地球温暖化問題と社会的割引の理論
Climate change and the theory of social discounting

阪本浩章 *
Hiroaki Sakamoto

平成 26 年 1 月 7 日

概 要

本稿では，主に地球温暖化問題への応用を念頭に，社会的割引に関する理論研究の動向をまとめる．問題の基本的な背景を確認した上で，特に不確実性と代替可能性に焦点を当てながら，近年の理論上の発展について統一的な枠組みの下で解説する．また，数値計算と具体例を用いて，理論的な研究成果がどのような政策的含意を持つのかを明らかにする．

Abstract

In this paper, I discuss concepts and models that lie behind the ongoing debate over climate change and discounting. By reviewing the recent developments in the theory of social discounting, I show how and on what basis relatively low and declining discount rates can be justified, especially when uncertainty and/or substitutability matters. With a practical application to the cost-benefit analysis in mind, I briefly sketch some policy implications of these theoretical developments.

キーワード： 気候変動，社会的割引，不確実性，代替可能性，持続可能性

Keywords: Climate change, Social discounting, Uncertainty, Substitutability, Sustainability

* 京都大学大学院経済学研究科（Graduate School of Economics, Kyoto University）

1　はじめに

地球温暖化問題への関心の高まりを背景にして，長期的な環境問題に適した政策評価の枠組みが求められている．地球温暖化問題に対する政策（温暖化対策）は，その実施に短期的な費用を伴う一方で，期待される便益の多くが将来時点に生じるという点で際立った特徴を持つ．費用と便益とが異なる時点に生じる場合，それらを単純に比較することによって政策の是非を論じることは適当でない．異なる時点に存在する財は，たとえ物理的には一定の量であっても，社会的に異なった価値を持つからである．経済的な制約が厳しい時点における一単位の財は，相対的に豊な社会が実現された後にもたらされる同量の財に比べて，おそらくは大きな価値を有する．逆に，資源の希少性が時間を通じて高まると予想されるのであれば，将来時点に存在する財の方が相対的に大きな価値を持つと見るべきであろう．したがって，温暖化対策に伴う費用と便益は，それぞれが生じる時点に応じて適切な重みを与えられた上で評価される必要がある．

政策評価の中で各時点の財を適切に重み付ける方法は，一般に社会的割引（social discounting），あるいは単純に割引と呼ばれる．社会的割引は決して目新しいものではなく，計画期間が複数時点にまたがる費用便益分析の中でこれまでも頻繁に用いられてきた．問題は，標準的な割引の慣行が，温暖化対策のような長期的な計画期間を持つ環境政策には必ずしも妥当しないということである．次節以降で見るように，温暖化対策による便益は数百年間という長期間に渡って生み出され続ける．そのため，遠い将来時点に生じる便益に与えられる重みの設定が政策の是非を左右する．特に，標準的な割引の手法は将来の便益に対して極めて小さな重みしか与えないため，将来時点に生じる便益の多くは政策評価に反映されないことになる．これは言い換えれば，温暖化の損害はそれが遠い将来に発生する限りでおよそ無視され得るということである．このような結論が一般的な倫理観や人々の直観と整合的でないとすれば，社会的割引はその理論的な基盤を問い直されなければならない．

以上のような問題意識から，主に環境経済学の研究者を中心にして，これまでに社会的割引の理論を再検討する試みが続けられてきた．特に 1990 年代以降は，地球環境問題が社会的に大きな関心を集めたこともあり，理論的にも実践的にも数多くの研究が蓄積された．一方で，研究領域が現時点で発展の途上にあるため，蓄積された研究成果を体系的に整理した文献は限られている．そこで本稿では，この分野における近年の展開と今後の展望を，統一的な枠組みの下で整理する．温暖化の損害評価をめぐる論争からも明らかなように，適切な割引の方法について現時点で必ずしも合意があるわけではない．それでも，それぞれの主張の妥当性を判断するための理論的な基礎は次第に整えられつつある．多くの利害関係者が同意できる温暖化対策が求められる中で，近年の研究成果が持つ意義とその政策的な含意を明らかにすることは，学術的な発展の土台を整えるというだけでなく，合理的な意思決定の手掛かりを提供するという意味でも有益であろう．

本稿の構成は次の通りである．次の 2 節では，問題の背景を改めて確認する中で，基本的な概念の導入を行なう．特に，社会的割引の理論を一般的な形で解説し，標準的なモデルを用いて温暖化問題に対する政策的な含意を明らかにする．3 節と 4 節では，近年研究上の著しい発展が見られた論点として，不確実性と代替

可能性についての議論をそれぞれ紹介する．まず 3 節では，将来の生産技術や消費経路に不確実性が存在する場合に，標準的な割引の理論がどのように修正されるべきかを明らかにする．4 節では，人工資本と自然資本との代替可能性に焦点を当てながら，複数財モデルにおける割引の理論を整理する．最後に 5 節では，その他の重要な論点に触れながら，今後の展望について簡単に述べる．

2　問題の背景

本節では，社会的割引の理論的な背景を解説すると同時に，この分野で頻繁に用いられる基本的な概念を定義する（2.1 項）．各概念やその表記は，以降の全ての節で用いられることを念頭に，抽象的かつ一般的な形で導入される．その上で，温暖化の損害評価に関する具体例を挙げながら，費用便益分析における割引理論の役割を確認する（2.2 項）．

2.1　プロジェクト評価と社会的割引

抽象的なモデルを用いて，温暖化対策のような長期間に渡って費用と便益を生じさせる公共的なプロジェクトを考えよう．このプロジェクトを実施すべきかどうかを考えた時，経済学における評価の基準は，それによって社会的な厚生が増加するかどうかである．厚生の水準を明示的に評価するために，消費の流列に関する社会的な選好が厚生関数 W によって代表されているとする．また，プロジェクトを実施する前の消費の流列を $x := (x_0, x_1, \ldots)$ で表わす．ここで，x_t は t 期の消費水準である．同様に，プロジェクトがもたらす消費の変化分を $\Delta x := (\Delta x_0, \Delta x_1, \ldots)$ で表わそう．これにより，プロジェクトを実施することによる厚生水準の変化は $\Delta W := W(x + \Delta x) - W(x)$ と書ける．ΔW の値が正であればこのプロジェクトは実施すべきであり，逆に ΔW の値が負であればこのプロジェクトは実施すべきでない．

社会的割引の理論は，このような厚生変化に基づく評価と整合的な形で，限界的な消費の変化をもたらすようなプロジェクト，つまり x に対して Δx が相対的に小さいプロジェクトについて，より簡便で直截な政策評価の方法を提供する．具体的には，社会的割引因子（social discount factor）の流列 $P := (P_0, P_1, \ldots)$ を用いて，プロジェクトの実施による純便益の割引価値 B を

$$B(P, \Delta x) := \sum_{t=0}^{\infty} P_t \Delta x_t \tag{1}$$

のように定義し，B の値が正である限りでプロジェクトは実施されるべきであると判断する．特に，社会的割引因子が $P_0 = 1$ となるように基準化されるとき，B は純便益の割引現在価値（discounted present value）であるという．以下では，社会的割引因子は現在価値に基準化されているものとする．また誤解の恐れがない限り，社会的割引因子のことを単に割引因子と表現する．

限界的なプロジェクトの実施に対して，割引価値の正負と厚生変化の正負とが一致するように割引因子が選ばれる時，その割引因子は社会的に効率的（socially efficient）であると言う．厳密な定義を与えるために，プロジェクトの開始時点で ϵ の費用をかけることで，t 期に $Z_t(\epsilon)$ の純便益が実現できるようなプロジェクトを考えよう．このプロジェクトの影響は T 期間に渡って生じるものとする．すなわち

$$\Delta x_t = \begin{cases} Z_t(\epsilon) & t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases}$$

である．プロジェクトを実施しなければ，つまり $\epsilon = 0$ であれば，費用も便益も生じないものと仮定する．したがって，すべての t について $Z_t(0) = 0$ である．また，プロジェクトの規模は限界的に調整できる，すなわち $Z_t(\epsilon)$ は ϵ について微分可能であると仮定する．

定義 1. 上記の仮定を満たす任意のプロジェクトについて，割引因子 P が

$$\left.\frac{\partial W(x+\Delta x)}{\partial \epsilon}\right|_{\epsilon=0} \geq 0 \iff \left.\frac{\partial B(P,\Delta x)}{\partial \epsilon}\right|_{\epsilon=0} \geq 0 \tag{2}$$

を満たす時，P は社会的に効率的であると言う．

この定義を満たす割引因子は，各 t について

$$P_t = \frac{\partial W(x)}{\partial x_t} \bigg/ \frac{\partial W(x)}{\partial x_0} \tag{3}$$

である．この表現から明らかなように，P_t は t 期における財の（限界的な）増加が 0 期における財の（限界的な）増加と比べて社会的にどれだけの価値を持つのかを表わす．つまり社会的に効率的な割引因子は，当該期における財の（0 期の財と比べた）相対的なシャドウプライスに等しい．以降，割引因子は全て社会的に効率的な割引因子を指すものとする．

(3) 式の割引因子を用いた場合に，比較的小規模のプロジェクトについて，B が純便益の総価値を近似的に表わすことを確認しよう．プロジェクトを実施した場合の社会厚生の変化は，Δx が十分に小さければ

$$W(x+\Delta x) - W(x) \approx \sum_{t=0}^{\infty} \frac{\partial W(x)}{\partial x_t} \Delta x_t$$

によって近似できる．したがって，0 期における財を価値基準財（numereire）とすれば，このプロジェクトによってもたらされる厚生変化の（0 期の財の単位での）総価値は

$$\begin{aligned} \frac{W(x+\Delta x) - W(x)}{\partial W(x)/\partial x_0} &\approx \sum_{t=0}^{\infty} \left(\frac{\partial W(x)}{\partial x_t} \bigg/ \frac{\partial W(x)}{\partial x_0} \right) \Delta x_t \\ &= B(P,\Delta x) \end{aligned} \tag{4}$$

で近似される．つまり，Δx が十分に小さければ，プロジェクトの純便益の総価値は「割引因子で重み付けた各期の純便益」の総和で近似できる．なお，(4) 式の左辺と右辺は，$\Delta x \to 0$ の極限（つまり $\epsilon \to 0$ の極限）で精確に一致する．

以上から明らかなように，異時点間の費用便益分析においては，各期の費用や便益に対する重み，すなわち割引因子 P_t が重要な役割を果たす．特に，温暖化対策に典型的に見られるような，長期間に渡って生じ続ける便益を現在価値に換算する必要がある場合，「P_t が時点 t に応じてどのように変化するか」ということが決定的に重要となる．そのため，割引因子そのものではなく，割引因子の変化率，すなわち社会的割引率（social discount rate）に着目した分析がなされる．

定義 2. 割引因子の限界的な変化率

$$\rho_{t+1} := -\ln(P_{t+1}) + \ln(P_t)$$

を（限界的な）社会的割引率と呼ぶ．また，割引因子の平均的な変化率

$$\bar{\rho}_t := -t^{-1}\left[\ln(P_t) - \ln(P_0)\right] = -t^{-1}\ln(P_t)$$

を（平均的な）社会的割引率と呼ぶ．

限界的な定義と平均的な定義は，それぞれの定義を用いた場合の相対的な分析の簡便さに応じて使い分けられる．定義から $\bar{\rho}_t = t^{-1}\sum_{s=1}^{t}\rho_s$ であり，したがって社会的割引率が時点 t に依存しない場合，二つの定義は一致する．また，ρ_t が t について減少関数（増加関数）であることは，$\bar{\rho}_t$ が t について減少関数（増加関数）であることと同値である．なお $P_t = e^{-\sum_{s=1}^{t}\rho_s} = e^{-t\bar{\rho}_t}$ であるから，限界的な定義を用いるのであれ，あるいは平均的な定義を用いるのであれ，現在価値の計算に影響はない．以降，社会的割引率のことを単に割引率と呼ぶ．

(3) 式から明らかなように，割引因子や割引率は，厚生関数 W と消費経路 x によって異なった値をとる．厚生関数は，資源分配のあり方に対してその社会的な望ましさに応じた順序付けを与えるもので，人々の選好や社会全体での価値判断を反映する．一方の消費の経路は，予想される経済成長などを考慮した，将来時点における社会の状態についての見通しである．したがって上で与えた割引因子や割引率の定義は，将来時点に生じる便益の価値が人々の価値判断や将来の見通しに依存するという，ごく自然な感覚と整合的なものである．なお，(3) 式の W として，いわゆる代表的個人の厚生関数を用いることも可能である．可能ではあるが，それは単に一つの選択肢としてあり得るということであり，そうすることに必然性はない．W を個人の厚生関数で置き替えることは，個人が実際に最大化しているものこそが社会的にも最大化されるべきであるという，一つの価値判断を意味する．ここで言う W は，そういった価値判断も一つの可能性として含む，より一般的な意味での厚生関数である．

標準的な想定の下では，割引因子 P_t は通常 1 より小さく，また t が将来時点になるほど小さな値をとる．割引因子が 1 よりも小さい時，したがって割引率が 0 よりも大きい時，それは現在時点における限界的な財の増加が，将来時点におけるそれよりも社会的に大きな価値を持つことを意味する．現在の財が将来の財よりも大きな価値を持つ理由は，少なくとも四つある．一つ目の理由は，一般的な傾向として，将来を生きる人々の方が現在を生きる人々よりも裕福であり，したがって消費の限界効用が将来時点で低下するということである．同じ一単位の財であっても，それが相対的に豊かな社会に存在する場合と，逆にそれが相対的に

貧しい社会にもたらされる場合とでは，後者の方がより大きな価値を持つと考えるのが直観に適っている．二つ目の理由は機会費用である．現在時点に存在する財は，それを生産的な投資活動に充てることで，将来時点でより多くの財に変換することが可能である．逆に将来時点に存在する財は，投資の収益率が負でない限り，現在時点により多くの財を生み出すことはできない．もっとも，この二つ目の理由は一つ目の理由と表裏一体の関係にある．将来の社会の方がより豊かであると見込まれるのは，現在の経済の生産性が正であるからに他ならない．

三つ目の理由は，単純に選好の問題として，現在時点における消費の方が将来時点におけるそれよりも人々によって好まれているという事実である．このような事実の観察に基づく理由付けは，割引に対して規範的な根拠を与えるものでは必ずしもない．ただ，民主的な意思決定が社会的な価値判断の指標になると考えるのであれば，そこに異時点間の財の重み付けに関する人々の価値判断が反映されているという意味で，考慮されるべきものである．四つ目の理由は，何らかの原因によって，将来のある時点で世界が存在しなくなるという可能性である．原理的には，遥か遠い将来にわたって世界が今と同様に存在し続ける保証はない．世界が消滅するリスクがゼロでない限り，現在時点における財（それを消費する人々は確かに存在する）は，将来時点における財（それを消費する人々は存在しないかもしれない）よりも，相対的に大きな価値を持つと言ってよいだろう．このような理由付けは，三つめの理由に合理的な説明を与えるものとも解釈できるが，厳密には独立に扱われるべきものである．

2.2 ベンチマーク・モデル

一つのベンチマークとして，最も標準的な設定の下で割引因子と割引率を求めてみよう．具体的には，厚生関数が

$$W = \sum_{t=0}^{\infty} e^{-\delta t} U(x_t) \tag{5}$$

で与えられるケースを考える[1)]．ここで $U(x_t)$ は，t 期に存在する人々の効用を代表するものと解釈できる[2)]．繰り返しになるが，(5) 式の W を代表的個人の厚生関数と解釈する必然性はない．したがって関数に含まれるパラメタは，個人の選好を代表するものでは必ずしもない．消費経路や資源分配の社会的な望ましさを測る指標として，このような形の厚生関数を想定しているというだけのことである．効用関数の一次微分と二次微分を，$U'(x_t) := \partial U(x_t)/\partial x_t$ と $U''(x_t) := \partial^2 U(x_t)/\partial x_t^2$ でそれぞれ表わそう．この時，限界効用の変化率を $v_{t+1} := \ln[U'(x_{t+1})] - \ln[U'(x_t)]$ とすれば，割引因子は

$$P_t = e^{-\delta t} \frac{U'(x_t)}{U'(x_0)} = e^{-\delta t + \sum_{s=1}^{t} v_s}$$

のように書くことができる．したがって，限界効用の弾力性 η_t と消費の成長率 g_t をそれぞれ，$\eta_t := -U''(x_t)x_t/U'(x_t)$，$g_{t+1} := \ln(x_{t+1}) - \ln(x_t)$ とすれば，

$v_{t+1} \approx -\eta_t g_{t+1}$ であるから[3]，対応する割引率は

$$\rho_{t+1} \approx \delta + \eta_t g_{t+1}, \quad \bar{\rho}_t \approx \delta + \frac{1}{t}\sum_{s=0}^{t-1} \eta_s g_{s+1}$$

