

博士論文

論文題目 マッチング削減約束アプローチを用いた気候変動国際交渉における野心的削減目標の合意可能性に関する研究

(Assessing the Feasibility of an Agreement on Ambitious Emission Reduction Targets in International Climate Change Negotiations: A Matching Abatement Commitment Approach)

氏名 川又 孝太郎

目次

要旨	8
ABSTRACT	10
1 序論	13
2 既往研究のレビューと本論文の目的	31
2.1 気候変動国際交渉の既往研究のレビュー	31
2.1.1 ゲーム理論を用いた分析研究	31
2.1.2 統合評価モデルを用いた定量的な分析研究	38
2.2 既往研究の問題点	41
2.3 論文の目的	44
2.4 論文の構成	44
3 モデルの枠組みと提携のないケースの計算結果	47
3.1 モデルの構築	47
3.2 STACO モデル	49
3.3 提携のないケースの計算結果	55
3.4 まとめ	57
4 マッチングメカニズム	59

4.1	理論的背景とモデルの構築	59
4.1.1	二国間のメカニズム	59
4.1.2	三カ国間以上のメカニズム	62
4.1.3	STACO モデルと組み合わせたモデル計算	64
4.2	計算結果	65
4.2.1	6カ国のケースにおける排出削減量	65
4.2.2	すべての参加国数毎の組み合わせにおける排出削減量と利得	67
4.2.3	産業革命以降の世界平均気温の上昇を 2°C未満に抑えるために必要な削減量との比較	73
4.2.4	便益の感度分析	75
4.3	まとめ	78
5	QCM (QUANTITY-CONTINGENT MECHANISM)	79
5.1	理論的背景とモデルの構築	80
5.1.1	理論的背景	80
5.1.2	STACO モデルと組み合わせたモデル計算	82
5.2	計算結果	83
5.2.1	6カ国のケースにおける QCM の適用	83
5.2.2	マッチングメカニズムの結果を活用した QCM	84
5.3	まとめ	86
6	モデルの拡張：排出量取引	87
6.1	理論的背景	87
6.2	計算結果	89
6.2.1	6カ国のケースでの計算結果	89
6.2.2	すべての参加国数毎の組み合わせにおける排出削減量	92

6.3	まとめ	96
7	国際交渉においてマッチング削減約束アプローチを適用するための提案	99
7.1	モデル分析の結果を踏まえたメカニズム提案	99
7.2	国際交渉の実態を踏まえた実現可能性の評価	102
7.2.1	QCMの提案者の存在	102
7.2.2	国内制約：国際競争力への悪影響の懸念	104
7.2.3	排出削減の費用便益の認識	111
7.3	まとめ	116
7.4	国際交渉への適用に際して具体的なプロセスの提案	117
8	結論	121
	参考文献	127
	補足資料	133
	謝辞	145

図目次

図 1-1	CO ₂ の産業革命以降の歴史的排出量（1850年～2008年）	15
図 1-2	気候変動枠組条約と京都議定書の締約国数	18
図 1-3	京都議定書に定められた主要諸国の排出削減義務と実績	19
図 1-4	各国のCO ₂ 排出量の割合（2010年）	20
図 1-5	世界及び主要排出国のCO ₂ 排出量の推移と将来予測	21
図 1-6	2020年の排出削減目標と2℃目標達成に必要な削減量とのギャップ	24
図 1-7	気候変動国際交渉の経緯	25
図 2-1	協力・非協力の場合の削減量と便益の比較	35
図 3-1	本論文におけるモデルの構成	48
図 3-2	2011年時点での各国・地域の限界削減費用曲線	53
図 3-3	STACOモデルでの削減量を決める考え方に関する模式図	54
図 3-4	STACOモデルによる世界全体のCO ₂ 排出量の予測	56
図 3-5	各国・地域のCO ₂ 排出量の予測	56
図 4-1	マッチングメカニズムによる参加国数毎の最大削減量とその際の利得	69
図 4-2	便益の感度分析結果	77
図 5-1	QCMのプロセス	82
図 6-1	6カ国の場合のマッチングメカニズムとQCMの利得の比較（排出量取引の有無）	90
図 6-2	参加国数毎の削減量と利得の比較（排出量取引の有無）	93

表目次

表 1-1	囚人のジレンマ状態にある気候変動問題.....	29
表 3-1	STACO モデルのパラメータ.....	50
表 3-2	STACO モデルの排出及び便益のシェアのパラメータ.....	52
表 3-3	提携のないケースでの各国の削減割合.....	57
表 4-1	6カ国参加の場合の STACO モデルとマッチングメカニズムの削減量の比較.....	66
表 4-2	6カ国の場合のマッチング係数.....	67
表 4-3	最大の削減量をもたらす国の組み合わせ.....	70
表 4-4	参加国数毎に最大の削減量をもたらす組み合わせでの追加的削減量と追加的利得	71
表 4-5	最大削減量をもたらす組み合わせにおける各国・地域の削減量.....	73
表 4-6	産業革命以降の世界の平均気温上昇を 2℃未満にするために必要な排出量の比較	75
表 4-7	限界削減便益の割引率の変化による感度分析結果.....	76
表 4-8	合計削減量の割引率の変化による感度分析結果.....	76
表 5-1	6カ国の場合の削減量の比較.....	84
表 6-1	6カ国の場合における限界削減費用の比較.....	90
表 6-2	オリジナルの STACO、マッチングメカニズム及び QCM の利得の比較（排出量取引の有無）.....	92
表 6-3	6カ国の最大削減ケースにおける 限界削減費用の比較.....	93
表 6-4	排出量取引の取引量とそれによる移転される金額.....	94

表 6-5	参加国数毎の最大削減ケースにおける各国の排出量取引量.....	95
表 6-6	参加国数毎の最大削減ケースにおける各国の限界削減費用.....	96
表 7-1	2020年における各国の削減割合の比較.....	100

略語

BaU; Business as Usual

COP; Conference of Parties

EU; European Union

G20; Group of 20

IIASA; International Institute for Applied Systems Analysis

IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change

QCM; Quantity-Contingent Mechanism

STACO; Stability of Coalitions

UNEP; United Nations Environment Programme

UNFCCC; United Nations Framework Convention on Climate Change

要旨

気候変動問題は囚人のジレンマ状態にあり、各国が他国の温暖化ガス排出削減にただ乗り（フリーライダー）する誘因が内在しているため、国際交渉において各国が大幅な削減目標に合意することは非常に難しい。囚人のジレンマを克服するメカニズムについては、ゲーム理論を用いた研究が広く行われている。また、気候変動の原因となる温室効果ガスの大気中での蓄積を考慮し、各国の削減目標の違いがどのように影響するかについて、統合評価モデルを用いた定量的な解析も行われている。本論文では、ゲーム理論のメカニズムデザインの一つであるマッチング削減約束アプローチの考え方を、**STACO (Stability of Coalitions)** という統合評価モデルと組み合わせ、国際交渉において、各国が野心的な削減目標に合意しうる方策について検討した。他国の削減を条件に自国の削減目標を積み増しするマッチングメカニズムを適用することにより、そのようなメカニズムがない場合と比較して、最大 **3.7** 倍の大幅な削減が実現できることを明らかにした。また、メカニズムに参加する国が増えれば増えるほど、削減量及び利得は大きくなることが明らかとなった。さらに、排出量取引を導入することにより、世界全体の削減費用を最大 **35%** 削減することが可能となり、また、各国の利得も大幅に向上することを示した。各国の限界削減費用は異なるため、各国が国内ですべて削減する場合と比べ、排出量取引を活用し、より限界削減費用の低い国で削減する方が世界全体で費用効率的に排出削減を実現することが可能となる。マッチングメカニズムの問題点としては、1) 参加国全てがメカニズム開始前に他国に対するマッチング係数を約束する必要があること、2) 削減量はメカニズムが始まる前には明らかになっていないため国内での合意を得ることが難しいことが挙げられる。そのため、マッチングメカニズムから求められた最適な削減量を特定の国々のグルー

プから他の国々に対して提案し野心的な削減目標に合意を得るという **Quantity-contingent mechanism (QCM)** が有効であると考えられる。このようなメカニズムは、**European Union (EU)** 等が現実の気候変動国際交渉で提案している条件付削減目標の形態に近いものであるため、これを発展させる形で **QCM** のメカニズムを提案することは実現可能と思われる。200 近くの国が参加する気候変動枠組における国際交渉で **QCM** のメカニズムを使った合意を得ることは非常に難しいことから、まずは主要排出国間で **QCM** に基づく合意を得た上で、気候変動枠組条約下の交渉で賛同を得るというプロセスが現実的である。主要排出国間の枠組みとしては、すべての主要排出国が参加しており、気候変動の国際交渉でもこれまで大きな役割を果たしてきた既存の **G20** の枠組みを活用することが最善だと考えられる。なお、本研究の結果を現実の国際交渉に適用するためには、各国の限界削減費用及び限界削減便益について関係者間で認識が共有されることが必須であるため、費用便益分析に関する研究の一層の進展が求められる。

キーワード：ゲーム理論、気候変動、国際交渉、マッチング削減約束アプローチ、統合評価モデル、ただ乗り

ABSTRACT

This paper aims to apply an alternative game theoretic model – namely the matching abatement commitment mechanism – to the negotiations for international climate change. This model might prove to be useful when assessing the feasibility of an agreement on ambitious emission reduction targets. It is generally difficult for each country to agree on ambitious emissions reduction targets in climate change negotiations as a result of the incentive for free riding. To overcome this problem that is often inherent in the provision of global public goods without any central authority, the game theoretic approach is widely employed and can also be combined with other quantitative methods for analyzing the impact of each country's behavior on cumulative emissions. This paper focuses on the matching abatement commitment mechanism, an alternative game theoretic model, where it is assumed that each country will determine its emission level contingent on the others' emission levels. Moreover, this approach will combine the data with an Integrative Assessment Model (STACO model). A numerical analysis has been carried out to examine how extensive of an emissions reduction can be achieved with and without the matching mechanism. The results show that this mechanism enables all countries to choose more ambitious reduction targets by a maximum of 3.7 times compared to situations that do not employ the mechanism. The results also show that the total reduction and payoff will both increase with an increasing number of coalition members. In addition, the emissions trading scheme reduces the total cost of emission reduction over the entire world by 35% at maximum; moreover, it improves the payoff for each country.

When the matching mechanism is applied to a real international negotiation there are at least two challenges to overcome. First, pledges on matching rates by all participating countries are required in advance. Second, reduction amounts cannot be determined prior to the mechanism

beginning. However, the Quantity Contingent Mechanism (QCM) can overcome these problems by requiring pledges from a limited number of countries only. The reduction amounts calculated through the matching mechanism can be set out as reduction pledges for developed countries and conditional reductions for developing countries.

The QCM is similar to the conditional pledges used by the European Union (EU), Australia, and others. It is hence realistic to apply the QCM to G20 countries rather than to all parties in the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). This study proposes a roadmap towards a possible agreement on the employment of the QCM; once there is agreement from the G20 countries this can be brought to the UNFCCC parties. In order for this scenario to materialize a mutual understanding of the cost and benefit of emission reduction must be established. With these conditions satisfied it is argued that QCM has significant potential to achieve ambitious emissions reduction targets.

Keywords: game theory, climate change, international negotiation, matching abatement commitment approach, integrated assessment model, free riding.

1 序論

気候変動問題とは、人為的な温室効果ガスの排出が蓄積し、その結果、気温の上昇や降雨量の変化、海面上昇などの気候の変動が長期的に起こる地球規模の環境問題である。

気候変動問題の国際的な対応を促す役割については、「気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)」が先導してきた。IPCC は、人為起源による気候変化、影響、適応及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988 年に世界気象機関 (WMO) と国連環境計画 (UNEP) により設立された組織である。1990 年に第 1 次評価報告書 (First Assessment Report) を発表して以来、4.5 年ごとに報告書をまとめている。2013 年には最新の IPCC 第 5 次評価報告書のうち、気候変動の予測に関する第 1 作業部会報告 (IPCC, 2013) がまとめられ、気候変動が人為的な温室効果ガスの排出により引き起こされていることが科学的に 95%以上の確率で確からしいとした。また、この 100 年間に世界の平均気温が 0.7°C 上昇し、海面が 17 cm 上昇していることが観測されている。さらに、第 5 次評価報告書の予測では、今世紀末に世界の平均気温がさらに 0.3°C から 4.8°C 上昇するとともに、海面は 26-82 cm 上昇すると予測されている (IPCC, 2013)。降水量については、短時間に強い雨が降ることが増え、台風も強大化すると予測されている。このような気候変動がどのような影響をもたらすかについては、IPCC の第 2 作業部会が検討している。IPCC 第 5 次評価報告書第 2 作業部会の結果は 2014 年の 3 月にまとめられる予定であるが、第 4 次評価報告書からは、将来的に世界の平均気温が産業革命以

前から 2-3° C を超える上昇が起きると、全ての地域で利益が減少またはコストが増大する可能性がかなり高いと予測されている (IPCC, 2007a)。また、世界銀行の主任エコノミストであったスターン卿を中心とした専門家のチームが 2007 年に発表したスターン報告 (Stern, 2007) では、気候変動対策に関する詳細な費用便益分析を行っているが、その計算結果は、産業革命以降の気温上昇が 2°C を超えると被害の大きさが対策コストを大きく上回り、かつ早期に対策をとった場合のコストが対策を先送りした場合のコストを下回るということを示した。

このように、気候変動による社会・経済・環境への悪影響は IPCC 評価報告書の功績もあり (2007 年にはノーベル平和賞を受賞)、近年広く認識されるようになり、将来の気候変動の脅威を避けるために、世界全体で大幅な削減を進める必要性に対する理解は深まっている。近年の異常気象の増加は、温室効果ガスとの直接的な因果関係は必ずしも明らかではないものの、人々に気候変動の脅威を身を以て感じさせている。しかしながら、なぜ、気候変動の国際交渉において各国は大幅な排出削減に合意することができないのであろうか？本論文の序論として、これまでの気候変動国際交渉の歴史を概観しつつ、上記疑問についての考察を行う。

1998 年に発表された IPCC 第一次報告書は、「人為起源の温室効果ガスがこのまま大気中に排出され続ければ、生態系や人類に重大な影響をおよぼす気候変化が生じるおそれがある」という警告を発した (IPCC, 1990)。世界の第一線の研究者が総体として発したこの警告は、社会的に非常に注目された。本報告を受けて、1992 年にリオデジャネイロで開催された地球サミットにおいて、国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) が署名され、1994 年に発効するに至った。気候変動枠組条約は、大気中の温室効果ガス (二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素 (亜酸化窒素 : N_2O) など、フロン類 (HFCs、PFCs、 SF_6)) の増加が地球を温暖化し、自然の生態系などに悪影響を及ぼすおそれがあることを、人類共通の関心事であると確認し、大気中の温室

効果ガスの濃度を安定化させ、現在および将来の気候を保護することを目的として、気候変動がもたらすさまざまな悪影響を防止するための取り組みの原則、措置などを定めている。条約では、締約国の共通だが差異のある責任、開発途上国などの国別事情の勘案、速やかで有効な予防措置の実施などを原則として掲げている。これらの原則の下、主に先進国に対して温室効果ガス削減のための政策の実施などの義務を課している。その理由としては、これまでの歴史的な排出量は先進国がその大半を占めること（図 1-1）、開発途上国は経済発展の途上にあり、排出削減のための資金もキャパシティもないことなどが挙げられる。

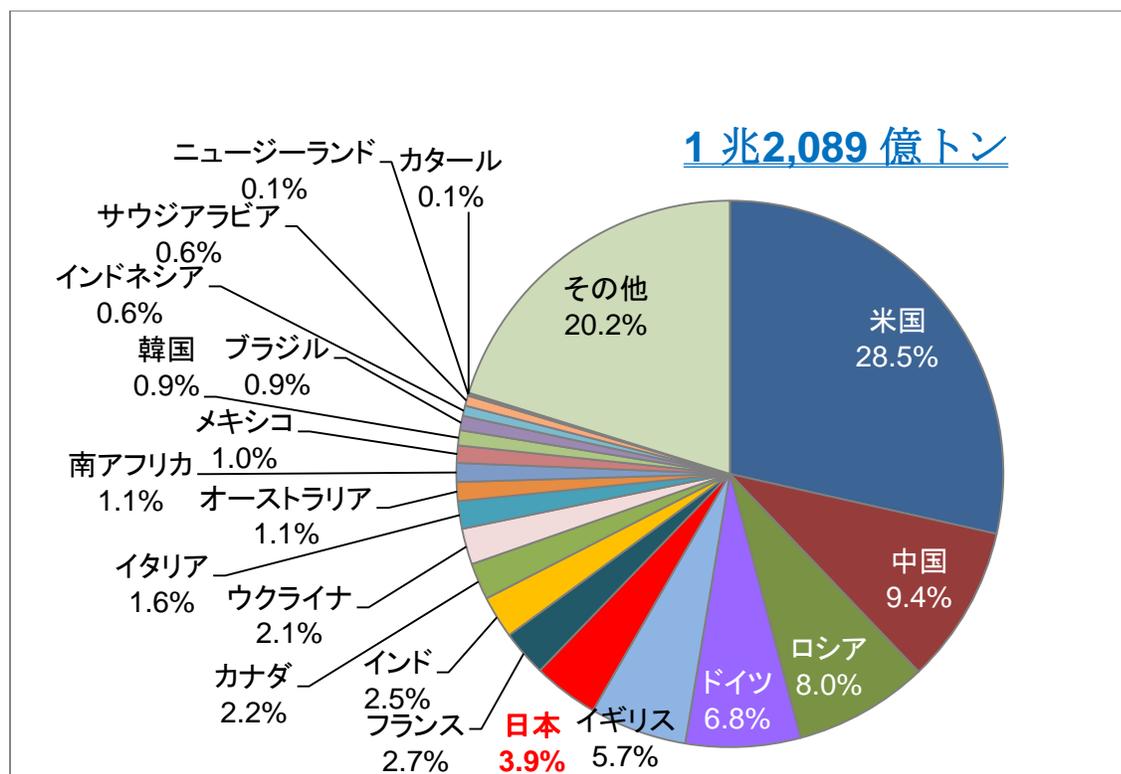


図 1-1 CO₂の産業革命以降の歴史的排出量（1850年～2008年）

（出典: World Resources Institute, Climate Analysis Indicators Tool）

気候変動枠組条約では、先進国及び旧ソ連や東欧等（合わせて附属書 I 国と呼ばれる）に対して、1990 年代末までに温室効果ガスの排出量を 1990 年の水準に戻すことを目指していくこと（そのための政策措置をとり、その効果の予測などを締約国会議に通報し、審査を受けること）、また、開発途上国に気候変動に関する資金援助や技術移転などを実施することを求めている。しかし、気候変動枠組条約での取り決め自体に法的拘束力がなかったため、2000 年に 1990 年の排出量に安定化という目標が達成する見込みが薄かった。また、2000 年以降の具体的取組みについて決められていなかった。このため、1995 年 3-4 月にベルリンで開催された第 1 回締約国会議（COP1 : Conference of the Parties）において、（1）政策および措置の詳細を定めること、（2）2000 年以降の特定期間における先進国の温室効果ガス排出量の具体的な削減目標を明示した議定書を 1997 年に開催する COP3 で採択すること、（3）開発途上国に対しては新たな約束を課さないことなどを盛り込んだ決議いわゆるベルリンマンデートが採択された（UNFCCC, 1995）。ベルリンマンデートは共通だが差異のある責任原則に基づき、開発途上国に対して何ら新たな約束は導入しない一方、持続的開発を達成するために約束の実行をより一層進めるということを定めた。つまり、開発途上国側からすれば、開発途上国の削減義務は新たな約束となるのでこれを回避できると解釈し、先進国側からすれば、条約に書かれている約束の実行を一層進めるということで、開発途上国にも何らかの義務を課すことができると解釈していた。

ベルリンマンデートの下で、1997 年 12 月に京都で開催された COP3 において気候変動枠組条約の目的を達成する議定書として、京都議定書が採択された。京都議定書は、2008～2012 年の期間（第 1 約束期間）の排出量に関する数値目標、排出抑制方法、排出削減を効率的に達成するための手段などを定めたものである。この議定書において附属書 I 国は第 1 約束期間の排出量に関する数値目標（附属書 I 国全体で 1990 年比平均 5.2%。日本 6%、米国 7%、欧州共同体 (EU) 8%の削減目標）を約束することとなり、さらに、その後の締約国会議で排出削減

を合理的に達成するための柔軟性措置（京都メカニズムとも呼ぶ）の細則、森林等吸収源の取り扱い、目標未達の際の罰則規定などが合意された。米国では COP3 の直前に、条約の締結権を持っている上院議会において、バード・ヘーゲル決議が採択された。主要な開発途上国の意味のある参加がないと京都議定書は批准しないという趣旨の決議で、1997年7月に連邦上院で、95対0の全会一致で採択された。COP3において当初米国が附属書I国だけの削減目標設定に対して激しく反対したのは、このバード・ヘーゲル決議が背景にあったからである。結局、COP3でアメリカは7%削減を受諾したものの、2001年の大統領選で誕生した共和党ブッシュ政権は同年3月に京都議定書離脱を表明、米国は京都議定書を締結しないまま今日に至っている。このように米国は2001年に議定書からの離脱を表明したが、日本は2002年6月に批准し、その後、2004年11月にロシアが批准して発効要件を満たしたため、2005年2月に京都議定書が発効した。2013年3月時点で194カ国およびEUが議定書の締約国となっている（図1-2）。

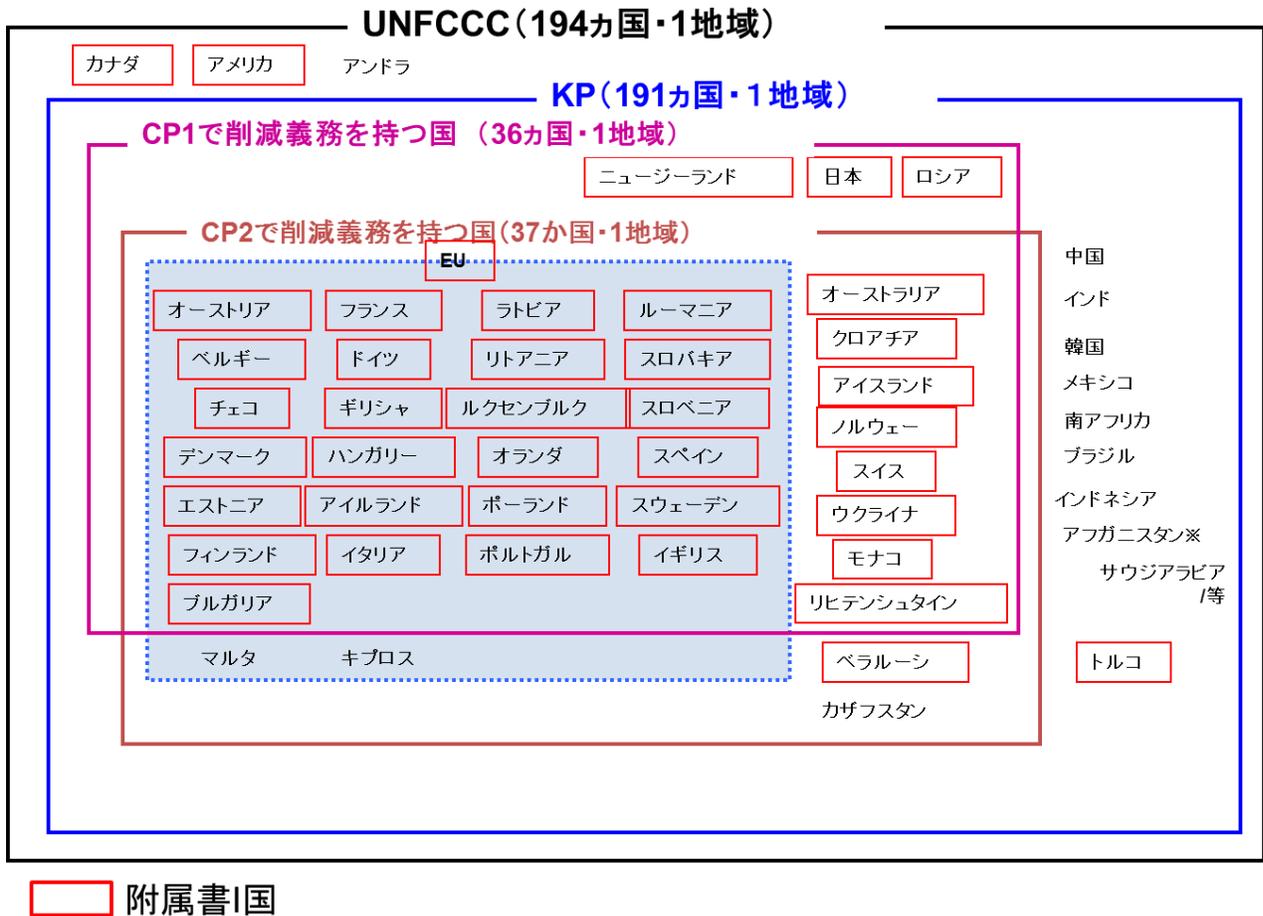


図 1-2 気候変動枠組条約と京都議定書の締約国数

(出展：環境省作成資料 http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/kyoto_hijun.pdf)

京都議定書に定められた主要諸国の排出削減義務と実績を図 1-3 (二酸化炭素換算で基準年比の%表示、プラスは増加、マイナスは削減) に示す。わが国を含め、基準年比で排出削減を約束した多くの国で排出が増加しており、京都議定書の目標を達成することが難しいことが分かる。

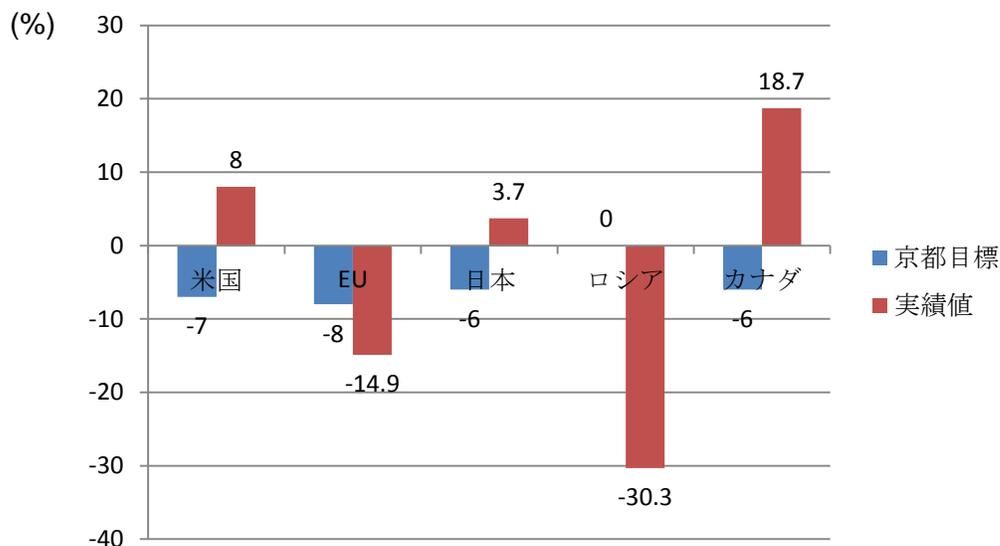


図 1-3 京都議定書に定められた主要諸国の排出削減義務と実績

※実績は 2011 年の値。森林等吸収源、京都メカニズムで獲得したクレジットは含まれていない

(出典：UNFCCC データから国立環境研究所が作成した資料から作成
http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/data/2013/kp_commitment_130605.xls)

なお、早期に議定書からの離脱を表明した米国の他、排出量が大幅増加したカナダも目標達成を断念することを 2007 年に表明している。また、排出量が急増しつつある開発途上国に関して、京都議定書では排出量の増加抑制措置を一切求めておらず、気候変動枠組条約の目標に照らしてその実効性の乏しさが指摘されている。2010 年には開発途上国である中国が米国を抜いて世界最大の排出国となった (図 1-4)。世界全体に占める開発途上国の排出量の割合は 1990 年には 3 分の 1 程度であったものが 2010 年には半分以上を占め、さらに 2020 年には 6 割強に到達すると予測されている (図 1-5)。

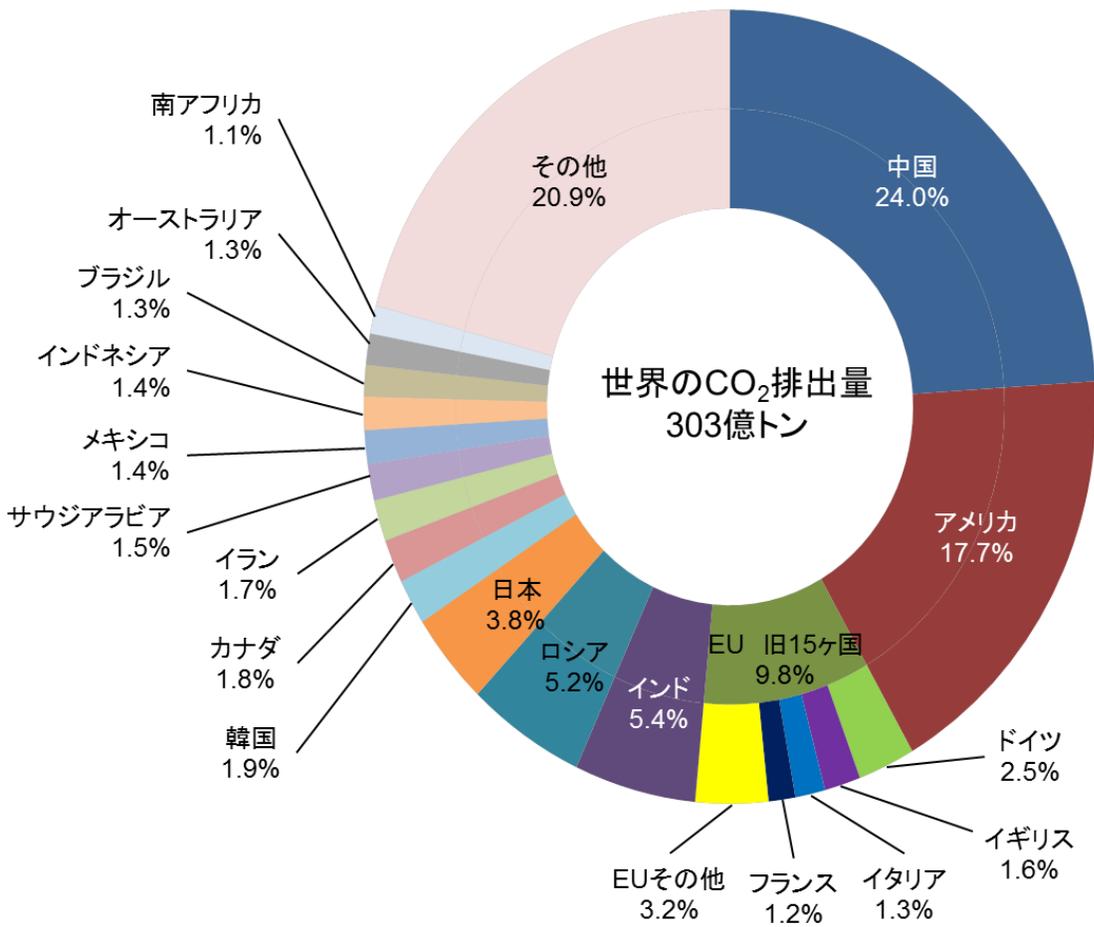


図 1-4 各国の CO₂ 排出量の割合 (2010 年)

