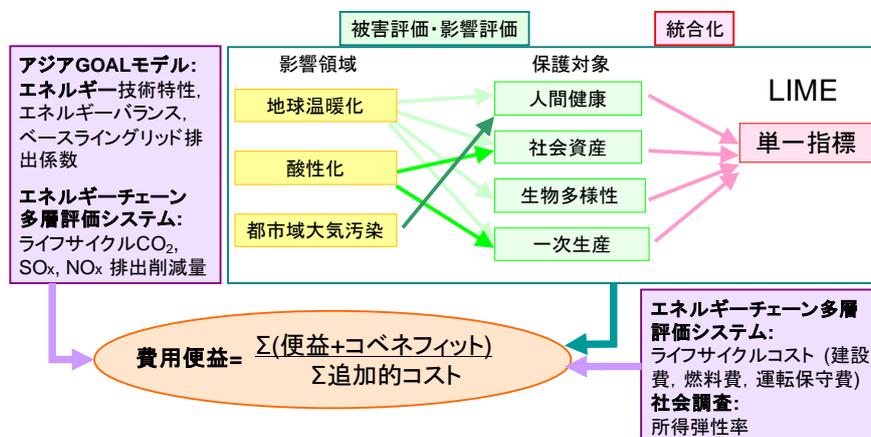


図5 LIMEと社会調査、費用便益分析、他のモデルとの関係

LIMEの係数のアジアの将来への調整には、ある国(地域)の未知の係数を、他の国(地域)の既知の係数と二つの国(地域)の一人当たりGDP比とを用いて推定する便益移転の考え方を適用する。その際、文献調査と社会調査の二つの方法を用いる。社会調査は、中国3地点、インド1地点で、大気汚染による健康被害を回避するための支払い意思額(WTP)を、仮想評価法(CVM)を用いて調査する方法をとる。収入に対する所得依存性を分析し、所得弾性率を表す係数を推定する。

所得依存性、サブテーマ(1)で得られたベースライングリッド排出係数、サブテーマ(2)で得られたライフサイクルでの追加コストと排出削減量とを用い、LIMEを適用することによって、中国にCDMとして先進的火力発電を導入する場合の、コベネフィットを含むライフサイクル費用便益分析を実施する。

4. 結果及び考察

結果

(1) トップダウン型のエネルギー需給モデルを用いた緩和技術の評価に関する研究

サブテーマ(1)の、日本MARKALモデルを用いた、2020年におけるわが国のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の削減可能性の分析結果を図6に示す。エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量は、国内対策のみで2020年に1990年比約15%、2050年に2005年比おおむね60%、削減が可能であるという結果が得られた。2020年のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量と中期目標との差分から、森林吸収による削減分を除いたものが、CDMなどオフセットメカニズムによるものとなる。すなわち、海外の排出枠を最大で約10%程度購入することになる。ただし、有効エネルギー需要は一定としたため、これを削減することができれば、排出枠の購入はさらに低減できる。なお、CDM、共同実施、国際排出量取引の割合は、将来時点における各クレジットの価格に依存するため、本分析だけでは特定できない。

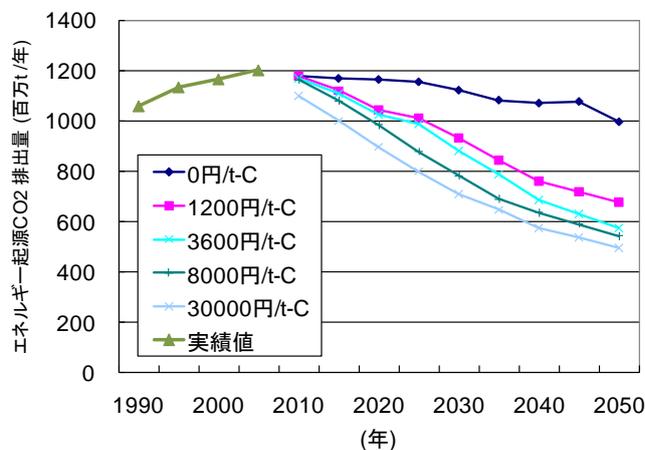
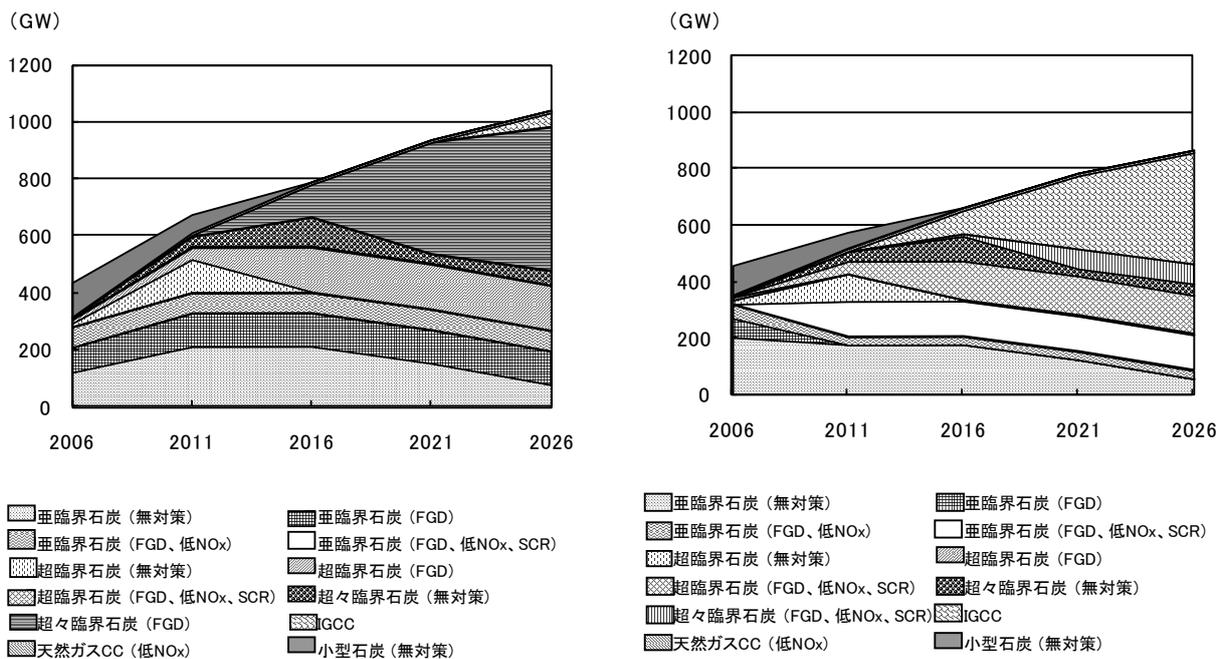


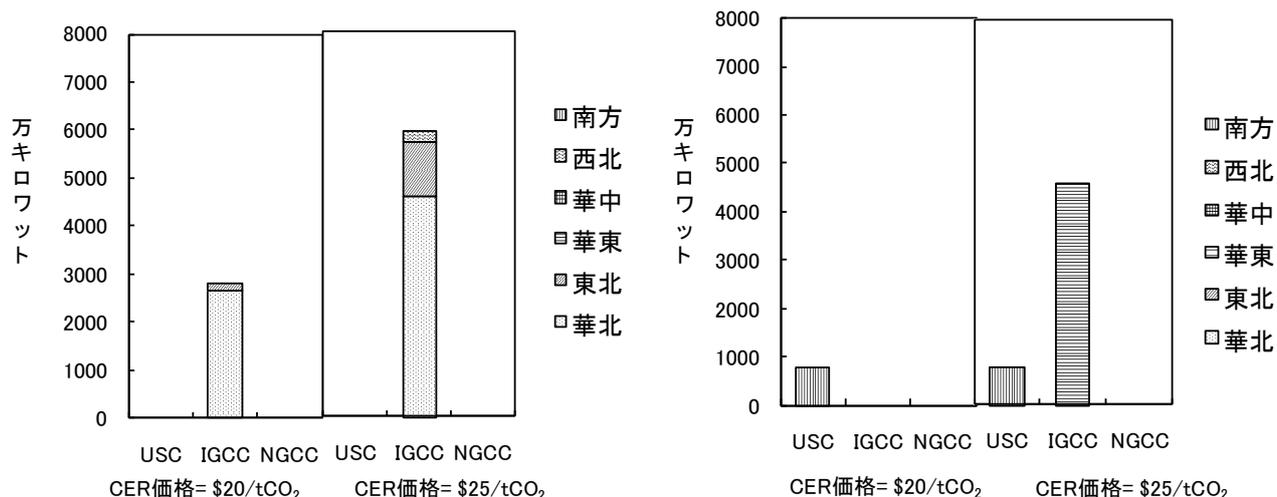
図6 我が国のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量

図7に、CDMクレジット供給可能量評価のために実施した、環境対策シナリオ別の中国の火力発電の最適電源構成(6電力網の合計)の分析結果を示す。NOx排出制約が追加されることによって排煙脱硝(SCR)付き石炭火力発電が増加するとともに、2016年以降IGCC(石炭ガス化複合発電)が大幅にベースラインに組み込まれるようになる。強化シナリオでは2016年以降IGCC等の高効率発電の設備量が増えるために、ベースシナリオと比較して火力発電のベースライングリッド排出係数も低下する。これらの結果は、サブテーマ(2)、サブテーマ(3)が実施する評価のためのデータとして利用する。

図8に中国における電力網別・技術別CDMクレジット供給可能量の分析結果を示す。環境対策によって発電コストが上がり、CDM技術の導入が容易になる。また、ベースライングリッド排出係数は低下する。クレジット価格が高いか電力買い取り価格が安いとCDMクレジット供給可能量は増加する。南方、華東での石炭ガス化複合発電によるCDMクレジット供給可能量が多い。



(a) ベースシナリオ(SOxのみ排出削減) (b) 強化シナリオ(SOx、NOxとも排出削減)  
 図7 中国の火力発電の環境対策シナリオ別の最適電源構成(6電力網の合計)



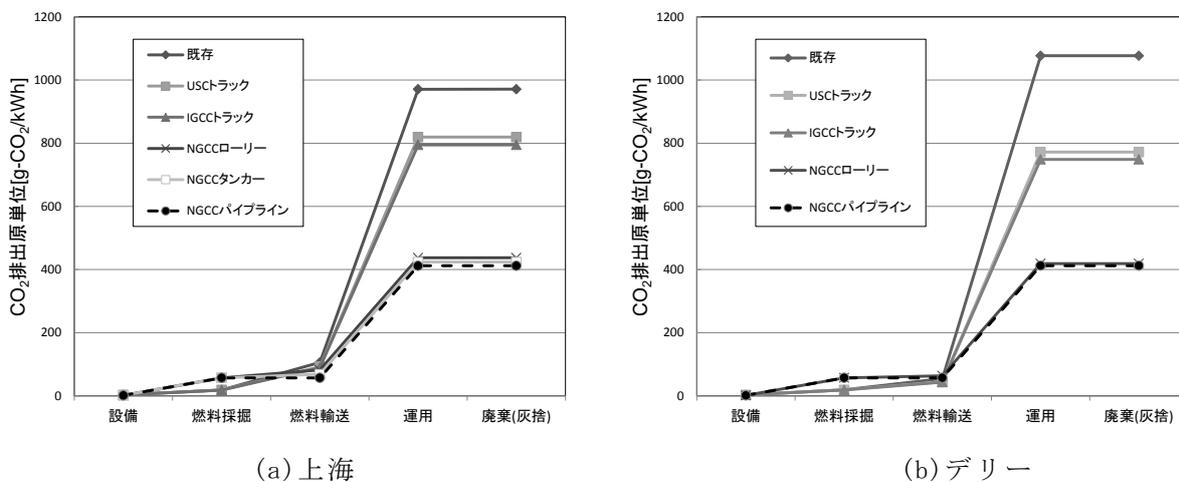
(a) 電力買い取り価格0.25元/kWh (b) 電力買い取り価格0.30元/kWh  
 図8 中国における電力網別・技術別CDMクレジット供給可能量(2016年、クレジット期間7年)

(2) ボトムアップ型のエネルギーチェーンLCAモデルを用いた、緩和技術評価に関する研究

中国6地域及びインド3地域を対象に、石炭ガス化複合発電(IGCC)、天然ガス複合発電(NGCC)、超々臨界圧石炭火力発電(USC)等の先進的火力発電のライフサイクル評価を行った結果は以下のとおりである。

図9に示す、エネルギーチェーンでのCO<sub>2</sub>排出原単位の評価結果からは、技術による排出量の差異がみられるが、いずれも使用段階での排出量が多いこと、先進的火力発電を導入することで運用段階での排出削減だけでなく、燃料輸送でも削減が見込まれることを示している。燃料輸送について中国とインドを比較すると、上海はデリーに比べ燃料産地が遠いため、燃料輸送におけるCO<sub>2</sub>排出量が多い。図10に、中国対象6地域において先進的火力発電を導入した場合の既存火力発電所からのCO<sub>2</sub>排出原単位削減量を示す。2005年及び2025年将来予測での削減量で、後者は2005年既存火力発電の平均値からの削減量である。既存火力発電の平均効率が低い地域では削減量が大きく、特にNGCCを導入した場合、排出削減量が大きく、CO<sub>2</sub>排出原単位は半減する。上海、広東など、燃料輸送距離の長い地域は、他地域と比べ削減量が小さい。

SO<sub>2</sub>排出については、地域別では重慶が最も排出量が多い。これは、重慶で使用される石炭の硫黄含有量が極めて多いことに起因する。ガス火力発電では天然ガス中の硫黄含有量が極めて少ないため、運用段階ではSO<sub>2</sub>の排出はほとんどない。各技術・地域ごとの発電コストの評価結果では、IGCCやUSCについて、上海や広東など炭鉱からの距離がある地域では、燃料輸送が総発電コストの半分以上を占め、燃料費が高い天然ガス火力発電のコストを上回るケースも見られる。またインドにおける石炭価格は熱量に対して安いために、燃料費を押し下げる。



(a) 上海 (b) デリー  
図9 上海、デリーにおけるCDM技術別CO<sub>2</sub>排出量

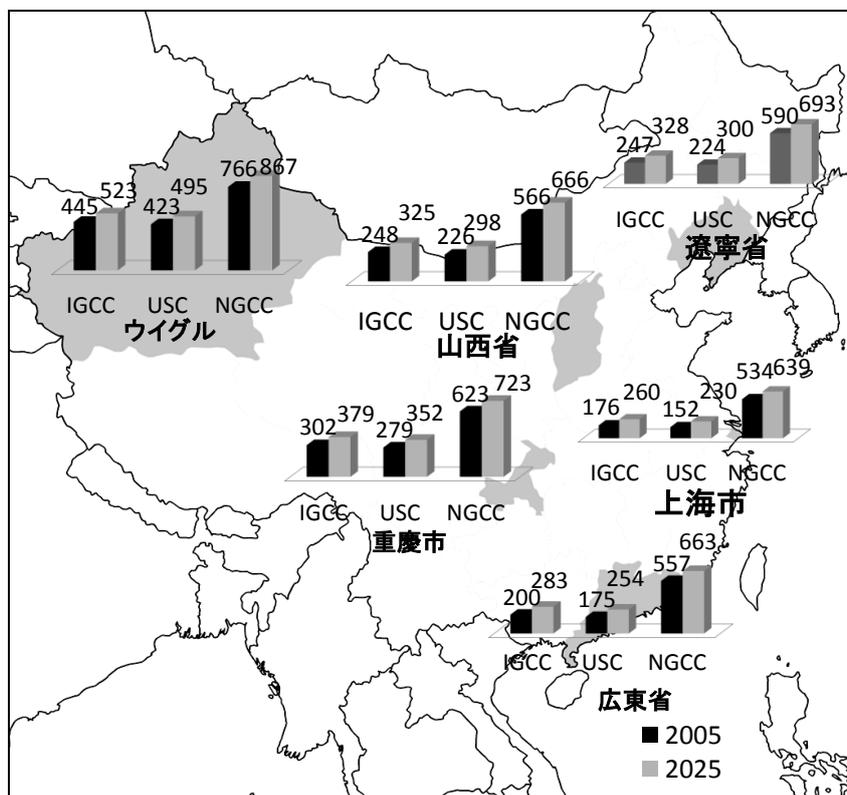


図10 中国6地域におけるCO<sub>2</sub>排出原単位削減量 (g-CO<sub>2</sub>/kWh)

## (3) ライフサイクル影響評価モデルを用いた、緩和技術導入による影響低減評価に関する研究

健康リスクの経済評価係数を推定することを主目的として、中国・上海、インド・デリーで500件の面接による環境意識調査を実施した。調査を実施するにあたっては、市内から均一にサンプルを抽出することに留意した。また、質問票の内容が複雑であることから、デリーにおいては、回答者の内容理解度が高くなる様にするためインドでの調査で多用されている社会経済指標(Socio Economic Classification)に従い調査対象世帯を制限した。さらに、中国・重慶及び広州において、上海での調査を補充することを目的として小規模調査を実施した。これらの調査の実施と並行して調査データの分析を継続的に進めた。

上海での調査結果に対して、所得弾性率を求めるために世帯年収の対数に支払意志額が影響を受ける様子を計算した。世帯年収 $w$ の回答者支払意志額の分布関数  $F(x)$  (引数 $x$ より支払意志額が小さい確率)をロジスティックモデル $F(x)=\exp(a+b \log x+c \log w)/\{1+\exp(a+b \log x+c \log w)\}$ を用いて推定すると、収入に対する所得弾性率を表す係数 $c/b$ は、1に近いと推定された(図11)。便益移転についての文献では、所得弾性率は0.5程度から1を越える値まで推定値がばらついていることから、値としては妥当な結果が得られた。

回答分布のデータに影響を及ぼしている要因と金額に関わらず支払わないという回答の存在を考慮し、支払の有無と金額の二つに要因を分解することを試みた。回答について強い仮定を置いて分析を行うと、図12に示すように、回答分布には、世帯年収、大気汚染の現状認識、罹患経験、学歴の各要因が影響を及ぼしている。影響の構造を分析すると、変数により影響の形が異なり、罹患経験、学歴は支払の有無に影響しているものの、提示金額に対する支払の有無への影響は弱い。一方、世帯年収は支払金額に影響を及ぼしているものの、金額が小さいときの支払意志の有無への影響は弱い。大気汚染に対する現状認識は、金額が小さいときの支払有無と金額の両方に影響を及ぼしている可能性が示唆される。

デリーにおける調査データの分析では、今後10年間の喘息罹患率を10%から減少させるための支払意志額は、罹患率1%減少当たり6千ルピー程度となる。デリーにおける回答分布に影響を及ぼしている要因は、基本的には上海の結果と類似の構造をしているが、全般的に各因子による影響が弱く、検出は上海の場合より困難である。

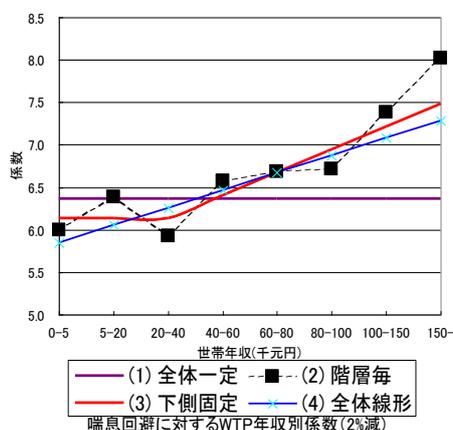


図11 中国・上海における係数の年収依存性

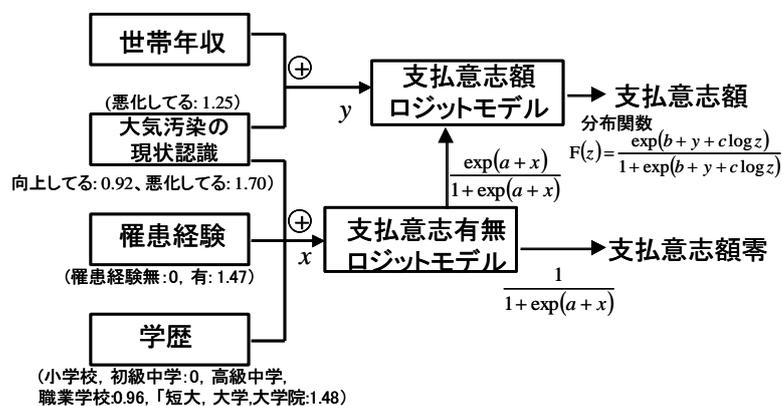


図12 中国・上海における支払意思額の構造

CDMプロジェクトのコベネフィットを含むライフサイクルでの費用便益分析のために便益移転を適用することから、中国・上海における健康被害に関する社会調査の結果を踏まえ、所得弾性率を0.9と設定する。この所得弾性率を用い、中国における先進的火力発電導入時のライフサイクルでの費用便益分析を行った。想定するCDMは、上海で脱硫・脱硝装置付きの超々臨界圧石炭火力発電を導入するものとし、費用は技術代替による平均発電コストの増分、便益、コベネフィットは技術導入による排出削減の外部コスト減額分とする。その際ベースラインとなるCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>等の排出と平均発電原価のシナリオはサブテーマ(1)から、新技术導入によるこれらの排出削減量と費用増分はサブテーマ(2)から、それぞれ得たデータを用いる。費用便益分析の結果を図13に示す。脱硫装置のコストが低下し、費用は低下する。一方、一人当たりGDPの増加によって、支払意思額が増

加し、便益は増加する。30年間の均等化費用便益はほぼ1である。ベースラインの経年変化(排出削減)を考慮したことで、コベネフィットを含む便益は、先行研究に比べ大きくないという結果が得られた。また、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出削減によるコベネフィットは、CO<sub>2</sub>排出削減による便益より大きい。

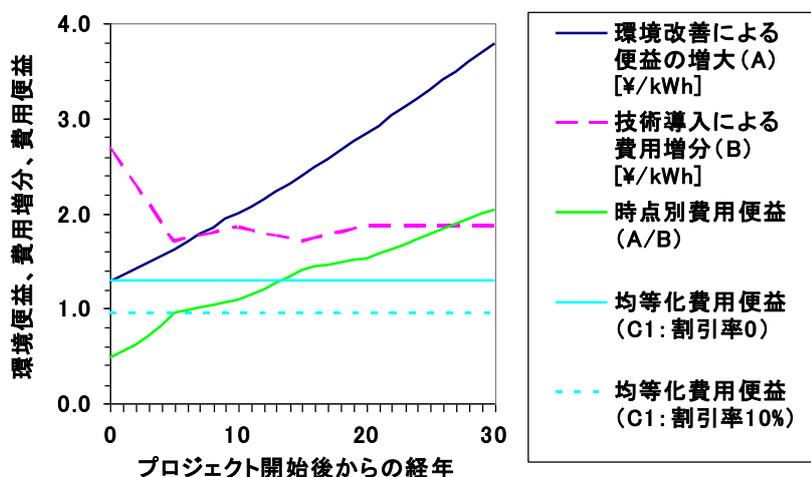


図13 中国における先進的火力発電導入による費用便益

#### 考察

サブテーマ(1)のマクロなエネルギー需給モデルによるCDMクレジット供給可能量の評価手法の開発に関しては、中国の6電力網の電源計画モデルを開発し、CDMの追加性、事業収益性という二つの要件を組み込んで評価する手法と合わせて、地域別・技術別のCDMクレジット供給可能量を実際のCDMプロジェクトと同様に、詳細に評価できるようにした点に新規性がある。サブテーマ(2)では、エネルギーチェーンLCAモデルの改良とデータベース整備を進め、これまで日本国内を対象としたサプライチェーンに限定されていた多層評価を中国、インドにおいても可能とし、さらにCO<sub>2</sub>だけでなく、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>に拡張することで、その有用性をさらに高めた。特に、実際のCDMプロジェクトでは評価されていないライフサイクルでの排出量の評価を実施したところに価値がある。サブテーマ(3)では、中国・上海やインド・デリーで実施した社会調査を通して、所得が上昇途上にある発展途上国における環境に関する支払い意思額についての知見を得ることができた。さらに、中国における先進的火力発電技術によるCDMの費用便益分析は、ベースライングリッド排出係数の経年変化を考慮して便益を評価した点で、先行研究にはない大きな学術的進展が得られた。以上、サブテーマ(1)～(3)を通じて、研究計画に掲げた内容はおおむね予定通り実施することができた。

以上の成果は、CDMや地球温暖化対策に造詣の深い国内外の専門家を招聘し、本研究課題の成果報告を兼ねて開催した地球温暖化シンポジウム「次期枠組みに向けたCDMの現状と今後」でも発信した。本研究課題で開発した手法は、2010年度から実施される E-1001 「アジア低炭素社会の構築に向けた緩和技術のコベネフィット研究」でさらに発展され、応用されるものと期待される。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