で近似できる．特に，各期の効用関数 U が

$$U(x) = \frac{x^{1-\eta}}{1-\eta} \tag{6}$$

のような冪関数で，消費の成長率が一定（$g_t = g$）である場合には

$$\rho_t = \bar{\rho}_t = \delta + \eta g \tag{7}$$

である．

(7) 式は，割引率の最も標準的な表現である．この表現から，ベンチマーク・モデルにおける割引率が二つの要因によって決定されることが分かる．一つ目の決定要因は δ で，これは社会的時間選好率（social rate of time preference）と呼ばれる．社会的時間選好率は，現在を生きる人々と比較して将来を生きる人々がどれだけ不衡平に扱われるべきか，あるいは扱われるべきでないかについての，社会的な価値判断を反映したパラメタである．$\delta = 0$ である時，時間軸上での相対的な位置関係に関わらず，全ての人々は衡平に扱われる．逆に $\delta > 0$ である場合には，彼らの生存期間が将来時点に存在するというそれだけの理由で，将来の人々を不衡平に扱うことを意味する[4]．これは先に述べた正の割引率を用いるべき理由の三つ目に相当し，特に $\delta > 0$ である時には，割引率に対して非忍耐効果（impatience effect）が存在するという．δ に対する別の見方としては，上記の四つ目の理由を反映したもの，すなわち何らかの原因によって世界が消滅するリスクを反映したものであると解釈することも可能である[5]．以下では，δ のことを単に時間選好率と呼ぶ．

割引率を決定する二つ目の要因は，(7) 式の二つ目の項，すなわち ηg である．パラメタの η はモデルの解釈や分析の目的に応じて様々な呼称を持つが[6]，割引率を議論する文脈においては，上述の正の割引率を用いるべき理由の一つ目に相当するものと解釈される．η は，消費の水準が 1%上昇した時に，一単位の財が持つ社会的な価値ががどれだけ減少するかを表わす．したがって，各時点の（消費の水準に関する）不平等を回避しようとする社会的な選好が，この η に反映されていると言ってよい[7]．将来の社会が現在よりも豊かになると予想されている時（つまり $g > 0$ である時），η の値が大きければ大きいほど割引率は大きくなり，将来時点で生み出される便益は現在時点の財に比べてより小さな価値しか持たないと判断される．逆に将来的に社会が貧しくなると予想されている時（つまり $g < 0$ である時），η の値が大きければ大きいほど割引率は小さくなり，将来の便益はより大きな価値を持つことになる．このような解釈に基づき，(7) 式における η と g は，両方を合わせて割引率に対する成長効果（growth effect），あるいは富効果（wealth effect）と呼ばれる．

割引率の決定要因のそれぞれが温暖化対策の費用便益分析においてどのような役割を果たすのかを，簡単な数値計算を用いて示しておこう．具体的な例として，

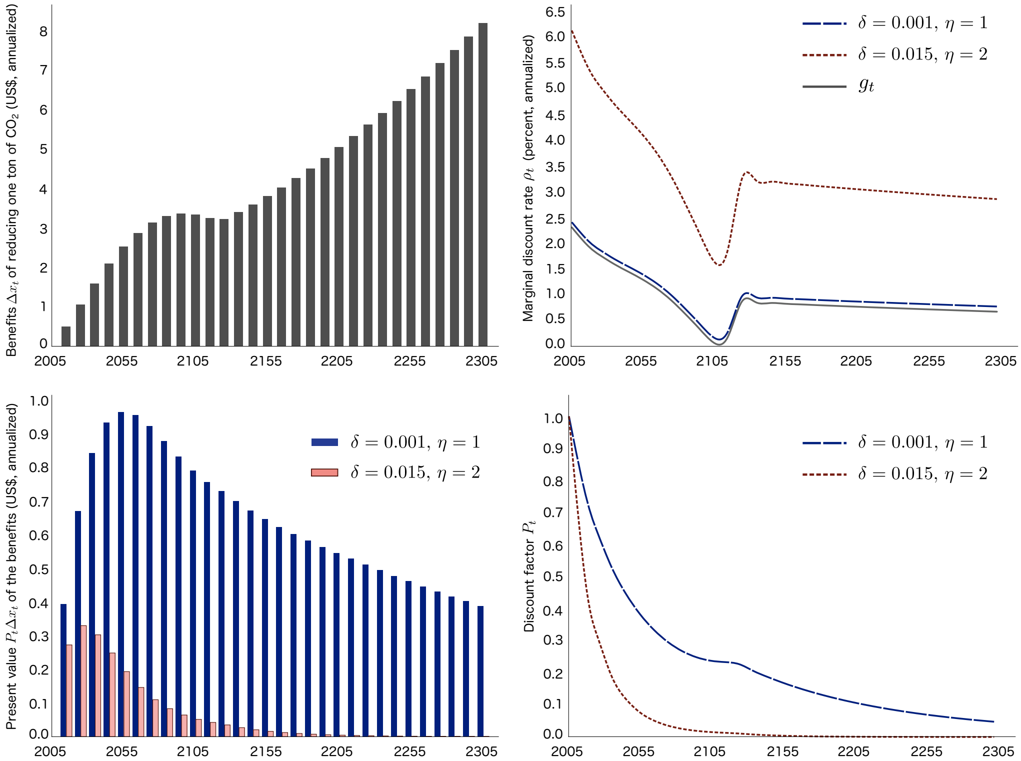

図 1: CO_2 を 1 炭素トン削減した場合の便益と割引率との関係

2010 年の時点で二酸化炭素を 1 炭素トン削減するというプロジェクトを考える．図 1 の左上のパネルは，Nordhaus (2008) の DICE-2007 を用いて，ベースラインから二酸化炭素を 1 炭素トンだけ削減した場合の一年あたりの便益（温暖化による損害の減少分）を図示したものである．図から明らかなように，このプロジェクトを実施した場合，便益 Δx_t は非常に長期間に渡って生じる．また，将来時点に生じる便益は現在時点のそれと比べて圧倒的に大きい[8)]．ベースライン・シナリオにおける消費の成長率 g_t は，右上のパネルに示されている通り，年率 2%程度から徐々に減少し，長期的には 0.7%付近で推移する．

このようなプロジェクトを評価する場合，その便益の現在価値は割引率の設定に大きく依存する．例えば，時間選好率を年率で 1.5%（$\delta = 0.015$），また $\eta = 2$ とすれば，割引率 ρ_t は 2005 年時点で 6%強，長期的には 2.9%程度となる（右上のパネル）．この設定の下では，割引因子 P_t は今後 100 年間で急激に減少し（右下のパネル），結果として 2150 年以降の便益の現在価値 $P_t\Delta x_t$ はほとんど無視できる程度に小さくなる（左下のパネル）．一方，時間選好率を 0.1%（$\delta = 0.001$），さらに $\eta = 1$ とした場合，割引率は 2005 年時点で 2.5%，長期的には 0.8%程度となる．対応する割引因子は相対的に緩やかに減少するため，2150 年時点に生じる便益もその 1/5 程度が現在価値として考慮されることになる．便益の割引現在価値の総和 $B = \sum P_t\Delta x_t$（これは炭素の社会的費用とも呼ばれる）は，前者の設定では 20 ドルであり，したがって限界削減費用が 20 ドル以下のプロジェクトしか実施されな

い．一方，後者の設定では便益の総和は 10 培以上の 206 ドルとなり，限界削減費用が 206 ドル以下のプロジェクトであればその実施が正当化される．

この例が端的に示すように，温暖化対策の費用便益分析においては，評価者によって選択されるパラメタの値が分析の結果を大きく左右する．そのため，特にパラメタの δ や η について，その「正しい値」を決定するための論争が繰り広げられてきた．例えば Nordhaus (2008) は，(5) 式を代表的個人の厚生関数とする動学的一般均衡モデルにおいて，均衡利子率（投資の収益率）r_t が Ramsey ルール

$$r_t = \delta + \eta g_t \tag{8}$$

を満たすという事実に基づいて[9]，δ と η の値をカリブレイトしている．より具体的には，米国の市場で観察される実質利子率が年率 5.5%程度であり，消費の成長率が今後数十年間は 2%前後で推移すると予想されることから[10]，(8) 式を用いて $0.055 = \delta + 0.02\eta$ を満たすように δ と η の値を設定するのである．実際，DICE-2007 のベンチマークは $\delta = 0.015$ および $\eta = 2$ としており，市場の利子率とおよそ整合的である[11]．現実の投資の収益率から割引率を導出するアプローチは，温暖化対策に充てられる費用を他の生産活動に投資した場合に得られるであろう便益，つまりは機会費用を考慮するという点で理に適ったものと言える．

しかしながら，市場で観察される利子率，あるいは投資の収益率を用いて社会的な割引率を導出することには，少なからぬ批判がある[12]．(8) 式で表わされる Ramsey ルールが成立するためには，その導出過程から明らかなように，経済が最適な消費経路を実現していなければならない．そのためには，経済活動に外部性が存在せず，個人が遥か遠い将来を完全に予見できる等，様々な仮定が満たされる必要がある．おそらくは歴史上で最大の市場の失敗であるとも言われ，なおかつ影響にも大きな不確実性を伴うという温暖化問題の性質からして，その仮定の多くは成立し難いものであろう．また別の問題として，現実の経済活動に従事する個々人が，(5) 式で定義される厚生関数を最大化するように行動していると見なすことに先験的な理由は存在しない[13]．もちろん，既に述べたように，逆に個人が実際に最大化しているものこそが，社会的な厚生関数として定義されるべきであると考えることもできる．ただその場合には，現時点で存在していない将来世代の選好が，少なくとも直接的には考慮されないことが問題となる．

一方 Stern (2007) は，とりわけ世代間衡平性を重視するという規範的な立場から，時間選好率を 0.1%に設定している[14]．時間選好率が厳密にゼロでない理由としては，上で言及した四つ目の理由，すなわち将来のある時点で人類が滅亡するリスクが挙げられている．もう一つの重要なパラメタである η については，Stern (2008) の中で，その解釈として（i）地域間の不平等回避の測度，（ii）異時点間の消費平準化選好の測度，（iii）期待効用理論に基づくリスク回避の測度，のそれぞれを検討し，実証的に値を定めることは困難であると結論している．また，たとえいずれかの解釈のもとで η の値を実証的に特定することが可能であったとしても，現実に観察される個々人の意思決定を，温暖化問題のような社会的な意思決定の基準として採用することは妥当でないとする．Sen (1982) が指摘するように，人々が集合的に意思決定を行なう場合（温暖化問題に関する政策決定）の選好は，個別に意思決定を行なう場合（市場に反映される意思決定）の選好とは異なるも

のかもしれない．その上で，倫理的にも経験的にも不適切でないベンチマークとして，暫定的に $\eta = 1$ が用いられている．

もっとも，割引率の設定に関する Stern (2007) のアプローチは，報告書の発表から程なくして，多くの，そして厳しい批判に晒された[15]．おそらく最も本質的な問題は，Stern (2007) の採用した割引率（つまりはプロジェクトの評価基準）によって，直観的には受け入れ難い政策が正当化されてしまうということである．例えば，今後 50 年間の投資の収益率 r_t が年率で 4%であるとしよう．これはそれほど非現実的な想定ではない．この時，現時点の ϵ 円は 50 年後の $e^{0.04\times 50}\epsilon \approx 7.4\epsilon$ 円と交換可能であることに注意する．ここで，現時点で政府が ϵ 円を国民から徴収して，50 年後を生きる人々のために投資するプロジェクト，つまり $Z_0(\epsilon) = -\epsilon$ かつ $Z_{50}(\epsilon) = e^{0.04\times 50}\epsilon$ のようなプロジェクトを考える．このプロジェクトの割引現在価値は $B \approx (-1 + P_{50}7.4)\,\epsilon$ である．Stern (2007) は年率で 1.3%の消費の成長率を想定しているので, $\delta = 0.001$, $\eta = 1$ とした時の割引率は $\rho_t = 0.001 + 1 \times 0.013 = 0.014$ であり，これは $P_{50} = e^{-0.014\times 50} \approx 0.5$ を意味する．したがって B の値は優に 0 を上回り，このプロジェクトの実施は社会的に正当化される．つまり Stern (2007) の仮定は，50 年後を生きる人々が現在と比べて $e^{0.013\times 50} \approx 2$ 倍の消費水準を享受するにも関わらず，現在世代から将来世代に所得を移転することで社会的な厚生が高まることを暗に意味しているのである．実際，割引率が投資の収益率を上回らない限り，このようなプロジェクトは必ず正当化されることが分かる[16]．この点に関して，例えば Dasgupta (2007, 2008) は，Stern (2007) の設定では消費水準の不平等回避の選好が弱過ぎる（すなわち η が小さ過ぎる）と見る．

このような論争は，割引率の設定に関する基本的な課題を明らかにする上で重要であるが，現実の問題解決という観点からすると，おそらく生産的ではない．δ や η をどのように設定するのであれ，たった二つの，しかもその「正しい」値に論争のあるパラメタによって結論が大きく左右されてしまうような分析は，政策評価の基準として十分な妥当性を備えたものとは言えないだろう．特に，温暖化対策のようにその実施にあたって多くの人々の同意を必要とする公共政策に関しては，上記の枠組みが社会的な意思決定の土台を提供することは難しいように思える．これは言い換えれば，ベンチマーク・モデルに基づく標準的な割引理論において，割引因子や割引率が導出される過程の「何処か」で，本来は考慮されて然るべき「何か」が見落とされてしまっていることである．次節以降で述べるように，割引率に関する近年の議論の多くは，そういったベンチマーク・モデルの不足を補おうとする試みの中で発展してきた．以下では，その中でも研究上の発展が特に著しい二つの論点，すなわち不確実性と代替可能性について，順を追って検討する．

3　不確実性と割引率

ベンチマーク・モデルの中で見落とされていたものの一つに，将来時点での不確実性が挙げられる．既に確認したように，温暖化対策の影響は非常に長期間に渡って生じる．そのような長期的な計画期間を持つ政策の評価においては，将来の見通しに不確実な側面があることを想定した上で割引率の設定方法を考えるのが合理的と言えよう．むしろ，そこに不確実性を想定しないことの方が不自然で

あるとさえ言える．

割引率の議論の中に不確実性を導入する方法は，大きく分けて二つある．一つ目の方法は，将来の生産技術の水準が不確定的であると仮定し，したがって投資の収益率に不確実性が存在すると考えるものである．100 年前を生きた人々が現在の技術水準を見通せなかったであろうことと同様に，現在を生きる人々が 100 年後の技術水準を見通すことは困難である．これは，実質的には，温暖化対策の機会費用に不確実性が存在するということに等しい．もう一つの方法は，より直接的に，将来時点における消費の水準に関して不確実性を仮定するものである．比較的短い期間に限ってみても，経済がこの先にどのような成長経路を辿るのかについて，現時点で予測することは容易でない．また大恐慌の例を挙げるまでもなく，長期的な消費水準には少なからぬ変動のリスクがあると見てよいだろう．したがって，将来のある時点において社会が現在より豊かであるとは必ずしも言えず，また逆に，予想を越えた豊かさが実現されている可能性もある．

本節の目的は，これら二つの不確実性を考慮した場合に，どのような割引率が用いられるべきかを検討することである．以下では，まず生産技術が不確実であると仮定して，割引率の設定と温暖化対策に対する政策的な含意を明らかにする（3.1 項）．その上で，消費経路に不確実性が存在する場合について，標準的な割引理論がどのように修正されるかべきかを確認する（3.2 項）．

3.1　生産技術の不確実性

割引率に対する不確実性の影響を，比較的早い段階で，そして劇的な形で示したのが Weitzman (1998) である．Weitzman (1998) は，将来時点での生産性を予測することが困難である等の理由から，投資の収益率に不確実性が存在するモデルを考えた．簡単化のために，社会全体の資本蓄積を k_t として，経済全体の集計的な生産性が

$$k_{t+1} = \tilde{A}_{t+1}\left(k_t - x_t\right) \tag{9}$$

のような線形の生産技術で表わされるとしよう．ただし，生産性 $\tilde{A}_t$ には不確実性が存在すると仮定する．変数の上部に付されたチルダは，それが確率変数であることを意味する．この時，投資の収益率（利子率）$\tilde{r}_{t+1} := \ln\left(\tilde{A}_{t+1}\right)$ は確率変数である．

Weitzman (1998) の結果を再現するために，t 期間の平均利子率を $\tilde{r}_t^* := t^{-1}\sum_{s=1}^{t}\tilde{r}_s$ として，次のような仮定を置く．

仮定 1. 平均利子率 $\tilde{r}_t^*$ の分布 F_t について，$t \to \infty$ での極限分布 F が存在する．つまり，平均利子率の極限 $\tilde{r}^* := \lim_{t\to\infty}\tilde{r}_t^*$ は，分布関数を $F(r^*)$，密度関数を $f(r^*) := \partial F(r^*)/\partial r^*$ とする確率変数である．

この仮定は，遥か遠い将来の（平均）利子率についてその分布が定まるということを意味する．これはそれほど制約的な仮定ではなく，本項を通じて常に維持される．また，$\tilde{r}^*$ の分布のサポートを $R^* \subset \mathbb{R}$ として，R^* の上限と下限をそれぞれ $\bar{r}^*$ と $\underline{r}^*$ で表わす．つまり，$\bar{r}^*$ は将来に実現し得る平均利子率の最大値であり，一

方の $\underline{r}^*$ はその最小値である[17)]．分析の目的に応じて，仮定 1 を次のようなより強い仮定で置き換える．

仮定 2. 利子率 $\tilde{r}_t$ の実現値は，時間を通じて一定である．つまり，ある確率変数 $\tilde{r}$ が存在して，任意の t について $\tilde{r}_t = \tilde{r}$ となる．

明らかに，仮定 2 は仮定 1 を含意し，仮定 2 の下で $\tilde{r}^* = \tilde{r}$ である．さらに，Weitzman (1998) によって暗黙的に置かれている（かに見える）次の仮定を明示しておこう．

