気候変動の経済分析

阪本浩章 *

June 16, 2017

1　はじめに

気候変動に関する経済学的な分析は，理論と実証の両面で，研究のフロンティアを急速に広げつつある．理論面では，新世代の気候経済モデルが開発され，自然科学の知見と結び付きながら政策上の意思決定に積極的に活用されるようになってきた．また実証面でも，個人用計算機の性能が向上し，様々な大規模データが利用可能になったことで，気候と経済との間にある因果関係を明らかにしようとする機運が高まっている．このような潮流は，気候の変化が徐々に顕在化する中で，その影響の解明と処方箋の提供とが，これまで以上に差し迫った課題として認識されるようになったことの現れでもある．本稿では，気候変動問題の一般的な背景を整理した上で，経済学における近年の研究動向を紹介する．

2　問題の背景

人類が地球環境に与えてきた影響の中で，おそらくは最もスケールの大きなものの 1 つが，二酸化炭素の排出である．図 1 のパネル A に見られるように，人為起源の二酸化炭素の排出は，当初は専ら森林伐採等の土地利用の変化によって生じていた．それが，産業革命を契機に，石炭や石油，天然ガスといった化石燃料が消費されるようになり，経済活動は大量の二酸化炭素の排出を伴うものになった．とりわけ 20 世紀の半ば以降はこの傾向が顕著で，直近の 10 年間（2006 年から 2015 年）だけでも，炭素量に換算して 100GtC（1GtC は 10 億炭素トン）を超える二酸化炭素が大気中に排

*千葉大学法政経学部

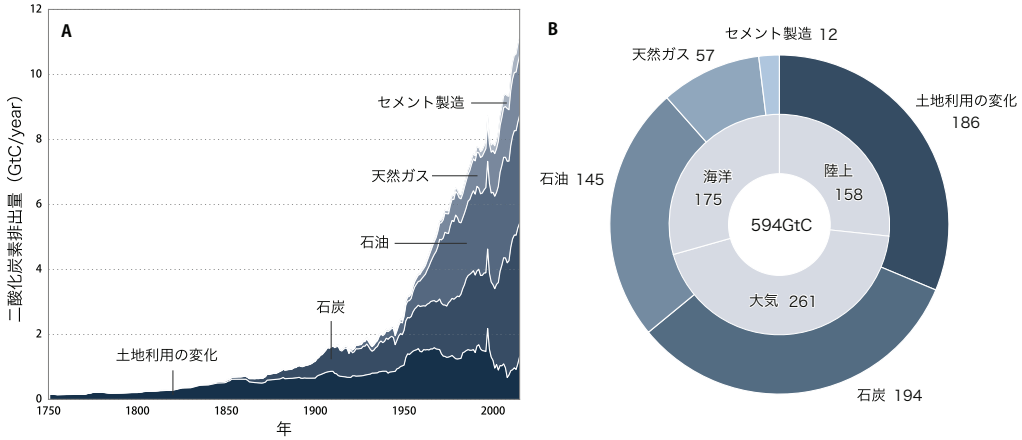

図 1: 二酸化炭素の排出量，累積排出量，蓄積先の内訳． パネル A は年間排出量の推移を排出源の内訳と共に示したもの．パネル B の外側の円は，1750 年から 2015 年の累積排出量を排出源ごとに示したもの．内側の円は，同じ期間の累積吸収量を吸収源ごとに示したもの．単位はいずれも GtC．値は Le Quere et al. (2016) に基づく．

出されている．排出された二酸化炭素の一部は，陸上や海洋に吸収されることで，地球の炭素循環の中に組み込まれてゆく．図 1 のパネル B に示したように，過去 250 年間の累積排出量 594GtC のうち，158GtC は陸上に，175GtC は海洋に吸収されたと見積られている[1]．一方，累積排出量のおよそ 44%にあたる 261GtC は依然として大気中にとどまっており，これが人為起源の気候変動の原因と考えられている．

現在，地球の大気に含まれる二酸化炭素の量は毎年 5GtC を超えるペースで増加しており，2015 年時点でその総量は 850GtC を超えている[2]．これは，数十万年間の長期スケールで見ても，未曾有の水準である．図 2 のパネル A は，大気中の二酸化炭素の総量[3]について，過去 80 万年間の推移を示したものである．またパネル B には，同じ図を直近の 1000 年間について（つまりはパネル A の右端を）拡大して表示してある．過去のデータからは，氷期と間氷期のサイクルに合わせた周期的な変動は見られるものの[4]，地球の大気に含まれる二酸化炭素の量はおおむね 400–600GtC 程度にとどまっていたことが分かる．約 1 万 2000 年前に始まった現在の間氷期にあっても，二酸化炭素の水準は 600GtC 弱で安定的に推移していた．それが，1850 年前後を境にして急激な上昇に転じている．これは，既に上で見たように，産業革命以降の化石燃料の消費によって大量の二酸化炭素が排出され，その一部が大気中に蓄積されたためである．

大気中に含まれる二酸化炭素の増加は，図 2 のパネル D に示したよう

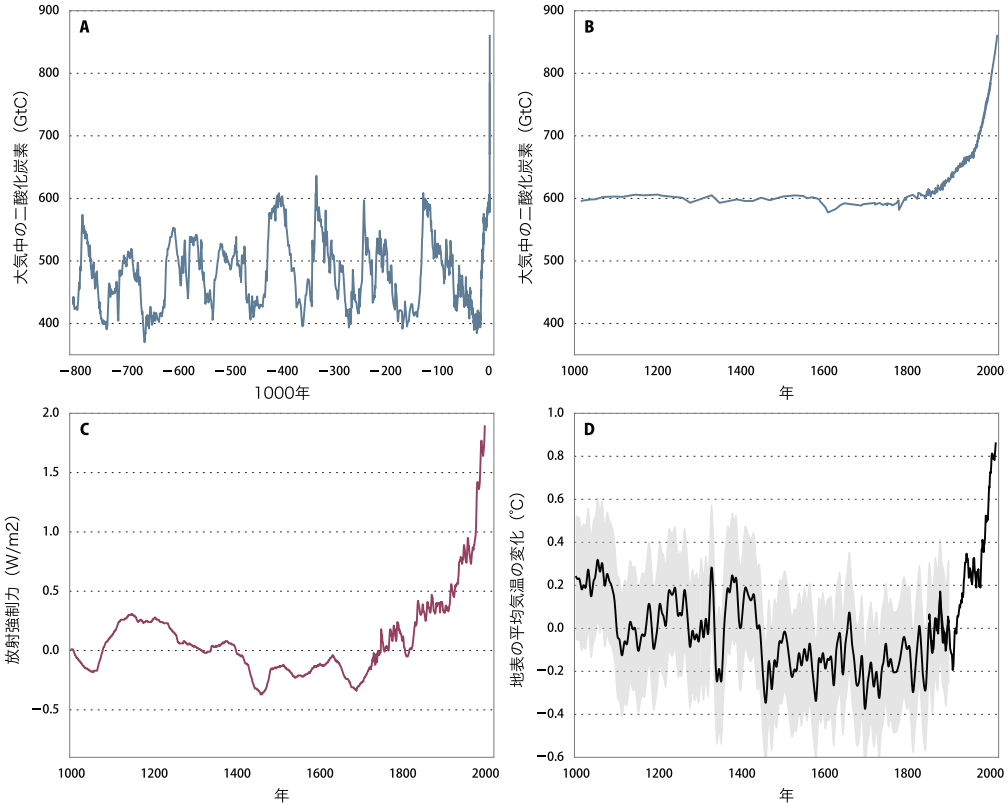

図 2: 大気中の二酸化炭素，放射強制力，地表の平均気温の推移． パネル A とパネル B は，氷床コアから得られたデータ (Luthi et al., 2008; Bereiter et al., 2015) と大気から得られたデータ (Keeling et al., 1976; Thoning et al., 1989) を組み合わせたもの．パネル C は，温室効果ガスによる効果に加えて，エアロソルや日射量の変化を合わせた放射強制力（ただし火山活動の影響を除く）を示している (Crowley, 2000)．パネル D は，Mann et al. (2008) および Morice et al. (2012) によるもので，気温は 1850–1900 年の平均値からの乖離で表わしてある．

な，地表の平均気温の急激な上昇傾向を生み出したと考えられている．地表の気温は，地球が太陽から受容するエネルギーと宇宙に放出するエネルギーとが均衡する水準で安定する．よく知られているように，大気中の二酸化炭素は，地表から放射されたエネルギー（赤外線）の一部を吸収することで，地球が受け取る正味のエネルギー量を増加させる (Fourier, 1824; Foote, 1856; Tyndall, 1861)．産業革命以前は，この二酸化炭素の温室効果を含めて，地球のエネルギー収支はおおむね均衡していたと考えられる．それが，二酸化炭素の急激な増加によってエネルギー収支の均衡が崩れ，地表の気温を押し上げているのである．より具体的には，産業革命以前の均衡と比較したエネルギー収支の変化は，放射強制力（radiative forcing）と呼ばれる単位面積あたりのエネルギー量で表現される．例えば，二酸化

炭素による放射強制力は対数関数によって近似できることが知られており (Arrhenius, 1896)，したがって時点 t における放射強制力は

$$F_t = F_{2\times} \log_2 \left(\frac{M_{0,t}}{\bar{M}_0} \right) + \bar{F}_t \tag{1}$$

のような形で与えられる．ここで，$M_{0,t}$ は時点 t における大気中の二酸化炭素の量，$\bar{M}_0$ は基準となる時点（多くの場合 1750 年）における二酸化炭素の水準である．パラメタの $F_{2\times}$ は，二酸化炭素の大気中含有量が基準値から 2 倍になった場合の放射強制力を表わすもので，その推定値は $F_{2\times} = 3.71$ である (Myhre et al., 1998)．この二酸化炭素による影響に，エネルギー収支に寄与する他の要因 $\bar{F}_t$ を加えた，正味の放射強制力 F_t の推移を図 2 のパネル C に示した．隣のパネル D と比較すると，単純な放射強制力の変化だけでも過去の気温の振る舞いをある程度説明できることが分かる．

もっとも，放射強制力の変化が直ちに気温の変化につながるわけではない．言ってみれば，地球の気温は「火にかけた鍋の水」のようなもので，放射強制力はその「火加減」に相当する．火を強めたからといってすぐに水が温まるわけではないし，逆に火を止めても冷めるまでには時間がかかる．そのため，気温の変化と放射強制力との関係は，例えば

$$T_t - T_{t-1} = \frac{1}{\chi} \left(F_t - \kappa(1-f) T_{t-1} \right) \tag{2}$$

のような運動方程式によって記述される (Schneider and Thompson, 1981)．ここで $\chi > 1$ は気候システムの慣性を捉えており，このパラメタの値を（単位時間の長さに応じて）適当に選ぶことで，気温の調整に時間がかかる様子を表現することができる．パラメタ κ は，温度の高い物体ほど多くのエネルギーを放出するという科学的によく知られた事実を反映したもので，$\kappa = 3.2$ と推定される (Soden and Held, 2006)．もう 1 つのパラメタ f は，フィードバック効果（気温の上昇に伴って，雲や水蒸気，あるいは地表の反射率といった気候システムの構成要素に生じる変化）を捉えている．フィードバック効果については，科学的に十分に明らかでない部分が残されており，正確な推定は容易でないとされる (Roe and Baker, 2007)．