エネルギーシステムモデルとライフサイクルアセスメントモデル、すなわち日本MARKALモデル、アジアGOALモデルと、エネルギーチェーン多層評価システム、LIME(日本版被害算定型ライフサイクル影響評価手法)とを統合的に運用する、CDM技術評価手法を開発した。ケーススタディとして、中国、インドにおける先進的火力発電等のエネルギー供給技術によるCDMを取り上げ、地域別・技術別CDMクレジット供給可能量を評価するとともに、その大きな地域、技術について、コベネフィットを含むライフサイクルでの費用便益を評価し、開発手法の有効性を実証した。

エネルギーシステムモデルとライフサイクルアセスメントモデルとを組み合わせ、アジア地域におけるエネルギー供給技術によるCDMのコベネフィットを含む費用便益分析のケーススタディまで実施した研究はこれまでなく、きわめて意義深い。特に、エネルギーシステムモデルに実際のCDMと同様の追加性と収益性の二つの要件を組み込んでCDMクレジット供給可能量を評価した点、費用便益の評価において、ベースライングリッド排出係数の経年変化を考慮して便益を評価した点で、先行研究にはない大きな学術的進展が得られた。また、実際のCDMプロジェクトでは評価されてい

ないライフサイクルでの排出量の評価を実施した点について科学的意義を有する。

## (2) 環境政策への貢献

環境省の日中や日本インドネシアの「コベネフィット研究とモデル事業の協力実施」に手法面での貢献が見込まれる。今後、オフセットメカニズムを通じた海外排出枠の獲得や、アジア地域における費用対効果の高い地球温暖化対策やSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>削減によるコベネフィットを有する環境対策の推進に役立つことが期待される。中国、インドにおけるコベネフィット研究は国際応用システム分析研究所(IIASA)で実施され、EU Framework Programでも開始されたが、これらの海外の研究事例に対しても、本研究は大きく先行しており、シンガポール大学から招待講演を依頼されるとともに、台湾中原大学から訪問を受けた。今後とも学術成果の更なる発信が期待されるとともに、これらの成果を通して地球環境政策への貢献や、IPCCの第5次評価報告書へのサイテーションが期待される。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：遠藤栄一

1954年生まれ、九州大学大学院工学研究科修了、工学博士、電子技術総合研究所主任研究官、現在、産業技術総合研究所主任研究員

参画研究者

(1) : 遠藤栄一 (同上)

(2) : 村田晃伸

1957年生まれ、東京大学大学院工学研究科修了、工学修士、電子技術総合研究所主任研究官、現在、産業技術総合研究所主任研究員

(3) : 岡島敬一

1968年生まれ、東京大学大学院工学系研究科修了、工学博士、静岡大学工学部助手、現在、筑波大学大学院講師

(4) : 野村昇

1962年生まれ、慶應義塾大学大学院理工学研究科修了、工学博士、機械技術研究所主任研究官、現在、産業技術総合研究所主任研究員

(5) : 時松宏治

1969年生まれ、東京大学大学院工学系研究科修了、工学博士、地球環境産業技術研究機構研究員、現在、エネルギー総合工学研究所主任研究員、産業技術総合研究所産学官制度来所者

## 7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

### (1) 査読付き論文

- 1) 村田晃伸、李哲松: 「二酸化炭素排出制約下における中国の産業部門の省エネルギー技術導入に関するモデル分析」、*日本エネルギー学会誌*、87, 11: 938-945 (2008)
- 2) Okajima K., *et al.*: Life cycle evaluation of energy supply technologies in China by energy chain multi layered model. *Proceedings of the International Conference on Applied Energy*, 1: 621-630 (2009).
- 3) Murata A., Endo E.: Developing a generation planning model of the Chinese power grids for the assessment of CDM activities. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 2009*, (2009)
- 4) Okajima K., *et al.*: Evaluation of emissions from energy supply technologies in China by energy chain LCA model. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 9*, I9FP0407: 1-6 (2009)
- 5) Okajima K., *et al.*: Externality analysis of primary air pollution from coal-fired power plant in urban region of China. *Proceedings of the International Conference on Applied Energy*, 2: 519-528 (2010).

### (2) 査読付論文に準ずる成果発表

特に記載すべき事項はない。

## B-074 アジア地域における緩和技術の統一的な評価手法の開発に関する研究

## (1) トップダウン型のエネルギー需給モデルを用いた緩和技術の評価に関する研究

独立行政法人産業技術総合研究所

エネルギー技術研究部門 エネルギーネットワークグループ

遠藤栄一・村田晃伸

平成19～21年度合計予算額 23,133千円

(うち、平成21年度予算額 5,831千円)

上記の予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本サブテーマでは、マクロなエネルギーシステムモデルである日本MARKALモデルとアジアGOALモデルとを用いて、2020年ころのエネルギー起源二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の中期目標と分析結果との差分としての我が国のCDMクレジット必要量と、アジア地域でエネルギー供給技術によるCDMを実施するものとして、地域別・技術別のCDMクレジット供給可能量とを評価する手法を開発することを目的とする。同時に、他のサブテーマに対しては、CDMを想定する地域における将来のエネルギーバランス、ベースライングリッド排出係数等を提供する役割も担う。研究の主な成果は以下の通りである。日本MARKALモデルでは、長期エネルギー需給見通し、World Energy Outlook等に基づいて、エネルギー需要、化石燃料価格、エネルギー技術データを設定した。マクロな対策費用に相当する、目的関数のトレードオフ係数をパラメータとする感度解析を通して、エネルギー起源の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量を、2020年に1990年比約15%、2050年に2005年比おおむね60%削減可能であることを明らかにした。アジアGOALモデルに関しては、世界/アジアエネルギーアウトックに基づいて、エネルギー需要を設定した。中国・インドを宿主国とする発電技術によるCDMを対象とし、CDMプロジェクトの成立要件である、追加性、事業収益性等に関する制約条件をモデルに組み込むことによって、ベースライン、クレジット価格、クレジット期間等を考慮できるCDM技術評価手法を開発した。CDM評価精度向上のために、中国については6大電力網の電源計画モデルを開発し、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出制約という環境対策と、最適電源構成、ベースライングリッド排出係数との関係を明らかにした。得られた排出係数に基づいて、中国における再生可能エネルギー発電や先進的火力発電によるCDMを評価した。環境対策の強化でベースライングリッド排出係数は低下すること、クレジット価格が高いか電力買い取り価格が安いとCDMクレジット供給可能量は増加すること、および南方、華東での石炭ガス化複合発電によるCDMクレジット供給可能量が多いことを明らかにした。

[キーワード] クリーン開発メカニズム(CDM)、アジア、エネルギー供給技術、エネルギーシステムモデル、CDM技術評価手法

## 1. はじめに

本研究課題サブテーマ(2)、(3)では、2020年ころのアジアでエネルギー供給技術によるCDMを実施するものとして、二つのライフサイクルアセスメント(LCA)モデルを適用し、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出削減による影響緩和を、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)等の大気汚染物質の削減による

コベネフィットも含めて、建設費、運転保守費等の追加的費用に対する費用便益として、定量的かつライフサイクルで評価する手法を開発するとともに、ケーススタディを通して開発手法の有効性を実証することを目指している。サブテーマ(1)では、その前提として、日本MARKALモデルとアジアGOALモデルの二つのマクロなエネルギーシステムモデルを用いて、2020年の温室効果ガス排出量の中期目標とエネルギー起源二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量との差分として、我が国がどの程度のCDMクレジットを必要とするか明らかにするとともに、アジア地域でエネルギー供給技術によるCDMを実施するものとして、どの地域・どの技術によるCDMクレジットの供給可能量が多いかを明らかにし、ケーススタディとしての詳細な評価を実施するにふさわしい地域・技術を選定するための情報を提供することを目指している。同時に、二つのサブテーマに対して、技術データのほか、CDM活動を想定する地域における将来のエネルギーバランスやベースライングリッド排出係数等の分析結果を提供する役割も担っている(図1.1参照)。

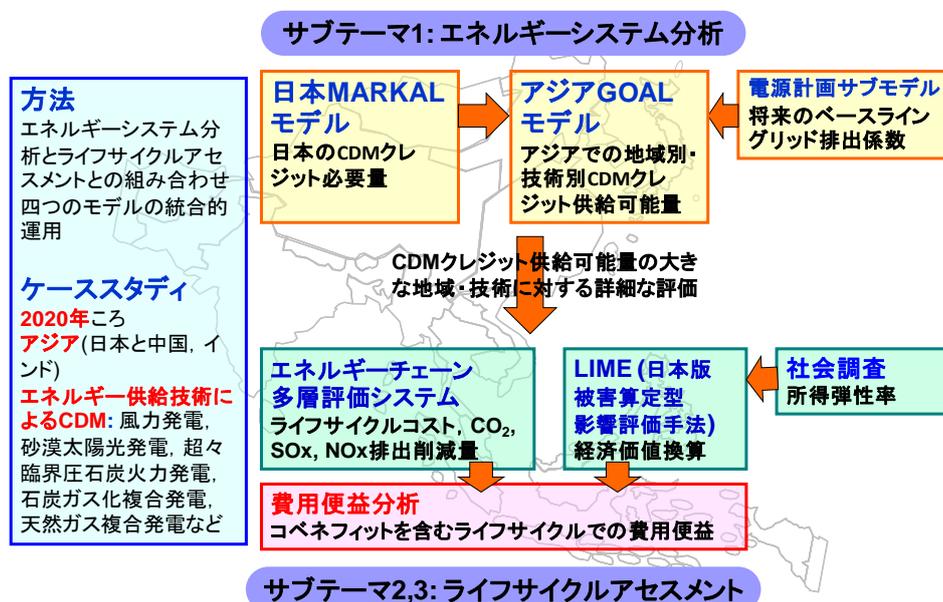


図1.1 本研究課題の基本的枠組み

## 2. 研究目的

日本MARKALモデルでは、2020年のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の中期目標と分析結果との差分として、我が国がアジア地域に求めるCDMクレジットの必要量を明らかにすることを目的とする。また、アジアGOALモデルでは、追加性や事業収益性など、実際のCDMプロジェクトの成立要件をモデルに反映することによって、アジア地域におけるエネルギー供給技術による技術別・地域別CDMクレジット供給可能量を精度よく推定することを目的とする。ケーススタディでは、中期目標の2020年ころを念頭に、アジア地域として、中国、インドを、エネルギー供給技術として、風力発電、砂漠太陽光発電、天然ガス複合発電、超々臨界圧石炭火力発電、石炭ガス化複合発電等の先進的火力発電などを対象に、開発手法を適用して、その有効性を実証することを目標とする。

### 3. 研究方法

サブテーマ(1)では、二つのエネルギーシステムモデル、日本MARKALモデルとアジアGOALモデルを用いて、我が国がアジア地域に求めるCDMクレジット必要量、アジアにおける地域別・技術別CDMクレジット供給可能量を評価する。それぞれ以下の方法で研究を進める。

#### (1) 日本MARKALモデルによる我が国のCDMクレジット必要量の分析

我が国がアジア地域に求めるCDMクレジット必要量については、2020年の温室効果ガス排出削減の中期目標と、2020年における我が国のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量との差分として求めることとし、我が国のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出削減の可能性を、日本MARKALモデルを用いて分析する。

MARKAL<sup>3)</sup>は、IEA ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme)で開発された多目的線形計画法を用いた、最適化型のエネルギーシステムモデルで、一つの国あるいは地域の一次エネルギー供給から最終エネルギー消費までのエネルギーシステムを種々のエネルギー技術とエネルギーキャリアとで表現する。特に、技術特性を通じてエネルギー技術を詳細にモデル化できる点が特徴である。本サブテーマでは、一次エネルギー源から最終エネルギー消費(エネルギーサービス)まで、1988～2052年の65年間にわたる我が国のエネルギーシステムを1期5年の13期、エネルギー技術約260種類、エネルギーキャリア約40種類で表現したモデルを用いる。目的関数として、総システムコスト、総CO<sub>2</sub>排出量をもつ。モデル化したエネルギーシステムの概要を図1.2に示す。

目的関数の総システムコストと総CO<sub>2</sub>排出量とのトレードオフ係数は、CO<sub>2</sub>排出に対する課徴金に相当するものであるが、マクロなCO<sub>2</sub>排出削減費用とも、技術競争力に対する影響という点では炭素税税率と見ることがもできる。対策費用の違いによるCO<sub>2</sub>排出削減効果を把握できるようにするため、目的関数を最小化してエネルギーシステムを最適化する際、このトレードオフ係数をパラメータとして感度解析を実施する。ただし、CO<sub>2</sub>排出量は、システムコストとは異なり、割引率の影響は受けない。そのため、期が進む(1990年前後の第1期から年を経る)に従って、モデル内での実効的課徴金は高くなっていき、分析対象期間内で一定ではない。本研究ではCO<sub>2</sub>排出削減の可能性を評価することが目的であるため、この方法を採用する。

MARKALのエネルギー需要は、有効エネルギー需要(エネルギーサービス量)で与える。日本MARKALモデルでは、この有効エネルギー需要は以下のように設定する。2000年までは、最終エネルギー消費とモデルで設定した需要機器の変換効率とから推定する。2005年以降は、この推定した値に部門別活動指標の増減率を掛けて設定する。部門別活動指標は、産業:素材生産量、鉱工業生産指数、実質生産額(鉄鋼、化学、窯業土石、紙パルプ、その他製造業、非製造業)、民生・家庭:世帯数、業務:床面積計、運輸・旅客:輸送需要人キロ、貨物:輸送需要トンキロとする。2005～2030年の値は「長期エネルギー需給見通し」<sup>4)</sup>に準拠し、2035年以降の値はトレンドと人口(減少)とを同程度に考慮して設定する。

化石燃料価格は、IEA World Energy Outlook 2009<sup>7)</sup>に基づいて設定する。2030年より後の価格上昇率は、その直前の上昇率の化石燃料種別の加重平均とし、原油、LNG、石炭とも1.2%/年で一定であると仮定する。

エネルギー技術の技術特性のうち、変換効率、設備利用率は、エネルギー供給技術については、主に「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」や「長期エネルギー需給見通し(再計算)」<sup>6)</sup>に基づいて、エネルギー需要技術については、「地球温暖化問題に関する懇談会 中期目標検討委員会」

配付資料<sup>9)</sup>などに基づいて設定する。導入設備容量上限値は、2030年までは「長期エネルギー需給見通し(再計算)」<sup>4)</sup>の最大導入ケースに準拠する。2035年以降は、各種ロードマップ<sup>8)</sup>を参照したり、それまでのトレンドを延長するなどして設定する。



図1.2 MARKALでモデル化した我が国のエネルギーシステムの概要

## (2) アジアGOALモデルによる地域別・技術別CDMクレジット供給可能量の分析

### 1) 統合的分析のためのデータ整備

#### a. 技術・経済データベースの開発

三つのサブテーマで使用されるアジアGOALモデル、日本MARKALモデル、エネルギーチェーン多層評価システム、日本版被害算定型影響評価手法(LIME)は、分析の対象とするエネルギー技術の効率、経済性等のデータを共通に利用する。これらのモデルで使用する技術データを共通化するために相互のデータベースを比較すると同時に、新たに文献調査を行って収集したデータに検討を加えて共通データを定める。新設火力の単機容量の大型化、高効率化が推進され、2004年頃から複数のガス複合サイクル発電、2006年には2基の超々臨界石炭火力発電所が運転を開始した。同時に、低効率な10万kW以下の小型火力の廃止が計画的に進められている。以上を考慮し、亜臨界石炭火力発電、超臨界石炭火力発電、超々臨界石炭火力発電、小型石炭火力発電、石炭ガス化複合サイクル発電、ガス複合サイクル発電、原子力発電、水力発電、揚水発電、風力発電の10種類の電源に関する、現有設備量、燃料消費率、ピーク時稼働率、年利用率、建設費、運転保守費、年経費率、導入見通し、等の技術・経済データと、電力網の送配電線路損失率、等のデータをデータベース化した。大気汚染(SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>)対策については、主要国の一つである中国では排煙脱硫が政府の計画として積極的に推進されている。大部分の脱硫設備では、実績がある湿式石灰石膏法が採用されている。SO<sub>x</sub>対策に比べてNO<sub>x</sub>対策の優先順位は低いようであるが、近年新規電源の大型化とともにkWh当たりのNO<sub>x</sub>排出量は減少しつつある。主なNO<sub>x</sub>対策は低NO<sub>x</sub>バーナーの採用である。排煙脱硝設備を備えた発電所の建設は計画段階のものがほとんどである。これらの技術に関して、脱硫・脱硝率、建設費、運転保守費、設備の地域分布、等のデータをデータベース化した。

## b. エネルギーシナリオ作成

発電技術の設備寿命は20年以上に及ぶ。先進的な発電技術によるCO<sub>2</sub>排出削減効果を評価するためには、少なくとも今後30年以上の期間にわたるモデル分析が必要である。そこで、日本エネルギー経済研究所による2030年までの見通しである世界/アジアエネルギーアウトック2007<sup>3)</sup>(以下、AE02007と略記)に準拠する形で、アジアGOALモデルの対象国の産業、交通、商業、都市家庭、農村家庭、農業各部門の需要を、2000年～2050年にわたりエネルギー種類別に設定する。AE02007が対象としていない2030年以降については、国別に想定したGDP成長率にもとづきAE02007の需要シナリオを延長する。中国に関しては、さらに産業部門をエネルギー多消費業種である鉄鋼、セメント、アンモニア、エチレン、紙とその他(プロセス熱、動力、照明等)に用途を分け、AE02007および文献調査の結果を踏まえて設定したエネルギー消費原単位を用いて、用途別・エネルギー種類のシナリオを設定する。

### 2) GOALモデルによる地域別、技術別CDMポテンシャル評価手法の開発

GOALモデルは、東アジア/東南アジアのエネルギーシステムを対象とする線形最適化モデルである。国毎に参照エネルギーシステムを定め、エネルギー採掘から、転換、輸送、利用に至るフローを、変換効率、設備利用率、利用開始可能時期、等の技術データに基づいて表現する。対象期間である1998年～2055年を8期に分割しており、各期の長さは任意の年数に設定できるようになっている。モデルの対象地域は、図1.3に示す日本、中国、インドネ

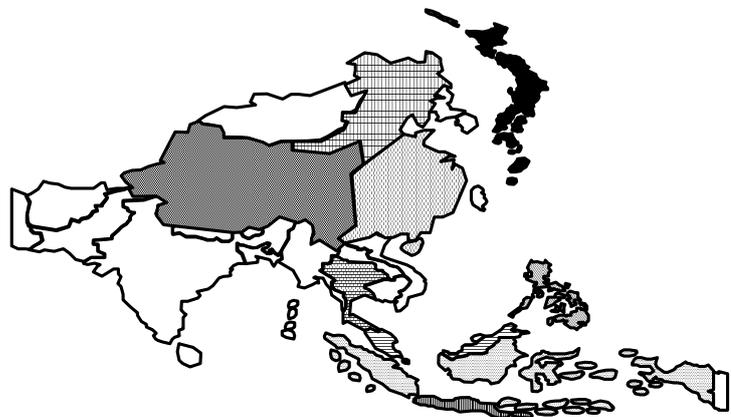


図1.3 アジアGOALモデルの対象地域  
(ハッチのある日本、中国、インドネシア、マレーシア、シンガポール、タイ、フィリピンとインド)

シア、マレーシア、シンガポール、タイ、フィリピンおよびインドの8カ国である。中国は、華北・東北、華東・中南、西北・西南の3地域に細分している。一次エネルギー資源として、石炭、原油、天然ガスの化石エネルギーと、水力、風力、太陽、バイオマスの再生可能エネルギーが各地域で生産される。電力システムに関しては、簡略化した年負荷持続曲線にもとづいてピーク需要、中間需要、ベース需要を設定し、それぞれについて需給バランスがとれるように各電源を運用する。電源技術のパラメータは発電効率、稼働率、年設備利用率の3種類があり、それぞれ燃料消費量、計画停止設備量、年間発電量に関する制約式に用いられる。また、年間最大需要に対する供給予備力必要量に関するピーク制約式を課している。その他、主な転換技術として、石油(精製)、石炭(コークス製造、ブリケット製造、選炭、ガス化、液化、メタノール製造)、天然ガス(精製、液化、気化、GTL製造、水素製造、メタノール製造)、バイオマス(ガス化、液化、水素製造)、核燃料サイクルなどを組み込んでいる。本研究では、エネルギーシステムの地域性やCDMプロジェクトの追加性を考慮し、クレジット価格、クレジット期間の年数、電力販売価格をパラメータとして地域別、技術別にクレジット供給可能量をGOALモデルで評価する手法を新たに開発した。

### 3) 中国の主要電力網を対象とする電源計画モデルの開発

CDMプロジェクトを評価する際のベースラインは、プロジェクトが実施される電力網に関して評価する必要がある。現在、独立小系統であるチベット除く中国の電力システムの主要部分は、図1.4に示す六つの電力網(華北網、東北網、華東網、華中網、西北網、南方網)からなっている。アジアGOALモデルにおける中国の地域分割は3分割であり、おおむね、華北網と東北網、華東網と南方網、華中網と西北網、という組み合わせに対応している。しかしながら、アジアGOALモデルにおける地域分割は、細部では実際の電力網の供給地域と一致していない点、ならびに実際の電力網の供給地域よりも広い地域を単位としている点で、CDMプロジェクトを評価するツールとしては不十分な面があった。



図1.4 中国の主要6電力網

その欠点を無くし、分析精度を高めることを目的として、中国主要6電力網の電源計画モデルを開発した。電力網を構成する電源の中長期的な変化を考慮に入れてベースラインCO<sub>2</sub>排出量を計算し、先進的発電技術の移転による温室効果ガス削減効果等を評価するためには電源計画モデルが適している。本サブテーマで構築する電源計画モデルは、表1.1に掲げる11の式で表現される線形計画モデルである。2006年を基準年に選び、2026年まで5年ごとに時間断面を設定している。

表1.1 中国6電力網電源計画モデルの制約式

制約式名	制約式の意味
電力需要充足式	発電量と電力需要がバランスすることを示す。
ピーク時設備稼働関係式	電力需要のピーク時間帯に発電可能な発電設備の割合を表す。
ピーク時予備力関係式	電力需要のピーク時間帯に発電可能な発電設備が十分確保できることを保証する。
運転出力の相互関係式	電力需要が高い時間帯ほど、多くの発電設備が稼働することを表す。
発電設備量の関係式	ある年に存在する発電設備量は、前年の保有設備量、新設設備量、改修による増減量、および廃止量で決まることを示す。
揚水用動力バランス式	揚水発電の揚水動力量と発電量との関係を表す。
年設備利用率関係式	発電設備の設備量と年間発電可能量（上限）の関係を表す。
発電量定義式	発電設備の発電量を定義する。
燃料消費量定義式	発電設備の燃料消費量を定義する。
環境負荷排出量定義式	電力網の環境負荷(CO <sub>2</sub> 、SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> )排出量を定義する。
CDMの追加性判定式	CDMプロジェクトの内部投資収益率(Internal Rate of Return、IRR)が予め設定したしきい値を超えないことを表す。判定は、CDMプロジェクトが実施される電力網、実施時期、および対象技術別に行う。
目的関数定義式	目的関数として計画期間中の総費用の現在価値換算値を定義する。総費用は、電力系統の設備費、燃料費、可変費からクレジットの販売収入を差し引いたものである。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 日本MARKALモデルによる我が国のCDMクレジット必要量の分析

平成19年度は、従来データのまま日本MARKALモデルを用い、我が国のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出削減の可能性を分析した。平成20年度は、「長期エネルギー需給見通し」やIEA World Energy Outlookで、エネルギー需要や化石燃料価格の見通しが改訂されたことから、これを日本MARKALモデルに反映し、分析を実施した。平成21年度は、「長期エネルギー需給見通し(再計算)」やIEA World Energy Outlookでのエネルギー需要や化石燃料価格の見通しの改訂のほか、「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」及び「中期目標検討委員会」参考資料などに基づいて、エネルギー供給技術、エネルギー需要技術とも、エネルギー効率、設備利用率、導入設備容量上限値を中心に全面的に見直した。

図1.5に設定した我が国の部門別活動指標を、図1.6に化石燃料価格を示す。改訂したエネルギー需要、化石燃料価格等を前提に、総システムコストと総CO<sub>2</sub>排出量とのトレードオフ関数を目的関数として、エネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の感度解析を実施した。図1.7に、我が国におけるエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量を示す。トレードオフ係数によって異なるが、CO<sub>2</sub>に対する重みを大きくした(CO<sub>2</sub>排出量1tをシステムコスト30000円に換算した)場合、国内対策のみで最大で1990年比で2020年に約15%、2050年に約50%(2005年比でおおむね60%)、削減が可能であるという結果が得られた。2020～2030年のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の値は、エネルギー需要を準拠した「長期エネルギー需給見通し」<sup>4)</sup>の値とほぼ同程度である。また、現状(2005年)比60～80%削減となっている2050年の長期目標に関しても、ほぼ達成可能なレベルであるとの結果になっている。