仮定 3. 利子率の実現値の流列を所与として，消費の経路は最適な水準にあるとする．つまり x は，$\tilde{A}_t$（あるいは $\tilde{r}_t$）の実現値のそれぞれについて，(9) 式の下で厚生関数 W を最大化しているものとする．

3.1.1 ガンマ割引

まずは不確実性が存在しない場合を考えよう．厚生関数の形状については，差し当たって特定化を行なわない．$t+1$ 期の利子率がある実現値 r_{t+1} をとる時，t 期の一単位の財は $t+1$ 期の $e^{r_{t+1}}$ 単位の財と交換可能である．同様に，利子率の流列が $r := \{r_s\}_{s=1}^{\infty}$ という実現値をとる時，0 期の一単位の財は t 期の $e^{\sum_{s=1}^{t} r_s}$ 単位の財と交換可能である．そこで，（事後的な）割引因子を $P_t(r) := e^{-\sum_{s=1}^{t} r_s} = e^{-tr_t^*}$ で定義しよう．仮定 3 の下では $\rho_t = r_t$ が成り立つので（Ramsey ルール），この $P_t(r)$ は社会的に効率的である．

ただ実際には，利子率の流列 $\tilde{r} := \{\tilde{r}_s\}_{s=1}^{\infty}$ は不確実である．そのため，いずれの r を所与としても，この $P_t(r)$ は事前の意味では必ずしも効率的でない．そこで Weitzman (1998) は，確実性等価割引因子（certainty-equivalent discount factor）を

$$P_t^{\mathrm{W}} := \mathbb{E}[P_t(\tilde{r})] \tag{10}$$

で定義し，これを事前の意思決定における割引因子として用いることを提案した．ここで $\mathbb{E}$ は期待値演算子である．P_t^{W} の定義は，期待効用理論に慣れ親しんだ者にとって，直観的にもっともらしいものである．ただしその直観的なもっともらしさを除けば，なぜこのような割引因子を用いるべきであるかについて Weitzman (1998) は十分な説明を与えていない．P_t^{W} に対応する（平均の）確実性等価割引率（certainty-equivalent average discount rate）は $\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} := -t^{-1} \ln \left(P_t^{\mathrm{W}}\right)$ である．この時，次の命題が成立する．

命題 1. 仮定 1 の下で，割引率 $\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}$ は $t \to \infty$ の極限において利子率の下限に収束する．すなわち $\lim_{t\to\infty} \bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} = \underline{r}^*$ が成立する．

証明．付録 A.1 を参照． □ □

この命題の意味するところは，明快かつ強力である．将来の生産性に関する見通しが確定的なものでなく，したがって投資の収益率が不確実である場合，(10) 式の定義を受け入れるのであれば，遥か遠い将来時点（far-distant future）に生じる便

益に対しては，考え得る中で最小の利子率を割引率として用いるべきだということである．

もっとも，命題 1 からは，相対的に近い将来に生じる便益に対してどのような割引率を用いるべきか明らかでない．この点について具体的な含意を導くために，将来時点における投資の収益率は不確実であるが，実現する値は時間を通じて一定であるという単純化，すなわち仮定 2 を置こう．この時，対応する確実性等価割引率は

$$\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} = -t^{-1} \ln \left(\mathbb{E}[e^{-\tilde{r}^* t}] \right) \tag{11}$$

であり，次の命題を得る．

命題 2. 仮定 2 の下で，割引率 $\bar{\rho}_t^W$ は t の単調減少関数となる．

証明．付録 A.2 を参照．□

当然ながら，仮定 2 の下では命題 1 も成立する．これらの命題は，割引率の設定をめぐって展開されてきた論争を和解させる上で，政策決定者にとって一つの福音である．ベンチマーク・モデルの割引率は，(7) 式から明らかなように，消費の成長率の変動を除けば時点 t に依存しない．言い換えれば，割引率の期間構造（term structure）が平坦になっている．そして期間構造が平坦である場合，長期的な計画期間を持つ費用便益分析において，割引率が適用される時点に応じた重み付けの調整ができないという問題が生じる．例えば，Nordhaus (2008) のアプローチは，短期的な便益については直観と整合的な結論を導くが，長期的な便益に対しては割引率が大き過ぎるように見える．一方の Stern (2007) のアプローチは，長期的な便益に対してはもっともらしい結論を導くが，それを短期的な便益に適用した場合に，投資の収益率と比べて割引率が小さ過ぎることが問題となる．Weitzman (1998) の命題が示していることは，短期的な便益に対しては（Nordhaus のような）比較的大きな割引率を適用し，長期的な便益に対しては（Stern のような）相対的に小さな割引率を適用すべきだということである．そして遥か遠い将来に期待される便益に対しては，最も低い割引率を適用することが求められる．このような「時点に関して逓減型の期間構造を持つ割引率（declining discount rate）」は，長期的な政策評価において直観と整合的な結論を導くものとして，現在に至るまで学術的にも実践的にも大きな関心を集めている[18)]．

この結果に基づき，Weitzman (2001) は温暖化対策の費用便益分析に用いられるべき割引率を「実証的に」示した．仮定 2 を置いた上で，2800 人に上る経済学者へのアンケート調査によって，$\tilde{r}$ の（主観的）確率分布を導出したのである．具体的には，仮定 1 における密度関数 f を $f(r) = [\Gamma(\alpha)]^{-1}\beta^{\alpha}r^{\alpha-1}e^{-\beta r}$ のように特定化し，アンケートの結果から $\alpha = (0.04/0.03)^2$，$\beta = 0.04/(0.03)^2$ と「推定」した．これは，投資の収益率 r が平均 4%，標準偏差 3%のガンマ分布に従うことを意味する．ガンマ分布のサポートは $R^* = \mathbb{R}_+$ であるから，命題 1 により，割引率 $\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}$ は $t \to \infty$ の極限で 0 に収束することが直ちに分かる．また，ガンマ分布を仮定したことによって割引因子を解析的に解くことも可能で，$P_t^{\mathrm{W}} = [\beta/(\beta+t)]^{\alpha}$ となる．したがって，対応する限界と平均の割引率は，それぞれ

$$\rho_{t+1}^{\mathrm{W}} = \alpha \ln \left(\frac{\beta+t+1}{\beta+t} \right), \quad \bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} = t^{-1} \alpha \ln \left(\frac{\beta+t}{\beta} \right)$$

表 1: ガンマ割引の期間構造

	$t=1$	10	25	50	75	100	150	200	300	500
ρ_t^{W} (% annual)	3.96	3.30	2.58	1.89	1.49	1.24	0.92	0.73	0.52	0.33
$\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}$ (% annual)	3.96	3.61	3.17	2.68	2.34	2.10	1.75	1.52	1.21	0.89
P_t^{W}	0.961	0.697	0.452	0.262	0.172	0.123	0.073	0.048	0.026	0.012

である．ここで，$\rho_1^{\mathrm{W}} = \bar{\rho}_1^{\mathrm{W}} \approx \alpha/\beta = \mathbb{E}[\tilde{r}]$ であることに注意すれば，割引率の期間構造は短期的な便益に対しては 4%，便益の生じる時点が遠い将来になるにつれてより低い割引率となり，遥か遠い将来では 0% となることが分かる（表 1）．このガンマ割引（gamma discounting）と呼ばれるアプローチを用いた場合，DICE-2007 に基づく二酸化炭素削減プロジェクトの割引現在価値は 113 ドルとなり，前節で挙げた二つの例のちょうど中間程度の評価を導く．

3.1.2 Weitzman-Gollier パズル

Weitzman (1998, 2001) は，(10) 式で定義される確実性等価割引因子が用いられるべきことについて，その理論的な根拠を与えていない．そこで，社会的に効率的な割引因子の定義に立ち返り，上記の分析の中で暗黙的に用いられている仮定を明らかにしよう．まず，Harsanyi (1955) に従い，社会的選好が期待効用関数によって代表されると仮定する[19)]．つまり，厚生関数は

$$W = \mathbb{E}\left[\sum_{t=0}^{\infty} e^{-\delta t} U(\tilde{x}_t)\right] \tag{12}$$

のように表わされるものとする．さらに，社会的選好がリスク中立的であると仮定しよう．つまり $U(x) = x$ のように U を特定化する．次に，単純化のために，プロジェクトの費用便益構造 Δx を

$$\Delta x_s = \begin{cases} Z_0(\epsilon) & s = 0 \\ Z_t(\epsilon) & s = t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{13}$$

のように特定化する．具体的なイメージとしては，0 期に $Z_0(\epsilon)$ の費用を掛けることで，t 期に $Z_t(\epsilon)$ の便益が生じるようなプロジェクトを想定すればよい．

いま，利子率の流列が $r := \{r_s\}_{s=1}^{\infty}$ で与えらえているとしよう．この時，t 期の $Z_t(\epsilon)$ は 0 期の $Z_t(\epsilon)e^{-\sum_{s=1}^{t} r_s}$ と交換可能である．したがって，プロジェクト Δx は

$$\Delta x_s^{\mathrm{W}} = \begin{cases} Z_0(\epsilon) + Z_t(\epsilon)e^{-\sum_{\hat{s}=1}^{t} r_{\hat{s}}} & s = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{14}$$

のように表現し直すことができる．これは，費用と便益を一端 0 期における純現在価値（net present value）Δx_0^{W} に変換してから，プロジェクトの評価を行なうこ

とを意味する．この（変換後の）プロジェクト Δx^{W} について，社会的に効率的な割引因子は定義 1，すなわち

$$\mathbb{E}\left[Z_0'(0) + Z_t'(0)e^{-\sum_{s=1}^{t}\tilde{r}_s}\right] \geq 0 \iff Z_0'(0) + P_t Z_t'(0) \geq 0$$

を満たす P_t であるから，$P_t = \mathbb{E}[e^{-\sum_{s=1}^{t}\tilde{r}_s}] = \mathbb{E}[e^{-\tilde{r}_t^* t}]$ のように，(10) 式で定義される確実性等価割引因子に一致する．つまり，Weitzman (1998) による確実性等価割引因子は，リスク中立的な社会選好を仮定し，(14) 式のように費用と便益を全て現在時点に移転する形でプロジェクトを再定義する時の，社会的に効率的な割引因子である．

このように暗黙的に置かれた仮定を検討する中で，同様にもっともらしい仮定の下で正反対の結論を導いたのが Gollier (2004) である．Gollier (2004) は，Weitzman (1998) とは異なり，費用と便益を一端 t 期における純将来価値（net future value）に変換してから，プロジェクトの評価を行なうことを考えた．利子率の流列 $r := \{r_s\}_{s=1}^{\infty}$ を所与とすれば，0 期の $Z_0(\epsilon)$ は t 期の $Z_0(\epsilon)e^{\sum_{s=1}^{t} r_s}$ と交換可能である．したがって，プロジェクト Δx は，

$$\Delta x_s^{\mathrm{G}} = \begin{cases} Z_0(\epsilon)e^{\sum_{\hat{s}=1}^{t} r_{\hat{s}}} + Z_t(\epsilon) & s = t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

のように表現し直すことも可能である．このようなプロジェクト Δx^{G} について，割引因子は

$$\mathbb{E}\left[Z_0'(0)e^{\sum_{s=1}^{t}\tilde{r}_s} + Z_t'(0)\right] \geq 0 \iff Z_0'(0) + P_t^{\mathrm{G}} Z_t'(0) \geq 0$$

を満たす P_t^{G} であるから，

$$P_t^{\mathrm{G}} = \left(\mathbb{E}\left[e^{\sum_{s=1}^{t}\tilde{r}_s}\right]\right)^{-1} = \left(\mathbb{E}\left[e^{\bar{r}_t^* t}\right]\right)^{-1} \tag{15}$$

をとなる．

(15) 式の割引因子の形状からして既に Weitzman (1998) との違いは明らかであるが，対応する割引率の性質を検討することによって，極めて対称的な結果が示される．P_t^{G} に対応する（平均の）割引率は $\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}} := -t^{-1}\ln\left(P_t^{\mathrm{G}}\right) = t^{-1}\ln\left(\mathbb{E}\left[e^{\bar{r}_t^* t}\right]\right)$ であり，さらに仮定 2 の下では

$$\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}} = t^{-1}\ln\left(\mathbb{E}[e^{\tilde{r}^* t}]\right) \tag{16}$$

となる．この時，次の命題が成立する．

命題 3. 仮定 1 の下で，割引率 $\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}}$ は $t \to \infty$ の極限において利子率の上限に収束する．すなわち $\lim_{t\to\infty}\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}} = \bar{r}^*$ が成立する．さらに，仮定 2 の下で，$\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}}$ は t の単調増加関数となる．

証明．付録 A.3 を参照． □

この命題の前半が意味するところは，遥か遠い将来時点に生じる便益に対しては考え得る中で最大の利子率を割引率として用いるべきだという，Weitzman (1998) とは正反対の結論である．また命題の後半も，Weitzman (1998) の結果とは全く異なり，割引率が時点とともに逓増することを示している．両者が用いた仮定の違い，すなわち Δx^{W} と Δx^{G} というプロジェクトの変換は，一見していずれももっともらしいものである．そうであるにもかかわらず，両者の結論は真っ向から対立している．矛盾するかに見えるこれらの結果は，後に Weitzman-Gollier パズルと呼ばれるようになった．

Weitzman-Gollier パズルは，いったいどのような問題に起因するものであろうか．Hepburn and Groom (2007) が示したように，実は Δx^{W} と Δx^{G} を特殊ケースとして含む形で，評価時点をより一般化したプロジェクトを考えることができる．(13) 式で与えられるプロジェクトについて，費用と便益を一端 $\tau \in [0, t]$ 期における純価値に変換してからプロジェクトの評価を行なうことを考えよう．利子率の流列 $r := \{r_s\}_{s=1}^{\infty}$ を所与とすれば，0 期の $Z_0(\epsilon)$ は τ 期の $Z_0(\epsilon)e^{\sum_{s=1}^{\tau} r_s}$ と交換可能であり，また t 期の $Z_t(\epsilon)$ は τ 期の $Z_t(\epsilon)e^{-\sum_{s=\tau+1}^{t} r_s}$ と交換可能である．よって Δx は

$$\Delta x_s(\tau) = \begin{cases} Z_0(\epsilon)e^{\sum_{\hat{s}=1}^{\tau} r_{\hat{s}}} + Z_t(\epsilon)e^{-\sum_{\hat{s}=\tau+1}^{t} r_{\hat{s}}} & s = \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

のように表現し直すことが可能である．Weitzman (1998) のプロジェクトは $\Delta x(\tau)$ について $\tau = 0$ とした場合であり，Gollier (2004) のプロジェクトは $\tau = t$ としたケースに相当する．プロジェクト $\Delta x(\tau)$ について，割引因子は

$$P_t(\tau) := \mathbb{E}\left[e^{-\sum_{s=\tau+1}^{t} \tilde{r}_s}\right] \left(\mathbb{E}\left[e^{\sum_{s=1}^{\tau} \tilde{r}_s}\right]\right)^{-1}$$

のように計算できるから，対応する（平均の）割引率は

$$\bar{\rho}_t(\tau) = -t^{-1} \ln\left(\mathbb{E}\left[e^{-\sum_{s=\tau+1}^{t} \tilde{r}_s}\right]\right) + t^{-1} \ln\left(\mathbb{E}\left[e^{\sum_{s=1}^{\tau} \tilde{r}_s}\right]\right)$$

となる．明らかに，$\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} = \bar{\rho}_t(\tau)\big|_{\tau=0}$ かつ $\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}} = \bar{\rho}_t(\tau)\big|_{\tau=t}$ である．

したがって，Weitzman-Gollier パズルは，プロジェクトの評価時点をそれぞれが恣意的に選択したことに起因している．そしてプロジェクトの評価時点は，誰がそのプロジェクトのリスクを引き受けるべきかということに関係している．プロジェクト Δx^{W} は，不確実性が解消された暁に，0 期に存在する人々によってプロジェクトの費用が賄われることを意味する．これは言い換えれば，機会費用の不確実性に伴うリスクを，0 期に存在する人々が全て引き受ける形でプロジェクトを評価するということである．一方プロジェクト Δx^{G} は，機会費用の不確実性に伴うリスクを，t 期（すなわち便益が生じる時点）に存在する人々が全て引き受けることを意味する．このような認識に基づいて，Buchholz and Schumacher (2008) は，温暖化対策の主な受益者が将来世代であることを考えれば，政策の実施に伴うリスクは受益者である将来世代によって引き受けられるべきであると指摘する．もしそうであるならば，パズルは Gollier (2004) の命題，すなわち時点に応じて逓増する割引率を正当化する形で解消するかに見える．

しかしながら，Gollier (2010b) および Gollier and Weitzman (2010) は，むしろ Weitzman (1998) の命題を正当化する形でパズルを解消した．パズル解消の鍵となったのは，(i) リスク中立性の仮定を緩めること，および (ii) 仮定 3 を明示的に考慮することである．各時点の効用関数 U の形状を特定せずに，厚生関数を (12) 式で与えよう．これは，リスク中立的でないことを許容するという意味でより一般的なものである．リスク中立性の仮定を緩めることによって，仮定 3 を明示的に考慮する必要が生じることに注意しておく．この時，定義 1 を満たす割引率は

$$\bar{\rho}_t = \delta - t^{-1} \ln \left(\frac{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_t)\right]}{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_0)\right]} \right) \tag{17}$$

