

# CO<sub>2</sub>削減問題に対するマルチエージェントシミュレーション

埼玉大学 武村亮介, 鈴木章彦, 渋谷秀雄

東京工業大学 鈴木章太郎

## 1. 緒 言

世界では CO<sub>2</sub> の増加による地球温暖化が問題となり京都議定書により世界中の批准した国に CO<sub>2</sub> 削減が課せられた。しかし、それにもかかわらずほとんどの国の排出量は増えている。

仮に 2 国あった場合、CO<sub>2</sub> を削減するためには、両方が環境優先政策をとるのが最適であるが、一方が経済優先政策を行いもう一方が環境優先を行う場合、経済的な不利益を被る結果となる。したがってもう一方も環境優先政策をとりえなく、結局両国が経済優先政策をとることになる。このように、CO<sub>2</sub> を減らすための最適な方法はわかっているが、その方策をとれないというジレンマが環境問題には存在する。そこでどのようにすれば CO<sub>2</sub> を削減できるかマルチエージェントシミュレーションで解析する。

## 2. 作成したシミュレーション

エージェントは先進国と途上国の 2 種類作成する。それぞれで政策が異なるものとした。先進国エージェントは CO<sub>2</sub> 削減を優先し、途上国エージェントは経済活動を優先する。エージェントの経済規模を GDP で表すことにし、各エージェントの政策により GDP が変化するものとする。またエージェントが経済活動よりも CO<sub>2</sub> 削減を優先し始める平均気温である臨界温度を 14.5, 15.5, 16.5, 17.5, 18.5, 19.5℃ と変えることができる。

エージェントは政策の方向性により政策を経済活動優先にするか CO<sub>2</sub> 削減優先するかを決める。先進国エージェント(A1, A2, A3, A4)を 4 つと途上国エージェント(D1, D2)を 2 つ用意する。これらの初期の GDP や政策の方向性の値を図 2 にまとめる。この表では先進国と途上国の臨界温度以上と以下での政策の違いを数値的に示している。

シミュレーションの大まかな流れは次のとおりである。まず式(1)のようにエージェントである先進国と途上国の GDP を合計し、式(2)のように CO<sub>2</sub> 濃度に換算した当年度の GDP を前年度の CO<sub>2</sub> 濃度に加える当年度の CO<sub>2</sub> 濃度とする。当年度の CO<sub>2</sub> 濃度を算出する際には GDP に一定の係数をかけた CO<sub>2</sub> 濃度から地球全体の CO<sub>2</sub> 吸収量を引いて求める。そして式(3)のように CO<sub>2</sub> 濃度から地球全体の平均気温を算出する。算出された気温により異常気象の発生率を算出する。異常気象が発生すると GDP が 99% になるものとする。また  $x$  はシミュレーションを開始してからの経過年を表す。

シミュレーションの基本的な条件は環境省の平成 19 年度環境循環白書のデータを採用する。これによると、化石燃料に依存しつつ高い経済活動をした場合である 2000 年から 100 年後に世界の平均気温が 4℃ 上昇する。これを実現するようにシミュレーシ

ョンの 1 ステップを 1 年、として実行し 100 ステップで 4℃ になるように調整する。調整にはエージェントの政策の方向性や式(4)の異常気象の発生率、GDP から CO<sub>2</sub> 濃度に換算する際の換算係数を調整する。CO<sub>2</sub> 排出量を削減し始める温度である臨界温度をパラメータとしてシミュレーションを実行した。

シミュレーション開始時の条件は平均気温を 14.5℃、CO<sub>2</sub> 濃度を 375ppm とする。シミュレーションが停止する条件はシミュレーション開始から平均気温が 5℃ 上昇したときである。これは平均気温が 5℃ 上昇すると地球が壊滅的な打撃を受けるからである。

またシミュレーションには 2 つの効果を加える。環境 NGO と技術革新である。

環境 NGO は環境問題に存在する囚人のジレンマを解消するために第 3 者的な立場から国家に助言や環境政策優先を働きかける。具体的な効果は表 2 に示す。

技術革新は法的措置により技術革新を進めていく方法である。京都議定書での削減目標や洞爺湖サミットで掲げられた目標などを参考にその目標に到達させるために国家が CO<sub>2</sub> 削減を満たす技術革新を行うというものである。技術革新の効果は GDP から CO<sub>2</sub> 濃度への換算係数を減少させることによって表す。具体的には式(6)に示すように式(2)に係数  $a(x)$  を導入する。技術革新が年々進行する様子を式(6)で表す。