2020年のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量と、我が国の温室効果ガス排出量の中期目標、1990年比25%削減(エネルギー起源CO<sub>2</sub>)との差分から、森林吸収による削減分を除いたものが、CDMなどオフセットメカニズム(市場メカニズム)によるものとなる。すなわち、海外の排出枠を最大で約10%(1億2000万t-CO<sub>2</sub>/年)程度購入する必要があることになる。CDM、共同実施(JI)、国際排出量取引の割合は、将来時点における各クレジットの価格に依存するため、CDMクレジットの必要量に限定すると、本分析だけでは特定できない。なお、京都議定書での我が国の目標は、1990年比6%削減であるが、森林吸収源で3.8%、京都メカニズムで1.6%の削減が見込まれている。

分析の対象としている2020年頃は、次期枠組み、ポスト京都/第二約束期間となる。京都メカニズムの今後の取り扱いに関しては、今後の気候変動枠組条約締約国会議(COP)での合意を待つ必要がある。2013年以降の地球温暖化対策に関する国際枠組みでも、オフセットメカニズム(市場メカニズム)はその仕組みとともに、対象技術も拡大される(例えば二酸化炭素回収貯留(CCS)や原子力発電)ものと推測される。

なお、エネルギー需要に関しては、日本MARKALモデルは、産業部門は石油等消費動態統計に基づいて、ボイラ用、コージェネレーション用、直接加熱用、原料用、その他用、電力用に分けている。一方、中期目標検討委員会での分析では、個別の技術による省エネルギーを積み上げる方法を採用しており、両者の整合性は必ずしもとれていない。感度解析では有効エネルギー需要は一定としており、ライフスタイルの変化や社会システムの変革は考慮していない。これらによる削減を見込むことができるならば、排出枠の購入はさらに低減できる。

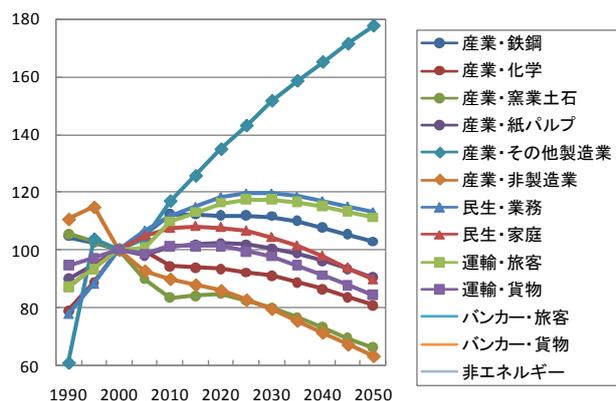


図1.5 MARKALで設定した部門別活動指標  
(2000年=100)

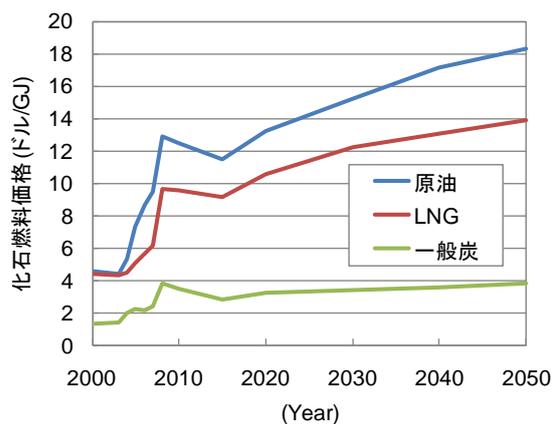


図1.6 MARKALで設定した化石燃料価格  
2000年ドル価格

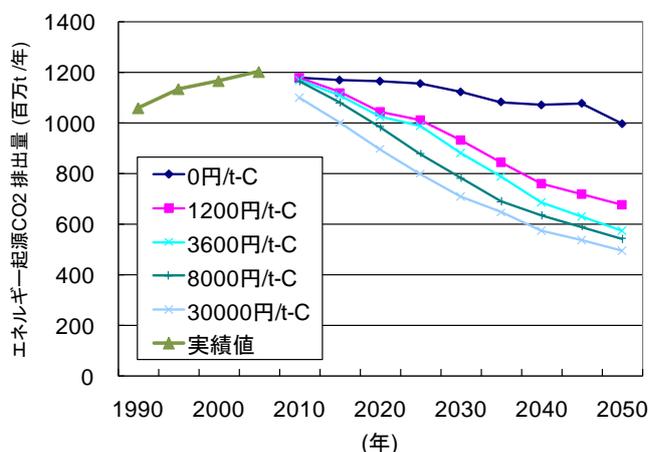


図1.7 我が国のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量

## (2) アジアGOALモデルによる地域別・技術別CDMクレジット供給可能量の分析

### 1) エネルギーシナリオ作成

需要シナリオは、AE02007の需要シナリオを用途別、エネルギー種別に細分して作成したものである。作成した需要シナリオを用いてアジアGOALモデルで計算したベースラインのCO<sub>2</sub>排出量は、図1.8に示す通りAE02007による2030年までのCO<sub>2</sub>排出量<sup>3)</sup>と概ね一致することを確認した。

### 2) アジアGOALモデルによる地域別・技術別CDMクレジット供給可能量評価手法の開発

#### ①大型再生可能エネルギー発電CDMのクレジット供給可能量評価

アジアGOALモデルを用いて、中国をホスト国とする大型再生可能エネルギー発電技術（風力発電、砂漠太陽光発電）のCDMで供給可能なクレジット量を分析した。対象とするCDMは、アジアGOALモデルにおける2008～2012年の期と、2013～2017年の期に実施されるとし、CDMプロジェクトのクレジット期間は14年ないし21年と想定した。図1.9(a)に2008～2012年におけるクレジット供給可能量、図1.9(b)に2013～2017年におけるクレジット供給可能量が、クレジット価格の上昇に連れて増加する様子を示す。風力発電CDMの場合、クレジット期間による供給可能量の差は比較的小さ

い。砂漠太陽光発電CDMの場合、クレジット期間14年では本検討の範囲内ではCDM事業として成立しなかった。

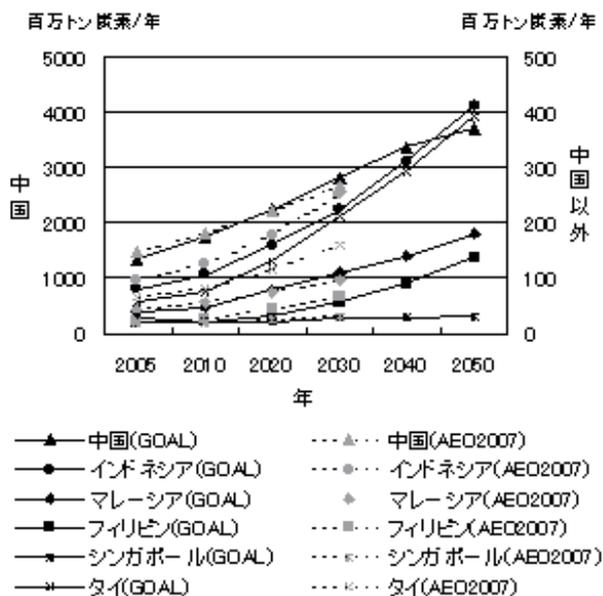


図1.8 ベースラインのCO<sub>2</sub>排出量(AEO2007との比較)

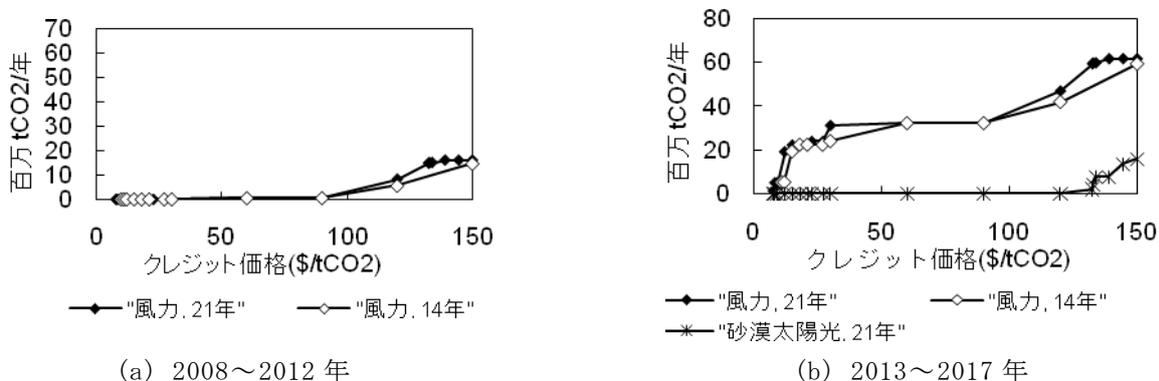


図1.9 中国における大型再生可能エネルギー発電CDMのクレジット供給可能量の分析結果

②中国6電力網電源計画モデルの開発

電源計画モデルを構築するためには、電力需要の将来シナリオ、電力網の年負荷持続曲線、燃料価格シナリオならびに技術・経済データ、の4種類の情報が必要である。これらのうち、電力需要の将来シナリオはこれまで通り引用文献1)の見通しに拠ることとして、各電力網の年負荷持続曲線、燃料価格シナリオおよび技術・経済データベースを構築し、電源計画モデルを開発した。

i 年負荷持続曲線

年負荷持続曲線とは、1年間に発生する毎時の電力需要を、最大から最小へ大きさの順に並べた曲線である。中国の電力網の年負荷持続曲線は公開されていないため、入手可能な情報<sup>2)</sup>に基づい

て主要電力網の年負荷持続曲線形状を推定した。推定に利用したのは、電力網のホームページ等で公開されている、2004年12月以降の月別最大需要、月平均日負荷率、月別電力販売量の情報、ならびに、引用文献2)で報告されている、華東電力網、華中電力網、および東北地区の大連、華北地区の北京、西北地区の蘭州、青海、南方地区の福州、南寧における夏季、冬季、および年平均日負荷曲線の典型的な形状に関する情報である。なお、1日の平均需要をその日の最大需要で割った値を日負荷率と呼び、日負荷率を1ヶ月単位で平均した値が月平均日負荷率である。2006年における各電力網の年負荷持続曲線の形状を推定した結果を図1.10に示す。図1.10の横軸は年を単位とする時間、縦軸は年間最大需要を1とした需要を表している。将来、各電力網の電力需要が増加しても、年間最大需要を基準とする年負荷持続曲線の形状は図1.10のまま変化しないと想定した。

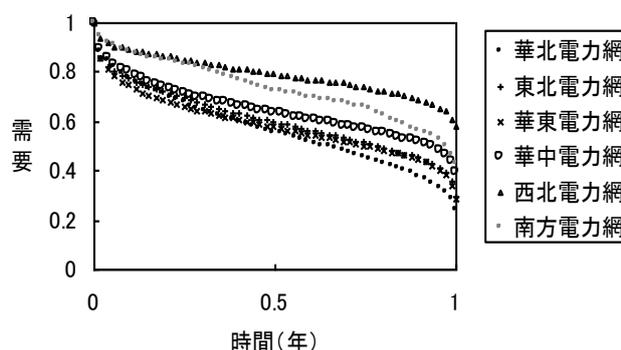


図1.10 中国の各電力網の年負荷持続曲線の形状

#### ii 電力網別エネルギー価格シナリオ

中国の火力発電所で使用する燃料の大部分を占める石炭は、主要な産地である山西省、陝西省、内蒙古自治区などから鉄道や船舶により各地に輸送される。各地の発電所の石炭炉前価格は、石炭の出荷地域、輸送手段ならびに輸送距離により場所ごとに異なるが、各電力網に関する実績データを入手することはできなかった。そこで、産炭地における出荷価格、産炭地から消費地までの輸送手段、輸送距離、輸送コストならびに輸送量を考慮した石炭の発電所炉前価格推定モデルを開発した。モデルを用いて設定した電力網別石炭炉前価格シナリオを表1.2に示す。なお、2011年以降は年0.5%の率で価格が上昇すると想定している。

また、輸入炭、核燃料およびLNGの輸入価格を表1.3のように想定した。沿岸部に位置する華東、南方などの電力網では、表1.2に示す中国炭か表1.3の輸入炭の安い方を選択できるものとした。

表1.2 中国における電力網別石炭炉前価格シナリオ

	2006	2011	2016	2021	2026	単位・他
華北・石炭	295	397	406	415	424	元/ton, 発熱量5500kcal/ton
東北・石炭	331	437	445	455	465	元/ton, 発熱量5500kcal/ton
華東・石炭	419	613	630	647	665	元/ton, 発熱量5500kcal/ton
華中・石炭	329	435	445	454	464	元/ton, 発熱量5500kcal/ton
西北・石炭	255	340	348	355	363	元/ton, 発熱量5500kcal/ton
南方・石炭	437	725	751	776	804	元/ton, 発熱量5500kcal/ton

表1.3 中国における輸入炭、核燃料およびLNGの価格シナリオ

	2006	2011	2016	2021	2026	単位・他
天然ガス(各地域共通)	2.05	2.23	2.43	2.64	2.87	元/m <sup>3</sup>
核燃料(各地域共通)	23400	23400	23400	23400	23400	元/tonウラン
輸入炭価格(各地域共通)	661	708	615	687	706	元/ton, 発熱量5500kcal/ton

## iii 技術・経済データ

想定した発電技術ならびに大気汚染対策技術の経済性データ<sup>3)4)</sup>を表1.4に示す。発電技術の内、超々臨界石炭火力発電は、国産化率を2011年において50%、2016年以降100%と想定する。

表1.4 中国における発電技術ならびに大気汚染対策技術の経済性データ

発電(元/kW)	2006	2011	2016	2021	2026
亜臨界石炭火力	3904	3904	3904	3904	3904
超超臨界石炭火力	3983	3983	3983	3983	3983
超臨界石炭火力	5355	4888	4420	4420	4420
IGCC石炭火力	6500	6500	6500	6270	6030
天然ガスCC	3005	3005	3005	3005	3005
原子力	11852	11852	11852	11852	11852
小規模水力	9115	9115	9115	9115	9115
中規模水力	6542	6542	6542	6542	6542
大規模水力	4398	4398	4398	4398	4398
風力	9000	9000	9000	9000	9000
揚水	3200	3200	3200	3200	3200

環境対策(元/kW)	2006	2011	2016	2021	2026
脱硫	250	240	230	220	210
脱硫+低NOxバーナー	280	270	260	250	240
脱硫+低NOxバーナー+脱硝	530	510	490	470	450
低NOxバーナー	30	30	30	30	30
低NOxバーナー+脱硝	280	270	260	250	240

## iv ベースラインの計算

発電技術のCDMによる排出クレジットは、電力網単位に定めたベースラインと火力発電のグリッドCO<sub>2</sub>排出係数に基づいて評価される。中国政府は大気汚染対策を強力に押し進めており、電力網の最適電源構成、ひいてはベースラインCO<sub>2</sub>排出量等にもその影響が現れる可能性がある。そこで、kWh当たりSO<sub>x</sub>排出量およびNO<sub>x</sub>排出量を低減するシナリオの下でベースラインCO<sub>2</sub>排出量等の評価する。具体的には、中国政府の政策を反映してkWh当たりSO<sub>x</sub>排出量を5年ごとにほぼ半減するシナリオ(ベースシナリオ)と、さらにkWh当たりNO<sub>x</sub>排出量も5年ごとにほぼ半減するシナリオ(強化シナリオ)を想定した分析を実施する。図1.11に示すのは、それぞれのシナリオにおける火力発電の最適電源構成(6電力網全体)に関する結果である。NO<sub>x</sub>排出制約が追加されることによって排煙脱硝(SCR)付き石炭火力が増加するとともに、2016年以降IGCCが大幅にベースラインに組み込まれるようになることが見て取れる。表1.5には、各シナリオの下で推計した火力発電のkWh当たりCO<sub>2</sub>排出量を示す。強化シナリオでは2016年以降IGCC等の高効率発電技術の設備量が増えるために、ベースケースと比較して火力発電のグリッドCO<sub>2</sub>排出係数も低下する。これらの結果は、サブテーマ(2)、サブテーマ(3)が実施する評価のためのデータとして利用された。

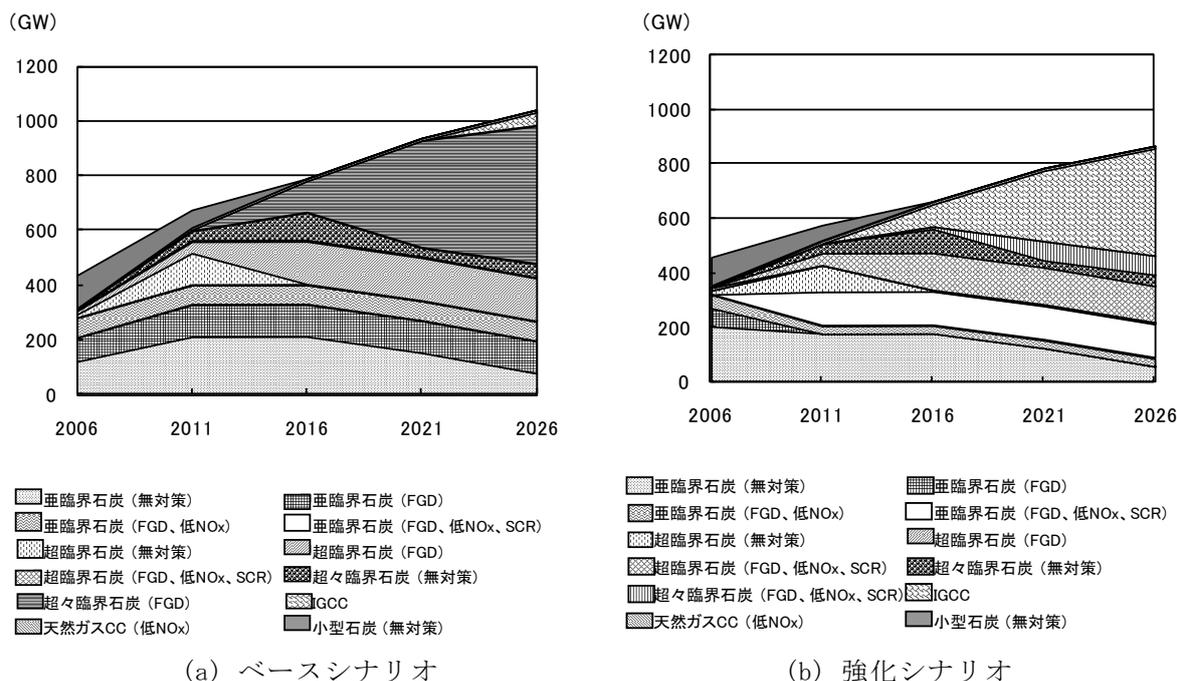


図1.11 異なる環境制約条件の下で評価した中国の最適火力電源構成(6電力網の合計)

表1.5 異なる環境制約条件の下で推計した中国の火力発電のグリッドCO<sub>2</sub>排出係数 (g-C/kWh)

(a) ベースシナリオ

	2006	2011	2016	2021	2026
華北網	267	247	218	198	184
東北網	276	245	220	195	181
華東網	255	229	205	191	178
華中網	276	246	202	182	178
西北網	280	257	228	210	193
南方網	261	243	221	191	176
6 電力網	266	242	213	194	181

(b) 強化シナリオ

	2006	2011	2016	2021	2026
華北網	267	249	219	197	180
東北網	276	245	218	190	174
華東網	255	230	202	187	174
華中網	276	246	202	177	173
西北網	280	257	228	207	191
南方網	261	243	220	186	172
6 電力網	266	242	213	191	177

## v 先進的火力発電によるCDMポテンシャルの評価

CDMプロジェクトは追加性を持つことが必要とされる。たとえば発電技術のCDMプロジェクトの場合、売り電収入だけでは経済的に成り立たないが、そこにクレジット販売収入を加えると経済的に事業が成立する必要がある。本研究では、発電した電力の買い取り価格、クレジット価格、クレジットを販売できる年数(クレジット期間)などをパラメータとして、CDMポテンシャルの大きさを地域別、技術別に評価する手法を開発した。また、開発した手法を中国6電力網電源計画モデルに適用して、脱硫脱硝付き超超臨界石炭火力発電(USC)、石炭ガス化複合サイクル発電(IGCC)、天然ガス複合サイクル発電(NGCC)によるCDMポテンシャルを試算する。試算には次の条件を用いる。

- 1) プロジェクトの事業性は内部投資収益率が8%を超えるかどうかで判定する(この基準は、中国をホスト国とするCDMプロジェクトのPDDで共通に使用されている)。
- 2) クレジット(CER)価格は\$20/tCO<sub>2</sub>、または\$25/tCO<sub>2</sub>を想定する。
- 3) 電力買い取り価格は、0.25元/kWhまたは0.30元/kWhを想定する。
- 4) クレジット期間は7年を想定する。
- 5) CDMプロジェクトは2011年および2016年に実施可能である。2011年に実施されるのはUSCおよび

NGCCのプロジェクトであり、2011年に実施されるのはUSC、NGCC、およびIGCCのプロジェクトである。

- 6) 大気汚染に関しては、kWh当たりSO<sub>x</sub>排出量を5年ごとにほぼ半減するシナリオ(ベースシナリオ)を想定する。
- 7) 割引率は年10%とする。

2016年におけるCDMポテンシャルの評価結果を図1.12および図1.13に示す。図1.12では電力買い取り価格を0.25元/kWhと想定し、図1.13では電力買い取り価格を0.30元/kWhと想定した。ともに、左はクレジット(CER)価格が20ドル/tCO<sub>2</sub>の場合、右はクレジット(CER)価格が25ドル/tCO<sub>2</sub>の場合の結果である。

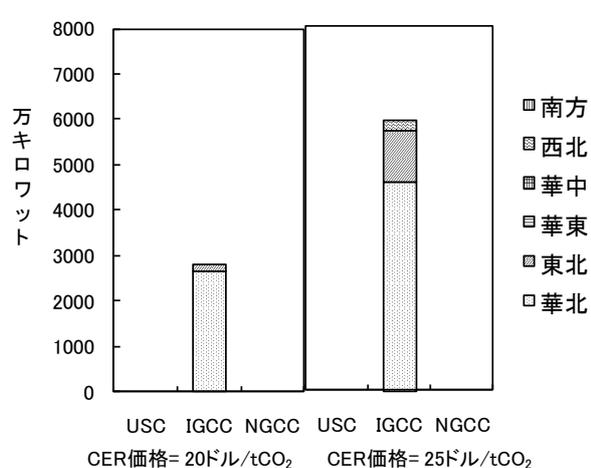


図1.12 中国における2016年のCDMクレジット供給可能量 (クレジット期間7年、電力買い取り価格0.25元/kWh)

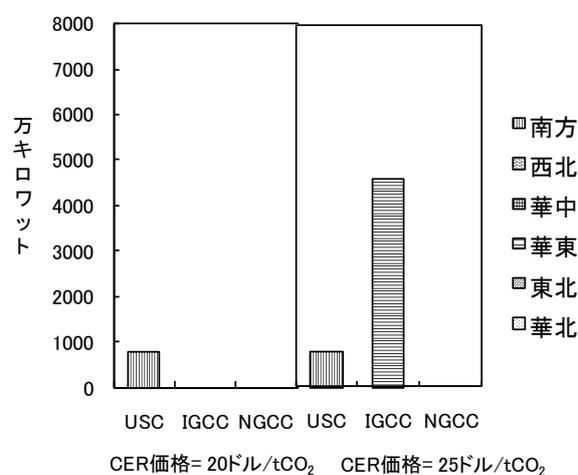


図1.13 中国における2016年のCDMクレジット供給可能量 (クレジット期間7年、電力買い取り価格0.30元/kWh)

当然ながらクレジット価格が高い方がCDMのポテンシャルは大きい。一方、電力買い取り価格が高いと採算がとれるプロジェクトの条件が緩やかになるために、CDMのポテンシャルは逆に小さくなる。また、電力買い取り価格が0.30元/kWhの場合に、CDMポテンシャルの高い地域が石炭価格の高い南方電力網および華東電力網に集中するのも、他地域では採算がとれるプロジェクトの条件がより緩やかになるからであると考えられる。技術的には、ここに示した四つのケースではIGCCのポテンシャルが大きくなった。天然ガス複合発電サイクルは発電コストが高いため、電力買い取り価格がもっと高くないと導入されない。

#### 考察

サブテーマ(1)のエネルギーシステムモデルによるCDMクレジット供給可能量の評価手法の開発に関しては、中国の6電力網の電源計画モデルを開発し、CDMの追加性、事業収益性という二つの要件を組み込んで評価する手法と合わせて、地域別・技術別のCDMクレジット供給可能量を実際のCDMプロジェクトと同様に、詳細に評価できるようにした点に新規性がある。この分析結果は、サ

ブテーマ(3)で実施した中国における先進的火力発電技術によるCDMの費用便益分析で、ベースライングリッド排出係数の経年変化を考慮して便益を評価できるようにした点で、先行研究にはない大きな学術的進展につながっている。サブテーマ(1)に関しては、研究計画に掲げた内容はおおむね予定通り実施することができた。