運動方程式 (2) におけるフィードバックパラメタ f は，気候感度（climate sensitivity）と呼ばれる指標を介して，気候変動の将来予測の中で重要な役割を果たす．気候感度とは「大気中の二酸化炭素が産業革命以前と比べて 2 倍の水準で推移した時に実現するであろう気温の上昇幅」のことである．

上の (1) と (2) からなるモデルでは，二酸化炭素を $M_{0,t} = 2\bar{M}_0$ の水準で安定化させると，十分に遠い将来時点の気温は

$$\lim_{t\to\infty} T_t = \frac{F_{2\times}/\kappa}{1-f} =: s$$

に収束することが分かるから[5)]，この s が気候感度である．この指標が重要なのは，二酸化炭素の排出量が同じであっても，気候感度の値が大きければ将来の平均気温は上昇し易く，逆に値が小さければ上昇し難いからである．二酸化炭素をどの程度まで排出してよいか（あるいはどの程度削減すべきか）を考えるためには，気候感度の値をそれなりの精度で知っておく必要がある．フィードバック効果 f が未知であるために，気候感度は一定の幅を持ってしか推定することができないが，例えば IPCC (2013) は s の値は 1.5 から 4.5 の範囲にある可能性が高い（likely）としている．

以上のような背景知識は，問題の科学的な側面にいて理解を深めるのに役立つというだけでなく，経済学的な分析を進める上でも重要になる．ここでは必要最低限の事項についてのみ紹介したが，興味のある読者は，例えば Farmer and Cook (2013) や Eggleton (2013) を参照されたい．

3　理論分析

気候変動という問題に対して，経済学的な観点から最初に分析を加えたのはおそらく Nordhaus (1977) である．Nordhaus (1977) は，この問題を「考え得る中で最も甚しい外部性の例」と捉え，動学的最適化問題という伝統的な経済学の枠組みの中で，二酸化炭素の影響を内部化するための政策を論じた．ただ，当時の議論は部分均衡モデルに基づくもので，気候システムも最適化問題に対する外生的な制約として与えられるという，極めて簡素なものであった．気候変動の経済分析をより現代的な形で提示し，その後の研究の方向性を決定付けたのは，Nordhaus (1992, 1993, 1994) による DICE（Dynamic Integrated Climate-Economy）モデルである．DICE モデルは，数多くの批判に晒されながらも (Pindyck, 2013)，今なおこの分野における重要なベンチマークであり続けている．また近年では，Golosov et al. (2014) の研究を契機に新世代の気候経済モデルも開発されるようになり，理論分析における新たなトレンドになりつつある．

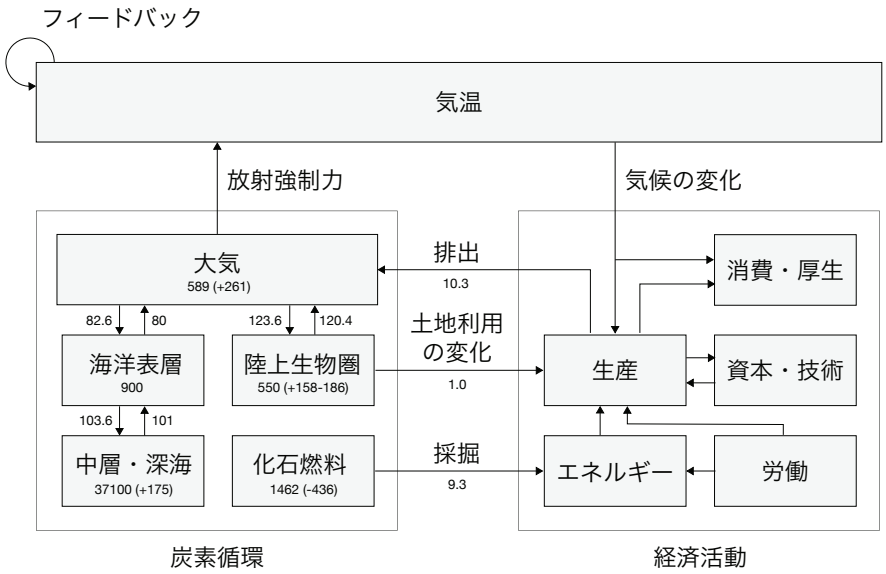

図 3: 気候経済モデル．炭素循環のストックおよびフローの数値は IPCC (2013) および Le Quere et al. (2016) に基づく．各炭素貯蓄層のストックの値は 1750 年時点の推定値，括弧内の数値は 1750-2015 年の正味変化量，矢印に付された数値は 2006-2015 年の炭素フローの年平均値．単位はいずれも GtC.

3.1 気候経済モデル

以下では，Golosov et al. (2014) のモデルも念頭に置きながら，DICE モデルに若干手を加えたものを用いて気候経済モデル[6)]の構造を説明しよう．図 3 に，モデルの概略を示した．基本的なアイディアは，Ramsey-Cass-Koopmans 型の成長モデル (Ramsey, 1928; Cass, 1965; Koopmans, 1965) に，前節で記述したような集計的な気候モデルを組み合わせるというものである．まず，時点 t における経済全体の生産技術は，

$$Q_t = A_t K_t^{\alpha} L_t^{\gamma} E_t^{1-\alpha-\gamma} \tag{3}$$

のような Cobb-Douglas 型の生産関数よって代表されると仮定する．左辺の Q_t は最終財の生産量，右辺の A_t は全要素生産性，K_t は資本ストック，L_t は労働投入量，E_t はエネルギー消費を表わす．エネルギーの生産関数には，

$$E_t = \left(\nu_0 E_{0,t}^{\rho} + \nu_1 E_{1,t}^{\rho}\right)^{\frac{1}{\rho}} \tag{4}$$

のような CES 型を想定しよう．ここで $E_{0,t}$ と $E_{1,t}$ はそれぞれ化石燃料と再生可能資源の消費量で，これらのエネルギー源は，労働 $L_{i,t}$ を生産要素と

して

$$E_{i,t} = A_{i,t} L_{i,t}, \quad i = 0, 1 \tag{5}$$

のような線形の技術で生産されるものと仮定する．時点 t の総人口を N_t で表わすと，労働力に関する制約は

$$L_t + L_{0,t} + L_{1,t} = N_t \tag{6}$$

である．二酸化炭素の排出は化石燃料の生産におおよそ比例するから，単位を適当に選ぶことで，化石燃料の消費量 $E_{0,t}$ を二酸化炭素の排出量と見なしてよい[7]．排出された二酸化炭素 $E_{0,t}$ は，

$$\begin{bmatrix} M_{0,t+1} \\ M_{1,t+1} \\ M_{2,t+1} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \phi_{0,0} & \phi_{0,1} & \phi_{0,2} \\ \phi_{1,0} & \phi_{1,1} & \phi_{1,2} \\ \phi_{2,0} & \phi_{2,1} & \phi_{2,2} \end{bmatrix}}_{=:\Phi} \begin{bmatrix} M_{0,t} \\ M_{1,t} \\ M_{2,t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{0,t} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

のような運動方程式に従って，地球の炭素循環の中に取り込まれる．既に前節で触れたように，$M_{0,t}$ は大気中の二酸化炭素の総量を表わす．一方，$M_{1,t}$ は陸上生物圏および海洋の表層に蓄積された二酸化炭素の総量，$M_{2,t}$ は深海に蓄積された二酸化炭素の総量である．行列 Φ は，図 3 に描かれたような，二酸化炭素が複数の異なる貯蓄層を循環する様子を線形関数で表現したものである．土地利用の変化に伴う二酸化炭素の排出は，単純化のために捨象してある．時点 t における平均気温 T_t は，大気中の二酸化炭素含有量 $M_{0,t}$ に応じて，前節で導入した (1) と (2) を通して定まる．これで，経済活動が地球の平均気温に影響を及ぼす経路を描写したことになる．

一方，平均気温が経済活動に及ぼす影響については，いわゆる損害関数（damage function）を用いて表現されるのが一般的である．損害関数とは，「平均気温が T_t 度上昇した場合に総生産の何割に相当する損害が生じるか」を見積ったものである[8]．ここでは，$\Omega(0) = 1$ および $\lim_{T\to\infty} \Omega(T) = 0$ を満たす任意の減少関数 Ω によって，損害関数を $1 - \Omega(T_t)$ で表わそう．つまり，平均気温が T_t 度上昇した場合に生じる損害の総額を $D_t = (1 - \Omega(T_t))Q_t$ で表わす．すると，生産量から損害額を減じた「正味の生産量」Y_t は

$$Y_t = Q_t - D_t = \Omega(T_t) Q_t = \Omega(T_t) A_t K_t^{\alpha} L_t^{\gamma} E_t^{1-\alpha-\gamma} \tag{8}$$

のように書ける．この（正味の）生産は

$$C_t + I_t = Y_t \tag{9}$$

のような形で消費 C_t と投資 I_t とに振り分けられ，投資は

$$K_{t+1} = (1 - \delta_K)K_t + I_t \tag{10}$$

のように資本ストックを増加させる．ここで，δ_K は単位時間あたりの資本の減耗率である．一人当たりの消費を $c_t := C_t/N_t$，個人の効用関数を $u(c, T)$，時間選好率を $\rho > 0$ として，時点 t における社会厚生は，

$$W_t = \sum_{\tau=t}^{\infty} \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^{\tau-t} N_\tau u(c_\tau, T_\tau) \tag{11}$$

のような功利主義的社会厚生関数によって与えられるものと仮定する．上の (1)–(11) を全て合わせたものが，我々の気候経済モデルである．

気候経済モデルには，異時点間の資源配分や二酸化炭素の排出削減に関する基本的なトレードオフが記述されており，経済学の理論に根差した費用と便益の比較を可能にしている．気候変動に伴う外部性の影響も，抽象度の高い集計レベルではあるが，モデルを必要以上に複雑にしない形で導入される[9]．(1)，(2)，および (7) からなる「気候システム」は，現実の気候の振る舞いを詳細に描写するには心許無いが，自然科学の知見を必要に応じて取り込むだけの拡張性を持つ．研究上の関心に応じて，モデルにより詳細な構造を与えることも，あるいは部分的に単純化することも極めて容易である．DICE モデルが四半世紀をかけて示してきたように，現実をバランスよく抽象化した気候経済モデルは，自然科学的な知見と社会科学的な知見とを単一の枠組みの下で統合し，それを政策に反映させるための効果的なプラットフォームとして機能する．

3.2 炭素の社会的費用

気候経済モデルを用いた分析の一例として，炭素の社会的費用（social cost of carbon: SCC）に関する研究を紹介しよう[10]．SCC とは，「二酸化炭素を炭素換算で 1 トン追加的に排出することで生じる社会的な費用」のことを言う[11]．これは，「大気中の二酸化炭素を 1 炭素トン削減することで得られ