(出展 : IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2012 Edition を元にした環境省作成資料
http://www.env.go.jp/earth/cop/co2_emission_2010.pdf)

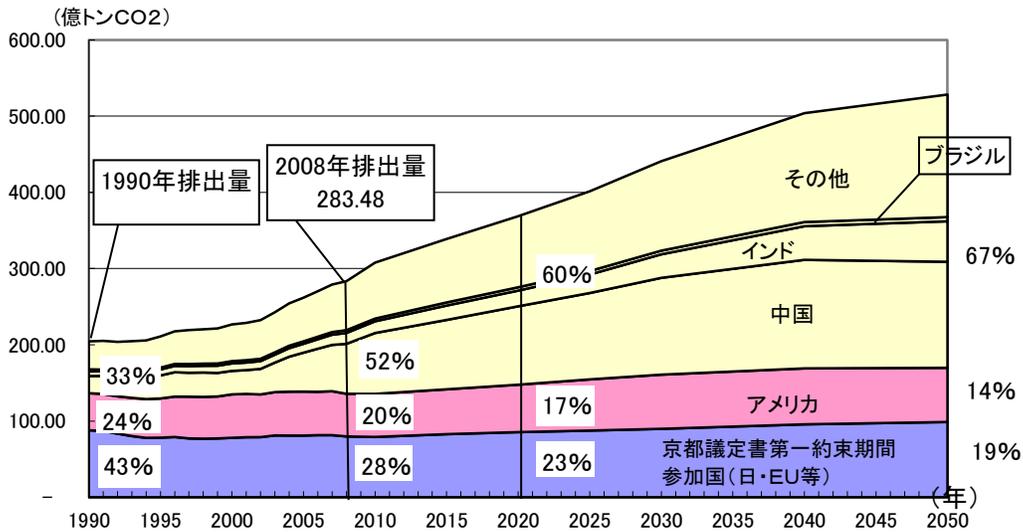


図 1-5 世界及び主要排出国の CO₂ 排出量の推移と将来予測

(出展：(財)地球環境産業技術研究機構資料より作成
http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/RITE_globalCO2GHGemission2011.pdf)

そこで、長期的な視野に立って目標を定め、開発途上国も参加した形で気候変動対策を進めていく方策について、議論する必要性が認識されるようになった。京都議定書は 2008 年から 2012 年までの先進国の削減義務についてしか取り決められておらず、2013 年以降の削減義務について 2005 年から開始することが規定されていた。そのため、2005 年に京都議定書改正に関する特別作業部会 (AWG-KP) が設置され、その検討が開始された。検討においては、京都議定書を批准していない先進国や開発途上国に削減努力を拡大するとともに、温室効果ガスの排出削減対策に意欲的に取り組む開発途上国や、気候変動の悪影響に対して脆弱な小島嶼国、最貧国等の適応対策への支援の道筋を付ける観点から、より包括的な次期枠組みの構築が必要との認識が高まり、2007 年 12 月にインドネシア・バリ島で開催された気候変動枠組条約第 13

回締約国会議（COP13）において、包括的な次期枠組みについて、気候変動枠組条約の下に長期的協力行動に関する特別作業部会（AWG-LCA）を設置して、2009 年末の COP15 で合意を得ることとされた。これら二つの AWG の下で、2020 年までの各国の削減目標・行動等については、気候変動の抑制に道筋を付けるための IPCC 等の科学の要請や、衡平性等の観点から、議論が行われた。2009 年 12 月、デンマークのコペンハーゲンにおいて、気候変動枠組条約第 15 回締約国会議（COP15）が開催された。交渉官レベルでは合意が得られず、状況を打開するため、閣僚レベルでの協議や首脳による直接の協議・交渉も実施され、その成果としてコペンハーゲン協定が作成され、締約国会議全体として同合意に留意することを採択した。その内容は、（1）地球の気温の上昇を 2℃以内に抑えること、（2）先進国は 2020 年までに削減すべき目標、開発途上国は削減のための行動をそれぞれ決めて、2010 年 1 月末までに提出すること、（3）先進国の削減目標と、開発途上国の削減行動の結果は、COP によって確立されるガイドラインによって、測定、報告、検証（Measurement, Report, Verification (MRV)）がされること、（4）開発途上国の気候変動対策を支援するため、先進国合同で 2010-2012 年に 300 億ドルと、2020 年までに毎年 1000 億ドルを支援動員の目標とすることという 4 点が主たる内容として盛り込まれた（EIC ネット, 2013）。2010 年のカンクンでの会合では、産業革命以降の気温上昇を 2℃未満に抑えるという合意に加え、コペンハーゲン協定の内容が正式に UNFCCC の下で合意され、協定に沿った内容で今後の交渉が進展すると期待された。しかしながら、2011 年のダーバンでの会合では、2015 年までに新たな枠組みについて合意し、2020 年から実施するという交渉スケジュールが決まったのみであり、実質的な合意は先送りされた。また、京都議定書の第 2 約束期間が実施されることになったが、EU 及び他の数カ国しか参加しなかった。日本、ロシア及びカナダは、京都議定書の参加国の排出量が世界全体の 26%しか占めず、有効な枠組みではないとして、第 2 約束期間に参加しないことを表明した。2012 年のドーハでの COP18 では、2020 年以降の新たな枠組みを検討する作業部会に将来枠組みの検討が一本化

されるとともに、京都議定書第 2 約束期間が 2013 年から 2020 年の 8 年間となることが決定された。

一方、2010 年のカンクン合意による各国の自主的な削減目標を足し合わせても、2°C 目標に達成に必要な削減量に 8-13Gt 足りないことが国連環境計画 (UNEP) の報告 (UNEP, 2012) では示されており (図 1-6)、ダーバン合意の下に設置されたダーバンプラットフォームに関するアドホックワーキンググループ (ADP) においても、2020 年以降の枠組みに加えて、2020 年までの野心の向上が主要テーマとなっている。当初、2020 年の目標については、義務的な目標を設定することを目指したが、合意を得られず、自主的なものに留まった。そのため、すべての国が参加する義務的な目標のある枠組みに 2015 年に合意することを目指して現在も交渉が続けられている。

以上述べた気候変動の国際交渉の経緯をまとめた図を、図 1-7 に示す。

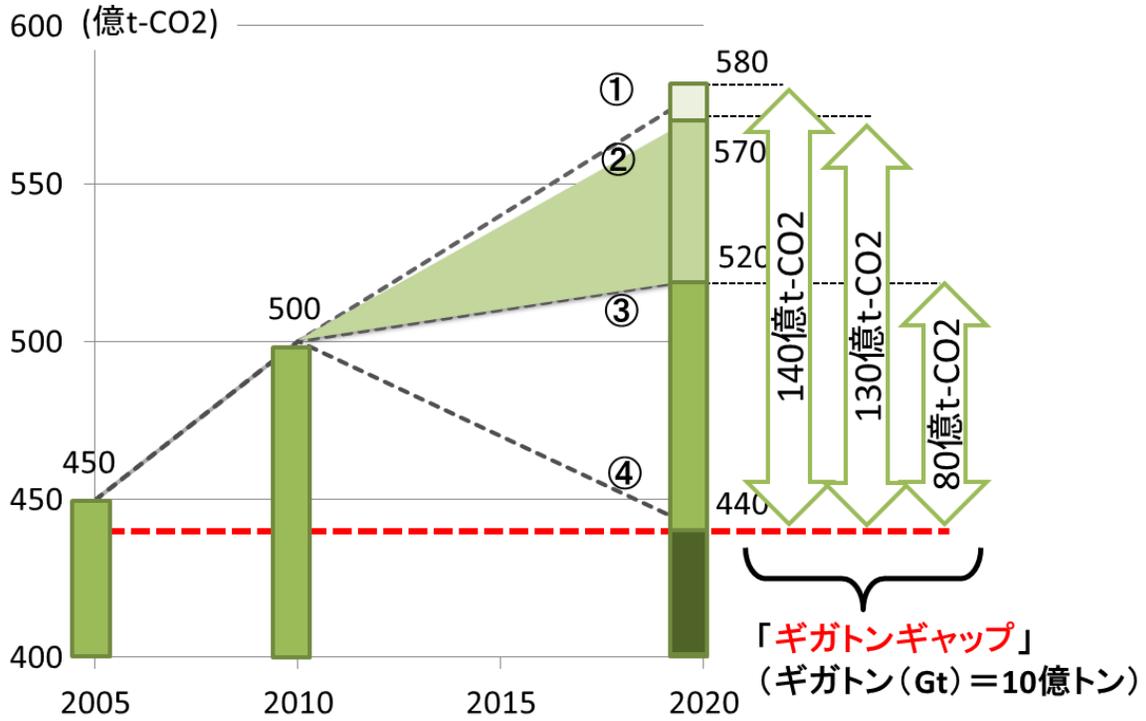


図 1-6 2020 年の排出削減目標と 2℃目標達成に必要な削減量とのギャップ (すべての温室効果ガス)

①今後追加的な対策をとらない場合(business as usual: BAU)
②各国が無条件の野心の低い目標・行動を実施
③各国が条件付きの野心の高い目標・行動を実施
④産業化以前と比較して気温上昇を 2℃以内に抑えるための排出量

(出展 : UNEP (2012) より環境省作成資料

<http://www.o-cdm.net/network/activity/occf/occf2012/occf2012-02.pdf> の p18)

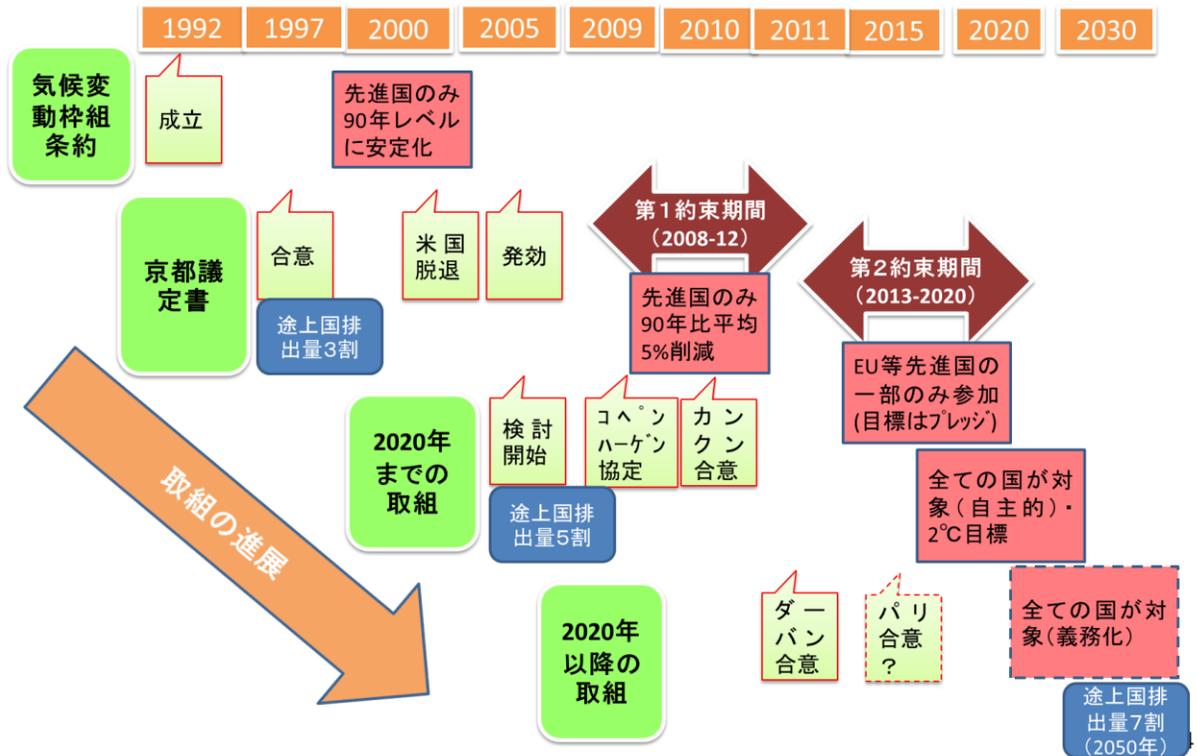


図 1-7 気候変動国際交渉の経緯

気候変動国際交渉において、開発途上国は歴史的排出責任や資金・人材が足りないことを理由として、先進国が率先して排出削減することを一貫して主張している。一方、先進国は率先して取り組むことに賛同しつつも、世界全体での排出削減のためには、開発途上国の排出削減も必要であると主張する。この開発途上国の参加問題が京都議定書の交渉、その後の現在も続いている 2013 年以降の取組を議論する国際交渉で一つの大きな争点となっている。当初、京都議定書第一約束期間では開発途上国には削減義務がなかったが、その後の開発途上国の急速な経済発展やそれに伴う温室効果ガス排出の大幅な増加に伴って、世界全体に占める排出量も大幅に増えたため、開発途上国の削減の必要性に対する認識が深まった。開発途上国も新興国を中心に対策の必要性を認識しはじめ、バリでの COP13 では、議長国であるインドネシアのユドヨノ大統領が何もしない場合 (Business as usual; BaU) と比較して 2020 年に 26%排出

削減することを宣言した。その後、COP15の前には、中国はGDP比の排出を2020年に40%改善する目標を、インドもGDP当たりの排出量を2005年比20~25%削減する目標を公表するなど、主要な開発途上国も自国の目標を定めるようになった。その後、カンクン合意に基づき、各国はこれらの目標をUNFCCCに登録している。ただし、これらの開発途上国の目標は、共通だが差異のある責任原則を根拠に、先進国と同様の絶対量目標ではなく、GDP当たり又はBaUに比した相対的な目標という、性質の異なる目標形態となっている。

一方、先進国でも排出削減に同意をしつつも、自国の経済や国際競争力への悪影響を懸念し、自国の排出削減目標は大幅なものとならないようにする傾向にある。開発途上国やNGOは、2°C目標を達成するためには、世界全体で必要な削減量を求め、それを一定の指標を基に各国の削減量として割り当てるというトップダウンの考え方を支持している（なお、開発途上国は先進国の排出削減目標についてのみ、トップダウンの考え方を採用すべきとしている点に留意が必要）。一方、削減可能なポテンシャルを積み上げ、その国の削減目標とするボトムアップの考え方があり、米国や日本をはじめ、多くの先進国がこのような考え方を取っている。ボトムアップで算出した削減可能量は単位削減量当たりの費用をいくらまで払うかに依存して増減する。すべての国が同じ単位削減費用まで負担すればよいが、そうでない場合、国際競争力に影響が出る。ある国のみが積極的に温室効果ガス削減に取り組んだ場合、他国で逆に温室効果ガス排出量が増加してしまう現象のことをカーボンリーケージといい、気候変動対策を考える上で重要な問題である。例えば、日本の経済団体連合会は、省エネの進んだ日本で温室効果ガスの排出対策が厳しくなると、鉄鋼やセメントなど国際競争に晒されているエネルギー集約型産業が排出対策の緩い開発途上国に生産拠点を移転し、その結果、カーボンリーケージが起こると主張し、日本が大幅な削減目標を掲げることに反対をしている。

各国の気候変動国際交渉に対する基本的なスタンスをまとめると以下のようなになる。日本は、京都議定書は世界全体のエネルギー起源CO₂排出量の約26%しかカバーしておらず、全ての

主要国を含む枠組みの保証がない中で第二約束期間を受け入れれば、2013年以降も一部の国のみが削減義務を負う枠組みが継続・固定化されることになり、世界規模での真の削減につながらないため、京都議定書第二約束期間の設定には賛同できず、すべての主要国が参画する衡平で実効性のある国際枠組みの構築を主張している。カナダやロシアも同様の議論を展開している。

米国は、中国等の主要開発途上国が法的義務を引き受けない場合、米国も当該義務を受け入れない姿勢である。また、京都議定書批准国ではなく、京都議定書の第二約束期間の議論に関与していない。EUは、主要国が参加する包括的な国際約束が実現することを条件に第二約束期間に合意し、すべての主要国が参画する衡平で実効性のある国際枠組みの構築を目指している。

中国やインドなどの主要排出開発途上国は、先進国は第二約束期間を設定し、野心的な目標を約束すべきこと、米国も他の先進国と同様に削減義務を受け入れるべきであるが、開発途上国の削減義務は受け入れないという姿勢を取っている。

小島嶼国、低開発国（LDC）やアフリカは、気候変動の影響を最も強く受ける地域であると同時に、ほとんど排出をしていない国々である。そのため、先進国の約束を定める京都議定書第二約束期間の設定が必要であるのみならず、先進国だけでなくすべての排出国が義務を負うべきとの立場を取っている。

このように先進国も開発途上国も各国それぞれの事情から、気候変動国際交渉に関するスタンスが決められており、そのスタンスはほとんど変わっていない。また、交渉テーマは京都議定書の交渉までは排出削減（国内削減、森林吸収源及び海外での貢献分）や技術移転、資金が主であったが、2013年以降の枠組みに関する交渉では、それ以外に、気候変動の避けられない悪影響への適応、気候変動による損失と被害へとテーマが拡大していった。気候変動は国際交渉の中で最も複雑な交渉と言われており、様々な議題がパッケージとして最終的な合意が行わ

れる構造となっている。なお、UNFCCC では意思決定方式が定められていないため、コンセンサスつまり全会一致が基本となっている。そのため、ボリビアなどの反米・反資本主義の国の反対が出て、コペンハーゲン協定が COP15 で UNFCCC での合意にならなかったなどの事態も起こっている。

以上、気候変動国際交渉の歴史をひも解いて、なぜ各国間で大幅な削減に合意できないかについて振り返った。これらの経緯を踏まえつつ、大幅な排出削減に合意できない理由を分析すると以下ようになる。

一つ目は、共有地の悲劇の問題である。Hardin (1968) は、自由に放牧できる共有地において、合理的な牧夫は家畜を殖やしていき、ついには共有地の草がなくなってしまうという破滅的な帰結に至ることを示した。気候変動の問題でも同じロジックが当てはまる。大気は誰でも利用できる（オープンアクセス）。そのため、人々は温室効果ガスを自由に排出し、その結果、気候変動が引き起こされてしまっている。一方、温室効果ガスの削減はどこの国が行おうとも、その便益はあまねく世界全体が裨益する。したがって、各国とも自国の負担をできるだけ少なくし、他国が多く削減する形を望む。開発途上国は先進国の責任とし、先進国に削減を迫る。先進国は開発途上国に削減に参加すべきと主張する。このような状態は、ゲーム理論では囚人のジレンマに例えられる。A 国と B 国という 2 国が存在し、気候変動問題について、何もしないか大幅削減するという二つの戦略があると仮定する（表 1-1）。両国とも大幅削減する場合に全体の利得が最も高くなるが、自国の利得の損得で考えると、両国とも“何もしない”という戦略が合理的となる。削減するためにはコストがかかる一方、どの国が削減しようとその効果に変わりはないため、ただ乗りのインセンティブが非常に大きいと言える。言い換えると、気候変動問題はただ乗りのインセンティブがある公共財ゲームであると言える (Barrett, 2003)。

表 1-1 囚人のジレンマ状態にある気候変動問題

A国 \ B国	何もしない (BaU)	大幅削減
何もしない (BaU)	② / ②	④ / 1
大幅削減	1 / ④	3 / 3

二つめの理由は、削減の困難さの問題である。排出の大部分を占める二酸化炭素は、ものを燃やせば発生し、化学的に安定で排出除去を簡単にできない。さらに、あらゆる経済活動から発生するため、排出削減のためには、発電、製造業、交通、農業、民生などあらゆるセクターでの対策が必要となる。これが、同じ地球環境問題でも、生産・消費規制という実効性の高い枠組みに合意し、成功例と考えられているモントリオール議定書によるオゾン層保護の国際的な取り組みと大きく違う点である。モントリオール議定書では、先進国のみならず、開発途上国にも猶予期間はあるものの生産・消費規制を適用することに合意している。このような違いをもたらす最大の要因は、オゾン層破壊物質であるフロン類については代替物質が開発されたことにあると考えられる。温室効果ガスはものを燃やすと発生するため、気候変動問題には代替物質を導入するといった単純な解決方法は存在しない。

三つめの理由は、フリーライダーを防止するために有効な仕組みが地球環境問題では容易に構築できないことである。国内問題では、規制など政府がただ乗りを防止するような仕組みを課すことができる。しかしながら、地球環境問題では、国内問題の政府に当たる上位組織（世界政府など）が存在しないため、そのような解決方法を取りえない。気候変動国際交渉では 200 カ国近くの加盟国により交渉が行われている。そこには、様々な考え方をを持った多様な国

が参画しており、全体での合意を得ることは非常に困難である。また、それぞれの国は皆、独立国家であるため、それぞれの主張を無理やり変えることはできず、地道な議論と妥協が必要となる。

このような厳しい状況下でどのようにすれば、社会的に最適な排出水準が達成可能かについては、他の国の排出削減行動に関する意思決定を考慮しつつ自国の意思決定を行うという関係性を解くゲーム理論を用いた分析が行われている。次章において、それら既往研究のレビューを行う。

2 既往研究のレビューと本論文の目的

本章では、初めにゲーム理論を用いた気候変動問題に関する既往研究のレビューを行う。続いて、それら既往研究にどのような問題点があるか指摘する。その上で、本論文の目的について明らかにし、最後に本論文の構成について述べる。

2.1 気候変動国際交渉の既往研究のレビュー

気候変動の国際交渉に関する既往研究の中でも、とりわけ国の交渉力学を扱う研究として、(1) ゲーム理論を用いた静的な分析、(2) 気候変動のダイナミックモデル（統合評価モデル）を用いた定量的な分析の二つが上げられる。本節では、これらについて、既往研究のレビューを行う。

2.1.1 ゲーム理論を用いた分析研究

前章で述べたように、気候変動問題は国際条約という無政府状態の下で、ただ乗りのインセンティブがある公共財供給ゲームとして捉えられる。各主体の戦略的行動を分析するゲーム理論は、ただ乗りのインセンティブがどのように作用するか、協力を阻む要素は何か、協力を促進するメカニズムは何かを分析し、気候変動国際交渉を成功に導く手がかりを与えてくれる

(Wood, 2010)。その適用には、大きく分けて、協力ゲームと非協力ゲームによる二つのアプローチがある。

(a) 協力ゲーム

協力ゲーム理論は、複数のプレイヤーによる協力的行動が可能であるとされた場合のゲームを扱ったもので、様々な提携の組合せの安定性を分析対象としている。代表的な協力ゲームとして提携 (Coalition) ゲームが挙げられる。提携ゲームでは、全体的な協力と部分的な協力の関係を分析することができる。提携ゲームは第一ステージで提携に参加するかどうかを決め、第二ステージで提携における自身の行動を決めるというプロセスで行われる。提携関係にあるプレイヤー同士は協力するが、提携関係にないプレイヤーに対しては非協力的に行動するとする。提携ゲームにおける提携行動は、提携をする各プレイヤーの利得を増加される場合に行われる。提携行動を行うためには、事前の交渉と互いに拘束力のある合意が必要であると考えられている。

提携ゲームでは、部分協力という中間的な協力的形態が提示される。また、協力均衡をもたらすコアという解の概念を持っていることも特徴である。コアとは、各プレイヤーの利得の配分が提携しない場合の各プレイヤーの利得を上回っており、また、どのような他の提携もプレイヤーの利得の合計を上回ることができない配分の集合を意味する。プレイヤーの集合 N と特性関数 $v(S)$ で定義される提携ゲームのコアは、以下のような配分 $x_i, i \in N$ が存在しないような配分 $y_i, i \in S$ の集合である (鷲田, 2010)。

$$v(S) \geq \sum_{i \in S} x_i$$

$$y_i < x_i, \quad \forall i \in S$$

Chander and Tulkens (1997) は協力ゲームのコアの考え方を国際環境条約に適用し、被害関数が線形で、すべての国が対称である等の前提が満たされれば、コアが存在することを証明した。さらに、Chander and Tulkens (2008) において、提携に参加する国は提携参加国全体の利得を最大化しようとし、不参加国は自国の利得を最大化するとし、提携の安定性を内部安定性と外部安定性からチェックした。一方、Finus (2001) は Chander and Tulkens の利得の移転スキームが実現可能ではないことを指摘したが、Serrano (1995) や Okada and Winter (2002) は、コアが存在すれば、それを前提としている展開型ゲームが適用可能となるため、協力ゲームの考え方が重要であることを示した。このような研究は、協力ゲームを非協力状態で実現させようとするナッシュプログラムに関連するものであるといえる。協力ゲームでは、前提としている協力行動がどのようにして成立するかという点については解明していないため、実現性に乏しいという問題点がある。そのため、非協力ゲームの枠組みで提携関係を研究した文献も数多くある。

(b) 非協力ゲーム

非協力ゲームではプレイヤーは各個独立に決定を行う。気候変動問題はゲーム理論での囚人のジレンマに例えられる。すなわち、世界全体で協力して削減を実施した方がすべての国の利得が向上するにも関わらず、他国が削減しつつも自国は排出し続ける方がその国にとっての利得は良くなってしまふ。

このような囚人のジレンマ問題の性質を持った気候変動国際交渉問題については、Barrett (2003) が構築した公共財に係る環境条約のシンプルなモデルをベースにした研究が数多く行われている。各国 ($i=1, \dots, N$) の利得は、すべての国の削減量 R ($R = \sum_{i=1}^N r_i$) の関数である排出

削減の便益 $B(R)$ とその国の削減量の関数である削減費用 $C(r_i)$ の差で表される。ここで、 $B(R)$ は R の一次式、 $C(r_i)$ は r_i の二次式であり、 $B' > 0$ 、 $C' > 0$ 、 $B'' \leq 0$ 、 $C'' \leq 0$ と仮定されている (b, c は定数)。

$$\prod_i = B(R) - C(r_i) = bR - \frac{1}{2}cr_i^2 \quad (1)$$

他国の削減によらず自国の利得の最大化のみを考えた場合、利得が最大になるのは、

$$\frac{\partial B(R)}{\partial r_i} = \frac{\partial C(r_i)}{\partial r_i} \quad (2)$$

の時で、式(1)をこれに代入すると、 $r = \frac{b}{c}$ となる。一方、すべての国が協力する場合には、全体の利得が最大になることから、

$$\sum_{i=1}^N \prod_i = NB(R) - \sum_{i=1}^N C(r_i) \quad (3)$$

において、

$$\frac{N\partial B(R)}{\partial r_i} = \frac{\partial C(r_i)}{\partial r_i} \quad (4)$$

となることが条件となり、式(1)をこれに代入すると、 $r = \frac{Nb}{c}$ となる。つまり、削減量は $\frac{b}{c}$ と

することが、他国の戦略に関わらず、当該国の支配戦略となり、社会的に最適な排出量 ($\frac{Nb}{c}$)

は達成されない。図 2-1 は $b=c=1$ 、 $N=5$ とした場合の例を示す。

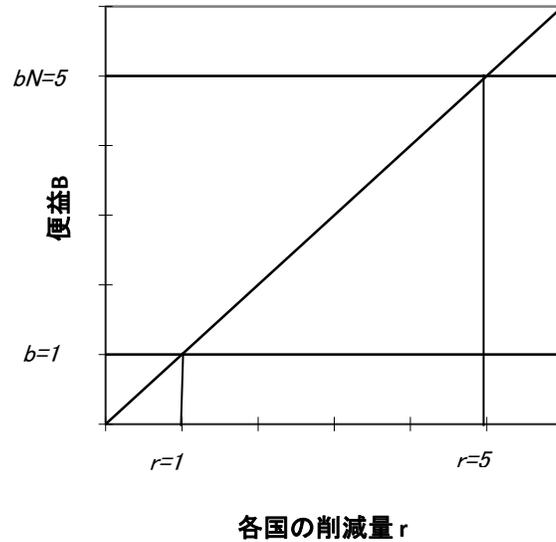


図 2-1 協力・非協力の場合の削減量と便益の比較

(Barrett (2003) を基に作成)

Barrett (2003) は、このモデルをベースにして、展開型ゲームを用いた分析を行った。協定参加国も不参加国も、ポジションを変えることによって、得られる利得が現在の状態よりも上回らないことを条件とする。その結果、各国は囚人のジレンマの状態にある場合に、協力する国の数は $N \leq \frac{b+c}{b}$ で求められることを示した。これは、参加国が少ない場合にのみ協力を維持できること、参加国数は便益と費用の関係から求められること、条約が生み出す追加的な利得が小さいほど多数の国が協力することを意味する。また、Barrett (2001) は各国が得られる便益が異なるとした場合、便益の大きい国の一部が条約に参加するが、それらの国からのサイドペイメントにより便益の小さい国も協定に参加することを示した。また、Barrett は繰り返しゲームにおいて、Getting Even という、1カ国が条約に非加盟だった場合に、他のすべての国または一部の国が、次の期間に非加盟となるという、Tit-for-Tat 戦略（しっぺ返し戦略）と呼ばれ

る条件付戦略を用いることを設定した場合、ある国が協定から抜け、フリーライドしつつ、罰則も受けないようにする事態を避けること（renegotiation-proof）ができるとした。しかしながら、**Getting Even** を導入しても、依然として限られた国しか協定に参加しないとの結論を導いた。このように気候変動の国際的な削減のための枠組みには少数の国しか参加しないという悲観的な **Barrett** の結論に対し、より多くの国が参加できるようなゲームを模索する後続研究がなされてきた。**Asheim et al (2006)** は、**Barrett** のモデルが世界全体を対象としていることに対し、世界全体を二つの地域に分け、それぞれが別の協定を持つと仮定して分析した。**Regional Penance** といわれる、ある地域協定参加国は他の地域協定参加国が前の期に削減しなかった場合は次の期に削減しないというしっぺ返し戦略を用いるが、他の地域の地域協定に対しては干渉しないという前提を置いた。その結果、地域協定の方が世界全体の協定よりも締約国数を多くでき、また、世界全体の利得も高くできることを示した。**Froyn and Hovi (2007)** は、**Asheim et al** のしっぺ返し戦略を発展させた **Penance-m** という戦略を用いて分析した。**Penance-m** 戦略では、最初はすべての参加国が協力することとし、 t 期に非協力の場合、 m カ国が次の期に非協力を選択するとする。この戦略を取れば、次の期に非協力となる国の数が少なくなることで、各国の利得が増えるので、全ての国が協力することが可能となることを示した。**McGinty (2006)** は、**Barrett** のモデルを拡張し、各国の削減費用及び便益が一様ではない設定とした場合について分析した。具体的に 7 カ国の場合と 20 カ国の場合について、各国の費用及び便益について仮定の数値を与えて計算した結果、より多くの国が参加し、合計削減量及び合計利得も多くなるという結果を得た。一方、**Asheim and Holtmark (2009)** は、戦略数が協力・非協力の二つでなく、削減量に応じて無数にある場合に拡張した。その結果、将来の割引率が十分低い場合には、削減量が高く、世界的な合意が維持可能であるとした。また、協力を得るために有効な方策として、貿易や気候変動への適応など他の 이슈ーとのリンケージ、開発途上国のための各種基金などのサイドペイメント、貿易措置である国境税調整などの罰則が