特に、日本MARKALモデルおよびアジアGOALモデルと、それらを用いた分析が注目を集め、シンガポール大学から招待講演を依頼されるとともに、台湾中原大学から訪問を受けた。また、サブテーマ(1)の成果は、CDMや地球温暖化対策に造詣の深い国内外の専門家を招聘し、本研究課題の成果報告を兼ねて開催した地球温暖化シンポジウム「次期枠組みに向けたCDMの現状と今後」でも発信した。アジアGOALモデルや電源計画サブモデルは、2010年度から実施される E-1001 「アジア低炭素社会の構築に向けた緩和技術のコベネフィット研究」でもさらに発展され、応用されるものと期待される。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

マクロなエネルギーシステムモデル、すなわち日本MARKALモデル、アジアGOALモデルによる、CDM技術評価手法を開発した。我が国のCDMクレジット必要量の分析を実施するとともに、ケーススタディとして、中国、インドにおける先進的火力発電等のエネルギー供給技術によるCDMを取り上げ、地域別・技術別CDMクレジット供給可能量を評価し、開発手法の有効性を実証した。

エネルギーシステムモデルに実際のCDMと同様の追加性と収益性の二つの要件を組み込んでCDMクレジット供給可能量を評価した点で、先行研究にはない大きな学術的進展が得られた。

### (2) 地球環境政策への貢献

環境省の日中や日本インドネシアの「コベネフィット研究とモデル事業の協力実施」などにおいて、手法面で貢献できるものと期待している。また、オフセットメカニズムを通じた海外排出枠の獲得の際に、一次スクリーニング手法として活用されるよう、成果の普及に努めたい。

## 6. 引用文献

- 1) 伊藤浩吉、他：「世界/アジアエネルギーアウトック2007」  
URL=<http://eneken.ieej.or.jp/report/> (アクセス日2007/10/23)
- 2) 趙希正、他：「中国電力負荷特性分析与予測」(中国語)、第6章、中国電力出版社 (2001)
- 3) 祁恩蘭、他：“The Analysis of Economics & Competitiveness of Nuclear Power in Our Country”(中国語)、期刊核電 (2004)、  
URL=[http://www.nuc-power.com/qikan/2004\\_02/2004\\_02\\_02.htm](http://www.nuc-power.com/qikan/2004_02/2004_02_02.htm) (アクセス日2009/6/10)
- 4) International Energy Agency, “Cleaner Coal in China”, Chapter V, OECD (2009)
- 5) 総合資源エネルギー調査会需給部会：「長期エネルギー需給見通し」(2008.5) 等の想定」、第4回参考資料4 (2009.2)
- 6) 総合資源エネルギー調査会需給部会：「長期エネルギー需給見通し(再計算)」(2009.8)
- 7) OECD/IEA: World Energy Outlook 2009, OECD, 63-68 (2009)
- 8) Cool Earth-エネルギー革新技术計画 (2008.3)

9) 地球温暖化問題に関する懇談会中期目標検討委員会：「仮分析結果における活動量、技術導入

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 村田晃伸、李哲松：二酸化炭素排出制約下における中国の産業部門の省エネルギー技術導入に関するモデル分析」、*日本エネルギー学会誌*、87, 11: 938-945 (2008)
- 2) Murata A., Endo E.: Developing a generation planning model of the Chinese power grids for the assessment of CDM activities. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 2009*, (2009)

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Murata A.: *Proceedings of the Renewable Energy 2008, Busan. Korea, (2008)*  
"Modeling of CDM Activity to Introduce Large-Scale Renewable Power Plant in China"

### (2) 口頭発表（学会）

- 1) 村田晃伸、遠藤栄一：平成20年電気学会電力・エネルギー部門大会（2008）  
「技術移転評価のための中国の系統計画モデル開発(1)」
- 2) 村田晃伸、遠藤栄一、第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2009）  
「技術移転評価のための中国の系統計画モデル開発(2)」
- 3) Endo E., Murata A., Okajima K., Nomura N. and Tokimatsu K.: *International Energy Workshop 2009, Venice. Italy, 2009*  
"Integrated assessment for CDM Activities in Asian countries using interlinkages of energy system models and life-cycle assessment models"
- 4) Endo E., Murata A., Okajima K., Nomura N. and Tokimatsu K.: *2nd Energy Economy Modeling Workshop, Singapore, 2009*  
"Integrated assessment of CDM activities in Asian countries by combining energy systems analysis and life-cycle assessment"(Invited)
- 5) Endo E., Murata A., Okajima K., Nomura N. and Tokimatsu K.: *International Energy Workshop 2010, Stockholm. Sweden, 2010*  
"Integrated Assessment of CDM Activities in Asian Countries from potential of credit and cost-benefit including co-benefits"（アブストラクト採択済み）

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 地球温暖化シンポジウム「次期枠組みに向けたCDMの現状と今後」（2010年2月24日、筑波大学総合研究棟B、観客約30名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし

## B-074 アジア地域における緩和技術の統一的な評価手法の開発に関する研究

## (2) ボトムアップ型のエネルギーチェーンLCAモデルを用いた緩和技術評価に関する研究

国立大学法人筑波大学

大学院システム情報工学研究科 リスク工学専攻 岡島敬一

平成19～21年度合計予算額 15,575千円

(うち、平成21年度予算額 4,928千円)

上記の予算額は、間接経費を含む。

[要旨] アジア地域におけるエネルギー供給技術によるCDMを対象とした評価手法の開発及び開発手法の適用を通じた有効性の実証を目的として、エネルギーチェーン多層評価システム(エネルギーチェーンLCAモデル)の各要素技術と各プロセスフローについて中国及びインドを中心とするアジア地域への適用方法を検討し、温暖化緩和の可能性の大きい特定地域を対象に緩和効果を定量的に評価した。また、中国におけるエネルギーチェーン基礎データに関し、発電所ヒアリングによるデータ収集を進めた。具体的には、アジア地域において大きなCDMクレジットポテンシャルがあると評価された中国及びインド各地域における先進的火力発電技術導入に対して、エネルギーチェーン多層評価システムを用いて、CDMのコベネフィットを含む費用便益分析のためのライフサイクルアセスメントを行った。具体的には中国の山西省、新疆ウイグル自治区、上海市、重慶市、遼寧省、広東省、インドではデリー、ムンバイ、コルカタの計9地域で、それぞれに石炭ガス化複合発電(IGCC)、天然ガス複合発電(NGCC)、超々臨界圧石炭火力発電(USC)を用いた新規プラントが建設される場合を想定した。先進的火力発電を導入することで大幅なCO<sub>2</sub>排出量削減が示され、特に既存の火力発電の効率が30%以下の低い地域では先進的火力発電導入効果大きい。発電コストは燃料輸送費について地域間や輸送手段で差がみられ、炭鉱から遠い上海市や広東省と炭鉱から近い山西省についてトラック輸送をした場合の比較をすると総発電コストに占める燃料輸送費の差が大きい。また中国におけるトラック輸送費は鉄道輸送費のおよそ10倍であったが、インドでは若干鉄道輸送費が低い程度であった。発電コストを技術間で比較すると、天然ガス火力発電は燃料費が高いため総じて石炭火力発電より高く導入に際して不利となる。しかし天然ガス火力発電は導入によるCO<sub>2</sub>削減量大きいという利点があるため、CO<sub>2</sub>削減コスト原単位で比較した場合地域・燃料輸送方法によっては石炭火力発電に対し優位性を持つことを明らかにした。

[キーワード] ライフサイクルアセスメント(LCA)、エネルギーチェーン、CO<sub>2</sub>排出原単位、SO<sub>x</sub>排出、NO<sub>x</sub>排出

## 1. はじめに

中国では近年の急速な経済発展により、エネルギー需要が増加し、電力供給の問題や環境問題もますます顕著になってきた。2007年における全世界の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量は28,829百万t-CO<sub>2</sub>に対し、中国はついに第一位となり20.7%を占める<sup>1)</sup>。アメリカ、ロシアに続きインドも第4位であり、中国やインドなどのアジアの途上国では急速な経済発展によってエネルギー需要が増大し、

それにともない今後もCO<sub>2</sub>排出量の大幅な増大が見込まれている。特に発電部門では中国・インドともに大部分を石炭に頼った電源構成であり、CO<sub>2</sub>排出の大きな要因となっている。中国全体の発電電力量のうち石炭によるものが約7割にのぼり、石炭火力発電所からの硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)排出量は全体の約6割を占めるという状況の中で、発電所新設時の発電技術の選択は今後のエネルギー需給体制や汚染物質排出管理において重要な問題である。そこで本サブテーマでは、ボトムアップ型ライフサイクル評価モデルであるエネルギーチェーン多層評価システムを用いた評価を地域別に進めてきた。中国における発電技術；石炭ガス化複合発電(IGCC)、天然ガス複合発電(NGCC)、超々臨界圧発電(USC)導入の地域別ライフサイクルアセスメントを行い、そのエネルギー収支やCO<sub>2</sub>排出量、SO<sub>x</sub>排出量を明らかにすることで発電技術の立地別の特性や汚染物質削減ポテンシャルの分析を進めてきている。対象地域を中国6地域へ拡大し、加えてアジアに置いて中国に次いで削減ポテンシャルが見込まれるインドの3地域を加え、発電技術の立地別の特性や排出削減ポテンシャルの分析を行う。

## 2. 研究目的

サブテーマ(2)では、ミクロなライフサイクル評価モデルであるエネルギーチェーン多層評価システムを用いて、サブテーマ(1)で定量的に算出される技術別・地域別・時間別CDMポテンシャル推計量に対応した供給チェーン分析を効率性・環境性・経済性について実施し環境負荷量をサブテーマ(3)に提供することを目的としている。中国における風力発電及び先進火力発電技術；石炭ガス化複合発電(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)、天然ガス複合発電(NGCC: Natural Gas Combined Cycle)、超々臨界圧発電(USC: Ultra Super Critical power plant)導入のライフサイクルアセスメントを行い、評価を進める。また、対象地域を6地域に拡大しさらにインドにおける3地域についても評価を進める。エネルギー収支、CO<sub>2</sub>排出量に加え、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出削減量を明らかにすることで、アジア地域におけるエネルギー供給側技術のCDM実施へ向けた分析を行うことを目標とする。

## 3. 研究方法

### (1) エネルギーチェーン多層評価

#### 1) エネルギーチェーンの概要

エネルギー源は主に石油、石炭、天然ガス、原子力、再生可能エネルギー(太陽光、風力、バイオマスなど)である。それらのエネルギー源は燃料採掘、輸送、変換・転換、利用などの流れからなるエネルギーシステムによって、エネルギーを供給している。エネルギーシステムには火力発電所や原子力発電所などの大規模なものから、太陽光発電設備のような小規模なものまであり、複雑なエネルギー需給体系を構成している。また、近年ではエネルギー需給経路が複雑な分散型エネルギーシステムや水素エネルギー利用システムなどの利用が導入されている。そのため、エネルギーシステムのCO<sub>2</sub>排出量や発電コストなどの評価を行う際に、火力発電所や原子力発電所などの大規模発電設備と、分散型電源のような小規模発電設備との比較のように、全く別のプロセスを経てエネルギーを供給するシステムを想定した場合、従来のような利用時のプロセスに限った評価では評価範囲が限定的であり不十分である。こうしたエネルギーシステムの比較をするには、エネルギー源の燃料採掘から輸送、貯蔵、変換、利用などエネルギーのサプライチェーン全

体を通じた客観的な評価が必要である。実際に、様々な研究機関も新規のエネルギーシステムの導入を分析する際には、エネルギーがどのようなプロセスを経て供給されるかという、サプライチェーン全体を通じた評価を行い、そのエネルギーシステムの環境性、経済性を明らかにしている。様々な経路を組み合わせたエネルギーの流れを「エネルギーチェーン」と定義し、エネルギーに関するサプライチェーン全体を考慮することでエネルギーシステムの客観的な評価を行う手法を「エネルギーチェーン評価手法」と呼ぶ。

## 2) エネルギーチェーン多層評価システム

本研究ではこのエネルギーチェーン評価手法を基に、エネルギーチェーン全体のエネルギー変換効率、CO<sub>2</sub>排出量といった環境性、各種プロセスの利用コストといった経済性など、多層的に評価を行うことが出来る「エネルギーチェーン多層評価システム」を用いて分析を行う。エネルギーチェーン多層評価システムではエネルギー供給の流れを原料、採掘、前処理、海外輸送、貯蔵、転換・変換、国内輸送、利用といった経路に分類し、これらをつなぎ合わせることでエネルギーチェーンを構成する。この最小単位はエネルギーチェーン多層評価システムの画面上で1つのボックスとして表示され、このボックスを組み合わせることでエネルギーチェーンを通じた評価が実施できる。評価内容により分析を効率シート、環境性シート、経済性シートのようにシートで分割し、各層で計算を実行することで、多層的に評価を行う。エネルギーチェーン多層評価システム の概念を図2.1に示す。

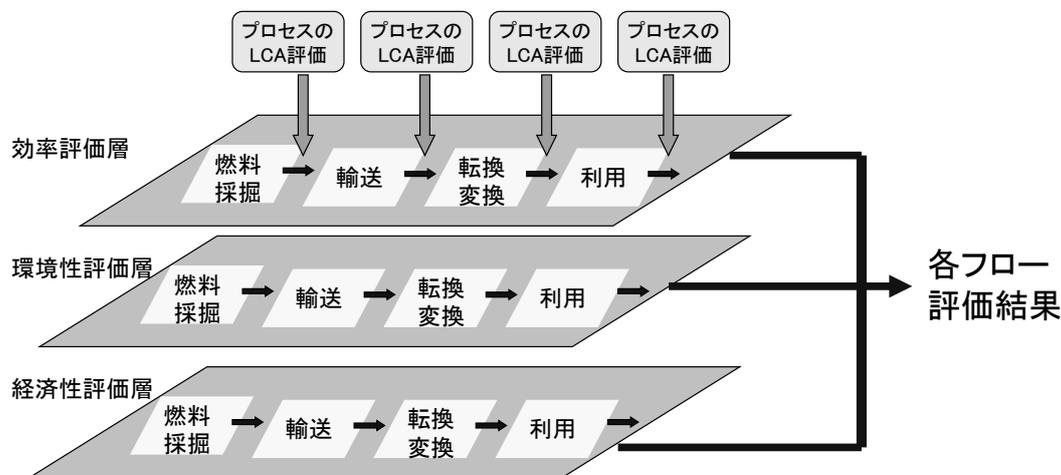


図2.1 エネルギーチェーン多層評価システム の概念

### (2) 検討対象

本研究では、発電技術として新エネルギー利用である風力発電、石炭の高効率利用技術であるIGCC、石炭からの燃料転換としてNGCC、最新の石炭火力発電であるUSCを想定した。製造、建設、運用、各段階での輸送を考慮し、各段階を通じての評価を行った。風力発電が中国新疆ウイグル自治区に、他の技術が新疆ウイグル自治区、山西省または上海に新規建設される場合を設定した。想定した導入される発電技術の設備容量は、風力発電は30MW（1.5MW機20基）、IGCC・NGCC・USCは1000MWである。風力発電に関しては、実際に設備容量が同程度の風力発電設備がCDM案件として導入されている実績がある。IGCC・NGCC・USCについては、CDMという制度の側面から、最新技術

が導入されるという仮定のもと、設備容量1000MWと設定した。各発電プラントの概要を表2.1に、各地域の中国における位置と天然ガスの供給経路を図2.2に示す。

表2.1 検討対象とする発電プラント

	風力発電	IGCC	NGCC	USC
設備容量 (MW)	30	1,000	1,000	1,000
設備利用率 (%)	35	75	75	75
効率 (%)	-	45	50	43
耐用年数 (年)	20	30	30	30

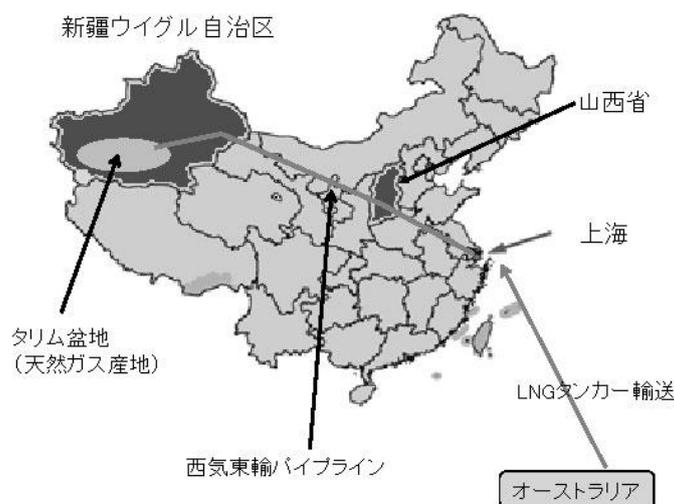


図2.2 天然ガス輸送経路

### (3) 評価範囲と前提条件の設定

設備の製造、輸送、建設、運用、燃料採掘、転換変換、燃料輸送を分析の範囲とした。輸送設備の製造、プラントの廃棄、リサイクルは範囲外とした。機器は日本で製造され、現地まで海上輸送、陸上輸送を経て輸送されるとした。日本から中国の港までの距離は1,000km、中国港から山西省までの距離は500km、新疆ウイグル自治区までの距離は3,000kmである。

燃料に関して、石炭は発電プラントから200km離れたところから石炭トラックで輸送されるとした。天然ガスについては、新疆ウイグル自治区内のタリム盆地で生産された天然ガスを、パイプライン輸送、またはLNGローリー輸送により新疆ウイグル自治区、山西省、上海へそれぞれ200km、2,500km、3,000km輸送されると設定した。上海ではこの他にオーストラリアからLNGタンカー輸送により燃料が供給される場合を設定した。

LNGローリー車でLNGを輸送することは日本の大手都市ガス会社等でも実施しているが、輸送距離が大きく異なる。日本では数百km程度であるのに対し、広匯LNG社では実走距離で3,000～6,000km以上離れた中国沿岸部まで輸送する<sup>2)</sup>。日本より輸送距離が一桁多く、最大で10日間かけて走破する。中国では、輸送ルート上に300～400kmおきに「ステーション」と呼ばれる運転手の休憩やローリー車の点検を行うポイントが設置されている。LNGローリー輸送では長距離を郵送することで輸送費がかさみ、パイプラインガス価格よりかなりLNG価格が割高になってしまう。しかし、中国の現状では、天然ガスの末端顧客までのパイプライン網はほとんどなく、そういった地域の

天然ガス需要を輸入LNG だけでは満たせないというのも事実であり、供給が安定しているLNGは多少割高でも需要が高い。

風力発電所のタワーはそれぞれ内部ケーブルで変圧器に接続され、外部ケーブルで電力グリッドまで50km送電されるとした。IGCC・NGCC・USCについてはケーブルでの電力グリッドへの接続は無視できるとし、考慮していない。予想される発電電力量は発電端での値を用いた。図2.3にエネルギーチェーン多層評価システム上で表示される各発電プラントのエネルギーチェーンを示す。分析指標としてCO<sub>2</sub>排出原単位、エネルギー収支比、CO<sub>2</sub>排出削減量、発電コストを用いた。CO<sub>2</sub>排出削減量では、導入された発電技術が発電した電力量が既存火力発電技術によって供給された場合をベースラインとして設定した。発電コストは所要費用を年間の発電量で割った値である。減価償却については、法定耐用年数15年、残存価値10%とし実質耐用年数にわたっての評価を行った。



図2.3 各発電技術に関するエネルギーチェーン

#### 4. 結果・考察

##### (1) CO<sub>2</sub>排出原単位

今回設定したすべての発電技術のCO<sub>2</sub>排出原単位評価結果を図2.4に示す。比較のために用いた既存火力発電の排出原単位は、各地域のエネルギーバランス表<sup>3)</sup>から得られた火力発電へ投入された石炭合計使用量と火力発電の発電電力量から算出したもので、運用のみを考慮したものである。以下の各グラフにおいて、地域略称は山(山西省)、ウ(新疆ウイグル自治区)、上(上海)を意味し、天然ガス供給方法の略称はパ(パイプライン)、ロ(LNGローリー)、タ(LNGタンカー)を意味してい

る。

風力発電が最も小さい値となったが、これは自然エネルギーがエネルギー源であるため、燃料からの排出がないからである。風力発電では、大部分が設備製造や建設からの排出であることがわかる。火力発電では運用段階、つまり燃料の燃焼が発電プラントのライフサイクルにおいて最も環境負荷が高いことがわかる。天然ガスと石炭という燃料の違いが大きき要因となって、NGCCと比べIGCC・USCのCO<sub>2</sub>排出原単位が大きくなった。運用段階のみ考慮した既存火力発電と比較すると、今回検討した技術では、どの技術、どの地域、どの燃料供給方法でも、ライフサイクル全体を考慮しているにもかかわらず、CO<sub>2</sub>排出原単位は小さくなった。このことから今回検討した技術の導入が、中国において発電プラントの環境影響緩和に貢献し、CO<sub>2</sub>排出削減が得られることが確かめられた。

地域別の検討結果では燃料輸送による影響が顕著となった。LNGローリー輸送では耐用年間に多くの燃料を片道数千kmにわたってLNGローリー車で輸送するため、燃料輸送におけるCO<sub>2</sub>排出が大きくなる。LNGタンカーの場合も同様に燃料輸送に関わるCO<sub>2</sub>排出が大きく影響する。一方、パイプライン輸送では燃料輸送におけるCO<sub>2</sub>排出が小さい。燃料採掘段階では、LNGローリー・LNGタンカーのLNG利用において、液化プロセスからのCO<sub>2</sub>があるために液化プロセスを含まないパイプラインと比べてCO<sub>2</sub>原単位が大きくなる。

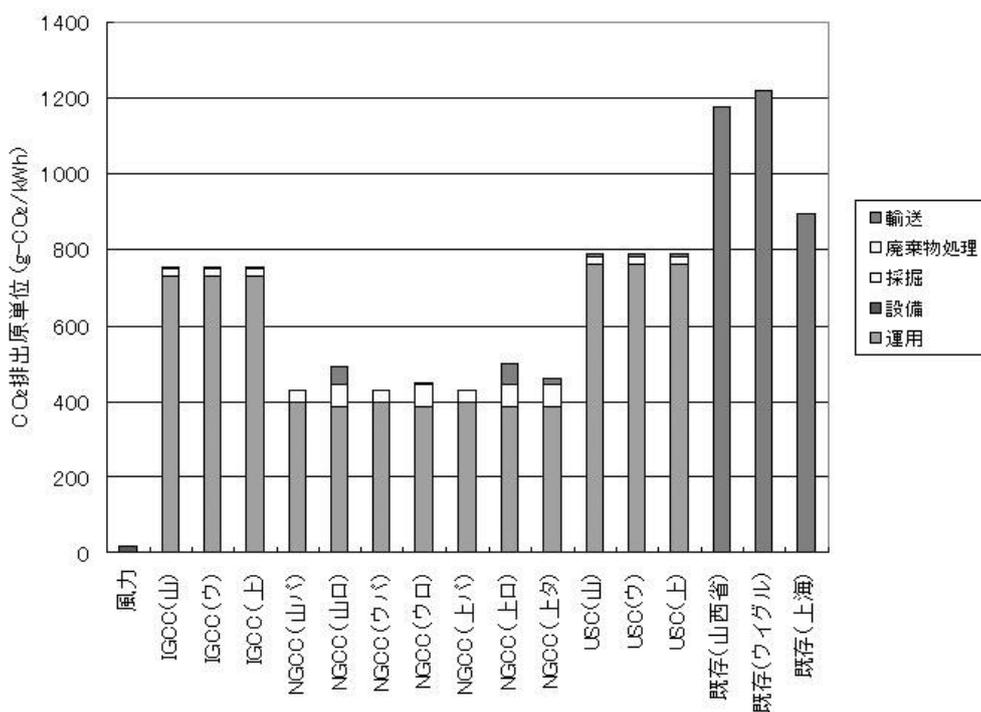


図2.4 CO<sub>2</sub>排出原単位評価結果

CO<sub>2</sub>排出原単位が各段階においてどのように積算されているか評価した結果を図2.5に示す。各技術の代表的なものを抽出して表示している。転換・変換部門、すなわち発電において、石炭を燃料とするIGCC・USCはCO<sub>2</sub>排出原単位が大きく伸びていることがわかった。CO<sub>2</sub>排出原単位に大きく影響するのは燃料の燃焼からの排出だということがわかる。NGCCでは燃料である天然ガスのCO<sub>2</sub>排出係数が小さいことや、NGCCの効率が比較的高いことから、石炭燃料の技術と比べて発電時にお

けるCO<sub>2</sub>排出量は少なく、IGCC・USCの約2分の1という結果となった。

輸送部門では、LNGローリーが輸送段階において他と比べてCO<sub>2</sub>排出が多いということがわかる。また、燃料採掘段階を比較すると、石炭よりも天然ガスの採掘でCO<sub>2</sub>排出が大きい。天然ガスのなかでは液化プロセスを含んでいるものが、液化プロセスなしものの約2倍もCO<sub>2</sub>排出があることがわかる。天然ガスを燃料として使う場合には、液化プロセスを含まないで済む技術の方がCO<sub>2</sub>排出原単位を抑えられる。