る社会的な便益」と言い換えてもよい．現時点で二酸化炭素を削減すれば，将来時点に予測されている気温の上昇を（わずかに）抑制することができる．それに伴って，本来であれば生じるはずであった気候変動に起因する損害を，部分的に回避することが可能となる．そしてこの便益を，削減費用と比較可能な形で（つまりは金銭的な現在価値で）評価したものがSCCである．SCCの推定値は，二酸化炭素1炭素トンの「価格」と解釈できるため，炭素税の議論とも結び付いて政策的な意味を持たせやすい．

理論的には，時点 t におけるSCCは

$$\mathrm{SCC}_t = \frac{-dW_t/dM_{0,t+1}}{dW_t/dC_t} \tag{12}$$

で定義される．分子の $-dW_t/dM_{0,t+1}$ は，時点 t において二酸化炭素を追加的に排出することによって（したがって $M_{0,t+1}$ を限界的に増加させることによって），社会厚生が減少する程度を表わしている．これを分母にある消費の限界効用（つまり W_t と C_t の限界的な交換比率）で除してあるのは，社会厚生で測った損害を時点 t の消費財の単位に換算するためである．一見して (12) からは明らかでないかもしれないが，SCCとは，二酸化炭素の排出によって各将来時点に生じる社会的費用を現在価値換算で足し上げたものに他ならない．実際，上の (11) を用いれば，(12) は

$$\begin{aligned}
\mathrm{SCC}_t &= \sum_{\tau=t+1}^{\infty} \underbrace{\left(\frac{1}{1+\rho}\right)^{\tau-t} \frac{u_c(c_\tau, T_\tau)}{u_c(c_t, T_t)}}_{=:R_{C,\tau}} \underbrace{\left(-\frac{dC_\tau}{dM_{0,t+1}}\right)}_{=:\Delta C_\tau} \\
&\quad \underbrace{-\frac{u_T(c_t, T_t)}{u_c(c_t, T_t)}}_{=:p_t} \sum_{\tau=t+1}^{\infty} \underbrace{\left(\frac{1}{1+\rho}\right)^{\tau-t} \frac{u_T(c_\tau, T_\tau)}{u_T(c_t, T_t)}}_{=:R_{T,\tau}} \underbrace{\left(\frac{dT_\tau}{dM_{0,t+1}}\right)}_{=:\Delta T_\tau} \\
&= \sum_{\tau=t+1}^{\infty} R_{C,\tau}\Delta C_\tau + p_t \sum_{\tau=t+1}^{\infty} R_{T,\tau}\Delta T_\tau
\end{aligned} \tag{13}$$

のように書き直すことができる．右辺の ΔC_τ は，時点 t における二酸化炭素の排出によって時点 $\tau \geq t+1$ に生じる消費への影響である．一方 $R_{C,\tau}$ は，（消費の）割引因子と呼ばれるもので，将来時点 τ における消費財 C_τ の（現在時点 t における消費財 C_t と比較した）相対的な価値を表わしている．したがって $R_{C,\tau}\Delta C_\tau$ は，二酸化炭素の排出によって時点 τ に生じる消費への影響を，現在価値（C_t の単位に換算したもの）で捉えたものである．

同様に，$R_{T,\tau}\Delta T_\tau$ は時点 τ に生じる気温上昇の直接的な負効用の（T_t の単位で測った）現在価値である．C_t と T_t とは異なる「財」であるから，(13) の第一項と第二項とを足し合わせる際に，二つの財の交換比率 p_t を用いて消費財の単位に統一している[12)]．

一般に，(12) あるいは (13) によって与えられる SCC について，その値を推定するためには数値計算が必要になる．モデルをカリブレイトした上で（つまり，パラメタの値を現実と整合性を持つように設定して）計算機に最適化問題を解かせることで，モデルの均衡を求めたり SCC を計算したりするのである．例えば Nordhaus (2014) は，DICE-2013R モデルのシミュレーションに基いて，2015 年時点の SCC の値を 1 炭素トンあたり 69 ドル（二酸化炭素 1 トンあたりで 18.6 ドル）と見積っている．また，米国では「炭素の社会的費用に関する省庁間作業部会（interagency working group: IWG）」が立ち上げられ，DICE モデル，FUND モデル (Tol, 1997; Waldhoff et al., 2014)，PAGE モデル (Hope et al., 1993; Hope, 2006) という 3 つの代表的な気候経済モデルを用いて SCC の値が推定された (Greenstone et al., 2013)．IWG (2015) によると，SCC の値は，後ほど触れる割引率の値に応じて，1 炭素トンあたりで 41 ドルから 207 ドル（二酸化炭素 1 トンあたりで 11 ドルから 56 ドル）程度とされている．

一方，数値計算を用いずに，いくつかの仮定を組み合わせることで SCC を解析的に求める研究も盛んになってきている (Gerlagh and Liski, 2012; Iverson, 2013; Golosov et al., 2014; Gerlagh and Liski, 2014; Traeger, 2015; van den Bijgaart et al., 2016)．具体的には，例えば

$$d(T;s) := e^{\frac{\ln(2)}{s}T} - 1 \tag{14}$$

として，$u(c,T)$ と $\Omega(T)$ をそれぞれ

$$u(c,T) = \ln(c) - \xi_u d(T;s), \quad \Omega(T) = e^{-\xi_y d(T;s)} \tag{15}$$

のように特定化してみよう．パラメタの $\xi_u, \xi_y > 0$ は，平均気温の上昇が個人の効用と集計経済に及ぼす影響をそれぞれ捉えている[13)]，また，十分に長い単位時間（少なくとも 10 年）を想定することで，資本減耗率を 100%（すなわち $\delta_K = 1$）で近似する．人口は一定の率で成長するものとして，単位時間あたりの成長率を $n < \rho$ としよう．さらに，二酸化炭素以外の要因が放射強制力に与える影響はどの時点でもおおよそ一定であると仮定して，

それを $\bar{F}$ で表わす．すると，時点 t における消費に占める SCC の割合は，

$$\frac{\mathrm{SCC}_t}{C_t} \approx \frac{2^{\frac{\bar{F}}{F_{2\times}}}}{\bar{M}_0}\left(\frac{\xi_y}{1-\alpha\beta}+\xi_u\right)\frac{F_{2\times}}{(1-\beta)\chi s+\beta F_{2\times}}\beta b \tag{16}$$

のような「公式」によって近似できる[14]．ここで，β は割引率を人口成長率で調整したもの（つまり $\beta := (1+n)/(1+\rho)$）で，$b > 0$ は行列 $(1-\beta\Phi)^{-1}$ の第一行第一列目の要素である．(16) を用いれば，最適化問題を数値的に解くことなく，SCC の値を直接に計算することが可能である．

このようなシンプルな SCC の公式は，上に述べたような単純化の仮定に依存しており，数値計算に基づく SCC の推定を完全に代替するものではない．しかしながら，計算過程がブラックボックス化しがちな数値分析を補完するものとして，近似的ではあっても閉形式で解を得ることは有用である．とくに，(16) の右辺は気候システムや損害関数，生産技術，選好といったモデルの構成要素に関するパラメタから成っており，構成要素のそれぞれが SCC の決定要因としてどの程度重要であるのかを見てとることができる．また，右辺のパラメタの中には，その妥当な値についておおまかな合意が存在するものもあれば，現時点では科学的に明らかになっていないものや，更なる実証研究を必要とするものもある．議論の余地が残されている部分について，特定の仮定を置いた上で数値計算の結果を示すのではなく，(16) のように検証が容易な形で SCC を提示することは，政策的な議論を建設的な形で進める上でも重要であろう．

3.3 理論分析の課題

関心のある読者のために，気候変動の理論分析に関する他の研究課題についても言及しておく．もっとも，気候変動の経済分析で扱われるテーマは多岐に渡り，その全てを網羅的に記述することは現実的でない．気候変動の経済学的な分析に関する全般的な紹介については Kolstad and Toman (2005) を，分析手法を含む詳細な解説については Karp and Traeger (2016) を参照されたい．マクロ経済モデルに焦点を当てた最近の研究動向については，Hassler et al. (2016) の解説が参考になる．以下では，いくつかの主要なテーマに限って，その要点をまとめることにする．

3.3.1 割引率

気候変動が経済学的な関心事となって以来，一貫して主要な論点であり続けてきたのが割引率である．ここで言う割引率とは，割引因子（$R_{C,\tau}$ や $R_{T,\tau}$）の減少率を指し，その役割は資本市場における実質利子率との類比によって理解できる．例えば，利子率が年率で 4%であったとすると，現時点の 1 ドルは一年後の $1 + 0.04 = 1.04$ ドルと交換可能である．この時，1 年後に得られる 1 ドルの現在価値は $1/(1+0.04) \approx 0.96$ ドルであると言ってよい．同様にして，2 年後に得られる 1 ドルの現在価値は $1/(1+0.04)^2 \approx 0.92$ ドルである．明らかに，利子率が高ければ将来の 1 ドルの現在価値は小さくなり，それが遠い将来時点であるほど利子率の影響を大きく受ける．これは，将来時点に何らかのリターンを見込める投資プロジェクトを考えた時，そのリターンの現在価値が利子率に応じて変わってくるということである．相対的に低い利子率の下では投資に値する案件であっても，利子率が高まればプロジェクトの実施は正当化できなくなるかもしれない．

気候変動の文脈で割引率（≈ 利子率）が重要になるのは，二酸化炭素を削減するための費用が直ちに生じるのに対して，その便益の大部分は遠い将来時点になるまで得られないからである．このような長期的な「投資プロジェクト」においては，割引率が費用便益分析の結論を大きく左右する．例えば，IWG (2015) の推定によると，割引率を年率 5%とした場合の SCC は 41 ドル程度であるのに対して，2.5%の割引率では 207 ドルにもなる．100 ドルの費用をかけて二酸化炭素を 1 炭素トン削減するプロジェクトは，前者の想定では正当化されないが，後者の想定では実施すべきものと判断される．より極端な例では，例えば SCC を (16) のような公式で近似した場合，$\lim_{\rho \to n} \mathrm{SCC}_t = \infty$ となることが示せるから，時間選好率（割引率の一部）が十分に小さければどのような費用を払ってでも二酸化炭素を削減すべきということになる．この例が端的に示すように，気候変動に関する費用便益分析は割引率の想定に対して極めてセンシティブであり，それゆえに適切な割引率の値を決定するための議論が今も続いている．このテーマに関する近年の研究成果については，Gollier (2012) および Gollier and Hammitt (2014) に詳しい．

3.3.2 不確実性

気候変動の経済分析の中では，不確実性を如何にして考慮するかという論点も避けて通ることはできない．考慮すべき不確実性は，大きく分けて 3

つある．社会経済に関する不確実性，気候システムに関する不確実性，そして気候変動の損害に関する不確実性である．まず，気候変動は非常に長期間にわたって生じる問題であるから，遠い将来時点の社会経済の状況について，ある程度の見通しが必要になる．しかしながら，社会全体がこの先どの程度豊かになるか（A_t）や，二酸化炭素を削減する技術がどの程度の速さで進歩するか（$A_{i,t}$）といったことは，いずれも大きな不確実性を含む．次に，たとえ社会経済の発展や二酸化炭素の排出経路を所与としたとしても，それがどの程度の気候変動をもたらすのかを正確に予測することは困難である．前節で既に触れたように，気候システムのフィードバック効果（f）の推定は容易でなく，また炭素循環（Φ）についても不確実性が残されている (Joos et al., 2013)．したがって，実際に生じる気候変動は予想されているものよりも小規模になる可能性もあれば，逆に想定外に深刻なものになる可能性もある．さらに，気候変動の程度自体に不確実性がなかったとしても，それによって引き起こされる損害（ξ_u や ξ_y）については，そのかなりの部分が十分に明らかにされていないか，あるいは全くの未知である．次節で述べるように，近年の実証研究によって，気候と社会経済との間にある因果関係は徐々に解明されつつある．それでも，人類が過去に経験したことのないような気候変動の影響を推し量ることは，実証研究の発展を以ってしても困難である．気候変動の経済分析においては，このような不確実性が残り続けることを前提に，いかにして合理的な意思決定が可能であるかを考えなければならない．理論分析における不確実性の取り扱いについては，例えば Traeger (2009)，Heal and Millner (2014)，Lemoine and Traeger (2016) などに詳しい．

3.3.3　ゲーム

気候変動が持つ際立った特徴は，その影響が遠い将来時点にまで及ぶことと，因果関係の様々な次元に不確実性が存在することである．これらの特徴は，上で述べたように，二酸化炭素に対する最適な価格設定を困難にする．しかしさらに厄介なのは，仮に最適な価格設定に関するコンセンサスが得られていたとしても，それをそのまま政策に反映させられるわけではないということである．大気中の二酸化炭素は国境を越えた負の公共財であり，したがってその水準を管理するための政策は各国の戦略の影響を免れない．世界全体にとって最適な政策が個々の国家にとって最適であるとは限らないため，現状に明らかな非効率性が存在しても，状況を改善する

ことは困難である．このことは，気候変動に関する国際的な枠組み作りが遅々として進まず，現時点でも十分な実行力を持った条約が存在していないことからも分かる．

また近年では，国家間だけでなく，世代間の依存関係も注目されるようになってきている．現世代が次世代の利益を必ずしも代表しないように，次世代も現世代の望む通りに行動するとは限らない．後続の世代がどのように振る舞うか（についての信念）に応じて，現在の世代が取るべき行動も異なったものになる．例えば，現在世代による単純な二酸化炭素の削減は，後続世代による二酸化炭素の排出によって容易に相殺され得る．このような世代間の戦略的依存関係を前提とすれば，低コストで実現可能な排出削減政策よりも，高額な初期投資を必要とする再生可能エネルギーへのコミットメントの方が効果的な気候変動政策になる可能性もある．国家間ゲームの理論的な取り扱いに関しては Barrett (2005) や Finus and Caparros (2015) が[15]，世代間ゲームについては Karp (2005, 2007, 2016) や Karp and Rezai (2014) が参考になる．

3.3.4 数値分析

もはや計算機を用いない実証分析など考えられないように，近年では，理論分析についても手計算だけで完結するものではなくなりつつある．とくに気候変動の経済分析は数値計算と密接に結び付いており，モデルを解析的に特徴付けるだけでなく，分析結果を定量的に解釈することも当然のように求められる．上に挙げたような研究課題に取り組むためには，経済理論に精通しているのはもちろんのこと，数値計算に関する基礎的な理解とプログラミングのスキルが不可欠である．初期の研究における数値分析は，不確実性の影響を考慮するものであっても，あるいは戦略的な状況を扱うものであっても，オープンループ型の解に焦点を当てた単純なものが多かった (Roughgarden and Schneider, 1999; Nordhaus and Yang, 1996)．しかし最近では，動的計画法を数値計算によって解くことで，不確実性下における学習効果を定量化したり，動学ゲームのマルコフ完全均衡を求めたりといった形で，より複雑な分析が一般的になってきている (Lemoine and Rudik, 2017; Sakamoto et al., 2017)．また，気候経済モデルは標準的な経済モデルに比べて状態変数の数（次元）が多く，次元の呪い（curse of dimensionality）と呼ばれる問題を克服することも 1 つの課題になる．経済学への応用を念頭に置いた数値分析の解説については，Judd (1998) や Miranda and Fackler

(2002) を参照されたい．

4　実証分析

理論分析に比べて，気候変動の影響に関する実証分析は，問題の重要性が広く認識されるようになってからも経済学者の関心を十分に集めてこなかった．気候と経済との関係を精査できるだけのデータが整備されておらず，因果関係を識別するための手法も確立されていなかったからである．しかし最近になって，様々な気候データを経済データと結びつけることが可能になり，適切な計量分析の手法についてもある程度の共通認識ができたことで，気候の変化が経済活動に及ぼす影響を明らかにしようとする機運が高まりを見せている．以下では，主に時系列データを用いた分析に焦点を当てながら，気候変動に関する近年の実証研究について概観する．

4.1　分析の手法

気候変動に関する実証研究の中で求められるのは，気候に関する変数と社会経済に関する変数との間にある，恒常的な因果関係を特定することである．例えば，x を気候変数（気温や降水量，特定の気象条件の発生頻度や強度など），y を経済変数（農産物の生産高や労働供給量，生産性，健康状態，犯罪率など）としよう．また，x 以外の y に影響を与える変数を集めたベクトルを $\boldsymbol{z}$ で表わそう．我々が知りたいのは，h と m を未知の関数として，これらの変数が

$$y = h(x) + m(\boldsymbol{z}) \tag{17}$$

のような関係にあった場合の関数 h の形状である．気候に関する変数の多くは，（少なくとも短期的には）経済活動に対して外生的に与えられるものである．したがって，(17) における関数 h は，x から y への因果関係を捉えたものと見てよい．

(17) のようなモデルを推定するためには，当然ながら，x の値について十分なバリエーションを持った標本が必要になる．気候変数 x の実現値に幅を持たせる方法の 1 つは，気候条件の異なる地域を含むクロスセクションデータを用いることである．具体的には，例えば x を年間の平均気温，y を熱中症に起因する年間死亡率として，x と y との間に存在する（かもしれない）因果関係に関心があるとしよう．この場合，平均気温の異なる二つの国の死亡率を比較することで，平均気温の変化が死亡率に及ぼす影響

を推定することができる．もちろん，死亡率を左右するのは平均気温だけではないから，適当な変数を $\boldsymbol{z}$ に加えて他の要因をコントロールできることが前提となる．気候変動の影響を分析した初期の実証研究の多くは，このようなクロスセクションデータを用いたものであった (Tol, 2009)．

クロスセクションデータを用いた分析の問題は，$\boldsymbol{z}$ を通してコントロールすべき要因が必ずしも明らかでなく，本来考慮すべき説明変数を省略してしまうリスクが常に存在することである．特に，y の値を左右する変数で，x とも相関するようなものを $\boldsymbol{z}$ に含めなかった場合，分析の結果はバイアスを伴ったものになる．熱中症の例では，一般的な傾向として，経済の発展に伴って死亡率は低下する．その一方で，発展途上国の多くが低緯度地域に位置しているため，経済発展の水準は平均気温と負の相関関係を持つ．したがって，経済発展の影響を $\boldsymbol{z}$ の中で考慮しなかった場合，推定結果は平均気温の影響を過大に評価する可能性が高い．このような単純な例では自明であるが，一般には，省略変数の有無やその影響を確認することは困難である．

また，必要な説明変数を省略することのないよう，なるべく多くの変数をコントロールすればよいという訳でもない．平均気温や降水量といった気候に関する変数は，多様な経路を通じて社会経済に影響を及ぼすため，$\boldsymbol{z}$ に含まれる他の説明変数が内生的に x の影響を受けたものになる可能性が高いからである．例えば，y に対する経済発展の影響をコントロールする方法として，GDP を説明変数に加えることが考えられる．しかしながら，GDP 自体が気候の影響を受ける内生変数であるため，GDP をコントロールしてしまうと，x が GDP を介して間接的に y に与える影響を捉えることができない．説明変数を $\boldsymbol{z}$ に加える際には，外生変数の中から適当なものを探すか，内生変数であっても気候の影響を受けないものを慎重に選ぶ必要がある．

このような背景から，気候変動に関する実証研究の最近の傾向として，時系列データやパネルデータが頻繁に用いられるようになってきている．平均気温や降水量といった気候に関する変数は，同一の地点で観測されたものであっても，時間を通じておおよそランダム変動する．したがって，クロスセクションデータのように異なる地点を比較せずとも，十分に長期間の観測データがあれば，自然の変動を通じて x の値にバリエーションを得ることが可能である．さらに，同じ地点を異なる時点で比較するものであるがゆえに，他の説明変数を $\boldsymbol{z}$ に加える必要性も低い．トレンド項や固定効果を適切に導入しさえすれば，y を説明するその他の要因を（観測不可

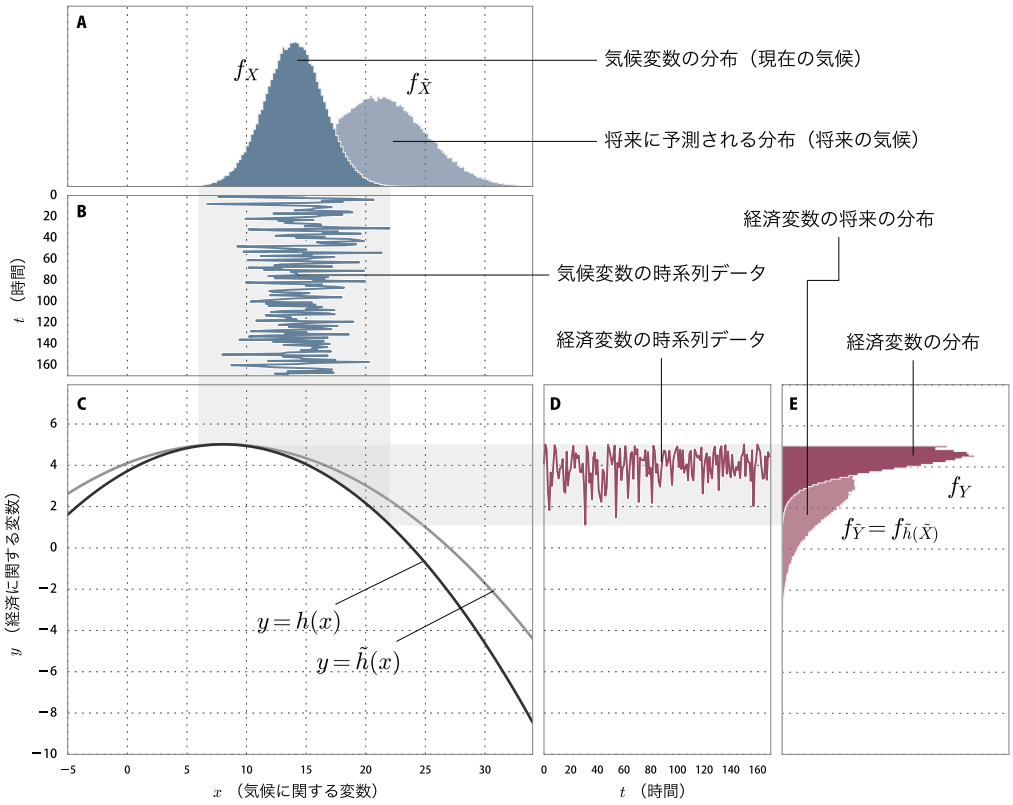

図 4: 時系列データを用いた実証分析の概略. 分布やデータは架空のもの．Carleton and Hsiang (2016) の Fig. 1 を参考に作成.

能なものも含めて）ある程度コントロールすることができる．分析の結果として得られる関数 h の情報は，気候変数 x が様々な経路を通して y に与える正味の影響を捉えたものになる．

図 4 は，時系列データを用いた実証分析のアイディアを図示したものである．概念の上では，平均気温のような気候変数は確率変数であり，特定の確率分布に従ってその実現値が生成される．実現する平均気温の値は毎年異なるが，その背後にある確率分布自体は，少なくとも短期的には一定である．パネル A に示したように，気候変動とはこの確率分布が（例えば f_X から $f_{\tilde{X}}$ に）変化することに相当し，それに伴って，気候変数の実現値が以前とは異なったものになり易くなる．このような分布の変化が，どのようなメカニズムを通して，またどの程度の規模で生じるのかを明らかにすることは，主に自然科学的な研究課題である．一方，経済学的な実証研究で問題になるのは，関心のある経済変数が気候変数の影響を受けるかどうか，そして影響を受けるのだとしたら，その経済変数の分布が将来ど

のように変化するのかということである．我々が直接観察できるのは，現在の気候の下で実現した気候変数 x の時系列データ（パネル B）と，対応する経済変数 y の時系列データ（パネル D）である．これらのデータを適切に用いることで，x と y との間に存在する因果関係 $y = h(x)$ を明らかにすることができる（パネル C）．そしてこの因果関係を所与とすれば，気候変動に伴って気候変数の分布が f_X から $f_{\tilde{X}}$ に変化した場合に，経済変数の分布は f_Y から $f_{\tilde{Y}}$ へと変化するであろう，といった予測が可能になる（パネル E）．

このようなアプローチは，クロスセクションデータを用いた分析に比べて頑健な推定を可能にするが，その推定結果の解釈には注意を要する．とくに，時系列データから読み取ることができるのは，あくまで経済変数が短期的な気象（weather）の変動に対してどのように反応するかということであり，それは必ずしも長期的な気候（climate）の変化に対する反応を意味しない．例えば，ある気候（パネル A の f_X）の下で平均気温が $x = 20$ 度（非常に稀な実現値）であった場合と，別の気候（パネル A の $f_{\tilde{X}}$）の下で平均気温が 20 度（平均的な実現値）であった場合とでは，人々の期待値が異なる分，経済の反応も異なったものになると考えられる．また，たとえ期待値の影響がなかったとしても，気候が変化してゆく過程で，人々の行動や経済の構造は新たな気候に適応したものになってゆくはずである．そのような適応が可能である分，将来時点における因果関係（パネル C の $\tilde{h}$）は，現時点で観察される因果関係 h とは異なったものになる可能性がある．

4.2 気候と経済成長

実証分析の具体的な例として，平均気温が各国の経済成長に及ぼす影響について，実際にパネルデータを用いて推定してみよう．下準備として，まずは気候に関するデータを分析に適した形式に整える作業が必要になる．気候に関するデータは，その多くが自然科学的な研究での利用を念頭に置いたものであり，そのままでは経済学の研究に適さないことが多い．物理的な観測データと社会経済の統計とを組み合わせることで，気候変数を経済学的に意味のある形で定義し直す必要も生じる．具体的には，気温や降水量に関する主要な時系列データは，地表を格子状に区切ったグリッドデータ形式で提供されており，国や行政区域の単位で測られる経済変数に直接的には対応しない．また，グリッドデータの各セルの値を単純に集計しただけでは，経済分析に適した変数にならないことも多い．とくに，経済分

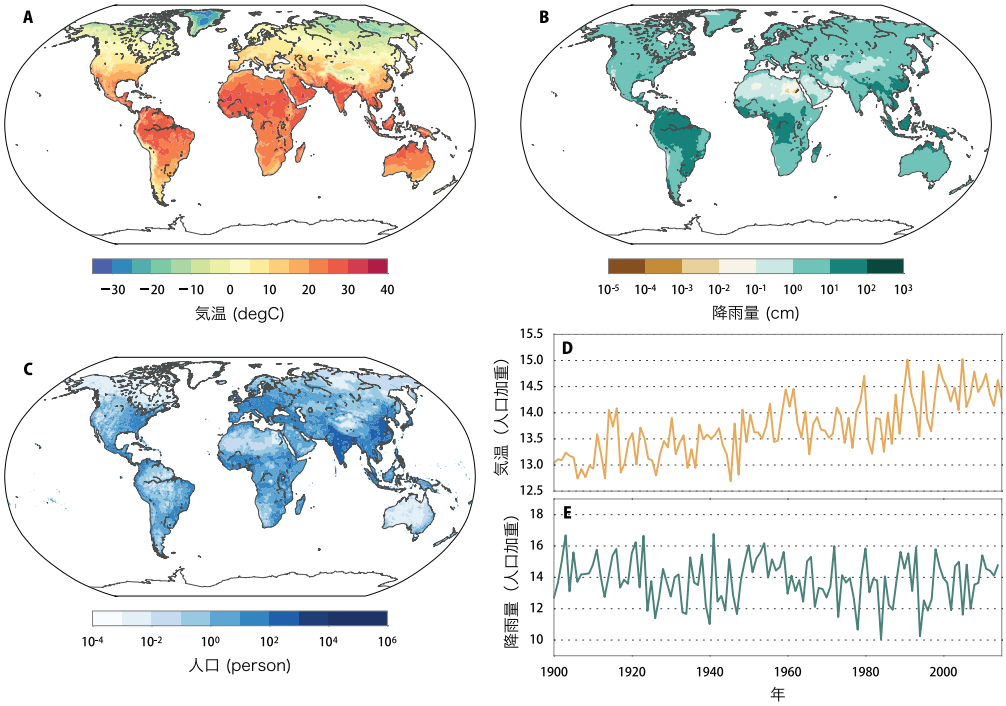

図 5: 気候変数に関するパネルデータの作成． パネル A と B は，2000 年の平均気温と平均降水量を示したもので，Willmott and Matsuura (2015) のグリッドデータに基づく．パネル C は，CIESIN (2016) によるグリッドデータを用いて同年の人口分布を示したもの．パネル D と E は，二つのデータを組み合わせて作成した 1900 年から 2014 年までのパネルデータについて，具体例として日本の時系列データを示したもの．

析で重要になるのは実質的な影響であるから，例えば人口の少ないセルで起こる気候の変化よりも，人口の多いセルで起こる変化の方が相対的に大きな意味を持つ．したがって，ある国の経済活動に対する気候の影響を測るためには，国境で囲われた領域に含まれるセル内の気候について，それぞれのセル内の人口で加重平均をとったものを用いる必要がある．

ここでは，Willmott and Matsuura (2015) のグリッドデータを基にパネルデータを作成してみる．このデータでは，1900 年 1 月から 2014 年 12 月までの，月ごとの気温と降水量が 0.5 度四方のセル単位で提供されている．一方，各セル内の人口については，CIESIN (2016) によるグリッドデータ（こちらは 2000 年時点の分布で固定する）が利用可能である[16]．それぞれのグリッドデータから得た気温，降水量および人口について，2000 年時点の値を図 5 のパネル A–C に示した．これらのデータに各国の領土データを組合わせることで[17]，人口で重み付けられた気温と降水量の時系列データを国単位で得ることができる．一例として，日本の気温と降水量につい

表 1: 気候変数の経済成長率への影響

	(1) 全標本	(2) アイルランド	(3) 米国	(4) 南アフリカ	(5) 全標本	(6) 1960–1992	(7) 1993–2014
$T_{i,t}$	-0.045	2.571^{**}	-0.176	-2.961^{***}	1.466^{***}	1.069^{***}	1.025^{***}
	(0.165)	(1.170)	(0.730)	(1.024)	(0.320)	(0.351)	(0.395)
$T_{i,t}^2$					-0.052^{***}	-0.053^{***}	-0.044^{***}
					(0.009)	(0.014)	(0.014)
$P_{i,t}$	0.021	-0.287	-0.515	-0.307	0.242^{**}	0.366^{**}	0.077
	(0.042)	(0.613)	(0.481)	(0.436)	(0.116)	(0.181)	(0.133)
$P_{i,t}^2$					-0.007^{***}	-0.010^{**}	-0.003
					(0.003)	(0.005)	(0.003)
標本サイズ	7391	44	54	54	7391	3763	3628
R^2	0.271	0.248	0.137	0.371	0.274	0.335	0.431

注: 表中の *，**，*** は，それぞれ 10%，5%，1%の水準で推定結果が統計的に有意であることを意味する．括弧内の数字は標準誤差．

て，セルごとの人口で加重平均をとった時系列データを図 5 のパネル D–E に示した．被説明変数である経済成長率は，World Bank (2016) のデータベースから取得することにしよう．このデータベースには，各国の一人あたり GDP 成長率について，1960 年から 2015 年までの不完備パネルデータが含まれている．

計量モデルについては，さしあたって

$$g_{i,t} = \alpha_i + \beta T_{i,t} + \gamma P_{i,t} + \mu_t + \theta_{i,1} t + \theta_{i,2} t^2 + \epsilon_{i,t} \tag{18}$$

のような線形モデルを考えよう．左辺の $g_{i,t}$ は国 i の時点 t における一人あたり GDP 成長率，右辺の $T_{i,t}$ と $P_{i,t}$ はそれぞれ平均気温と降水量（いずれも人口加重平均）で，残りの $\theta_{i,1} t + \theta_{i,2} t^2$ は各国に固有のトレンドをコントロールするための項である．モデルの推定結果を，表 1 の 1 列目に示した．いずれの係数も統計的に有意でなく，この結果からは，気温や降水量は経済成長率に影響を及ぼさないように見える．一方，世界全体のデータを用いるのではなく，標本を国別の時系列データに限定すると，国によっては気温の影響が有意になってくる．例えば，表 1 の 2–4 列目は，アイルランドと米国，南アフリカを部分標本とした場合の結果をそれぞれ示している．米国に関しては依然として有意な影響が見られないが，アイルランドでは平均気温の上昇が経済成長率を押し上げるのに対して，南アフリカでは逆に経済成長率を低下させることが分かる．

この種の分析に一早く取り組んだ Dell et al. (2012) は，成長率への影響が国によって異なるのは，主に所得水準の違いによるものであると考えた．

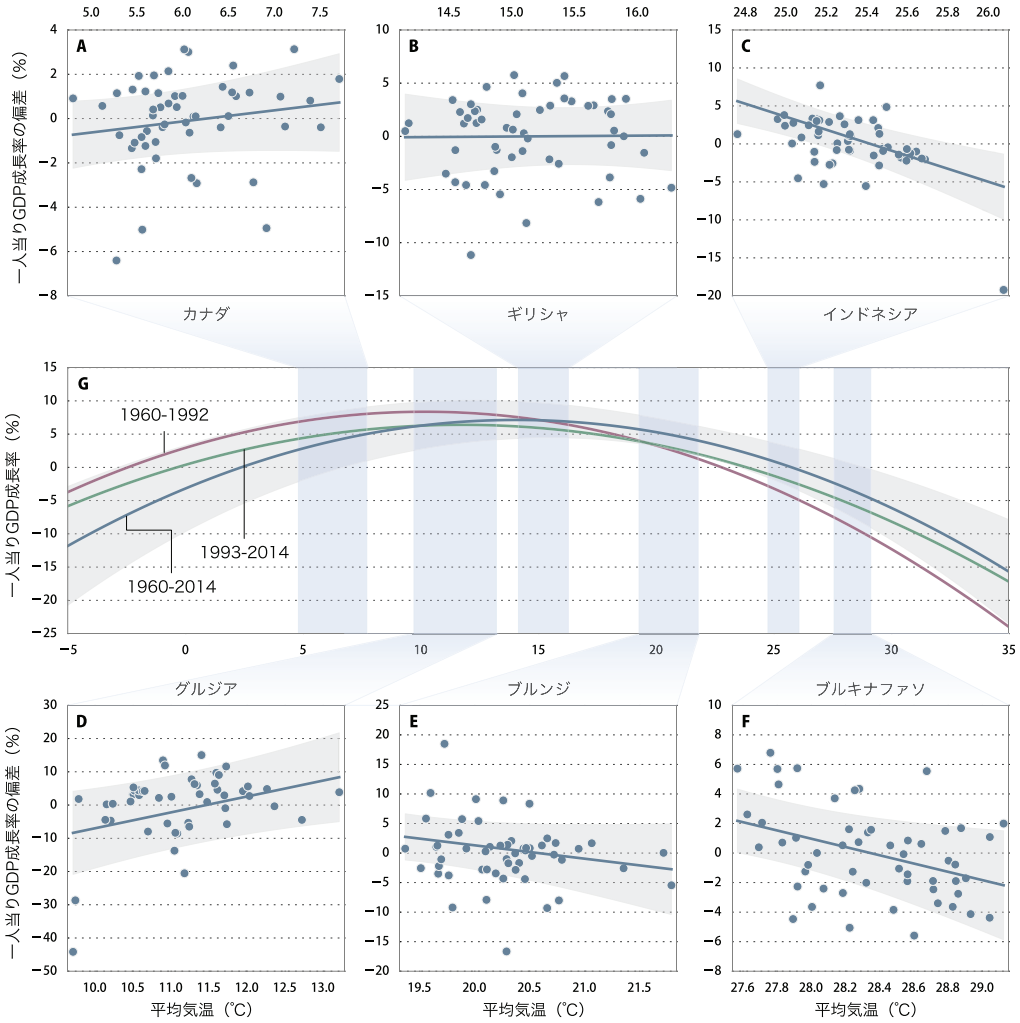

図 6: 平均気温が経済成長率に及ぼす影響． パネル A–F は，線形モデルを仮定して国ごとに推定した結果を示している．パネル G は，非線形モデルを仮定した上で，標本全体（1960–2014）および部分標本（1960–1992，1993–2014）を用いて推定した結果．網掛けされた領域は 90%信頼区間．

例えば，高所得国と低所得国とに標本を大きく分割した場合，高所得国では（有意でない）正の影響が見られるのに対して，低所得国では負の影響が確認できる (Dell et al., 2012)．この解釈に従えば，平均気温と経済成長率との間の因果関係（図 4 の関数 h）は，所得の水準に応じて変化することになる．一方，同様の分析を行なった Burke et al. (2015) は，影響に差があるのは平均気温の絶対的な水準が国によって異なるためであり，因果関係そのものは世界全体でおおよそ共通であると見ている．実際，(18) に非線形の項を加えて分析を行うと，表 1 の 5 列目に示したように，世界全体の標本を用いた場合にも十分に有意な結果を得る．より具体的には，気

温と成長率との間には図 6 のパネル G に示したような逆 U 字型の関係が存在し，気温が「最適な水準」である 14 ℃付近から乖離するにつれて経済成長率は低下する．したがって，平均気温が限界的に上昇した場合，現時点での気温が比較的低い国では成長率を押し上げる一方で，気温が既に高い国では成長率を低下させることになる（パネル A–F）．同様の関係は，高所得国のみ（あるいは低所得国のみ）を標本とした場合にも認められ，所得をコントロールしても結果は大きく変わらない[18]．将来もこの因果関係に大きな変化がないとすれば，例えば IPCC (2013) の将来予測シナリオ等と組み合わせることで，気候変動によって各国の経済成長がどのような影響を受けるかをある程度予測することができる．

4.3 実証分析の課題

気候変動の実証分析については，既に優れたサーベイ論文が複数存在しており，関心のある読者はそちらを一読することを薦める．とくに，パネルデータを用いた研究の包括的な解説については Dell et al. (2014) を，豊富な具体例を交えた近年の研究動向の紹介については Carleton and Hsiang (2016) を参照されたい．また，方法論に関する議論については Hsiang (2016) が詳しく，気候データの取り扱いについては Auffhammer et al. (2013) が参考になる．以下では，気候変動の実証分析における主立った論点を簡単にまとめる．

4.3.1 適応

おそらく最も大きな論点は，このような実証研究を通して，果たして長期的な気候変動の影響を捉えられるのかということである．既に上でも触れたように，長期的な気候の変化による影響は，短期的な気象の変動による影響と必ずしも一致しない．例えば，例年になく気温が高くなったというケース（気象の変動）では，予期せぬ暑さに熱中症の患者が増加することも起こり得る．しかし高い平均気温が常態化している場合（気候の変化）であれば，おそらくは多くの人が水分補給のための飲料水を携帯する習慣を身に付けており，同じ気温であっても難を逃れるという可能性もある．あるいは，気候の変化によって空調機器が従来必要とされなかった地域にも普及すれば，気候変数と経済変数との結び付きは，過去のデータが示すほど強いものではなくなるかもしれない．さらに中長期的には，気候が変化した事実が広く認識されることで，変化後の気候に適した農作物の品種が

開発されたり，頻発する異常気象に対応できるインフラが整備されたりといった形で，影響を緩和するような技術革新が促されることも考えられる．このような適応策の中には，技術的に既に利用可能で，気候の変化を人々が認識するだけで効力を持つものもあれば，今後の外生的な技術発展とともに実現するであろうものや，気候変動が起こることで初めて経済合理性を満たすようになるものもある．

将来の適応可能性を予測することは極めて困難であるが，今あるデータを基にして，過去に適応が生じたかどうかを問うことはできる．例えば，表 1 の 6–7 列目および図 6 のパネル G には，標本を二つの期間（1960 年から 1992 年および 1993 年から 2014 年）に分割した場合の結果を示してある．1992 年以前と 1993 年以降とで推定された因果関係に大きな変化はなく，この期間に限って言えば，効果的な適応は生じなかったように見える．この間に社会経済を取り巻く環境は大きく変わり，また気候の変化もある程度生じていたこと（図 2 のパネル D）を考えると，この結果は，少なくとも気温と経済成長率との因果関係については，適応が容易でないことを示唆している．一方，適応の可能性が極めて大きいケースも存在する．例えば，米国における気温と死亡率との因果関係は 1960 年以前と以降とで劇的に変化しており，その大部分が空調機器の普及によって説明できることが知られている (Barreca et al., 2016)．したがって，このような健康面での直接的な影響については，現時点では強い因果関係が確認されている途上国であっても，経済の発展に伴って適応が進む可能性が高い．

4.3.2　前例のない気候の影響

時系列データを用いた実証分析は，説明変数の値にバリエーションを得る方法として，自然のランダムな変動を利用している．そのため，この方法によって推定される因果関係は，気候変数の実現値が比較的狭い範囲（図 4 で網掛けされた範囲）にある場合にしか妥当性を持たない．例えば，図 6 のパネル A–F からも明らかなように，各国の気温が平均値から 2 ℃以上乖離することはほとんどない．したがって，平均値から 3 ℃や 4 ℃も乖離するような場合について，それが経済にどの程度の影響を及ぼすのかを予測することは難しい．多くの場合，線形の因果関係をそのまま延長したり，あるいはより保守的に，観測された影響の最大値を観測範囲外にも適用したりといった形で，場当たり的に対応しているのが現状である (Houser et al., 2015)．上で紹介した経済成長率への影響の例では，世界全体をカバーする

パネルデータを用い，全ての国に共通する因果関係を推定することで，この問題を部分的に回避している．

関連する論点として，経験的に得られた因果関係を延長するだけでは，気候変動によって構造的な変化が生じる場合に対応できないという問題もある．気温が3℃上昇することの意味を気温が2℃上昇した過去の経験から類推することは，気候や経済の仕組みに構造的な変化が生じないことを前提とすれば妥当である．しかしながら，例えば気候システムの臨界点（tipping points）の存在を考えた場合，これは適当な想定ではなくなってくる．気候システムの臨界点とは，平均気温がある閾値を超えると，海洋の深層循環の停止やグリーランドにおける氷床の不安定化といった，大規模で不可逆的な変化がシステム全体に生じることを指して言う．Lenton et al. (2008) によれば，気温の上昇幅の閾値はおおよそ 3 度から 6 度である可能性が高く，その閾値を一端超えると大幅な海面上昇や気象条件の極端な変化を引き起こしかねないとされる．あるいは，気候システムの構造に変化はなくとも，平均気温の上昇に伴う大規模な難民や紛争の勃発によって，社会経済が構造的な変化を強いられる可能性もある．このような破局的な事象について，その蓋然性や規模を定量化することは困難であるが，何らかの形で影響評価に組込むことが求められている．

4.3.3　影響の経路

気候変数が経済変数に及ぼす影響の程度については，近年の実証研究の中で特定されつつある．しかしながら，その影響が具体的にどのような経路を通じて生じているのかという，背後にあるメカニズムについては明らかにならないことが多い．これは，影響の経路に関する具体的な構造を与えずに，(18) のような誘導型モデルを推定しているからである．気候変数が経済変数に影響を及ぼす経路は，潜在的には無数に存在し，その全てが観察可能であるとは限らない．したがって，あらゆる経路を考慮した「正味の影響」を知ることができるのは，誘導型モデルを用いた研究の利点でもある．一方で，メカニズムをブラックボックスにしたまま因果関係を推定しているがゆえに，その推定結果は柔軟性を欠いたものになる．例えば，観察された因果関係の中で与件とされていた事情が，将来の時点で妥当性を持たなくなることが分かっていても，それを適切な形で将来予測に反映させることができない．とくに，将来予測の中では適応の可能性（およびそのために必要となる費用）を考慮することが重要になるが，具体的な影響

の経路を知らずにそういった情報を反映させることは困難である．

4.3.4　一般均衡効果

別の論点として，異地点間あるいは異時点間での相互作用の影響が，局所的な影響と区別されずに推定されてしまっているという問題もある．例えば，ある地点（時点）の平均気温は一定であったとしても，他の地点（時点）の平均気温に変化があった場合には，気温に変化のなかった地点（時点）にも何らかの影響が生じる可能性が高い．あるいは，同程度の気温の上昇であっても，特定の地点（時点）だけがそれを経験する場合と，全ての地点（時点）が同時に経験する場合とでは，全体での影響が異なるのはもちろんのこと，局所的な経済変数への影響も異なったものになるはずである．ある地点（時点）で行われるはずであった経済活動が，気候変数の影響によって別の地点（時点）に置き換えられるだけのこともあれば，市場価格への影響や生産要素の移動を通じて複雑な一般均衡効果を生み出すことも考えられる．こういった影響については，計量モデルに空間的（時間的）なラグを導入することで部分的に捕捉することができるが，十分な分析が行なわれていないのが現状である．

5　おわりに

本稿では，気候変動の経済分析に関する近年の研究を，理論と実証の両面について概観した．理論面では，気候経済モデルの解析モデルとしての有用性が改めて認識され，政策的な活用を強く意識した研究が多くなってきている．実証面では，時系列データが積極的に活用されるようになり，社会経済がいかに気候に依存したものであるかを明らかにしつつある．課題は依然として多いが，この分野の研究がかつてない程に活発化していることは間違いない．また研究上の大きな潮流として，気候変動に関する経済分析が，単なる経済学的な分析ではなくなってきているということも指摘できる．理論面でも実証面でも，他の学問領域の知見を経済分析の中に取り込むことで，例えば自然科学系の学術誌で高い評価を得ることも決して珍しいことではなくなってきた．今後は，経済学的な方法論に根差した研究を進めると同時に，分野の垣根を越えた研究に取り組んでゆくことも，より一層求められるようになるだろう．

注

1）人為起源の二酸化炭素は，気候変動とはまた別の問題として，海洋に大量に吸収されることで海洋酸性化（ocean acidification）と呼ばれる問題も引き起こしており，海洋生態系への悪影響が懸念されている．

2）気候変動に関する最新のデータは，例えばアメリカ海洋大気庁のウェブサイト（https://www.climate.gov）等から入手できる．データの可視化については，アメリカ航空宇宙局のウェブサイト（http://climate.nasa.gov）なども参考になる．

3）大気中の二酸化炭素は濃度（concentration）で表示されることも多く，その場合の単位には ppm が用いられる．ここでは，地球全体の炭素循環とのつながりを示すために，大気中の二酸化炭素をその総量で表わし，単位に GtC を採用する．なお，1ppm は約 2.13GtC に相当する．

4）大気中の二酸化炭素の量が増加すると，温室効果が強まることによって海水の温度も上昇する．一方で，海水の温度が上昇すると，それまで海に溶け込んでいた二酸化炭素が大気中に放出され，温室効果を更に強めることになる．つまり，大気中の二酸化炭素の増加は，温暖化の原因であると同時に，温暖化の結果でもある．氷期から間氷期へと移行する過程では，ミランコビッチサイクルと呼ばれる日射量の周期変動によって，まずは大気および海水の温度が（温室効果を通さずに）上昇し，それを契機として海水の二酸化炭素が大気中に放出されることで，温暖化のフィードバックループが生じると考えられている (Shakun et al., 2012).

5）話を簡単にするために，ここでは二酸化炭素以外の放射強制力の変化 $\bar{F}_t$ は無視している．

6）気候システムと経済システムとを統合的に扱うモデルは，自然科学で用いられる複雑なモデルも含めて，一般に統合評価モデル（Integrated Assessment Models: IAM）と呼ばれる．DICE モデルを中心にした IAM 全般のサーベイとしては，例えば Nordhaus (2013) がある．

7）本来であれば，石油や石炭などの種類ごとに分けて考えるべきであるが，単純化のためにここでは「化石燃料」を 1 つの財として扱う．

8）なお，「平均気温が T_t 度上昇した場合に何ドルの損害が生じるか」といった問いにはあまり意味がない．同程度の気候の変化であっても，経済活動の規模が大きければ大きいほど，損害の「額」は大きくなると考えられるからである．

9）このような形で気候変動の影響をモデル化することについては，例えば Stern (2013) が批判的な検討を行なっている．

10）SCC に関する最近の研究としては，例えば Anthoff and Tol (2013)，Greenstone et al. (2013)，Weitzman (2013)，Nordhaus (2014)，Moore and Diaz (2015)

などがある．SCC のサーベイとしては Tol (2013) を，展望的な解説については Pizer et al. (2014)，Burke et al. (2016) を参照されたい．

11) 炭素量換算ではなく，二酸化炭素を 1 トン追加的に排出することで生じる社会的な費用として定義されることもあり，その場合には「二酸化炭素の社会的費用（social cost of CO_2）」などとも呼ばれる．炭素の質量を 12 と定義した場合の二酸化炭素の相対質量は 44 であるから，二酸化炭素 1 トンあたりの SCC は，1 炭素トンあたりで計算した SCC の $12/44 \approx 0.27$ 倍になる．

12) 財の相対価格と割引との関係については，Weikard and Zhu (2005)，Hoel and Sterner (2007)，Gollier (2010)，Traeger (2011) などが詳しく論じている．

13) パラメタ ξ_u, ξ_y の適切な値は，モデルで想定される気候感度 s の値に依存することに注意しておく．つまり，モデル上で気候感度 s の値を変更する場合，実質的な影響 $\xi_u \Delta(T; s), \xi_y \Delta(T; s)$ が変更前と同等の水準となるように，ξ_u, ξ_y の値も変更する必要がある．

14) この (16) の導出は，単純であるが煩雑なため，本稿では割愛する．興味のある読者は，例えば Gerlagh and Liski (2012) や Traeger (2015) が類似の公式を導出しているので，そちらを参照されたい．

15) 最近では，契約理論の観点から環境条約を分析する研究も増えている (Harstad, 2012, 2016; Pichler and Sorger, 2016; Battaglini and Harstad, 2016)．ただし，このトレンドの先駆けとなった Harstad (2012, 2016) の研究では，主要な命題の証明に瑕疵が見られるので注意が必要である．

16) CIESIN (2016) のデータは 0.5 度四方よりも解像度が高いため，二つのデータを突き合わせる際には，Willmott and Matsuura (2015) に合わせて人口データを部分的に集計する必要がある．

17) 領土データについては，たとえば Natural Earth（`http://www.naturalearthdata.com`）等，パブリックなデータセットが利用可能である．

18) Burke et al. (2015) の結果は，Dell et al. (2012) の結果と整合的である．低所得国の平均気温は「最適な水準」よりも右側の領域に多く分布しているのに対して，高所得国の平均気温は「最適な水準」の両側に広く分布している．したがって，線形モデルを仮定した場合，高所得国への平均的な影響は「最適な水準」の両側で打ち消し合うことになる．

参考文献

Anthoff, D. and Tol, R. S. J. (2013) “The uncertainty about the social cost of carbon: a decomposition analysis using FUND,” *Climatic Change*, 117(3), 515–530.

Arrhenius, S. A. (1896) "On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground," *Philosophical Magazine*, 41, 237–276.

Auffhammer, M., Hsiang, S. M., Schlenker, W., and Sobelz, A. (2013) "Using weather data and climate model output in economic analysis of climate change," *Review of Environmental Economics and Policy*, 7(2), 181–198.

Barreca, A., Clay, K., Deschenes, O., Greenstone, M., and Shapiro, J. S. (2016) "Adapting to climate change: the remarkable decline in the US temperature-mortality relationship over the twentieth century," *Journal of Political Economy*, 124(1), 105–159.

Barrett, S. (2005) "The theory of international environmental agreements," in Maler, K.-G. and Vincent, J. R. (eds.) *Handbook of Environmental Economics*, 3: Elsevier, Chap. 28, 1457–1516.

Battaglini, M. and Harstad, B. (2016) "Participation and duration of environmental agreements," *Journal of Political Economy*, 124(1), 160–204.

Bereiter, B., Eggleston, S., Schmitt, J., Nehrbass-Ahles, C., Stocker, T. F., Fischer, H., Kipfstuhl, S., and Chappellaz, J. (2015) "Revision of the EPICA Dome C CO2 record from 800 to 600kyr before present," *Geophysical Research Letters*, 42, 542–549.

Burke, M., Hsiang, S. M., and Miguel, E. (2015) "Global non-linear effect of temperature on economic production," *Nature*, 527, 235–239.

Burke, M., Craxton, M., Kolstad, C. D., , Onda, C., Allcott, H., Baker, E., Barrage, L., Carson, R., Gillingham, K., Graff-Zivin, J., Greenstone, M., Hallegatte, S., Hanemann, M., Heal, G. M., Hsiang, S. M., Jones, B. F., Kell, D. L., Kopp, R. E., Kotchen, M. J., Mendelsohn, R., Meng, K. C., Metcalf, G. E., Moreno-Cruz, J., Pindyck, R., Rose, S., Rudik, I., Stock, J. H., and Tol, R. S. J. (2016) "Opportunities for advances in climate change economics," *Science*, 352(6283), 292–293.

Carleton, T. A. and Hsiang, S. M. (2016) "Social and economic impacts of climate," *Science*, 353, aad9837.

Cass, D. (1965) "Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation," *Review of Economic Studies*, 32(3), 233–240.

CIESIN (2016) "Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4)," URL: http://dx.doi.org/10.7927/H4D50JX4, Center for International Earth Science Information Network - Columbia University, NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).

Crowley, T. J. (2000) "Causes of climate change over the past 1000 years," *Science*, 289, 270–277.

Dell, M., Jones, B. F., and Olken, B. A. (2012) "Temperature shocks and economic growth: evidence from the last half century," *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), 66–95.

Dell, M., Jones, B. F., and Olken, B. A. (2014) "What do we learn from the weather? the new climate-economy literature," *Journal of Economic Literature*, 52(3), 740–798.

Eggleton, T. (2013) *A Short Introduction to Climate Change*: Cambridge University Press.

Farmer, T. and Cook, J. (2013) *Climate Change Science: A Modern Synthesis Volume 1*: Springer.

Finus, M. and Caparros, A. (2015) *Game theory and international environmental cooperation: essential readings*: Edward Elgar.

Foote, E. N. (1856) "Circumstances affecting the heat of the Sun's rays," *The American Journal of Science and Arts*, 382–383.

Fourier, J.-B. J. (1824) "Remarques generales sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires," *Annales de Chimie et de Physique*, 27, 136–167.

Gerlagh, R. and Liski, M. (2012) "Carbon prices for the next thousand years," CESifo working paper No. 3855.

Gerlagh, R. and Liski, M. (2014) "Carbon prices for the next hundred years," CESifo working paper No. 4671.

Gollier, C. (2010) "Ecological discounting," *Journal of Economic Theory*, 145(2), 812–829.

Gollier, C. (2012) *Pricing the planet's future: the economics of discounting in an uncertain world*: Princeton University Press.

Gollier, C. and Hammitt, J. K. (2014) "The long-run discount rate controversy," *Annual Review of Resource Economics*, 6, 273–295.

Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., and Tsyvinski, A. (2014) "Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium," *Econometrica*, 82(1), 41–88.

Greenstone, M., Kopits, E., and Wolverton, A. (2013) "Developing a social cost of carbon for US regulatory analysis: a methodology and interpretation," *Review of Environmental Economics and Policy*, 7(1), 23–46.

Harstad, B. (2012) "Climate contracts: a game of emissions, investments, negotiations, and renegotiations," *Review of Economic Studies*, 79, 1527–1557.

Harstad, B. (2016) "The dynamics of climate agreements," *Journal of the European Economic Association*, 14(3), 719–752.

Hassler, J., Krusell, P., and Smith, Jr., A. A. (2016) "Environmental macroeconomics," in *Handbook of Macroeconomics*, 2: Elsevier, Chap. 24, 1893–2008.

Heal, G. and Millner, A. (2014) "Reflections: uncertainty and decision making in climate change economics," *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(1), 120-137.

Hoel, M. and Sterner, T. (2007) "Discounting and relative price," *Climatic Change*, 84, 265–280.

Hope, C. (2006) "The marginal impact of CO_2 from PAGE2002: an integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern," *Integrated Assessment*, 6(1), 19–56.

Hope, C., Anderson, J., and Wenman, P. (1993) "Policy analysis of the greenhouse effect: an application of the PAGE model," *Energy Policy*, 21(3), 327–338.

Houser, T., Hsiang, S., Kopp, R., Larsen, K., Delgado, M., Jina, A., Mastrandrea, M., Mohan, S., Muir-Wood, R., Rasmussen, Jr., D. M., Rising, J., and Wilson, P. (2015) *Economic Risks of Climate Change: An American Prospectus*: Columbia University Press.

Hsiang, S. M. (2016) "Climate econometrics," *Annual Review of Resource Economics*, 8, 43–75.

IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press.

Iverson, T. (2013) "Optimal carbon taxes with non-constant time preference," MPRA Paper No. 43264.

IWG (2015) "Technical support document: technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under executive order 12866," Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government.

Joos, F., Roth, R., Fuglestvedt, J. S., Peters, G. P., Enting, I. G., von Bloh, W., Brovkin, V. A., Burke, E. J., Eby, M., Edwards, N. R., Friedrich, T., Frölicher, T. L., Halloran, P. R., Holden, P. B., Jones, C. D., Kleinen, T., Mackenzie, F. T., Matsumoto, K., Meinshausen, M., Plattner, G. K., Reisinger, A., Segschneider, J., Shaffer, G., Steinacher, M., Strassmann, K. M., Tanaka, K., Timmermann, A., and Weaver, A. J. (2013) "Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis," *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(5), 2793–2825.

Judd, K. L. (1998) *Numerical Methods in Economics*: MIT Press.

Karp, L. S. (2005) "Global warming and hyperbolic discounting," *Journal of Public Economics*, 89, 261–282.

Karp, L. S. (2007) "Non-constant discounting in continuous time," *Journal of Economic Theory*, 132, 557–568.

Karp, L. S. (2016) "Provision of a public good with multiple dynasties," forthcomming in *Economic Journal*.

Karp, L. S. and Rezai, A. (2014) "The political economy of environmental policy with overlapping generations," *International Economic Review*, 55(3), 711–733.

Karp, L. S. and Traeger, C. P. (2016) "Dynamic Methods in Environmental and Resource Economics," URL: https://are.berkeley.edu/~traeger/pdf/KarpTraegerDraft.pdf.

Keeling, C. D., Bacastow, R. B., Bainbridge, A. E., Jr., C. A. E., Guenther, P. R., Waterman, L. S., and Chin, J. F. S. (1976) "Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii," *Tellus*, 28, 538–551.

Kolstad, C. D. and Toman, M. (2005) "The economics of climate policy," in Maler, K.-G. and Vincent, J. R. (eds.) *Handbook of Environmental Economics*, 3: Elsevier, Chap. 30, 1562–1593.

Koopmans, T. C. (1965) "On the concept of optimal economic growth," in *Econometric Approach to Development Planning*, Amsterdam: North-Holland Publishing, 225–287.

Le Quere, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., adn Jan Ivar Korsbakken, S. S., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S. C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Goldewijk, K. K., Jain, A. K., Kato, E., Kortzinger, A., Landschutzer, P., Lefevre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J. R., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M., Munro, D. R., Nabel, J. E., ichiro Nakaoka, S., O'Brien, K., Olsen, A., Omar, A. M., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rodenbeck, C., Salisbury, J., Schuster, U., Schwinger, J., Seferian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tian, H., Tilbrook, B., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire,

A. J., , and Zaehle, S. (2016) "Global carbon budget 2016," *Earth System Science Data*, 8, 605–649.

Lemoine, D. and Rudik, I. (2017) "Managing climate change under uncertainty: recursive integrated assessment at an inflection point," forthcomming in *Annual Review of Resource Economics*.

Lemoine, D. and Traeger, C. P. (2016) "Economics of tipping the climate dominoes," *Nature Climate Change*, 6, 514–520.

Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., and Schellnhuber, H. J. (2008) "Tipping elements in the Earth's climate system," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786–1793.

Luthi, D., Floch, M. L., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., and Stocker, T. F. (2008) "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present," *Nature*, 453(7193), 379–382.

Mann, M. E., Zhang, Z., Hughes, M. K., Bradley, R. S., Miller, S. K., Rutherford, S., and Ni, F. (2008) "Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(36), 13252–13257.

Miranda, M. J. and Fackler, P. L. (2002) *Applied Computational Economics and Finance*: MIT Press.

Moore, F. C. and Diaz, D. B. (2015) "Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy," *Nature Climate Change*, 5(2), 127–131.

Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., and Jones, P. D. (2012) "Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set," *Journal of Geophysical Research*, 117.

Myhre, G., Highwood, E. J., Shine, K. P., and Stordal, F. (1998) "New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases," *Geophysical Research Letters*, 25(14), 2715–2718.

Nordhaus, W. D. (1977) "Economic growth and climate: the carbon dioxide problem," *American Economic Review*, 167(1), 341–346.

Nordhaus, W. D. (1992) "An optimal transition path for controling greenhouse gases," *Science*, 258, 1315–1319.

Nordhaus, W. D. (1993) "Optimal greenhouse-gas reductions and tax policy in the DICE model," *American Economic Review*, 83(2), 313–317.

Nordhaus, W. D. (1994) *Managing the Global Commons*: The MIT Press.

Nordhaus, W. D. (2013) "Integrated economic and climate modeling," in *Handbook of CGE Modeling*, 1: Elsevier, Chap. 16, 1069–1131.

Nordhaus, W. D. (2014) "Estimates of the social cost of carbon: cencepts and results from the DICE-2013R model and alternative approaches," *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(1), 273–312.

Nordhaus, W. D. and Yang, Z. (1996) "A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies," *American Economic Review*, 86(4), 741–765.

Pichler, P. and Sorger, G. (2016) "The value of commitment and delegation for the control of greenhouse gas emission," Working Paper No:1604, Department of Economics, University of Vienna.

Pindyck, R. S. (2013) "Climate change policy: what do the models tell us?" *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860–872.

Pizer, W., Adler, M., Aldy, J., Anthoff, D., Cropper, M., Gillingham, K., Greenstone, M., Murray, B., Newell, R., Richels, R., Rowell, A., Waldhoff, S., and Wiener, J. (2014) "Using and improving the social cost of carbon," *Science*, 346(6214), 1189–1190.

Ramsey, F. P. (1928) "A mathematical theory of saving," *Economic Journal*, 38(152), 548–559.

Roe, G. H. and Baker, M. B. (2007) "Why is climate sensitivity so unpredictable?" *Science*, 318(5850), 629–632.

Roughgarden, T. and Schneider, S. H. (1999) "Climate change policy: quantifying uncertainties for damages and optimal carbon taxes," *Energy Policy*, 27(7), 415–429.

Sakamoto, H., Ikefuji, M., and Magnus, J. R. (2017) "Adaptation for mitigation," mimeo.

Schneider, S. H. and Thompson, S. L. (1981) "Atmospheric CO2 and climate: importance of the transient response," *Journal of Geophysical Research*, 86, 3135–3147.

Shakun, J. D., Clark, P. U., He, F., Marcott, S. A., Mix, A. C., Liu, Z., Otto-Bliesner, B., Schmittner, A., and Bard, E. (2012) "Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation," *Nature*, 484, 49–55.

Soden, B. J. and Held, I. M. (2006) "An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models," *Journal of Climate*, 19(14), 3354-3360.

Stern, N. (2013) "The structure of economic modeling of the potential impacts of climate change: grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models," *Journal of Economic Literature*, 51(3), 838–859.

Thoning, K. W., Tans, P. P., and Komhyr, W. D. (1989) "Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974–1985," *Journal of Geophysical Research*, 94, 8549–8565.

Tol, R. S. J. (1997) "On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND," *Environmental Modeling & Assessment*, 2, 151–163.

Tol, R. S. J. (2009) "The economic effects of climate," *Journal of Economic Perspectives*, 23(2), 29–51.

Tol, R. S. J. (2013) "Targets for global climate policy: an overview," *Journal of Economic Dynamics & Control*, 37(5), 911–928.

Traeger, C. P. (2009) "Recent developments in the intertemporal modeling of uncertainty," *Annual Review of Resource Economics*, 1, 261–285.

Traeger, C. P. (2011) "Sustainability, limited substitutability, and non-constant social discount rates," *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 215–228.

Traeger, C. P. (2015) "Closed-form integrated assessment and uncertainty," CESifo working paper No. 5464.

Tyndall, J. (1861) "Bakerian lecture: On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 151, 1–36.

van den Bijgaart, I., Gerlagh, R., and Liski, M. (2016) "A simple formula for the social cost of carbon," *Journal of Environmental Economics and Management*, 77, 75–94.

Waldhoff, S., Anthoff, D., Rose, S., and Tol, R. S. J. (2014) "The marginal damage costs of different greenhouse gases: an application of FUND," *Economics: the Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 8(2014-31), 1–33.

Weikard, H. P. and Zhu, X. (2005) "Discounting and environmental quality: when should dual rates be used?" *Economic Modelling*, 22, 868–878.

Weitzman, M. L. (2013) "Tail-hedge discounting and the social cost of carbon," *Journal of Economic Literature*, 51(3), 873–882.

Willmott, C. J. and Matsuura, K. (2015) "Terrestrial air temperature and precipitation: 1900–2014 gridded monthly time series (Version 4.01)," URL: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2014/README.GlobalTsT2014.html.

World Bank (2016) "GDP per capita growth (annual %)," URL: http://data.worldbank.org, World Bank Open Data.