有効であるとした。Helland and Hovi (2004) は、Barrett の理論的な分析から得た結論について、20 名の被験者を用いて、囚人のジレンマゲームを繰り返し行う実験により検証を行った。具体的には、Barrett の結論のうちの二つ、(1) 削減費用が高いほどより協力的な関係が構築できること、(2) 協力国数は全体のグループサイズによらないことについて検証を行った。その結果、Barrett の結論とは逆に、削減費用が大きいほど参加国数が減ること、参加国数はグループ全体の国の数に応じて増加することが示された。

また、気候変動のような国際交渉を国内政治と国際政治の二つのレベルで行われるゲームとして捉える考え方が Putnam により提案されている。Putnam (1988) は、各国の国際交渉のスタンスが国内で承認可能な領域 (win-set) に制約されるため、win-set が小さいほど、国際合意の余地は小さくなることを示した。Rouchier and Thoyer (2001) は、EU の遺伝子組み換え物質規制導入問題に対して、2 レベルゲームを適用し、国内のプレイヤーとして世論、ロビー団体、各国代表を設定し、EU15 カ国を対象にコンピュータモデルでシミュレーションをした。Lisowski (2010) は、Putnam の 2 レベルゲームの考え方を適用し、米国ブッシュ政権が京都議定書から離脱したケースを分析した。その結果、離脱した理由として、ブッシュは個人的に京都議定書に不満を持っていたこと、ハーグでの COP6 の失敗により米国上院が批准できるような議定書とならないことが明らかになったこと、石油やガスの生産を拡大するという国内エネルギー政策を追求しつつ議定書交渉を行うことに整合性を保てないことがあることを明らかにした。Gerst et al (2013) は、Putnam の 2 レベルゲームの考え方を気候変動の国内エネルギーモデルに組み込み、国際交渉のスタンスに影響を及ぼす国内での政府、企業、消費者の関係性を複数の政策シナリオで示すことのできるモデルを構築した。政策シナリオとして、炭素税を導入し、その税収を①家庭に還付する、②産業分野の研究開発に充てる、③再生エネルギーの研究開発に充てるというシナリオを、③炭素税を導入しないというレファレンスシナリオと比較した。その結果、短中期的には炭素税導入の三つのシナリオは同程度の削減を可能とする一

方、長期的には再生エネルギーの研究開発に充てるシナリオのみエネルギーコストと経済を切り離すことができ、大幅な CO₂ 排出削減をしながらも GDP を増加させることができることを示した。

排出削減量のコミットメントについては、国内での合意を取り付けることが必要となる。排出量が多いセクターが主要な産業の場合、野心的な排出削減目標に対する国内での合意形成を得ることは非常に難しい。特に、国際競争に晒される鉄鋼や自動車などのセクターについては、厳しい排出削減目標が生産価格の上昇をもたらし、より削減目標が緩い国に生産拠点が移転する、いわゆるカーボンリーケージが起これ、国内産業の衰退とともに、当初意図した削減が世界全体では達成できないという問題点が指摘されている (Babiker, 2005)。

2.1.2 統合評価モデルを用いた定量的な分析研究

前節でレビューした静的な分析では、大気中への温室効果ガスの蓄積により影響が生じる気候変動問題を分析することには限界がある。また、静的な分析では通常対称な国を仮定しており、非対称な国を仮定している場合でも仮想的な数値を与えて比較している。現実には、温室効果ガス排出量も気候変動の被害も国毎に地域ごとに異なるため、現実の排出量や削減ポテンシャル、被害コストの各国ごとの違いを反映しつつ、温室効果ガスの大気中への排出・蓄積をダイナミックに表現し、定量的な排出量の予測と気候変動による被害を金銭的に評価したモデルを用いて、各国が取りうる戦略を協力ゲームや非協力ゲームといった形で組み込んだ研究が行われている。これらの研究においても、静的な分析モデルと同様に各国が排出削減により得られる利得がプラスになることを参加の動機として前提としている。ただし、このような定量的研究の数はまだ多くはない (Jørgensen, et al., 2010)。

Nordhaus (1996) は RICE という地域ごとに扱うダイナミックモデルを用いて、各国の異なる戦略を分析し、協力戦略は非協力戦略よりも高いレベルの削減を可能とすること、高所得の国が協力により得られる利得が低所得国よりも少ないことを明らかにした。Tol (1997) は、FUND という統合評価モデルを用いて分析を行い、協力がある場合には非協力の場合よりも削減量が大きくなるが、サイドペイメントが不十分であるため、自律的 (self-enforcing) なものとはならないこと、非協力状態における効率的な削減量は気候変動枠組条約で議論されている削減量よりは小さいが現実に行われている削減量よりは大きいことを示した。Bunche and Carraro (2005) は、Nordhaus の RICE モデルをベースに、2013 年以降の国際枠組みについて、6 つのシナリオを設定し、米国、EU、日本、ロシア及び開発途上国のそれぞれの利得を分析した結果、2020 年までは先進国だけが削減し、2020 年以降は開発途上国も最適な経路よりもさらに 10% 下回る削減を実施するというシナリオが最も有望であることを示した。Bohm and Larsen (1994) は、欧州と旧ソ連で排出量取引が導入される場合に、初期配分をいくつかの指標を用いて分析し、GDP 当たりの費用での分配が最も衡平性をもたらすこと、排出量取引制度の活用により削減コストは欧州が自主的に削減する場合と比べ、85%削減されることを明らかにした。Rubio and Ulph (2007) は大気中の蓄積を考慮しつつ、対称な国を仮定した簡素なモデルで、自律的な協力が可能かどうか分析し、被害コストが大きいほど、自律的な条約へ参加する国は少ないことを示した。Drouet (2008) は、Haurie (1995) の考え方を用い、世界を 3 地域 (米国、他の OECD 国及び開発途上国) に分類し、各地域の非協力的な態度を前提にしつつも、2050 年における世界全体の累積排出量を一定以下に抑えるという約束の下に、二つの期に分けて一般均衡モデル (GEMINI-E3) を用いて計算を行った。その結果、2050 年の排出量は BaU のケースに比べて、米国が 33%、他の OECD 国が 26%、開発途上国が 47%削減され、温室効果ガスの価格が 1t 当たり 2025 年までは 108 米ドルから 2050 年に 160 米ドルに上昇することが示された。Eyckermans and Finus (2007) は、CWSM という RICE モデルを発展させた統合

評価モデルを、安定的な協力関係を導くゲーム理論的考察と組み合わせて分析を行った。分析では、世界を6地域（米国、日本、EU、中国、旧ソ連、その他）に分け、国の組み合わせによる削減量及び利得を統合評価モデルにより導き、その結果を協定から離脱することに対する内部安定性と協定に参加することに対する外部安定性から判断し、安定的な協定を分析した。利得の移転スキームがない場合については安定的な協定が存在しなかったことから、利得移転スキームについて、排出量、GDP、1人当たり排出量など異なる指標を用いて評価した。その結果、世界全体での削減が進み、多くの国が参加する合意に導くためには、（1）利得の移転により協力による利益を各国間で平準化すること、（2）条約の安定性を高めるためにオープンメンバーシップからEUやWTOのようなクローズメンバーシップへの制度的変更が有効であることを示した。Weikard et al (2010) は、提携ゲームと Dellink (2004) や Finus et al (2006) が開発した STACO (Stability of Coalitions) という統合的評価モデルを組み合わせて分析した。その結果、利得移転スキームは大きな提携関係を維持するために有効であり、提携に参加するインセンティブを提供すること、第2期でフリーライドを防ぐ脅しに用いることができるため、再交渉を導入することが有効であることを示した。また、再交渉の期間が短いと脅しとしては有効性が高いが、短期間では削減政策が十分実施できないため、一定程度の期間（30年程度）が最もバランスが良いことを示した。その他、STACOモデルを用いて、メンバーシップのルール (Finus et al, 2006)、複数の提携の構築 (Saiz et. Al, 2006)、利得の移転スキーム (Altamirano-Cabrera and Finus, 2006; Weikard et al, 2006) や不確実性の下での提携関係の安定性 (Dellink et al, 2008) などの研究が行われている。

2.2 既往研究の問題点

前節で見たように、静的な非協力ゲーム理論の分析から、多くの国が参加し、参加国が大幅に削減する安定的な枠組みは成立しないことが示されている。しかしながら、これらの分析は気候変動交渉への適用を考えた場合に、少なくとも次の3点において問題がある。

第一に、Barrett やその後の関連論文では、繰り返しゲームにおいて、Getting Even や Panance といった、1カ国が条約に非加盟だった場合に、他のすべての国または一部の国が、次の期間に非加盟となるという、Tit-for-Tat 戦略(しっぺ返し戦略)と呼ばれる条件付戦略を用いることを仮定している。これは、囚人のジレンマ状態にある場合に、国が自発的に条約に加盟するために必要な前提として設定されている。しかしながら、現実には、1カ国が条約から脱退したからといって、次の期に、多くの国が脱退して罰するという事態は想定されない。また、気候変動国際交渉において、いずれかの国からそのような方針を持っていることが表明されたこともなければ、他国がそのような戦略をとっていることが各国の共通理解になっているわけでもない。例えば、米国が2001年に京都議定書を批准しないことを表明した際にも、米国を罰するために他国が次期約束期間での離脱を表明した事実はない。また、国際交渉は、約束期間が10年程度の間隔があり、離脱した国を罰するために10年間、他の国が約束を実施しないということは、条約の目的の達成に向けて重大な支障となる。

第二に、これら静的な分析の多くが、対称的な国を設定していることも不十分である。非対称な国を設定している研究でも、2種類の異なるタイプの国といった仮想的な形式でしか非対称性を考慮していないものが多い。現実には、排出削減の費用もそれによって回避することができる気候変動の影響の度合いも国毎に異なる。そのような非対称性を定量的に表現するモデルで考慮することが必要である。

第三に、静的な分析では、気候変動のダイナミックな挙動を考慮できない。気候変動は大気中に蓄積された温室効果ガスの濃度により、影響が生じるため、温室効果ガスのフローではなく、ストックを考慮できる分析であることが求められる。

第一の問題点を克服するために、メカニズムデザインの研究成果を活用することが考えられる。メカニズムデザインは、資源配分などの社会問題に当たって、実現したい目標を自律的に実現できるような制度を設計することを目指している。Attanasi et al. (2010) は交渉ゲームの環境として、協力的な結果に導く **confirmed proposal** というメカニズムを考案した。このメカニズムはパイの分割ゲームに類似しており、2人ゲームにおいて、以下のプロセスで実行される。ステージ 1.1 において、プレイヤー1 はプレイヤー2 が合意すれば S_1 という戦略を採用することを告げる。ステージ 1.2 で、プレイヤー2 は、もしプレイヤー1 が戦略 S_1 をコンファームするのであれば、 S_2 という戦略を採用することを告げる。ステージ 1.3 でプレイヤー1 は戦略 S_1 をコンファームするかどうかを決定する。コンファームすればプレイヤー1 は戦略 1 をプレイヤー2 は戦略 2 を実行することが決定し、コンファームしなければステージ 2 へ移る。ステージ 2.1 で、プレイヤー2 の戦略 S_2 が新しい提案とされる。ステージ 2.2 で、プレイヤー1 はプレイヤー2 への反応として戦略 S_1 とは異なる戦略 S_1^2 を採用すると告げる。プレイヤー2 は戦略 S_2 をコンファームするか決定を行う。コンファームすれば、戦略 S_2 と S_1^2 が確定し、そうでなければステージ 1 に戻り、プレイヤー1 が S_1^2 を提案するところから開始する。Attanasi et al は、ゲームが囚人のジレンマにある場合に、上記メカニズムが協力関係に導くことを示した。

Attansi らが提案したメカニズムデザインと同様なメカニズムとして、Guttman (1987)、Danziger and Schnytzer (1991) 及び Boadway et al (2007, 2011) は条件付貢献あるいはマッチング削減約束アプローチと言われる手法を確立した。他のプレイヤーの貢献に応じたマッチング係数を設定し、自らの貢献を積み増しすることを約束する手法であり、Guttman などは本手法により無政府状態でもパレート最適な結果が得られることを示した。さらに、Boadway

(2007) は、Guttman のメカニズムを発展させ、2 人ゲームにおいて、1 カ国のみがマッチングメカニズムによる削減を宣言できるとした場合を分析し、効率的な公共財の供給を実現することを示した。

このマッチング削減アプローチは、しっぺ返し戦略に代わって、気候変動問題に適用しうるメカニズムだと考えられるが、Guttman も Boadway も一般的な国際公共財を対象とした理論的な分析に留まっており、気候変動問題を対象とした研究は未だになされていない。

さらに、既存研究に関する第二、第三の問題点を克服するためには、現実の排出量や削減ポテンシャル、被害コストの各国毎の違いを反映しつつ、温室効果ガスの大気中への排出・蓄積をダイナミックに表現し、定量的な排出量の予測と気候変動による被害を貨幣価値で評価したモデルを用いて、各国が取りうる戦略を組み込んだ研究を行う必要がある。前節で見たように、ゲーム理論を定量的な統合評価モデルと統合した研究は行われている。しかしながら、既存研究では、協力ゲームの枠組みである提携ゲームのメカニズムを用いているものがほとんどである。提携ゲームでは、前提としている協力行動がどのようにして成立するかという点については解明していないため、現実の気候変動交渉において、どのようなプロセスで合意するかについての示唆は乏しい。マッチング削減約束アプローチは合意に向けたプロセスを示すことができる有望なメカニズムと考えられるが、上記で述べたように、これを気候変動国際交渉に適用した研究はなく、そのようなメカニズムを定量的な統合評価モデルと組み合わせる試みも未だ行われていない。

2.3 論文の目的

前節で見たように、無政府状態である国際社会では、ただ乗り（フリーライド）のインセンティブが大きいため、気候変動国際交渉において、IPCC が科学的に示唆する気候変動の悪影響を避けるために必要な大幅な削減を各国間で合意できない状況にある。そのため、本論文では、Guttman (1987)らが提案したマッチング削減約束アプローチのメカニズムデザインの理論的な考え方を、現実に即した定量的なモデルと組み合わせて、国際交渉において各国が野心的な削減目標の合意を実現する方策について提案することを目的とする。

具体的には、（1）気候変動問題にマッチング削減約束アプローチの考え方を組み込んだ統合評価モデルを適用し、そのメカニズムにより、各国及び世界全体の削減量の引き上げがどの程度可能かを定量的に示し、（2）世界全体の効率的な排出削減を実現する手段として、排出量取引を導入した場合の効果を定量的に示し、（3）国際交渉の実態を踏まえ、本メカニズムを現実の国際交渉に適用するための具体的な方策を提案する。

2.4 論文の構成

本論文の構成は以下のとおり。

第3章において、本論文での定量的な分析の基礎として用いる、Dellink et al (2004) が開発した STACO モデルを用いて、本分析のベースラインとなる提携がないケースについて分析し、各国の削減量と利得の計算結果を示した。

第4章では、Guttman (1987) が構築したメカニズムデザインの一つである、マッチングメカニズムの考え方を統合評価モデルである STACO モデルと組み合わせ、各国及び世界全体で削減量の引き上げがどの程度可能かについて、定量的な分析を行った。初めに、主要な 6 カ国が

メカニズムに参加する場合について分析する。続いて、あらゆる国の組み合わせに対して適用し、メカニズムに参加する国の数の違いにより、その結果にどのような差異が出るかについて検討した。

第 5 章では、Boadway (2007) が Guttman のメカニズムを発展させた Quantity Contingent Mechanism (QCM) を STACO モデルと組み合わせ、各国及び世界全体で削減量の引き上げがどの程度可能かについて、定量的な分析を行った。さらに、QCM の課題である条件付き削減量を如何に設定するかについて、具体的な方法を検討した。

第 6 章では、世界全体の費用便益を向上させ、効率的な排出削減を可能とする仕組みとして、排出量取引制度をマッチングメカニズム及び QCM それぞれに導入した場合に、各国及び世界全体で利得がどの程度向上するかについて、分析を行った。

第 7 章では、マッチング削減約束アプローチを現実の気候変動交渉に適用させるために、モデル分析の結果を踏まえたメカニズムの提案を行った。次に、国際交渉の実態を踏まえて、その提案の実現可能性について評価を行った。さらに、提案したメカニズムを現実の気候変動国際交渉において、どのようなプロセスにより適用が可能かについて、過去の交渉の実態を踏まえつつ考察を行い、具体的な提案を行った。

最後に第 8 章において、7 章までのマッチング削減約束アプローチを組み込んだ統合評価モデルによる各種計算結果や、上記メカニズムを具体的に気候変動国際交渉に適用する際の方策に関し、導き出された結論についてまとめた。併せて、本論文における研究をさらに発展させるために、将来の研究課題についても提示した。

3 モデルの枠組みと提携のないケースの

計算結果

本章では、本論文で構築したモデルの枠組みの全体像を説明する。構築に当たっては、ゲーム理論の静的なモデルと気候変動の温室効果ガスの大気中の蓄積を考慮し、費用便益を定量的に評価できる統合評価モデルを組み合わせて適用した。続いて、定量的分析を担う STACO モデルという Delink et al (2004) が開発した統合的アセスメントモデルの内容について詳述する。さらに、モデルを用いて、本分析のベースラインとなる提携のないケース (All Singleton) における各国の温室効果ガスの削減量と利得について、その結果を示す。

3.1 モデルの構築

既存文献のレビューで見たように、気候変動国際交渉において囚人のジレンマ状態を克服しうる現実的なプロセスを示しうる、ゲーム理論のメカニズムデザインと定量的な統合評価モデルを組み合わせた研究はほとんどない。そのため、本論文では、Guttman (1987) のマッチングメカニズムと Boadway (2007) の QCM (Quantity-Contingent Mechanism) の2つのマッチング削減約束アプローチを組み込んだ、定量的な分析が可能な統合評価モデルを構築する。本論文の目的は、上記二つのメカニズムを定量的に分析し、気候変動国際交渉で具体的に適用するた

めの方策を提案することに主眼があるため、新たにモデルを開発することはせず、既存の STACO モデルという Dellink et al (2004) が開発した比較的簡易な統合評価モデルを用いて分析することとした。なお、STACO モデルを用いた研究では、提携ゲームの考え方を活用し、提携した国同士では、気候変動の便益を合算して考えることとしているが、本論文では、その前提に代わり、マッチング削減アプローチの考え方を導入する。なお、費用効率性を高める目的で、排出量取引をそれぞれのメカニズムに組み合わせた場合についても検討する。

本論文におけるモデルの構成を図 3-1 にまとめた。なお、STACO モデルの枠組みは共通であるが、マッチングメカニズムを適用する場合と、QCM を適用する場合とで、別々のモデルとした。

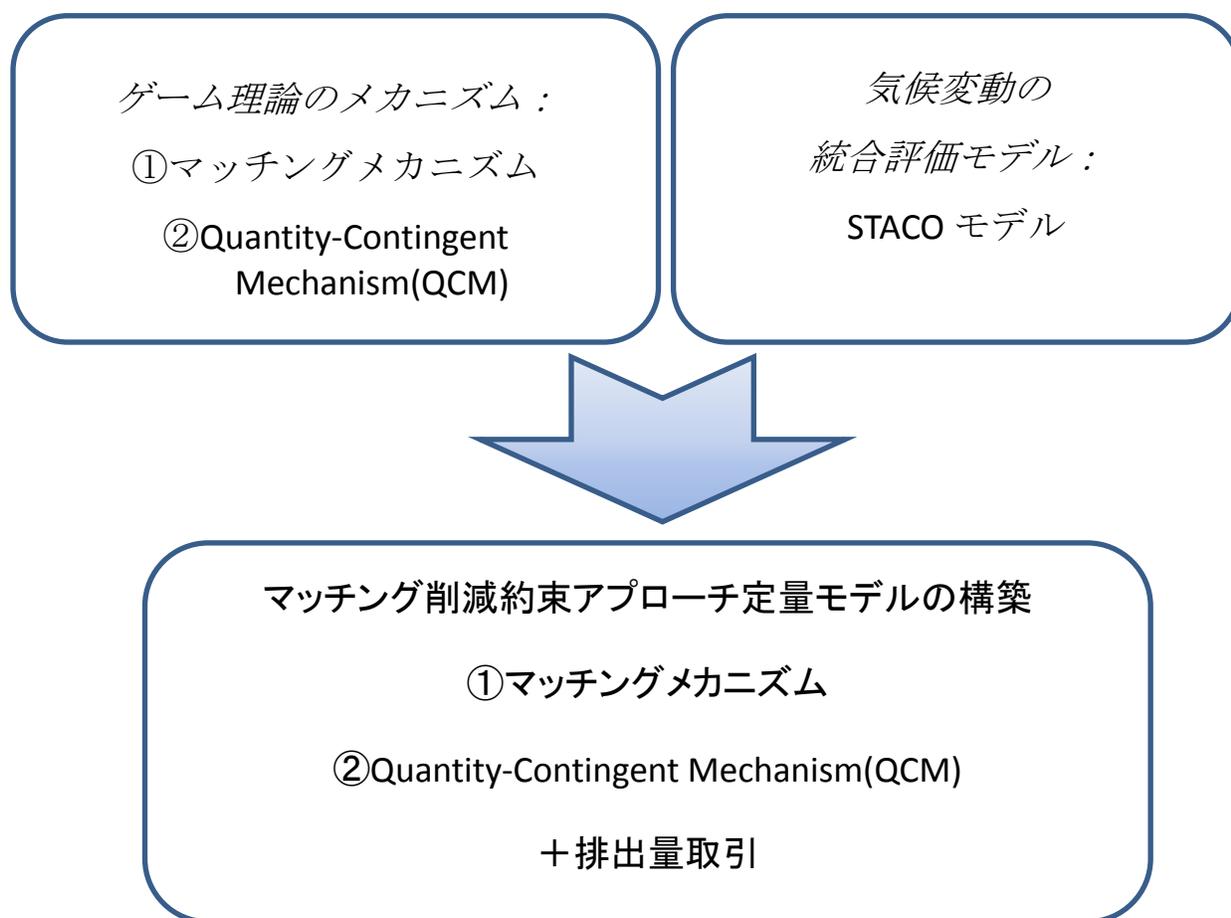


図 3-1 本論文におけるモデルの構成

3.2 STACO モデル

STACO モデルは、Dellink et al (2004) が開発したゲーム理論のモデルと各国の CO₂ 削減の費用と便益を計算する統合評価モデルを組み合わせたモデルである。STACO モデルは、世界の CO₂ 削減に当たってどのような提携関係が成立するかについて分析することを目的とし、どの国の組み合わせの提携が最も安定的か、大気中の CO₂ 濃度にどのような影響を与えるかを分析するために用いられる。STACO モデルはあり得る提携の組み合わせのそれぞれについて CO₂ 削減による利得の変化を計算し、提携するかないかで、どのように各国・地域の利得が変化するかを比較できる。このようにして、各提携関係の安定性を評価する。提携関係にある国では、すべての提携国の利得の合計を最大化するように行動する一方、提携に参加しない国は自国の利得を最大化するように行動するとの前提を置く。

STACO モデルは世界を 12 地域に区分し、それぞれをプレイヤーとして考える。12 地域とは、1) 米国 (USA)、2) 日本 (JPN)、3) EU15 (EU)、4) その他の OECD 加盟国 (OOE)、5) 東ヨーロッパ (EET)、6) 旧ソ連 (FSU)、7) エネルギー輸出国 (EEX)、8) 中国 (CHN)、9) インド (IND)、10) アジア新興国 (DAE)、11) ブラジル (BRA)、12) その他の国々 (ROW) である。

モデルの対象期間は 2011 年から 2110 年までの 100 年間である。その期間内の毎年の排出量データは 2110 年における CO₂ の累積量を計算するために用いられ、便益と費用の現在価値が計算される。モデルの基本的な数式を以下に示す。表 3-1 にモデルのパラメータをまとめた。

表 3-1 STACO モデルのパラメータ
(出典 : Delink et.al, 2004)

Symbol	Description	Value	Unit	Source
M	Pre-industrial level of	590	GtC	Nordhaus (1994)
M_{t0}	Stock of CO2 in 2010	835	GtC	Nordhaus (1994)
σ	ä Natural annual removal	0.00866	-	Nordhaus (1994)
ω	Airborne fraction of emissions remaining in the atmosphere	0.64	-	Nordhaus (1994)
r	Discount rate	0.02	-	Assumption
θ_i	Share of region i in global benefits	see Table 3-2		Own calculation based on Fankhauser (1995) and Tol (1997)
α_i	Abatement cost parameter of region i			Own calculation based on Ellerman and Decaux (1998)
β_i	Abatement cost parameter of region i			Own calculation based on Ellerman and Decaux (1998)
γ_D	Scale parameter of damage and benefit function	0.027	-	Tol (1997)

削減の便益は、気候変動の緩和対策によって避けられる被害であると置くと、これは CO₂ の累積量に関する。STACO モデルでは、被害は DICE モデルの被害コストモジュールと Germain and Van Steenberghe (2003) の気候モジュールから算出している。各期間の CO₂ の累積量は以下の式で与えられる。

$$M_t(q_{2010}, \dots, q_t) = \bar{M} + (1 - \delta) \cdot (M_{t-1} - \bar{M}) + \omega \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{e}_{i,t} - q_{i,t}) \quad (3-1)$$

累積量は前の期までの累積量 M_{t-1} 、と自然の累積量 \bar{M} 、減衰率 δ 、ベースライン排出量 $\bar{e}_{i,t}$ 、削減量 $q_{i,t}$ 及び大気中に存在する浮遊物の fraction ω による。CO₂ 排出量については、STACO モデルでは、EPPA model を使用している。被害関数は CO₂ の累積量の関数であり、おおよそ比例関数であるといえる。(3-2) 式で、 y_t は t 年における世界の GDP を用いて、

$$d_t M_t(q_{2010}, \dots, q_t) = [\gamma_1 + \gamma_2 \cdot (\frac{M_t}{M})] \cdot \gamma_D \cdot y_t \quad (3-2)$$

と表される。

GDP の成長率は DICE モデルの数値を用い、年 2% と外生的に与える。パラメータの γ_2 は OLS-regression で世界の被害パラメータ γ_D から推計される。Tol (1997) の推計である、被害総額は CO_2 の累積量が産業革命以前の 2 倍となった際に GDP の 2.7% となると外生的に仮定した。世界の削減による便益は CO_2 の累積量によることが式 (3-3) から分かる。式 (3-3) は各国が実施する現在の削減から得られる限界削減便益を表す。各年の削減レベルは対象期間全体の削減レベルを対象期間 (100 年) で割った数値とする。また、各地域は世界全体の便益の一定の割合で分配される (表 3-2)。便益は対象期間の便益の合計で r の割合で将来の便益は割引される。

$$B_i(q_i) = s_i \cdot \gamma_D \cdot C \cdot q_i \sum_{t=2011}^{\infty} \left\{ (1+r)^{-(t-2010)} \left(\sum_{s=2011}^t (1-\delta_M)^{t-s} \cdot 0.64/100 \right) \right\} \quad (3-3)$$

表 3-2 STACO モデルの排出及び便益のシェアのパラメータ
(出典 : Delink et.al, 2004)

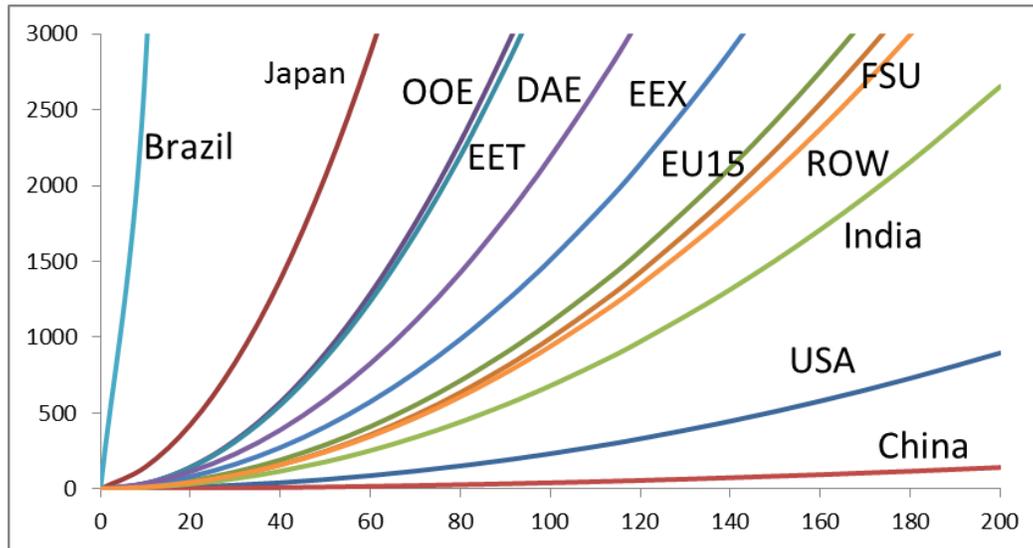
Regions	Emission in 2010 GtC (share)	Parameters		
		Share of global benefits θ_i	abatement cost α_i	abatement cost β_i
USA	1.763 (0.238)	0.2263	0.0005	0.00398
JPN	0.344 (0.046)	0.1725	0.0155	0.1816
EU15	0.943 (0.127)	0.236	0.0024	0.01503
OOE	0.36 (0.049)	0.0345	0.0083	0
EET	0.226 (0.03)	0.013	0.0079	0.00486
FSU	0.774 (0.104)	0.0675	0.0023	0.00042
EEX	0.469 (0.063)	0.03	0.0032	0.03029
CHN	1.127 (0.152)	0.062	0.00007	0.00239
IND	0.344 (0.046)	0.05	0.0015	0.00787
DAE	0.316 (0.043)	0.0249	0.0047	0.03774
BRA	0.122 (0.016)	0.0153	0.5612	0.84974
ROW	0.637 (0.086)	0.068	0.0021	0.00805
World	7.425 (1)	-	-	-

削減費用関数は EPPA モデルの予測を用いた。式 (3-4) で α と β は地域の費用の外生的に与えたパラメータで、表 3-2 に記載されている。式 (3-4) と (3-5) は割引された削減費用と限界削減費用である。各国の限界削減費用曲線を図 3-2 に示す。

$$C_i(q_i) = \sum_{t=2011}^{2110} (1+r)^{-(t-2010)} \cdot \left(\frac{\alpha_i}{3} q_i^3 + \frac{\beta_i}{2} q_i^2 \right) \quad (3-4)$$

$$MAC_i(q_i) = \sum_{t=2011}^{2110} (1+r)^{-(t-2010)} \cdot (\alpha_i q_i^2 + \beta_i q_i) \quad (3-5)$$