風力発電では燃料の採掘や前処理、燃料の輸送がないため機器素材、機器製造、機器輸送、建設、運用のみであり、このグラフでそれらは一部門に統合されているため、1点で表示されている。

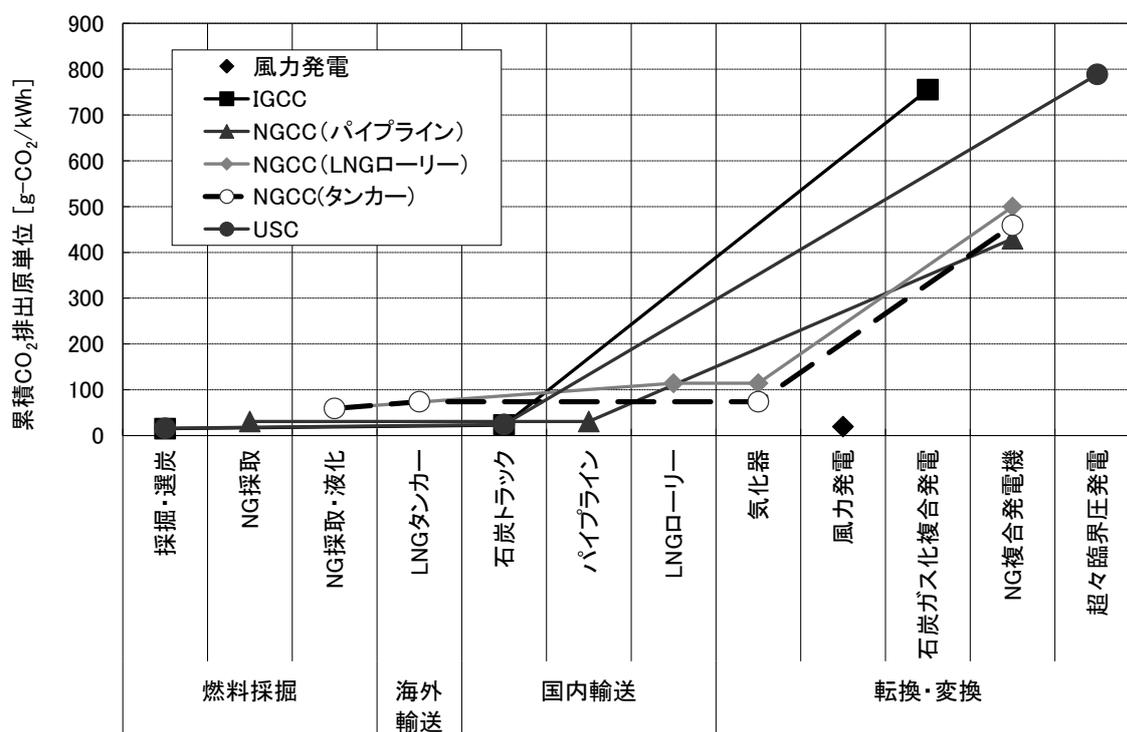


図2.5 エネルギーチェーン積算CO<sub>2</sub>排出原単位

## (2) エネルギー収支比

エネルギー収支比は発電プラントが耐用年間に生産した電力が、その電力供給に必要な発電設備の建設や運用に投入されたエネルギー(発電のための投入エネルギーを除く)に対してどの程度の比率になるかを示したものである。エネルギー収支比が1以上になることが生産システムとしての成立条件となる。エネルギー収支比の評価結果を図2.6に示す。エネルギー収支比は風力発電が高く、NGCCで燃料供給方法にLNGローリー・タンカー輸送を選んだ場合が低い値となった。風力発電は他と比べて、燃料採掘や燃料輸送もなく、投入エネルギーが少なく済むのでエネルギー収支比が高くなる。

NGCCは燃料供給方法によって大きな変動がみられた。LNGローリー・タンカー輸送を想定したケースでは、そのエネルギー収支比はパイプライン輸送の場合と比べ1/3~1/5程度になってしまう。これは、天然ガスの液化プロセスへの投入エネルギーが大きいためである。NGCCに関しては、エ

エネルギー収支比という観点からも、天然ガスの液化プロセスを含むか含まないかにより結果が変わってくる。

最もエネルギー収支比が低くなったのはNGCC（上海・LNGローリー）であったが、その値は1.9であり、生産システムとしての成立条件であるエネルギー収支比が1以上という要件は全ての技術が満たしている。

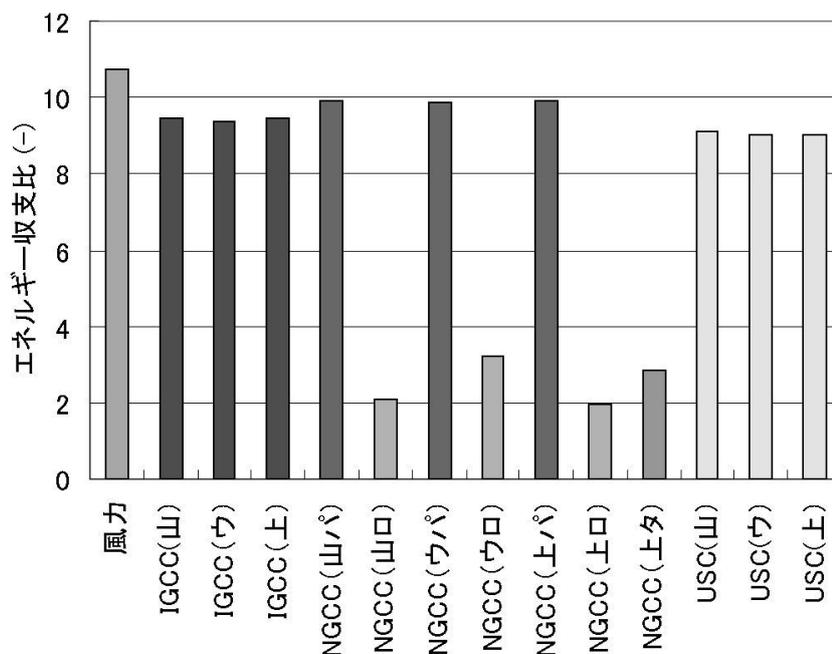


図2.6 エネルギー収支比

### (3) CO<sub>2</sub>排出削減量

#### 1) 技術別・地域別排出削減量比較結果

CO<sub>2</sub>排出削減量の評価結果を図2.7に示す。風力発電に関しては設備容量を1,000MWに換算した値を用いた。CO<sub>2</sub>排出削減量は各地域のベースラインの排出原単位<sup>3)</sup>を元に算出した。最も多くCO<sub>2</sub>排出削減量が得られる結果となったのは新疆ウイグル自治区に燃料供給方法にパイプラインを選択したNGCCプラントを導入した場合となった。これは、燃料輸送や天然ガス液化プロセスでのCO<sub>2</sub>排出が少ないこと、燃料としての天然ガスのCO<sub>2</sub>排出係数が小さいこと、NGCCの効率が高いこと、新疆ウイグル自治区の既存火力発電のCO<sub>2</sub>排出係数が大きいことが要因である。

CO<sub>2</sub>排出削減量に関しては同じ発電技術でも、地域によって大きな変動が出る結果となった。地域によって既存火力発電のCO<sub>2</sub>排出係数の値が異なることが原因である。上海においては、IGCC・USCを導入してもCO<sub>2</sub>排出削減は少なく、山西省や新疆ウイグル自治区と比べIGCC・USCでは1/3～1/4、NGCCでは1/2程度の削減量しか見込めないことがわかった。これは、上海の既存火力発電のCO<sub>2</sub>排出係数が小さいことが原因である。上海での石炭生産はなく、他地域からの電力供給に頼っていることから、上海地域内での石炭への依存度が低く、それによって上海での既存火力発電のCO<sub>2</sub>排出係数が低くなっていると考えられる。より多くのCO<sub>2</sub>排出削減量を得ることを目的とするならば、既存火力発電のCO<sub>2</sub>排出係数が大きい地域にCO<sub>2</sub>排出係数が小さく発電電力量が多い技術を導入す

ることが必要である。発電プラントのライフサイクルでのCO<sub>2</sub>排出量に大きく影響しているのは、燃料の燃焼からのCO<sub>2</sub>排出であり、CO<sub>2</sub>排出係数が大きい石炭を燃料として用いているIGCC・USCは、天然ガスを燃料とするNGCCと比較して、発電時に多くのCO<sub>2</sub>を排出するためCO<sub>2</sub>排出削減量は小さくなる。風力発電は、CO<sub>2</sub>排出原単位は最も小さいものの、設備利用率や耐用年数が他の発電プラントよりも低いので、設備容量を1,000MWに換算してもCO<sub>2</sub>排出削減量は多くならない。

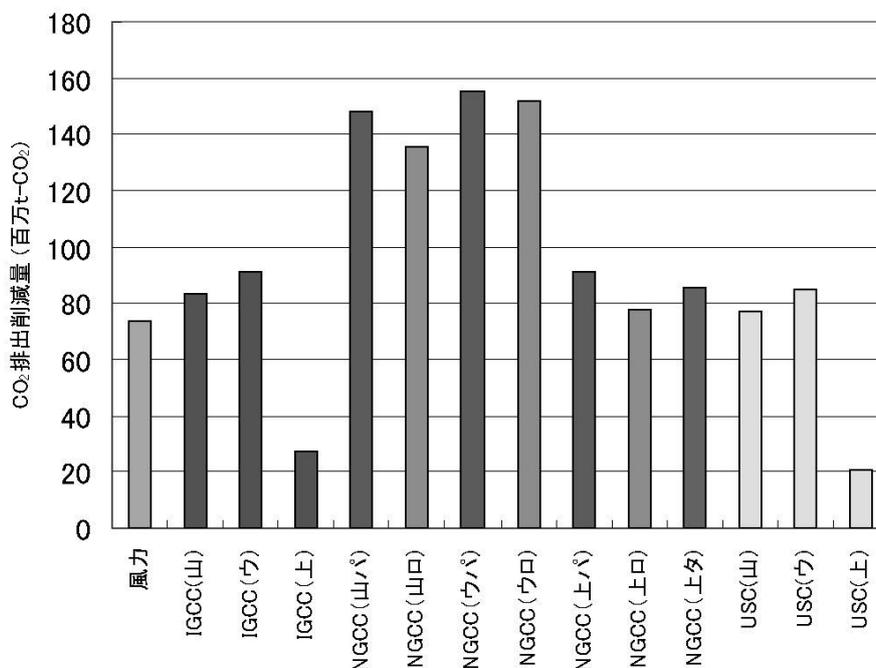


図2.7 CO<sub>2</sub>排出削減量(風力発電は設備容量1000MW換算)

## 2) 総設備容量・設備利用率・耐用年数

風力発電のCO<sub>2</sub>排出削減量に関して、発電電力量が少ないこと、すなわち総設備容量が少ない、設備利用率が低いまたは耐用年数が短いことが結果に影響を与えていると考えられる。そこで、それらの値と結果との関係を明らかにするため、基数の増設による総設備容量の増大、設備利用率・耐用年数の向上を仮定し、どの程度まで技術の向上があれば風力発電によってIGCC・NGCC・USCと同等のCO<sub>2</sub>排出削減量を得られるのかを試算した。その結果、USCと同等のCO<sub>2</sub>排出削減量を得るには設備容量1,150MW(767基)、IGCCと同等のCO<sub>2</sub>排出削減量を得るには設備容量1,220MW(814基)程度まで増やせばよいが、NGCCと同等のCO<sub>2</sub>排出削減量を得るには、設備容量2,070MW、1,380基まで設備容量を増やさなければならず現実的には難しいことが示された。

また、設備容量1,000MWで、風力発電の設備利用率を変化させたケースでは、風力発電がNGCCと同等の削減量をもたらすには設備利用率が75%以上必要となる。この実現は現状では非常に困難であり、設備利用率だけの向上により風力発電にNGCCと同等のCO<sub>2</sub>排出削減量を期待することはできない。なお、IGCCとは設備利用率45%程度、USCとは設備利用率40%程度で同等の削減量を得られることがわかった。設備容量を1,000MWとし、耐用年数を変化させた場合にNGCCと同等のCO<sub>2</sub>排出削減量を得るには、耐用年数を42年まで向上させる必要がある。この結果も現実的な値ではなく、耐用年数だけの向上により風力発電にNGCCと同等のCO<sub>2</sub>排出削減量を期待することはできない。なお、

IGCCとは耐用年数25年、USCとは耐用年数24年で同等の削減量が得られる結果となった。

#### (4) 現地ヒアリングと発電技術効率将来推計

詳細な技術条件を用いるために現地ヒアリングを行った。一例として平成20年12月8～10日に行った華能大連発電所でのヒアリング(図2.8)について記す。発電所副所長の静鉄岩氏他2名に対応頂いた。設備容量は140万kW(35万kW×4)であり、亜臨海ボイラを用いている。第1期設置分は21年の稼働であり、第2期設置分は10年の稼働であった。第3期着工として120万kWの超臨界ボイラが予定されている。負荷率85%、熱効率42.3%とのことであった。ただし効率の定義は本サブテーマとは異なっている。脱硫装置は導入されているが稼働開始直後で、安定運転まで至っていない。脱硫効率は推定92%で、95%に向上させる予定である。脱硝装置は未導入で検討中であった。使用石炭は熱量が5,000～5,500 kcal/kg、硫黄分が0.6wt%以下である。

これら現地ヒアリング調査結果及び文献データ<sup>4-6)</sup>を元に、技術諸元を再設定した。加えて、各技術の将来発電効率について日本における技術ロードマップ<sup>7)</sup>をもとに習熟曲線を描き推計を行った。その結果を表2.2に示す。

表2.2 先進火力発電効率の将来推計結果

	IGCC	USC	NGCC
容量(MW)	1000	1000	1000
設備利用率(%)	75	75	75
耐用年数	30	30	30
効率(%) 2005	46.4	45.0	50.3
2011	48.4	46.7	58.7
2016	50.0	48.1	63.3
2025	52.0	49.9	66.4



図2.8 華能大連発電所でのヒアリング

### (5) 対象地域の拡大

前述のとおり、中国はついにCO<sub>2</sub>排出量が第1位になり、インドも中国、アメリカ、ロシアに続き第4位となった。中国やインドなどのアジアの途上国では急速な経済発展によってエネルギー需要が増大し、それにともないCO<sub>2</sub>排出量が今後も大幅な増大が見込まれている。そこで山西省、新疆ウイグル自治区、上海市としていた中国での対象地域に重慶市、遼寧省、広東省を加え6地域とし、さらにインドのデリー、ムンバイ、コルカタの3地域、計中国及びインド9地域を対象地域へ拡大してライフサイクルアセスメント評価を進めた。それぞれに各技術を用いた新規プラントが建設される場合を想定し、図2.9に評価対象とした中国6地域及びインド3地域の位置関係、ならびに燃料産出地及び輸送経路を示す。前述と同様、発電燃料に関しては、石炭は近隣炭鉱からトラック輸送、鉄道輸送、天然ガスはオーストラリアからタンカー輸送、近隣ガス田からLNGローリー輸送、パイプライン輸送され発電所に届けられるとした。

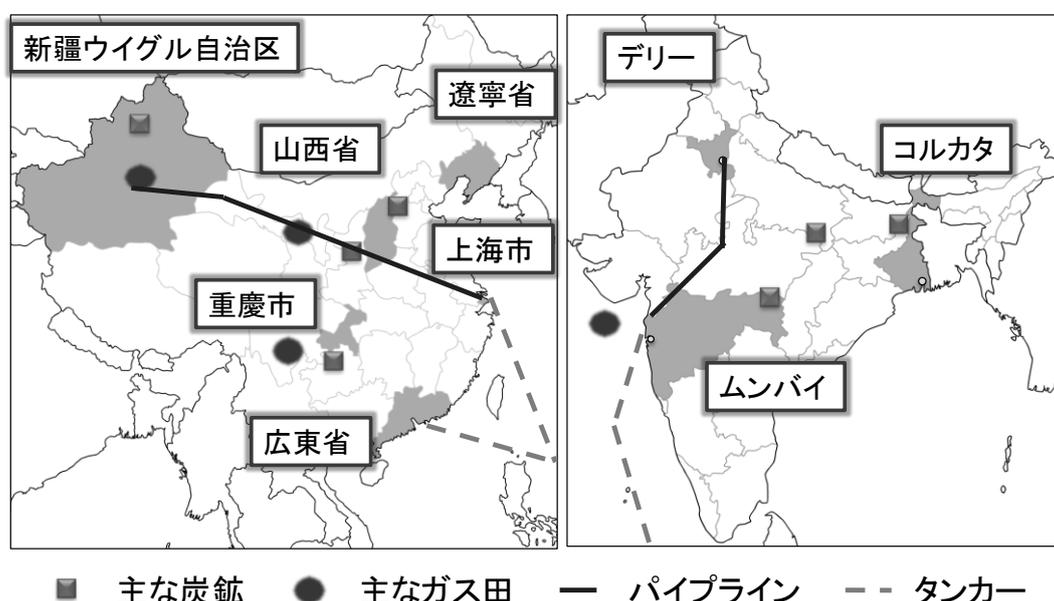


図2.9 中国、インドのライフサイクルアセスメント対象地点

### (6) 中国及びインド諸地域での発電技術別投入エネルギーの比較

発電技術別のエネルギー収支比評価結果を図2.10に示す。ここでは中国のウイグル、上海、及びデリーでの結果を示す。エネルギー収支比で最も優れているのは、NGCCのパイプライン輸送であり、各地域とも30を超える収支比が得られた。NGCCのタンカー輸送とローリー輸送は、天然ガスの液化工程での転換損失と、輸送時のエネルギー消費のため収支比は大幅に低くなり、三地域ともパイプライン輸送と比較して約1/10となった。IGCC、USCはNGCCパイプライン輸送と比較すると小さいものの、比較的産炭地に近いウイグル及びデリーにおいて6~8を示している。一方上海におけるIGCC、USCの収支比は低く、これは上海から炭鉱まで距離があり燃料輸送にエネルギーを消費していることに起因している。

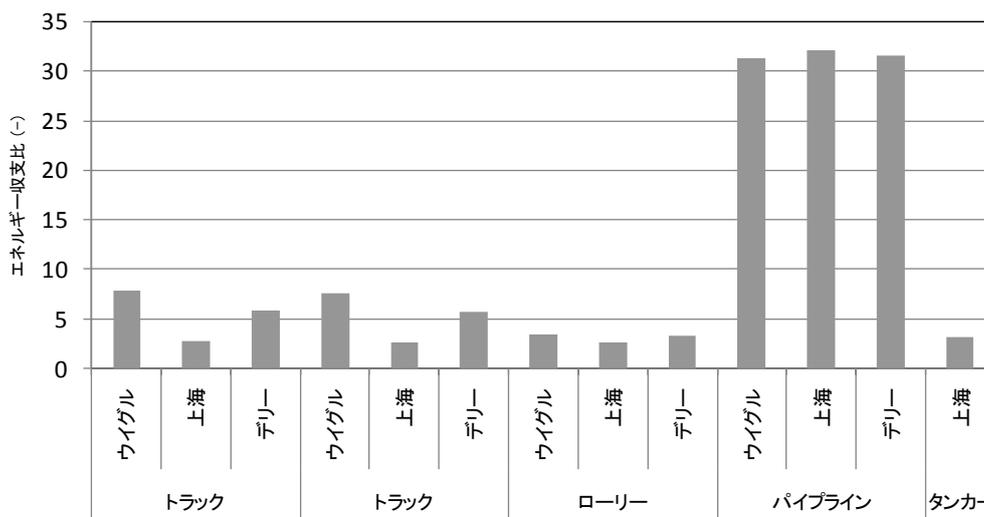


図2.10 発電技術別のエネルギー収支比

(7) CO<sub>2</sub>排出原単位チェーン及びCO<sub>2</sub>排出原単位削減量

エネルギーチェーン多層評価システムを用いたIGCCと既存火力発電プラントに関するCO<sub>2</sub>排出原単位の結果を図2.11に示す。建設から廃棄までのサイクルの各段階でのCO<sub>2</sub>原単位を積算している。上海、デリーともに先進火力導入により排出削減が見込まれる。また、先進火力を導入することで運用段階での排出削減だけでなく燃料輸送でも削減されることがわかる。また上海はデリーに比べ燃料産地が遠いため燃料輸送におけるCO<sub>2</sub>排出量が多い。

図2.12に対象9地域において先進火力を導入した場合の既存火力発電所からのCO<sub>2</sub>排出原単位の2005年と2025年の削減量を示す。既存火力の効率は現地ヒアリングデータ及び文献値<sup>8)</sup>を参照し、2005年平均値からの削減量となっている。既存火力の平均効率が悪い地域では削減量が大きく、特にNGCCを導入した場合にはCO<sub>2</sub>排出原単位は半減した。なお、図2.11及び図2.12における燃料輸送はトラック輸送とローリー輸送のケースのみを示している。

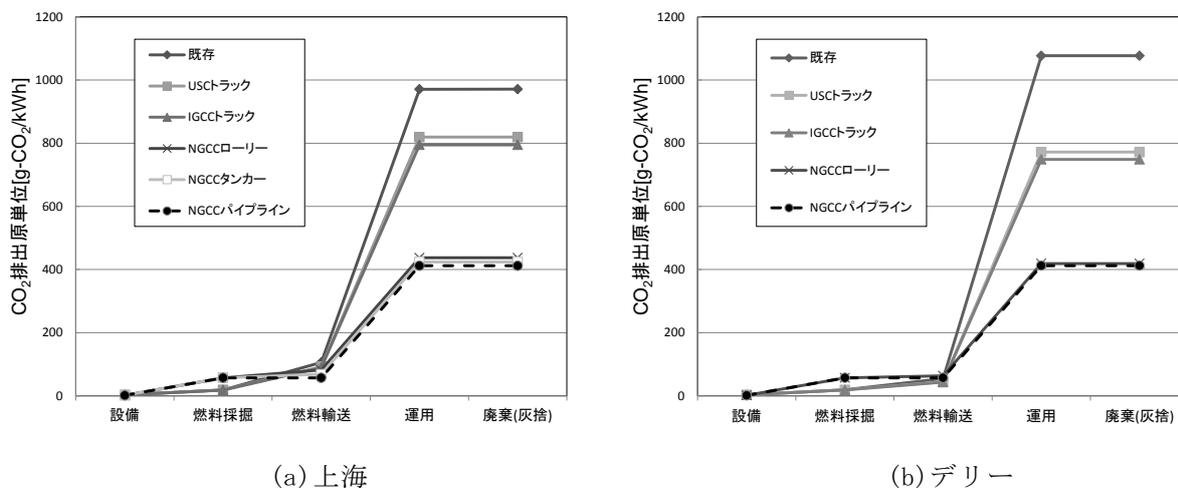


図9 上海、デリーにおけるCDM技術別CO<sub>2</sub>排出量

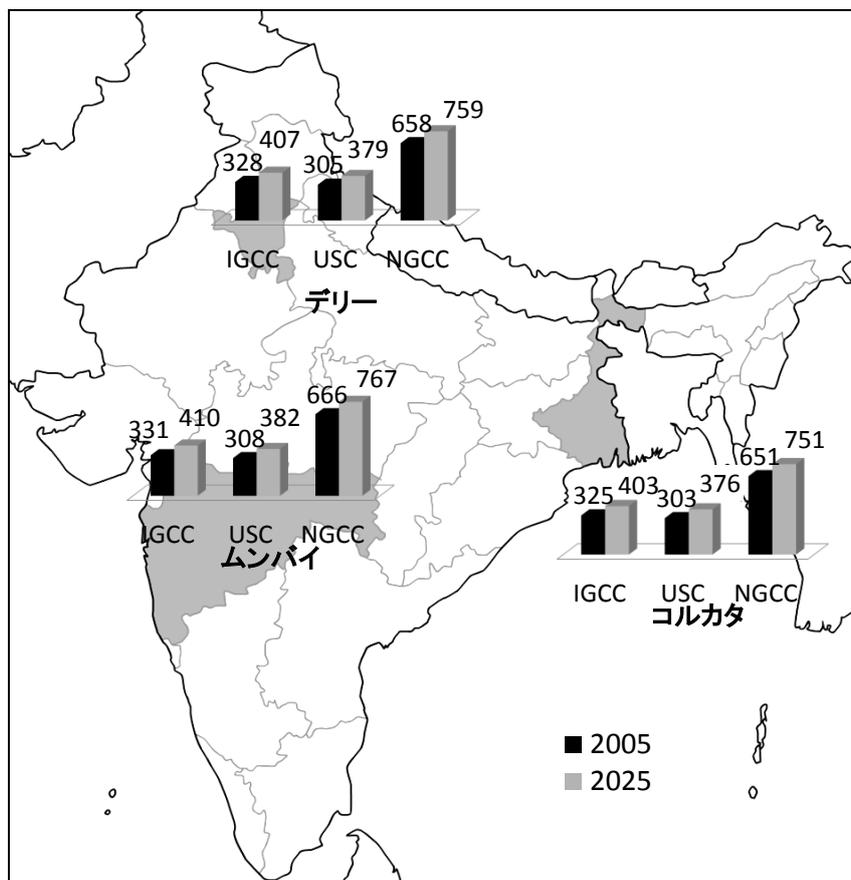
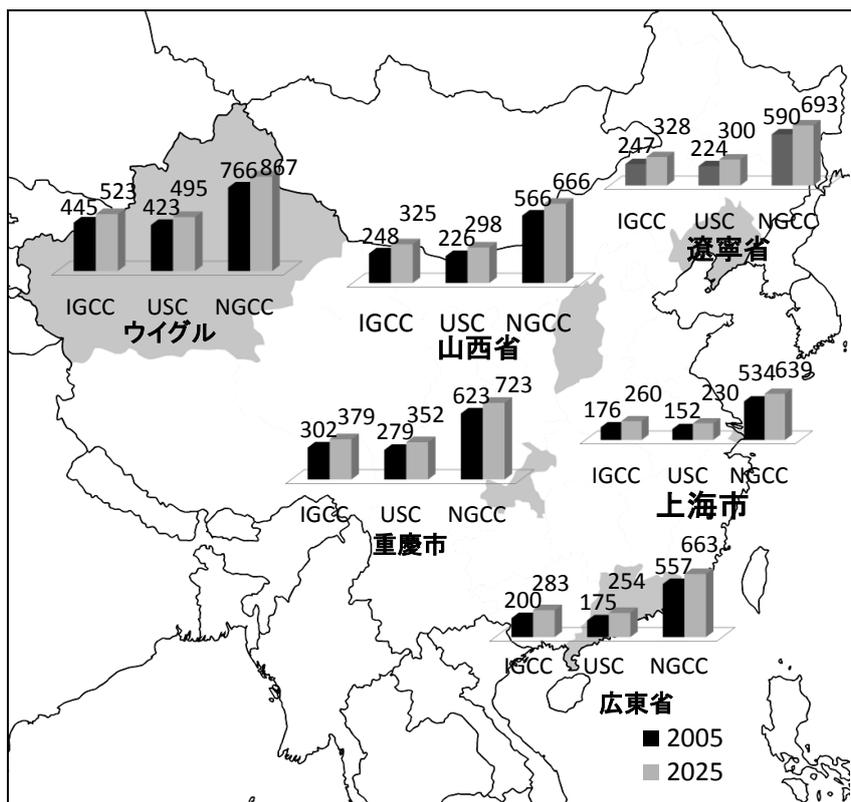