である．

命題 4. 仮定 1，および仮定 3 の下で，任意の t と $\tau \in [0, t]$ について

$$\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} = \bar{\rho}_t^{\mathrm{G}} = \bar{\rho}_t(\tau) = \bar{\rho}_t$$

が成立し，これらの割引率は $t \to \infty$ の極限で $\underline{r}^*$ に収束する．さらに仮定 2 の下で，割引率は t の減少関数となる．

証明. 付録 A.4 を参照. □

この命題が示していることは，最適な消費経路が実現されていることを前提とすれば，割引率はプロジェクトの評価時点に依存せず，結局は Weitzman (1998) の結果が改めて確認されるということである．時点に応じて逓減する割引率が正当化され，特に遥か遠い将来時点に生じる便益に対しては，考え得る中で最小の利子率を割引率として用いるべきである．命題 4 は仮定 3 に依存するものであるが，そもそも利子率のみに基づいて割引率を論じることが妥当なのは，消費経路が最適化されている場合に限られる．したがってこれは，Weitzman (1998) の命題をより一般的な形で示したものと見てよいだろう．

3.2 消費経路の不確実性

投資の収益率に不確実性を仮定して割引率を検討することは，最適な消費経路の実現を暗黙的に仮定することになる．また将来時点の不確実性は，生産技術や投資の収益率に限って存在するわけではなく，様々な不確定要素が互いに作用し合いながら，最終的には「消費の不確実性」に集約されてゆく．この消費の不確実性に着目した研究を最初に行なったのは，Gollier (2002a,b) である．以下では，特に Gollier (2007, 2008) に依拠しながら，消費経路の不確実性が割引率に与える影響を検討する．

3.2.1 慎重度と予防効果

引き続き，厚生関数を (12) 式のように特定化しよう．この時の割引率は (17) 式によって与えられるが，0 期に不確実性は存在しないと仮定すれば，

$$\bar{\rho}_t = \delta - t^{-1} \ln \left(\frac{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_t)\right]}{U'(x_0)} \right) \tag{18}$$

である．この表現をもとに，まずは不確実性下での割引率の決定要因を検討する．(18) 式を見ると，第二項には消費水準が変化することによる効果，すなわち成長効果が含まれていることが分かる．ただ明らかに，第二項には成長効果だけでなく不確実性の影響も含まれている．成長効果と不確実性の効果とを分離するために，消費の経路が不確実性を伴わずに $\tilde{x}_t$ の平均値 $\mathbb{E}[\tilde{x}_t]$ を実現する場合の割引率 $\bar{\rho}_t^d$ を考える．非忍耐効果と成長効果は $\bar{\rho}_t^d$ の中で考慮されることになるので，割引率に対する不確実性の影響は $\bar{\rho}_t - \bar{\rho}_t^d$ である．ここで

$$\bar{\rho}_t = \underbrace{\delta - \frac{1}{t}\ln\left(\frac{U'(\mathbb{E}[\tilde{x}_t])}{U'(x_0)}\right)}_{=\bar{\rho}_t^d} - \frac{1}{t}\ln\left(\frac{\mathbb{E}[U'(\tilde{x}_t)]}{U'(\mathbb{E}[\tilde{x}_t])}\right) \tag{19}$$

と書けることに注意すれば，割引率に対する不確実性の影響は (19) 式の第三項によって捕捉されることが分かる．この影響は，Kimball (1990) による予防的貯蓄（precautionary saving）の概念との類似性から，予防効果（precautionary effect）と呼ばれる．

予防的貯蓄行動がそうであるように，割引率に対する予防効果も，効用関数の三次微分 $U'''(x_t) := \partial^3 U(x_t)/\partial x_t^3$ に依存している．具体的には，次の命題が成り立つ．

命題 5. 効用関数 U が $U''' > 0$ を満たす時，そしてその時のみ，$\bar{\rho}_t < \bar{\rho}_t^d$ が成立する．

証明. 付録 A.5 を参照． □

効用関数が $U''' > 0$ を満たすとき，その選好は不確実性に対して慎重（prudent）であるという．したがって命題 5 は，社会的な選好が不確実性に対して慎重である時，消費経路に不確実性が存在する場合の割引率が，不確実性が存在しない場合に比べて低くなることを示している．この結果は，消費経路にどのような不確実性が存在するかということに依存しない．つまり，社会的な選好が不確実性に対して慎重であると見なせる限りで，不確実性下での費用便益分析にはより低い割引率を用いるべきであり，したがって将来時点に生じる便益に対してより大きな重みを与える必要がある．

予防効果がどのような役割を果たすのかを，具体的な例を挙げて示しておこう．まず，(18) 式が

$$\bar{\rho}_t = \delta - t^{-1}\ln\left(\mathbb{E}\left[e^{\sum_{s=1}^{t}\tilde{v}_s}\right]\right) \tag{20}$$

のように書けることに注意する．ここで $\tilde{v}_t$ は限界効用の変化率 $\tilde{v}_{t+1} := \ln[U'(\tilde{x}_{t+1})] - \ln[U'(\tilde{x}_t)]$ である．(20) 式が端的に示すように，消費経路に不確実性が存在する場合，割引率は $\tilde{v}_t$ がどのような確率過程に従うかに依存する．ここでさらに，効用関数が (6) 式のような冪関数であると仮定すれば $\tilde{v}_{t+1} = -\eta[\ln(\tilde{x}_{t+1}) - \ln(\tilde{x}_t)] = -\eta\tilde{g}_{t+1}$ であるから，$\tilde{v}_t$ は消費の変化率 $\tilde{g}_t$ に比例する．この時，t 期間の消費の平均成長率を $\tilde{g}_t^* := t^{-1}\sum_{s=1}^{t}\tilde{g}_s$ で表わすと

$$\bar{\rho}_t = \delta - t^{-1}\ln\left(\mathbb{E}\left[e^{-\eta t\tilde{g}_t^*}\right]\right) \tag{21}$$

である．

(21) 式を見ると，確率変数 $\tilde{g}_t^*$ の分布を上手く特定化することで，解析的に割引率を解くことができると分かる．例えば，不確実性の特定化として，各期の成長率 $\tilde{g}_t$ が独立に同一の正規分布 $N(\mu,\sigma^2)$ に従うと仮定しよう．これは，$\tilde{g}_t$ が

$$\tilde{g}_t = \mu + \tilde{\varepsilon}_t, \quad \tilde{\varepsilon}_t \sim \mathrm{iid}N(0.\sigma^2) \tag{22}$$

のように表現できることを意味する．明らかに，t 期間の平均成長率 $\tilde{g}_t^*$ も正規分布に従い，$\mathbb{E}[e^{-\eta t \tilde{g}_t^*}]$ が $\tilde{g}_t^*$ の積率母関数であることに注意すれば

$$t^{-1}\ln\left(\mathbb{E}\left[e^{-\eta t \tilde{g}_t^*}\right]\right) = -\eta\mathbb{E}\left[\tilde{g}_t^*\right] + (1/2)\eta^2 t\mathbb{V}\left[\tilde{g}_t^*\right] \tag{23}$$

となる[20)]．ここで $\mathbb{V}$ は分散演算子である．さらに $\mathbb{E}\left[\tilde{g}_t^*\right] = \mu$ かつ $t\mathbb{V}\left[\tilde{g}_t^*\right] = \sigma^2$ から

$$\bar{\rho}_t = \delta + \eta\mu - (1/2)\eta^2\sigma^2 \tag{24}$$

である[21)]．不確実性が存在しない時（つまり $\sigma = 0$ の時），$\bar{\rho}_t = \delta + \eta\mathbb{E}\left[\tilde{g}_t\right]$ であるから，この割引率はベンチマーク・モデルのそれと等しい．また，不確実性が存在する場合（つまり $\sigma > 0$ の時），割引率は σ^2 の減少関数であり，したがって不確実性が大きければ大きいほど低い割引率が正当化される．

このような消費経路の不確実性は，割引率の値に対して定量的にどの程度の影響があるのだろうか．不確実性を (22) 式で特定化した場合，σ は消費の成長率のボラティリティを表わすものと解釈できる．過去 30 年間に渡る OECD 諸国のデータによれば，消費の成長率のボラティリティはおよそ 0.5%から 4%程度（つまり $0.005 \leq \sigma \leq 0.040$）と推定される (Cecchetti et al., 2006)．同様のボラティリティが今後も続くと仮定すると，例えば $\sigma = 0.02$ として，(24) 式から $\bar{\rho}_t = \delta + \eta\mu - 0.0002\eta^2$ となる．つまり，不確実性の存在しない場合と比べて，割引率は $0.02\eta^2$%しか低下しない．δ や μ が数%のオーダーで議論されることを考えると，不確実性の影響はほとんど無視できると言ってよいだろう．

もっとも，この結論は上の例で用いた二つの仮定，すなわち (i) 効用関数が (6) 式のような冪関数であること，および (ii) 消費経路に存在する不確実性が (22) 式で記述できること，という仮定に決定的に依存している．これらの仮定の帰結として，限界効用の変化率 $\tilde{v}_t$ は独立同一分布となり，$\bar{\rho}_t = \delta - \ln\left(\mathbb{E}\left[e^{\tilde{v}}\right]\right)$ のように，割引率の期間構造が平坦になってしまう．これは，遠い将来に生じる便益に対する割引率も，短期的な便益に対する割引率と全く同程度の予防効果しか持たないことを意味する．この点を踏まえ，Gollier (2002a,b) と Gollier (2007, 2008) は，上記の二つの仮定のそれぞれを検討することで，割引率に対する不確実性の影響が時点の経過とともに増大し得ること，すなわち逓減型の割引率が導かれることを示した．以下では，特に Gollier (2008) に従って，消費経路のショックに何らかの意味で永続性（persistence）が存在する場合の割引率について検討する．

3.2.2　永続性と構造的不確実性

逓減型の割引率が導かれる場合の例として，(22) 式をやや一般化し，一次の自己相関を許容した確率過程

$$\tilde{g}_t = \phi\tilde{g}_{t-1} + (1-\phi)\mu + \tilde{\varepsilon}_t \tag{25}$$

を考える[22]．ショックに永続性が存在しない時（つまり $\phi = 0$ の時），(25) 式は (22) 式に等しくなる．一方，消費の成長率が過去の成長率にある程度影響を受けると考えられる場合（つまり $\phi \in (0,1)$ である場合），$\tilde{g}_t$ の分布は独立同一でなくなる．この時，t 期間の平均成長率を $\tilde{g}_t^*$ とすれば，

$$\mathbb{E}\left[\tilde{g}_t^*\right] = \mu + t^{-1}(g_{-1}-\mu)\frac{\phi(1-\phi^t)}{1-\phi}$$

$$t\mathbb{V}\left[\tilde{g}_t^*\right] = \underbrace{\left\{1 - t^{-1}\frac{\phi(1-\phi^t)}{1-\phi}\left[2-\frac{\phi(1+\phi^t)}{1+\phi}\right]\right\}\frac{1}{(1-\phi)^2}}_{=:\Phi_t}\sigma^2$$

となる．簡単化のために，効用関数は (6) 式のまま与えられており，前期の成長率の実現値が平均的な値（$g_{-1} = \mu$）であったとしよう．すると割引率は，(21) 式と (23) 式から

$$\bar{\rho}_t = \delta + \eta\mu - (1/2)\eta^2\sigma^2\Phi_t$$

である．$\Phi_1 = 1$ であるから，この割引率は短期的にはショックに永続性がない場合の割引率と一致する．ただし，Φ_t が t について単調増加であることに注意すれば，割引率は t の減少関数になることが分かる．特に $\lim_{t\to\infty}\Phi_t = (1-\phi)^{-2}$ であるから，遥か遠い将来の便益に対しては，短期的な便益と比べて $(1-\phi)^{-2}$ 倍の予防効果が生じることになる．この結果は，計画期間が比較的短い公共政策の評価には標準的な割引率を用いる一方で，温暖化対策のような計画期間が非常に長期に及ぶ政策については，将来時点に生じる便益に対してより低い割引率を用いるべきであることを示唆している．

また，自己相関の程度が大きければ大きいほど，すなわち ϕ が 1 に近付けば近付くほど，遠い将来の便益に対する割引率は短期的な割引率に比べて小さくなる．実際，不確実性がわずかでも存在するならば（つまり $\sigma > 0$ ならば），

$$\lim_{\phi\to 1}\lim_{t\to\infty}\bar{\rho}_t = -\infty$$

であるから，$\tilde{g}_t$ がランダムウォーク（$\phi = 1$）に従う時，割引率は無限期先で $-\infty$ になる．したがってこの場合，遥か遠い将来時点に生じる損害は現時点のどんな犠牲を払ってでも回避されなければならない．この結果は，遥か遠い将来時点で割引率が最小になるという点で，Weitzman (1998) の命題を彷彿とさせるものである．事実，Weitzman (1998) が用いた仮定 1 は，利子率 $\tilde{r}_t$ の分布が独立同一でないことを要求したものであり，仮定 3 の下で，限界代替率の変化率 $\tilde{v}_t$ の分布が独立同一でないことに相当する．本節で仮定した冪関数型の効用関数の下では，それは

取りも直さず，消費の成長率の分布が独立同一でないということを意味する．特に，消費の成長率にランダムウォークを仮定した場合，平均成長率 $\tilde{g}_t^*$ の極限分布は正規分布になるから，命題 1 と同様の論理により，割引率は正規分布のサポート（実数全体）の下限 $-\infty$ に収束するのである．

上で用いた仮定は必ずしも現実的なものではないが，消費の成長率に対するショックの永続性は，成長率の自己相関ではなく，その背後にある構造的不確実性（structural uncertainty），あるいはパラメタの不確実性（parameter uncertainty）を反映したものとして解釈することができる．この点を確認するために，引き続き効用関数が冪関数であると仮定しよう．さらに，消費の成長率 $\tilde{g}_t$ が何らかの定常分布に従うと仮定する．このような想定の下ではショックに永続性がなくなり，割引率の期間構造は平坦になる．ただしこの結論は，$\tilde{g}_t$ の分布が既知であることを前提としている．これは言い換えれば，今後の経済の状態を確実に見通すことはできないが，実現し得る状態のそれぞれについて，それがどの程度の確かさで実現するかを完全に把握しているということである．この仮定は十分に現実的なものではない．将来のリスクを見積もるために現時点で利用できる情報は限られており，社会が直面している不確実性の中には，起こり得る事象に対して簡単に確率を割り振ることができないものも含まれているからである．このような認識に基づけば，$\tilde{g}_t$ の分布自体が未知であると想定する方がより現実的であると言える．

そこで，$\tilde{g}_t$ の分布を特徴付けるパラメタの値（つまりは $\tilde{g}_t$ の平均値や分散）が確実には分からない状況，すなわち構造的な不確実性を仮定しよう．具体的には，分布を特徴付けるパラメタを $\theta \in \Theta$ で表わし，$\tilde{\theta}$ 自体も確率変数であるとする．$\tilde{\theta}$ の真の値が θ であった場合，消費の成長率 $\tilde{g}_t$ は θ についての条件付定常分布に従うものとする．この時，割引率 $\bar{\rho}_t$ は

$$
\begin{aligned}
\bar{\rho}_t &= \delta - t^{-1} \ln\left(\mathbb{E}\left[e^{-\eta \sum_{s=1}^{t} \tilde{g}_s(\tilde{\theta})}\right]\right) \\
&= \delta - t^{-1} \ln\left(\mathbb{E}\left[\left(\mathbb{E}\left[e^{-\eta \tilde{g}(\theta)} \middle| \theta\right]\right)^t\right]\right) \qquad (26)
\end{aligned}
$$

である．この割引率の振舞いについての命題を以下で与えるが，その前に，θ について条件付きの確実性等価成長率 $\tilde{g}_\theta$ を $e^{-\eta g_\theta} = \mathbb{E}[e^{-\eta \tilde{g}(\theta)} | \theta]$，あるいはより明示的に

$$
g_\theta := -\eta^{-1} \ln\left(\mathbb{E}\left[e^{-\eta \tilde{g}(\theta)} \middle| \theta\right]\right)
$$

で定義しておく．これは $\tilde{\theta}$ の実現値に依存しているため，$\tilde{g}_\theta$ も確率変数である．$\tilde{g}_\theta$ の分布について，そのサポートの下限を $\underline{g} := \min_{\theta \in \Theta} g_\theta$ で表わす．

これらの表記を踏まえて，次の命題を得る．

命題 6. (26) 式の割引率 $\bar{\rho}_t$ は t について減少関数であり，$\lim_{t\to\infty} \bar{\rho}_t = \delta + \eta \underline{g}$ が成立する．

証明. 付録 A.6 を参照. □

つまり，消費の成長率自体に自己相関はなくとも，そこに構造的な不確実性が存在すると考えられる場合，時点に関して逓減型の割引率を用いるべきである．ま

表 2: 割引率に対する不確実性の影響

不確実性に関する仮定			導出される割引率の性質	
不確実性の所在	消費経路	不確実性の性質	割引率の期間構造	遠い将来時点の割引率
投資の収益率	最適性を仮定	—	—	利子率の下限
投資の収益率	最適性を仮定	実現値は一定	時点とともに逓減	利子率の下限
消費の成長率	—	定常系列相関	時点とともに逓減	相関の程度に応じた下限
消費の成長率	—	構造的不確実性	時点とともに逓減	確実性等価成長率の下限

た，$\bar{\rho}_1 = \delta + \eta\mathbb{E}\left[g_\theta\right]$ に注意すれば，成長率に相関がある場合と同様に，割引率は平均的な成長率を反映した値から始まり，t の増加とともに徐々に減少してゆく．これは，構造的な不確実性が消費の成長率に実質的な相関を生み出すように作用するからである．

具体的な例を挙げておこう．これまでの分析との比較を容易にするために，$\tilde{g}_t$ が独立に同一の正規分布 $N(\mu(\theta), \sigma(\theta)^2)$ に従うとする．分布の平均と分散は構造的パラメタ θ の関数で，θ の値に応じてそれぞれ一意に定まる．したがって，θ の値が既知であれば，$\bar{\rho}_t = \delta + \eta\mu(\theta) - (1/2)\eta^2\sigma(\theta)^2$，すなわち割引率は (24) 式に一致する．構造的パラメタの値が未知であるとすれば，割引率は $\bar{\rho}_t = \delta - t^{-1}\ln\left(\mathbb{E}\left[e^{-\eta\tilde{g}_\theta t}\right]\right)$ で，条件付きの確実性等価成長率 $\tilde{g}_\theta$ は

$$\tilde{g}_\theta = \mu(\tilde{\theta}) - (1/2)\eta\sigma(\tilde{\theta})^2 \tag{27}$$

となる．

命題 6 によれば，割引率の期間構造は $\tilde{g}_\theta$ の分布によって決定付けられる．そこで，Weitzman (2007b) に従い，$\mu(\theta) = \mu$ かつ $\sigma(\theta) = \theta$（つまり分散にのみ構造的な不確実性が存在する）として，θ が逆ガンマ分布に従うと仮定しよう．これは，Bayes ルールによる信念の更新を念頭に置いたものである．すると，逆ガンマ分布のサポートは $\mathbb{R}_+$ であるから，(27) 式により $\tilde{g}_\theta$ の分布のサポートは $(-\infty, \mu]$ となる．したがって，逆ガンマ分布自体のパラメタの設定によらず，命題 6 から

$$\lim_{t\to\infty}\bar{\rho}_t = -\infty$$

が直ちに従う．より一般に，σ の分布が逆ガンマ分布でなくとも，あるいは代わりに μ だけに不確実性が存在すると仮定した場合でも，$\tilde{g}_\theta$ の分布のサポートが $-\infty$ を含む限りこの結果は成立する．そのような仮定が妥当である時，遥か遠い将来に生じる損害は何としても避けられなければならない．以上の議論から，成長率が高い自己相関を持つという非現実的な仮定を置かずとも，消費の不確実性は割引率に対して十分に大きな影響を与えることが分かる．実際，例えば Gollier (2008) は，構造的パラメタの分布を現実的な範囲で仮定した場合に，ガンマ割引のような逓減型の割引率が正当化されることを示している．

本節のまとめとして，割引率に対する不確実性の影響を表 2 に整理しておく．近年の理論研究の多くは，不確実性の性質を注意深く検討する中で，時点とともに逓

減する割引率を様々な形で導いている．このような結果を受け，現実の政策評価の基準としても，政策に伴う便益が遠い将来に生じるものであればあるほど，相対的に低い割引率を適用することが求められるようになってきている[23)]．逓減型の割引率は不確実性が存在することの論理的な帰結として導かれるものであり，したがって利害が鋭く対立する温暖化対策の意思決定においても，一定の参照点を与えるものであると言えよう．

4　代替可能性と割引率

割引率の理論研究の中で，不確実性と並んで注目を集めているのが，異なる財の間での代替可能性である．ベンチマーク・モデルの中では，効用に直接的な影響を与える財は一種類のみと仮定されていた．しかしおそらくより現実的な仮定は，効用が複数の財やサービスから直接的に影響を受けるというものであろう．あるいは同じことであるが，複数の財を組み合わせることで効用の源泉を（家計内で）生産し，それを消費していると考える方が自然である．本節では，複数の異なる財が，直接的あるいは間接的に効用水準に影響を及ぼすような状況を考える．特に，人工資本から生産が可能な財（生産財）と自然資本からのみ生み出されるサービス（環境財）とを明示的に区別し，それによって割引率がどのように修正されるべきかを検討する．

割引率の議論において複数の財を明示的に考慮することは，少くとも次の二点において重要な意味を持つ．一点目は，財ごとに固有の割引率を導出できるということである．プロジェクトの実施によって生み出される将来時点の便益について，それが生産財の形で生じる場合と環境財の形で生じる場合とでは，便益に適用すべき割引率が異なり得る．また二点目として，異なる財の間での相対価格の変化を考慮できるようになることも，適切な割引率の設定を考える上で非常に重要である．プロジェクトの便益が特定の財の形でのみ生じる場合であっても，相対価格（限界代替率）の変化を通じて，割引率の期間構造は他の財の消費水準から影響を受ける[24)]．

以下では，まず割引因子や割引率の定義を複数財モデルに一般化し，その基本的な性質を確認する（4.1 項）．その上で，生産財と環境財とが存在する二財モデルを用いて，各財に対する割引率の期間構造を特徴付ける（4.2 項）．特に，財同士の代替可能性が割引率にどのような影響を及ぼすかについて詳細に検討する．

4.1　複数財モデルへの一般化

財ごとに異なった割引率を用いるべきことは，Krutilla (1967) によって古くから指摘されていたものである．Krutilla (1967)，Fisher et al. (1972)，および Fisher and Krutilla (1975) は，主に環境財の形で便益が生じるプロジェクトを念頭に，選好の変化や限界生産性の相対的な上昇を通じて環境財の価値が将来的に高まる可能性を指摘した．これらの研究は，将来時点に生じる環境的な便益に対して，市場の利子率（すなわち生産財の割引率）とは異なった割引率を用いる必要性を示唆するものである．温暖化問題の文脈においても，生産財と環境財とで異なった割引率を

用いるアプローチが提案されており，そのようなアプローチは双率割引（dual-rate discounting）と呼ばれる[25)]．しかしながら，1990 年代までの研究の多くは，理論的な基礎付けを欠いたまま，したがってある程度恣意的に，財ごとの割引率を差異化するというものであった．双率割引に対して理論的な定式化を与えたのは，Weikard and Zhu (2005) である．

まず，複数財モデルにおける割引率を定義しよう．具体的には，2 節で導入した定義のそれぞれについて，財の次元を $n \in \mathbb{N}$ に一般化する．つまり，x_t，Δx_t，Z_t，P_t などは，いずれも n 次元ベクトルであると考える．すると，プロジェクトを実施することによる純便益の割引価値 B は

$$B(P, \Delta x) := \sum_{t=0}^{\infty} P_t \Delta x_t = \sum_{t=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{n} P_{i,t} \Delta x_{i,t}$$

のように表現でき，社会的に効率的な割引因子の定義についても，2 節で与えた定義 1 がそのまま妥当する．

一般性を失なうことなく，0 期における財 1 を価値基準財としよう．また，各期における財 1 のことを便宜的に「生産財」と呼ぶことにする．この時，t 期の財 i に対する割引因子は

$$P_{i,t} = \frac{\partial W(x)}{\partial x_{i,t}} \Bigg/ \frac{\partial W(x)}{\partial x_{1,0}} \tag{28}$$

である．財 i に対する限界の意味での割引率 $\rho_{i,t}$，および平均の意味での割引率 $\bar{\rho}_{i,t}$ は，

$$\rho_{i,t+1} := -\left[\ln\left(P_{i,t+1}\right) - \ln\left(P_{i,t}\right)\right]$$
$$\bar{\rho}_{i,t} := -t^{-1}\left[\ln\left(P_{i,t}\right) - \ln\left(P_{i,0}\right)\right]$$

によってそれぞれ定義される．これらの定義から直ちに，プロジェクトの便益が異なる財の形で生じる場合，それぞれの財に対して適用すべき割引率は一般に異なったものになるということが分かる．

それでは，異なる財に対する割引率はどのような基準によって差異化されるべきであろうか．この点を確認するために，

$$p_{i,t} := \frac{\partial W(x)}{\partial x_{i,t}} \Bigg/ \frac{\partial W(x)}{\partial x_{i,0}}, \quad p^r_{i,t} := \frac{\partial W(x)}{\partial x_{i,t}} \Bigg/ \frac{\partial W(x)}{\partial x_{1,t}}$$

として，(28) 式が

$$P_{i,t} = p^r_{i,0} p_{i,t} = p_{1,t} p^r_{i,t} \tag{29}$$

のように書き替えられることに注意しよう．ここで，$p^r_{i,t}$ は t 期における財 i の（t 期の生産財と比較した）相対価格（relative price）である．あるいは，$p^r_{i,t}$ を t 期の財 i に対する限界支払意思額（marginal willingness to pay）と解釈することもできる．一方，$p_{i,t}$ は t 期における財 i の（0 期の財 i と比較した）相対的なシャドウプライスである．

プロジェクトの便益が t 期の財 i の形で生じる時，それを価値基準財（0 期の財 1）に変換するためには，(i) 現在価値に変換し，(ii) 生産財の価値に変換する，という

二つのステップが必要となる．(29) 式は，この二つのステップの順序が交換可能であることを示している．つまり，(29) 式の一つ目の等号は (i) の変換を行なった後に (ii) の変換を行なうものであり，逆に二つ目の等号は (ii) の変換を行なった後に (i) の変換を行なうものである．当然ながら，生産財に対する割引因子は $P_{1,t} = p_{1,t}$ を満たし，これは単一財モデルにおける社会的割引因子に等しい．(29) 式から，直ちに次の命題を得る．

命題 7. 財 i に対する割引率と生産財に対する割引率の差は，財 i の相対価格の成長率に比例する．より正確には，

$$\rho_{i,t+1} - \rho_{1,t+1} = -\left[\ln\left(p^r_{i,t+1}\right) - \ln\left(p^r_{i,t}\right)\right]$$

および

$$\bar{\rho}_{i,t} - \bar{\rho}_{1,t} = -t^{-1}\left[\ln\left(p^r_{i,t}\right) - \ln\left(p^r_{i,0}\right)\right]$$

が成立する．

つまり，財 i の相対価格が今後成長すると見込まれる場合，将来時点に生じる財 i の便益に対しては，その相対価格の成長率の分だけ，生産財に対するものより低い割引率を用いる必要がある．これは，Krutilla (1967) によってなされた指摘を厳密な形で確認するものである．なお，$\rho_{i,t+1} = -\ln(p_{i,t+1}) + \ln(p_{i,t})$，$\bar{\rho}_{i,t} = -t^{-1}\left[\ln(p_{i,t}) - \ln(p_{i,0})\right]$ であることに注意すれば，割引率の特徴付けには（$P_{i,t}$ ではなく）$p_{i,t}$ を分析するだけで十分であることも分かる．また，プロジェクトの割引現在価値 B は，財ごとの割引現在価値を $b_i := \sum_{t=0}^{\infty} p_{i,t}\Delta x_{i,t}$ として，$B = \sum_{i=1}^{n} p^r_{i,0} b_i$ のようにも書くことができる．

4.2　二財モデル

前項で導入した枠組みに基づき，$n = 2$ として生産財（$i = 1$）と環境財（$i = 2$）が存在する二財モデルを考えよう．特に，Hoel and Sterner (2007) および Traeger (2011b) に従って，生産財と環境財の代替可能性に着目しながら，それが割引率の期間構造に及ぼす影響を明らかにする．生産財と環境財の代替可能性は，弱い持続可能性（weak sustainability）と強い持続可能性（strong sustainability）に関する論争に見られるように，持続可能性の概念と密接に関わるものである．したがって，代替可能性と割引率との関係を検討することは，持続可能性の定義に関する立場の違いが長期的な便益の評価に対して持つ含意を解明することにつながる．

4.2.1　生産財と環境財の代替可能性

代替可能性に焦点を当てるために，効用関数 U に

$$U(x_{1,t}, x_{2,t}) = u(\bar{x}_t) = \frac{\bar{x}_t^{1-\eta}}{1-\eta}, \quad \bar{x}_t = \left[\nu_1 x_{1,t}^{\frac{\chi-1}{\chi}} + \nu_2 x_{2,t}^{\frac{\chi-1}{\chi}}\right]^{\frac{\chi}{\chi-1}} \tag{30}$$

のような CES-CIES 型を仮定する．ここで，$\bar{x}_t$ は n 種類の財を用いて「生産」される複合財（composite good）であり，人々はこの複合財の水準に応じて効用を得る．あるいは，全体的な消費水準に関する選好を関数 u が代表し，消費される財のバランスに関する選好を関数 $\bar{x}$ が代表していると解釈してもよい．χ は同一時点における生産財と環境財との代替の弾力性，$\xi := 1/\eta$ は異時点間の複合財 $\bar{x}_t$ の代替の弾力性である．なお，$\nu_i \in (0,1)$ は $\nu_1 + \nu_2 = 1$ を満たす．

(30) 式のような U を仮定した場合，$U_i(x_t) := \partial U(x_t)/\partial x_{i,t}$ として，相対価格 $p^r_{i,t}$ は

$$p^r_{i,t} = \frac{U_i(x_{1,t}, x_{2,t})}{U_1(x_{1,t}, x_{2,t})} = \frac{\nu_i}{\nu_1}\left(\frac{x_{i,t}}{x_{1,t}}\right)^{-1/\chi}$$

である．したがって，$g_{i,t}$ を財 i の成長率として，相対価格の変化率は

$$\ln\left(p^r_{i,t+1}\right) - \ln\left(p^r_{i,t}\right) = \chi^{-1}\left(g_{1,t} - g_{i,t}\right) \tag{31}$$

となる．つまり，もし生産財の成長率が環境財の成長率よりも大きい場合（$g_{2,t} < g_{1,t}$），環境財の相対価格は時間を通じて増加し続ける．これを命題 7 と合わせれば，次の命題を得る．

命題 8. 次の三つの不等式は互いに同値である．

$$g_{2,t} < g_{1,t} \iff p^r_{2,t} < p^r_{2,t+1} \iff \rho_{2,t} < \rho_{1,t}$$

さらに $\rho_{2,t} - \rho_{1,t} = -\chi^{-1}\left(g_{1,t} - g_{2,t}\right)$ となる．

この命題の意味するところは明快であろう．生産財の成長率が環境財のそれを上回る時，そしてその時のみ，環境財の相対価格は上昇し，環境財に対する割引率は生産財に対する割引率よりも小さくなる．具体的には，環境財に対する割引率と生産財に対する割引率との差は，それぞれの財の成長率の差に比例する．また，成長率の差を所与として，代替の弾力性 χ が小さければ小さいほど割引率の乖離は大きくなる．したがって，例えば生産財のみが成長し，環境財の消費水準が一定であるような場合，生産財と環境財との代替が困難であればあるほど，将来時点での環境財の便益に対して相対的に低い割引率を用いるべきである．

効用関数が (30) 式で与えられる場合，各財に対する割引率を解析的に求めることも可能である．具体的には，複合財の成長率を $g_{t+1} := -\left[\log(\bar{x}_{t+1}) - \log(\bar{x}_t)\right]$ として，財 i に対する割引率は

$$\rho_{i,t} = \delta + \underbrace{\eta g_t}_{=:\psi^g_t} \underbrace{-\chi^{-1}(g_t - g_{i,t})}_{=:\psi^s_{i,t}} \tag{32}$$

である．(32) 式の ψ^g_t は，全体的な消費水準が上昇することによる成長効果（overall growth effect）である．特に，複合財の成長率 g_t が，価値分配率（value share）を

$$v_{i,t} := \frac{p^r_{i,t} x_{i,t}}{p^r_{1,t} x_{1,t} + p^r_{2,t} x_{2,t}}$$

として $g_t = v_{1,t}g_{1,t} + v_{2,t}g_{2,t}$ と書けることに注意しよう．つまり g_t は，各財の成長率について価値分配率で加重平均をとったものになっており，$(x_{1,t}, x_{2,t})$ から $(x_{1,t+1}, x_{2,t+1})$ への消費の成長が実質的にどれだけ社会厚生を高めるかを表わしている．この実質的な消費水準の成長率が大きければ大きいほど，すなわち将来の社会が全体的に豊かであればあるほど，将来時点での一単位の財が持つ社会的な価値は現在時点に比べて相対的に低下する．価値が低下するその分だけ割引率は上昇し，したがって将来時点に生じる便益の現在価値は小さく見積もられなければならない．

一方の $\psi_{i,t}^s$ は，消費される財のバランスが変化することによる代替効果（real substitution effect）を表わしている．(32) 式から，財 i の割引率に対する代替効果は，その財の成長率 $g_{i,t}$ と複合財の成長率 g_t との差に比例する．財 i の成長率が他の財の成長率と比べて小さい時，将来時点における財 i は相対的な希少性を高めることになるから，一単位の財 i が持つ社会的な価値は他の財に比べて上昇する．希少性の高まりによって社会的な価値がどれだけ増加するかは，その財が社会にとってどれだけ掛け替えのないものであるかということ，すなわち代替（不）可能性に依存する．将来的にある財の相対的な希少性が高まることが予想されている時，他の財との代替の弾力性 χ が小さければ小さいほど，つまりそれを他の財によって埋め合わせることが困難であればあるほど，その財に対する割引率は小さく設定されなければならない．逆に，χ が十分に大きい場合，つまり他の財による代替が極めて容易であると考えられる場合には，代替効果による割引率の低下は無視し得るものになる．

簡単な数値計算を用いて，温暖化対策の費用便益分析への含意を示しておこう．まず，Sterner and Persson (2008) に従って，0 期（2010 年）における環境財の価値分配率 $v_{2,0}$ を 0.1 と仮定する．これは，仮に環境財が市場で取り引きされていた場合に，人々が総支出の 10%を環境財の購入に振り分け，残りの 90%を生産財の購入に充てるであろうことを意味する．各パラメタの値は，これも Sterner and Persson (2008) に従って，$\rho = 0.01$，$\chi = 1/2$，$\eta = 3/2$（$\xi = 2/3$）のように定める．残りのパラメタ ν_i については，環境財の単位を適当に選ぶことによって $\nu_2 = v_{2,0} = 0.1$ とする[26]．この設定は，例えば 2010 年の生産財の総消費が 43.9 兆ドルであった場合に，環境財の総消費の（生産財の単位での）価値を 4.9 兆ドル（$p_{2,0}^r \times 43.9$）と見積もることに相当する．将来時点における環境財の消費水準 $x_{2,t}$ は，2010 年を基準年とした平均気温の上昇分 TEMP_t に応じて

$$x_{2,t} = \frac{1}{1 + \kappa \mathrm{TEMP}_t^2} x_{2,0} \tag{33}$$

のように定める．つまり，将来の環境サービスの水準は，温暖化による気温上昇が起こらない限り（つまり $\mathrm{TEMP}_t = 0$ である限り）初期の水準を維持できるが，温暖化の進行によって低下するものと仮定する．損害関数のパラメタ κ は，DICE-2007 における生産財の損害関数に合わせて $\kappa = 0.0028388$ とする．

以上の仮定の下で，再び DICE-2007 を用いて，ベースラインから二酸化炭素を 1 炭素トンだけ削減した時の年あたりの便益 $\Delta x_{i,t}$ を図示したものが，図 2 の左上のパネルである．生産財の形で生じる便益については，図 1 で示したものと全く同一のものである．環境財の形（つまり温暖化による環境サービスへの損害が回

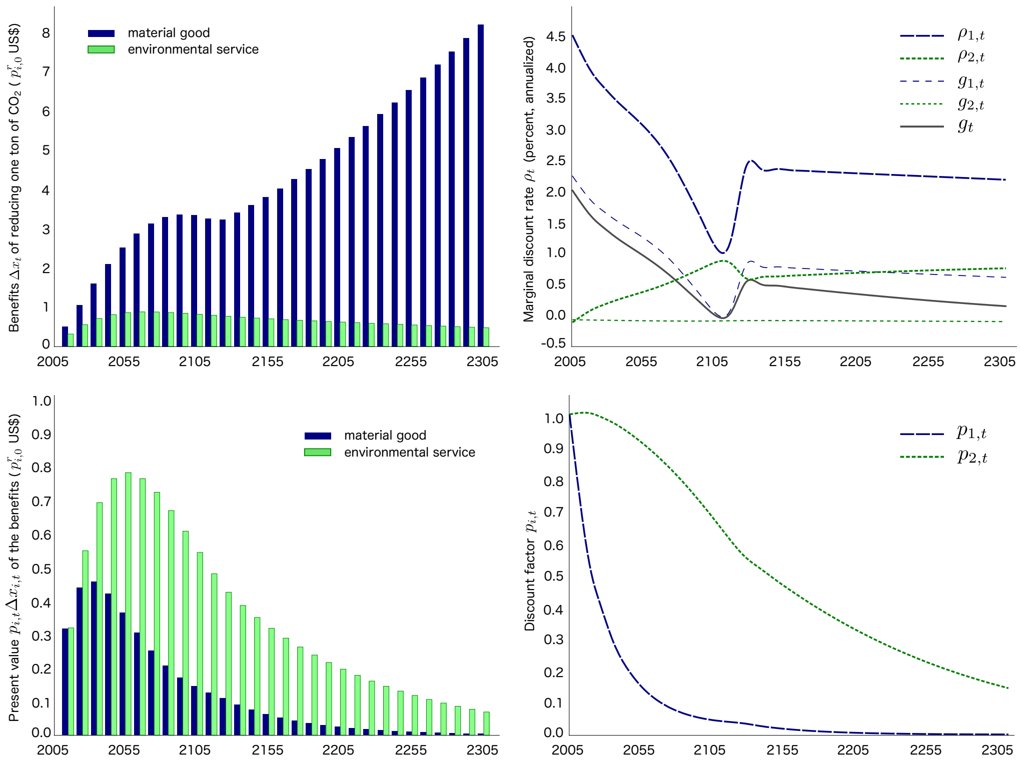

図 2: CO_2 を 1 炭素トン削減した場合の便益と割引率との関係（二財モデル）

避される形）で生じる便益は，生産財と比較して小さいものになっている．これは，主に (33) 式を仮定したことによるもので，正確な推定値の提供を意図するものでは無論ない．ベースライン・シナリオにおけるそれぞれの財の成長率 $g_{i,t}$，および複合財の成長率 g_t は右上のパネルに示されている．仮定により，環境財の水準はほとんど変化せず，温暖化の進行によって若干の減少傾向を示す．また図から明らかなように，生産財と環境財の割引率は非常に異なったものになる．生産財に対する割引率 $\rho_{1,t}$ が年率で 4.5%から 2.5%程度で推移するのに対して，環境財に対する割引率 $\rho_{2,t}$ は初期時点で-0.1%，長期的にも 0.8%に留まる．これは，生産財の成長によって環境財が相対的に希少となり，環境財の社会的な価値が将来時点で上昇するからである．実際，環境財の相対価格 $p^r_{2,t}$ は，2010 年時点において（ここで恣意的に選ばれている仮想的な単位あたりで）0.11 ドルであったものが，2100 年には 1.6 ドル，2300 年には 30 ドル以上にまで上昇する．

生産財の割引率 $\rho_{1,t}$ への代替効果は常に正となり，逆に環境財の割引率 $\rho_{2,t}$ への代替効果は常に負となる．さらに，ここでは環境財を生産財で代替することがそれほど容易ではない（$\chi = 0.5$）と仮定しているため，命題 8 により，二つの割引率に大きな乖離が生じる．このような代替効果の影響は，対応する割引因子 $p_{i,t}$（右下のパネル）や現在価値 $p_{i,t}\Delta x_{i,t}$（左下のパネル）からも明らかであろう．便益の割引現在価値の総和は，生産財について $b_1 = \sum p_{1,t}\Delta x_{1,t} = 38$，環境財について $b_2 = \sum p_{2,t}\Delta x_{2,t} = 110$ であるから，$B = b_1 + p^r_{2,0}b_2 \approx 51$ ドルとなる．つまり，温

暖化による環境財への影響を明示的に考慮した場合，限界削減費用が 51 ドル以下のプロジェクトであればその実施が正当化される．もちろん，この値は上述の仮定に依存しており，特に環境サービスの価値をどの程度に見積もるかによって大きく変わってくる．便益の割引現在価値の総和 B は，2010 年時点における環境財の価値を 11 兆ドル（$v_{2,0} = 0.2$）と見積もった場合は 61 ドル，19 兆ドル（$v_{2,0} = 0.3$）と見積もった場合は 74 ドル，29 兆ドル（$v_{2,0} = 0.4$）と見積もった場合は 90 ドル，44 兆ドル（$v_{2,0} = 0.5$）と見積もった場合は 113 ドルになる．したがって，仮に現時点で自然資本から人々が享受しているサービスの総価値を，人工資本から生産される財の総価値と同等であると見なすのであれば，不確実性の影響を考慮せずとも，プロジェクトの評価はガンマ割引を用いた場合と類似したものになる．

4.2.2　持続可能性と割引率

生産財と環境財が存在する二財モデルにおいては，二つの財がどれだけ代替可能であるかとう点が重要な役割を果たす．代替可能性をどのように見積もるかによって，それぞれの財に対して適用すべき割引率が大きく異なってくるからである．そして，生産財と環境財の代替可能性は，「持続可能な発展」概念をどのように解釈すべきかということと密接に関係している．環境と開発に関する世界委員会は，1987 年の報告書において，持続可能な発展を「将来世代が自らのニーズを満たす能力を損なうことなく，現在世代のニーズを満たすような発展」と定義した．この定義に対して，維持されるべきものを社会全体の厚生水準と解釈し，厚生水準が通時的に減少しない状態を以って持続可能な発展が実現されていると判断するのが，いわゆる「弱い持続可能性」という考え方である．一方，維持されるべきものを自然資本のストックと見なし，自然資本の物理的な量が通時的に減少しないことを持続可能な発展の要請と考えるのが，「強い持続可能性」と呼ばれる解釈である．二つの解釈の主な違いは，前者が自然資本を人工資本と代替可能なものと捉えるのに対して，後者はその代替可能性を認めていないという部分にある (Neumayer, 1999).

本節のモデルにおいて，代替可能性に対する考え方は厚生関数の中で考慮される．そこで，二つの持続可能性の解釈を次のように定義しよう．

定義 3. ある環境財の水準 $x_2^* \in \mathbb{R}_{++}$ を所与とする．この時，(i) 任意の効用水準 $U \in \mathbb{R}$ に対して，

$$U(x_1, x_2^*) > U$$

を満たす生産財の水準 x_1 が存在する時，厚生関数は弱い持続可能性を満たすと言う．(ii) 一方，ある効用水準 $U \in \mathbb{R}$ が存在し，

$$U(x_1, x_2^*) \leq U$$

が任意の生産財の水準 x_1 で成立する時，厚生関数は強い持続可能性を満たすと言う．

この定義は，生産財と消費財との代替可能性に関する立場の違いを反映したものである．厚生関数が弱い持続可能性を満たす時，環境財の水準が一定であって

も，生産財の水準を高めることで社会厚生を際限なく高めることができる．これは，環境財の水準が低下しても，それを埋め合わせるだけの生産財の水準が常に存在することを意味する．一方，社会厚生関数が強い持続可能性を満たす時，環境財の水準が一定である限り，生産財の水準をいくら高めてもそれによって実現できる社会厚生には上限が存在する．これは言い換えれば，環境財の水準が低下してしまった場合，その損失を生産財によって埋め合わせることには限りがあるということである．

次の命題は，より一般的な文脈で Gerlagh and van der Zwaan (2002) によって示されたものである．持続可能な発展の要請に対する立場の違いと，代替可能性に関する仮定の違いとを直接的に結びつけるものと言える．

命題 9. 代替の弾力性が $\chi > 1$ である時，そしてその時のみ，厚生関数は弱い持続可能性を満たす．また代替の弾力性が $\chi < 1$ である時，そしてその時のみ，厚生関数は強い持続可能性を満たす．

証明. 付録 A.7 を参照. □

したがって，定義 3 が妥当である限りにおいて，本節のモデルで $\chi > 1$ と仮定した場合，それは弱い持続可能性の立場を反映したものであり，逆に $\chi < 1$ と仮定した場合，それは強い持続可能性の立場を反映したものであると言える．これは，割引率への影響という点でも直観と整合的である．既に確認したように，代替の弾力性 χ の大小は，割引率に対する代替効果を直接的に左右する．例えば，将来的に環境財の希少性が相対的に高まると仮定した場合，χ の値が小さければ小さいほど，つまりは社会的な選好が強い持続可能性の立場を反映したものであればあるほど，環境財に対する割引率は低く設定されなければならない．ただし，ある特定の時点を所与とした時，弱い持続可能性と強い持続可能性の違いは割引率に定性的な違いをもたらさない．社会的な選好が弱い持続可能性を反映したものであっても，あるいは強い持続可能性を反映したものであっても，χ の値が小さければ小さいほど，環境財に対する割引率は低下する．

持続可能な発展の定義に関する立場の違いがより明確に表われるのは，割引率の期間構造においてである．期間構造の分析を容易にするために，経済は定常状態にあると仮定しよう．つまり，生産財と環境財の成長率は時間を通じて一定 ($g_{i,t} = g_i$) であるとする．ただし，定常状態においても価値分配率 $v_{i,t}$ は変化し続けるため，複合財の成長率 g_t は通時的に変化し得ることに注意しておく．さらに，持続可能な発展の実現が社会的な関心事となるような状況，すなわち環境財の成長率が生産財のそれと比べて小さいような状況（$g_2 < g_1$）を考えよう．この時，将来時点において環境財が相対的に希少性を高めることが見通される．実際，(31) 式から，環境財の相対価格 $p^r_{2,t}$ は通時的に増加し続け，$\lim_{t\to\infty} p^r_{2,t} = \infty$ である．したがって，環境財の価値分配率が $v_{2,t} = \nu_2^\chi (p^r_{2,t})^{1-\chi}/\nu_1^\chi + \nu_2^\chi (p^r_{2,t})^{1-\chi}$ と書けることに注意すれば，$v_{2,t}$ は χ の値に応じて単調に変化し，

$$g_{t+1} > g_t \iff \chi > 1 \tag{34}$$

表 3: $g_2 < g_1$ の定常状態における割引率の期間構造

	代替可能性		持続可能性		成長率	成長効果		代替効果				割引率
	異財間	異時点間	強弱	広狭	$\dot{g}$	ψ^g	$\dot{\psi}^g$	ψ_1^s	$\dot{\psi}_1^s$	ψ_2^s	$\dot{\psi}_2^s$	$\dot{\rho}_i = \dot{\psi}^g + \dot{\psi}_i^s$
A	$\chi > 1$	$\xi > \chi$	弱い	狭義	+	+	+	+	−	−	−	−
B	$\chi > 1$	$\xi = \chi$	弱い	広義	+	+	+	+	−	−	−	0
C	$\chi > 1$	$\xi < \chi$	弱い	広義	+	+	+	+	−	−	−	+
D	$\chi = 1$	—	—	—	0	+	0	+	0	−	0	0
E	$\chi < 1$	$\xi > \chi$	強い	広義	−	+	−	+	+	−	+	+
F	$\chi < 1$	$\xi = \chi$	強い	広義	−	+	−	+	+	−	+	0
G	$\chi < 1$	$\xi < \chi$	強い	狭義	−	+	−	+	+	−	+	−

かつ

$$\lim_{t\to\infty} g_t = \begin{cases} g_1 & \text{if} \quad \chi > 1 \\ \nu_1 g_1 + g_2 \nu_2 & \text{if} \quad \chi = 1 \\ g_2 & \text{if} \quad \chi < 1 \end{cases} \tag{35}$$

となる．つまり，社会的な選好が弱い持続可能性を満たすか，あるいは強い持続可能性を満すかによって，環境財の価値分配率の成長率が逆転し，それに伴って複合財の成長率の期間構造が決定的に異なったものになるのである．財の間の代替が比較的容易であると想定し，したがって社会的な選好が弱い持続可能性を満たすような場合（$\chi > 1$），複合財の生産に対する環境財の貢献は長期的には無視できるものになる．一方，生産財と環境財の代替は難しいという認識に基づき，強い持続可能性を満たすような社会的選好を考えた場合（$\chi < 1$），逆に複合財に対する生産財の貢献が相対的に無視できるものになる[27]．

割引率の期間構造に関する詳細な結果は，表 3 にまとめられている．成長効果 ψ_t^g や代替効果 $\psi_{i,t}^s$ の定性的な符号は，既に確認したように，生産財と環境財との代替可能性に関する仮定に依存しない．一方，便益が生じる時点に応じて各効果がどのように変化するか（$\dot{\psi} := \partial\psi/\partial t$）という点については，代替の弾力性 χ の大小が 1 を閾値にして符号を逆転させることが見て取れる．また，割引率の期間構造（$\dot{\rho} := \partial\rho/\partial t$）の決定には，異なる財の間での代替の弾力性だけでなく，異なる時点における同一財の代替の弾力性 $\xi = 1/\eta$ が重要な役割を果たすということも分かる[28]．これは，成長効果と代替効果の相対的な優劣が，異時点間の代替の弾力性によって異なってくるからである．(32) 式から，成長効果は異時点間の代替の弾力性 ξ の逆数に比例し，代替効果は財間の代替の弾力性 χ の逆数に比例する．したがって，χ が ξ を下回る場合（つまり異時点間の代替に比べて財間の代替が相対的に困難である場合），成長効果に比べて代替効果の方が割引率に対して大きな影響力を持ち，長期的には代替効果の影響が支配的となる．逆に χ が ξ を上回る場合（つまり異時点間の代替に比べて財間の代替が相対的に容易である場合），成長効果の方が相対的に大きな影響力を持ち，長期的には成長効果の影響が支配的となる．例えば，表の A と G のケースでは，いずれも時点とともに減少する割引率が導かれているが，前者は代替効果が成長効果を上回ることによるものであり，後者は逆に成長効果が代替効果を上回ることに起因する．

Traeger (2011b) は A と E の二つのケースを比較して，次のようなある意味で逆説的な結果を導いている．まず，弱い持続可能性の要請を満たす社会的な選好を考え，その代替の弾力性を $\chi^w > 1$ とする．一方で，同様に強い持続可能性の要請を満たす社会的な選好を考え，その代替の弾力性を $\chi^s < 1$ で表わす．また，それぞれの選好に対応する割引因子を $p^l_{i,t}$（$l \in \{w, s\}$）で表わそう．異時点間の代替の弾力性は，いずれの社会的選好についても共通に ξ であるとする．この時，次の命題を得る．