(限界削減費用 : US\$/t)



(削減量 : Gt)

図 3-2 2011 年時点での各国・地域の限界削減費用曲線
(出典 : Dellink et.al, 2004)

便益と費用に基づいて、グロスの利得の現在価値は以下の式 (3-6) で表される。

$$\prod_i = B_i(q_i) - C_i(q_i) \quad (3-6)$$

ここで、協定参加国と参加しない国はそれぞれの削減戦略に基づいてナッシュ均衡をプレイすると考える。

本論文では、費用便益計算のための定量的なモデルの枠組みについては Dellink et al (2004) の STACO モデルをほぼそのまま利用した。ただし、オリジナルの STACO モデルでは、提携を結んだ国の便益の合計を自国の便益と捉えて、自国の削減量を決定するという考え方を前提として置いている。具体的には、図 3-3 の模式図のように、それぞれの国の限界削減費用曲線と限界削減便益を合算した黒線との交点が提携した場合の各国の削減量として決定されると仮定している。先進国が青でコストも便益も共に高い値を示し、途上国が赤で共に低い値という

傾向となっているため、STACO モデルの仮定では、提携した場合、途上国の削減量が大幅に増加することになる。

一方、本論文ではこの前提の代わりに、マッチング削減約束アプローチの考え方により、他国の追加的な削減を条件として自国の削減量を決定するという前提を用いて、モデルを構築した。この点については第4章で詳述する。

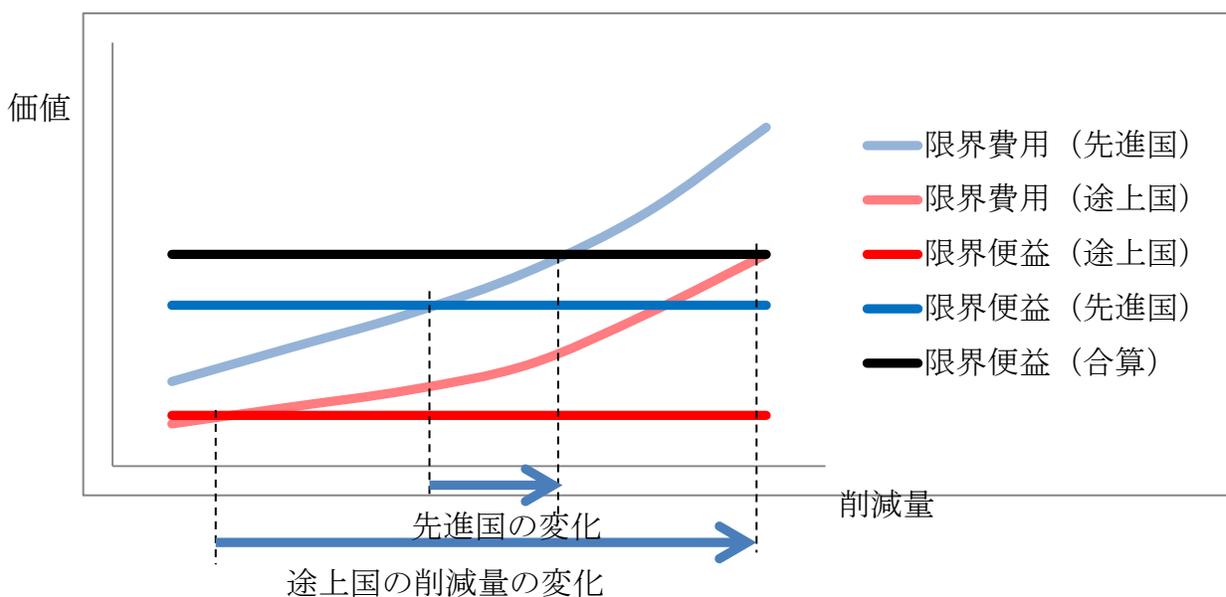


図 3-3 STACO モデルでの削減量を定める考え方に関する模式図

3.3 提携のないケースの計算結果

STACO モデルを用いたどの国も提携関係を作らないケース (All Singleton) における各国の削減量を計算した。非協力のケースでは、各国それぞれにおいて、限界削減費用が限界削減便益と等しくなる削減量が解となる。つまり、

$$MAB_i(q_i) = MAC_i(q_i)$$

ここで、

$$\begin{aligned} MAB_i(q_i) &= s_i \cdot \gamma_D \cdot C \cdot q_i \sum_{t=2011}^{\infty} \left\{ (1+r)^{-(t-2010)} \left(\sum_{s=2011}^t (1-\delta_M)^{t-s} \cdot 0.64/100 \right) \right\} \\ &= s_i \cdot \gamma_D \cdot C \cdot q_i \cdot 7.767 = s_i \cdot 37.40 \cdot q_i \end{aligned}$$

$$MAC_i(q_i) = \sum_{t=2011}^{2110} (1+r)^{-(t-2010)} \cdot (\alpha_i q_i^2 + \beta_i q_i) = 43.1 \cdot (\alpha_i q_i^2 + \beta_i q_i)$$

である。

各国の便益は世界全体の削減量の関数となることから、全体として解が求められる。上記の計算を実施した結果、世界全体の排出量については、2010年の7.4Gtから2100年には3倍以上の25.2Gtに増加する。世界全体の排出量の変化を図3-4に、各国の排出量の変化を図3-5に示す。また、非協力のケースでの各国の2010年時点での削減割合を表3-3に示す。米国の削減量が最も大きく、100年間で162Mtであった。一方、削減割合では中国が最も大きく、BaUから13.7%であった。なお、モデルでは現在の各国の排出量と経済成長率、限界削減費用、限界削減便益を外生的に与え、各国の将来排出量、削減費用、削減便益を内性的に求めた。また、100年間のBaUの排出パスを経済成長率から算出し、そのBaUから定率で各年の削減率を設定している。

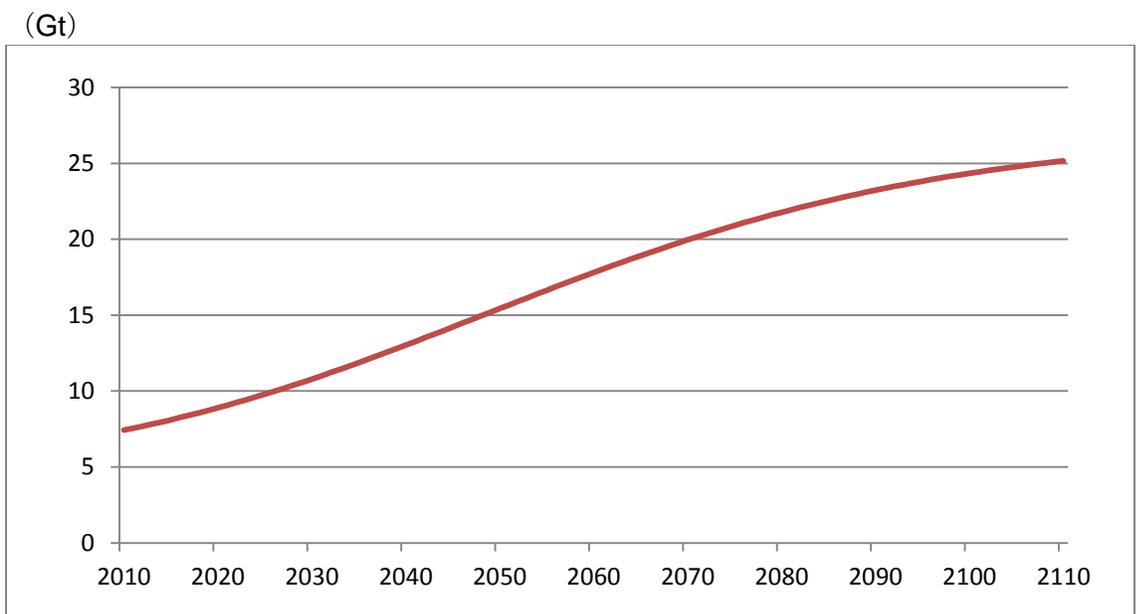


図 3-4 STACO モデルによる世界全体の CO₂ 排出量の予測

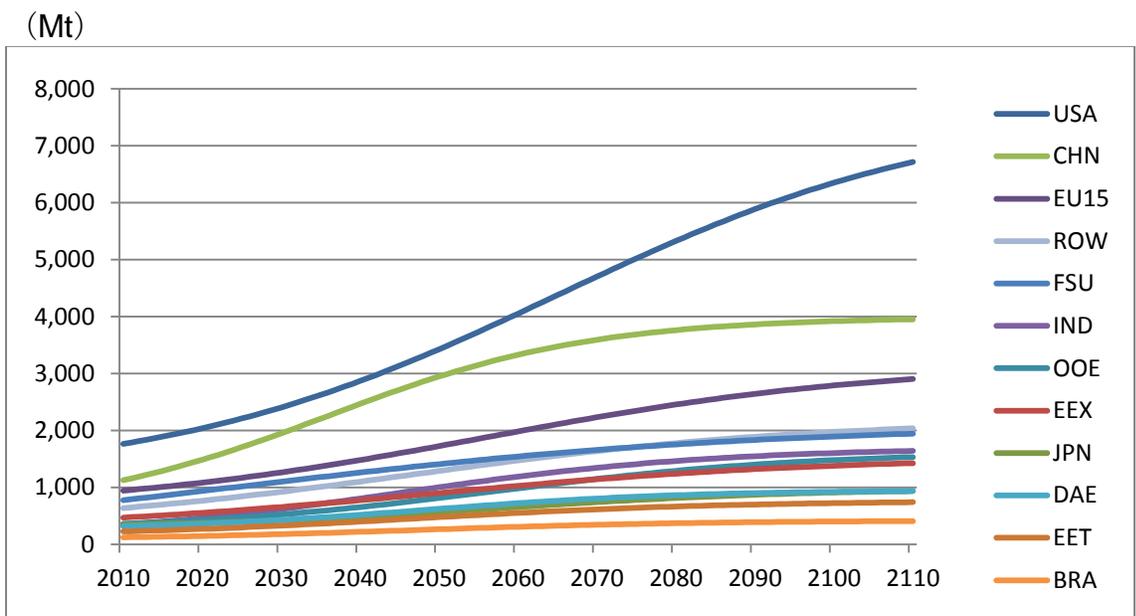


図 3-5 各国・地域の CO₂ 排出量の予測

表 3-3 提携のないケースでの各国の削減割合

国	排出量 (2010年) (Mt)	削減量(Mt)	削減割合(%)
USA	1,763	162	9.2
JPN	344	8	2.3
EU15	943	66	7.0
OOE	360	19	5.3
EET	226	9	4.1
FSU	774	50	6.4
EEX	469	8	1.7
CHN	1,127	155	13.7
IND	344	34	9.8
DAE	316	5	1.7
BRA	122	2	0.1
ROW	637	37	5.8

3.4 まとめ

以上のように、マッチング削減約束アプローチと STACO モデルを組み合わせて、定量的分析が可能なモデルを構築した。また、STACO モデルの前提と計算に用いているパラメータを示した。さらに、STACO モデルを用いたどの国も提携関係を作らないケース (All Singleton) における各国の削減量を計算した。その結果、米国の削減量が最も大きく、100 年間で 162Mt となる一方、中国が最も大きい削減割合を示し、BaU から 13.7%であることが分かった。

4 マッチングメカニズム

本章では、気候変動の国際交渉において、各国の削減目標を引き上げる可能性を持つ、ゲーム理論のマッチングメカニズムの考え方を統合評価モデルである STACO モデルと組み合わせ、モデルを構築する。まずは、マッチングメカニズムの理論的背景について、Guttman (1987) が示した 2 国間でのメカニズムを詳述し、続いて、Boadway et al (2011) が拡張した 3 カ国以上のメカニズムについて述べる。次に、STACO モデルとどのように組み合わせ、計算を行ったかを示す。続いて、構築したモデルを用いて行った計算結果について示す。まずは、主要排出国である 6 カ国にモデルを適用したケースについて、その排出削減量と利得の変化を求めた。次に、2 カ国から 12 カ国（世界全体）まで、あらゆる国の組み合わせについて計算を行い、それぞれの国及び世界全体の削減量と利得を明らかにした。また、このようにして算出された削減量が、世界の気温上昇を 2°C 未満に抑えるために必要な削減量との比較を行った。

4.1 理論的背景とモデルの構築

4.1.1 二国間のメカニズム

Guttman (1987) はマッチングメカニズムが非協力ゲームにおいて、他の国の削減に応じて削減するという参加国が合意すれば、功利的な態度の主体間においても自動的に削減が進

み、パレート最適を実現できることを示した。マッチングメカニズムは二つのステージから成り立つ。第 1 ステージでは、プレイヤー i は他のプレイヤーの削減に応じて積み増しする係数である b_i を表明する。第 2 ステージでは、マッチング係数を所与として、自身の無条件の削減量 a_i を選定する。したがって、プレイヤー i の削減量は次式 (4-1) で示される。

$$q_i = a_i + b_i \sum_{j \neq i} a_j \quad (4-1)$$

プレイヤー i の利得 Π_i は、他のすべてのプレイヤーの削減の合計の関数である便益 $B_i(Q)$ と自身の削減費用 $C_i(q_i)$ (なお、 $Q = \sum_{i=1}^N q_i$) の差で、次式 (4-2) となる。

$$\Pi_i = B_i(Q) - C_i(q_i) \quad (4-2)$$

すべての均衡はサブゲーム完全均衡となっていると仮定し、後ろ向き帰納法により再帰的に解かれる。ステージ 2 で、ステージ 1 でのマッチング係数を所与とし、プレイヤー 1 は利得 Π_1 を最大化するように、自身の貢献 a_1 を選定する。一次条件は、(4-3), (4-4) 式のようになる。

$$\frac{\partial \Pi_1(a_1, a_2, b_1, b_2)}{\partial a_1} = (1 + b_2) \frac{\partial B_1(Q)}{\partial Q} - \frac{\partial C_1(q_1)}{\partial q_1} = 0 \quad (4-3)$$

$$\frac{B_1'(Q)}{C_1'(q_1)} = \frac{1}{1 + b_2} \quad (4-4)$$

なお、便益 $B_i(Q)$ と削減費用 $C_i(q_i)$ は共に 1 回微分が正を満たすとする。

同様にプレイヤー2 は利得 $\Pi_2(a_1, a_2, b_1, b_2)$ を最大化するように、 a_2 を選定する。プレイヤー2 の条件は以下となる。

$$\frac{\partial \Pi_2(a_1, a_2, b_1, b_2)}{\partial a_2} = (1 + b_1) \frac{\partial B_2(Q)}{\partial Q} - \frac{\partial C_2(q_2)}{\partial q_2} = 0 \quad (4-5)$$

$$\frac{B_2'(Q)}{C_2'(q_2)} = \frac{1}{1 + b_1} \quad (4-6)$$

Guttmanはプレイヤーが2人の場合、反応関数が $b_1 b_2 = 1$ を満たすことを発見した。ステージ1での内部均衡は $b_1 b_2 = 1$ でない場合存在し得ない。 $b_1 b_2 < 1$ の場合、 $b_1 b_2 = 1$ になるまで双方のプレイヤーはマッチング係数を引き上げようとする。 $b_1 b_2 > 1$ の場合、内部均衡が不安定になる。ステージ2で不安定な状態になると予期すると、プレイヤーはマッチング係数を引き上げようとし、 $a_1 = a_2 = 0$ となり、削減がなされなくなる。マッチングメカニズムでは、プレイヤーのマッチング係数を通じた間接的な削減と、自身の直接的な削減の費用が等しくなる。もし、プレイヤー1の削減量が非常に大きく、便益が公共財の実質的価格よりも小さいと、プレイヤー1は自身の無条件削減量を0とする。 $b_1 b_2 = 1$ の際に、2カ国の排出量が効率的なレベルになる。

$$b_1 b_2 = 1 \Leftrightarrow \frac{1}{1 + b_1} + \frac{1}{1 + b_2} = 1 \Rightarrow \frac{B_1'(Q)}{C_1'(q_1)} + \frac{B_2'(Q)}{C_2'(q_2)} = 1 \quad (4-7)$$

次の式が示すように、それぞれのプレイヤーの直接削減とマッチング係数を通じた間接削減の実質費用は等しくなる。

$$\frac{1}{1 + b_2} Q = \frac{(1 + b_2)a_1 + (1 + b_1)a_2}{1 + b_2} = a_1 + \frac{1 + b_1}{1 + b_2} a_2 = a_1 + b_1 a_2 = q_1 \quad (4-8)$$

ステージ1では、 $a_1(b_1, b_2)$ 、 $a_2(b_1, b_2)$ を所与として、プレイヤー1と2は b_1, b_2 をそれぞれ選択する。このようにして、プレイヤー1の総削減量は全体の削減量 Q に $\frac{1}{1+b_2}$ を掛けたもの

と等しくなる。プレイヤー2についても同様であり、それぞれの国の総削減量はリンダール均衡となる。均衡状態では、プレイヤー1とプレイヤー2は無条件の削減分と他国の削減に応じた実施する削減分の区別ができなくなる。プレイヤー1の無条件分の実質的削減費用は $\frac{1}{1+b_2}$

であるに対し、マッチングメカニズムでの実質削減費用は $\frac{b_1}{1+b_1}$ となる。また、 $b_1 b_2 = 1$ である

から、 $\frac{1}{1+b_2} = \frac{b_1}{1+b_1}$ 及び、 $\frac{1}{1+b_1} = \frac{b_2}{1+b_2}$ となる。したがって、直接的な削減分とマッチング

メカニズムを通じた間接的削減分の費用は等しくなる。マッチングメカニズムで得られた均衡がパレート最適になるためには、均衡がすべてのプレイヤーに対して内部均衡になっている必要がある。すべての選好や収入がプラスになっていることが内部均衡となるための必要十分条件である。

このように、マッチングメカニズムは、そのルールにさえプレイヤー間で合意することができれば、自動的にパレート最適の状態に到達することを示している。

4.1.2 三カ国間以上のメカニズム

Boadway et al (2011) は、二国間での結果は三カ国間以上のケースにも当てはまることを示した。 n カ国が存在すると仮定し、 $i, j = 1, \dots, n$ とし、 $b_{i,j}$ を i 国の j 国の自主的削減量に対するマッチング係数とする。ここで、他国の自主的削減に対して、それぞれ異なるマッチング係数を

設定することとなる。二国間の場合、ステージ 1 で同時にマッチング係数を選び、ステージ 2 で直接削減量を決定した。二国間の場合と同様に、後ろ向き帰納法により解いていく。

ステージ 2：直接削減分 a_i の設定

マッチング係数は決定されており、 i 国の直接削減分は以下の解となる。

$$\frac{B'_i(Q)}{C'_i(q_i)} = \frac{1}{1 + \sum_{j \neq i}^n b_{ji}} \quad (4-9)$$

i 国が削減を 1 単位増やすための実質的費用は他のすべての国のマッチング係数の合計に依存する。 n カ国の場合、マッチング係数はすべての i, j, k に対し、 $b_{ij}b_{ji} = 1$ $b_{ki}b_{ij}b_{kj} = 1$ (或いは $b_{ki}b_{ij} = b_{kj}$) となる。二国間の場合と同様のため、詳細は省略する。前述の条件が満たされると、どの国もその状態から逸脱するインセンティブを持たなくなる。二国間の場合に導き出される他の数式も同様である。特に、 $b_{ij}b_{ji} = 1$, $b_{ki}b_{ij}b_{kj} = 1$ を満たす場合、

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \sum_{j \neq i}^n b_{ji}} = \sum_{i=1}^n \frac{B'_i(Q)}{C'_i(q_i)} = 1 \quad (4-10)$$

となる。したがって、均衡状態は効率的であり、限界削減便益はすべての国で等しくなる。各

国の削減量はリンダール均衡を実現する。 i 国のリンダール価格 $\frac{B'_i(Q)}{C'_i(q_i)}$ は $\frac{1}{1 + \sum_{j \neq i}^n b_{ji}}$ と等しく

なる。式 (1) と、 $b_{ij}b_{ji} = 1$ 及び $b_{ki}b_{ij} = b_{kj}$ から、各国のリンダール均衡は次のように表される。

$$q_i = a_i + \sum_{j \neq i}^n b_{ij} = \frac{1}{1 + \sum_{j \neq i}^n b_{ji}} (q_1 + \dots + q_n) \quad (4-11)$$

4.1.3 STACOモデルと組み合わせたモデル計算

STACO モデルを用いたマッチングメカニズムによる協力ケースにおける各国の削減量を計算した。非協力のケースでは、各国それぞれにおいて、限界削減費用が限界削減便益と等しくなる削減量が解となった。一方、マッチングメカニズムでは、式 (4-10) から、

$$MAC_i(q_i) = (1 + \sum_{j \neq i}^n b_{ji}) MAB_i(q_i)$$

となる。また、式 (4-11) から、

$$q_i = \frac{1}{1 + \sum_{j \neq i}^n b_{ji}} (q_1 + \dots + q_n)$$

となる。

また、 $b_{ij}b_{ji} = 1$, $b_{ki}b_{ij}b_{kj} = 1$ を満たす。

q_i 、 b_{ij} を変数として、上記式を満たすような q_i 、 b_{ij} を算出する。計算には Microsoft™ Excel のマクロ計算を用いた。エクセルでのマクロ計算のアルゴリズムについて、3カ国の場合のソースコードを補足資料 B に示す。

4.2 計算結果

4.2.1 6カ国のケースにおける排出削減量

オリジナルの STACO モデルでは提携関係を結んだ国の便益の合計を自国の便益と捉えて、自国の削減量を決定するとしている。一方、本章ではマッチングメカニズムの考え方に沿って、他国の追加的な削減を条件として自国の削減量を決定するという前提でモデルを構築した。はじめに、上位 6 位までの温室効果ガス主要排出国（中国、米国、EU、インド、旧ソ連、日本）のケースを対象として上記の自国の削減量の決定の考え方の違いにより、各国の削減量がどのように変化するかについて検討した。

対象の 6 カ国は、その排出量の合計が 2010 年時点での世界全体の排出量の 7 割近くを占め、2020 年でも同程度であることが予測されている。Guttman (1987) が示しているように、国の数が増えるほどメカニズムの実現可能性が小さくなることから、国の数を限定した方が合意しやすい。主要排出国を含む 6 カ国の場合において、モデルを適用した結果について述べる。マッチングメカニズムとオリジナルの STACO では各国毎でも、全体でも異なる削減量を示した。100 年間で世界全体の削減量はオリジナルの STACO モデルでは 181Gt だが、マッチングメカニズムでは 137Gt であった。どの国も提携関係にない場合 (All Singleton) と比べると、オリジナルの STACO モデルでは 3.3 倍、マッチングメカニズムでは 2.5 倍の削減となる（表 4-1）。各国の削減量の結果を見ると、オリジナルの STACO モデルにおいては、中国 (CHN) ・インド (IND) が高い削減率を示した。100 年間の削減量が毎年同じだと仮定すると、オリジナルの STACO モデルでは中国は現在の排出量を 75%、インドは 56%削減しなければならない計算となる。一方、EU は 15%、日本 (JPN) は 9%と先進国は緩やかな削減幅となった。一方、マッ

チングメカニズムでは、開発途上国と先進国の削減量がオリジナルの STACO モデルよりも近づく結果となった。マッチングメカニズムにおける中国の削減率は 33%、インドは 40%である一方、EU と日本がそれぞれ 22、23%となった。なお、どの国も提携関係にない場合 (All Singleton) に比べると日本の削減量は 10 倍に増えており、日本の非常に高い限界削減費用では、23%の削減のためには相当な費用がかかることが示唆される。米国 (USA) の削減量はオリジナルの STACO モデルでもマッチングメカニズムでも同程度で、提携のないケースの 2 倍程度であった。

表 4-1 6 カ国参加の場合の STACO モデルとマッチングメカニズムの削減量の比較

	STACO (Gt)	% from BaU	c.p. All Singleton	Matching (Gt)	% from BaU	c.p. All Singleton
USA	33.8	19.2	2.1	34.5	19.6	2.1
JPN	3.1	9.0	4.0	8.0	23.1	10.3
EU15	14.3	15.2	2.2	20.3	21.6	3.1
FSU	17.4	22.5	3.5	14.8	19.2	3.0
CHN	84.9	75.3	5.5	37.2	33.0	2.4
IND	19.3	56.0	5.7	13.9	40.5	4.1
Global	180.7		3.3	136.7		2.5

オリジナルの STACO モデルでは、提携国は提携国全体の限界削減便益と自国の限界削減費用が等しくなるレベルまで削減すると仮定している。つまり、提携がない場合と比べて、自国の限界削減便益が大きくなると仮定している。一方、マッチングメカニズムでは、限界削減便益には変化がないが、他国が自国の削減に比例した削減を行うため、提携がない場合に比べて各国の実質的な限界削減費用が引き下げられることになる。

計算の結果求められたマッチング係数を表 4-2 に示す。例えば、日本の無条件での削減量に対する米国のマッチング係数は 4.35 である。これは、日本の無条件削減の 4 倍以上の削減を米

国が行うことを示す。日本が各国から最も高いマッチング係数を設定されており、中国が最も低い。ある国のマッチング係数はその国の限界削減便益が小さい場合に大きくなり、限界削減費用が大きくなるほど大きくなる。言い換えると、マッチング係数は一種の補助金であるとも解釈できる。削減の便益をあまり受けない国は補助が大きくなり、削減費用が大きい国も補助が大きくなる。その関係は以下の式で表される。

$$\frac{B'_i(Q)}{C'_i(q_i)} = \frac{1}{1 + \sum_{j \neq i}^n b_{ji}} \Rightarrow \sum_{j \neq i}^n b_{ji} = \frac{C'_i(q_i)}{B'_i(Q)} - 1 \quad (4-12)$$

表 4-2 6カ国の場合のマッチング係数

	USA	JPN	EU15	FSU	CHN	IND
USA		4.35	1.82	2.38	0.91	2.13
JPN	0.23		0.43	0.55	0.21	0.49
EU15	0.54	2.35		1.31	0.52	2.18
FSU	0.42	1.80	0.76		0.39	1.11
CHN	1.08	4.64	1.88	2.54		2.33
IND	0.47	2.04	0.45	0.90	0.42	

4.2.2 すべての参加国数毎の組み合わせにおける排出削減量と利得

ここでは、マッチングメカニズムに参加する国を 2 カ国・地域から 12 カ国・地域（全世界）のあらゆる組み合わせを対象として分析を行った。この分析を通じて、マッチングメカニズムに参加する国の数の増加により、どの程度、各国及び世界全体の追加的削減量が増加するのかを分析した。ただし、マッチングメカニズムのグループは 1 つのみ形成されるとして、複数のグループが存在するケースは本論文では検討していない。組み合わせは、2 カ国で 66 ケース、

3カ国で220ケース、4カ国で495ケース、5カ国で792ケース、6カ国で924ケース、7カ国で792ケース、8カ国で495ケース、9カ国で220ケース、10カ国で66ケース、11カ国で12ケース、12カ国で1ケースとなり、全体で4083ケースある。そのうち、どの国も提携関係にない場合 (All Singleton) の利得よりも高い利得を得られる場合のみを分析の対象とした。なぜなら、提携がない場合よりも利得が少ないケースでは、その国にとってマッチングメカニズムを利用する誘因がないからである。

提携がない場合の利得よりも高い利得を得られるケースは、2カ国で18ケース、3カ国で67ケース、4カ国で117ケース、5カ国で292ケース、6カ国で411ケース、7カ国で288ケース、8カ国で102ケース、9カ国で29ケース、10カ国で5ケース、11カ国で1ケース、12カ国で1ケースあり、全体で1331ケースある。このように、6カ国において最も組み合わせが多く、それ以降マッチングメカニズムの参加国が多くなると、組み合わせの数が減少し、11カ国、12カ国では1ケースのみとなっている。

マッチングメカニズムの導入によって、削減量及び利得が協力のない場合に比べてどのように変化するかを図4-1にまとめた。ここでは、2カ国・地域から世界全体(12カ国・地域)までの各ケースにおける最大の削減量の組み合わせを取り出してグラフとした。提携がない場合では100年間に世界全体で55Gtの削減量となり、削減による利得は1兆9630億米ドルとなる。2カ国のケースではこれらが73Gt、2兆6290億米ドルとなり、参加国が増えれば増えるほど、削減量及び利得がともに上昇することが分かる。世界全体がメカニズムに参加した場合には、削減量は202Gt、利得は4兆7130億米ドルにまで高まり、これは提携がない場合と比べ、削減量で3.7倍、利得で2.4倍を示すことが分かった。

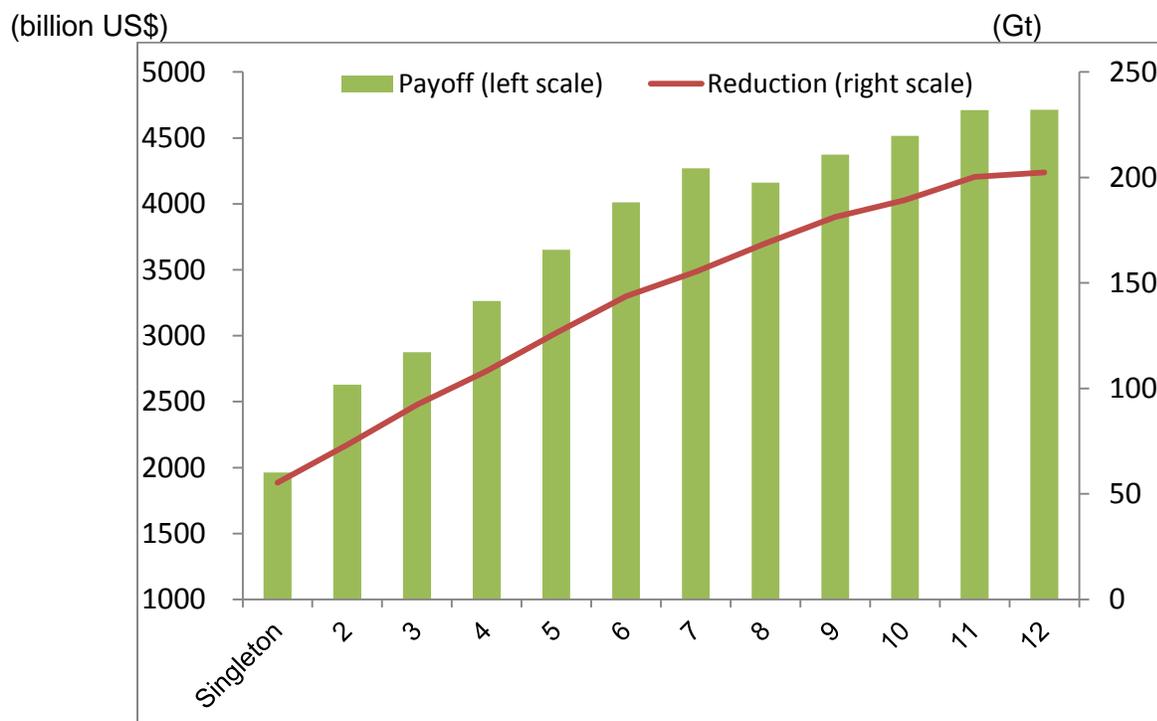


図 4-1 マッチングメカニズムによる参加国数毎の最大削減量とその際の利得

最大の削減量をもたらす国々の組み合わせが、参加国数のそれぞれにおいてどのようになるかについて表 4-3 にまとめた。2 カ国のケースでは米国と中国、3 カ国のケースではこれに EU15 が加わり、4 カ国のケースではさらにインドが追加される。5 カ国の場合は、さらに、その他の国 (ROW) が入り、6 カ国のケースでは旧ソ連 (FSU) が加わる。7 カ国のケースではエネルギー輸出国 (EEX)、8 カ国のケースでは日本 (JPN)、9 カ国のケースではその他の OECD 加盟国 (OOE) が追加され、10 カ国のケースでは東ヨーロッパ (EET)、11 カ国のケースでアジア新興国 (DAE)、12 カ国つまりすべての国が参加するケースでは最後にブラジルが加えられる。