図2.12 中国6地域、インド3地域におけるCO<sub>2</sub>排出原単位削減量(g-CO<sub>2</sub>/kWh)

### (8) SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出量

各地域、各発電方式での耐用年数期間での累積SO<sub>x</sub>排出量を図2.13に示す。SO<sub>2</sub>としての換算として示している。脱硫装置によるSO<sub>x</sub>除去前の排出量について検討を行った。SO<sub>x</sub>の排出は燃料中の硫黄分に由来し、特に発電時は燃料からの排出量が大きく、また石炭の硫黄含有量は地域ごとに差があり、南西地方で産出される石炭は比較的硫黄分が多い。燃料中の硫黄含有量はヒアリングデータ及び文献値を参照した<sup>8)</sup>。重慶で使用される石炭の硫黄含有量が極めて高いため、排出量が多くなった。石炭火力においては運用段階での排出量が多いが、NGCCでは天然ガス中の硫黄含有量が極めて小さいため、運用段階ではSO<sub>x</sub>の排出はほとんどない。NO<sub>x</sub>排出量は燃料の燃焼方法により大きく異なる。IGCCは石炭をガス化した合成ガスを燃やしているためNO<sub>x</sub>排出量が少ない。SO<sub>x</sub>排出量と比較すると先進火力と既存火力にSO<sub>x</sub>のような大きな差はないが、NO<sub>x</sub>排出量においても既存火力の排出量は高く、USCと比べた場合でも既存火力はUSCの3.3倍となった。またNGCCは除去装置なしであってもSO<sub>x</sub>排出・NO<sub>x</sub>排出が少ない。

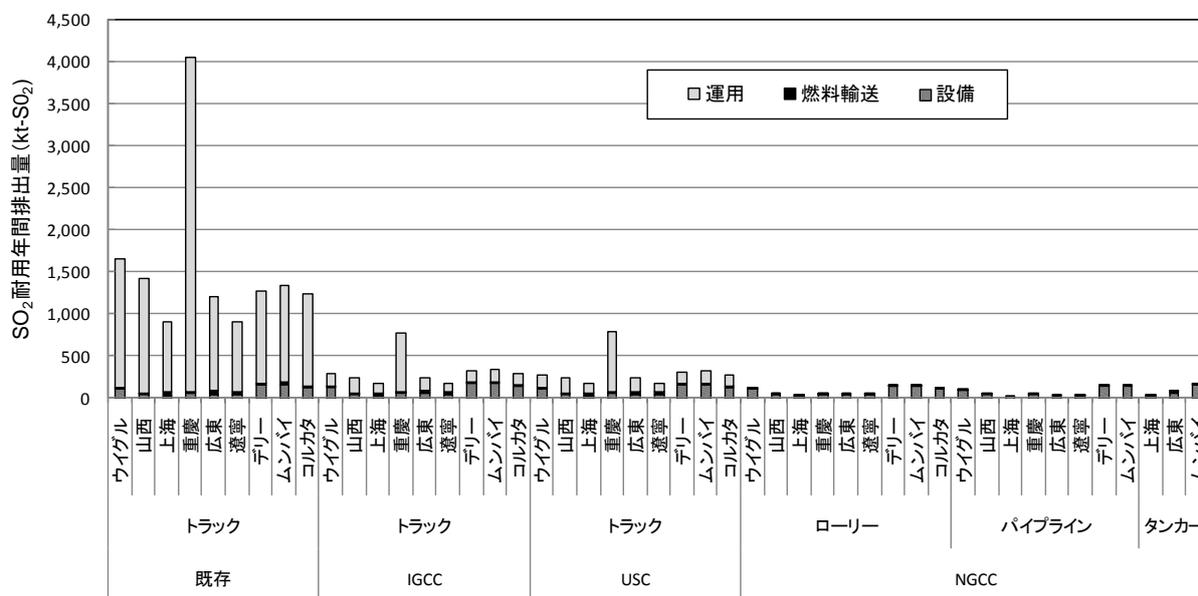


図2.13 各ケースにおけるSO<sub>x</sub>排出量(耐用年間累積排出量：SO<sub>2</sub>排出換算)

### (9) 発電コスト

各技術・地域ごとの発電コストの結果を図2.14に示す。IGCCやUSCについて、上海や広東など炭鉱からの距離がある地域では、燃料輸送に費用がかさみ総発電コストの半分以上を占め、燃料費が高い天然ガス火力のコストを上回る地域もあった。またインドにおける石炭価格は熱量に対して低いため燃料費を押し下げる結果となった。また石炭の輸送方法によって発電コストは大きく変わってくる。中国における鉄道輸送費はトラック輸送のおよそ1/10であるため、例えば上海では同じ技術あっても燃料輸送費が大幅に下がりNGCCよりも総発電コストで低くなった。一方インドでは鉄道とトラックの輸送費があまり変わらないため差はみられなかった。

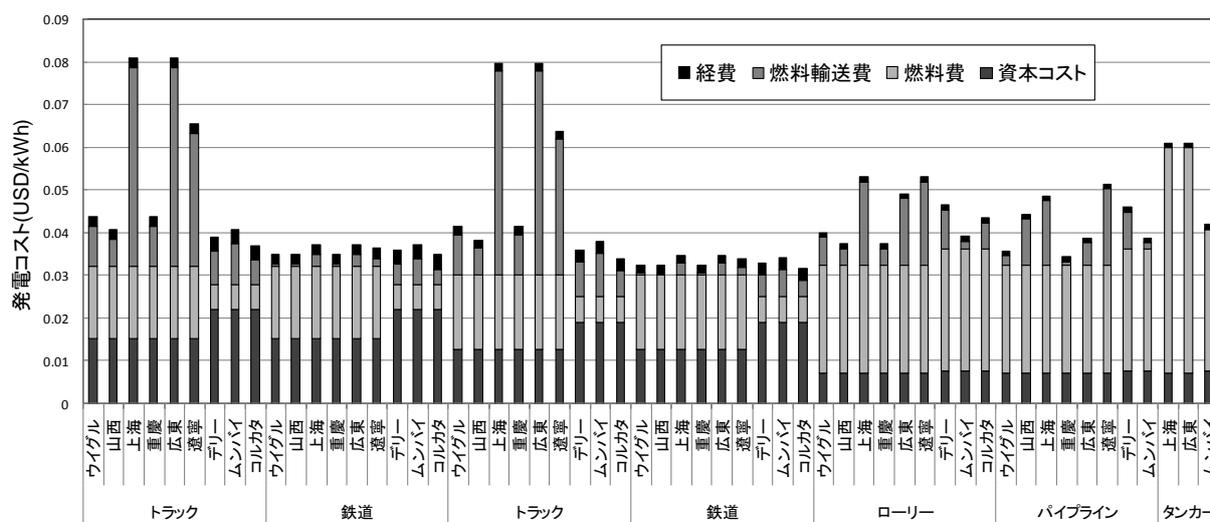


図2.14 各技術・地域ごとの発電コスト結果

(10) CO<sub>2</sub>削減コスト原単位

実際に技術を導入するにあたり、掛かる費用に対してどれだけのCO<sub>2</sub>排出削減が見込めるかという事は重要な指標となる。先進火力によって既存石炭火力の代替を行った場合について、各地域における技術別優位性の検討を行った。各地域・各先進火力技術におけるCO<sub>2</sub>削減コスト原単位を、その耐用年間で発電コスト原単位で除することで算出した。結果を図2.15に示す。地域別に見ると石炭火力におけるインドのCO<sub>2</sub>削減コスト原単位値がウイグルを除く中国各地域と比べ低くなった。これはインドにおける発電コストが低いことが要因である。またウイグルが低いのは

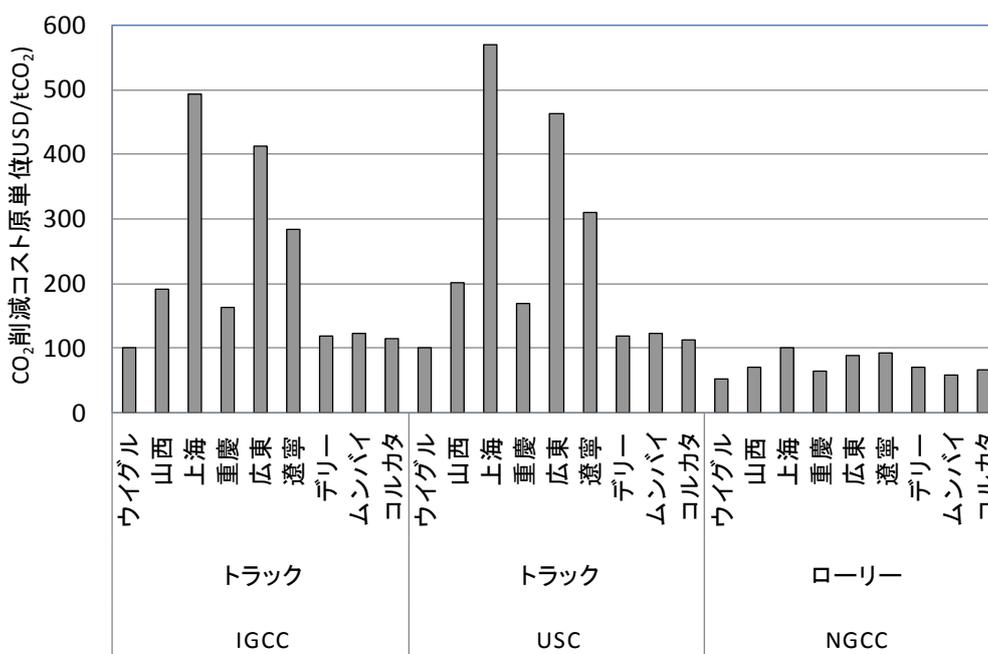


図2.15 各地域・各先進火力技術におけるCO<sub>2</sub>削減コスト原単位

既存石炭火力の効率が悪いため、CO<sub>2</sub>削減量が他地域に比べ多いことによるものである。技術別に見ると、例えば上海ではNGCCのCO<sub>2</sub>排出削減コスト原単位が114 USD/t-CO<sub>2</sub> となり、IGCCの492 USD/t-CO<sub>2</sub>を大幅に下回っている。天然ガス火力は石炭火力よりも発電コストが高く費用面で不利であったが、CO<sub>2</sub>削減ポテンシャルが高いため、CO<sub>2</sub>排出削減コスト原単位では石炭火力に対する相対的な優位性は高くなった。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブテーマでは中国6地域及びインド3地域を対象にして異なるエネルギー供給システムに対して評価を実施し、CO<sub>2</sub>削減効果に加え、先進的発電技術導入による硫黄酸化物及び窒素酸化物排出削減効果を定量的に示した。これまで独自に開発を進めてきたエネルギーチェーン多層評価システムの改良とデータベース整備を進め、特に環境性評価に関する評価精度を向上させ、これまで日本国内を対象としたサプライチェーンに限定されていたエネルギーチェーンLCAを中国及びインドを対象として可能にした。この分析結果は、中国及びインドにおけるCDMのコベネフィットを含むライフサイクル費用便益分析に役立つものである。

### (2) 地球環境政策への貢献

本サブテーマではエネルギーチェーン多層評価システムの各要素技術と各プロセスフローについて中国を中心とするアジア地域への適用作業の方法を検討し、温暖化緩和の可能性の大きい中国及びインドの諸地域を対象に、緩和効果について定量的に評価を進めた。サブテーマ(1)及び(3)とのリンク構築により、エネルギー分析及び環境負荷影響分析結果がわが国の温暖化抑制施策に貢献することが期待される。研究期間を通じて論文発表、国際会議における発表、ワークショップ開催を通し成果発信を展開した。課題終了後においても国際会議発表、論文発表を通じ、成果の広報・普及に努める。

## 6. 引用文献

- 1) 財団法人日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット：「エネルギー・経済統計要覧(2010年版)」，省エネルギーセンター，235 (2010)
- 2) 三神直人(2007)：「石油・天然ガスレビュー」，独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構ホームページ，41(6)，25-44，  
<[http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/1/1855/200711\\_025a.pdf](http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/1/1855/200711_025a.pdf)>，(参照2010-1-7)
- 3) 国家統計局工業交通統計局，国家發展和改革委員会能源局：「中国能源統計年鑑2006」，中国統計出版社(2006)
- 4) 内山洋司，山本博巳：電力経済研究，29，5-9 (1990)
- 5) Rogner H., Sharma D., Jalal A.: "International Journal of Energy Sector Management", 2(2), 181-196 (2008)
- 6) 赵洁，赵锦洋：「2005年中国科协学术年11分会场暨中国电机工程学会2005年学术年会主旨报告」，中国电机工程学会ホームページ，14-24，(2005)  
<<http://joa.csee.org.cn/Public/DownloadFile.aspx?FileStorageId=6fb63b2f-b81b-4871-9114-3e5872910463>>，(参照2010-1-7)

- 7) 経済産業省:「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」, 経済産業省ホームページ,  
 < <http://www.meti.go.jp/press/20080305001/03cool-earth-p.r.pdf>>, (参照2010-1-7)
- 8) 中国電力年鑑編輯委員会:「中国電力年鑑2006」, 中国電力, (2006)

## 7. 国際共同研究等の状況

中国遼寧省大連市の大連理工大学において、Mu Hailin教授、Ning Jiachen准教授らとディスカッションを行い、中国、特に大連を中心とした中国東北部におけるエネルギー供給の状況について議論を行った。さらに、華能大連発電所及び大連泰山熱電所においてMu Hailin教授、Ning Jiachen准教授らと共に発電運転状況、環境負荷物質排出状況、コスト等についてヒアリングを行った。これらを通して、今後の緩和技術評価研究について議論を進めた。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Okajima, K., Kogure, R., Noujima M., Komura, A., Uchiyama, Y.: Proceedings of the International Conference on Applied Energy, 1, 621-630 (2009)  
 "Life Cycle Evaluation of Energy Supply Technologies in China by Energy Chain Multi Layered Model"
- 2) Okajima K., Ueno, H., Uchiyama, Y.: Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 9, I9FP0407: 1-6 (2009)  
 "Evaluation of emissions from energy supply technologies in China by energy chain LCA model"
- 3) Okajima K., Ishikawa, Y., Uchiyama, Y.: Proceedings of The International Conference on Applied Energy, 2, 519-528 (2010)  
 "Externality analysis of primary air pollution from coal-fired power plant in urban region of China"

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

なし

### (2) 口頭発表(学会)

- 1) 小暮遼、岡島敬一、能島雅史、小村昭義、「エネルギーチェーン多層評価モデルを用いた中国におけるライフサイクル分析」、エネルギー・資源学会第24回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、東京、2008
- 2) Okajima, K., Kogure, R., Noujima M., Komura, A., Uchiyama, Y.: "Life cycle evaluation of energy supply technologies in china by energy chain multi layered model", The First

International Conference on Applied Energy, Hong Kong, 2009

- 3) 上野博史、岡島敬一、内山洋司、能島雅史、小村昭義：「中国3地域における発電技術のエネルギーチェーン多層評価」、エネルギー・資源学会第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、東京、2009
- 4) 石川佳宏、内山洋司、岡島敬一：「中国の都市域における火力発電からの排出による一次大気汚染の外部性評価」、エネルギー・資源学会第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、東京、2009
- 5) Okajima K., Ueno, H., Uchiyama, Y.: "Evaluation of emissions from energy supply technologies in China by energy chain LCA model", International Conference of Electrical Engineering, Shenyang, 2009
- 6) 上野博史、岡島敬一、内山洋司、能島雅史：「アジア地域における発電技術のエネルギーチェーンLCA評価～中国・インド各地域における先進火力導入の検討～」、第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、東京、2010
- 7) 岡島敬一、上野博史、内山洋司：「中国・インド諸地域を対象とした先進発電技術導入のエネルギーチェーンLCA評価」、第5回日本LCA学会研究発表会、横浜、2010
- 8) Okajima K., Ishikawa, Y., Uchiyama, Y.: "Externality analysis of primary air pollution from coal-fired power plant in urban region of China". Proceedings of The International Conference on Applied Energy, Singapore, 2010

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) エネルギーセミナー「中国・ウイグルにおけるエネルギー情勢」（2010年1月22日、筑波大学総合研究棟B、観客12名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし

## B-074 アジア地域における緩和技術の統一的な評価手法の開発に関する研究

## (3) ライフサイクル影響評価モデルを用いた、緩和技術導入による影響低減評価に関する研究

独立行政法人 産業技術総合研究所

安全科学研究部門 素材エネルギー研究グループ

野村昇

エネルギー技術研究部門 エネルギー社会システムグループ

時松宏治

〈研究協力機関〉

東京都市大学 環境情報学部

伊坪徳宏

日本福祉大学 健康科学部

坂上雅治

京都大学 フィールド科学教育研究センター

佐藤真行

平成19～21年度合計予算額 14,873千円

(うち、平成21年度予算額 6,064千円)

上記の予算額は、間接経費を含む

[要旨] クリーン開発メカニズム(CDM)は、先進国と途上国との間の温暖化ガス排出量削減についての共同プロジェクトであるが、プロジェクトが実施されると窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)等の排出量変化の副次的効果(コベネフィット)も発生する。このような副次的効果を含む費用便益分析のため、CDM対象国に設置された火力発電所から排出される環境負荷物質を念頭に置き、日本版被害算定型影響評価手法(LIME)における被害係数・経済評価係数の適用可能性について検討し、また新鋭火力発電所を新設導入することを想定したプロジェクトの費用便益分析を実施した。この費用便益分析においては、サブテーマ(1)から得られた動的なベースラインシナリオを利用すると共に、サブテーマ(2)から得られる対象技術のCO<sub>2</sub>排出原単位を利用した。環境影響の経済評価係数も、本サブテーマの社会調査から推察される所得弾性値を考慮して決定した。

このような分析を行うため、新たな知見の集積が著しい環境科学的なバックデータを現在の研究レベルに合わせて集積し、健康影響や社会資産、生物多様性等の影響カテゴリーに対し、気候変動による影響評価についてのレビューを行い、気候モデルを用い温室効果ガス排出に起因する気温と海面上昇を評価指標として集約整理し、LIMEの被害係数・経済評価係数の修正を行った。また、健康リスクの経済評価係数を推定することを主目的に、中国・上海市及びインド・デリー市において、それぞれ500件規模の面接による環境意識調査を実施した。調査結果にもとづき喘息罹患回避に対する確率的価値を推定した。調査データの分析を進め、支払意志の有無と金額を分解したモデルを用いて所得等の要因による影響を分析した。修正された被害係数を用いた新鋭火力発電所の費用便益分析により、環境改善と発電所新設のための費用増加は同程度の大きさを持つことが判明した。

[キーワード] 日本版被害算定型影響評価手法(LIME)、便益移転、社会調査、費用便益分析、コベネフィット

## 1. はじめに

クリーン開発メカニズム(Clean Development Mechanism; CDM)は、温室効果ガス排出量の総量を削減するための活動であるが、プロジェクトによっては窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)の排出量の大きな増減があり、環境負荷がCDMプロジェクト評価の温室効果ガス排出量以外の点からも副次的に変化することがあり、副次的便益はコベネフィットとよばれる。サブテーマ(3)では、サブテーマ(1)、(2)から得られた結果を用い、CDMの副次的な費用、便益を含んだCDMプロジェクトの費用便益分析を実施することを目標としている。環境負荷の総合的な評価方法としては、ライフサイクルアセスメント(LCA)が広く用いられる様になりつつある。LCAでは、資源の消費、環境負荷物質の排出といったインベントリが人間健康、社会資産等へ与える被害をインパクトとして定量化し、インベントリの発生量がインパクトの被害に与える影響量を被害係数と呼ぶ。また、異なる種類の被害の重要度を定量化して単一の指標で表すことができれば、インベントリを統一指標で定量化でき、複数の選択肢の比較が可能となる。その一つである金銭的価値に、被害量を換算することも行われ、換算係数は経済評価係数と呼ばれる。日本でのLCAで多用される日本版被害算定型影響評価手法(Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling; LIME)における被害係数・経済評価係数は、日本における調査時点を対象に構成されているが、CDMプロジェクトは発展途上国であるプロジェクト対象国で長期間実施されるものであり、既存の被害係数・経済評価係数をそのまま用いてLCAを実施することは必ずしも適切ではない。このため、火力発電所から排出される環境負荷物質を念頭におき、被害係数・経済評価係数の値について見直しを行う。さらに、温室効果ガス排出量の削減が期待される新鋭火力発電所を新設導入することを想定した中国におけるCDMプロジェクトの費用便益分析を実施する。

## 2. 研究目的

本研究では、アジア地域におけるエネルギー供給技術によるCDMを対象とし、CDM評価手法の開発と、開発手法の適用を通じた有効性の実証とを目的としている。サブテーマ(3)では、CDMの実施可能性の大きい地域、技術に対して、副次的費用便益を含めた定量的分析を行う手法を開発し、CDMプロジェクトの費用便益を分析する。

## 3. 研究方法

CDMのLCAによる経済価値評価を含む分析を行うためには、プロジェクト対象国におけるプロジェクト実施期間における被害係数、経済価値係数が必要となる。日本で開発されたLIMEの知見を生かし、LIMEで決定されている係数を対象地域のプロジェクト期間について適用可能にするため、被害係数、経済評価係数の値の検討を行う。ケーススタディとして、サブテーマ(1)の分析から得られた動的なベースラインシナリオを利用すると共に、サブテーマ(2)の分析から得られたLCAデータをもとにして、先進的火力発電を導入するCDMプロジェクトの費用便益分析を実施する。

### (1) 被害係数についての環境科学的データの検討

気候モデルMAGICC/SCENGENを用い、大気中寿命等が異なるCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oを対象として、将来排出シナリオに対して、気温上昇と海面上昇を評価する。また、LIMEでの影響のカテゴリー区分である健康影響や社会資産等に対して気温上昇や降水量・海面上昇等気候変動によるエンドポイント