命題 10. 財間の代替に比べて異時点間の代替が容易であるならば，つまり $l \in \{w, s\}$ について $\xi > \chi^l$ であれば，

$$p^s_{i,t} < p^w_{i,t}, \quad \forall t \geq \bar{t}$$

となる時点 $\bar{t}$ が存在する．

証明. 付録 A.8 を参照. □

この命題は，強い持続可能性概念を支持する立場にとってあまり都合のよいものではないように見える．命題の趣旨は，やや厳しい仮定（とくに ξ が 1 より大きい，あるいは η が 1 より小さい）を置いた上ではあるものの，ある時点 $\bar{t}$ が必ず存在し，それ以降に生じるあらゆる便益について，強い持続可能性の考え方を反映した割引因子が弱い持続可能性の考え方を反映した割引因子よりも小さくなるというものである．したがってこれは，強い持続可能性を満たす社会的選好の方が，弱い持続可能性を満たす社会的選好に比べて，将来時点の便益や損害を小さく見積もる可能性を示している[29]．

もっとも，見込まれる便益の発生時点が有限期先までにとどまり，時点 $\bar{t}$ がプロジェクトの計画期間 T よりも将来の時点に存在する場合には，このような逆説的な結果は必ずしも導かれない．また Traeger (2011b) は，持続可能な発展の解釈として狭い定義を採用した場合，直観とより整合的な結果が得られることを示している．具体的には，「対応する割引率が逓減型であること」自体を（持続可能な発展と整合的な）社会的選好が満たすべき要件とした場合，将来的に環境の悪化が予測されるような状況（$g_2 < 0$）においては，命題 10 のような「割引因子の逆転」が生じる可能性を排除できることが分かっている．これは，強い持続可能性と弱い持続可能性との比較以前に，表の A と G のケース以外を，背後にある社会的選好が（狭義の）持続可能性と整合的でないと判断して除外することに相当する．この結果は，持続可能な発展の解釈に関する立場の違いが，生産財と環境財との代替可能性だけでなく，異時点間の代替可能性についての認識の違いにも起因するものであることを示唆している．

本節で議論した割引率と代替可能性との関係は，近年に著しい理論的展開を見た一方で，分析を深める余地を比較的大きく残している．また，社会的な割引と環境サービスの評価とを結びつけるという点で，実証的にも重要な課題を含むものである．温暖化問題の文脈に限らず，より一般に持続可能性の概念を実践的な政策評価の基準に反映させるという意味でも，更なる発展が期待される論点であると言えよう．

5　まとめと今後の展望

本稿では，不確実性と代替可能性に焦点を当てながら，標準的な割引理論がどのように修正されるべきかを検討した．将来の見通しに不確実性が存在することを認めるのであれば，費用便益分析の中で用いる割引率はより低く設定されるべきである．その不確実性が生産技術に存在するのであれ，あるいは消費経路に存在するのであれ，多くのもっともらしい想定の下で逓減型の割引率が導き出される．そして逓減型の割引率を用いた場合，短期的なプロジェクト評価との整合性を保ちながら，将来に生じる便益についても直観に反しない形で考慮することが可能となる．一方，複数財モデルを用いた分析が示していることは，それぞれの財に対する割引率が大きく異なったものになり得るということである．これは，単一財モデルに依拠する標準的な分析において，相対的な希少性の変化が割引率に与える影響を暗黙のうちに捨象していたことを意味する．特に，自然資本から生み出される環境サービスに喪失の恐れがある場合，人工資本を用いてそれを代替することが難しいのであれば，損失を回避することによる便益の現在価値は十分に大きなものになり得る．

本稿は割引理論に関する研究動向を整理することを目指したが，ここで触れたもの以外にも多くの論点が存在する．例えば，不確実性下での意思決定理論が標準的な期待効用理論を越えて展開されていることを受けて，いわゆる曖昧さ（ambiguity）を割引率の中で考慮する試みがある (Gollier and Gierlinger, 2010; Traeger, 2011a)．温暖化の進行が人類にとって未曾有の経験であり，その影響を通常の意味での確率的事象として捉えることが難しいことを考えれば，曖昧回避的な選好を割引率の設定に反映させることは重要な課題である．また，割引率の議論の中でしばしば争点となる世代間の衡平性だけでなく，世代内の衡平性についてもその影響が検討され始めている (Yamaguchi, 2010; Gollier, 2011; Emmerling, 2011)．生産財と環境財の代替可能性がそうであったように，相対的に豊かな地域の財と貧しい地域の財は，その「代替可能性」に応じて割引率に影響を及ぼす．特に温暖化の影響は地理的に偏った形で生じると考えられるため，対策の便益を最適な形で分配できるのでない限り，世代内の衡平性も割引理論の中で検討される必要がある．他にも，人口動態の変化から逓減型の割引率を正当化するもの (Krysiak, 2010) や，破局的事象のリスクに焦点を当てたもの (Tsur and Zemel, 2009)，世代を越えた習慣形成に着目するもの (Gollier et al., 2010) など，様々な観点から割引理論の研究が進められている．

理論研究におけるこのような展開は，実践的な文脈で温暖化問題を論じるにあたっても，議論を生産的な形で進めるための手掛かりとなるものである．温暖化によって遠い将来に生じると予想される損害は，短期的な投資の収益率との比較に基づいて過少に評価されるべきではなく，また一方で，論争の多い仮定を用いて誇張される必要もない．本稿で紹介した議論が示唆していることは，これまでに見落とされてきた現実の側面を考慮することによって，過少でも過剰でもない，適度な範囲での温暖化対策が正当化されるということである．もちろん，議論の余地は依然として大きく残されたままである．ただそれも，主義主張の相異に根差した論争としてではなく，論理の積み重ねによって解決し得る課題として捉えられるようになってきている．温暖化による悪影響が顕在化しつつある中で，理

論的基盤の一層の整備を進めるとともに，研究成果の蓄積を政策評価の中で積極的に活用してゆくことが必要であろう．

A　付録

A.1　命題 1 の証明

まず，$\underline{r}^*$ が R^* の下限であることから

$$\begin{aligned}\lim_{t\to\infty} e^{-(r_t^*-\underline{r}^*)t} &= e^{-(r^*-\underline{r}^*)\lim_{t\to\infty} t} \\ &= \begin{cases}1 & \text{if} \quad r^* = \underline{r}^* \\ 0 & \text{if} \quad r^* \in R^* \setminus \{\underline{r}^*\}\end{cases}\end{aligned}$$

である．したがって，

$$\begin{aligned}\lim_{t\to\infty} e^{-(\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}-\underline{r}^*)t} &= \lim_{t\to\infty} \int e^{-(r_t^*-\underline{r}^*)t} dF_t(r_t^*) \\ &= \int e^{-(r^*-\underline{r}^*)\lim_{t\to\infty} t} dF(r^*) \\ &= 1\end{aligned}$$

が成り立つ．これは $\lim_{t\to\infty}\left(\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} - \underline{r}^*\right)t = 0$ を意味するから，$\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} - \underline{r}^*$ は $t \to \infty$ の極限において 0 に収束しなければならず，命題の結果を得る．

A.2　命題 2 の証明

リスクに直面する個人の確実性等価が効用関数の凸性の増加関数になることから直ちに従う．まず (11) 式を $e^{-t\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}} = \mathbb{E}[e^{-t\tilde{r}^*}]$ のように書き直せることに注意する．ここで，凸関数 $u_t(c) = e^{tc}$ を効用関数とするような個人を考えると，これは $u_t(-\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}) = \mathbb{E}\left[u_t(-\tilde{r}^*)\right]$ を意味する．つまり $-\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}$ は，u_t を効用関数とする個人が不確実な消費水準 $-\tilde{r}^*$ に直面した時の確実性等価であると見なせる．同様にして，$-\bar{\rho}_{t+1}^{\mathrm{W}}$ は u_{t+1} を効用関数とする個人が $-\tilde{r}^*$ に直面した時の確実性等価である．u_t の定義から，任意の t について $u_{t+1}(c) = e^{(t+1)c} = (u_t(c))^{(t+1)/t}$ であるから，u_{t+1} は u_t に比べて「より凸」である．よって，Pratt (1964) の定理 1 から，任意の t について $-\bar{\rho}_{t+1}^{\mathrm{W}} > -\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}$ が成立する．

A.3　命題 3 の証明

証明は，命題 1 および命題 2 の証明と完全に対称的である．まず，$\bar{r}^*$ が R^* の上限であることから

$$\lim_{t\to\infty} e^{(r_t^*-\bar{r}^*)t} = \begin{cases}1 & \text{if} \quad r^* = \bar{r}^* \\ 0 & \text{if} \quad r^* \in R^* \setminus \{\bar{r}^*\}\end{cases}$$

である．したがって，

$$\lim_{t\to\infty} e^{(\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}}-\bar{r}^*)t} = \int e^{(r^*-\bar{r}^*)\lim_{t\to\infty} t} dF(r^*) = 1$$

が成り立つ．これは $\lim_{t\to\infty}\left(\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}}-\underline{r}^*\right)t=0$ を意味するから，$\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}}-\underline{r}^*$ は $t\to\infty$ の極限において 0 に収束しなければならない．命題の後半については，まず (16) 式を $e^{t\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}}}=\mathbb{E}[e^{t\tilde{r}^*}]$ のように書き直せることに注意する．ここで，$u_t(c)=e^{tc}$ を効用関数とするような個人を考えると，$\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}}$ と $\bar{\rho}_{t+1}^{\mathrm{G}}$ は，それぞれ u_t と u_{t+1} を効用関数とする個人が不確実な消費水準 $\tilde{r}^*$ に直面した時の確実性等価であると見なせる．u_{t+1} は u_t に比べて「より凸」であるから，Pratt (1964) の定理 1 から，任意の t について $\bar{\rho}_{t+1}^{\mathrm{G}}>\bar{\rho}_t^{\mathrm{G}}$ が成立する．

A.4　命題 4 の証明

まず，プロジェクト $\Delta x(\tau)$ について，対応する割引因子は

$$P_t(\tau)=\frac{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_\tau)e^{-\sum_{s=\tau+1}^{t}\tilde{r}_s}\right]}{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_\tau)e^{\sum_{s=1}^{\tau}\tilde{r}_s}\right]}$$

である．同様に，Δx^{W} と Δx^{G} に対応する割引因子は，それぞれ

$$P_t^{\mathrm{W}}=P_t(0)=\mathbb{E}\left[\frac{U'(\tilde{x}_0)}{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_0)\right]}e^{-\sum_{s=1}^{t}\tilde{r}_s}\right]$$

$$P_t^{\mathrm{G}}=P_t(t)=\left(\mathbb{E}\left[\frac{U'(\tilde{x}_t)}{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_t)\right]}e^{\sum_{s=1}^{t}\tilde{r}_s}\right]\right)^{-1}$$

である．仮定 3 の下で消費の経路が最適化されているならば，x は利子率の実現値 $r:=\{r_s\}_{s=1}^{\infty}$ に応じた水準となり，任意の r について

$$e^{-r_{\tau+1}}=e^{-\delta}\frac{U'(x_{\tau+1}(r))}{U'(x_\tau(r))}$$

すなわち

$$U'(x_\tau(r))e^{-\sum_{s=\tau+1}^{t}r_s}=U'(x_t(r))e^{-\delta(t-\tau)}$$
$$U'(x_\tau(r))e^{\sum_{s=1}^{\tau}r_s}=U'(x_0(r))e^{\delta\tau}$$

が全ての τ で成立する．したがって，$P_t:=e^{-\delta t}\mathbb{E}[U'(\tilde{x}_t)]/\mathbb{E}[U'(\tilde{x}_0)]$ とすれば，任意の t と τ について

$$P_t^{\mathrm{W}}=P_t^{\mathrm{G}}=P_t(\tau)=P_t$$

であるから，それぞれに対応する割引率は一致する．一般性を失なうことなく，P_t^{W} に対応する割引率 $\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}$ だけを考えよう．仮定 1 の下で

$$\begin{aligned}\lim_{t\to\infty} e^{-(\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}-\underline{r}^*)t} &= \lim_{t\to\infty}\mathbb{E}\left[\frac{U'(\tilde{x}_0)}{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_0)\right]}e^{-(\tilde{r}_t^*-\underline{r}^*)t}\right]\\ &= \lim_{t\to\infty}\int e^{-(r^*-\underline{r}^*)t}\hat{f}(r^*)dr^* \qquad (36)\end{aligned}$$

である．ただしここで，

$$\hat{f}(r) := \frac{U'(x_0(r))}{\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_0)\right]} f(r)$$

とした．命題 1 の証明と同じ議論により，(36) 式は 1 に収束するから，$\lim_{t\to\infty} \bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} = \underline{r}^*$ である．また，仮定 2 の下で

$$\hat{\mathbb{E}}\left[e^{-\tilde{r}t}\right] := \int e^{-rt} \hat{f}(r) dr$$

とすれば，$\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}} = t^{-1} \ln(\hat{\mathbb{E}}[e^{-\tilde{r}t}])$ と書ける．命題 2 の証明と同じ議論により，この $\bar{\rho}_t^{\mathrm{W}}$ は t に関して減少関数であるから，命題の結果を得る．

A.5　命題 5 の証明

Jensen の不等式により $\mathbb{E}\left[U'(\tilde{x}_t)\right] \geq U'(\mathbb{E}\left[\tilde{x}_t\right]) \Leftrightarrow U''' \geq 0$ であることから，(19) 式とあわせて直ちに導かれる．

A.6　命題 6 の証明

まず $e^{-(\bar{\rho}_t-\delta)t} = \mathbb{E}[e^{-\eta\tilde{g}_\theta t}]$ と書けることに注意する．$u_t(c) = e^{ct}$ という効用関数を持つ個人にとって，$-(\bar{\rho}_t-\delta)$ は $-\eta\tilde{g}_\theta$ の確実性等価となっている．したがって，命題 2 の証明と同様の論理から，$-(\bar{\rho}_{t+1}-\delta) > -(\bar{\rho}_t-\delta)$ が任意の t で成立する．また命題 1 の証明と同様にして，$\lim_{t\to\infty} e^{-(\bar{\rho}_t-\underline{g})t} = 1$ となるから，割引率 $\bar{\rho}_t$ は $t\to\infty$ の極限で $\tilde{g}_\theta$ の下限に収束する．

A.7　命題 9 の証明

まず $\chi > 1$ としよう．この時，任意の $x_2 > 0$ について $\lim_{x_1\to\infty} \bar{x}(x_1, x_2) = \infty$ であるから，$u(\bar{x})$ が上に有界でないことに注意すれば，$\lim_{x_1\to\infty} U(x_1, x_2) = \infty$ である．したがって，任意の $x_2^* > 0$ と任意の $U < \infty$ について，$U(x_1, x_2^*) > U$ となる x_1 が常に存在する．次に $\chi < 1$ としよう．この時，任意の $x_2 > 0$ について $\lim_{x_1\to\infty} \bar{x}(x_1, x_2) = \nu_2^{\chi/(\chi-1)} x_2$ であるから，$\lim_{x_1\to\infty} U(x_1, x_2) = (1-\eta)^{-1} \nu_2^{\chi(1-\eta)/(\chi-1)} x_2^{1-\eta} < \infty$ である．したがって，x_2^* を所与として，$U > (1-\eta)^{-1} \nu_2^{\chi(1-\eta)/(\chi-1)} (x_2^*)^{1-\eta}$ となる U が存在し，任意の x_1 について $U(x_1, x_2^*) < U$ が成立する．

A.8　命題 10 の証明

まず，(37) 式と (38) 式から，$\xi > \chi^l$ の下で

$$\lim_{t\to\infty} \left(\rho_{1,t}^s - \rho_{1,t}^w\right) = (g_1 - g_2)\left((\chi^s)^{-1} - \xi^{-1}\right) > 0$$

$$\lim_{t\to\infty}\left(\rho^s_{2,t}-\rho^w_{2,t}\right)=(g_1-g_2)\left((\chi^w)^{-1}-\xi^{-1}\right)>0$$

であることに注意する．これにより，ある $\varepsilon>0$ と t^* が存在し，$\rho^s_{i,t}-\rho^w_{i,t}>\varepsilon>0$ が任意の $t>t^*$ で成立する．よって，任意の $t>t^*$ について

$$\begin{aligned}p^w_{i,t}/p^s_{i,t} &= e^{\sum_{s=0}^{t^*}(\rho^s_{i,t}-\rho^w_{i,s})}\times e^{\sum_{s=t^*+1}^{t}(\rho^s_{i,s}-\rho^w_{i,s})}\\ &> e^{\sum_{s=0}^{t^*}(\rho^s_{i,s}-\rho^w_{i,s})}\times e^{\varepsilon(t-t^*-1)}\end{aligned}$$

である．ここで $\bar{t}:=\max\{t^*,t^*+1-\varepsilon^{-1}\sum_{s=0}^{t^*}(\rho^s_{i,s}-\rho^w_{i,s})\}$ のように $\bar{t}$ をとれば，任意の $t>\bar{t}$ について

$$p^w_{i,t}/p^s_{i,t}>e^{\sum_{s=0}^{t^*}(\rho^s_{i,s}-\rho^w_{i,s})}\times e^{\varepsilon(\bar{t}-t^*-1)}\geq 1$$

となり，命題の結果を得る．

注

1）厚生関数をこのような「割引効用和」の形で定義するアプローチは割引効用主義（discounted utilitarianism）と呼ばれ，Ramsey (1928) によって導入された．背後にある公理の定式化を行なったのは Koopmans (1960) である．
2）このような解釈については，例えば Harsanyi (1955) を参照．
3）テイラー近似により，十分に小さな ε について $\ln(1+\varepsilon)\approx\varepsilon$ であり，また $U'(x_{t+1})\approx U'(x_t)+U''(x_t)(x_{t+1}-x_t)$ であることに注意する．これらの近似は，一期間あたりの時間幅を小さく定義すればするほど，したがって x_{t+1} が x_t に近づけば近づくほど，精確なものになる．
4）例えば，社会的時間選好率を年率 1.5%とした場合，$e^{-0.015\times45}\approx0.5$ であるから，2050 年に存在する人の効用は 2005 年に存在する人の効用と比べておよそ半分の価値しか持たないと判断することになる．
5）このような解釈は，古くは Yaari (1965) によって与えられたものである．
6）消費の限界効用の代替の弾力性 (elasticity of marginal utility of consumption)，不平等回避の測度 (index of inequality aversion)，あるいは相対的リスク回避の測度 (index of relative risk aversion) などと呼ばれる．また η_{t+1} は, $\zeta_{t+1}:=-\partial\ln(x_{t+1}/x_t)/\partial\ln(U'(x_{t+1})/U'(x_t))$ で定義される異時点間の消費の代替の弾力性（intertemporal elasticity of substitution）の逆数である．
7）同一時点での主体の異質性を明示的に考慮する場合，η は世代内の（消費の水準に関する）不平等回避に関する選好も同時に代表する (Atkinson, 1970).
8）便益の流列がこのような性質を持つのは，部分的には DICE モデルにおける損害関数の仮定によるものである．DICE モデルは，温暖化による損害が経済規模に比例するような形で損害関数を特定化している．したがって，長期的な経済成長を仮定している DICE-2007 のベースライン・シナリオでは，気温上昇による限界的な損害が将来時点であるほど大きくなる．
9）簡単な例を挙げれば，t 期における投資の収益率を r_t とした時，社会全体の資本蓄積 k_t の動学は $k_{t+1}=e^{r_{t+1}}(k_t-x_t)$ のように書ける．これを制約として (5) 式を最大化するように x_t が選ばれる時，一階の条件から $e^{-r_{t+1}}=e^{-\delta}U'(x_{t+1})/U'(x_t)$ が成立するので，最適な消費経路上では (8) 式が満たされる．
10）DICE-2007 のベースライン・シナリオによる．
11）利子率 r_t と消費の成長率 g_t が与えられたとしても，(8) 式を満たす δ と η の組み合わせは無限に存在する．Nordhaus (2008) は，世代間衡平性を重視するのであれば $\delta=0.001$

と置くことも可能であるが，その場合には Ramsey ルールを満たすように $\eta = 2.7$ とするべきであると主張する．Weitzman (2007a) も，Nordhaus (2007) とおよそ同様の立場から，$\delta \times 100 = g \times 100 = \eta = 2$（torio of twos）を一つのベンチマークとしている．

12) 例えば，Dasgupta (2008)，Gollier et al. (2008)，Heal (2009) など．

13) 市場で観察される意思決定は必ずしも外部性を考慮したものではなく，したがって市場の利子率と社会的な投資の収益率とは乖離し得る．Dasgupta (2008) はその一例として，温室効果ガスの長期的な影響を考慮すれば（社会的な）投資の収益率は負であるはずのエネルギー集約的な生産活動に対して，現実の市場では投資が続いている（つまり市場の利子率は正である）という事実を挙げている．

14) 倫理的な観点から時間選好率をゼロに設定すべきとする立場は，古くは Pigou (1920)，Ramsey (1928)，Harrod (1948) などに見られる．

15) 例えば，Byatt et al. (2006)，Tol and Yohe (2006, 2009)，Nordhaus (2007)，Weitzman (2007a)，Dasgupta (2007)，Mendelsohn (2008) など

16) このような問題は，古くは Ramsey (1928) によって指摘されていたものである．Rawls (1971) や Arrow (1999) が指摘するように，正の時間選好率は世代間衡平性の観点からは倫理的に許容されないが，逆に時間選好率を極めて低く設定することも，実際問題として相対的に貧しい世代に負担を強いるという意味で，倫理的に受け入れ難い結論を導く．

17) サポート R^* が単集合でないとき，仮定 1 は各期の利子率の分布が独立かつ同一でないことを暗に意味する．$\tilde{r}_t$ が独立同一分布に従う場合，大数の法則により，平均利子率 $\tilde{r}_t^*$ は $t \to \infty$ の極限で期待値 $\mathbb{E}[\tilde{r}_t]$ に確率収束してしまう．つまりその場合，$R^* = \{\mathbb{E}[\tilde{r}_t]\}$ で $\bar{r}^* = \underline{r}^* = \mathbb{E}[\tilde{r}_t]$ となる．

18) 逓減型の割引率については，例えば Groom et al. (2005) や Gollier et al. (2008) に詳しい．

19) 社会的選好が期待効用の公理を満たすとする仮定は，その妥当性に関して論争があるものである．この仮定の妥当性に疑問を投げかけるものとしては，Diamond (1965)，Epstein and Segal (1992) などがある．

20) 一般に，確率変数 $\tilde{y}$ が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従う時，その積率母関数 $M(\lambda)$ は任意の $\lambda \in \mathbb{R}$ に対して $M(\lambda) := \mathbb{E}[e^{\lambda \tilde{y}}] = e^{\lambda\mu + (1/2)\lambda^2\sigma^2}$ である．

21) これは，拡張 Ramsey ルール（extended Ramsey rule）と呼ばれ，Mankiew (1981) などによって導出されたものである．

22) これは非現実的な想定ではなく，実際，消費の成長率に対するショックが定常過程であるという仮説は多くの国で実証的に否定されている (Chocrane, 1988)．

23) 例えば英国では，長期的な政策評価に対しては逓減型の割引率を使用するよう推奨している (HM-Treasury, 2003)．

24) また別の重要な点として，割引率に対する不確実性の影響を個別の財ごとに考慮できるということもある．一方の財の水準については将来時点での不確実性が大きく，他方の財についてはそうでないというような状況は，ごく自然に起こりうる．特に二財モデルにおける不確実性の影響については，Gollier (2010a) が詳細に分析している．

25) 双率割引については，例えば，Hasselmann et al. (1997)，Yang (2003)，Tol (2003) などを参照．

26) 0 期において生産財の水準が（例えばドルの単位で）$x_{1,0}$ であったとしよう．環境財についても 0 期の水準が存在するが，その財の単位のとり方は任意である．そこで，生産財の単位を固定したまま，環境財の 0 期の水準 $x_{2,0}$ が $x_{2,0} = x_{1,0}$ を満たすように，環境財の単位を選ぶ．すると，$p^r_{2,0} = (\nu_2/\nu_1)(x_{2,0}/x_{1,0})^{-1/\chi} = \nu_2/\nu_1$ かつ $v_{2,0} = p^r_{2,0}/(1 + p^r_{2,0}) = \nu_2$ であるから，パラメタ ν_2 は 0 期における環境財の価値分配率と等しくなり，$\nu_2 = v_{2,0} = 0.1$（よって $\nu_1 = 1 - \nu_2 = 0.9$）である．

27) なお，長期的な割引率は，(35) 式を (32) 式と合わせて

$$\lim_{t\to\infty} \rho_{1,t} = \begin{cases} \delta + \eta g_1 & \text{if} \quad \chi > 1 \\ \delta + \eta g_1 - (\eta - 1)\nu_2 (g_1 - g_2) & \text{if} \quad \chi = 1 \\ \delta + \eta g_2 + \chi^{-1} (g_1 - g_2) & \text{if} \quad \chi < 1 \end{cases} \tag{37}$$

$$\lim_{t\to\infty}\rho_{2,t}=\begin{cases}\delta+\eta g_1-\chi^{-1}(g_1-g_2) & \text{if} \quad \chi>1\\ \delta+\eta g_2+(\eta-1)\nu_1(g_1-g_2) & \text{if} \quad \chi=1\\ \delta+\eta g_2 & \text{if} \quad \chi<1\end{cases} \tag{38}$$

となる．

28) 割引率は $\rho_{i,t}=\delta+(\chi-\xi)(\chi\xi)^{-1}g_t+\chi^{-1}g_i$ のように書け，したがって $\dot{\rho}_i=\dot{g}(\chi-\xi)/\chi\xi$ となる．これを (34) 式とあわせれば，表の結果を得る．

29) 特に，生物多様性の損失や氷床の融解といったような，温暖化の影響が環境サービスの不可逆的な損失をもたらすような場合，強い持続可能性の要請は，おそらくは本来の意図に反する形で費用便益分析の結果を左右することになる．何らかの不可逆的な損失を食い止めるためのプロジェクトを考えた場合，その便益は未来永劫，常に正の値で生じるものと見なせる．そのため，たとえ時点 $\bar{t}$ が遥か遠い将来であっても，弱い持続可能性概念に基づく費用便益分析の方がそのプロジェクトによって生じる便益の現在価値を高く評価する可能性が高い．

参考文献

Arrow, K. J. (1999), “Discounting, morality, and gaming,” in P. R. Portney and J. P. Weyant (eds.), *Discounting and intergenerational equity*, pp. 13–21, Resource for the Future.

Atkinson, A. B. (1970), “On the measurement of inequality,” *Journal of Economic Theory*, vol. 2, pp. 244–263.

Buchholz, W. and J. Schumacher (2008), “Discounting the long distant future: a simple explanation for the Weitzman-Gollier-puzzle,” CESifo Working Paper, No. 2357.

Byatt, I., I. Castles, I. M. Goklany, D. Henderson, N. Lawson, R. McKitrick, J. Morris, A. Peacock, C. Robinson, and R. Skidelsky (2006), “The Stern review: a dual critique,” *World Economics*, vol. 7(4), pp. 165–232.

Cecchetti, S. G., A. Flores-Lagunes, and S. Krause (2006), “Assessing the sources of changes in the volatility of real growth,” NBER Working Paper No. 11946.

Chocrane, J. H. (1988), “How big is the random walk in GNP?” *Journal of Political Economy*, vol. 96, pp. 893–920.

Dasgupta, P. (2007), “Commentary: the Stern review’s economics of climate change,” *National Institute Economic Review*, vol. 199, pp. 4–7.

Dasgupta, P. (2008), “Discounting climate change,” *Journal of Risk and Uncertainty*, vol. 37, pp. 141–169.

Diamond, P. A. (1965), “Cardinal welfare, individualistic ethics, and interpersonal comparison of utility: comment,” *Journal of Political Economy*, vol. 75, pp. 765–766.

Emmerling, J. (2011), “Discounting and intragenerationl equity,” Mimeo.

Epstein, L. G. and U. Segal (1992), "Quadratic social welfare functions," *Journal of Economic Theory*, vol. 100, pp. 691–712.

Fisher, A. C. and J. V. Krutilla (1975), "Resource conservation, environmental preservation, and the rate of discount," *Quarterly Journal of Economics*, vol. 89(3), pp. 358–370.

Fisher, A. C., J. V. Krutilla, and C. J. Cicchetti (1972), "The economics of environmental preservation: a theoretical and empirical analysis," *American Econonic Review*, vol. 62(4), pp. 605–619.

Gerlagh, R. and B. C. C. van der Zwaan (2002), "Long-term substitutability between environmental and man-made goods," *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 44, pp. 329–345.

Gollier, C. (2002a), "Discounting an uncertain future," *Journal of Public Economics*, vol. 85, pp. 149–166.

Gollier, C. (2002b), "Time horizon and the discount rate," *Journal of Economic Theory*, vol. 107(2), pp. 463–473.

Gollier, C. (2004), "Maximizing the expected net future value as an alternative strategy to gamma discounting," *Finance Research Letters*, vol. 1(2), pp. 85–89.

Gollier, C. (2007), "The consumption-based determinants of the term structure of discount rates," *Mathematics and Financial Economics*, vol. 1(2), pp. 81–101.

Gollier, C. (2008), "Discounting with fat-tailed economic growth," *Journal of Risk and Uncertainty*, vol. 37(2–3), pp. 171–186.

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

Gollier, C. (2010b), "Expected net present value, expected net future value, and the Ramsey rule," *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 59(2), pp. 142–148.

Gollier, C. (2011), "Discounting, inequalities and economic convergence," Mimeo.

Gollier, C. and J. Gierlinger (2010), "Socially efficient discounting under ambiguity aversion," Mimeo.

Gollier, C., O. Johansson-Stenman, and T. Sterner (2010), "Discounting with intergenerational habit formation," Mimeo.

Gollier, C., P. Koundouri, and T. Pantelidis (2008), "Declining discount rates: economic justifications and implications for long-run policy," *Economic Policy*, vol. 56, pp. 757–795.

Gollier, C. and M. L. Weitzman (2010), “How should the distant future be discounted when discount rates are uncertain?” *Economics Letters*, vol. 107(3), pp. 350–353.

Groom, B., C. H. P. Koundouri, and D. Pearce (2005), “Declining discount rates: the long and the short of it,” *Environmental and Resource Economics*, vol. 32, pp. 445–493.

Harrod, R. F. (1948), *Towards a dynamic economics*, MacMillan.

Harsanyi, J. C. (1955), “Welfare, individualistic ethics, and interpersonal comparisons of utility,” *Journal of Political Economy*, vol. 63(4), pp. 309–321.

Hasselmann, K., S. Hasselmann, R. Giering, and V. Ocana (1997), “Sensitivity study of optimal CO_2 emission paths using a simplified structural integrated assessment model (SIAM),” *Climatic Change*, vol. 37, pp. 345–386.

Heal, G. (2009), “The economics of climate change: a post-stern perspective,” *Climatic Change*, vol. 96, pp. 275–297.

Hepburn, C. and B. Groom (2007), “Gamma discounting and expected net future value,” *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 53(1), pp. 99–109.

HM-Treasury (2003), *The green book: appraisal and evaluation in central government*, HM Treasury.

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

Kimball, M. S. (1990), “Precautionary saving in the small and in the large,” *Econometrica*, vol. 58, pp. 53–73.

Koopmans, T. C. (1960), “Stationary ordinal utility and impatience,” *Econometrica*, vol. 28, pp. 287–171.

Krutilla, J. V. (1967), “Conservation reconsidered,” *American Econoic Review*, vol. 57(4), pp. 777–786.

Krysiak, F. C. (2010), “Discounting, intergenerational equity, and demographic change,” Mimeo.

Mankiew, G. (1981), “The permanent income hypothesis and the real interest rate,” *Economic Letters*, vol. 7, pp. 307–311.

Mendelsohn, R. (2008), “Is the Stern review an economic analysis?” *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 2(1), pp. 45–60.

Neumayer, E. (1999), *Weak versus strong sustainability: exploring the limits of two opposite paradigms*, Edward Elgar.

Nordhaus, W. D. (2007), "The Stern review on the economics of climate change," *Journal of Economic Literature*, vol. 45(3), pp. 686–702.

Nordhaus, W. D. (2008), *A question of balance: weighing the options on global warming policies*, Yale University Press.

Pigou, A. C. (1920), *The economics of welfare*, McMillan.

Pratt, J. W. (1964), "Risk aversion in the small and in the large," *Econometrica*, vol. 32(1–2), pp. 122–136.

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

Rawls, J. (1971), *A theory of justice*, Harvard University Press.

Sen, A. K. (1982), "Approaches to the choice of discount rate for social benefit-cost analysis," in R. C. Lind (ed.), *Discounting for time and risk in energy policy*, pp. 325–353, Resource for the Future.

Stern, N. (2007), *The economics of climate change*, Cambridge University Press.

Stern, N. (2008), "The economics of climate change," *American Economic Review*, vol. 98(2), pp. 1–37.

Sterner, T. and U. M. Persson (2008), "An even Sterner review: introducing relative prices into the discounting debate," *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 2(1), pp. 61–76.

Tol, R. S. J. (2003), "On dual-rate discounting," *Economic Modelling*, vol. 21, pp. 95–98.

Tol, R. S. J. and G. W. Yohe (2006), "A review of the Stern review," *World economics*, vol. 7(4), pp. 233–250.

Tol, R. S. J. and G. W. Yohe (2009), "The Stern review: a deconstruction," *Energy Policy*, vol. 37, pp. 1032–1040.

Traeger, C. P. (2011a), "The social discount rate under intertemporal risk aversion and ambiguity," CUDARE Working Paper, 1092R.

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

Tsur, Y. and A. Zemel (2009), "Endogenous discounting and climate policy," *Environmental and Resource Economics*, vol. 44, pp. 507–520.

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

Weitzman, M. L. (1998), "Why the far distant future should be discounted at its lowest possible rate," *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 36(3), pp. 201–208.

Weitzman, M. L. (2001), "Gamma discounting," *American Economic Review*, vol. 91(1), pp. 260–271.

Weitzman, M. L. (2007a), "A review of the Stern review on the economics of climate change," *Journal of Economic Literature*, vol. 45(3), pp. 703–724.

Weitzman, M. L. (2007b), "Subjective expectations and asset-return puzzles," *American Economic Review*, vol. 97(4), pp. 1102–1130.

Yaari, M. E. (1965), "Uncertain lifetime, life insurance, and the theory of the consumer," *Review of Economic Studies*, vol. 32, pp. 137–150.

Yamaguchi, R. (2010), "Discounting, distribution and disaggregation," Multi-level environmental governance for sustainable development Discussion Paper, No. 10-01.

Yang, Z. (2003), "Dual-rate discounting in dynamic economic-environmental modeling," *Economic Modelling*, vol. 20, pp. 941–957.