表 4-3 最大の削減量をもたらす国の組み合わせ

Number of coalition	Coalition of maximum case												
2	USA	CHN											
3	USA	CHN	EU15										
4	USA	CHN	EU15	IND									
5	USA	CHN	EU15	ROW	IND								
6	USA	CHN	EU15	FSU	ROW	IND							
7	USA	CHN	EU15	FSU	ROW	EEX	IND						
8	USA	CHN	EU15	FSU	ROW	EEX	IND	JPN					
9	USA	CHN	EU15	FSU	ROW	EEX	OOE	IND	JPN				
10	USA	CHN	EU15	FSU	ROW	EEX	OOE	IND	JPN	EET			
11	USA	CHN	EU15	FSU	ROW	EEX	OOE	IND	JPN	DAE	EET		
12	USA	CHN	EU15	FSU	ROW	EEX	OOE	IND	JPN	DAE	EET	BRA	

提携がない場合と比較した追加的な削減量は、2カ国のケースで18Gt、3カ国のケースで37Gt、4カ国のケースで53Gt、5カ国のケースで71Gt、6カ国のケースで88Gt、7カ国のケースで100Gt、8カ国のケースで113Gt、9カ国のケースで126Gt、10カ国のケースで134Gt、11カ国のケースで145Gtであった。また、提携がない場合に比べた追加的な利得は、2カ国のケースで6,660億米ドル、3カ国のケースで9,120億米ドル、4カ国のケースで1兆3,000億米ドル、5カ国のケースで1兆6,900億米ドル、6カ国のケースで2兆480億米ドル、7カ国のケースで2兆3,080億米ドル、8カ国のケースで2兆1,990億米ドル、9カ国のケースで2兆4,110億米ドル、10カ国のケースで2兆5,540億米ドル、11カ国のケースで2兆7,490億米ドル、12カ国のケースで2兆7,500億米ドルであった（表4-4）。なお、8カ国、9カ国及び10カ国のケースでは、最大削減量となる国の組み合わせと最大利得となる国の組み合わせが異なる。最大の削減量を示す国の組み合わせには日本が入るが、最大利得を示す場合には日本以外の国（8カ国ではOOE、9カ国及び10カ国ではDAE）が入っている。これは、日本の限界削減費用が高いために、日本が入った場合に中国など限界削減費用の低い国での削減がより進む一方、日本の削減費用が高いために利得は抑えられることが要因である。

表 4-4 参加国数毎に最大の削減量をもたらす組み合わせでの追加的削減量と追加的利得

Number of coalition	Number of cases	Cases for plus	Maximum additional reduction (Gt)	Maximum additional payoff (billion US\$)
2	66	18	18	666
3	220	67	37	912
4	495	117	53	1300
5	792	292	71	1690
6	924	411	88	2048
7	792	288	100	2308
8*	495	102	113	2199
			112	2525
9*	220	29	126	2411
			122	2740
10*	66	5	134	2554
			131	2935
11	12	1	145	2749
12	1	1	147	2750
Total	4083	1331		

※削減量が最大となる組み合わせと利得が最大となる組み合わせが異なる。

各々の参加国数の場合において、最大の削減量のケースは排出量の多い国が入っていることが分かる。また、メカニズムへの参加国が多くなるほど、全体の削減量も多くなることが分かった。例えば、参加国数が 8 カ国のうち削減量が最大となる国の組み合わせは 7 カ国で最大となる組み合わせに日本を加えた組み合わせとなる。8 カ国の最大ケースにおける日本の削減量は 8.8Gt であるが、7 カ国最大となる組み合わせより合計の削減量では 13.4Gt 多い。日本は世界全体では 4%程度の排出量しか占めないが、日本が参加するか否かが日本の排出量以上の影響をもたらすことが分かった。ゲーム関係にあるため、日本が参加しない場合、日本が参加した場合の日本の削減量以上に追加的削減の機会が失われるからである。つまり、参加国数を増やせば、その国の削減量よりも全体として多くの削減量が達成できることが分かる。

表 4-5 はそれぞれの参加国数における削減量が最大となるケースでの参加各国の削減量を示した表である。提携がない場合と比較すると、削減量は国によって異なり、最も削減量が大きいすべての国が参加する場合には国間で 2.5 倍から 85.3 倍の幅がある。限界削減費用が高い国である、日本 (JPN)、アジア新興国 (DAE) やブラジル (BRA) では、提携がない場合に比べ、大きな倍率で削減を行うことが分かる。これは、マッチングメカニズムにより、限界削減費用の低い国がより多く削減することになるため、その分世界全体での削減が進み、削減による便益が得られることから、削減費用の高い国でもより多く削減することがコスト的に見合うからである。また、どの国もメカニズムの参加国の数が多くなればなるほど、削減量も多くなることが示されている。

参加国の数が少ない場合、米国 (USA)、中国 (CHN) や EU などの排出量が多い国が参加するケースで、全体の削減量が大きくなる。また、限界削減費用が低い国も含まれる傾向にある。例えば、インド (IND) は提携がない場合、その他の国 (ROW) や旧ソ連 (FSU) よりも削減量は小さいにも関わらず、4 カ国参加の場合から最大削減ケースに ROW や旧ソ連よりも先んじて含まれている。インドの限界削減費用は ROW や旧ソ連よりも小さいため、他の参加国から、より多くの削減を引き出すことができるためと考えられる。

表 4-5 最大削減量をもたらす組み合わせにおける各国・地域の削減量

	(Gt)											
	USA	CHN	EU15	IND	ROW	FSU	EEX	JPN	OOE	EET	DAE	BRA
Emissions in 2010	1.76	1.13	0.94	0.34	0.64	0.77	0.47	0.34	0.36	0.23	0.32	0.12
Singleton	16.2	15.5	6.6	3.4	3.7	5.0	0.8	0.8	1.9	0.9	0.5	0.02
2	24.5	25.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	28.5	30.0	16.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	30.9	32.9	18.2	12.4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	33.2	35.8	19.6	13.4	14.1	-	-	-	-	-	-	-
6	35.4	38.4	20.9	14.3	14.6	15.2	-	-	-	-	-	-
7	36.6	39.7	21.6	14.8	15.0	15.7	8.3	-	-	-	-	-
8	37.7	41.1	22.2	15.3	15.5	16.1	8.6	8.8	-	-	-	-
9	38.8	43.4	22.9	15.7	15.9	16.6	8.9	9.1	8.7	-	-	-
10	39.5	43.1	23.3	16.0	16.2	16.8	9.1	9.3	8.8	6.3	-	-
11	40.4	44.3	23.8	16.4	16.6	17.2	9.3	9.6	9.0	6.4	7.7	-
12	40.5	44.5	23.9	16.4	16.7	17.3	9.4	9.6	9.1	6.4	7.7	1.3
12 vs Singleton (times)	2.5	2.9	3.6	4.9	4.5	3.5	11.8	12.4	4.7	6.9	14.3	85.3

4.2.3 産業革命以降の世界平均気温の上昇を 2°C未満に抑えるために必要な

削減量との比較

マッチングメカニズムの導入により可能となる排出削減量が、産業革命以降の世界平均気温の上昇を 2°C未満に抑えるために必要な削減量に達成するかどうか検討した（表 4-6）。UNEP（2009）は、2010 年の排出量を 49Gt-CO₂ 換算、2020 年の排出量を 58Gt-CO₂ 換算、2°C未満を達成するために必要な排出量を 44Gt-CO₂ 換算と推計している。一方、マッチングメカニズ

ムを用いたモデルの排出量は 2010 年に 7.4Gt-C 換算、2020 年排出量が 8.9Gt-C 換算、すべての国がメカニズムに参加する場合での排出量が 6.9Gt-C 換算となっている。CO₂ 換算と C 換算している違いがあるため、これを合わせて比較すると、絶対量については本論文でのモデル計算の結果が 4 割ほど低いこととなっている。本論文はエネルギー起源 CO₂のみを対象にしている一方、UNEP の報告書 (UNEP, 2012) は他の温室効果ガスも含めていること、世界全体の排出量について不確実な点が多いこと等から、このような違いが生じていると推察される。しかしながら、割合としては 2010 年の排出量を 100 とした際に、2020 年の排出量は UNEP 報告書が 118 で、本論文での計算が 120 と近い値を示している。また、2°Cに抑制するために必要な排出量の 2010 年排出量との比較では、UNEP 報告書では 90 となっている。一方、マッチングメカニズムにおいて、すべての国が参加する場合の排出量は 2010 年排出量では 93 であり、ほぼ近い値を示している。したがって、マッチングメカニズムを用いて世界全体の排出削減を進めることで、2°C達成のために必要な排出量に抑えることができる可能性があることが分かる。

一方、2°C達成のためには、2020 年以降も引き続き排出量を一層削減していくことが必要になる。STACO モデルでは、ベースライン排出量が Business as usual では年々急速に増えていき、2100 年では現状の 3 倍以上の排出量になると仮定している。また、限界削減費用については、技術発展に伴い、毎年 5%ずつ低減していくと仮定している。一方、2050 年に世界全体の排出量を半減するためには、限界削減費用を大幅に低減する必要があり、革新的な排出削減技術の開発・導入が不可欠であることが分かる。

表 4-6 産業革命以降の世界の平均気温上昇を 2°C未満にするために必要な排出量の比較

	UNEP 報告書			マッチングメカニズム	
	Gt-CO ₂ 換算	Gt-C 換算	割合	Gt-C 換算	割合
2010年の排出量	49	13.4	100	7.4	100
2020年の排出量	58	15.8	118	8.9	120
2°C達成に必要な2020年での排出量	44	12.0	90	6.9	93

4.2.4 便益の感度分析

ゲーム理論では、プレイヤーが功利的にふるまうことを前提としており、行動のベースとして費用と便益が重要となる。したがって、マッチングメカニズムが現実の国際交渉で採用されるためには、費用便益の認識について共通認識が作られることが必要である。費用便益の共通認識を作る上で重要なパラメータが割引率である。割引率の設定によって、計算結果は大きく変わりうる。なぜなら、気候変動による影響は将来になればなるほど大きくなると考えられるからである。割引率を低く見積もるということは将来の価値を高く見るということであり、割引率を高く設定するということは将来の価値を低く見るということである。Nordhaus などの主流派は 5% 前後の割引率を用いているが、スターンは気候変動の影響は超長期に及び、倫理的な観点から将来世代の便益を大きく割り引くべきではないとの考え方で 2% 未満の割引率を用いている。そのため、マッチングメカニズムを用いて、すべての国が参加する場合とメカニズムがない場合について、割引率を本論文のモデルで利用している 2% に加え、0% とした場合と 4% と変化させた場合について計算を行い、感度分析を行った。割引率の変化によって、限界削減便益（2010年価値）がどう変化するかの結果を表 4-7 に示す。世界全体で割引率が 2% の場合に 24.8\$/CO₂-t の限界削減便益が、0% では 79.2\$/CO₂-t に 4% では 14.1\$/CO₂-t となった。

表 4-7 限界削減便益の割引率の変化による感度分析結果

(\$/CO₂-t)

ケース	全ての国が参加する場合			メカニズムがない場合		
	0%	2%	4%	0%	2%	4%
割引率						
USA	120	38	16	20	8	5
JPN	219	68	27	15	6	4
EU15	200	64	27	20	9	5
OOE	92	29	12	3	1	1
EET	45	14	6	1	0	0
FSU	93	30	13	6	3	1
EEX	42	13	5	3	1	1
CHN	18	8	4	5	2	1
IND	59	19	8	4	2	1
DAE	42	13	5	2	1	1
BRA	137	41	16	1	1	0
ROW	84	26	11	6	3	1
Global	79.2	24.8	14.1			

表 4-8 合計削減量の割引率の変化による感度分析結果

(Gt)

ケース	全ての国が参加する場合			メカニズムがない場合		
	0%	2%	4%	0%	2%	4%
割引率						
USA	48.3	40.5	34.4	19.6	16.2	13.3
JPN	11.7	9.6	7.9	1.0	0.8	0.6
EU15	28.6	23.9	20.3	8.1	6.6	5.3
OOE	10.7	9.1	7.8	2.2	1.9	1.6
EET	7.6	6.4	5.5	1.1	0.9	0.8
FSU	20.4	17.3	14.9	5.8	5.0	4.2
EEX	11.4	9.4	7.8	1.1	0.8	0.6
CHN	54.0	44.5	43.9	19.6	15.5	12.0
IND	19.7	16.4	14.0	4.2	3.4	2.6
DAE	9.4	7.7	6.4	0.7	0.5	0.4
BRA	1.6	1.3	1.1	0.0	0.0	0.0
ROW	19.9	16.7	14.2	4.6	3.7	3.0
Global	243.3	202.8	178.3	68.2	55.3	44.3
比率	20%	0%	-12%	23%	0%	-20%

また、割引率の変化による、世界全体の 100 年間の総削減量の影響については表 4-8 に示す。割引率が世界全体の削減総量は 2% の場合に 203Gt であることに對し、0% で 243Gt、4% で 178Gt となった。

このように、割引率が 0% と 4% の結果を比べると、限界削減便益に 5 倍以上の大きな開きがある一方、総削減量については 3 割も差がないことが分かる (図 4-2)。つまり、便益に対する試算に差があったとしても、総削減量に与える影響は比較的小さいと言える。なお、メカニズムがない場合には、世界全体の合計削減量が 2% の際に 55Gt、0% で 68Gt、4% で 44Gt となった。つまり、各国間での協力が成立するか否かの削減量の差の方が大幅に大きいことが分かる。

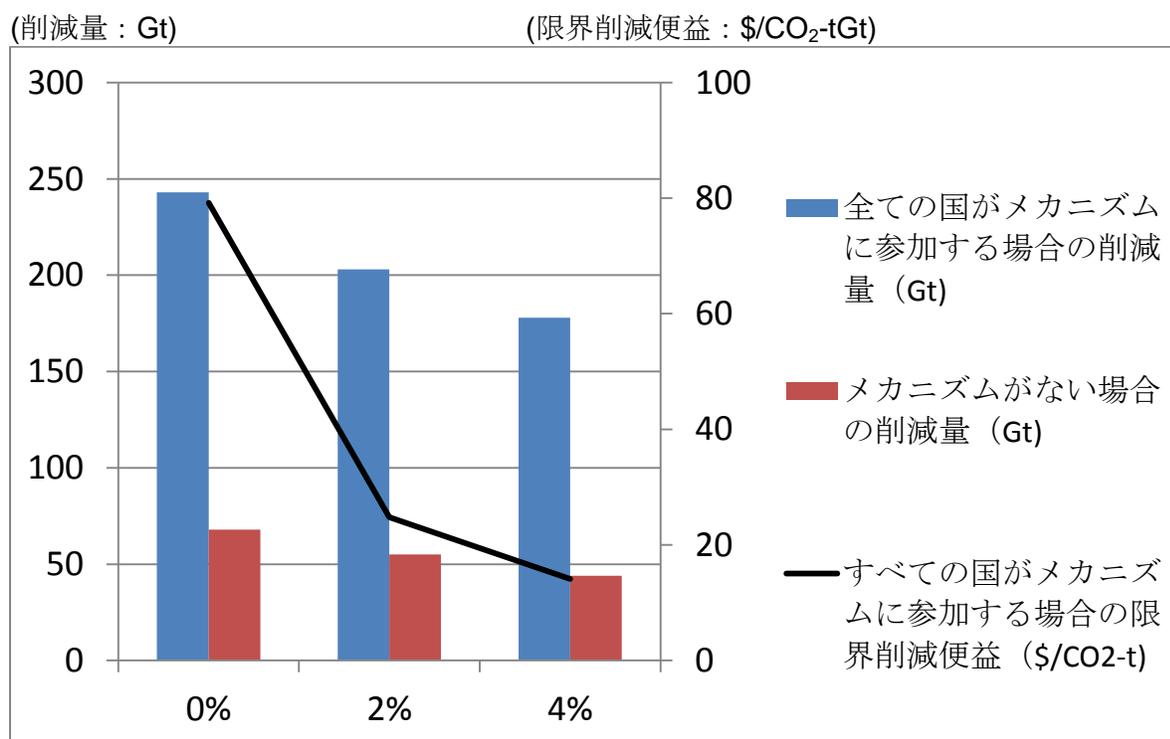


図 4-2 便益の感度分析結果

4.3 まとめ

本章では、マッチングメカニズムの考え方を **STACO** モデルと組み合わせて、ゲーム理論の考え方を取り入れた定量的分析を可能とするモデルを構築した。また、本モデルを適用し、主要排出国 6 カ国を対象に計算を行った。その結果、マッチングメカニズムにより、メカニズムがない場合と比べ、2.5 倍の削減が可能であることが分かった。オリジナルの **STACO** モデルと比較したところ、開発途上国の排出削減量が少なく、先進国が多くなっており、国際交渉で議論されている数値により近い結果となった。オリジナルの **STACO** では、提携する国の便益を自国の便益として捉えるという現実的でない仮定となっていることが問題であると考えられる。

また、あらゆる提携の組み合わせについても分析を行った。その結果、提携国の数が多くなればなるほど、世界全体の削減量及び利得が向上することが分かった。世界全体がマッチングメカニズムに参加すれば、何も提携がない場合と比較して、3.7 倍の削減量が達成可能であることが判明した。

さらに、産業革命以降の世界平均気温を 2°C 未満に抑えるために必要な削減量との比較を行った。その結果、マッチングメカニズムの導入により 2020 年に必要とされる削減量を到達する可能性があるが、それ以降の大幅な削減の実現のためには、限界削減費用を大幅に下げる革新的技術の開発・導入が不可欠であることが分かった。

5 QCM (QUANTITY-CONTINGENT MECHANISM)

本章では、気候変動の国際交渉において、各国の削減目標を引き上げる可能性を持つ、ゲーム理論のマッチングメカニズムを発展させた QCM (Quantity-Contingent Mechanism) の考え方を STACO モデルと組み合わせ、モデルを構築する。

まず、QCM の理論的背景について、Boadway (2007) が示したメカニズムを詳述する。続いて、STACO モデルとどのように組み合わせ、計算を行ったかを示す。

さらには、このモデルを用いて行った計算結果、すなわち、主要排出国である 6 カ国にモデルを適用したケースについて、その排出削減量と利得の変化を求めた。次に、QCM の問題点を指摘し、その問題点を克服しうるマッチングメカニズムの計算結果を用いた QCM の実施という考え方について検討する。

5.1 理論的背景とモデルの構築

5.1.1 理論的背景

Boadway (2007) は、Guttman のメカニズムを発展させ、2人ゲームにおいて、1人のプレイヤーのみがマッチングメカニズムによる削減を宣言できるとした場合を分析した。このメカニズムでは、ある国がもう一方の国の一定以上の削減を条件にさらなる削減の上乗せを約束する。条件を満たさない場合の削減量がメカニズムのパラメータを決めるために重要で、最終的に各国の利得を決める。このマッチングメカニズムの応用形は QCM (Quantity-Contingent Mechanism) と呼ばれる。もし、相手国が一定の削減を実施しない場合、提案国は当初約束した削減を行わず、結果はフォールバックポジションとなる。提案国はフォールバックポジションを考慮に入れつつ、相手国の参加を促す水準となるような削減条件を提案する。Boadway は QCM が無政府状態の場合でも、QCM を提案する国又はグループが存在すれば、QCM は成立し、その結果排出削減量が引き上げられ、効率的な公共財の供給が実現できることを証明した。

QCM は三つのステージから成る。第 1 ステージでは、プレイヤー1 が、プレイヤー2 が r 以上の削減をする場合に g_h を、 r 未満の場合には g_l を削減することを宣言する。第 2 ステージでは、プレイヤー2 が自国の削減量を宣言する。最後に第 3 ステージで上記の条件に従って、自国の削減を実施する。QCM においては、プレイヤー1 が g_h 、プレイヤー2 が r を削減することは明らかである。プレイヤー1 にとって QCM への約束は拘束力があるため、総削減量は g_h を超えることはない。もし、プレイヤー2 が r よりも少ない削減しかしない場合、プレイヤー1 は削減を行わず、メカニズムがない場合の利得となる。そのため、プレイヤー2 は削減を少なく

しても利得が改善されない。そのため、 g_h と r が均衡状態となる。Boadway は QCM が効率的で、以下のサミュエルソン条件を満たしていることを示した。

$$\frac{B_1'(Q)}{C_1'(q_1)} + \frac{B_2'(Q)}{C_2'(q_2)} = 1 \quad (5-1)$$

ここで、プレイヤー2 は、メカニズムがない場合の利得と同じだけを得て、プレイヤー1 は残りのすべての余剰利得を得る。メカニズムがない場合と比べた余剰利得がどちらのプレイヤーに割り振られるかは、第 3 ステージにおける各プレイヤーの約束を実施する能力による。また、 g_h 、 g_l 、及び r をどのように設定するかを仮定する必要がある。まず、単純に g_l をすべての国が非協力状態にあるナッシュ均衡とする。全体の削減量を最大化するメカニズムを特定することが目的であることから、プレイヤー1 が g_l における利得を下回らないようにしつつ、削減を最大化すると仮定する。その上で、削減レベルを上げることに伴い発生する利得はすべてプレイヤー2 に帰属するとした。 r の水準はサミュエルソン条件を満たすように設定する。この QCM のプロセスを図 5-1 に示す。マッチングメカニズムと比べた QCM の特徴としては、(1) マッチング係数を各国ごとに設定する必要がないこと、(2) 提案者の存在を前提に、マッチングメカニズムのようにルールへの合意がなくても、メカニズムがスタートできる点が挙げられる。

本論文では、Boadway et al (2011) の研究を基に、QCM を多国間の場合に拡張した。1 つ又は複数の協力関係にある国々が他の国々の削減を条件に一定水準の削減の積み増しを約束するとする。

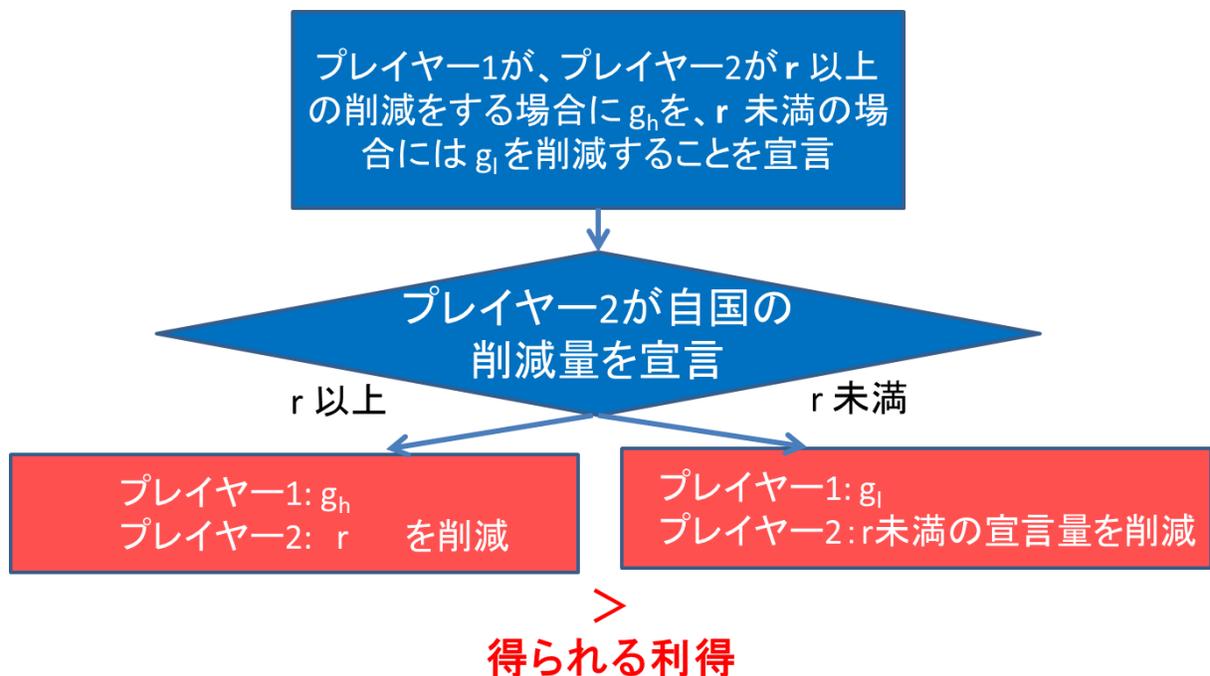


図 5-1 QCM のプロセス

5.1.2 STACOモデルと組み合わせたモデル計算

UNFCCC の交渉では、開発途上国も含めたすべての国が削減行動を取るようになってきているが、特に先進国が率先して削減することが合意されている。現在の政治状況から、米国が短期的にこのような条件付削減に参加することは難しいが、米国を含んだすべての先進国が中国やインドといった主要排出開発途上国に条件付戦略を提案することが理想的である。そのため、ここでは、先進国（米国、日本、EU、旧ソ連）が中国、インドに対して条件付削減を提案すると仮定する。

ここで、追加的削減により発生する余剰利得を提案国が一切受け取らないという仮定を置く。つまり、すべての余剰利得は提案を受ける側が受け取るとする。すなわち、

$$\prod_{\text{先進国}} = B_{\text{先進国}}(q_{\text{世界全体}}) - C_{\text{先進国}}(q_{\text{先進国}}) = \text{各国の} \textit{Singleton} \text{の利得}$$

また、中国とインドの間での分配については様々な方法が考えられるが、ここでは、簡便に均等に分割するものとする。式で表すと、

$$1/2 \cdot \prod_{\text{余剰利得}} = B_{\text{中国}}(q_{\text{世界全体}}) - C_{\text{中国}}(q_{\text{中国}}) = B_{\text{インド}}(q_{\text{世界全体}}) - C_{\text{インド}}(q_{\text{インド}})$$

となる。一方、式 (5-1) から、

$$\sum_{i=1}^n \frac{B'_i(Q)}{C_i(q_i)} = 1$$

となる。

q_i を変数として、上記式を満たすような q_i を算出する。このようにして、QCM の考え方を STACO モデルと組みあわせて、各国の削減量を計算した。

5.2 計算結果

5.2.1 6カ国のケースにおける QCM の適用

前節で設定したように、先進国が条件付削減を中国とインドに提案した場合について、モデルを適用して計算を行ったところ、先進国の削減率はどの国でも大差はなく 24-28% となった（表 5-1）。また、マッチングメカニズムと比べて、中国やインドの削減率は大幅に低くなるのが分かった。中国の削減率はマッチングメカニズムで 33% であったものが QCM で 26% となり、インドの削減率はマッチングメカニズムの 40% から QCM の 15% と大幅に小さくなった。日本の削減量はメカニズムがない場合と比べて QCM では 12 倍となり、マッチングメカニズムでの 10 倍よりも大きくなった。

上記の結果から、**QCM** では、先進国が開発途上国よりも多く削減する形となっている。これは、余剰利得を先進国は一切受け取らずに、中国とインドで折半するという先進国にとって厳しい前提条件としているためである。

表 5-1 6カ国の場合の削減量の比較

	STACO (Gt)	% from BaU	c.p. Singleton	Matching (Gt)	% from BaU	c.p. Singleton	QCM (Gt)	% from BaU	c.p. Singleton
USA	33.8	19.2	2.1	34.5	19.6	2.1	43.8	24.9	2.7
JPN	3.1	9.0	4.0	8.0	23.1	10.3	9.6	27.8	12.3
EU15	14.3	15.2	2.2	20.3	21.6	3.1	25.4	26.9	3.8
FSU	17.4	22.5	3.5	14.8	19.2	3.0	18.7	24.2	3.8
CHN	84.9	75.3	5.5	37.2	33.0	2.4	29.5	26.2	1.9
IND	19.3	56.0	5.7	13.9	40.5	4.1	5.2	15.1	1.6
Global	180.7		3.3	136.7		2.5	140.0		2.5

5.2.2 マッチングメカニズムの結果を活用した QCM

QCM が成立するための条件は、(1) **QCM** を提案する国又はグループが存在すること、(2) 自国の目標と他国に要求する目標の設定方法及び追加的削減による利得の分配方法である。

(1) については、**EU** が提案国となりうると考えられる。第 7 章で詳しく見るが、**EU** は過去の気候変動国際交渉において、他の主要排出国の野心的な削減を条件に、自国の目標を引き上げるという提案を実際に行っている。

(2) について、前節では、追加的削減により発生する余剰利得を提案国が一切受け取らないという仮定を置き、余剰利得を受け取る中国とインドとの間では折半するというルールを設定した。このルールは恣意的な設定であり、現実の国際交渉で適用するためには、このルールがすべてのメカニズム参加国にとって受け入れ可能なものとなることが必要となる。しかしながら、

各国の利害に直結する利得分配方法をすべての参加国が納得できうる形に設定することは極めて難しい。すべての参加国が受け入れ可能なルールを模索する必要がある。

一つの可能性として、マッチングメカニズムで定量的に導かれる、最大の削減量を獲得できるケースでの各国の削減量を **QCM** における各国の削減量と設定することが考えられる。このようにすれば、一義的に各国の削減量が決まり、恣意性が排除できる。各国の温室効果ガス削減費用及び便益のデータが存在し、共通認識が得られていれば、マッチングメカニズムの計算が可能となり、それに基づいて上記の **QCM** の目標設定も可能となると考えられる。

5.3 まとめ

本章ではマッチングメカニズムを発展させた QCM を STACO モデルと組み合わせてモデルを構築し、主要排出 6 カ国を対象に計算を行った。その結果、先進国の削減率は 24 から 28% である一方、中国が 26%、インドが 15% とマッチングメカニズムの結果と比較し、大幅に小さくなっていることが分かった。これは、すべての余剰利得を中国とインドで分配するというルールを用いているためである。QCM を成立させるためには、条件付き削減のルールをどのように設定するかが大きな課題となる。これを克服する方法として、マッチングメカニズムにおいて最大の削減量を実現するケースの各国の削減量を QCM における削減量と設定することを提案した。