トへのインパクトを評価した上で、IPCC第4次評価報告書(IPCC-AR4)を中心にレビュー作業を行い、LIMEにおける気温変化・海面上昇から経済価値化までの評価方法を見直す。LIMEにおける暴露-反応の関係の取扱を踏まえ、参照している評価手法における暴露-反応関数を現在LIMEでの温暖化によるダメージ評価において用いている条件下において適用可能になるだけの情報を収集し、文献等を参照して情報を補う。さらに、IPCC-AR4と世界保健機構(WHO)のGlobal Burden of Disease(WHO-GBD)等の研究とでは人口・GDPと世界の地域区分が異なっていることから、相互の整合性を持った将来シナリオや気温上昇との関係も合わせて温暖化によるダメージの定量的評価を可能にするためのモデルの特性を調べ、基礎データを収集整理する。

## (2) 経済評価係数についての検討

本研究では、火力発電システムを対象としたCDMプロジェクトを想定する。火力発電所から排出される大気汚染物質に起因する健康リスクの増減の評価がプロジェクト評価のために重要である。環境科学的な方法で評価されるインパクトを経済価値に換算する重み付け係数は、評価対象国により異なると考えられる。LIMEにおいては、日本での調査に基づいて係数の値を決定しているため、経済価値を対象国の値に換算する必要がある。その文献調査として便益移転に関する最新文献のレビューを実施するとともに、実証分析として中国・上海市及びインド・デリー市において環境意識についての社会調査を実施する。

便益移転については、便益移転の分析と誤差率を算出した論文<sup>2,3,5,8)</sup>と、便益移転の研究そのものを評価した論文<sup>1,6,7)</sup>の、2種類を対象としてレビュー作業を行う。前者に分類される論文は主に、便益移転の妥当性を検討するものである。レビューした論文では、主にコンジョイント分析を用いた便益移転の妥当性を検証するため、調査地等の状況設定、調査票の作成、モデリングの設定・分析結果、妥当性の検証、という項目立てとなっている。後者に分類される論文は主に、便益移転の研究を評価するものである。レビューした論文では、既存研究の便益移転の誤差率をレビューし、その結果を算出する際の問題点などを指摘するものとなっている。

環境汚染による健康に対する被害の経済価値を換算する方法として、人的資本法、ヘドニック法、仮想評価法(Contingent Valuation Method; CVM)によるWTP推定アプローチ等が試みられている。人的資本法は、健康被害による損失を評価するときに、健康についての被害により失われた所得に基づいて価値換算を行うものである。これに対して、ヘドニック法は財市場において汚染水準や健康リスクにより、地代、賃金等が変化することを分析することにより経済価値の推定を行おうというアプローチである。賃金についての分析は、環境負荷に限らず事故等のリスクを対象にした分析も行われており、賃金リスク法を他のヘドニック法と分けて考える考え方もある<sup>13)</sup>。これらの方法は、市場で現に取引されているという意味で、社会的に評価されている経済的な価値を反映している一方で、環境負荷により価格が変動した部分を他の要因から分離することは容易ではなく、データ取得の面でも困難な場合がある。CVMに代表される表明選好法は、多数の回答者に環境負荷の変化についてのシナリオを提示して選好を直接質問し、得られた回答を統計的に分析して経済価値の推定を行う方法で、他の方法で推定が困難な評価対象についての適用が可能である。本研究でもCVMを手法として用いて大気汚染起源の健康リスクに対する支払意志額についての社会調査を平成20年度に中国・上海市において、平成21年度には、インド・デリー市において実施した。

調査では、大気汚染により引き起こされる健康リスクのうち、死亡率を変化させない喘息罹患に対するリスク低減と死亡率低下の両者に対する支払意志をCVMにより分析することを主目的とする。これは、LIMEの大気汚染による健康被害についての係数がこの2種類について提供されていることを考慮したものである。大気汚染による被害を経済評価するに当たり、汚染自体を低減させる費用を直接質問する方法も考えられるが、公共財的性質を持つ環境の質の向上を自由意志での支払の有無を回答するCVMを用いると環境負荷の低減に対して金銭的な価値を見いだしてにもかかわらず、他の人の支払いによる改善を期待して自分では支出をしないという戦略的回答であるフリーライダー的誘発する可能性がある。その影響を低減させるために、被害を低減させる空気清浄機、吸入器の購入意志を質問する方法をとった。調査票は、主目的となるWTPについての設問を中心に配置し、その前に環境問題及び大気汚染に関連する設問を配置する。これは、分析を行うための回答を得ることの他に、CVMの設問の前提を回答者に思い浮かべさせることを目的としている。CVMの設問の後ろでは、世帯年収、職業等の回答者の属性と環境意識に関連した設問を質問する。

死亡率の変化を伴わない健康被害に対するWTPは、大気汚染に起因する被害が評価対象であるため、被害として大気汚染に起因して喘息になることとし、支払対象として空気清浄機を取り上げる。空気清浄機の保有の有無については、他の機器も含めてCVMに関わる設問より後ろで尋ねるが、保有している世帯はほとんどなかった。

CVMによりWTPを尋ねる質問では、支払う意志のある上限金額を直接質問する方法の他に、金額を提示して、これに対して支払の意志の有無を尋ねる二肢選択法が多用される。二肢選択法では1回の質問に対する回答からはWTPが提示金額以上か、それ未満かという情報しか得られないため、情報量を増やすために1回目の回答を得てから金額を変更して再度支払意思を尋ねる二段階二肢選択法も多用される。2回目に提示する金額は、1回目に支払をする意志があった回答者に対しては増大させ、支払う意志無しとした回答者には減少させることになる。今回の調査では調査項目が罹患率、死亡率というパラメータを持ち得るものであり、限られた回答者と質問数から少しでも多くの情報を得る試みとして選択肢を3種とした質問を行う。また、二肢二段階選択法に倣い質問は2回行い、2回目の質問では1回目選ばれた回答により提示金額を変化させた。三肢選択法は、Loomis<sup>4)</sup>でも回答者が実際より高いWTPを回答する傾向を避ける方法として提案されているが、ここでは質問に対する回答内容については信頼をし、別の観点から回答から得られる情報量を増やすことに着目して選択肢を構成した。大気汚染により今後10年間において喘息になる確率が10%あるとし、空気清浄機の設置によりこれを8%ないし6%に減少させることができるときのWTPを尋ねる。3つの選択肢では、喘息になる確率を6%、8%にするために空気清浄機に要する費用を提示し、高い提示金額の支出を行い罹患率が6%に低下すること、低い提示額の支出を行い罹患率が8%になること、及び空気清浄機を購入せずに罹患率10%のままという3種の選択肢からの一番好ましいものの選択を依頼する。罹患率が6%となることは、8%となることよりも好ましいことであり、これに対するWTPは8%に対するそれより小さくはならない。また、1回目の回答により金額を変化させた選択肢を2回目に提示する二肢二段階選択法に倣い、1回目の三つの選択肢毎に異なる2回目の設問への回答を要請する。

死亡率の上昇についての質問は、喘息の罹患率についての質問の後ろに配置する。死亡率に関するWTPを質問するにあたっては、喘息への罹患よりも強い印象を与える対象として吸入器の購入

を支払対象とする。シナリオを提示する前に中国の生命表から算出した年齢別の10年間における死亡率を提示する。その後シナリオとして1.4倍ないし1.3倍となるときWTPを、喘息罹患率のときと同様に二段階に3肢選択法で質問する。

上海市での調査は、調査対象者を20歳から59歳までの居住者とし、調査対象世帯は、上海市を構成する19の区から居民委員会を抽出し、各居民委員会から10世帯以内を抽出して訪問面接法により回答を依頼する方法を用いる。世帯を訪問した後、質問に入る前に、世帯の構成員について質問を行い、調査対象の年齢である構成員の中から無作為に1人を選び回答を依頼する。なお、調査対象者からメディア、公告、調査会社関係者、過去半年以内に類似の調査を受けた居住者、引越してから半年以内の居住者は除外する。サンプル数は500世帯である。上海市での調査は平成20年9月から10月にかけて実施した。

デリー市での調査は、上海市と同様に訪問面接法で実施する。環境の経済価値換算を行うのが目的の今回の調査においては、地域の居住者全てを対象にするのが基本となるが、CVMでの質問内容についての理解度の観点と、収入が極端に低い場合においては環境負荷低減に対して金銭的な支出を行うことが困難な場合があるということを考慮して、インドでの調査で用いられることの多い世帯をA-Eの5段階に分類する社会経済指標（SEC; Socio Economic Classification）によって比較的経済的に恵まれているA-Cに属する世帯を対象に調査を行う。インドで用いられるSECは、世帯中心となる構成員の職業と学歴により世帯を分類分けするもので、調査世帯を訪問したときに最初に質問して世帯がどの分類に属するかを判定している。デリー市では、SECがA-Cに属する世帯はほぼ半数とされている。回答者は、調査対象年齢の世帯構成員から誕生日法により決定して依頼をする。対象年齢は、上海市の時と同様に20歳から59歳とする。調査対象世帯は、多段抽出法により調査開始世帯をランダムに選択し、エリアサンプリングにより住居を訪問し調査への協力を依頼する。1箇所の調査地点からの調査は10人以内とし、10人の回答を得られたら外の地点を調査する。回答者の抽出に当たっては、年齢、性別もバランスを取るよう配慮する。サンプル数は500世帯である。デリー市の調査は平成21年8月から11月にかけて実施した。

### （3）費用便益分析

所得調整した原単位移転により、日本における支払い意思額を中国のそれに移転する方法を用いて、費用便益分析を行う。分析対象は、中国・上海市において輸入超々臨界圧(USC)石炭火力発電を新設導入することで、2005年～2034年の間運転する状況を想定する。サブテーマ(1)の分析から得られた動的なベースラインシナリオを利用すると共に、サブテーマ(2)の分析から得られたLCAデータを利用する。将来の社会経済の発展シナリオは、IPCC-SRES（温室効果ガス排出特別報告書）のB2シナリオ準拠とする。

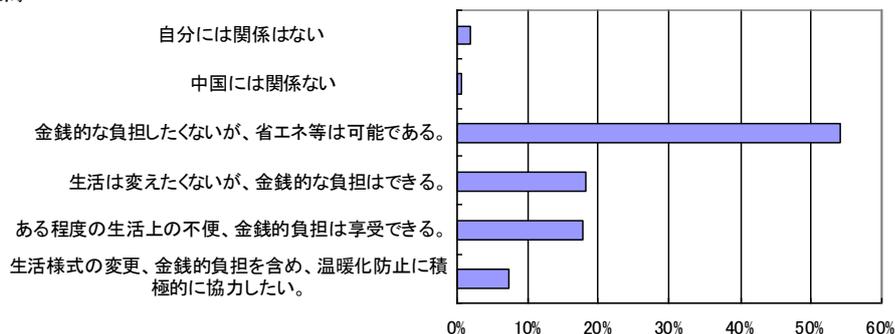
## 4. 結果・考察

### （1）被害係数についての環境科学的データの検討

#### 1) 気候モデルによる計算

気候モデルMAGICC/SCENGENは、IPCC-AR4で用いられたものと整合するバージョンであるVer5.3が公表され、情報収集の結果使用が適切と考えられたことから、Ver.5.3により計算を行った。将来排出シナリオは、IPCC-SRESのB2およびA2とした。評価は、複数の気候感度(1.5°C、2.6°C、4.5°C)

## 中国／上海



## インド／デリー

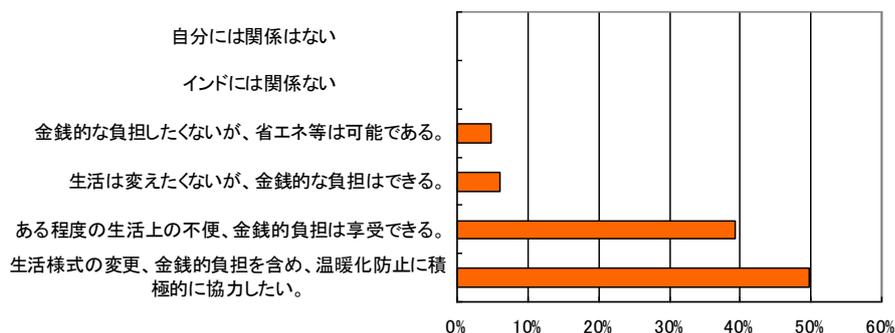


図3.1 地球温暖化問題についてどう思いますか？

に対して行うこととしたが、IPCC-AR4及びMAGICC 5.3での見直し内容にあわせて、異なる気候感度についても併用した。2010年～2100年までの10年刻みの10時点において、排出量のパータバージョン（+10Gton、+1Gton、+0.1Gton）を与え、感度解析を含むモデルランを実施した。この感度解析を通して、パータバージョンに対する気温上昇と海面上昇の挙動を確認した。特に線形性等の関係に着目した。関係の整理の際には、現バージョンのLIME地球温暖化影響評価方法と比較することとし、特に全球の気温上昇・海面上昇等に注目として、1単位の温室効果ガスの排出が影響評価期間においてもたらす気温上昇の積算量（temp-factor）等を評価指標として算出、比較した。

## 2) 環境インパクトの評価

健康影響に関しては、WHO-GBD等に示された、より新しい影響評価研究における評価内容の整理を行い、LIMEの現バージョンで用いている評価方法と評価指標としての特性を比較した。本調査では、特に、社会資産との関連も深いと考えられる栄養不足及び災害を重点的な対象とした。社会資産への影響に関しては、農業生産と海面上昇による影響を対象とし、調査対象文献に示される、より新しい影響評価研究における評価内容の整理を行い、LIMEの現バージョンで用いている評価方法と評価指標としての特性を比較した。温暖化による生態系への影響を絶滅リスクにより評価し、ダメージ関数に生態系（絶滅リスク）の評価のリンケージを図った。

## (2) 経済評価係数についての検討

### 1) CDM対象国における環境意識についての社会調査の概要

調査では、環境問題に対する認識についての質問を最初に行い、健康に関わる質問を行った後、CVMに関する設問に移る様にした。環境問題に関する設問では、地球温暖化問題についての知識とどの程度協力する意志があるかを尋ねている。調査の前半部で、「二酸化炭素等の温室効果ガスにより、地球温暖化問題が起こる可能性があることを聞いたことがありますか」と尋ねている。上海市での調査では、回答者のうち80%が聞いたことがあるとしていた。一方、デリー市での調査においては、逆に地球温暖化問題を知っているとしたひとは15%程度に過ぎず、80%以上のひとはその様な話は聞いたことがないと回答しており温暖化問題についての知識は両地域で大きく異なっていた。なお、デリー市における調査では、SECで世帯のクラス分けを行っているが、予備調査実施時の回答状況及び回答結果から、回答者は十分に調査票を理解していると判断できた。次に、地球温暖化の緩和にどの程度協力できるかを質問した。選択肢は、協力の度合いと「経済的負担」「省エネルギー」のどちらかを嗜好するかを分析するために選択肢は「生活様式の変更、金銭的負担を含め、温暖化防止に積極的に協力したい。」、「ある程度の生活上の不便、金銭的負担は享受できる。」、「生地球温暖化問題についてどう思いますか?」、「生活は変えたくないが、金銭的な負担はできる。」、「金銭的な負担はたくないが、省エネ等は可能である。」、「中国/インドには関係ない。」、「自分には関係はない。」を準備した。図3.1に回答分布を示す。中国では、金銭的な負担を避け、省エネルギー等はできるという回答が多かった。これは、日本国内で同様な質問を行った場合<sup>11)</sup>と近い傾向であった。一方、デリー市における調査ではこれよりも協力意志が強いという選択肢が選ばれていた。

喘息罹患率について、WTPの分布が対数ロジスティック分布を当てはめ、WTPの大きさ及びこれに影響を与える要因を検討した。WTPが $x$ より小さい確率が

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{a + b \log x + \sum_i c_i z_i}} \quad (1)$$

に従っていると仮定してパラメータ $a$ 、 $b$ 、 $c_i$ の推定を行った。ここで $x$ は金額で上海市での調査は元単位、デリー市での調査ではルピー単位である。 $F(x)$ は $x$ 元の時に支払う意志がある回答者の比率である。パラメータ $b$ は金額により支払うひとの割合が減少する速度を表すパラメータ、パラメータ $a$ は分布の位置を決める定数項である。金額に対数をとっているため、金額のスケールは $a$ となり、 $b$ は分布の形を表す。また、 $c_i$ は、説明変数のWTPへの影響を表すパラメータで、この式では $c_i$ の値が小さい程支払意志が強くなる。(1)式は、金額が0のとき全員が受入れを行い、金額が増加すると支払う人の比率が減少する形となっている。質問では、三肢選択を用いており空気清浄機を購入することにより、10%であった喘息罹患率が8%あるいは6%になるものを購入するかを質問している。罹患率が6%、

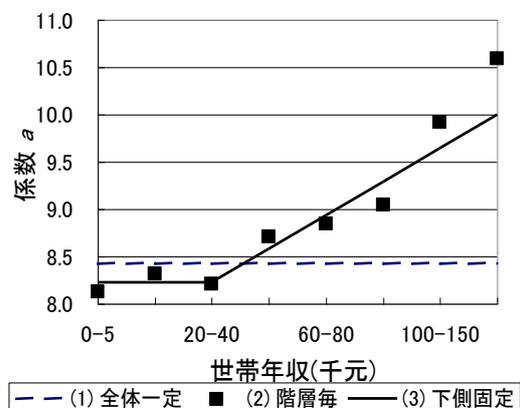


図3.2 中国・上海における支払意思額の世帯年収依存性

8%となるWTPの存在範囲を考慮して、最尤法を適用してパラメータの推定を行った。その際WTPの値と罹患率減少の係数が比例すると仮定した。この仮定の成立は自明では無いが、死亡率を扱う場合に確率的生命価値(VSL; Value of Statistical Life)の推定を行うとき等はこの比例関係が暗黙の仮定として用いられていることになり、ここでもこの手法に倣うこととした。なお、三肢選択法における推定方法については、今後も改良の余地があるものと考えられる。このため、次節以降の推定結果については推定法の改良により値が大きく改訂される可能性がある。

## 2) 喘息罹患率についての分析

上海市で得られたデータに対するパラメータの推定結果を表3.1に、デリー市で得られたデータに対する推定結果を表3.2に示す。括弧内に示した値は推定値を漸近分散で割って求めた $t$ 値である。説明変数を導入せずに上海市の調査で得られたデータに対して推定を行ったときに、10年間の喘息罹患率を減少させるための1%当たりWTPの中央値は、約530元となった。機械的な計算になるものの、喘息回避へのWTPは52,560元となる。なお、調査時点での中国元の為替レートは約16円/元であるため、日本円に直すと84万円程度となる。WTPは世帯年収等の経済的条件の影響を受けると考えられるが、世帯年収についての回答は、6万元～8万元という回答が最も多く、次いで4万元～6万元という回答が多かった。デリー市における調査では10年間の喘息罹患率を減少させるためのWTPの中央値は1%当たり約6,000ルピーとなった。これを100%へ換算し日本円に直すと、120万円程度となった。

上海市についての当てはめ結果のモデルA2以降は、説明変数を導入しているものである。説明変数には、世帯年収、学歴、呼吸器系疾患罹患経験の有無、性別、子供の有無を取り上げた。

支払意志額所得が与える影響を分析するため、(1)式の独立変数に所得を取り入れたモデルについて推定を行った。上海市での調査で世帯年収は、選択肢を選ぶ形式で質問している。質問では、年収10万元以下は2万元刻み、10万元～20万元は5万元刻みとし、他に5千万元未満、20万元以上の9段階の選択肢を設けた。2万元以上を選んだ回答者は少数だったため、高収入の2つの階級を

表3.1 上海での調査データにより推定されたパラメータ

Model	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Median	528.5	513.6	495.8	452.0	483.6	484.3	497.6
Log likelihood	-838.7	-826.7	-830.1	-829.2	-788.3	-791.2	-792.9
AIC	1,681.4	1,671.4	1,666.1	1,664.4	1,612.6	1,606.4	1,601.8
a	-5.54 (-16.9)	-5.13 (-10.7)	-5.02 (-14.2)	-5.30 (-15.7)	-3.71 (-5.7)	-3.82 (-7.3)	-4.22 (-9.6)
b	0.88 (18.7)	0.91 (18.7)	0.91 (18.7)	0.91 (18.7)	1.00 (18.6)	0.99 (18.7)	0.99 (18.7)
I2c		-0.40 (-0.9)			-0.53 (-1.1)		
I3c		0.01 (0.0)			-0.03 (-0.1)		
I4c		-0.58 (-1.4)			-0.38 (-0.9)		
I5c		-0.69 (-1.7)			-0.46 (-1.0)		
I6c		-0.71 (-1.7)			-0.70 (-1.5)		
I7c		-1.39 (-3.0)			-1.39 (-2.7)		
I8c		-2.06 (-3.2)			-1.71 (-2.4)		
IA1c			-0.20 (-0.4)				
IA2c				-0.27 (-0.4)		-0.24 (-0.3)	-0.23 (-0.3)
Ed2c					-0.94 (-2.9)	-0.89 (-2.8)	-0.83 (-2.6)
Ed3c					-1.31 (-3.8)	-1.29 (-3.7)	-1.18 (-3.6)
Lpc					-0.83 (-3.2)	-0.83 (-3.2)	-0.83 (-3.3)
Po2c					-0.73 (-2.9)	-0.73 (-2.9)	-0.62 (-3.0)
Po3c					-1.86 (-6.1)	-1.83 (-6.1)	-1.70 (-6.4)
Po4c					-0.29 (-0.8)	-0.31 (-0.8)	
Fmc					-0.22 (-1.3)	-0.21 (-1.2)	
Mrc					-0.47 (-1.3)	-0.42 (-1.2)	
Chc					0.35 (1.1)	0.26 (0.8)	

合併して分析は8階級で行い、各階級に対応してダミー変数を導入し、これに対応したパラメータをI1c~I8cとした。I1cを零に固定して、I2c~I8cを推定した。各パラメータは、一番年収の少ない年収5千元未満の階層と比較した支払意志の強さを表し、値が小さい程支払意志が強いことになる。図3.2に収入に関わる部分の変化を示す。モデルA2は、各階層別にパラメータを推定したもので、収入の少ないところでは値が零に近く、次第に値が負で絶対値が大きくなっている。今回はサンプルの数が必ずしも多くないためか、統計的に有意になったのはI7及びI8の2つのパラメータであった。収入の増加に対して支払意志が強くなることを確認するため、収入を表すパラメータに線形の制約を課して推定を行ったのがモデルA3である。t値からパラメータは負で統計的に有意であった。このため、世帯年収が増加するに従い支払意志も強くなると考えることができる。収入が少ない階層のいくつかはI<sub>i</sub>の値が零に近い。収入の低い3つの階層について値が零とした形になるモデルを推定し、モデルA4とした。モデルA3に比べ僅かながら尤度は上昇しており、当てはまりが改善された。これより、世帯年収がある程度大きくなってからWTPが増大に転じると考えた方が自然であった。他のパラメータも含めて推定を行ったのがモデルA4及びモデルA5である。学歴については、最終学歴を「小学校、初級中学校」、「高級中学、職業学校」、「短期大学、大学」、「大学院」にその他を加えた選択肢を選ぶ形式で質問している。前3者に対応してパラメータEd1c、Ed2c、Ed3cを導入し大学院を選択したのは10名以下であったので、Ed3cに対応した分類に統合した。Ed1cを零に固定して推定を行った。Ed2c、Ed2cは負で有意であり、推定されたパラメータの値から、学歴が高い程支払意志が強いという傾向が出ていた。

回答者の健康状態と大気汚染についての認識は、支払意志に影響する可能性がある。素朴な感覚からは、健康状態に何らかの不安がある場合は、健康に関わる支出について積極的になるであろうと予想される。一方、生命価値を経済的経済価値換算するということを押し進めると、支出を行い、空気清浄機を購入することにより得られる生命の質と、空気清浄機を購入しない場合の生命の質との差を経済価値換算したものが、支払意志をもつ金額の上限となる。この考え方により支払意志の有無が決まる場合、現在の健康状態が悪いことにより大気汚染による喘息罹患を回避することによる便益は、健康なひとのそれより少なくなる可能性もあり得る。

呼吸器系疾患の罹患歴は、CVMの三肢選択の質問を行う直前で、現在罹患しているか、過去に罹患したことがあるかを質問している。500人のうち、呼吸器系疾患に罹っていると回答したひとは3%弱であったが、過去に罹患したひとも含めると20%程度のひとが呼吸器系の病気に罹ったことがあると回答していた。現在罹患しているひとも含めて罹患経験があるひとに対するダミー変数を導入し、対応するパラメータをLpcとした。t値は有意であり、呼吸器系疾患に罹患した経験があると支払意志が強くなる傾向がある。大気汚染の現状についても、三肢選択の前に質問を行った。選択肢は、「大気汚染の問題はない」、「大気汚染はあるが、段々良くなってきている」、「更に悪くなってきている」、「問題があり、良くも悪くもなっていない」、「その他」から選択する形式とした。「その他」を選んだ回答者はいなかった。他のパラメータと同様に後三者に対してパラメータPo2c、Po3c、Po4cを対応させた。Po2c、Po3cは有意に負でありPo4cは有意性は検出されなかった。大気汚染について、改善、悪化について変化があると考えられる回答者について、問題がないか変化がないとしたひとに比べて支出意志が強いという傾向になった。