## 3. シミュレーション条件

シミュレーションは次の条件で行ってみた。

- 1) NGO の働きかけがある場合とない場合で実行する。
- 2) 技術革新の効果がある場合とない場合で実行する。
- 3) 臨界温度を 14.5, 15.5, 16.5, 17.5, 18.5, 19.5℃ と変える。
- 4) シミュレーションは同じ条件で 10 回ずつ行いその平均値を求める。
- 5) 仮にシミュレーションが 19.5℃ に達しない場合はシミュレーション開始から 2000 年過ぎた段階で終了として成功という評価を与え、各条件の回数を求める。

## 4. シミュレーション結果

シミュレーション結果は以下ようになった。技術革新がある場合ではシミュレーション開始から 2000 年に以上経った結果が得られたので技術革新がない場合は 5℃ 上がったときの年数を、技術革新がある場合はシミュレーション開始から 2000 年に以上経った割合を集計した。

まず技術革新がない場合のシミュレーション結果は下のグラ

フに示す。グラフの横軸は CO<sub>2</sub> 削減を優先し始める平均気温である臨界温度を表し縦軸は平均気温が 5°C 上昇するまでの年数を表している。

シミュレーション結果としては臨界温度が低ければ低いほど平均気温が 5°C 上昇するまでにかかる年数が長くなった。また NGO の働きかけがある場合の方がない場合と比べて平均気温が 5°C 上昇するまでの年数が長くなった。よって環境問題に存在する囚人のジレンマを解消する方法として環境 NGO を働きが有効であることがわかった。

また技術革新がある場合のシミュレーション結果としては臨界温度が低いほど成功率が上がった。しかし NGO の働きかけがある場合とない場合ではどちらが良い結果となったか判断がしにくい。環境 NGO の働きかけがある場合は成功率が発生する臨界温度が 18.5°C までであるのに対し環境 NGO の働きかけがない場合は 17.5°C である。しかし臨界温度が 16.5°C と 17.5°C の成功率は環境 NGO の働きかけがない場合の方が高い。本来なら環境 NGO の働きかけがある場合の方がない場合よりも高いはずであるが、これには環境 NGO の効果より技術革新による効果の方がはるかの大きいのが原因である。これを解消するにはもっとシミュレーションの回数を多くすることが必要で、シミュレーション回数を多くすることにより環境 NGO の働きかけがある場合の方が成功率の上昇が見られるという結果が考えられる。

これらの結果から京都議定書で課せられた目標と洞爺湖サミットで掲げられた目標は臨界温度が 15.5°C から環境問題に本気で取り組みれば、それによって持続可能な地球が実現できるであろうことがわかった。

### 5CO<sub>2</sub>削減目標に対する検討

最後にどれだけ CO<sub>2</sub> 排出量を削減すれば良いかを解析する。5章に示す技術革新の効果を加えたシミュレーションで用いた式では 50 年目から先は排出量を 50% にするとしたが、式で削減する目標値をもう少し下げしてみる。式(6)に年数を入れていくと 80 年目の 111.0% というのはあり得ない削減目標なので本シミュレーションでは 50 年から 75 年までの 6 つの条件でシミュレーションを行う。

シミュレーション結果を図 5 に示す。これによると 55 年だと 30%、60 年だと 90%、65 年以降だと 100% の確率でシミュレーションが停止しなかった。よって式(6)に従って CO<sub>2</sub> 排出量をこれから 65 年間削減し 65 年後に現在の 77.5% 削減することができれば確実に持続可能な地球が達成できるという結果になった。

## 6 結 言

結果として地球が救われるための CO<sub>2</sub> 削減目標が解析できた。しかし現状の時点で 2010 年に世界全体の CO<sub>2</sub> 排出量を 94% にするのは厳しい。本論文を書いている 2009 年の現段階で基準年よりも CO<sub>2</sub> 排出量が増えている。そのため目標を確実に実行させるための拘束力がなくては持続可能な地球の達成は難しいであろう。

今後シミュレーションの精度を上げるために技術革新の効果を考えるだけでなく、エージェント間の相互作用の効果を検討す

る必要があると考えられる。また植林などによる CO<sub>2</sub> 吸収量を増やす効果も考慮していく必要があると考えられる。

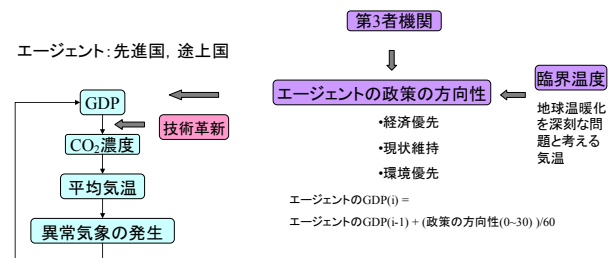


Fig.1 flow chart

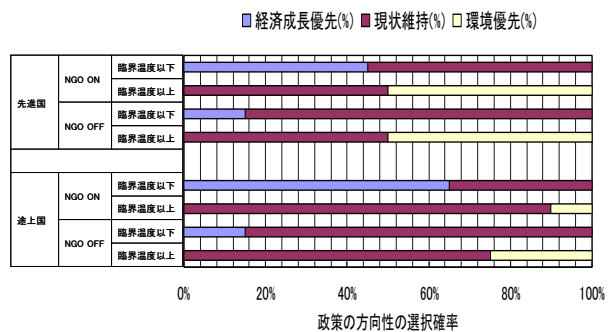


Fig2 Policy direction

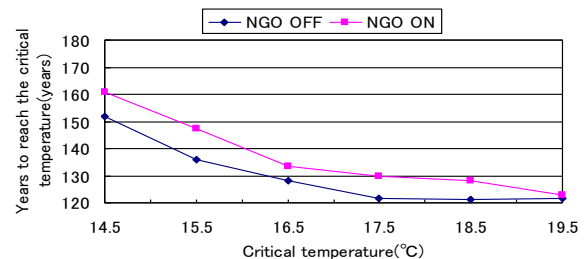


Fig.3 Years that become 19.5°C

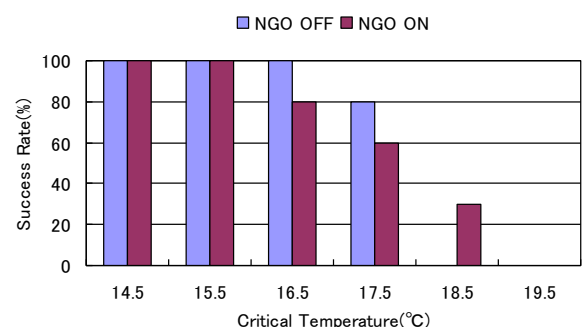


Fig.4 Simulation result

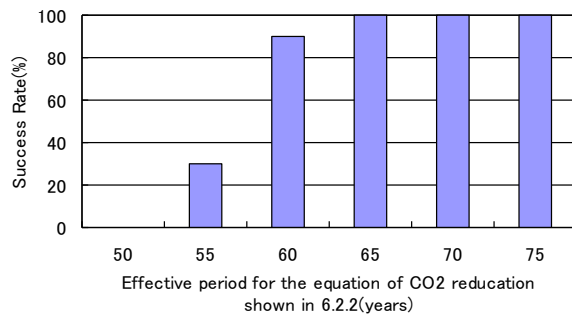


Fig5 Saved condition

$$GDP(x) = GDP\_A(x) + GDP\_D(x) \cdots (1)$$

$$CO_2(x) = CO_2(x-1) + GDP(x) * 0.0043 - 18.3 \cdots (2)$$

$$TEMPERATURE(x) = 14.5 + (CO_2(x) - 375) * 4 / 285 \cdots (3)$$

$$PROBABILITY(x) = (TEMPERATURE(x) - 14.5) / 20 \cdots (4)$$

$$CO_2(x) = CO_2(x-1) + GDP(x) * 0.0043 * a(x) - 18.3 \cdots (5)$$

$$a(x) = \left( -\frac{1}{75}x^2 - \frac{3}{10}x + \frac{295}{3} \right) * \frac{1}{100} \cdots (6)$$

## 7.参考文献

<sup>1)</sup>山影進 服部正太 コンピュータのなかの人工社会 共立出版

<sup>2)</sup>平成 19 年度環境循環白書