6 モデルの拡張：排出量取引

6.1 理論的背景

各国とも排出削減対策の実施に伴う経済的コストが野心的な目標設定を妨げる要因となっている。先進国は経済発展に伴って、エネルギー効率を向上させてきた。そのため、温室効果ガスの削減ポテンシャルは少なくなってきており、追加的に 1 t 削減するために必要な費用（限界削減費用）が高くなっていると考えられる。一方、開発途上国はエネルギー効率が低いため、限界削減費用が低く、多くの削減ポテンシャルがあると考えられる。世界全体で効率的に排出削減を進めるためには、できるだけ安い削減ポテンシャルから実現していくことが必要である。これを実現するための政策手段として排出量取引がある (Andries et al, 2009)。排出量取引は、京都議定書の第 17 条にも規定されており、温室効果ガスの削減を補完する京都メカニズム（柔軟性措置）の一つである。また、EU では 2005 年から域内での排出量取引制度を導入している。排出取引の制度を導入すると、削減しやすい国は炭素クレジットを売ることによって利益を得られるので、削減に対するインセンティブが生まれ、より努力して削減しようとする。このように市場原理を生かして環境負荷を低減する手法を経済的手法という。これによって、社会全体としての削減費用が最も少ない形で温室効果ガスを削減できると期待されている。EU の他にも国内での排出量取引は、ニュージーランド、米国東部、カルフォルニア州、東京

都、中国 2 省 5 市などで導入されている。韓国も 2015 年から排出量取引を導入する法律が成立しており、今後世界的に排出量取引が拡大していくことが予想される (IETA, 2013)。

排出量取引をマッチングメカニズムに組み合わせることで、費用効率的に削減目標を達成することが可能となる。排出量取引を組み合わせたマッチングメカニズムは以下の三つのステージから成る (Boadway, 2011)。最初の二つのステージで決定されるマッチング係数と直接削減量から、その国が約束する排出削減量が決定される。第 3 ステージで、国は排出量を競争的に決定される価格で取引する。

排出量取引システムを管轄する中央集権的な世界政府が存在しない場合、排出量取引を伴う三つのステージから成るメカニズムは、第 4 章で述べた排出量取引のない二つのステージから成るメカニズムよりも、より強力な形で国の約束が必要とされる。サブゲーム部分均衡を仮定すると、ステージ 3 からの帰納的手法で本メカニズムは解決される。

ステージ 3 : 排出量取引

ここでは、 i 国の削減約束は $q_i = a_i + b_i \sum_{j \neq i} a_j$ で示され、

排出量の需要は以下の利得を最大化するものとし (p_i ; 排出量取引による削減、 p_c ; 排出量取引の単位価格)、

$$\prod_i = B_i(q_i) - C_i(q_i - p_i) - p_c \cdot p_i \quad (6-1)$$

となる。第 1 の条件は $C'_i(q_i - p_i) = p_c$ 、で解は i 国の排出量取引の需要 $p_i(p_c, q_i)$ ($i, j = 1, \dots, n$ and $i \neq j$) となる。均衡解では、

$$\sum p_i = 0 \quad (6-2)$$

となり、価格はすべての i において、

$$p_c(q_1, \dots, q_n) = C'_i(q_i - p_i) \quad (6-3)$$

となる。

このように、排出量取引の導入により、すべての国の限界削減費用が等しくなる。

また、排出量取引は QCM にも適用することができると考えられるが、その際、QCM のステージ 4 において、上記と同様にメカニズムが遂行されることとなる。

6.2 計算結果

6.2.1 6カ国のケースでの計算結果

前節の排出量取引のステージをマッチングメカニズムのモデルに組み込んで、主要排出国である米、日本、EU、旧ソ連、中国、インドの 6 カ国を対象に定量的な計算を行った。なお、この 6 カ国で世界全体の排出量の約 7 割を占めている。計算の結果、6 カ国の限界削減費用を大幅に削減することが示された (表 6-1)。マッチングメカニズムでは、日本の限界削減費用は 1t 当たり 105 米ドル、EU は 56 米ドルであるが、中国は 8 米ドル、インドは 17 米ドルとなっている。排出量取引により、中国やインドは先進国に排出権を売却することができる。世界全体で考えると、限界削減費用が低い中国やインドで削減することが費用効率的であり、排出量取引の導入により、世界全体の利得は排出量取引がない場合よりも 12% 改善することが分かった。利得増加のほとんどは、日本 (39%)、EU (28%)、中国 (24%) が得ることとなる。

表 6-1 6カ国の場合における限界削減費用の比較

	Singleton	Original STACO	Matching	Matching with ET	QCM	QCM with ET
USA	8	30	32	18	49	19
JPN	6	30	105	18	136	19
EU15	9	30	56	18	83	19
FSU	3	30	22	18	35	19
CHN	2	30	8	18	6	19
IND	2	30	17	18	4	19

(US\$/t)

排出量取引導入による利得の増加は QCM において著しいことが分かる（図 6-1）。QCM では提案国である先進国の利得はメカニズムがない場合と同等にとどまるとした。

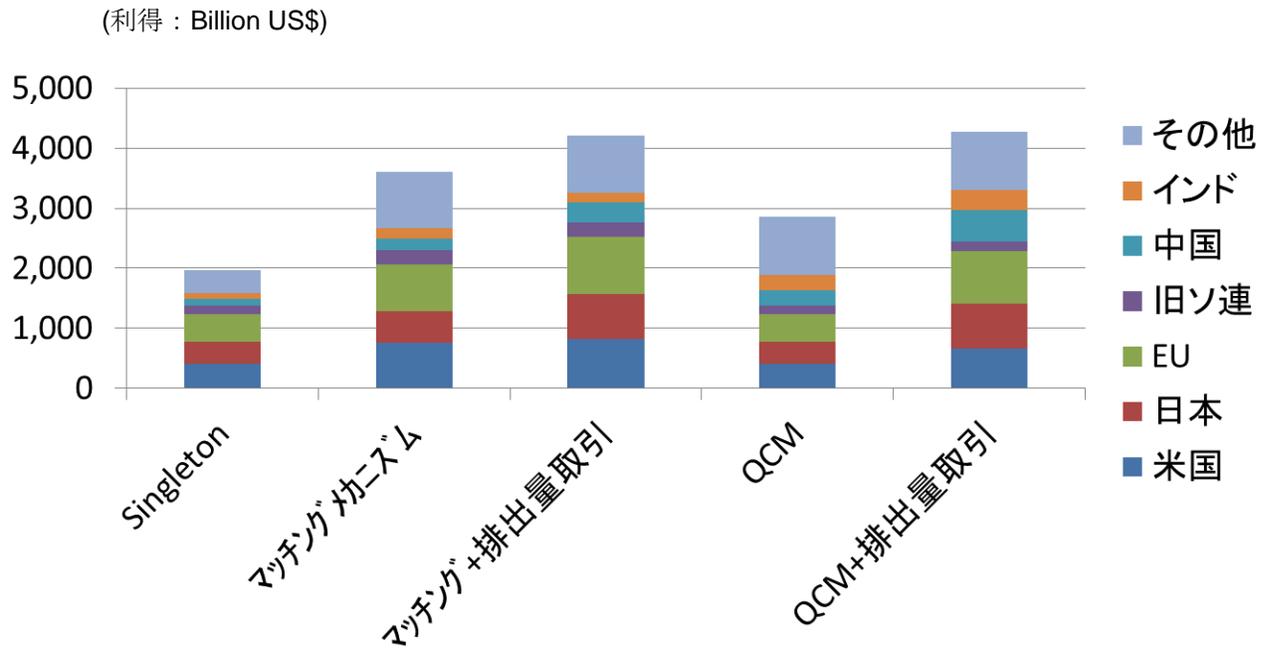


図 6-1 6カ国の場合のマッチングメカニズムと QCM の利得の比較（排出量取引の有無）

このような設定は先進国が率先して対策を取るという気候変動枠組み交渉での考え方を反映できるかもしれないが、先進国のみならず世界全体の利得を大幅に悪化させてしまう。QCMの世界全体の利得は2兆8,540億ドルである一方、排出量取引を用いたQCMでの世界全体の利得は5兆5,150億ドルと排出量取引を用いたマッチングメカニズムとも遜色がなく、排出量取引を導入することにより、利得ロスなく削減が可能となることが分かった。

なお、オリジナルのSTACOモデルの前提条件では参加国の限界削減費用が均等化されてしまうので、排出量取引を実施する余地がない。また、オリジナルのSTACOモデルでは、中国が大幅な削減を行うこととなり、表6-2に示す通り、中国の利得がマイナスになる。そのため、中国に参加のインセンティブはない。オリジナルのSTACOモデルは提携国が提携国全体の限界削減便益と同レベルの限界削減費用まで削減を進めると仮定している。一方、マッチングメカニズムは他の国の削減量に応じて当該国が追加的削減を行うというメカニズムにより、実質的な限界削減費用が下げられるため、メカニズム参加国の削減量が増えるという仕組みになっている。国が提携国といえども、他国の便益を自国の便益と考え、それと等しいレベルまで削減費用を負担するというオリジナルのSTACOモデルの仮定は現実的ではない。また、オリジナルのSTACOモデルでは、中国の利得がマイナスになってしまうという問題を解決する必要がある。利得の再分配の仕組みがなければ、中国が自国の利得が大幅に減少する結果を受け入れるとは考えられない。

表 6-2 オリジナルの STACO、マッチングメカニズム及び QCM の利得の比較（排出量取引の有無）

(billion US\$)

	Singleton	Original STACO	Matching mechanism	Matching mechanism with ET	QCM	QCM with ET
USA	415	1,151	759	815	415	658
JPN	356	1,126	524	757	356	744
EU15	464	1,428	783	950	464	875
OOE	72	236	178	178	183	183
EET	27	88	66	66	68	68
FSU	136	281	238	240	136	173
EEX	62	202	153	153	157	157
CHN	112	-567	194	335	254	512
IND	101	121	164	165	254	339
DAE	52	169	128	128	131	131
BRA	31	101	77	77	79	79
ROW	137	456	344	344	356	356
Global	1,963	4,791	3,607	4,208	2,854	4,276

6.2.2 すべての参加国数毎の組み合わせにおける計算結果

2 カ国から 12 カ国までの最大の削減量を示すケースにおける利得を排出量取引のある場合とない場合で計算した（図 6-2）。排出量取引をマッチングメカニズムに組み込むことにより、それぞれのケースでばらつきはあるものの 9%から 35%の利得が増加することが明らかになった。利得が最大となるケースは 12 カ国、つまりすべての国が参加する場合で、利得の合計が 3 兆 7,250 億米ドルとなる。これは排出量取引がない場合の利得である 2 兆 7,500 億米ドルに比較し、35%向上している。利得の向上割合は、参加国が多ければ多いほど、排出量取引を導入した場合の利得向上の効果は大きくなることが分かった。

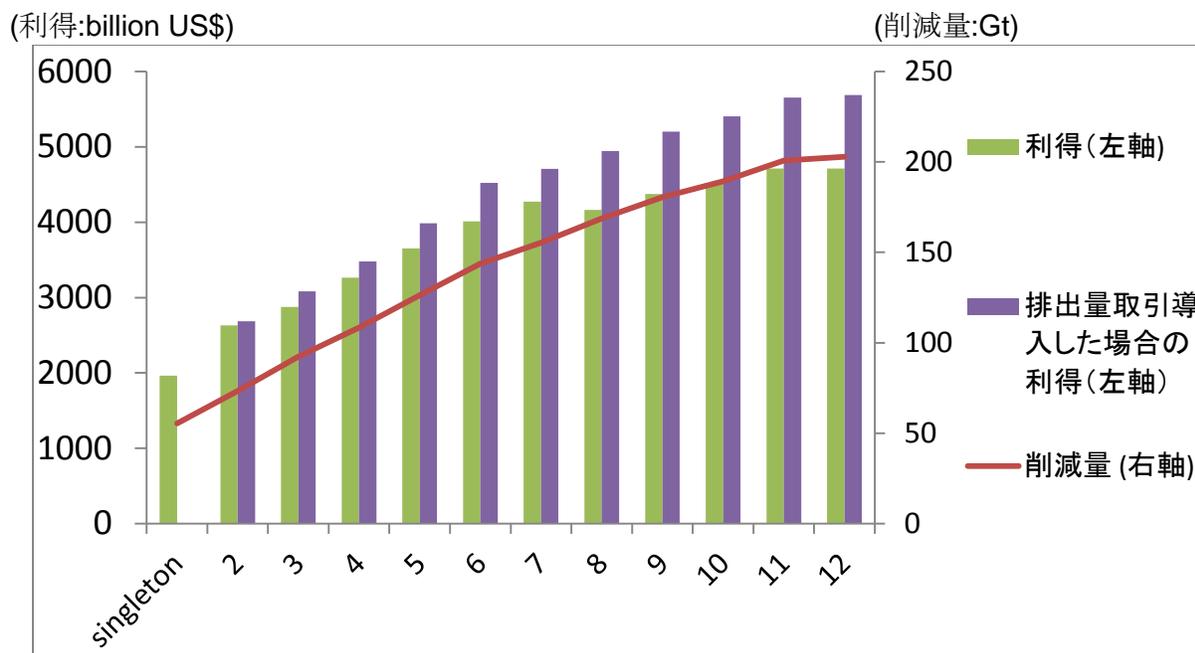


図 6-2 参加国数毎の削減量と利得の比較 (排出量取引の有無)

排出量取引を導入することにより、限界削減費用が平準化され、限界削減費用の高い国での削減が少なくなり、限界削減費用の低い国での削減が多くなるため、利得が大幅に改善する。6カ国・地域の最大削減ケース（米国、EU、旧ソ連、中国、インド、その他）の場合、マッチングでの限界削減費用は米国が 1t 当たり 33 米ドル、EU が 1t 当たり 59 米ドル、中国が 1t 当たり 8 米ドルである（表 6-3）。排出量取引を導入した場合、これらはすべて 1t 当たり 18 米ドルと同じ限界削減費用となる。

表 6-3 6カ国の最大削減ケースにおける 限界削減費用の比較

	USA	EU15	FSU	CHN	IND	ROW
Matching	33	59	23	8	18	24
Matching with ET	18	18	18	18	18	18
Singleton	8	9	3	2	2	3

排出量取引により、中国は限界削減費用が 1 t 当たり 8 米ドルから、18 米ドルになるまで削減が進められ、その分の追加的削減量である 24.2Gt を主に先進国に 4,430 億米ドルで売却する。米国は 10Gt を 1,830 億米ドルで購入し、EU も 10.4Gt を 1,900 億米ドルで中国から購入する（表 6-4）。世界全体で見れば、マッチングメカニズムにより計算される排出量を各国でそのまま削減するよりも、排出量取引を導入して限界削減費用の安い国でより多く削減することが費用効果的であることが分かる。

表 6-4 排出量取引の取引量とそれによる移転される金額

	USA	EU15	FSU	CHN	IND	ROW
Trading Amount (Gt)	10.0	10.4	1.7	-24.2	-0.1	2.1
Payment for the Trading (Billion US\$)	183	190	32	-443	-1	39

表 6-5 はすべての参加国の組み合わせについて、排出量取引による取引量をまとめたものである。どのケースでも、中国がほとんどの排出権を供給しており、有志連合への参加国が増えれば増えるほど、一貫して中国の供給量も多くなっている。また、米国と EU ではほぼ同量を購入しており、中国の供給量のほとんどをカバーしていることが分かる。ただし、日本が有志連合に加わる 8 カ国以上の場合は、日本が米国、EU に次いで多く買い取るため、2 カ国のケースから一貫して増えている米国、EU の買い取り量が 8 カ国のケースで若干減少を示している。インドの限界削減費用は、本モデルにおいて、中国よりも高く設定されていることから、余剰削減量をあまり売却することができないという結果になっている。本論文での限界削減費用は STACO モデルの設定した値を使用している。インドの実際の限界削減費用は STACO モデルの仮定よりも小さい可能性も考えられ、さらなる精緻化に向けた研究が求められる。

表 6-5 参加国数毎の最大削減ケースにおける各国の排出量取引量

(Gt)

	USA	CHN	EU15	IND	ROW	FSU	EEX	JPN	OOE	EET	DAE	BRA
Emissions in 2010	1.76	1.13	0.94	0.34	0.64	0.77	0.47	0.34	0.36	0.23	0.32	0.12
Singleton	16.2	15.5	6.6	3.4	3.7	5.0	0.8	0.8	1.9	0.9	0.5	0.02
2	9.7	-9.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	8.8	-17.5	8.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	9.5	-19.2	9.4	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
5	9.6	-22.1	9.9	0.0	2.6	-	-	-	-	-	-	-
6	10.0	-24.2	10.4	-0.1	2.1	1.7	-	-	-	-	-	-
7	10.3	-25.1	10.7	-0.1	2.2	1.8	0.3	-	-	-	-	-
8	9.5	-28.8	10.5	-0.7	1.7	1.3	-0.1	6.5	-	-	-	-
9	9.3	-28.9	10.6	-0.9	1.6	1.3	-0.2	6.6	0.6	-	-	-
10	10.2	-29.8	11.1	-0.6	1.9	1.5	-0.1	6.8	0.7	-1.8	-	-
11	10.4	-30.3	11.3	-0.6	2.0	1.6	-0.1	7.0	0.7	-1.8	0.0	-
12	10.3	-30.8	11.3	-0.7	1.9	1.5	-0.1	7.0	0.7	-1.8	-0.1	0.8

次に、各ケースでの各国の限界削減費用を表 6-6 にまとめた。メカニズムがない場合（All Singleton）ではいずれの国も一桁であるが、マッチングメカニズムにより削減量が大きくなるにつれて、ほぼ一貫して増加することが分かる。特に、米国、EU 及び日本といった先進国での限界削減費用が高く、世界のすべての国が参加するケースでは、1 t 当たりの限界削減費用はそれぞれ、42.3 米ドル、72.8 米ドル、136.7 米ドルとなった。

また、排出量取引を導入した場合の限界削減費用は参加国の間で一律に平準化され、2 カ国のケースの 1 t 当たり 5.4 米ドルから一貫して増加し、世界のすべての国が参加するケースでは、1 t 当たり 24.8 米ドルとなることが分かる。

表 6-6 参加国数毎の最大削減ケースにおける各国の限界削減費用

(US\$/t)

	USA	CHN	EU 15	IND	RO W	FSU	EEX	JPN	OOE	EET	DAE	BRA	ET
Single ton	8.5	2.3	8.8	1.9	2.5	2.5	1.1	6.5	1.3	0.5	0.9	0.6	-
2	17.2	4.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.4
3	22.3	5.8	39.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.7
4	25.8	6.7	45.9	14.2	-	-	-	-	-	-	-	-	13.6
5	29.5	7.6	52.4	16.2	23.0	-	-	-	-	-	-	-	16.1
6	33.1	8.4	58.6	18.1	24.2	23.2	-	-	-	-	-	-	18.3
7	35.1	8.9	62.1	19.2	25.7	24.6	20.4	-	-	-	-	-	19.4
8	37.1	9.3	65.6	20.3	27.1	26.1	21.5	121.2	-	-	-	-	21.9
9	39.1	10.2	69.3	21.4	28.6	27.6	22.6	127.5	27.1	-	-	-	23.8
10	40.4	10.0	71.3	22.0	29.5	28.4	23.3	130.9	27.9	14.7	-	-	23.5
11	42.0	10.5	74.3	22.9	30.7	29.7	24.2	135.9	29.1	15.3	24.4	-	24.5
12	42.3	10.6	74.8	23.0	30.9	29.9	24.3	136.7	29.3	15.4	24.6	87.9	24.8

6.3 まとめ

本分析の結果から、排出量取引が各国及び世界全体の利得の向上に効果的であることが分かった。排出量取引を導入しない場合、**QCM** では先進国が大きな削減費用負担を強いられ、利得が大幅に減じられる。排出量取引を導入すると、限界削減費用の各国間の差が **win-win** の関係を生み出すことが分かった。つまり、開発途上国は限界削減費用が低いため、より多くの削減を少ない費用で実施することが可能である。先進国は、自国の限界削減費用が高いため、自国で削減するよりも、開発途上国での安い費用で行われた排出削減量を買取る方が遥かに少ない費用で済む。さらにその結果、先進国から開発途上国へ資金の流れができる。開発途上国

は経済発展の途上にあるため、CO₂の排出削減に多くの資金を振り分けることが難しく、先進国からの資金流入は排出削減への強い誘因となると考えられる。

7 国際交渉においてマッチング削減約束 アプローチを適用するための提案

以上のモデル分析の結果、マッチング削減約束アプローチによって、最大 3.7 倍の削減目標への合意を可能にすることが分かった。本章においては、モデル分析の結果を踏まえ、マッチング削減約束アプローチを現実の気候変動国際交渉に適用させるための提案を行う。さらに、国際交渉の実態を踏まえて、その提案の実現可能性について評価を行う。最後に、上記提案を実行するためのプロセスを提案する。

7.1 モデル分析の結果を踏まえたメカニズム提案

マッチングメカニズムは、そのルールにさえ参加国が合意すれば、自動的にパレート最適な状態に到達できるという優れたメカニズムである。本論文のモデル計算によれば、2020 年におけるすべての国が協力するケースでは、米国が 8%から 20%、日本が 2%から 26%、EU が 6%から 22%、中国が 10%から 30%と各国が削減レベルを大幅に上積みしている（表 7-1）。

表 7-1 2020 年における各国の削減割合の比較

国	排出量（2020年）(Mt)	Singleton の場合		全ての国が協力する場合	
		削減量(Mt)	削減割合(%)	削減量(Mt)	削減割合(%)
USA	2,038	162	8.0	405	19.9
JPN	376	8	2.1	96	25.6
EU15	1,083	66	6.1	239	22.1
OOE	428	19	4.5	91	21.2
EET	269	9	3.4	64	23.8
FSU	935	50	5.3	173	18.5
EEX	552	8	1.4	94	17.0
CHN	1,485	155	10.4	445	30.0
IND	462	34	7.3	164	35.6
DAE	361	5	1.5	77	21.4
BRA	145	2	0.1	13	8.9
ROW	766	37	4.9	167	21.8
世界全体	8,901	553	6.2	2,027	22.8

一方、マッチングメカニズムの欠点は、各国に対して、それぞれ固有のマッチング係数を設定しなければならない点にある。6カ国の場合、各々の国が他の5カ国についてのマッチング係数をそれぞれ決めることになる。また、もう一つの欠点として、マッチングメカニズムではメカニズムを実施した後にならないと各国の削減量が判明しないという点が挙げられる。削減量は産業や国民生活に大きく影響を与えると認識されていることから、メカニズム実施前に結果的にどのくらい削減するかについての情報なしに、複数のマッチング係数のみについて、産業界や国民の合意を取り付けるのは容易ではない。

QCM はマッチングメカニズムと異なり、マッチング係数を多数設定する必要もなければ、削減量も予め明らかになっている。そのため、各国が国際交渉の前に削減量を国内で決定しておくことが可能となるため、より現実的であると考えられる。さらには、すべての国ではなく、一部の国のみが条件付削減を約束するという QCM の前提は、すべての国がルールに合意する必要のあるマッチングメカニズムよりも現実に適用が容易である。現実の気候変動国際交渉でも、条件付戦略を提示しているのは一部の先進国のみである。

QCM の難しさは、自国や他国の条件付き削減量をどのような方法で決定するかという点にある。第 5 章では、削減条件として、先進国はメカニズムがない場合 (Singleton) と同等の利得しか得られず、余剰利得はすべて中国とインドで均等に分配されるという前提から求めたが、これは途上国に有利な設定であるため、先進国が提案する条件としては厳しい。各国の衡平な削減量を設定するための方法論として、過去の排出責任、1 人当たりの排出量均等化、1 人当たり GDP や削減ポテンシャル等様々な指標を用いた方法が提案されている (IPCC, 2007b)。また、豪州はより多くの国が合意できうる指標として、1 人当たり排出量を 2050 年に均等化することを提案した。このように、数多くの指標が提案されているが、すべての国が合意する指標は未だに存在していない。

以上の考察より、本モデル計算の結果を踏まえると、各国の排出削減の野心を引き上げるメカニズムとして、マッチングメカニズムで算出される削減量を QCM の条件付き削減量として設定し、先進国から開発途上国に提案するという方法が考えられる。これにより、世界全体の削減量を最適化することが可能となる。各国の削減費用と便益が共通認識として得られていれば、その数値を用いて、マッチングメカニズムを用いて各国の条件付き削減量を算出することができる。さらに、排出量取引を導入することにより、中国など限界削減費用の低い開発途上国で追加的な排出削減が行われ、それを先進国が購入し、対価として支払われることになる。このメカニズムを通じて世界全体の削減が費用効率的に行われることとなる。

7.2 国際交渉の実態を踏まえた実現可能性の評価

前節では、モデル分析の結果を踏まえて、気候変動国際交渉に QCM のメカニズムを用い、マッチングメカニズムで算出される削減量を各国の削減量と設定することを提案した。本節では、この提案を国際交渉の実態と照らし合わせて評価し、その実現可能性を検討する。

7.2.1 QCMの提案者の存在

QCM は提案者の存在を前提に、各国の排出削減目標の引き上げを可能とするメカニズムである。そのため、現実の国際交渉に QCM を適用するためには、提案者となりうる国の存在が必要となる。気候変動国際交渉においては、EU が提案者となりうると考えられる。EU は条約の締結時から、先進国全体の野心的な削減目標を提案するとともに、EU としても野心的な削減目標を設定してきた。1997 年の京都での気候変動枠組条約第三回締約国会議（COP3）の前に、EU はいち早く先進国の一律 15%削減（1990 年比）を提案した。日本は実質 3%、米国は 0%を提案していたため、EU の高い削減提案がなければ、最終的な削減率はもっと低いものになっていたと考えられる。さらに、2013 年以降の枠組みに関する交渉において、EU は自主的に 20% 削減し、主要排出国が同等の削減を行えば 30% 削減すると表明した。気候変動国際交渉のゲームにおいて、EU はただ乗りではなく、自ら率先して削減に協力することを選び取ってきたと言える。そのような選択をしてきた要因としては、(1) EU は削減費用が他の先進国より比較的安く、気候変動に率先して対応することで先行者利益を狙っていること、(2) 超国家機

構のため地球公共財の削減に取り組む素地が高いこと、(3) 市民の意識が高く政治的に積極的な策をとりやすいことが挙げられる (蟹江、2001)。

マッチング削減約束アプローチは、現在多くの先進国が UNFCCC の下で提案している条件付戦略と類似している。コペンハーゲン COP の前後で多くの国が 2020 年の削減目標値を表明したが、その約半分の国の目標は条件付きであった。最も早く条件付き目標に言及したのは EU であり、コペンハーゲン COP のおよそ 3 年前の 2007 年 1 月に欧州委員会が提案し、2008 年 12 月に正式に決定した (IVL, 2012)。その内容は 2020 年までに無条件に 1990 年比 20% 削減し、他の先進国が同等の削減を実施し、開発途上国もそれぞれの責任と能力に応じて相応の貢献を行えば 30% に引き上げるというものであった。EU の条件付き削減目標の発表を受けて、その後多くの国が条件付き目標を採用した。

豪州政府はモデル分析を 1 年半かけて実施し、ガルノー報告 (Garnaut, 2008) をまとめ、それを基にして条件付削減目標を 2009 年 5 月に提案した。豪州は、2020 年までに無条件に 2000 年比 5%削減し、主要開発途上国が大幅な排出抑制し、先進国が豪州と同程度の削減を行う場合 15%、さらに大気中の温室効果ガス濃度を 450ppm 以下に抑えることができる野心的なレベルで合意ができれば 25%削減するとした。なお、ガルノー報告では、ゲーム理論の考え方を前提に条件付戦略を意図的に設定している。

その他に条件付き削減を採用した国は以下のとおりである (Climate Action Tracker, 2013)。アイスランドは、2009 年 5 月に主要排出国の相応の排出削減を条件に 30%削減を発表した。ニュージーランドは 2009 年 8 月に 2°C 目標達成に合意し、主要排出国が相応の排出削減を行い、土地利用変化と森林に関する有効なルールが決められ、効率的な国際炭素市場が創出されることを条件に 1990 年比 10-20% 削減すると発表した。スイスは、2009 年 8 月に EU と同じ条件で 20% から 30% に目標を引き上げると宣言した。日本は 2009 年 9 月の国連総会での演説で、政権交代間もない民主党の鳩山首相が、すべての主要国による衡平かつ実効性のある国際的枠

組みの構築及び意欲的な目標の合意を条件に 1990 年比 25%削減を発表した。ノルウェーは 2009 年 10 月に主要排出国が 2°C目標に整合性のある排出削減に合意すれば 1990 年比で 40%削減することを発表した。ロシアは 2009 年 11 月にすべての主要排出国が法的拘束力のある削減義務に合意し、ロシアの森林吸収が適切に評価されるならば、1990 年比 15-25% 削減すると宣言した。

このように EU の条件付き戦略が契機となって、各国の対応が変わり、多くの先進国が条件付き戦略を採用するようになったということが、現実の事例から考察される。条件付き戦略が多くの国で採用されたという事実は、マッチング削減約束アプローチが不完全な形であるものの現実の国際交渉で使われており、本論文で提案しているメカニズムの実現可能性が高いことを示している。

7.2.2 国内制約：国際競争力への悪影響の懸念

気候変動国際交渉において各国が表明する削減目標は国内制約による影響を大きく受けると考えられる。理論的にも、国際交渉を国内政治と国際政治の二つのレベルで行われるゲームとして捉える考え方が Putnam により提案されている。Putnam (1988) は、各国の国際交渉のスタンスが国内で承認可能な領域 (win-set) に制約されるため、win-set が小さいほど、国際合意の余地は小さくなることを示した。本節では、京都議定書及び現在の気候変動国際交渉において日本及び主要国の国際交渉スタンスと国内制約との関係について考察し、その観点から本論文の提案するメカニズムが国際交渉で適用が可能かどうか検討する。

(a) 京都議定書における国内制約

京都会議の前に、EU はいち早く先進国の一律 15% 削減 (1990 年比) を提案したが、EU 内では 10% 削減までしか合意できておらず、日米が 10% を超えた合意に賛同はしないとの見解があった。京都会合の直前になって、日本は 5% を基本とするが、各国の事情に応じて軽減できる仕組みを設け、先進国平均でみると 3%弱の削減率となる提案を行った。日本は省エネルギーが進んでいるので、他の先進国よりも削減負担は小さくてよいとの考えで、2.5%の削減を打ち出した。米政府はその直後に先進国一律 0% を提案した。最終的には、京都会議の最終日に、日米 EU の 3 カ国の密室交渉で数値が決定された。米国はゴア副大統領 (当時) が急遽来日し、数値交渉において柔軟性を示した。日本は米国が米提案である 0% 削減からせいぜい 2-3%しか動かないと予測していた。しかし、米国は、中国などの開発途上国の参加がない場合、上院の承認が得られないことが分かっていたにもかかわらず、最終的に 7% 削減に合意した。EU が 1% ずつしか各国間の削減率に差異を認めなかったことや議長国として合意をまとめる必要があったため、日本も 6% 削減を受け入れた。その結果、EU 8%、米 7%、日 6%というそれぞれの削減幅で合意に至った (竹内, 1998)。数値は当初の EU 提案と日米の提案の中間程度だが、森林吸収源を加えること、6 種類のガス全体での目標としたこと、排出量取引や開発途上国の削減を先進国の削減とカウントするクリーン開発メカニズム (CDM) 制度を認めたことなどのルールの設定により削減目標数値が見かけ上大きくなった。その結果、内容的には各国とも自国が提案した値とほぼ変わらない値であった。つまり、各国の国内の win-set がうまく交差するように、ルール設定の変更を行って見かけの数値を変化させたと言える。交渉後、EU は 6 ガスでの 8% は当初考えていた 3 ガスでの 13%に相当し、当初提案とほぼ同じであることを明らかにした (蟹江, 2001)。日本の数値も 2001 年の交渉において吸収源で 3.8% の削減を特例的に認められたことで、もともとの日本の提案 2.5% 削減という数値と変わらない値

となった。これは、米国の離脱表明後、日本に批准させることが議定書発効のために必要となり、他国が大幅に譲歩したために認められたものであった。また、米国も国内での説明において、様々なルールの変更の結果、自国提案の 0% に比べ、2-3% の削減に相当するに過ぎないとの見解を示していた（竹内，1998）。ただし、米国は条約の批准権を持つ上院において、開発途上国の削減義務なしに京都議定書を批准しないと決議（バード・ヘーゲル決議）が京都国会の直前に全会一致で採択されており、京都議定書では開発途上国の削減義務が見送られたことから、結局批准しなかった。先進国の数値目標とは別の部分で国内制約があったと言えるが、開発途上国の削減義務についてはベルリンマンデートで新たに課さないことで既に決着がついていたため、京都会議で議論することは困難であった。しかしながら、国際競争力への影響に対する懸念から、米国は主要開発途上国にも削減レベルは異なるにせよ、米国と同じ種類の削減義務を負うことが必要と考えていた。なお、その他の先進国の数値については、時間的制約もあり、ほとんど精査されることなく、各国が困難なく受け入れられるレベルで合意された。

このように、京都議定書交渉において、国内制約が非常に大きな要因となり、結果的に各国の削減数値は各国が国内で事前に調整して決められた数値とほとんど変わらないように、ルール設定の変更で対応したことが分かる。つまり、マッチングメカニズムのようにメカニズムがスタートした後でないと、合意する削減目標が明らかにならないような形では、各国が事前に国内の調整を行うことができず、国際交渉で合意することは難しい。したがって、2 レベルゲームの考え方からすると、QCM のように事前に提案する内容が定まっているアプローチが優れていると考えられる。

(b) 2013年以降の枠組み交渉における国内制約

京都議定書は条約に規定された先進国の排出を 2000 年に安定化するという目標が達成できなかったため、法的拘束力のある義務を先進国に課す枠組みの構築を目的とした交渉であった。そのため、交渉ゲームのプレイヤーは先進国、とりわけ排出量の多い日米 EU の 3 極が中心であった。しかしながら、現在行われている 2013 年以降の枠組み交渉では先進国のさらなる排出削減目標に加え、京都議定書で先送りされた開発途上国の参加問題も主要な議題となり、中国やインドなどの排出量の多い開発途上国も主要プレイヤーとなった。また、京都議定書では議論されていなかった、条約の究極目標を達成するために、世界全体の中長期的な排出削減目標とそれを実現するための枠組みづくりも新たに議論の対象となった。コペンハーゲン協定とそれに続くカンクン合意において、主要国のほとんどが自国の 2020 年削減目標を自主的に登録している。本論文提出時期において、未だ交渉中で最終的な合意に至っていないため、結果を分析できないが、これまでの交渉を見ると、京都議定書と同じ構造であり、各国とも国内で決定した削減目標を堅持している。

日本は京都議定書の際と同様、エネルギー効率の良さから欧米よりも小さい削減率でよいとの考えを持っていたが、京都議定書目標の 6% より大きい削減とすることは必要と考え、2009 年 6 月に 2005 年比で 15% 削減（1990 年比で 8% 削減）を提案した。この数値は、国際競争力への影響への懸念に配慮し、限界削減費用を指標に欧米の目標と同レベルになるよう導いた値である。ただし、これは純粋に国内削減の数値であり、国際交渉の行方により、国外からクレジットとして購入する部分を上積みする余地は示唆していた。しかし、2009 年 8 月の政権交代により、新たな民主党政権は NGO などが主張する 1990 年比 25% の削減を政権発足後すぐに提案した。国連総会での首相の発表は国内外から評価されたが、裏打ちする政策やその実現性に関する国内での議論は十分に行われていなかった。また、25% 目標は主要排出国の参加が

条件とされているものの、何をもって参加したとするかの具体的な考えは示されていなかった。なお、2013年のワルシャワでのCOP19で、日本政府は25%目標に代わる新たな目標を発表した。新目標は2020年に2005年比で3.8%減であり、この目標は2011年の福島の原子力発電所の事故を受けて、原子力発電の割合をゼロとする前提で算出されたものである。

米国は削減費用や米国経済への悪影響を懸念し、ブッシュ政権下において、京都議定書への不参加を表明した。ハリケーンカトリーナでの甚大な被害や映画「不都合な真実」のキャンペーンなどにより、米国市民も気候変動によるリスクに対する認識が高まった。そのような状況下で、国際協調路線のオバマ政権になって、国際交渉に積極的に関与する姿勢に変わり、2050年に2005年比83%削減する経路を示した法案の成立を目指した。2020年目標については現在の排出量が1990年よりも十数%増大していることから、オバマ政権にあっても1990年比3%という小さい削減率しか提示できなかった。また、国際交渉において、自国での法案が設定しているレベル以上に引き上げることを否定している。それでも、米国はブッシュ政権下よりかなり積極的になったことから、国際社会から歓迎された。さらに、2012年にオバマ大統領は再選を果たし、就任演説でも気候変動問題の重要性とそれに取り組む意欲を示した。ただし、経済問題など他の課題の陰に隠れてしまい、現時点では上記の法案が早期に成立する見込みはほとんどない。米国では、国会議員が化石燃料産業からの献金を多く受け、削減対策に反対している。気候変動問題の登録ロビイストの数は3000人近くおり、その9割程度が化石燃料産業のために働いている。そのため、米国では強力な気候変動対策の実施が難しいと言われている(Repetto, 2011)。このような状況から、オバマ大統領は2013年6月25日の演説において、石炭火力発電所からのCO₂排出規制の強化等を含む新たな計画を発表した。これは、成立の見込みの薄い法案に頼った対応ではなく、行政のみで実施可能な施策を打ち出したものと考えられている。

京都議定書は国際的な取り組みの第一歩との位置づけであったため、その交渉の際には、条約の究極目的を達成するために必要な削減量について議論は及ばず、先進国全体目標レベルについても明確な指標はなかった。一方、現在の交渉では、世界全体の必要削減量の議論が行われ、コペンハーゲン協定では産業革命以降の気温の上昇幅を 2°C未満に抑えることが合意された。Climate Analytics et al (2011) の試算によれば、各国が提示した 2020 年削減目標の合計は 1990 年比 12-17%減 で、2°Cを達成するために必要と NGO や開発途上国などが主張している 25-40% 減との間に大きなギャップが存在することが示された。京都議定書交渉時には考える必要がなかったが、現在の交渉では先進国の削減目標をどのように引き上げ、このギャップを埋めて行くかということが一つの主要な議題となっている。そのため、各国の国内制約を前提にしつつ、削減目標の引き上げを促すようなアプローチを見出すことが求められる。QCM は各国の国際競争力への影響の懸念に対応しつつ、削減目標を引き上げるメカニズムとして有望である。また、予め自国の削減目標が明らかになっていることから、国内での合意を事前に取り付けることができる。

(c) まとめ

条件付戦略は国内制約を考慮した優れたメカニズムだと考えられる。上記で見たように、国際交渉では国内での制約のため、政府が自由に交渉ポジションを変えることができない。国際交渉のプレイヤーは国であるが、それぞれの国内でのコンセンサスに基づいて、その取りうる戦略は限定される。国内での制約に国際交渉が縛られるさまは、京都議定書の際の日米 EU 間での数値交渉や米国のバード・ヘーゲル決議と京都不参加にも見られた。国際交渉では、国際競争力への影響を懸念し、他国に比べて衡平でない削減レベルを課せられることに対する強い不信感が高いレベルでの削減目標の合意の障害となっている。また、2 レベルゲームが示すよ

うに各国のポジションは国内での **win-set** に制約を受けるため、国際交渉で大幅な削減に合意するためには、**win-set** をそのレベルまで拡大することが必要になってくる。そうでなければ、京都議定書の際の交渉で見たように、中身は変わらずに見掛けの数値が変わるだけである。国内での **win-set** を広げるためには、大幅削減の便益の認識向上は重要である。さらに、国際競争力への懸念に対応する手法として、EU や豪州が提案したような条件付戦略が有効と考えられる。特に、豪州は世界全体の大幅削減の便益を考慮すると同時に、国際競争力への懸念に対処することを目的に、世界全体の目指す温室効果ガスの大気中の安定化濃度に応じた自国の削減目標を設定した (Garnaut, 2008)。また、450ppm を目指す合意が望ましいとしながらも、各国が受け入れ可能な現実的なレベルにまず合意することが 2013 年以降の国際的枠組みの第一歩として重要とした。また、各国の削減目標についても、目指すべき安定化濃度のレベルに応じて、衡平で妥当な数値とすることが必要であるとした。つまり、高すぎる目標はその国の国際競争力に影響を生じ、低すぎる目標は国際的な合意形成を妨げる。豪州は、国際交渉における柔軟性を確保することも意図して、目指すべき安定化濃度に応じて、豪州の削減目標を複数置いた。また、万が一合意がない場合でも、先進国の一員として将来の合意の余地を残すために、自国の削減目標を設定するとした。すなわち、450ppm 実現を合意するならば 2000 年比 25%削減、500ppm で 15%削減、自主的に 5%削減とし、EU の目標よりも世界全体での安定化濃度とリンクさせている点でさらに具体的な設定になっている。このような全体の合意のレベルに合わせて自国の削減目標を連動させる条件付戦略を各国が国内で合意することで、国内での **win-set** を大きくし、国際交渉における柔軟性を付与することが有効と考えられる。

条件付戦略により、国際競争力への懸念に対処することが可能となる。UNFCCC の交渉では、各国間の衡平で比較可能な目標が最も論争の大きい問題である。各国は他国よりも衡平でない高い削減目標を負うことで、産業競争力を失うことを強く恐れている。この恐れが、各国が野心的な目標に合意するための大きな障害となっている。

なお、日本を含め多くの国がすべての主要国の参加による意欲的な目標を条件にしているが、意欲的な目標がどのレベルを示すのかは明確ではない。そのため、他国の削減目標を引き上げるインセンティブとして不十分である。また、日本では限界削減費用を衡平性指標としているが、衡平性指標は自国に有利ではなく、他国も納得できるものにしなければ合意には結びつかない。その意味で、**QCM** は国内の制約を受けつつ、世界全体の便益を考慮して、より高い削減目標に合意するためのメカニズムとして有望なものと考えられる。

7.2.3 排出削減の費用便益の認識

マッチング削減約束アプローチでは、各国が削減対策の費用と削減によって避けられる気候変動の影響という便益を正確に知っており、それを基に削減するかしないか合理的に判断することを前提としている。そのため、本論文で提案したメカニズムが現実の国際交渉に採用されるか否かは、温室効果ガスの削減費用と避けられる気候変動の便益がどの程度実際に認識されているのかに依存する。本節では、国及び人々がこれをどの程度認識しているかを考察するとともに、国際交渉における費用便益の共通認識を醸成するための活動をレビューし、マッチング削減約束アプローチの適用可能性について検討する。

世界全体の費用便益分析に関しては、スターン報告をはじめ、いくつか試算があるものの、各国毎に分析した研究は少ない。そのため、各国の目標設定の過程を見ても、長期的な気候変動の被害も含めた費用便益分析がなされた例はほとんどない。排出削減の便益は自国の削減努力のみではなく、他国の行動も含めた世界全体の排出削減量に依存するため、不確定要素が大きく、試算に含めることが難しいことがその理由であると考えられる。日本でも 2009 年 6 月に発表された削減目標の検討の際に、便益は判断指標とならず、日本の長期エネルギー需給見

通しに基づいた削減ポテンシャルとその削減費用が検討のベースとなった（内閣官房，2009）。それに加え、EU や米国の目標値との限界削減費用による比較が判断材料とされた。すなわち、削減費用負担の違いが企業の国際競争力に影響を与えるため、他の主要国と比べて不利にならないようにすることが重要な判断指標となった。その結果、2020 年に 2005 年比 15% 削減という目標が決定された。排出削減の便益も判断材料として含めるべきとの主張もあったが、信頼できる定量的な研究結果が存在していなかったために考慮されなかった。

各国が大幅な削減行動をとるためには、それがパレート優位であるとの認識を人々が持つことが必要条件である。その意味で、IPCC 報告書やスターン報告の重要性は非常に高い。人々の認識の変化が、各国のポジションの変化をもたらさう。モントリオール議定書の際には、近い将来の皮膚がんの増加という認識しやすいリスクであったため削減のインセンティブが高く、先進国が削減の便益を多く受けることから、先進国がその削減を主導した (Barrett, 2003)。米国に適用した試算によれば、モントリオール議定書では削減便益が削減費用を大きく上回ったが、京都議定書では大きく下回ることが示されている (Sustein, 2007)。そのため、モントリオール議定書の場合は、囚人のジレンマ状態には陥らず、米国を含めた先進国が自主的に取り組み、開発途上国の削減行動への参加に対してサイドペイメントを支払うこととなった。気候変動問題の場合、気象災害の形で現れ、人が関与しない天災との区別が難しいことから、リスクとして認知されにくいことが先進国での率先した取り組みがなされにくい原因の一つと考えられる。また、削減対策の便益は将来世代が多く裨益するものであることも野心的な削減目標が取られにくい原因であると考えられる。経済分析では、将来の便益は割引率により減じられる。スターン報告では、気候変動のような長期的な環境影響については、非常に低い割引率を設定すべきとしているが、現実には将来世代は影響力を行使できないことから、将来の便益は低く見積もられる傾向にある。

一方、気候変動対策の便益には、避けられた長期的な悪影響のほかに、削減対策がもたらす副次的便益（コベネフィット）が存在する。エネルギー効率の向上は、エネルギーの節約による経済的便益のほか、地政学的リスクのある輸入化石燃料への依存を減らせるエネルギー安全保障上の便益もある。国立環境研究所の試算によると、2020年における世界の削減ポテンシャルの半分近くはコストがかからないか経済的にプラスの効果があるとされている (Hanaoka et al, 2009)。再生可能エネルギーにも同様の副次的便益がある。現状ではコストは高いものの、技術開発による将来のコスト削減も見越せる。加えて、大気汚染削減の効果もある。さらに、近年では、グリーン成長という、エネルギー効率向上や再生可能エネルギーへの投資が経済成長や雇用増大に寄与するという考え方が広まり、米国・韓国・中国・日本などが次々と関連する政策を発表した (OECD, 2011)。米国はエネルギー安全保障上の効果や経済へのプラスの影響を強調しつつ、気候変動対策を進めている。例えば、2013年6月に発電所からの排出規制を発表した際にも、オバマ大統領は国産エネルギーの増加や気候変動対策がもたらす商機を強調した (White House, 2013)。このような便益は現有世代が享受できるものであるため、将来の気候変動回避の便益に比べ世論の支持が得やすいと考えられる。

このように、便益については、主に将来世代が享受する避けられた気候変動の悪影響による便益と、現有世代が享受するコベネフィットの便益があるが、前者の便益は各国の目標設定の議論において十分に考慮されておらず、高い削減レベルに合意するための必要条件が現時点では満たされていないと考えられる。

以上、削減目標の検討に当たっての各国における費用便益の認識について考察した。次に、国際交渉における費用便益の共通認識を醸成するための活動についてレビューし、マッチング削減約束アプローチの適用可能性について検討する。各国の限界削減費用については、様々なモデルを統合して、一致した数値を導き出そうという国際的な取り組みが行われた (Amann et al, 2009)。本取組に参加したモデルは、International Institute for Applied Systems Analysis

(IIASA) の GAINS モデル、国立環境研究所の AIM モデル、地球環境産業技術研究機構の DNE+21 モデル、オーストラリアの GTEM/MMRF モデル、オランダ PBL の IMAGE モデル、McKinsey のモデル、OECD の ENV LINKAGES モデル、EU の JRC-IPTS の POLES モデルである。経済成長率等のモデルの前提条件をできるだけ揃え、削減対策メニューもすり合わせるとともに、基準年の排出量からモデルをキャリブレーションすることによって、モデル間の整合性を取ろうと試みられた。その結果、消費者の需要の変化やマクロ経済的フィードバック機能のあるモデルでは、附属書 I 国全体で 2020 年に 2005 年比で 40% (1990 年比だと 45%) の削減ポテンシャルが 1t 当たり 50-150 米ドルで実現可能であるが、ボトムアップ型のモデルでは削減ポテンシャルが上記の半分程度となることが分かった。これらのモデル計算結果は気候変動国際交渉においてもセミナー等で説明が行われ、交渉担当者間でも議論が行われた。これらの結果は気候変動の国際交渉で各国の目標を設定するためのベースとして取り上げられるまでには至っていないものの、研究者間では一定程度の共通認識は存在していると言える。一方、気候変動の国際交渉においては、どの国もそれぞれの国の様々な特別な事情のため、大幅な削減は困難で、限界削減費用が提示された数値よりも現実には高いと主張する傾向にある。例えば、EU や豪州は計算して各国の削減すべき水準を示したが、他国の反発を予測して、参考値という形でしか示さずに、積極的にその値にすべきと明確に言及しなかった (EC, 2009; Garnaut, 2008)。今後、各国が受け入れられることが可能な水準についての共通認識を醸成していくことが求められる。

便益の分析については様々な不確実性のため、費用予測よりも遥かに難しい。削減費用と異なり、定量的な結果を出しているモデルはいまだ少なく、上記のような共通認識を醸成するための活動はこれからである。研究はまだ初期の段階で、気候変動回避による便益は人々に十分認識されていない。しかしながら、このような研究の必要性についての認識は広がりつつあり、研究が活発になってきている。日本においても、2009 年に環境省地球環境研究総合推進費の戦

略的研究「S-4 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」の成果として、初めて日本における気候変動影響の貨幣的な損失コストが発表された。S4 研究の結果によると、追加的な排出削減対策が行われない場合、今世紀末には年間約 17 兆円の損失があることが分かった（文部科学省・気象庁・環境省、2009）。便益は気候変動の回避された影響を貨幣価値に置き換えたものとしているが、気候変動の影響がいつどこにどの程度現れるかを予測することは非常に困難である。海面上昇の影響は比較的確度が高いと言われているが、それでも IPCC 第 5 次評価報告書の 2100 年の予測も 26-82cm と大きな幅がある (IPCC, 2013)。2100 年の平均気温の予測の幅は 0.3°C から 4.8°C である。降水量の予測はさらに難しく、モデル間で大きな幅があり、定量的把握は非常に難しい。そのため、その結果として起こりうる、洪水や干ばつといった被害がどの程度増えるのかを予測することも非常に困難である。さらに、気候変動の影響は遠い将来に顕著となるため、便益は長期的に考える必要がある。遠い将来の便益を現在価値にどう置き換えるかという割引率についても経済学者の間で大きな論争となっている。このような温室効果ガスの累積による気候変動による影響に関する研究は IPCC が主導しており、定量化のためにはさらに一層の努力が求められる。

本論文で提案したメカニズムが各国で採用されるためには、最新の知見を取り入れ、費用便益のデータのさらなる精緻化が求められる。各国の政策担当者が設定された数値が現実的でないと判断した場合には、そのような提案を真剣に取り上げようとはしないだろう。各国に採用されるためには、現実的な数値を使っていると認識されることが必要となる。その意味で、日本が中心となって設立した低炭素社会研究ネットワークでの中長期の低炭素社会のモデル分析 (NIES, 2011) や ADB でのスターン報告の地域版の研究や東南アジア諸国に対するモデル構築の技術支援 (ADB, 2010) は重要である。

なお、本分析から、**Business as Usual (BaU)** からの削減量で検討することの重要性が示唆される。特定年（例えば 1990 年など）からの削減率では、削減目標の費用便益を正しく認識することはできない。**BaU** は予測であるため、不確実性を伴う。しかしながら、将来の目標を費用効果的に決定するという行為自体に将来の不確実性は内包されているため、これを避けることはできないとも言える。

7.3 まとめ

本章では、**QCM** のメカニズムを用い、マッチングメカニズムで算出される削減量を各国の削減量と設定することを提案した。次に、その提案を国際交渉の実態に照らし合わせて評価を行った。その結果、**EU** をはじめとした先進国が **QCM** の提案者となりうること、本メカニズムが野心的な目標設定の阻害要因である国際競争力への悪影響の懸念を克服しうることが分かった。一方、本メカニズムを適用するためには、各国がメカニズムに参加するすべての国の費用便益の情報を共有していることが前提となるが、現段階ではそれらに対する各国の共通認識は得られていない。しかしながら、ベースとなりうる研究は進められており、これらを発展させて、各国間の費用便益に関する共通認識を醸成することが本メカニズムの実現のためには必要であることを示した。

なお、マッチングメカニズムの計算結果によれば、中国の削減率は **30%** と主要な先進国の削減率を上回る数値となっている。国際交渉では先進国の歴史的な排出責任から先進国が率先して排出削減することが求められているため、中国は先進国より高い削減目標を受け入れるためには、なんらかのインセンティブが必要と考えられる。排出量取引導入による先進国からの資金流入は高い削減目標合意を後押ししうると考えられる。

7.4 国際交渉への適用に際して具体的なプロセスの提案

前節までに QCM を用いた条件付き戦略のメカニズムが、各国の削減目標を引き上げるメカニズムとして優れていることを示した。本節においては、本提案を現実の気候変動国際交渉に適用するに当たって、具体的にどのようなプロセスが適切かについて検討する。

気候変動交渉は国際連合の枠組みで行われていることから、UNFCCC での交渉の場に本メカニズムを適用することがまず考えられる。しかしながら、UNFCCC での国際交渉には 200 カ国近くが参加している。これまで見てきたように、国際交渉のレビューやゲーム理論を活用した国際交渉の既往研究から、国の数が増えるにしたがって合意を得ることが難しくなることが分かっている。

そのため、より少ない国のグループにおいて、本メカニズムを適用し合意を得た上で、そのグループでの合意内容を UNFCCC にフィードバックして、すべての参加国の合意を得るというプロセスがより現実的で実現可能性が高いと考えられる。実際にコペンハーゲン協定を合意した際も、G20 とほぼ同じ参加国の首脳が集まって直接交渉をした上で合意を取り付けた。その際、COP15 において UNFCCC 参加国での合意とすることを試みたが、それは果たせず、翌年のカンクンでの COP16 においてようやくコペンハーゲン協定の内容について合意することができた。また、G20 諸国で世界全体の 8 割の排出量を占めていることから、G20 で野心的な排出削減目標に合意ができれば実質的な排出削減の効果としては十分意味があると言える。

このように、スモールグループでまず合意を得て、世界全体での合意につなげるという事例は先に挙げたコペンハーゲン協定での事例のほか、過去の気候変動交渉でも度々見られる。京都議定書交渉では、日本、米国、EU の 3 極の間で 6, 7, 8% 削減をまず合意した (7.2.2 参照)。また、コペンハーゲンでの COP15 の前にも、G8 プロセスが先進国間の合意形成の場として活用され、G20 が新興国も含めた場として使われた。2005 年の G8 グレンイーグルスサミットで

「気候変動、クリーンエネルギー及び持続可能な開発に関する対話」いわゆる **G20** 対話のプロセスが英国主導でスタートした。一方、米国主導で **2007** 年に「エネルギー安全保障と気候変動に関する主要経済国会合 (MEM)」がスタートした。いずれもほぼ **G20** と同じ構成国であり、また、内容としても **2008** 年の **G8** 北海道洞爺湖サミットにおいて、気候変動の中長期目標等に合意することという同様の目的を希求していた。**G20** では新興国が自国の経済成長の足かせになるとの懸念を強く持っていたため、世界全体で排出量を半減するとの合意には至らなかったが、**G8** では **2050** 年に世界全体で排出量を半減し、そのために先進国が **80%** 削減することが合意された。**G8** 北海道洞爺湖サミットの後も、ブッシュ政権からオバマ政権になって名称が変わった、「エネルギーと気候に関する主要経済国フォーラム (MEF)」が継続されており、**G20** 間での合意形成の場として現在も機能している。

このような現実を鑑み、**G20** 諸国でまず合意し、その合意を **UNFCCC** に提案して、承諾を受けるというプロセスが **QCM** を用いた条件付き戦略のメカニズムを現実に適用するプロセスとして有望だと考えられる。これまでの分析から、**G20** において条件付戦略を適用するためには、削減費用及び便益についての最新の知見をまとめるとともに、その知見をベースに現時点での共通認識を醸成することが必要であると言える。削減費用については、前述した **IIASA** の検討結果を更新したものを基に、先進国のみから主要排出開発途上国にもその対象を拡大して、**G20** 諸国についての計算結果を求めることが有望である。削減便益については、**IPCC** をはじめ、現時点での研究成果をとりまとめ、共通認識を醸成することが考えられる。その上で、現在のカンクン合意の下でのプレッジ & レビューのプロセスにおいて、費用便益分析のレビューも対象に含め、**IPCC** の主導の下で研究機関が集まって作業を行うという過程が有効であろう。そして、一定程度の成果が得られた段階で、**QCM** を用いた条件付き戦略のメカニズムを適用することが考えられる。具体的には、まず **G20** にマッチングメカニズムを適用し、各国の最適な削減量を算出する。次に、これらの削減量を削減目標として他のすべての **G20** 国が約束する

との条件付戦略を **G20** の先進国が提案する。その結果、**QCM** を用いた条件付き戦略のメカニズムにより、開発途上国を含めた **G20** すべての国で上記削減目標が採用されることが実現可能となる。

8 結論

本論文では、マッチング削減約束アプローチの理論的な考え方を、現実に即した定量的な統合評価モデルと組み合わせて、野心的な削減目標の合意を実現する方策について提案することを目的とした。まず、そのメカニズムにより、どの程度削減量の引き上げが可能かを定量的に示した。その結果、

- マッチングメカニズムは、メカニズムがない場合と比較して、最大 **3.7** 倍の削減目標への合意を可能にすること
- 削減量及び利得はメカニズムに参加する国が増えれば増えるほど大きくなることを明らかにした。

また、世界全体の効率的な排出削減を実現する手段として、排出量取引を導入した場合の効果を定量的に示した。その結果、

- 排出量取引を導入することにより、全体の削減費用を最大 **35%**削減できることが分かった。

次に、上記モデル計算の結果を踏まえて、各国の排出削減の野心を引き上げるメカニズムとして、

- QCM のメカニズムを用い、マッチングメカニズムで算出される削減量を各国の削減量として設定すること

を提案した。その提案の実現可能性について、国際交渉の実態の分析から評価した。その結果、

- 実際の交渉では EU が条件付き戦略を採用し、多くの先進国が追随したことから、本提案の実現可能性が高いこと
- 国際競争力への悪影響の懸念が野心的な目標設定を妨げている主な要因であることから、他国の削減目標レベルに応じて自国の削減目標を設定する手法がより高いレベルでの国際合意を実現しうる可能性があること
- 途上国の削減インセンティブが欠如しており、排出量取引の導入により、先進国から途上国への資金の流れができ、これを克服する可能性があること
- マッチング削減アプローチの導入のためには、排出削減の便益が認識されていることが前提となるが、現状では認識不足であること

が分かった。

最後に、現実の国際交渉において、本メカニズムを適用するためのプロセスとして、

- まず G20 や MEF といった世界の排出削減の大宗を占める主要排出国グループにおいて、先進国が開発途上国に対して QCM を用いた本メカニズムを提案し、各国の野心的な削減量に合意した上で、その合意を UNFCCC において世界全体での合意につなげること

を提案した。

なお、本モデルに限らず、分析結果の解釈に当たってはその前提の妥当性を含めたさらなる検証が必要とはいえ、本分析によって、理論分析のみでは把握できなかった様々な特徴を定量的に明らかにすることができた。

最後に、本問題の分析に係る今後の検討課題として以下の 5 点を挙げておく。第 1 に、前提やデータを精査・更新し、費用便益が現実により即したものとなるよう精緻化することが求められる。モデルでは利得構造を正確に把握していることが前提とされているが、現実には将来の気候変動を回避することによる便益は定量化が非常に難しく、十分認識されているとは言えない。様々なセクターにわたる気候変動による被害影響をできる限り広くとらえる必要がある。

また、現在のモデルで考慮している便益以外でも、間接的な影響も検討する必要がある。具体的には、自国以外の国で生じた被害が経済に間接的に悪影響を及ぼす場合、例えば、タイで起きた洪水が日本企業の製造部門に及ぼす悪影響や、諸外国の異常気象で穀物収量が減ったときの日本の食料安全保障なども費用便益に含めるべきである。また、気候変動の避けられる被害以外にも、大気汚染物質の削減や省エネ、エネルギー安全保障上の便益など様々なコベネフィットも考慮する必要がある。

第 2 点目として、100 年間を何期間かに分割し、それぞれの期で最も効率的な排出削減を行うようモデルを改良することが必要である。本論文のモデルでは、排出削減を 100 年間で平均的に実施するとの仮定を置いているが、通常このような仮定は非効率であり、より最適な排出削減経路が存在する。現実の国際交渉でも、気候変動枠組条約でまず 2000 年の目標を設け、京都議定書で 2010 年の目標（実際は 2008 年から 2012 年の平均）に合意し、カンクン合意で 2020 年の目標を設定し、2020 年以降の国際枠組みでの目標年としては 2030 年が有力視されているなど、およそ 10 年ごとに目標が設定されている。

第 3 点目として、国内制約について、より深く考慮したモデルとすることである。本モデルは、基本的に国をプレイヤーとして扱ったが、条件付き戦略により、間接的に国内制約も考慮できるとした。しかしながら、現実の国際交渉では、産業界などの国内プレイヤーも削減目標の決定に大きな影響力を及ぼしている。そのため、Putnam の 2 レベルゲームの考え方を適用し、国内プレイヤーもモデルに組み込み、直接的に扱うモデルの構築が望まれる。

第 4 点目としては、衡平性の問題を考慮することが挙げられる。先進国と開発途上国の対立の主な原因は、過去の排出責任、1 人当たりの排出量の差、経済発展段階の差といった衡平性の問題にある。これらの点は、プレイヤーの利得構造ですべてを説明するゲーム理論では考慮できない。Barrett のモデルからは、削減費用が低く便益も高い開発途上国が削減のインセンティブを持ち、さらに先進国など他の国の削減への参加を促すためにサイドペイメントを支払う

ことが示唆される。しかしながら、現実には「共通だが差異のある責任原則」に基づいて、逆に先進国がまず削減し、開発途上国にサイドペイメントを支払っている。この結果からも、ゲーム理論のモデルでは考慮できない衡平性を考慮する必要性が強く示唆される。

最後に、第5点目として、メカニズムをどのように耐戦略的 (strategy-proof) とするかは重要な点である。本論文で用いたメカニズムは、メカニズムのステージを元に戻すことはできないとの前提に立っている。参加国がステージを元に戻さないことを確かなものとするためのメカニズムとして、例えば、デポジット制度が考えられる (Gerber and Wichardt, 2009)。このメカニズムでは第一ステージにおいて、プレイヤーはデポジットを支払うことを求められる。第二ステージでは二つの結果がありうる。第一ステージで一部のプレイヤーがデポジットを支払わない場合、すべてのデポジットは返還され、デポジット制度のない通常のゲームが行われる。一方、すべてのプレイヤーがデポジットを支払えば、プレイヤーはあらかじめ約束した削減を実施する。そして、実際に約束を実行した場合にデポジットは返還される。約束の実行が不十分であればデポジットは返還されない。デポジットの額に差異があり、誰も削減しない場合よりも削減した方が各プレイヤーの利得が向上する場合にサブゲーム均衡となる。このメカニズムではデポジットを事前に支払わせることにより、約束を守るインセンティブを与えている。例えば、カナダは2005年の排出量が京都議定書の削減目標（1990年比で6%減）よりも33%も上回っており、目標達成が絶望的になったことから、2007年に京都議定書から脱退した。京都議定書では目標が達成できなかった場合、次期約束期間で超過した量の1.3倍の超過達成が求められるという罰則がある。この罰則は反って脱退するインセンティブを与えてしまう。デポジット制度では、枠組みに残って、デポジットを返還してもらおうインセンティブが働く。現実的には、インセンティブになるような多額の資金を事前にデポジットとして支払うことは難しい。加えて、それを管理する機関にはかなり高度な信頼性が求められ、実現は困難だと考え

られる。しかしながら、脱退に対する何らかのディスインセンティブがなければ、大幅削減の実施の信頼性が損なわれるため、今後このような仕組みの研究が求められる。

参考文献

- Amann, M., Rafaj, P., Höhne, N. (2009). GHG mitigation potentials in Annex I countries Comparison of model estimates for 2020, Interim Report IR-09-034, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Arce M. and Daniel G. (2004). "Asymmetric Leadership and International public goods." *PUBLIC FINANCE REVIEW*, 32 (5), 528-558.
- Asheim, G., Froyen, C., Hovi, J., and Menz, F. (2006). "Regional versus global cooperation for climate control." *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(1), 93-109.
- Asheim, G., and Holtmark, B. (2009). "Renegotiation-Proof Climate Agreements with Full Participation: Conditions for Pareto-Efficiency." *Environmental & Resource Economics*, 43(4), 519-533.
- Asian Development Bank (2010). Strengthening Planning Capacity for Low Carbon Growth in Developing Asia, <http://www.cmcc.it/projects/tender-adb-strengthening-planning-capacity-for-low-carbon-growth-in-developing-asia> (last accessed on 20 January 2014).
- Attanasia, G., García-Gallego, A., Georgantzís, N., and Montesano, A. (2011). "Non-Cooperative Games with Chained Confirmed Proposals." *Contributions to Game Theory and Management*, 4, 19-32.
- Babiker, M. (2005). "Climate change policy, market structure, and carbon leakage." *Journal of International Economics*, 65(2), 421-445.
- Barrett, S. (1998). "On the Theory and Diplomacy of Environmental Treaty-Making." *Environmental and Resource Economics*, 11(3-4), 317-333.
- Barrett, S. (2001). "International cooperation for sale." *European Economic Review*, 45(10), 1835-1850.
- Barrett, S. (2003), *Environment and Statecraft*, Oxford University Press, Oxford.
- Baumert, K.A., Herzog, A., and Pershing, J. (2009). *Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*, World Resource Institute.
- Bjørn Lomborg (Ed.) (2004). *Global Crises, Global Solutions*, Cambridge University Press.
- Boadway, R., Song, Z., and Tremblay, J. (2007). "Commitment and matching contributions to public goods." *Journal of Public Economics*, 91(9), 1664-1683.

- Boadway, R., Song, Z., and Tremblay, J. (2011). "The efficiency of voluntary pollution abatement when countries can commit." *European Journal of Political Economy*, 27(2), 352-368.
- Bodansky, D (2010). A Tale of Two Architectures: The Once and Future U.N. Climate Change Regime, <http://ssrn.com/abstract=1773865> (last accessed on 20 Jan 2014)
- Buchholz, W., Cornes, R., and Rubbelke, D. (2011). "Interior matching equilibria in a public good economy: An aggregative game approach." *Journal of Public Economics*, 95(7-8), 639-645.
- Chander, P. and Tulkens, H. (2008). "Cooperation, Stability, and Self-enforcement in International Environmental Agreements. " Guesnerie, R., & Tulkens, H. (eds), *The Design of Climate Policy*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Climate Action Tracker (2011). <http://climateactiontracker.org> (last accessed on 20 Jan 2014).
- Climate Analytics, EcoFys and Potsdam Institute for Climate Impact Research (2011). Cancun Climate Talks: Keeping Options Open to Close the Gap. Climate Action Tracker Briefing Paper, http://www.climateactiontracker.org/briefing_paper_cancun.pdf (last accessed on 20 Jan 2014).
- Colby, B. (2000). "Cap-and-trade policy challenges: A tale of three markets." *Land Economics*, 76(4), 638-658.
- Danziger, L and, Schnytzer, A. (1991). "Implementing the Lindahl voluntary-exchange mechanism." *European Journal of Political Economy*, 7, 55-64.
- Dellink, R., J.-C. Altamirano-Cabrera, M. Finus, E. van Ierland, A. Ruijs and H-P. Weikard. (2004), Empirical background paper of the STACO Model, Wageningen University, <http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Chair-groups/Social-Sciences/Environmental-Economics-and-Natural-Resources-Group/Show/STACO-Stability-of-Coalitions-A-research-project-on-the-formation-and-stability-of-international-climate-agreements.htm> (last accessed on 20 Jan 2014).
- den Elzen, M., Hof, A., and Roelfsema, M. (2011). "The emissions gap between the Copenhagen pledges and the 2 degrees C climate goal: Options for closing and risks that could widen the gap." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 21(2), 733-743.
- Drouet L, Haurie A, Moresino F, Vial J-P, Vielle M, Viguier L, (2008). "An oracle based method to compute a coupled equilibrium in a model of international climate policy." *Computational Management Science*, 5, 1-2, 119-140.
- Dutta, P.K. and Radner, R. (2004). Self-enforcing climate-change treaties, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 101(14), 5174-5179.
- Eckerman, J. and Finus, M. (2003). "Coalition formation in a global warming game: How the design of protocols affects the success of environmental treaty-making." *Natural Resource Modeling*, 19, 3, 323-358.

EICネット(2013). コペンハーゲン協定,

<http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&ecoword=%83R%83y%83%93%83n%81%5B%83Q%83%93%8D%87%88%D3> (last accessed on 20 Jan 2014)

Ellerman, A.D. and A. Decaux (1998). Analysis of post-Kyoto CO2 emissions trading using marginal abatement curves. MIT joint program on the science and policy of global change. Report No. 40, Cambridge: MIT.

European Commission (2009). Staff Working Document, part 1. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Towards a comprehensive climate change agreement in Copenhagen - Extensive background information and analysis, issued in Brussels on 28 January, 2009. COM(2009) 39 final,

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52009SC0101:EN:NOT> (last accessed on 20 Jan 2014).

Fankhauser, S. (1995). Valuing climate change: The economics of the greenhouse. London: Earthscan.

Finus, M., Altamirano-Cabrera, J., and Van Ierland, E. (2005). "The effect of membership rules and voting schemes on the success of international climate agreements." *Public Choice*, 125(1-2), 95-127.

Flachsland, C., Marschinski, R., and Edenhofer, O. (2009). "Global trading versus linking: Architectures for international emissions trading." *Energy Policy*, 37(5), 1637-1647.

Froyen, C. B. and Hovi, J. (2007). "A climate agreement with full participation." *Economic Letters*, 99, 317-319.

Garnaut, R. (2008). The Garnaut Climate Change Review: Final Report. Cambridge University Press.

Germain, M., and Van Steenberghe, V. (2003). "Constraining equitable allocations of tradable CO2 emission quotas by acceptability." *Environmental & Resource Economics*, 26(3), 469-492.

Gerst, M.D., P. Wanga, A. Roventini, G. Fagiolo, G. Dosi, R.B. Howarth and M.E. Borsuetk (2013). "Agent-based modeling of climate policy: An introduction to the ENGAGE multi-level model framework." *Environmental Modelling & Software*, 44, 62-75.

GUTTMAN, J. (1987). "A NON-COURNOT MODEL OF VOLUNTARY COLLECTIVE ACTION." *Economica*, 54(213), 1-19.

Hanaoka, T., and Kainuma, M. (2012). "Low-carbon transitions in world regions: comparison of technological mitigation potential and costs in 2020 and 2030 through bottom-up analyses." *Sustainability Science*, 7(2), 117-137.

Haurie, A. (1995). "Environmental coordination in dynamic oligopolistic markets." *Group Decision and Negotiation*, 4(1), 39-57.

- Hardin, G. (1968). "The Tragedy of the Commons." *Science*, 162(1968), 1243-1248.
- Helland, L and Hovi, J. (2004). The theory of full international cooperation, CICERO Working Paper, 2004:06.
- Hof, A., den Elzen, M., and van Vuuren, D. (2008). "Analysing the costs and benefits of climate policy: Value judgements and scientific uncertainties." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 18(3), 412-424.
- Hof, A., den Elzen, M., and van Vuuren, D. (2009). "Environmental effectiveness and economic consequences of fragmented versus universal regimes: what can we learn from model studies?" *International Environmental Agreements-Politics Law and Economics*, 9(1), 39-62.
- International Emissions Trading Association (2013). <http://www.ieta.org/worldscarbonmarkets> (last accessed on 20 Jan 2014)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (1990). Contribution of Working Group I to the First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007a). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007b). Summary for policymakers. In: Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA (eds), *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge New York
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UugwS5qCjIV> (last accessed on 20 Jan 2014)
- IVL (Swedish Environmental Research Institute) (2012). Comparisons of the Copenhagen Pledges, Analyses for Climate Change Professionals., <http://www.ivl.se/download/18.7b47b48513b0e45ae785f/1353314961642/> (last accessed on 20 Jan 2014)
- Jørgensen, S., G. Martín-Herrán and G. Zaccour, (2010). "Dynamic Games in the Economics and Management of Pollution." *Environmental Modeling & Assessment*, 15(6), 433-467.
- Kawamata, K. and Horita, M. (2013). "Applying Matching Strategies in Climate Change Negotiations." *Group Decision and Negotiations*, (DOI 10.1007/s10726-013-9354-6) (forthcoming).
- Lisowski, M. (2010). "Playing the Two-level Game: Us President Bush's Decision to Repudiate the Kyoto Protocol." *Environmental Politics*, 11:4, 101-119.

- McGinty, M. (2007). "International environmental agreements among asymmetric nations." *Oxford Economic Papers-New Series*, 59(1), 45-62.
- Mills, E. (2009). "A Global Review of Insurance Industry Responses to Climate Change." *Geneva Papers on Risk and Insurance-Issues and Practice*, 34(3), 323-359.
- Nagashima, M., Dellink, R., van Ierland, E., and Weikard, H. (2009). "Stability of international climate coalitions - A comparison of transfer schemes." *Ecological Economics*, 68(5), 1476-1487.
- National Institutes for Environment Studies (2011). 2050 Low Carbon Society Scenarios, <http://2050.nies.go.jp/LCS/> (last accessed on 20 Jan 2014).
- Nordhaus, W.D., Yang Z. (1996). "A Regional Dynamic General Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies." *American Economic Review*, 86(4), 741-765.
- OECD (2011). Towards Green Growth, <http://www.oecd.org/dataoecd/37/34/48224539.pdf> (last accessed on 20 Jan 2014).
- Peterson, E., Schleich, J., and Duscha, V. (2011). "Environmental and economic effects of the Copenhagen pledges and more ambitious emission reduction targets." *Energy Policy*, 39(6), 3697-3708.
- PUTNAM, R. (1988). "DIPLOMACY AND DOMESTIC POLITICS - THE LOGIC OF 2-LEVEL GAMES." *International Organization*, 42(3), 427-460.
- Repetto R. (2011). America's Climate Problem The Way Forward. Earthscan.
- Stern, N. (2008). "The economics of climate change." *American Economic Review*, 98(2), 1-37.
- Sunstein, C. (2007). "Of Montreal and Kyoto: A tale of two protocols." *Harvard Environmental Law Review*, 31(1), 1-65.
- Tol, R. (1997). "Valuing climate change: The economics of the greenhouse - Fankhauser, S." *Economic Journal*, 107(444), 1586-1588.
- Underdal, A., Hovi, J., Kallbekken, S., and Skodvin, T. (2012). "Can conditional commitments break the climate change negotiations deadlock?" *International Political Science Review*, 33(4), 475-493.
- Wood, P., Costanza, R., Limburg, K., and I, K. (2011). "Climate change and game theory." *Ecological Economics Reviews*, 1219, 153-170.
- United Nations Environment Programme (2012). The Emissions Gap Report 2012, <http://www.unep.org/pdf/2012gapreport.pdf> (last accessed on 20 Jan 2014)
- United Nations Framework Convention on Climate Change (1995). REPORT OF THE CONFERENCE OF THE PARTIES ON ITS FIRST SESSION, HELD AT BERLIN FROM 28 MARCH TO 7 APRIL 1995, <http://unfccc.int/resource/docs/cop1/07a01.pdf> (last accessed on 20 Jan 2014)

- United Nations Framework Convention on Climate Change (2011). Appendix I - Quantified economy-wide emissions targets for 2020, http://unfccc.int/meetings/copenhagen_dec_2009/items/5264.php (last accessed on 20 Jan 2014).
- White House (2013). President Obama's Plan to Fight Climate Change, <http://www.whitehouse.gov/share/climate-action-plan> (last accessed on 20 Jan 2014).
- 蟹江憲史 (2001) 地球環境外交と国内政策, 慶應義塾大学出版会.
- 川又孝太郎、堀田昌英 (2012) 「気候変動国際交渉プロセスのゲーム理論的考察」 『社会技術研究論文集』 vol9, 41-49.
- 環境省 (2008) 『STOP THE 温暖化 2008』 <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/stop2008/> (last accessed on 20 Jan 2014).
- 環境省 (2013) 排出量取引インサイト <http://www.ets-japan.jp/index.html> (last accessed on 20 Jan 2014)
- 竹内 敬二 (1998) 『地球温暖化の政治学』 朝日新聞社.
- 内閣官房 (2009) 『地球温暖化対策の中期目標について』 http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tikyuu/kaisai/dai07kankyo/cyuuki_mokuhyou.pdf (last accessed on 20 January 2014).
- 中嶋ほか (2009) 「地球温暖化影響のマクロ的経済評価の系譜と知見」 『地球環境』 14 (2), 299-307.
- 文部科学省・気象庁・環境省 (2009) 『温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート：日本の気候変動とその影響』 <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep091009/full.pdf> (last accessed on 20 Jan 2014).
- 鷲田豊明 (2010) 『環境ゲーム論』 上智大学出版

補足資料

A. マッチングメカニズムの参加国数毎の最大削減量と排出量取引による削減量及び利得

表 1.2 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	24.5	9.7	14.9	508
CHN	25.4	-9.7	35.1	135
世界全体	73.6			643

表 2.3 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得 (US Billion\$)
USA	28.5	8.8	19.7	588
EU15	16.7	8.7	8.0	673
CHN	30.0	-17.5	47.5	195
世界全体	92.2			1456

表 3.4 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	30.9	9.5	21.4	675
EU15	18.2	9.4	8.7	778
CHN	32.9	-19.2	52.1	229
IND	12.4	0.3	12.1	135
世界全体	108.0			1816

表 4.5 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	33.2	9.6	23.6	768
EU15	19.6	9.9	9.7	892
CHN	35.8	-22.1	57.9	280
IND	13.4	0.0	13.4	153
ROW	14.1	2.6	11.6	210
世界全体	126.1			2304

表 5.6 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	35.4	10.0	25.4	894
EU15	20.9	10.4	10.5	1040
FSU	15.2	1.7	13.5	262
CHN	38.4	-24.2	62.6	337
IND	14.3	-0.1	14.4	178
ROW	14.6	2.1	12.4	252
世界全体	147.9			2964

表 6.7 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	36.6	10.3	26.3	929
EU15	21.6	10.7	10.9	1086
FSU	15.7	1.8	13.9	272
EEX	8.3	0.3	8.0	103
CHN	39.7	-25.1	64.9	357
IND	14.8	-0.1	14.9	185
ROW	15.0	2.2	12.8	261
世界全体	155.9			3192

表 7.8 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	37.7	9.5	28.2	991
JPN	8.8	6.5	2.3	927
EU15	22.2	10.5	11.8	1161
FSU	16.1	1.3	14.8	292
EEX	8.6	-0.1	8.7	112
CHN	41.1	-28.8	69.9	428
IND	15.3	-0.7	16.0	200
ROW	15.5	1.7	13.8	280
世界全体	169.0			4392

表 8.9 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	38.8	9.3	29.5	1057
JPN	9.1	6.6	2.5	991
EU15	22.9	10.6	12.3	1240
OOE	8.7	0.6	8.1	160
FSU	16.6	1.3	15.3	311
EEX	8.9	-0.2	9.1	119
CHN	43.4	-28.9	72.3	453
IND	15.7	-0.9	16.6	215
ROW	16.0	1.6	14.4	299
世界全体	181.7			4846

表 9.10 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	39.5	10.2	29.3	1104
JPN	9.3	6.8	2.5	1035
EU15	23.3	11.1	12.3	1296
OOE	8.8	0.7	8.1	167
EET	6.3	-1.8	8.0	68
FSU	16.8	1.5	15.3	324
EEX	9.1	-0.1	9.2	124
CHN	43.1	-29.8	72.9	476
IND	16.0	-0.6	16.6	222
ROW	16.2	1.9	14.3	311
世界全体	188			5127

表 10. 11 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	40.4	10.4	30.0	1171
JPN	9.6	7.0	2.6	1098
EU15	23.8	11.3	12.6	1375
OOE	9.0	0.7	8.3	177
EET	6.4	-1.8	8.2	72
FSU	17.2	1.6	15.6	343
EEX	9.3	-0.1	9.4	131
CHN	44.3	-30.3	74.7	504
IND	16.4	-0.6	17.0	236
DAE	7.7	0.0	7.7	109
ROW	16.6	2.0	14.7	330
世界全体	200.7			5547

表 11. 12 カ国・地域の場合

	削減量 p (Gt)	排出量取引 q (Gt)	国内削減量 q-p (Gt)	利得(US Billion\$)
USA	40.5	10.3	30.2	1182
JPN	9.6	7.0	2.6	1108
EU15	23.9	11.3	12.7	1387
OOE	9.1	0.7	8.3	179
EET	6.4	-1.8	8.2	73
FSU	17.3	1.5	15.7	347
EEX	9.4	-0.1	9.5	133
CHN	44.5	-30.8	75.2	514
IND	16.4	-0.7	17.2	238
DAE	7.7	-0.1	7.8	110
BRA	1.3	0.8	0.5	88
ROW	16.7	1.9	14.8	333
世界全体	202.7			5692

B. Excel のマクロでの計算式のソースコード (3カ国がマッチングメカニズムに参加する場合)

```
Sub Find_Answer_Matching_Mechanism()
```

```
Range("B19:B24").Value = "1"
```

```
Dim Countryi As String
```

```
Dim Countryj As String
```

```
Dim Countryk As String
```

```
Dim Alphai As Double
```

```
Dim Alphaj As Double
```

```
Dim Alphak As Double
```

```
Dim Betai As Double
```

```
Dim Betaj As Double
```

```
Dim Betak As Double
```

```
Dim Sii As Double
```

```
Dim Sij As Double
```

```
Dim Sik As Double
```

```
Dim Payoffi As Double
```

```
Dim Payoffj As Double
```

```
Dim Payoffk As Double
```

```
Dim Singlei As Double
```

```
Dim Singlej As Double
```

```
Dim Singlek As Double
```

```
Dim Gsum As Double
```

```
Dim i As Integer
```

```
Dim j As Integer
```

Dim k As Integer

Dim x As Integer

Dim y As Integer

x = 1

y = 2

' A loop that will make 10 iterations, starting with the number 1,
' and finishing at the number 10.

For i = 1 To 10

' Put the initial parameters and values for country i

Range("B16") = Range("F" & Format(i + 1))

Countryi = Range("A" & Format(i + 1))

Alphai = Range("B" & Format(i + 1))

Betai = Range("C" & Format(i + 1))

Sii = Range("D" & Format(i + 1))

Singlei = Range("F" & Format(i + 1))

Payoffi = Range("G" & Format(i + 1))

For j = 2 To 11

If j > i Then

' Put the initial parameters and values for country j

Range("B17") = Range("F" & Format(j + 1))

Countryj = Range("A" & Format(j + 1))

Alphaj = Range("B" & Format(j + 1))

Betaj = Range("C" & Format(j + 1))

Sij = Range("D" & Format(j + 1))

Singlej = Range("F" & Format(j + 1))

Payoffj = Range("G" & Format(j + 1))

For k = 3 To 12

If k > j Then

' Put the initial parameters and values for country k

Range("B18") = Range("F" & Format(k + 1))

Countryk = Range("A" & Format(k + 1))

Alphak = Range("B" & Format(k + 1))

Betak = Range("C" & Format(k + 1))

Sik = Range("D" & Format(k + 1))

Singlek = Range("F" & Format(k + 1))

Payoffk = Range("G" & Format(k + 1))

' マッチングメカニズムの計算式

Range("F16").Formula = "=B16+B17+B18-B16*(1+B21+B23)"

Range("F17").Formula = "=B16+B17+B18-B17*(1+B19+B24)"

Range("F18").Formula = "=B16+B17+B18-B18*(1+B20+B22)"

Range("F19").Formula = "= 43.1 *" & Alphai & "*" B16 ^ 2 + 43.1 *" & Betai & "*" B16 -
37.4 *" & Sii & "*" (1 + B21+B23)"

Range("F20").Formula = "= 43.1 *" & Alphaj & "*" B17 ^ 2 + 43.1 *" & Betaj & "*" B17 -
37.4 *" & Sij & "*" (1 + B19+B24)"

Range("F21").Formula = "= 43.1 *" & Alphak & "*" B18 ^ 2 + 43.1 *" & Betak & "*" B18 -
37.4 *" & Sik & "*" (1 + B20+B22)"

```
Range("F22").Formula = "=B19*B21-1"
Range("F23").Formula = "=B20*B23-1"
Range("F24").Formula = "=B22*B24-1"
Range("F25").Formula = "=B19*B22*B23-1"
```

' 残渣の 2 乗の計算

```
Range("G16").Formula = "=F16^2"
Range("G17").Formula = "=F17^2"
Range("G18").Formula = "=F18^2"
Range("G19").Formula = "=F19^2"
Range("G20").Formula = "=F20^2"
Range("G21").Formula = "=F21^2"
Range("G22").Formula = "=F22^2"
Range("G23").Formula = "=F23^2"
Range("G24").Formula = "=F24^2"
Range("G25").Formula = "=F25^2"
Range("G26").Formula = "=SUM(G16:G25)"
```

' Set the target cell C82 to minimum by changing cell B16:B24.

```
SolverOK SetCell:=Worksheets("Sheet1").Range("G26"), MaxMinVal:=2, _
ByChange:=Worksheets("Sheet1").Range("B16:B24")
```

' Add the constraint for the model. The only constraint is that the

' number of parts used has to be above 0--

```
SolverAdd CellRef:=Worksheets("Sheet1").Range("B16:B24"), Relation:=3, _
FormulaText:=0
```

' Solve the model but do not display the Solver Results dialog box.

SolverSolve UserFinish:=True

Gsum = Worksheets("Sheet1").Range("G26")

' Finish and keep the final results.

SolverFinish KeepFinal:=1

' Show the result of all the calculations at Sheet 13

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 1) = y

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 2) = Countryi

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 3) = Countryj

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 4) = Countryk

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 5).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B16")

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 6).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B17")

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 7).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B18")

Worksheets("Sheet1").Range("I20").Value = "= + B16 + B17 + B18 - " & Singlei & " - " &

Singlej & " - " & Singlek

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 8).Value = Worksheets("Sheet1").Range("I20").Value

Worksheets("Sheet1").Range("I16").Value = "= 37.4 *" & Sii & "*" (55.35-" & Singlei & "-" &
Singlej & "-" & Singlek & "+B16+B17+B18) - 43.1 / 3 *" & Alphai & "*" B16 ^ 3 - 43.1 / 2 *" & Betai
& "*" B16 ^ 2"

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 9).Value = Worksheets("Sheet1").Range("I16").Value

Worksheets("Sheet1").Range("I17").Value = "= 37.4 *" & Sij & "*" (55.35-" & Singlei & "-" &
Singlej & "-" & Singlek & "+B16+B17+B18) - 43.1 / 3 *" & Alphaaj & "*" B17 ^ 3 - 43.1 / 2 *" & Betaj
& "*" B17 ^ 2"

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 10).Value = Worksheets("Sheet1").Range("I17").Value

Worksheets("Sheet1").Range("I18").Value = "= 37.4 * " & Sik & " * (55.35-" & Singlei & "-" & Singlej & "-" & Singlek & "+B16+B17+B18) - 43.1 / 3 * " & Alphak & " * B18 ^ 3 - 43.1 / 2 * " & Betak & " * B18 ^ 2"

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 11).Value = Worksheets("Sheet1").Range("I18").Value

Worksheets("Sheet1").Range("I19").Value = "= 37.4 * (B16+ B17+B18-" & Singlei & "-" & Singlej & "-" & Singlek & ") - 43.1 / 3 * " & Alphai & " * (B16 -" & Singlei & ") ^ 3 - 43.1 / 2 * " & Betai & " * (B16 -" & Singlei & ") ^ 2 - 43.1 / 3 * " & Alphaj & " * (B17 - " & Singlej & ") ^ 3 - 43.1 / 2 * " & Betaj & " * (B17 - " & Singlej & ") ^ 2 - 43.1 / 3 * " & Alphak & " * (B18 - " & Singlek & ") ^ 3 - 43.1 / 2 * " & Betak & " * (B18 - " & Singlek & ") ^ 2"

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 12).Value = Worksheets("Sheet1").Range("I19").Value

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 13).Value = Gsum

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 14).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B19")

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 15).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B20")

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 16).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B21")

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 17).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B22")

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 18).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B23")

Worksheets("Sheet13").Cells(y, 19).Value = Worksheets("Sheet1").Range("B24")

y = y + 1

' Show the result of qualified calculations which the payoff can be better off at Sheet

14

If Worksheets("Sheet1").Range("I16").Value > Payoffi And
Worksheets("Sheet1").Range("I17").Value > Payoffj And
Worksheets("Sheet1").Range("I18").Value > Payoffk Then

Worksheets("Sheet14").Cells(x, 1) = x

Worksheets("Sheet14").Cells(x, 2) = Countryi

```
Worksheets("Sheet14").Cells(x, 3) = Countryj  
Worksheets("Sheet14").Cells(x, 4) = Countryk  
Worksheets("Sheet14").Cells(x, 5).Value = Worksheets("Sheet1").Range("I20").Value  
Worksheets("Sheet14").Cells(x, 6).Value = Worksheets("Sheet1").Range("I19").Value  
Worksheets("Sheet14").Cells(x, 7) = Gsum  
  
x = x + 1
```

```
End If
```

```
End If
```

```
Next
```

```
End If
```

```
Next
```

```
Next
```

```
End Sub
```


謝辞

本研究を進めるにあたり、大変多くの方々に御世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

まず初めに、研究活動全般にわたり格別なる御指導と御高配を賜りました東京大学大学院新領域創成科学研究科 堀田昌英教授に深い感謝の意を表します。社会人博士ということで、研究のための時間が非常に限られた中で、3年半で博士論文をまとめることができたのは、ひとえに先生の適切なアドバイスのおかげです。先生と接する中で、環境省を退官後には大学教授を目指すのも一つの有力な選択肢だと思ふ気持ちも芽生えてきました。また、相談に乗ってください。

次に、博士論文の副査として、貴重な御教示を賜りました東京大学大学院新領域創成科学研究科の戸堂康之教授、本田利器教授、中山幹康教授、亀山康子客員教授に心より感謝申し上げます。先生方の御助言により、論文の論理的な精密さが改善され、論文の完成度が高まりました。本当にありがとうございました。

また、学会発表の場として、**Group Decision and Negotiations** に2年連続で参加できたことは貴重な経験となりました。学会の場で、ゲーム理論の環境分野への適用において、先駆的存在である、**Keith Hipel** 教授と出会い、意見交換ができたことは得難い経験でした。その後も、

昨年、今年と 2 年連続来日された際には食事を共にさせていただくなど、懇意にいただいたことに感謝いたします。また、同じ博士課程の Yu Maemura くんとは、ブラジル、スウェーデンと遠い場所にも関わらず、2 年とも同学会と一緒に出席できたのは良い思い出です。また、スウェーデンでの GDN2013 では Tony Odoemena くんとも一緒に、ノーベル賞受賞晩餐会と同会場のストックホルム市庁舎でのレセプションに参加できたことも良い記念となりました。

社会人博士だったため、同じ研究室の学生と一緒に過ごす時間は極めて限られたものでしたが、ゼミの発表会や忘年会での機会は楽しいものでした。お付き合いいただいた方々ありがとうございました。

社会人博士として学ぶことを応援し、そのための各種書類の準備にご協力いただいた環境省地球環境局地球温暖化対策課 和田篤也課長、アジア開発銀行地域・持続可能な開発局環境セーフガード課 Nessim Ahmad 課長には特に感謝いたします。また、私が現在室長を務める環境省地球環境局国際協力室の室員の皆様には、学会発表等で休暇の際に不在中にご迷惑をかけました。留守を預かってもらった西前晶子補佐をはじめ、皆様に感謝申し上げます。

それから、私が博士課程を取るきっかけとなったのは、国土交通省の西村政洋氏（当時アジア開発銀行に勤務）に社会人博士課程の存在を教えていただいたことでした。受験時や単位取得など様々な手続きについても親切に教えていただき、感謝申し上げます。それから、STACO モデルに関し、問い合わせに快く応じていただいた、RITE の長嶋美由紀女史にも感謝申し上げます。

最後になりましたが、研究のために、家庭サービスの時間を減らさざるを得ないことも多かったにもかかわらず、いつでも優しく笑顔で、あらゆる面でサポートしてくれた妻と息子に深く深く感謝します。彼らのサポートがなければ、博士論文をまとめることは決してできなかったと思います。

本研究は、私の本業の環境行政に直結している内容です。今後、研究成果を生かせるよう、精一杯頑張っていきたいと強く思っております。最後に改めて、私を支えていただいた関係者の皆様方に重ねて厚く謝意を表し、謝辞といたします。