性別については、女性についてパラメータFmc、子供の有無についてはCheを、回答にもとづきダミー変数を設定しパラメータを推定した。いずれもt値から統計的に有意ではなく、性別と子供

表3.2 デリモデルの当てはめ結果例

モデル		B1	B2	B3	B4	B5	B6
対数尤度		-1,317.7	-1,313.2	-1,313.2	-1,309.0	-1,300.4	-1,304.6
定数部分	$a$	-8.08 (-25.95)	-7.75 (-22.79)	-8.29 (-24.8)	-7.68 (22.55)	-7.63 (-10.39)	-8.10 (-23.74)
	$b$	0.93 (25.35)	0.94 (25.32)	0.94 (25.3)	0.94 (25.31)	0.96 (25.36)	0.95 (25.34)
世帯年収	Rs. 100,000以下		*	0.55 (3.0)	*	0.42 (2.18)	0.44 (2.33)
	Rs. 100,001 - Rs. 200,000		-0.57 (-2.99)	*	-0.45 (-2.33)	*	*
	Rs. 200,001 以上		-0.49 (-2.00)	*	-0.30 (-1.19)	*	*
学歴 階級合併	高等学校相当まで				*	*	*
	短大相当(退学含む)				-0.48 (-2.89)	-0.41 (-2.30)	-0.42 (-2.56)
大気汚染への認識	問題はない					*	*
	改善されつつある					-1.42 (-2.08)	-0.79 (-3.01)
	悪化している					-0.50 (-0.78)	*
	問題有るが変化無					-0.90 (-1.38)	*
性別	男性だと 0 女性だと 1					0.14 (0.82)	
結婚経験	結婚経験有りだと 1					0.48 (1.24)	
子供の有無	子供有りと 1					-0.51 (-1.41)	

の有無が支払意志に与える影響は検出されなかった。

デリ市での調査では、所得は5万ルピー以下、5万ルピーを超え10万ルピー、以後10万ルピーまで20万ルピー刻み、200ルピー以下、それ以上の計9段階で質問している。しかしながら、被調査世帯において40万ルピー以上の所得があった世帯は少数だったため、分析を行う時は、10万ルピー以下、10万ルピーを超え20万ルピー以下、20万ルピーを超える、の3段階に分けて推定を行った。モデルB2およびB3は、所得の上位2階級に属する世帯に対するダミー変数を導入して推定を行ったものである。所得を3段階に分けて考えるモデルB2では、所得下位層に対する中位、上位層の係数を推定した。係数はいずれも有意であった。モデルB3では、中位、上位をひとまとめにして下位層と比較した。対数尤度の差とパラメータが一つ少ないことを考慮すると、モデルB3の方がモデルB2の方が分析対象のデータに対しては当てはまりが良いと考えられた。これは、所得が中位以上になると支払い意志が強くなるものの、中位と上位の差は検出されなかったことに相当する。

学歴については、短大就学相当(中退を含む)以上の学歴がある回答者とそれ以外に分けて、ダミー変数を導入した。モデルB4からB6は学歴を説明変数として含むモデルで、何れにおいても学歴が高い方が支払意志が強いという傾向が有意に出ている。大気汚染のレベルについての認識については、改善されつつあるという認識があるときに支払意志が強くなるという傾向が検出されたが、他の回答についての係数は有意性を検出できなかった。性別、結婚経験、子供の有無は上海市での調査と同様影響は検出されなかった。

3) 少額でも支払意志がない回答者についての分析

(1) 式のモデルは、金額が零になると全員が罹患率減少に対して金銭的な支払を行い、金額が増すに従い、支払を行う率が減少するという形になっている。喘息罹患率の減少

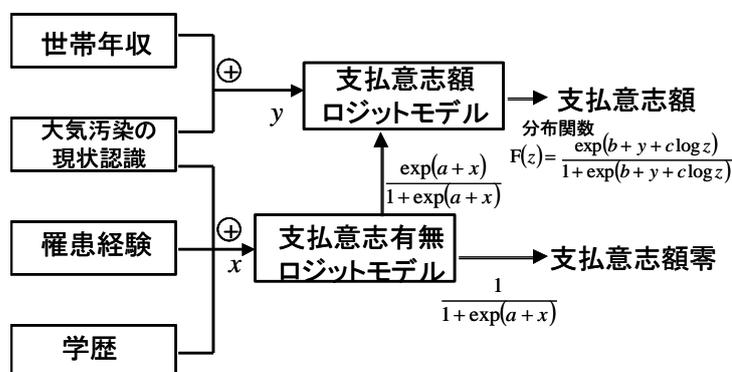


図3.3 中国・上海における支払意志額の構造

表3.3 支払意志額が零のひとの存在を考慮したモデルの当てはめ

Model	C1	C2	C3	C4	C5
Median	726.9	677.4	666.2	693.5	716.7
Log likelihood	-795.1	-761.0	-726.1	-733.2	-736.3
AIC	1594.3	1559.9	1522.3	1512.5	1492.5
a	-12.80 ( -14.0 )	-12.12 ( -8.7 )	-13.99 ( -11.2 )	-13.48 ( -12.1 )	-13.67 ( -14.2 )
b	1.75 ( 1.47 )	1.95 ( 1.34 )	2.08 ( 1.53 )	2.04 ( 1.52 )	2.00 ( 1.52 )
d	0.57 ( 5.2 )	0.63 ( 5.2 )	-1.96 ( -2.8 )	-1.73 ( -3.2 )	-1.38 ( -3.8 )
I2c		0.40 ( 0.6 )	0.74 ( 1.2 )		
I3c		-0.11 ( -0.2 )	0.01 ( 0.0 )		
I4c		-0.09 ( -0.2 )	0.06 ( 0.1 )		
I5c		-0.24 ( -0.4 )	-0.03 ( -0.1 )		
I6c		-1.24 ( -1.9 )	-1.04 ( -1.6 )		
I7c		-1.42 ( -2.1 )	-1.12 ( -1.7 )		
I8c		-1.90 ( -2.2 )	-1.65 ( -1.9 )		
IA2c				-0.38 ( -4.0 )	-0.44 ( -5.5 )
Ed2c		-0.96 ( -2.0 )	-0.61 ( -1.3 )	-0.51 ( -1.1 )	
Ed3c		-1.14 ( -2.2 )	-0.73 ( -1.4 )	-0.63 ( -1.3 )	
Lpc		-0.32 ( -1.0 )	-0.17 ( -0.5 )	-0.13 ( -0.4 )	
Po2c		-0.25 ( -0.6 )	0.11 ( 0.3 )	0.30 ( 0.8 )	
Po3c		-1.54 ( -3.6 )	-1.16 ( -2.7 )	-1.02 ( -2.5 )	-1.25 ( -4.5 )
Po4c		-0.34 ( -0.6 )	-0.46 ( -0.8 )	-0.23 ( -0.4 )	
Fmc		-0.15 ( -0.7 )	-0.11 ( -0.5 )	-0.13 ( -0.6 )	
Mac		-0.42 ( -0.9 )	-0.47 ( -1.0 )	-0.54 ( -1.2 )	
Chc		0.25 ( 0.6 )	0.28 ( 0.7 )	0.32 ( 0.8 )	
I2e			1.04 ( 1.7 )		
I3e			-0.16 ( -0.3 )		
I4e			0.28 ( 0.6 )		
I5e			0.31 ( 0.6 )		
I6e			0.16 ( 0.3 )		
I7e			1.05 ( 1.7 )		
I8e			1.41 ( 1.4 )		
IA2e				0.10 ( 1.2 )	
Ed2e			0.97 ( 2.5 )	0.85 ( 2.3 )	0.96 ( 2.7 )
Ed3e			1.40 ( 3.3 )	1.34 ( 3.2 )	1.48 ( 4.0 )
Lpe			1.39 ( 3.2 )	1.37 ( 3.2 )	1.47 ( 3.2 )
Po2e			1.03 ( 3.4 )	1.08 ( 3.7 )	0.91 ( 3.7 )
Po3e			1.90 ( 4.5 )	1.89 ( 4.7 )	1.70 ( 4.6 )
Po4e			0.10 ( 0.2 )	0.25 ( 0.6 )	
Fme			0.18 ( 0.8 )	0.16 ( 0.7 )	
Mae			0.28 ( 0.6 )	0.16 ( 0.3 )	
Che			-0.28 ( -0.6 )	-0.11 ( -0.3 )	

は、ほぼ全てのひとが望むものであると想定され、金額が低いと全員が罹患率の減少を望むと考えるのが自然である。しかしながら、調査で得られた回答分布からは金額に関わらず支払を行わない層がいることが示唆された。CVMにおいては、設定されたシナリオに対して「支払手段に反対」、「政策の詳細が不明」等という立場に立ち提示額に関わらず支払をしないという抵抗回答が存在することがある<sup>12)</sup>。このとき、支払を行わない理由を尋ねる等の方法で抵抗回答を除外して分析を行うことがある。抵抗回答をそのままにして分析を行うと、WTPの推定値は低めのバイアスを持つことになる。一方で、支払意志の無い回答を機械的に除くことはWTPを過大に見積もる危険性があることも指摘されている。CVMは多様な対象に適用されており、既に存在している公共財についての評価にも使用される。無料で現在一般の人に対して供給されている公共財に対して、回答者が支払を行うことを仮想することは困難である可能性は大きく、このことに起因して抵抗回答が存在することが予測される。しかしながら、本報告での分析対象は自分自身の健康についての事項であり、公共財と比べて支払方法に反対等の理由で抵抗回答が起こる可能性は低いと考えられる。また、回答者が対象物に大きな経済的な価値を見いだしている場合において、支払手段を理由に支払わないと回答するかについての考察は十分に行われてはいない。

ここでは、以上のことを鑑み、金額が零でも支払意志がない確率 $\beta$ を得られた回答から最尤法で求めることとした。モデルの構造を図3.3に示す。(1)式に代えて、WTPが $x$ より小さい確率が

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{a + \sum_i c_i z_i + b \log x}} (1 - \beta) + \beta \quad (2)$$

となるモデルを当てはめた。ここで、 $\beta$ は金額が零であっても支払うと回答しない確率で、これが説明変数 $z_i$ に依存することを考え、パラメータ $c_i$ により $\beta$ が

$$\beta = \frac{1}{1 + e^{d + \sum_i e_i z_i}} \quad (3)$$

と変化する場合を考えた。表3.3に推定結果を示す。ここで、パラメータ $a$ 、 $b$ 、 $c_i$ は、(1)式のモデルと同様であり、パラメータ $d$ 、 $e_i$ は、金額に関わらず支払意志がない比率である。推定結果を表3.3に示す。(2)式中のパラメータ名は(1)式のモデルと同じものを用い、(3)式のパラメータ名は(1)式のその末尾の $c$ を $e$ に変更したものをを用いた。

説明変数がないモデルC1を当てはめた対数尤度は、 $\beta$ を導入しないモデルに比べて対数尤度が大きく増加しており、金額に関わらず支払意志がないひとの比率が高いことが示唆された。中央値は死亡率1%減当たり730元となり、(1)式のモデルより大きくなった。これは、金額に関わらず支払を行わないひとを含めて推定を行った場合に分布が下の方に引きずられていた影響がなくなったからだと推定される。なお、ここでの中央値は、金額零で支払を行わないひとを含めて支払意志額の順で50%に位置するひとに対応する金額である。

説明変数を導入し、 $\beta$ が定数としたモデルC2では、対数尤度が増大することにより当てはまりは良いと判定される一方で、多くのパラメータの有意性が失われている。

一方、 $\beta$ が説明変数に依存することを許容すると、 $\beta$ に関わるいくつかのパラメータについて強く有意性が検出された。世帯年収は、金額に影響を与える(2)式のパラメータとして(1)式のモデルと同様の結果が得られている一方で、 $\beta$ に与える影響は弱いと推定された。他の多くのパラメータは、逆に(2)式のパラメータでは有意性がなく、(3)式のパラメータとして有意であった。学歴については、モデルB2では $t$ 値が大きく低下しており、モデルB3では、Ed2c、Ed3cの有意性が失われた一方で、Ed2e、Ed3eは正で統計的に有意であった。(3)式のパラメータは大きい程 $\beta$ が小さくなることにより支払意志が強くなる。呼吸器系疾患罹患歴も、 $\beta$ が導入されたモデルではLpcの有意性は無くなり、Lpeは有意であった。このことより、学歴、罹患歴は支払意志の金額に作用するというよりも、支払を行うか否かに影響すると解釈できる。大気汚染についての認識においては、Po3c、Po3eについては、同様な傾向が見られたが、汚染が悪化しているとしている回答者については、金額及び $\beta$ の両方のパラメータPo2c、Po2e共に支払意志が強くなる傾向を有意に示していた。

性別、結婚経験の有無、子供の有無が支払意志に及ぼす影響は、 $\beta$ を含むモデルでも検出されなかった。

表3.1から3.3の推定は、三肢選択法による選択肢とWTPの存在範囲について強い仮定を置いて行われている。このため、推定法により結果が変化する可能性はある。しかしながら、回答者の選択行動について、所得と所得以外の要因で異なる傾向の存在が示唆された。

#### 4) 所得弾性率についての検討

支払意志額の所得依存性について、前節まででロジスティックモデルの係数と所得の関係によ

り分析した。支払意志額について

$$F(x;u) = \frac{\exp(u+a+b \log x)}{\{1 + \exp(u+a+b \log x)\}}$$

となる場合を想定していた。ここで、 $a$ 、 $b$  は、パラメータで、 $u$  は、回答者毎に異なる属性である。支払意志額  $y$  と所得  $w$  との関係が、 $y = cw^d$  という関係を想定できるときの  $d$  の値が所得弾性率となる。上海市で行っている調査では、支払意志額の回答が直接得られるのではなく、金額を提示してその金額からの大小が回答として得られることになる。これから、上式の分布関数を想定してパラメータを推定することになる。弾性率を推定する場合、

$$\log y = \log c + d \log w$$

であることを考慮すると、所得の対数を説明変数に含み推定を行うと、

$$\begin{aligned} F(x;u) &= \frac{\exp(u+a+b \log x - c \log w)}{\{1 + \exp(u+a+b \log x - c \log w)\}} \\ &= \frac{\exp[u+a+b \log(x/w^{c/b})]}{\{1 + \exp[u+a+b \log(x/w^{c/b})]\}} \end{aligned}$$

となり、 $c/b$  が弾性率の推定値と考えることができる。

上海市での調査において、世帯年収は9段階の選択肢及び無回答の計10種類のカテゴリのどれに属しているかという形でデータが与えられている。支払意志額の所得弾性率は所得の対数と支払意志額の対数との間の線形関係とも考えることができ、各階級毎に所得額を対応させることが必要となる。また、所得金額が小さい回答者については、対数をとることにより値が極端に小さくなる心配もあり、最上位階層は所得金額の上限は与えられていない。このため、2~8番目の所得階層のデータを用いることとし、各階層の中央の値(上下端の平均)をその階級に属する回答者世帯の年間所得として推定を行った。このため、両端の所得階級の回答者はデータから除かれることになりデータ数は全体より減少することになる。

上海市のデータに上記のモデルと従来のモデルを当てはめて推定を行った。また、提示金額が幾ら低くても支払を行わないと言うひとが割合  $g$  だけいる場合

$$F(x;u) = (1-g) \frac{\exp[u+a+b \log(x/w^{c/b})]}{\{1 + \exp[u+a+b \log(x/w^{c/b})]\}} + g$$

についても推定を行った。(抵抗回答がある場合もこれに相当する)

試算を行った結果、所得を説明変数として導入する場合、弾性率に対応して所得に対して対数をとるよりも、パラメータ化した方が僅かに当てはまりは良好であったが、差は大きくはなかった。提示金額零で全員が支払を行う場合(通常の場合、 $g=0$ に相当)は、 $b=0.908$ 、 $c=-0.913$ で弾性率の推定値は1.005、金額零で支払わない人がいる場合の推定値は、 $g=0.35$ で、 $b=1.888$ 、 $c=1.920$ で弾性率1.017と推定された。金額零でも支払わない人を考慮すると係数  $b$ 、 $c$  は大きく変化するものの、その比率の弾性率の推定値はほとんど変わらなかった。また、弾性率の値はほぼ1となった。

### (3) 費用便益分析

被害係数・経済評価係数についての検討結果を踏まえ、中国・上海市で脱硫・脱硝装置付きの先進的火力発電(USC)を新設導入するCDMプロジェクトを想定して費用便益分析を実施した。

CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>の排出削減量はサブテーマ(2)のエネルギーチェーン多層評価システムによる結果を用いた。USC導入により、現状の上海を含む華東地区における平均排出量と比較して、CO<sub>2</sub>は100 g-CO<sub>2</sub>/kWh、SO<sub>x</sub>は2.37g-SO<sub>x</sub>/kWh(15,565t-SO<sub>x</sub>/年に相当)、NO<sub>x</sub>は3.7g-NO<sub>x</sub>/kWh(24,309 t-NO<sub>x</sub>/年に相当)という削減量に、それぞれなった。このベースラインの平均排出量の将来シナリオは、現時点の平均排出量が将来にわたっても一定であるとの仮定から、サブテーマ(1)の中国電源計画モデルの分析結果を用いるよう改めた。

この排出削減量は主に中国における影響緩和に寄与することになり、それを金銭評価して便益と解釈することになる。しかしながら、排出されたSO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>については、中国国内だけでなく日本にも飛散・越境し、酸性雨や二次大気汚染として影響を与えている。そのため、日本への影響の緩和も考慮する必要がある。日本へ越境して日本に沈着するSO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>の率を、排出量の0.5%とした<sup>9)</sup>。この値も将来時点についてのシナリオに本来依存すると思われるが、評価の第一歩としては十分と考えられる。

次にLIMEの被害係数を本分析に用いるように修正する。分析に用いるLIMEの被害係数

- ・温暖化：人間健康、社会資産
- ・酸性化：社会資産、一次生産力
- ・二次大気汚染：人間健康

が評価対象となる。温暖化については中国が対象地域となり、酸性化、二次大気汚染は中国及び日本の両方が評価対象となる。影響領域、影響カテゴリー、地域を合計すると8種類になる。

ここで、一次大気汚染は現段階での分析には含んでいない。今後別途、上海における分析結果をアドオンする方法を採用する。また、二次大気汚染については、NO<sub>2</sub>やSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等の粒子の拡散・越境を評価するSRM(Source Receptor Matrix)が現時点では最新のものが無いため、過去の大気拡散モデルのデータを利用している。ただし、今後の見直しで変更される可能性はある。

現在の日本を対象としたこれらのLIMEの被害係数を将来時点・中国に適用するために、影響を受けるレセプターの将来シナリオにより調整を行なう。具体的には日本の基準年の値を分母、日本および中国の将来時点の値を分子とした比を、LIMEの被害係数に乗じる。この方法は第一次近似としては十分と考えられる<sup>10)</sup>。

求めた排出削減量のうち、CO<sub>2</sub>は中国における温暖化影響、SO<sub>x</sub>

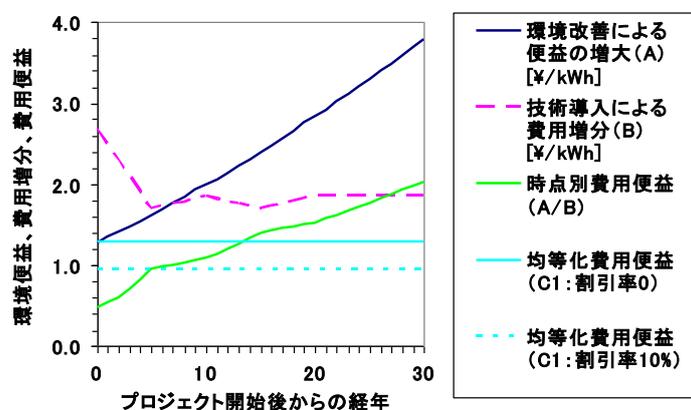


図3.4 中国における先進的火力発電導入による費用便益

とNOxは酸性化と大気汚染による影響としてLIMEの被害係数を調整して求めた。被害の緩和を便益と解釈し、その額を便益が一人当たりGDP比の0.5乗に比例するとした便益移転を行い、 $\Sigma$  (排出削減×被害係数×WTP)から便益総額を求めた。本来ならばIPCC-SRESのB2シナリオにおける一人当たり消費の伸び率を用い、消費の限界効用の弾力性を、社会調査の結果より0.9と設定し、割引率(社会的時間選好率)を求めべきところであるが、簡便のためゼロとした場合と、10%とした場合の2通りで求めた。その結果を図3.4に示す。脱硫装置のコストが低下し、費用は低下する。一方、一人当たりGDPの増加によって、支払意思額が増加し、便益は増加する。30年間の均等化費用便益はほぼ1で、費用と便益は同程度である。ベースラインの経年変化(排出削減)を考慮したことで、コベネフィットを含む便益は、先行研究に比べ大きくないという結果が得られた。また、SOx、NOx排出削減によるコベネフィットは、CO<sub>2</sub>排出削減による便益より大きい。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

CDMによる環境負荷を副次的な費用、便益を含めて評価するために、ライフサイクル影響評価係数の地域、時点についての見直しを行った。環境科学的な面からのLIMEの被害係数・経済評価係数の見直しを行い、経済評価係数については、中国・上海市及びインド・デリー市において支払意思額調査を実施し、支払意思額の金額とこれに影響を与える要因について分析した。このことはその環境評価に係わる科学的基礎的知見の整備に貢献すると共に、所得が上昇途上にある発展途上国における環境意識形成についての知見を与えることが期待される。ケーススタディとして、中国における先進的火力発電によるCDMを対象にコベネフィットを含むライフサイクルでの費用便益を評価した。費用便益の評価において、他のサブテーマで算出されているベースライングリッド排出係数の経年変化を考慮して便益を評価した点、ライフサイクルでの排出量の評価を実施した点でも新規性がある。

### (2) 地球環境政策への貢献

現在の日本を基準として開発されたライフサイクル影響評価手法であるLIMEの手法の枠組みを維持しつつ適用対象を拡げることにより、国外での環境影響を考慮する必要のあるCDM等の国際的なプロジェクトの評価を行うことが可能になることが期待される。特に、日本とCDM対象国との間で行われる事業である「コベネフィット研究とモデル事業の協力実施」等に手法面での貢献が見込まれる。これらの成果を通して地球環境政策への貢献が期待される。

## 6. 引用文献

- 1) Brouwer R.: "Environmental value transfer: state of the art and future prospects" *Ecol. Econ.* 32, 137-152 (2000)
- 2) Brouwer R. and Spaninks, F. A.: "The Validity of Environmental Benefit Transfer: Further Empirical Testing", *Env. Res. Econ.* 14, 95-117 (1999)
- 3) Colombo, et al.: "Testing Choice Experiment for Benefit Transfer with Preference Heterogeneity", *Amer. J. Agr. Econ.* 89(1) 135-151 (2007)
- 4) Loomis J., Traylor K. and Brown T.: "Trichotomous Choice: A Possible Solution to Dual

- Response Objectives in Dichotomous Choice Contingent Valuation Questions”, Journal of Agricultural and Resource Economics, 24-2, 572-583, (1999).
- 5) Morrison, et al.: “Choice Modeling and Tests of Benefit Transfer”, Amer. J. Agr. Econ. 84(1) 161-170 (2002)
- 6) Ready R., et al.: “Benefit Transfer in Europe: How Reliable Are Transfers between Countries”, Env. Res. Econ. 29, 67-82 (2004)
- 7) Ready R. and Navrud S.: “International benefit transfer: Methods and validity tests”, Ecol. Econ. 60, 429-434 (2006)
- 8) Smith, et al.: “Structural benefit transfer: An example using VSL estimates”, Ecol. Econ. 60, 361-371 (2006)
- 9) 杉山大志、他: 「日本の酸性化対策としての国際協力の費用効果性-中国・韓国の脱硫への出資は安価なオプションか?」 エネルギー・資源 20, 289-296 (1999)
- 10) 時松宏治、他: 「ライフサイクル影響評価と統合評価モデルを融合したシミュレーション分析」、環境科学会誌 19, 25-36 (2006)
- 11) 野村昇: 「低環境負荷エネルギーシステムへの支払意志の分析」、日本エネルギー学会誌, 88-2, 140-146, (2009).
- 12) 栗山 浩一: 「表明選好法におけるバイアスの経済分析」、環境経済・政策研究, 1-2, 51-63, (2008).
- 13) 古川俊一、磯崎肇: 「統計的生命価値と規制政策評価」、日本評価研究, 4-1, 53-65, (2004).

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表 (学会)

- 1) 野村昇: 「上海市における環境意識の調査」、第4回日本LCA学会研究発表会、北九州、2009
- 2) 野村昇: 「CDMホスト国における環境経済価値の調査」、第5回日本LCA学会研究発表会、横浜、2010

### (3) 出願特許

なし

### (4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

なし

### (5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし