

GEO-5 地球環境概観 第5次報告書 上

—— 私達が望む未来の環境 ——

第1章「駆動要因」

第2章「大気」

第3章「陸」

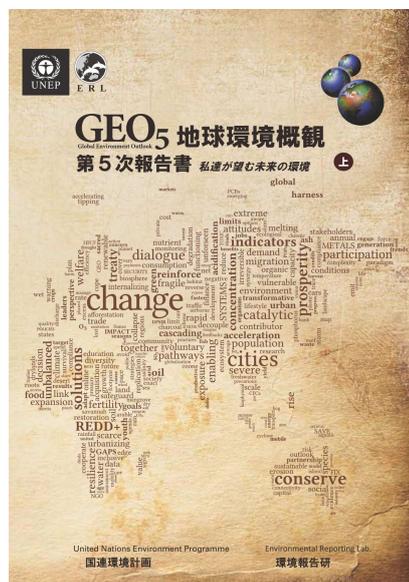
第4章「水」

第5章「生物多様性」

第6章「化学物質と廃棄物」

第7章「地球システムの全体像」

第8章「必要なデータの見直し」



ここをクリックすると環境報告研
のホームページが開きます。

2015年 10月 1日 発行

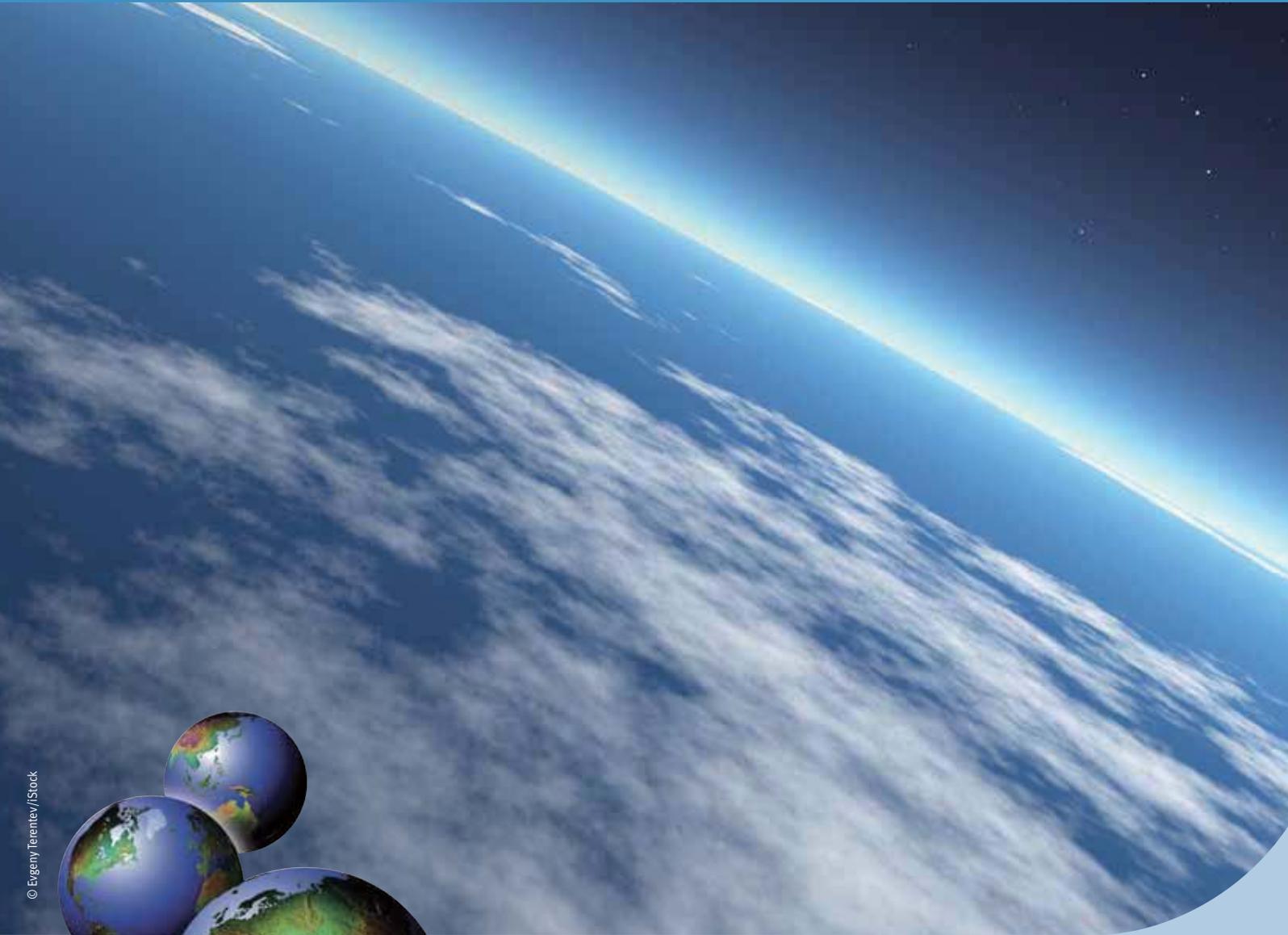
編 UNEP（国連環境計画）

発行所 一般社団法人 環境報告研
<https://www.hokokuken.com>

印刷者 大日本印刷株式会社

ISBN 978-4-9907-839-0-7

地球システムの全体像



© Evgeny Terentev/iStock

統括執筆責任者: Jill Jäger and Neevati Patel

執筆責任者: Vladimir Ryabinin, Pushker Kharecha, James Reynolds, Lawrence Hislop and Johan Rockström

執筆協力者: Andrew Githeko, Pauline Dube, Niki Frantzeskaki, Derk Lorbach, Jan Rotmans, Genrikh Alekseev, Benjamin Gaddis and Jiansheng Ye (GEO Fellow)

主科学査読者: Gerhard J. Herndl

章編集者: Neevati Patel

主要メッセージ

第2章～第6章で議論された変化は、統合され相互接続された統一体である地球システムの中で起こっている。人は、そのシステムの不可欠な要素である。

地球システムは複雑であり、相互作用する構成要素からできている。これらの構成要素内、およびその構成要素間に非線形な相互作用があり、それに人の鼓動を予測することの生来の難しさが加わり、それらが地球システムの予測に制約を課している。

地球システム内の、人による圧力が増大するにつれて、地球はいくつかの臨界閾値に接近しているか、または既にそれを超過してしまっており、その臨界閾値を超過すると、地球の生命維持機能にとって、突然の非線形な変化が生起する可能性があり、このことは現在と将来の人間の幸福にとって重大な意味を持つ。例えば、気候の変動性や過酷な天候が食糧安全保障に影響を与え、閾値の超過が温度上昇に応じたマラリアの増加による著しい健康被害をもたらす。また気候事象の頻度と激しさの増加が、自然資産と人の安全保障の両面に影響を与え、気温や海面上昇の変化が加速することで、現地住民コミュニティの社会的結束に

影響を及ぼす。例えば、アラスカでは、永久凍土層が溶けて洪水が増加するために村が移転を強いられようとしている。

問題解決のためこれまでなされてきた専門家によるトップダウン方式は、柔軟性に欠けるため、地球システムの複雑で非線形な変化に対して、効果的に対処できない。これまで持続不可能な発展という難題に20年もばらばらに取り組んできたが、今は、情報を得て効果的な意思決定を行うための、地球システム (Earth Systems) として統合されたアプローチが必要になっている。

地球システムへの人間圧力の底流にある駆動要因に、緊急に対処する必要がある。と同時に、地球システムの複雑さとそこに内在する不確実性に、もっと適切に対処できるアプローチをとる必要がある。そのアプローチは、次の3つの要素を含んでいなければならない。相互作用とフィードバックを理解する基礎研究；基礎研究を下支えする継続的な長期モニタリングと観察；観察によって必要性が指摘された場合に、対応の調整が行えるように進展について定期的に評価しておくことである。

序文

宇宙から初めて撮られた地球の写真は、その境界線が有限であるという、一瞬にして深遠な理解をもたらした。科学の進歩によって、全体としての地球を、より良く見るようになってきている。それは、地球規模の現象を記録できるようにする、地上とリモートセンシングの地球観測システムを結合させたものや、環境の過去の状態を復元する能力の進歩や、地球規模のシミュレーション実験を行なう計算能力の向上などによる (Steffen *et al.* 2004b)。人類の活動が、現在、非常に広範囲になり、その影響が深刻であるために、惑星規模で地球に影響を与えているという証拠が示されている。

変化を来す主要な駆動要因を明らかにした第1章、そして地方レベル、大陸域レベル、世界レベルでの環境変化とその影響を例証した第2~6章に続いて、本章は地球システムの観点から、変化について議論し、私たちが生活し、働き、そして惑星を統治しながら進める遷移 (transition) の舵取りをすることとの関連について述べる。

地球システム

一つのシステムとは、一定の境界内で互いに相互作用する構成要素の集合体である。地球システムは、惑星とそこに住む生命の状態と進化を決定している、相互作用する物理的、化学的、生物的、社会的な構成要素とプロセスの巨大な集合体を含む、複雑な社会・環境システムである。地球システムの生物物理的な構成要素は、多くの場合、スフィア (圏) と呼ばれ、大気圏、生物圏、水圏、地圏がある。それらは、気候システムや、生き

ている生物圏によって生み出される食物生産などの生態系サービスや、化石燃料や鉱物のような自然資源、といった地球の機能を制御する環境プロセスを提供する。人間は地球システムの中に組み込まれている一つの要素である。すべてのスフィアは、無数のサブシステムと無数のレベルの構成を含んでいる。これらのスフィア内での相互作用と、スフィア間での相互作用は複雑であり、地球システムの将来の状態について予測できることには限界がある。

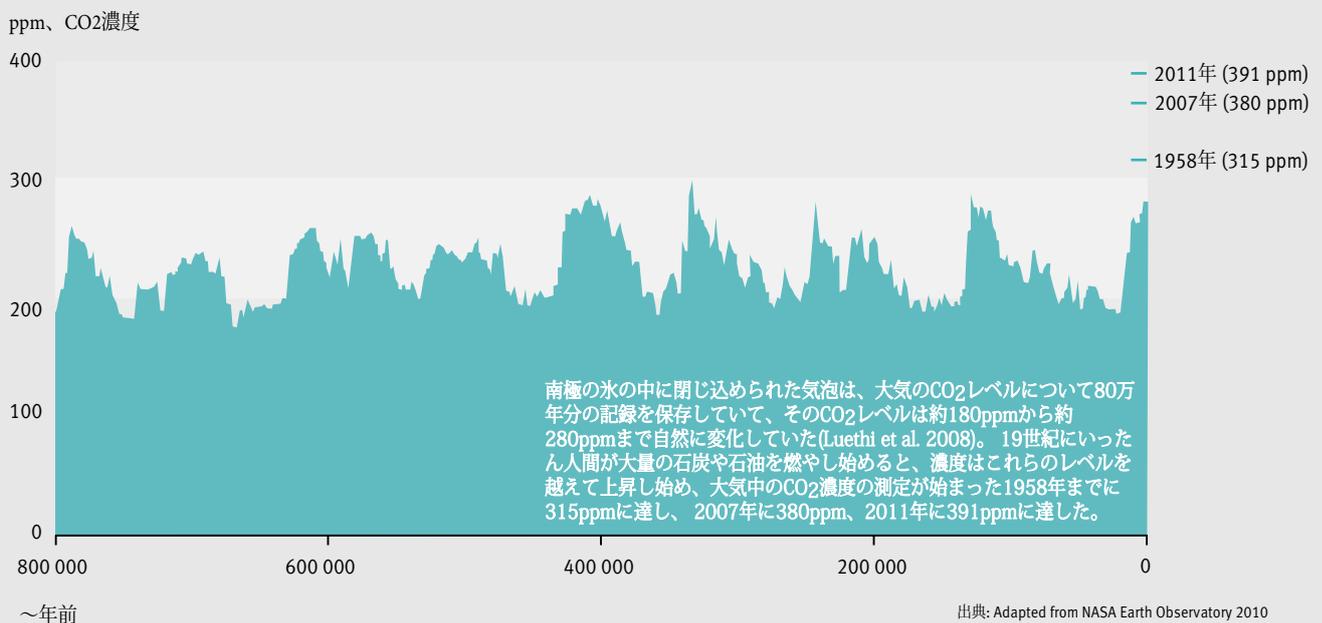
前例のない変化

何人かの専門家は、地球が人新世という新しい地質年代に入ったと言っている (Zalasiewicz *et al.* 2011, 2010)。その言葉は、ノーベル賞受賞者ポール・クルツェンによる造語で、人間が今や自然の力を圧倒しつつあるという考え方をとらえたものである。人新世に入ったということは、近代社会や70億人を擁する世界の発展を可能にする、非常によい生活環境を過去一万年にわたって人類に提供してきた「完新世」と呼ばれる間氷期から離脱することになるだろう (Folke *et al.* 2011)。

クルツェン (Crutzen 2002) は、250年前の産業革命が人新世の始まりであったと言う。19世紀前半以降、10億人未満から現在の70億人になったという前例のない人口上昇は、人新世が展開していくにつれての特有の出来事である (Zalasiewicz *et al.* 2010)。この人口の急増に伴って、天然資源の消費増大や、化石燃料への依存が途方もなく膨張するといった多くの社会変化が起こった (第1章)。

地球システムは、人による影響とは別に、人の影響を受ける前から、自然の変動の複雑さを呈している。南極大陸の氷床コアによって分かることは、過去80万年の間、気温や二酸化炭

図 7.1 大気中のCO₂濃度の変化



素 (CO₂) 濃度は、比較的限られた範囲内で振動しているが (Luethi *et al.* 2008)、それは、地球が自転や太陽を回る軌道に沿って回転運動する際の不規則なずれ (Hays *et al.* 1976) といった要因に、大きく結び付けられる変動によるものである。しかしながら、現在の大気 CO₂ 濃度は、過去の範囲とかけ離れており (図 7.1)、1950 年の 310ppm から 2011 年には 391ppm まで上昇し (NOAA 2011)、産業革命前の時代から後の大気 CO₂ 濃度の全上昇分のうちの半分が、過去 30 年間に生じた (Steffen *et al.* 2007)。

地球上の生命の多様性を示す生物多様性は、およそ 50 億年のこの惑星の歴史のうちの過去 38 億年程度の間に進化した。その間に 5 回の大規模な絶滅という出来事が記録されたが、これまでの出来事 (自然の隆起や惑星の変化によるもの) と異なり、現在の生物多様性の損失は、主として人の活動によるもので、多くの場合、6 度目の地球規模絶滅と呼ばれている (Barnosky *et al.* 2011; Eldredge 2001)。第 3 次地球規模生物多様性概況 (CBD 2010) によれば、有り余るほど生存していた、いくつかの脊椎動物の個体数が、1970 年から 2006 年の間に、平均してほぼ 3 分の 1 減り、なおも世界的に減り続けている。多くの生物学者が、今後数十年で多くの種が失われ (Leadley *et al.* 2010)、陸や海の景観が突然変化するリスクが増大するだろうと考えている (Estes *et al.* 2011)。少数の科学者は、より長期的には、これらの絶滅が、生物多様性だけでなく多様性が生成される進化のプロセスをも変えるだろうとい

うことを認めたようである (Myers and Knoll 2001)。

地球システムの相互作用

地球システムの様々なスフィアが相互に連結されていることを考えると、システムの一つにおける変化は、他のシステムの一つか、それ以上に影響を与える。Box 7.1 は、第 2 章～第 6 章の例を引用して、地球システムのスフィア間での相互作用を説明し、それらが人の活動によってどのように変化させられようとしているかを示す。

地球システムの複雑さ

地球システムの複雑さは、システム構成の多くのスケールやレベルで相互作用する無数のプロセスと関係している。重要なことは、これらの相互作用では、変化が直線的であったり、漸進的な形で起こることはめったにないということである。代わりに、地球上の様々なシステムが変化を受ける場合の振る舞いは、ほとんど非線形で起こり、変化を抑えるか (負のフィードバック)、変化を増強するか (正のフィードバック) のいずれかのフィードバックによって決定される (Steffen *et al.* 2004a)。多くのそのようなフィードバックが地球システムを形作る。

正のフィードバックは、システムを不安定にして、もう一つの状態へと移行させる、つまりレジームシフト (Box 7.2) を

Box 7.1 人の活動によって影響を受けた地球システムの相互作用の例

大気圏と生物圏

- 二酸化硫黄の大気濃度の変化が、酸性雨 (第 2 章) によって陸域生態系と淡水生態系に影響を与え、魚種資源や他の敏感な水生種を著しく損失させ、生物多様性や林業にも影響を及ぼしている。
- 極地域の生物圏が、他の大陸からの産業性汚染物質の長距離輸送によって汚染されてきた (第 6 章)。

地圏と水圏

- 世界の地下水の貯水率は、1960 年から 2000 年の間に取水量が 2 倍以上になったために減少している (第 4 章)。地下水層の枯渇は、地盤沈下や、淡水を供給する際に、塩水の侵入を引き起こす場合がある。さらに農業のような人間の活動により、1960 年以降、世界中の流域でリンや窒素などの栄養塩の移動が著しく増加した (第 4 章)。

大気圏と地圏

- 地表近くの永久凍土層の 90% が、大気圏に CO₂ とメタンを放出しながら、2100 年までに融けて無くなってしまいかもかもしれない (第 3 章)。
- 世界の陸地の多くで、極端に激しい雨が降ったり、極端に雨が少なくなったり (干ばつ) といったことが頻繁に起こるようになった。長期の傾向として、サヘルやインド北部で、より乾燥した状

況へと向かう傾向が示されている (第 2 章)。

生物圏と水圏

- ダムの建設や、川や川の氾濫原の制御が、生態系や生物多様性に影響を与える (第 4 章と第 5 章)。
- 産業廃水、下水、廃物、農業排水、大気汚染 (酸性雨) などの廃棄物から来る水質汚染物質は、内陸の湿地やそれらの生物多様性に大きな脅威を与える (第 5 章)。

大気圏と水圏

- 人為起源の CO₂ 排出のかなりの部分が、海洋に毎年吸収されている。これは水と反応して炭酸を作るため、海洋をより酸性化する。平均の海洋表面 pH 値は、既に 8.2 から 8.1 まで減少しており、2100 年までに 7.7 まで下がると予想されている (第 4 章)。
- 残留性有機汚染物質 (POPs) や重金属のような特定の長命の化学物質が、海洋環境に到達して、世界中に運ばれ、その結果、人間や野生生物に毒性作用を引き起こしている (第 6 章)。

地圏と生物圏

- 石油流出が、水界と海洋生態系を脅かし続けている (第 4 章)。

引き起こすかもしれないシステムの反応の増加である。正のフィードバックの一例は、北極圏における黒色炭素沈着の影響である(McConnell *et al.* 2007)。黒色炭素粒子は、バイオマスや化石燃料の不完全燃焼から大気へ放出される(第2章)。極地の気候が、黒色炭素沈着に特に脆弱であるのは、黒色炭素が雪、氷河、海水のアルベド(反射率)に影響を与えるためである。黒色炭素はそれらの表面を黒くして、放射線の反射をより小さくするので、温暖化と、氷や雪の融解を増加させることになる。ラマナサンとカーマイケル(Ramanathan and Carmichael 2008)は、ヒマラヤ山脈の高地では、雪塊や氷河の融解にとって、黒色炭素による太陽放射線吸収の増加からくる正のフィードバックは、大気中のCO₂増加に起因する温度上昇と同じくらい重大なことであるかもしれないと報告している。

地球の大気中の温度と炭素含有量との間の重要な関係が、比較的短い時間スケールと、地質年代の時間スケールの両方において明らかになった(Pagani *et al.* 2010)、それは、大気圏や、地球システムの他の構成要素における多くのフィードバックが関与した結果である。例えば、海水の温度がより高くなることや、酸性度がより大きくなることは、炭素吸収源として働く海洋の能力を弱める(Steffen *et al.* 2004b)。この正のフィードバックは、システムの反応を増加させて、不安定にするフィードバックである。

気候科学でますます議論されるようになってきている、もう一つの不安定にするフィードバックは、北極圏の永久凍土層内の炭素貯蔵と関係している。気温上昇が永久凍土層を融かすことになれば、これが炭素を放出し、気温をさらに上昇させ、結果として、より多くの永久凍土層を融かし、もっと多くの炭素を放出することになるだろう(Krey *et al.* 2009)。



森林は貴重な炭素吸収源であり、人為起源のCO₂排出に対して負のフィードバック対応を提供する。© Eugenio Opitz



藍藻類マイクロキスティスの繁茂によって、水が明るい緑色に変色していることから、この川は明らかに富栄養化している。© Heike Kampe/iStock

そのようなフィードバックのプロセスにおける生物多様性の役割は、現時点では、物理的、化学的、生物学的プロセスにおける相互作用の複雑さのためによく理解されていない。しかし、もし土壌の温暖化で引き起こされる土壌呼吸の加速によって、地下に格納されていた炭素が大気へ放出されるならば、気候変動を増強する可能性がある正のフィードバックが生じるであろうことが、よく知られている(Rustad *et al.* 2001)。

負のフィードバックは、初期の反応を抑えるフィードバックで、安定させる傾向がある。例えば、大気中の水分が増加すると、より大きな雲の覆いが作られ、地球から太陽光を反射させる割合(アルベド)が高まり、そのことが大気中の温度を下降させ、蒸発率を減少させるに至る(Schmidt *et al.* 2010)。

これまでのところ、人間の圧力に対して地球システムがとった対応はその影響を抑えるほうが総じて支配的であった(Steffen *et al.* 2004b)。これは地球システムが持つ生来のレジリエンス(回復力)によって説明され、生物圏は、人によって引き起こされたいくつかの乱も含め、かく乱を和らげるように気候システムと相互作用する。その結果、世界の生物圏の中の炭素吸収源が、人の活動からもたらされるCO₂排出に対して負のフィードバック対応を行い、1960年代に年間およそ20億トンであった炭素吸収を、2005年にはおよそ40億トンまで増加させた(Canadell *et al.* 2007)。しかし、世界の環境変化がもたらす圧力を和らげる生物圏の能力が、低下してきている兆しが見られる(Le Quéré *et al.* 2009)。例えば、地方レベルでは、湖の富栄養化が生じ(Qin *et al.* 2007)、大陸域レベルでは、地域の温暖化が増幅して北極圏の海水融解が加速されるというように、正のフィードバックが増大している証拠がある(Serreze and Barry 2011)。

Box 7.2 レジームシフト

ある閾値を超えると発生する生態学上のレジームシフトは、たいてい突然発生し、それは強制力の変化（駆動要因の変化）によるよりも（社会側の）対応の変化によって、はるかに大きく発生する。またレジームシフトは、人間の経済や社会への影響を伴いながら、長期に続く可能性がある(Briggs *et al.* 2009)。いくつかの生態系は、2つ以上のかく乱による別々の影響の合計よりも、結合された影響の方が大きくなる相乗効果にさらされる時の変化に対して、極めて脆弱になる可能性がある(Folke *et al.* 2004)。一例は、干ばつと過放牧の結合した影響にさらされた牧草地であり、土壌、生物多様性、生産性に変化が起これ、結果として、異なる構造や機能特性を備えた新しい生態系がもたらされる。これは、フィードバックの変化が徐々に起こった例である(Wysham and Hastings 2008; Levin 1998)。対照的に、一つの状態からもう一つの状態へのシフトが、以下に例証するように、破局的または極端な外部からの混乱に起因して起こる場合もある(van Nes and Scheffer 2007)。

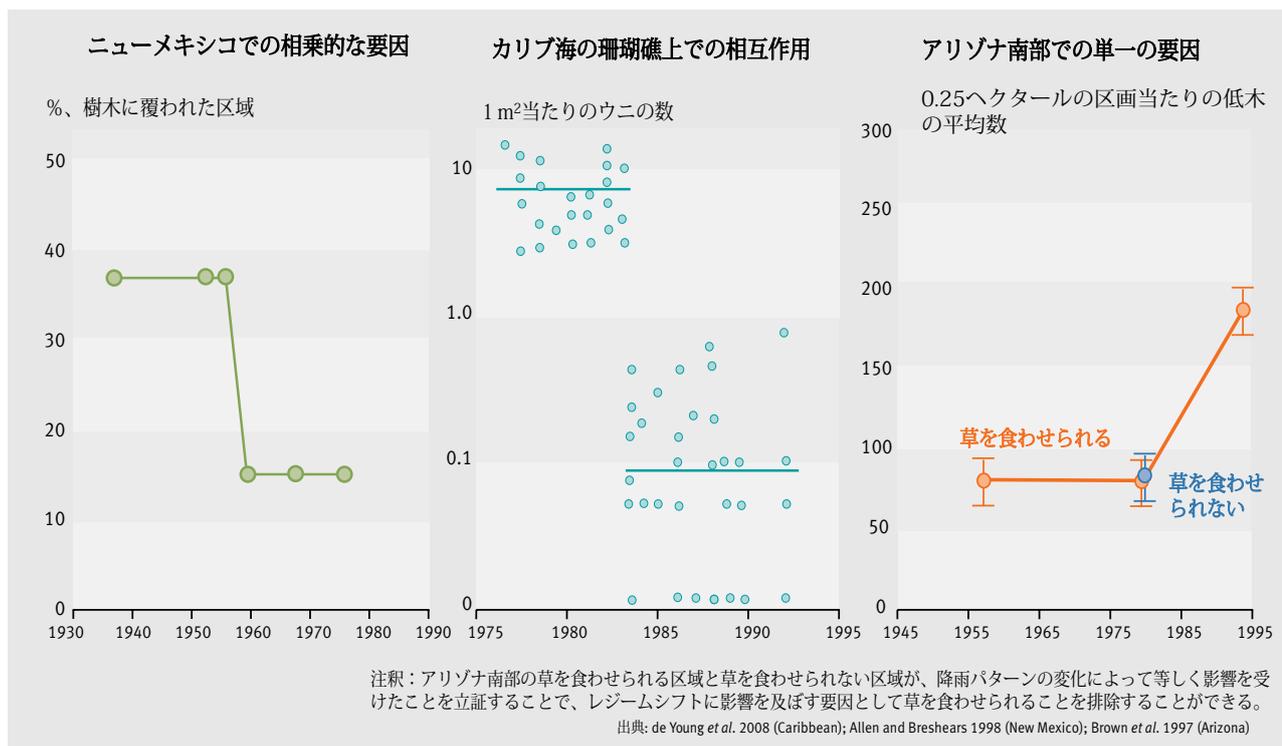
レジームシフトの3つの例が図7.2に示される。最初の例は、アメリカの北ニューメキシコにおいて、いかにして森林であった区域が消滅し、それらがピニオンやジュニパーの低木林によって置き換えられたかを示すもので、干ばつとキクイムシ来襲の相乗効果が、ポンデローザマツ（マツ属ポンデローサ）の枯死率を高めた結果である。これは、記録されている景観規模の

レジームシフトのうち最も急速に起こったものの一つである(Allen and Breshears 1998)。

第2の例も、急速であるが、基本的な原因が全く異なる。デ・ヤングらが(de Young *et al.* 2008)、生物間の相互作用の影響を例を用いて説明した。カリブ海のサンゴ礁の種特有の病原体が、1980年代の初めに、ウニの大量死を引き起こした。ウニの個体群密度が、それらの本来のレベルの1%に減少し、次いで茶色の肉質の藻類が、もはや（ウニに）食べられることなく増えることができるようになり、サンゴ礁に繁茂した。そのサンゴ礁の群落は、レジームシフトを引き起こしたのである。そのシフトは、トリガー（病原体）と、藻の優位性の両方のために、1年か2年以内で発生したが、その新しい状態が、20年以上の間、いくつかの区域で存続した。

ブラウンらは(Brown *et al.* 1997)、アメリカのアリゾナ南部の半乾燥の立地において、約10年の期間にわたって、草に支配されていた生態系から、低木に支配される生態系へのシフトについて記載した。これを駆動させたのは、季節的な降雨で、ゆっくりと変化する単一の駆動要因であった。冬の降雨は、草よりも木質の低木が成長して広がっていくのを容易にし、そのことが、いくつかの動物種の絶滅を引き起こし、以前は希であった他の動物種を増やした。

図7.2 様々な駆動要因とフィードバックに起因するレジームシフトの例



地球システムが人の幸福に及ぼす変化と影響

上記で議論された主要な地球システムの変化が、環境、経済、社会に対して影響を及ぼす。あらゆるスケールで、人の活動や環境変化がもたらす影響と地球システムとの相互の関わり合いを示しながら、決して包括的ではないが、実例を用いてこれらの影響について引き続き説明する。

極地域

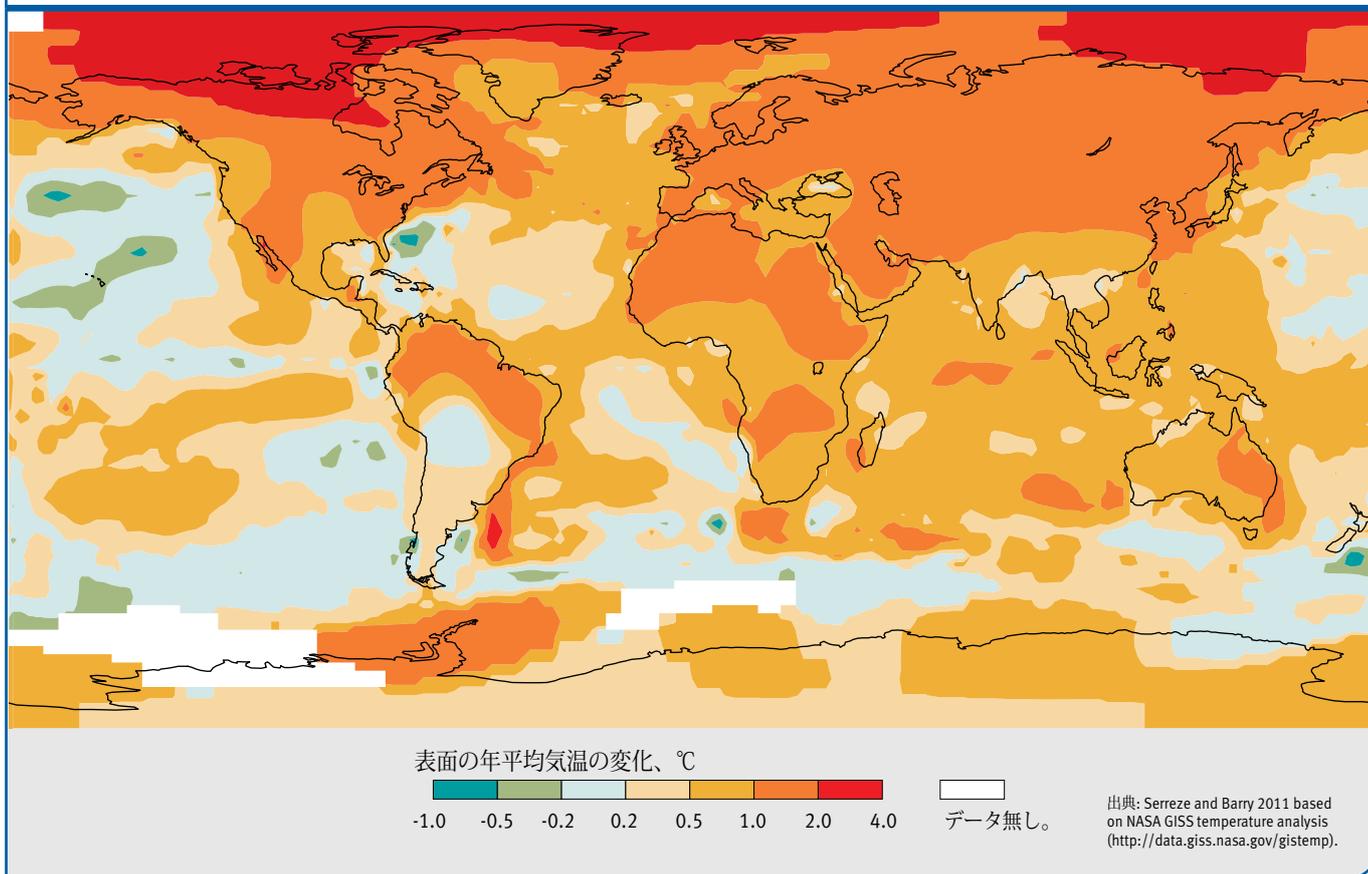
世界の環境の中で発生する複雑な変化の多くが、極地域において増幅する傾向がある。例えば、緯度のより低い地帯から来る熱流束は、北極海水の融解を加速するし、北極圏の氷河やグリーンランドや南極の水床の量を減少させ、そのすべてで世界の海面上昇に寄与する。極地域は、いろいろな経路で、緯度の低い地帯や地球全体に影響を及ぼしている。

北極圏

図 7.3 に示されるように、北極地域は最近の数十年間に、表面温度の最大の上昇を経験した（赤で示される）。この地球温暖化の増幅は、計器による記録と過去の気候を復元することによって確認され、気候モデルのシミュレーションでも示されている(Serreze and Barry 2011)。

その増幅は、北極圏への熱輸送(Graversen *et al.* 2008)、雪上への黒色炭素沈着(Hansen and Nazarenko 2004)、それに付随するアルベドの減少によって強められる海水の融解(Screen and Simmonds 2010)、大気によって下向きに放出される赤外放射(温室効果ガス等による赤外線エネルギー)の増加(Francis and Hunter 2006)、大気中において熱を吸収する黒色炭素エアロゾルの増加(第 2 章)(Shindell and Faluvegi 2009)など、いくつかの要因によって引き起こされる。北極の海水被覆が急速に縮むことは、正の気候フィードバックの一部である。人工衛星のデータによって示されるように、過去 30 年にわたって氷で覆われた区域の減少に加えて、最も古くて最も分厚い氷についても、かなりの減少が起こりつつある(Maslanik *et al.* 2011)。海洋と大気間の断熱材としての働きをしている海水の消失は、結果として、上向きの熱流束を強めることになり、そのことが北極圏における対流圏下部を暖めて、北半球の多くに行き渡る大気循環に影響を与える(Serreze and Barry 2011; WWF 2010)。これは、暴風の経路、降雨パターン、熱波と寒波に至る状況を変える。例えば、暖かい北極海と寒い大陸によって新たに生じている大気パターンは、寒い季節に、より激しい北極気団をより頻繁に発生させるように働き(Petoukhov and Semenov 2010)、北半球の中緯度で暮らしている何億もの人々の幸福に影響を及ぼす。

図 7.3 地球表面の年平均気温について観測された1960~2009年の変化



北極評議会の「北極圏の雪、水、氷、永久凍土」(SWIPA) 評価によると、永久凍土層の温度が、特に寒い場所で過去 20~30 年で 2℃も上昇したことが示されている(SWIPA 2011)。北極圏の温暖化は、永久凍土層の融解と減少を引き起こしており(Lawrence *et al.* 2008)、スカンジナビア、ウラル山脈西のロシア北極圏、アラスカの奥地において、季節的に永久凍土層の上部の土壌の融ける深さが増大した。1970~2005 年の間に、ロシアの永久凍土層の南限界が北方へ 30~80km 後退し、カナダのケベックでは、過去 50 年間に 130km 後退した(ACIA 2004)。地域規模で起こっている永久凍土層の融解というプロセスは、微生物の活性を増加させ、現在凍土に固定されている炭素を放出することになり(Tarnocai *et al.* 2009)、世界的な正の気候フィードバックを引き起こすだろう(Schaefer *et al.* 2011)。2030 年までに、北極圏は炭素吸収源というより、むしろ炭素発生源になる可能性がある(Schaefer *et al.* 2011)。

また北極海域が温暖化して海表面が開放されることは、炭化水素や他の天然資源が利用されるようになることを意味する(Stephenson *et al.* 2011)。石油やガスの生産、そして航行が増加して、北極圏は、人為起源の炭素排出量を増大させる産業振興の区域へと急速に変わる可能性があるかもしれない。これは正の気候フィードバックのもう一つの例であり、自然的影響(温室効果)と社会的影響(人間活動)の両方を引き起こす。

地球システムにおける世界と地域の相互の結び付きに関して、予期しなかったもう一つの兆候が、2011 年春、亜寒帯の北極圏で観測された。高度 18~20km の成層圏オゾンのおよそ 80%が消失するという前例のない現象で、マニーラによって(Mannev *et al.* 2011)、それは成層圏下部の低温状態が変則的に長く続いたことが原因であるとされ、塩素がオゾン破壊する形となる大気状況が、永い低温状態によって持続強化されたのである。

南極圏と南極海

この辺境の地域は、まだよく理解されておらず、そこで起こる非常に複雑な地球システムの相互作用を観測する能力は制限されている。多くの観測によれば、南極海域が世界の海洋の平均よりも、急激に暖まっていることが示されている。中層水の温暖化が、ジル(Gille 2002)によって報告され、さらに船舶による観測結果とフロート観測を比較した結果、南極環流の海域が広範囲に温暖化し、塩分濃度が下がっていることが示された(Böning *et al.* 2008)。また深海と深層水の測定結果も、温暖化の傾向を示している(Purkey and Johnson 2010)。この地域の大きな特異性は、成層圏のオゾンホールであり、オゾンホールが過去 30 年にわたって南極の環境に著しい影響を及ぼしてきた。オゾンホールの影響による南半球環状モードとそれに関連する風が、温暖化を引き起こす温室効果ガスから、南極半島を除く南極大陸の大部分を保護する傾向にあったが、(オゾンホールの回復で)そのような気候変動に関する主要な地域パターンが変わろうとしている。(Turner *et al.* 2009; Thompson and Solomon 2002)。

南極圏は、地球最大の冷凍された淡水を貯蔵しており、61.1メートルに相当する海面上昇を引き起こす潜在力を持つ(IPCC 2001)。南極の氷床のかなりの部分が陸の上にとどまっているが、これらの陸地表面は現在の平均海面よりもっと低い。例えば、西南極の氷床の氷の底は、その多くが海洋表面より 1,000メートル以上も下にある。最近の推定では、この西南極の氷が世界の海面を 3.3メートル押し上げる可能性があることが示唆されている(Bamber *et al.* 2009)。東南極の氷床のこれまで未調査であった区域について、最近の航空機からの地球物理学的な測定結果によると(Young *et al.* 2011)、そのほとんどの氷床の底が海面より下にあることが示された。したがって、急激な温暖化に置かれている海洋氷床の安定性が懸念される。最近の南極大陸における地域的な温度傾向は、さほど著しいものではなく、いくつかの場所では温度が下がっているけれども、1951~2006年の間には、南極半島の北西部のファラデーやベルナツキー基地で10年当たり0.53℃の上昇を観測した(Turner *et al.* 2009)。この地方の温暖化とそれに伴う風の変化が、1995年におけるラーセン棚水Aの崩壊と、2002年のBの崩壊を引き起こした主な原因であると考えられている。温暖化にさらされている現在の西南極の氷床の崩壊の可能性、または融解の加速が集中的に調査されている(Huybrechts 2009; Pollard and DeConto 2009)。

通常、CO₂の大気濃度が増加すると、海洋はさらにそれを吸収する傾向がある。しかし、世界の海洋の炭素吸収のうちの重要な部分を占めている(Takahashi *et al.* 2009) 南海洋では、CO₂を吸収する能力が低下しつつある(Le Quéré *et al.* 2007)。

Box 7.3 南極の生物多様性

南極の大規模海洋生態系は、魚、イカ、ヒゲクジラ、アザラシ、ペンギン、海鳥のすべてが常食としているナンキョクオキアミと、低次栄養段階の植物プランクトンとを結び付ける、やや短い食物網が特徴である(Hill *et al.* 2006)。1980年代までは、アザラシ、クジラ、魚の捕獲について、制御が為されていなかったか、または規制が緩かった(Sherman and Hempel 2008)。アザラシ、クジラ、海鳥が初期の捕獲の対象となったが、これらの資源が減少すると共に、魚、次いでオキアミ、そして最後にカニやイカに注目が移っていった。初期の搾取の多くは、やや急激に起こり、鍵となる生物の一連の破局的な資源崩壊を招いたので、激しい生態学的な影響が及ぼされたに違いない(Nicol and Robertson 2006)。オキアミ漁場を管理する予備的なアプローチが、以下の好ましいアプローチが開発されるまでの当面の手段として、「南極の海洋生物資源の保存に関する条約」(CCAMLR)によって採択され、1982年に施行された。好ましいアプローチとは、生態系モニタリングの増強、オキアミやそれらの捕食動物と環境影響と漁場とを結び付けるモデルのさらなる進化、漁船の挙動に関する高解像度リアルタイム情報などである(Hewitt *et al.* 2001)。

この理由として可能性の高いものの一つは、1970年代以降、南極海を覆う極地付近の西風が15~20%強まったことであるが、その西風の増大は、部分的に成層圏オゾンホールによる影響に起因している可能性がある(Thompson and Solomon 2002)。この現象は南極の生物多様性にとっても重要な意味を持つ(Box 7.3)。

世界気候研究計画の化学-気候モデル検証プロジェクト(CC MVal2)は、全体として、モントリオール議定書の実施による成層圏オゾン層の完全回復が、今世紀の中頃には達成されるとしている(Eyring *et al.* 2010)。しかし、オゾン層が復元されると、南半球環状モードとそれに関連する風に影響して、南極圏と南極海にて温室効果ガスの引き起こす温暖化を押し込んでいる既存の制約が弱まって(Turner *et al.* 2009)、その他の著しい変化を、その地域から世界にもたらす可能性がある。

人の幸福への影響

極地域での変化パターンが地球の他の場所での活動や影響と結びついていることは、GEO-4(UNEP 2007)で「地球公共財の乱用」と呼んだ、どこにでもある脆弱性のパターンを例証するものである。例えば、この乱用によって、気候変動や海面上昇といった環境変化がもたらされ、海面上昇した場合の漁場や土地の減少といった資源の枯渇に、人々も環境もさらされることになる。地球公共財の乱用に起因する変化に最も脆弱な人々は、たいていその乱用自体に責任を負っていない。

長い時間スケールで地球システムの全体像を見てみれば、極地域で進行する可能性がある将来の変化は、極地域と地球の残りの部分とが互いに接続されること、成層圏オゾンの回復と地球温暖化のような問題の領域間で相互作用が起こること、西南極の氷床の融解という大惨事が起こる可能性などである。これらの極地域での将来の変化は、潜在的な非常に大きな圧力であり、それらへの人々や環境の脆弱性を減らすために、地球公共財を管理する全体的な対策が必要であることを示している。

ヒンドークシュ山脈とヒマラヤ山脈

ヒンドークシュ山脈からヒマラヤ山脈にかけては(図7.4)、時には第3の極と呼ばれ、世界で最も動的で複雑な山系の一つである。それは、10万km²以上の氷河の覆いと、アジアで最も大きい河川のうちの10本の水源を含み、極地域以外で見られる最大の量の雪と氷を擁する。この山系は、世界で最も多湿な環境や、最も乾燥した環境をいくつか通って3,500km伸び、垂直方向には地球上のほぼすべての生物分布帯を通して標高8,000mに達する。そして地理的には人間が最も集中し人口密度が最も高い地域の中心に位置し、非常に壊れやすい環境で、特に地球温暖化に脆弱であることが認められる(Bates *et al.* 2008; Xu *et al.* 2007)。

南アジアの国々は、自然災害に対して極端に脆弱であるため、周期的な災害が、地域の社会的・経済的に公平な発展に大幅な後退を繰り返し引き起こしている。気候変動が、災害に至る異常気



数年の間隔でパキスタンを襲う最悪の洪水による犠牲者が、ノウシェラの北西の都市の浸水した通りを歩いている。

© Amjad Jamal/UN Photo

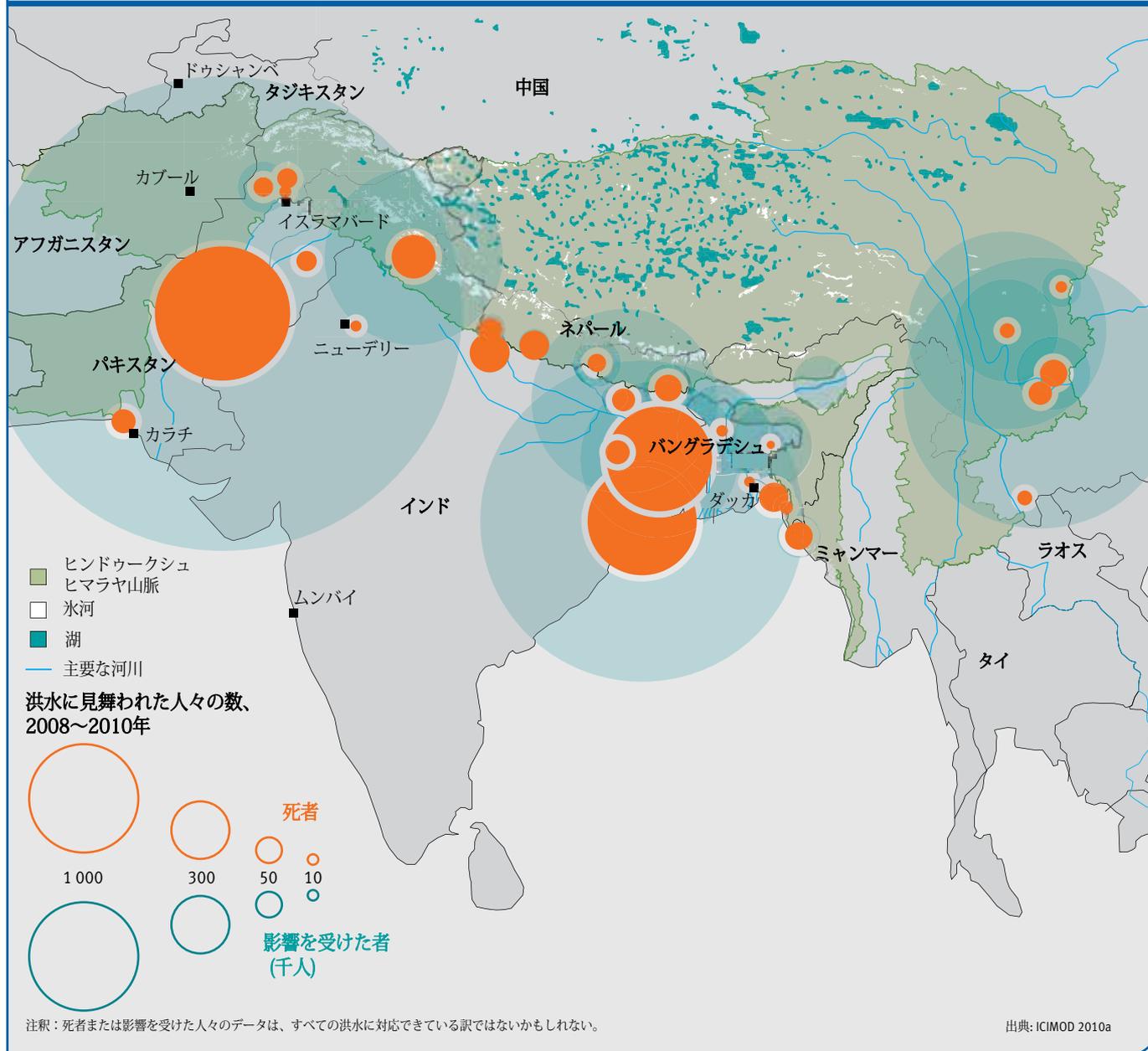
象の頻度と大きさの両方を増大させていると予想され、速やかな対応が必要である(Cruz *et al.* 2007)。

気候変動の頻度や大きさ、そしてそれによる影響の可能性に関して、不確実性が高まっているが、ヒマラヤ地域の環境的・社会的・経済的な景観を、徐々に、強力に変えつつある多くの圧力の一つが、気候変動であることに疑問の余地はない。このことは、山間部のコミュニティや生計に対して著しい影響を及ぼす水や生態系サービスについて特に当てはまり、下流の利用者、特に女性は、例えば飲料水や燃料のためにひんぱんに長距離を歩く必要があり大きな影響を受ける(UNEP 2011b)。しかし、山間地域では、近代化(通信、輸送、インフラ、貨幣化など)や移住による伝統的な性別関係を変更させる、全体的な変化の枠組みの中で、変化していく気候の影響が理解されなければならない(CIDA 2002)。

人の幸福への影響

ヒンドークシュ-ヒマラヤ山脈地域とその下流での、気候変動による人の幸福への影響は特に激しい。それは気候の影響を受けやすい農業などの職業に依存している人々が多いためである。この地域では、20%以上の総計約2億6,000万人が貧困ライン以下の生活をしている。国際食糧政策研究所(IFPRI)は、気候変動による世界の穀物生産への悪影響が、年間0.6~0.9%出るかもしれないが、南アジアではその影響が2080年までに18.2~22.1%程度まで高くなるかもしれないと結論した(von Braun 2007)。また最近の研究で、ヒマラヤ地域とその下流域の、南アジアの穀物地帯として知られるインドのガンジス川の平原などは、気候変動に特に弱いとの結論が出されている(Ma *et al.* 2009; Xu *et al.* 2009; Bates *et al.* 2008; Cruz *et al.* 2007; Beniston 2003; Nijssen *et al.* 2001)。

図 7.4 ヒンドークシュ山脈からヒマラヤ山脈の地域の最近の洪水



山間に住む人々や下流の氾濫原に住んでいる人々のような、貧しく社会の主流から取り残されたグループは気候変動に特に弱い。低所得で多くの家屋が丈夫でないことに加えて、ヒマラヤ山脈の荒い地形が、この地域を特に洪水の被害を受けやすい区域にしている。土砂崩れや不安定な地盤（図 7.4）が、定住するには重大な脅威になっている。さらに洪水後、人々は多くの場合、同じ危険を受けやすい区域に再建するために、死と破壊の危険性を増大させている。

山間での生計は、平地での生計よりも、環境や経済の激変にはるかに影響を受けやすく、山間における貧困は気候変動によって悪化する（ICIMOD 2010b）。特に女性は気候変動や環境劣化の影響に脆弱である（ICIMOD 2009; Plumper and Neemayer 2007）。

アマゾン

アマゾンの森林は地球システムの非常に重要な構成要素である。それは地球で最大の陸域生物多様性の宝庫であり（Cochrane and Barber 2009; Foley *et al.* 2007）、莫大な量の水とエネルギーを大気圏と交換し、狭域や地域の気候に影響を与え（da Rocha *et al.* 2009）、また 900 億トンの炭素を保持する主要な炭素吸収源であり、貯蔵庫である（Chao *et al.* 2009）。この量は、世界の熱帯雨林に保持されている全炭素のおよそ 5 分の 1 になる（Pan *et al.* 2011; Chao *et al.* 2009）。

アマゾンは、最近になって世紀に一度の大干ばつを、2005～2010年の5年の間に2回も経験した。その2回はいずれも、普段は純炭素吸収源である平穏な地域に、炭素排出量を大きく増加させることになる急速で広範囲に及ぶ木の大量枯死を引き起こした（Lewis *et al.* 2011; Phillips *et al.* 2009）。森林減

少の速度は低下しつつあるけれども、干ばつは森林の燃焼性や延焼を大きくするために、火災への脆弱性を高める(Aragão *et al.* 2007)。ベルガラとショルツ(Vergara and Scholz 2010)によるモデル・シミュレーションによれば、ゼロ森林伐採(森林伐採させない)のシナリオにおいて、主として化石燃料の排出ガスによって駆動される気候変動単独の影響が、2100年までにアマゾン生物群系の規模を3分の1にまで縮小させるということが起こり得る。それも森林伐採と火災の影響が気候変動の影響と結合する場合、そのモデルはもっと大きな縮小を示す。

森林減少は一般的に、アマゾンにおいては特に、上記で議論された自然の要因に加えて、多数の社会経済的な要因(第3章)による相互作用の産物である。これらの中で最大のものは、圧倒的に牧草地への転用であり、それは国際的に増大している牛肉需要を満たすためのものである(Zaks *et al.* 2009)。第3章で議論されたように、アマゾンの未来に関する楽観論には、まだ根拠は残っている。例えば、ブラジル政府によるアマゾンの森林減少を予防し制御するための行動計画(PPCDAm)であり、それはモニタリングと法の執行、土地保有権の調整、持続可能な土地利用のための代替案の促進という3つの目標を焦点にした一連の政府イニシアチブを統合したものである。

人の幸福への影響

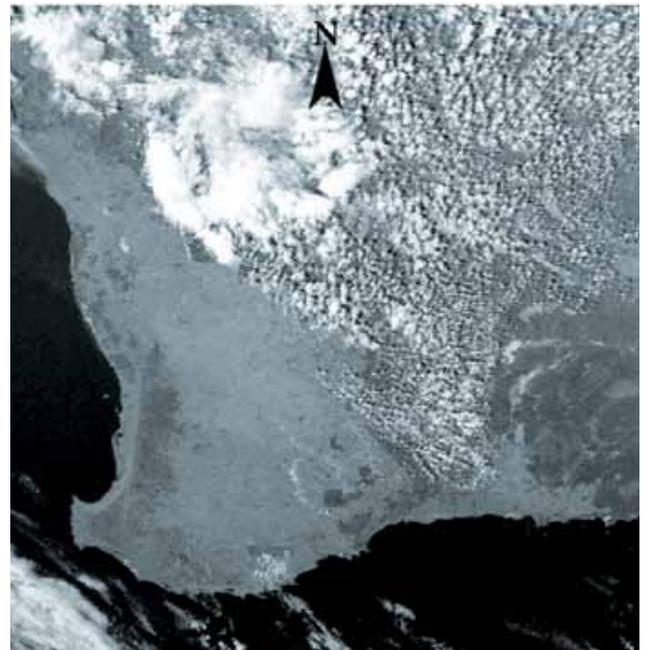
またアマゾンは、炭素吸収源として機能することによって、地球の気候を調節する重要性に加えて、先住民と最近の入植者の両者に対して生計を与える(Parry 2008)。フォーリーらは(Foley *et al.* 2007)、アマゾン生態系が、淡水や河川流量を調節し、地域の気候パターンを調整し、媒介生物による疾病や飲料水媒介の疾病の蔓延を抑制しており、それらのすべてが人の幸福にとって極めて重要であると指摘する。アマゾンの農民たちは、栽培時期における干ばつや洪水や火災による影響、疾病の蔓延による影響、食料や水や人の安全保障上の影響を受けるため、気候変動に脆弱である(Bronzizio and Moran 2008)。

乾燥地域

乾燥地域の砂漠化または土地荒廃は、人間社会が直面する最も大きな環境諸課題の一つである(第3章)。世界の乾燥地域は(砂漠からステップ、サバンナに及ぶ、乾燥、半乾燥、乾燥半湿潤の気候地域)、世界の地表面積のおよそ40%を覆っていて、ほぼ20億人にとっての生活の地である(Ezcurra 2006)。景観の劣化は、社会経済、気象、生態系の各プロセスが密接に結合して生じるので、特に複雑な問題である(Reynolds and Stafford Smith 2002)。

西オーストラリア州

土地被覆の変化が、乾燥地帯の地域の気候にどのように影響を及ぼし得るかを示す一例がある。西オーストラリア州での、ウサギが耕地と牧草地に損害を与えるのを防ぐために構築されたウサギ防除フェンスである。そのフェンスは、750km以



西オーストラリア州の耐ウサギ性のフェンスが、自然植生(東側)と、農地および牧草地(西側)とを分離している。自然植生が成長しているフェンスの東側は、より暗くて、多くの雲がある。

Source: Pielke *et al.* 2011

上に及び、東の自然植生と、西の1300万ヘクタールの耕地を分離している。ウサギから作物が保護されたかは例証していないが、植生がどのように気候に影響したかを例証している。自然植生が残っているフェンス東側に、より多くの雲があり、より頻繁に雨が降る(写真を参照)。フェンスの両側で、多数の物理的、生物的な変数を測定したネアら(Nair *et al.* 2011)によって、いくつかの妥当性のある説明がされている。彼等は、フェンスの農地側では、年間を通してこれらの変数が大幅に変動するが、自然植生の側では、小さな季節変動だけが見られることを発見した。ネアと同僚は、自然植生側の表面がより暗いこと、またより大きくでこぼこしていることが、大気の中へ流れていく熱流束を増強させる結果となり、それが雲を形成させるチャンスを増やしたと結論した。測定が1970年代に始まって以降、降雨量の観察結果では、主に農地側に限って、冬の降雨量が20%減ったことが示されている。

サヘル

サヘルは、サハラの南のアフリカを東西に横切って、10か国にわたって延びる大きな半乾燥地帯である。降雨量が非常に変化し易く、そして疑いなく相互作用している重要な次の二つの要因によって、その降雨の大半が駆動されている。それは、地球規模での海面温度のパターン(Biasutti *et al.* 2008)と、陸と大気の相互作用に影響を及ぼす土地被覆の大規模な変化(Huber *et al.* 2011)である。サヘルにおける降雨変動と植生の動態の役割は、多くの注目を集める研究対象となっているが、サヘル地域の国々の人口が、1960年の1900万人に対して2020年までに4倍になると予想されているので、それは特に重要である(Brown and Crawford 2009)。

サヘルは、ほぼ6千年前は、草地や灌木地によって覆われていたが(Prentice and Jolly 2000; Hoelzmann *et al.* 1998)、その後乾燥した状態に転換したことを示す海底堆積物や考古学的証拠資料がある。(Foley *et al.* 2003; de Menocal *et al.* 2000)。最近では、1950年代と1960年代のより降雨量の多い比較的湿潤な状態から、1970年代と1980年代のより乾燥した状態への明白な移行があり、それに続いて、過去30年にわたってサヘル地域全域での降雨量の全般的な増加傾向がもたらされ(Huber *et al.* 2011)、それが、一般に緑化傾向と呼ばれるものになっている。しかし、フーバーらは(Huber *et al.* 2011)、植生の変化が必ずしも降雨変化に直接に関係したとは限らないとして、この傾向の複雑さを明らかにしている。

人の幸福への影響

西オーストラリア州の場合には、土地利用の変化が意図しない影響をもたらした。根深い自然植生を除去したことが、降雨量の減少だけでなく、地下水面上昇をもたらした農地表層の塩分を増加させたために、農業生産性がさらに低下した。人が農業のために土地を開墾し続けるにつれ、逆説的なことが起り、食糧生産が短期的には増加しても、長期的にはひどく減少するかもしれない(Noticewala 2007)。

牛飼育と農業のためにオーストラリアの自然植生を広範囲に除去したことのもう一つの影響は、先住民に対するもので、彼等はこれまで伝統的な食物を、豊富な野生生物に頼ってきた。しかし多くの先住民のグループが、大牧場で働いてヨーロッパの食糧に適合する以外に選択肢がなかった(Kouris-Blazos and Wahlqvist 2000)。これは、肥満に関連する慢性病を引き起こし、彼等の栄養状態や幸福に対して、有害な影響を及ぼした(Wolfenden *et al.* 2011)。

アフリカの多くの地域、特にサヘルのような乾燥地域では、主に自給農業で生活が営まれている(Kumssa and Jones 2010)。このことは、人の活動と土地被覆と気候との間の複雑なフィードバックを考慮すると、食糧安全保障にとって著しいリスクとなる。アフリカ・パートナーシップ・フォーラム(APF 2007)は、アフリカの乾燥地域で暮らす7,500万から2億5,000万の人々が気候変動によって影響を受けると推定している。

サヘル地域の緑化は観測されているが、地域の西部区域の降雨量は増加していない(Huber *et al.* 2011)。メルツらは(Mertz *et al.* 2010)、年間400~900mmの降雨量であるサヘル地域の5つの国々の1,249世帯について行った研究で、天水作物生産が減少している原因が、降雨量の不足を主とする気候要因によるものであると信じているのは世帯の30~50%で、土地保有の変化のような広範な他の要因によるものであるとした者が、残り50~70%であることが分かった。メルツら(Mertz *et al.* 2010)は、最も乾燥した地帯と最も湿潤である地帯の違いに加えて、天水作物区域と家畜区域の違いを研究し、

最も乾燥した地域で天水農業を発展させようとしているサヘルの農業限界域にいる人々の直面している困難さを示した。乾燥地域における気候変動への適応策は、これらの込み入った相互作用を考慮に入れなければならないだろう。

火災

地球規模でのバイオマスバーニングの大半が、干ばつ年と並外れた降水年のサイクルがある熱帯地方で発生している(Liu *et al.* 2010; van der Werf *et al.* 2008; Goldammer and de Ronde 2004)。アフリカ大陸は、植生火災の発生が最も多く、世界全体での年間のバイオマスバーニングの推定30~50%を占める(Roberts and Wooster 2008; Dwyer *et al.* 2000)。

大規模な制御不能な火災が、植生に覆われた全ての大陸で近年増加しており、何百億米ドルの被害をもたらしている(Bowman *et al.* 2009)。アメリカやカナダからの検証データ(図7.5)では、両国での森林火災の程度が、20世紀の間に著しく増加したことを示している。アメリカ西部では、1980年代の中頃以降から、大規模な森林火災の頻度がほぼ4倍に増加し、その広がりには6倍以上になった(USGCRP 2009)。カナダやアラスカのツンドラでの最近の火災は、過去5千年の間に前例を見ないものである(Hessl 2011)。人工衛星による観察によって、気候と人的活動の間の強い非線形な関係が明らかにされている。干ばつは、より急速な森林減少をもたらすと同時に、泥炭地の地下水面上昇による火災緩衝の効果を減少させ、生態系の火災への脆弱性を増加させる(van der Werf *et al.* 2008)。将来の火災の動態を予測することは困難な作業である。それは、火災の様々な原因となる要素が非線形性を示すことや(Hessl 2011; Flannigan *et al.* 2009; van der Werf *et al.* 2008)、直接的な人間活動と気候変動のどちらが、一般的に言って、より支配的な役割を火災発生に及ぼしているのかという未解決の疑問があるためである(Bowman *et al.* 2009)。

人の幸福への影響

火災による人の幸福に対する著しい影響には、次のようなも



カナダ、ブリティッシュコロンビアのバーミリオン川、3年前に区域を荒廃させた森林火災の余波 © Bruce Smith/iStock

図 7.5 カナダの森林火災、1920～1999年



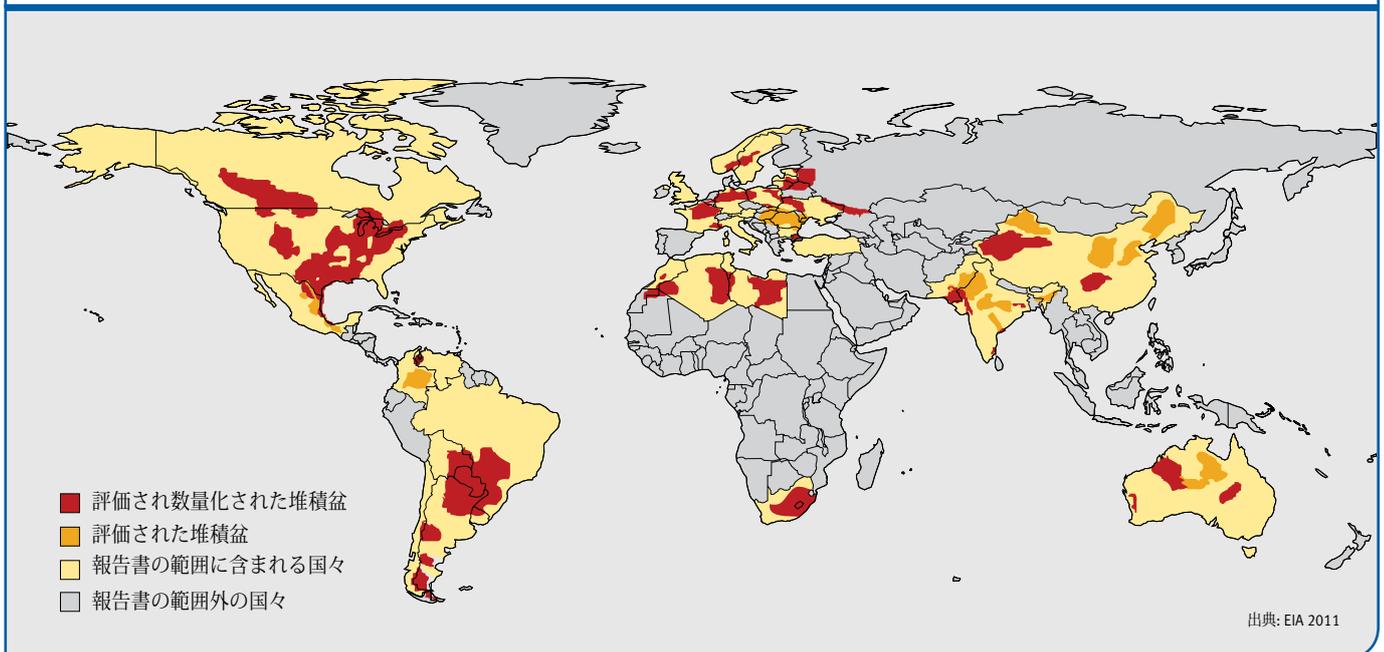
のがある。家屋などの資産の破壊(Bowman *et al.* 2009)、2010年のロシアでの火災で明らかにされた人の健康や大量死に及ぼす影響、また例えば2007年のレバノンで経験されたような農村資源に依存しているコミュニティでの生計の喪失(IUCN 2008)などである。さらに、現在の世界の火災の傾向が継続または悪化すると、森林や他の生態系に貯蔵された莫大な量の炭素による深刻な事態を招き、気候-炭素フィードバックの増幅が解放され、危険な気候変動のリスクが増大する可能性がある。

シェールガス堆積盆

傾斜掘りや水圧破砕のような新しく実証された技術によって、低透過性の地層(シェール層)から、天然ガスを経済的に抽出することができるようになった。これらを実施することは、新しい天然ガス井の建設、そしてそれに伴う基盤施設であるパイプライン、道路、圧縮装置ステーション、蒸発池の建設を加速することになり、広範な土地の破砕とかく乱、大気質の悪化、地表水と地下水の質の低下をもたらす。アメリカの東部と西部の数箇所では、新たに対象となる地層が、新技術を使用して経済的に掘削できるようになるため、その発展の速度が急上昇した。現在まで、そのようなシェールガスの抽出は、主としてアメリカで起こっているが、新技術の使用が拡大するにつれて世界の他の地域(図7.6)に拡がると予想され、拡がってゆくにつれて、他のガス資源と比較した場合の収益性や、シェールガスの特性によって勢いを増す(Kuuskraa and Stevens 2009)。

天然ガスで石炭の燃焼を代用することは、排出量の低減になり、いくつかの地方の大気質に恩恵をもたらすかもしれないが(Howarth *et al.* 2011)、一方で、天然ガスを集中的に開発する現場近くでの大気質への影響は、特にベンゼンや、オゾンを生成する前駆物質や、浮遊粉じんなどの、危険な大気汚染物質の放出のために、非常に深刻になる可能性がある。さらに広い意味では、シェールガス燃料への切り替え、つまりシェールガスのような従来とは異なる化石燃料が、大規模に開発され使用され続けるようになると、そのメタン排出量が従来のガスと比べて少なくとも30%高いため、人為起源の気候変動を悪化させるだろう(Howarth *et al.* 2011; Wigley 2011)。さらにアメリカ西部では、生成された水(つまり炭層ガス水)の廃棄に使用される蒸発池が、揮発性有機物である、危険な大気汚染物質の深刻な発生源となっていることが最近分かった(USEPA

図 7.6 米国連邦エネルギー情報局によって特定された世界のシェールガス堆積盆



2009)。また、井戸を掘削し完成させるために使用される水の消費割合が高いことに伴って、その天然ガス開発が水資源に及ぼす影響も広範囲に及ぶ。また爆発可能レベルのメタンによる地下水層の汚染(Osborn *et al.* 2011)、塩化物、金属、有機化合物による表面水や地下水の汚染、生成された水が放出される河川の汚染などがもたらされる(Johnson *et al.* 2008)。天然ガスが採取される地層を持つ多くの複雑な性質が、地下水資源に対して、知られていない多くの影響を及ぼすかもしれない。このことは、世界にシェールガスの膨大な埋蔵量があるために特に懸念される(EIA 2011;IEA 2011)。

人の幸福への影響

関連する地表水汚染や大気汚染と同様に、水圧破砕で使用される化学物質も、人の健康にとって有害であると思われる(Finkel and Law 2011)。

オーバーシュート

地球システムの機能やその最近の変化について、科学的に理解されるようになったことで、人間社会にとって深刻な影響と共に、根本的な状態変化をもたらすであろう閾値、あるいはティッピングポイントを超過する危険性があることが分かってきた。そのようなシフトには、熱帯雨林からサバンナへの転換、造礁サンゴ礁から軟質サンゴ礁への転換、降雨パターンの変化などを含めなければならないかもしれない(Box 7.2)。地域から地球規模の影響が引き起こされる急激に変化する危険性については、ティッピングエレメント(Schellnhuber 2009)や、惑星限界(planetary boundary)(Rockström *et al.* 2009a)といった概念で捉えられ、それらは地球システム科学によって洞察された比較的最近の見識である。持続可能性につ

Box 7.4 エコロジカル・フットプリント

エコロジカル・フットプリントは、現在の技術を用いて、一人の住人の消費する資源を生成するために、かつ一人の住人の廃棄物を浄化するために、一人の住人が使用することになる生物学的に生産性のある陸地と水域の面積として表される。Kitzesらは(Kitzes *et al.* 2008)、エコロジカル・フットプリントを、利用可能なバイオキャパシティと比較した。バイオキャパシティは、規定された地理的区域内で、一人の住人が利用できる生物学的に生産性のある区域の面積である。図7.7は、北アメリカと西ヨーロッパでは、フットプリントがバイオキャパシティを超過していることを示す。Kitzesらは(Kitzes *et al.* 2008)、もし世界中の誰もが、典型的な北アメリカや西欧の人と同等のエコロジカル・フットプリントを持ったならば、国際社会は、地球のバイオキャパシティの3~5倍オーバーシュートするだろうと結論した。中央ヨーロッパや東ヨーロッパは、共にその地域における利用可能なバイオキャパシティ内で生活しているが、地球規模で見れば持続可能にやっていけないレベルの、一人当たり消費レベルで生活している。逆に、アジア太平洋地域は、その領域内において利用可能なバイオキャパシティを越えた生活をしているが、もし地球規模に拡張されれば、オーバーシュートを引き起こさない一人当たりのエコロジカル・フットプリントで生活している。アフリカの居住民は平均して、地域規模でも、地球規模でも、一人当たり利用可能なバイオキャパシティ未満で生活している。

いてのこれらの地球規模での枠組みは、成長の限界、環境収容力、エコロジカル・フットプリント、オーバーシュートといった以前の概念を補完するものであり、天然資源の埋蔵量の推定

図7.7 大陸域のエコロジカル・フットプリントとバイオキャパシティ、2002年

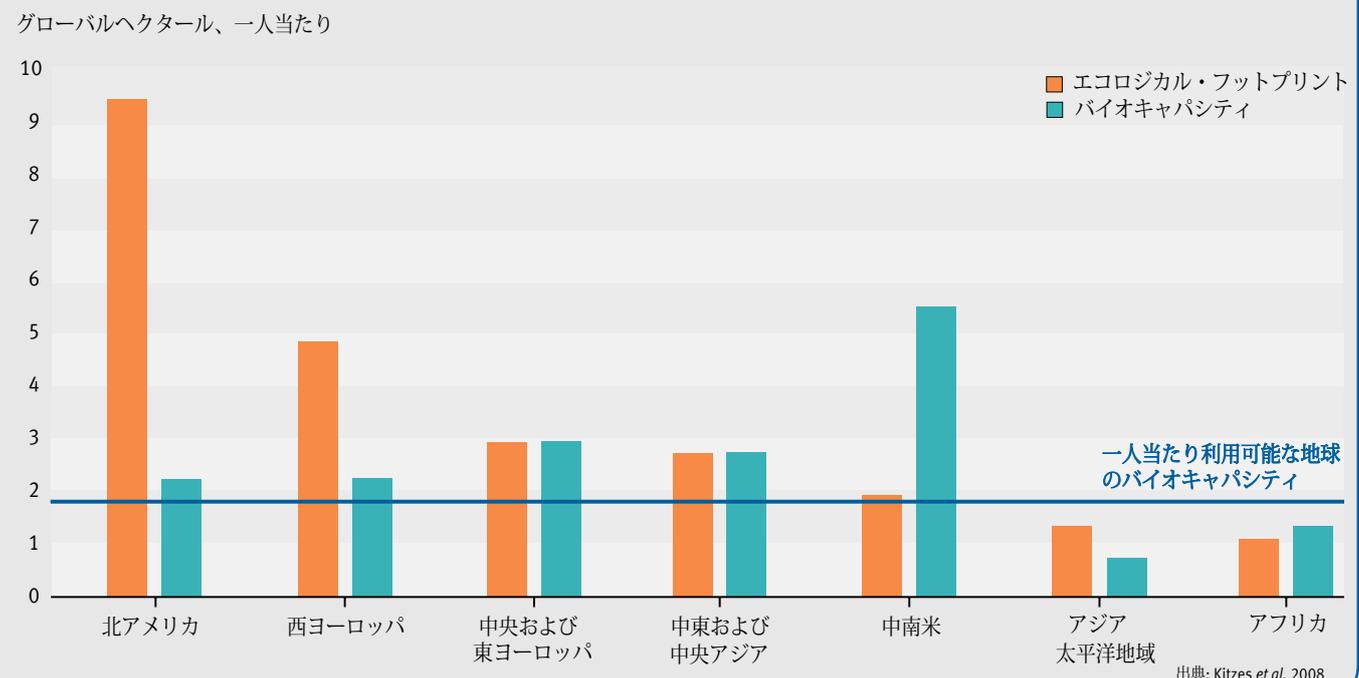
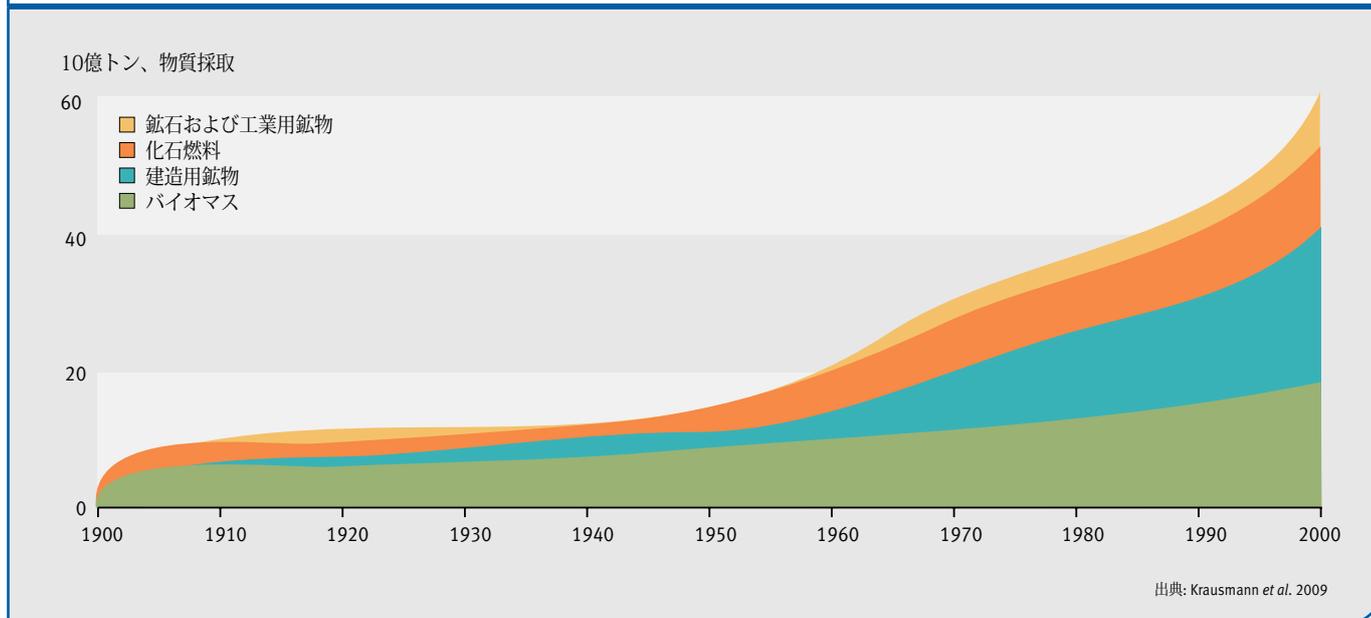


図 7.8 世界の物質採取、1900～2005年



や、主として健康に関する様々な汚染物質の臨界負荷についての推定と共通するところがある。これらを記述する言葉のすべての基本になるものは、人為起源による変化が、地球システムによるその変化を吸収する能力を超えてしまうポイントを特定するための、様々な方法であり想定である。この方法や想定については、まだ科学文献において議論されているところであるが、その結論はすべて、地球システムが閾値に到達しつつあり、その影響は重大であるという点で一致している。

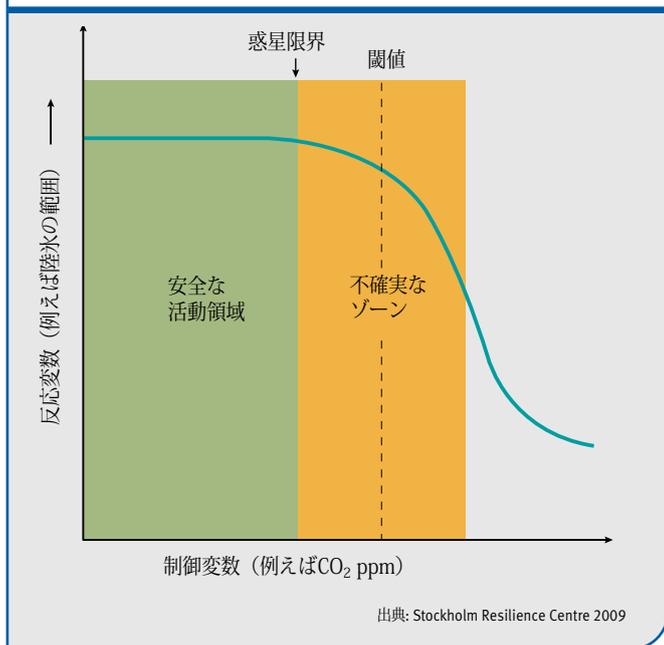
40年前に、メドウズらは(Meadows et al. 1972)「成長の限界」の中で、限りある惑星上で歯止めのない消費や経済を成長させると、地球の環境収容力を超過する方向へと地球を導き、それが世界経済に重大な影響をもたらすだろうと主張した。ホールとデイは(Hall and Day 2009)、この研究の結論を振り返って見て、その警告が概ね正しかったことを発見した。ターナーは(Turner 2008)、「成長の限界」の中で提示されたシナリオと1970年から2000年までの実際の歴史データとを比較し、その「成り行き」シナリオの特徴が、30年間の実際の歴史データとほぼ同じであったと見なすことができること、またその結末が21世紀の途中で世界システムが崩壊する結果になっているということを発見した。

エコロジカル・フットプリント(第5章)は、生物圏に対する人の需要や、地球のバイオキャパシティを理解するために使用される。さらなるデータ改善の必要性はあるが、1966年以降、人類全体のエコロジカル・フットプリントは、かなりの地域差はあるものの、2倍になった(WWF 2010)。Box 7.4や図7.7は、フットプリントと利用可能なバイオキャパシティの両方に、著しい地域格差があることを示しており、どの地域が利用可能量を超えてバイオキャパシティを使用しているかが分かる。巨大都市のエコロジカル・フットプリントは、著しくオーバーシュートしている。

地球システムの限界を示すもう一つのアプローチは、資源の使用に着目したものである(UNEP 2011a)。経済活動で使用される全ての物質を数値化する物質フロー勘定は、採取の工程で動員された物質の総計、および経済過程の中で実際に使用された物質を、それらの質量(トン)で測って計上する。21世紀初めに採取された世界の物質の推定量は、年間470~590億トンにのぼり(図7.8は高い方の推定値を示す)、世界の物質採取は20世紀の間に8倍に増大した(UNEP 2011a)。UNEP(2011a)が開発した3つのシナリオはすべて、2050年までに資源の生産性の著しい改善が無ければ、90億人のニーズを満たすことは不可能であるだろうということを明らかにしている。

地球システム内の相互作用と非線形性を考えに入れた惑星限界という概念が、ロックストロームら(Rockström et al. 2009a)によって導入され、幸福に暮らせる安全な活動領域を人類に提供する惑星限界の設定の鍵となる環境プロセスが特定された。ロックストロームらは(Rockström et al. 2009b)、9つの惑星プロセスを特定し、それらのうちの7つに対して安全な惑星限界を提案した。つまり気候変動、生物多様性の損失速度、窒素とリンの循環、成層圏オゾン層の破壊、海洋の酸性化、世界の淡水使用、土地利用の変化の7つである。提案された惑星限界の位置は、危機的な環境システムに有害な変化をもたらす引き金を引く可能性がある、重大なフィードバックや非線形シフトの危険性から距離を置いて、安全であると考えられる位置に置かれた(図7.9)。環境の危険性には不確実な領域があり、それも常にあるだろうという認識の下、プロセスにとっての安全な位置は、科学による現状の評価に基づかせた。その個々の環境プロセスにとって安全な限界のレベルは、予防的措置が反映されるよう、この科学的に不確実である領域の下端に選定された(Rockström et al. 2009a, 2009b)。その惑星限界は、資源の欠乏に関係するのではなく、人の活動によって駆動される速度とプロセスに関係する。

図 7.9 地球システムのプロセスにおいて、臨界閾値を超えてしまうことを回避するために設定される限界である惑星限界の概念についての記述



惑星限界の枠組みは、世界規模での環境の諸問題が気候変動だけにはとどまらないことを示す。さらに、分析された上記の諸々のプロセスが相互作用すること、つまり、一つの惑星限界を超過することが、他の惑星限界からの距離に影響を与えるかもしれないことが、証拠によって示されている。例えば、農地の拡張は、陸域生態系からの炭素排出量を増加させることにより、気候変動の惑星限界に関係してくるかもしれない。惑星限界の分析において用いられた特定の数字については、異論が唱えられるかもしれないが(Nature 2009)、そのアプローチによって、オーバーシュートに関する議論が提供され、早期の分析によれば、気候変動、生物多様性の損失速度、窒素循環への世界的介入という3つの惑星限界を、人類がすでに超過してしまっていることが示されている(Rockström *et al.* 2009b)。リンの循環への人的介入に関する最近の追跡調査によれば、リンに関する惑星限界も、淡水系で超過してしまっていることが示されている(Carpenter and Bennett 2011)。

人の幸福への影響

生態系は、供給サービス、調整サービス、基盤サービス、文化サービスを提供しており、人の幸福にとって不可欠なものである(TEEB 2010; MA 2005)。人の幸福は、個々の人間が、価値あると思う人生を生きていく能力や、彼等の可能性を達成する機会をどの程度まで持てるかであり(UNEP 2007)、家計、安全、健康、社会関係だけでなく、資源へのアクセスを含む一連の要素によって決定される(序章)。これらの要素はすべて、地球システムの変化によって影響を受ける。また人と環境のシステムにおいて世界が相互に連結されていることは、一つの場所での幸福が、他の場所での行為によって影響されるかもしれないことを意味する。第2章～6章は、地球システムのサブシ

ステムの変化が、どのように幸福に影響するかの例を提供しているが、それらは概して、資産や社会的結束や身の安全というよりも、食料や水の安全保障などの側面について言及している。

惑星の環境収容力を超過したり、突然、不可逆的に変化する時代に入ることによる人の幸福への影響を、地球システムの全体像から検討することが重要である。以下の例で示されるように、地球システムの複雑で非線形な変化の影響は、既に人の幸福に対して重大な結果をもたらしている。

多くの相互作用する駆動要因が人の安全保障に影響する

気候の変動性や異常気象が食糧安全保障に影響を及ぼす。これらの駆動要因は複雑で、様々な経路で影響を引き起こす(地域的水不足、農地の塩類化、洪水による作物の破壊、災害による食品物流の途絶、伝染性の植物病や疫病の負荷の増加)(IPCC 2007)。

閾値の超過:健康への著しい影響

土地利用の変化や森林減少は、局所的に温度を上げ、陰を取り除くことになって生息地が変化し、その変化が、マラリア媒介生物の急速な発生を促すことがある(da Silva-Nunes *et al.* 2008; Afrane *et al.* 2005)。パスカルらは(Pascual *et al.* 2006)、地域の温度変化の影響による、マラリアのよく知られている非線形な閾値反応(生物系)の重要性を示した。

前例のない事象による資産や人の安全保障への影響

気候変動は既に人の安全保障をむしばんでいるが、生計を維持するために重要である天然資源へのアクセスと質が低下することによって、今後ますますそうなるだろう(Barnett and Adger 2007)。例えば、バングラデシュでは、かなりの人々が、農地、社会基盤、通信システムを損失させる河川堤防の浸食や洪水によって、毎年影響を受けている。これらの資産は生計を維持するために不可欠である(Poncelet *et al.* 2010)。

急速な変化と先住民コミュニティ

既に述べたように、北極圏は地球上のどこよりも速く暖まっている。1975年以降、アラスカの気温は平均2.0～3.5℃まで上昇した。アラスカの海岸や川の航行可能水域に沿ったおよそ200の先住民の村が、浸食または洪水の頻度の上昇に脅かされており、5つのコミュニティにおいて、移転が唯一の解決策であると結論が下された。研究では、立ち退きは相当な文化的、社会的、経済的、心理学的な影響を及ぼすことが示されている(Bronen 2010)。

地球システムの諸課題に対する遷移とシステム対応

地球システムの諸課題は「込み入ってはっきりとせず、多くの利害関係者を伴い、構造の不確実性に包まれ、制御することが困難である、持続不可能という難解な諸問題」であると見なされてきた(Rotmans 2006)。その難解な諸問題は、それらの

症状に対処するだけであったり、採られた対策が単に周辺部への対策をわずかに増やすだけで根本的原因に対処することが不十分である場合には、再発する傾向がある。第2章～第6章（気候変動、土地荒廃、生物多様性損失、水の安全保障、化学汚染）で議論された様々な諸問題の一つ一つについて、持続不可能という症状がみられるが、社会の機構や制度のより深い根本的な問題が覆い隠されている。

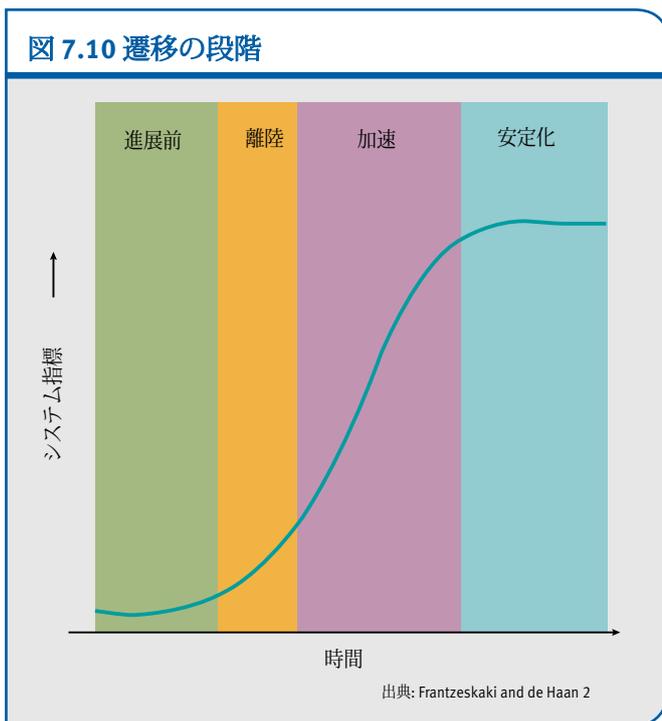
その問題の難解さは、Rotmans (2006)がシステム障害と呼ぶ、次のようなものによる。

- ・制度のシステム障害：刷新を妨げる制度による支配
- ・経済のシステム障害：市場開発の不十分さ、または投資資金の不足
- ・社会のシステム障害：硬直化した行動
- ・生態のシステム障害：本章初めに述べたレジームシフト

遷移管理

これらのシステム障害に対処するには、遷移管理など、斬新なガバナンスの形態が必要である(第16章)(Grin *et al.* 2010)。究極的に、これらのシステム障害が取り除かれると、構造や文化や慣習が変化すると共に、社会システムの構成や機能に、非線形な根本的なシステム変化がもたらされるだろう(Loorbach and Rotmans 2010)。

図 7.10 に示されるように、遷移 (transition: トランジション) の変化は、通常の徐々に進む社会変化とは異なり、次の4つの段階で生起する。すなわち進展前、離陸、加速、安定化の4つである。進展前と加速の段階の間にある離陸の瞬間が、多くの場合、システムが覆り、後戻りできなくなるポイントとして認識されている(Frantzeskaki and de Haan 2009)。



チリの特定海域内の大型船を削減したことで、漁業経営に斬新な解決策がもたらされた。© Joris Van Ostaeyen

1950年以降の個人的移動手段や、集約農業、化石エネルギーインフラなどの出現といった歴史的な遷移は、貧困、不平等、教育不足といった社会問題を解決しようとする望みをもって、ある程度は推進された。しかし、これらの遷移が、今度は、それ自身による問題を生み出した。各個人は今や、安価なエネルギーや移動手段を利用できるようになったかもしれないが、その結果として、汚染や資源搾取や過密を招いている。複雑で難解な現代の諸問題に対処する際の課題は、より先を見越した、探索的なやり方で、それらに対処する新しい方法を見つけることである。変化の複雑なプロセスについて、その動態をよく理解し、それらの速度と方向に対して影響を及ぼそうとすることが必要である。

社会の遷移を推し進める力について、より完全に理解することが、地球システムのための政策を作る上で不可欠である(Frantzeskaki and de Haan 2009)。現在主流である政策や調査のアプローチは、主に、既存のシステムを向上させるように努力して、徐々に改善へと導いていくものであるが、遷移を思考するには、根本的な転換が必要である。周辺部を改善したり、既存システムの最適化を図るといった現在の流れは、技術システムだけでなく政策をも、そしてさらに社会システムも固定化してしまい(Frantzeskaki and Loorbach 2010)、結果的に、持続可能性から逸脱した社会へと導いてしまう。そのような固定化から抜け出すには、基本的に、構造、文化、慣習を改めて、長期の持続可能性を達成する根本的な転換、すなわち大転換(第16と17章)が必要である。

社会経済システムと生態系の両者に不安定性が表れ、諸々の遷移がますます起こりそうになっているので、その速度と方向に対して効果的に、これらの遷移に影響を及ぼすための戦略を組み立てることが極めて重要である(Loorbach *et al.* 2011; Loorbach and Rotmans 2006)。指示して制御するやり方で遷移を誘導しても、うまくいかないけれども、様々な取り組み、例えば、既存社会の動きの統合、特定分野での技術革新、新たな慣習などを用いて、遷移に影響を及ぼすことは可能である。遷移を制御するためには、長期の安定した系統立てたモニタリングが重要であることが、Box 7.5 で例を用いて説明される。

Box 7.5 危機に対する革新的な対応

チリでは、漁場連合が崩壊し、民主主義への動きが出たことで、漁師、科学者、管理者の間の非公式の協力と信頼に基づく、漁場を管理するためのいくつかの新しい取り決めを試みるチャンスが訪れた。チリの魚種資源が危機的な状況にあり、人々がその対策を求めていることを誰もが認識し、また同時に社会変化が始まっていた。このことが、新しいアプローチを積極的に受け入れるように促した。またその地域の沿岸生態系についての科学的な理解が十分に為され、漁業管理のための新しい管理計画の基盤と、新しい協同モデルが試行された。その結果、出来たものは、排他的な大洋領域を地元漁民や小規模漁業に割り付ける海洋保有権の全国システムだった。明確に定められた領域での大型船の数を減らすことによって、漁業圧力が下がった。

出典: Gelcich *et al.* 2010

地球システムが変化している証拠が示された以上、遷移の起こる必然性を理解することや、遷移のプロセスを統治し制御する方法を学ぶことが、特に重要である(Loorbach *et al.* 2011)。社会の変革に際して、徐々に導入されるトップダウンの変化と、自己組織化していくボトムアップのプロセスとの間で、動的な相互作用を引き起こす、新しい種類の複数レベルの変化プロセスが必要となる。なぜなら、専門家によって問題解決を行う伝統的なトップダウン方式は、複雑で非線形で急激に変化する状況に、効果的に対処できるほど、柔軟ではないからである。

これらの変化のプロセスには、新たな知識を発展させ、それを適用していくために、科学、政策、市民社会、企業からの担当者による活発な関与が必要である(O'Riordan 2008)。その

Box 7.6 グレートバリアリーフのガバナンスの改善という遷移

ルソンら(Olsson *et al.* 2008)はグレートバリアリーフの場合には、管理が、柔軟なものでなければならず、また継続的で科学的なモニタリングに適応でき対応するものでなければならぬことを見出した。リーダーシップのもとでのコンセンサスの形成も重要であるが、この柔軟性が、新しい形の相互作用や作業のやり方を可能にする。グレートバリアリーフ海洋公園局と局長は、世界で最大のサンゴ礁生態系の管理を、生態学に基づくものにするために、国民、産業界、政府といったあらゆるレベルに支援を求め、それを獲得することに重要な役割を果たした。そのプロセスで決定的に重要なステップは、バリアリーフをより柔軟に管理するために、公的支援を得ることだった。新制度の下で、最も目を見張る最も議論的になったイニシアチブの一つは、あらゆる形態の漁業を禁止する地区を、6%から33%まで広げたことであり、何も採取しない世界最大のゾーンを作ることであった。バリアリーフの例は、人の幸福のために海洋生態系を積極的に管理するという姿勢に基づいて、人と自然を統合的に見る方向へ、考え方が転換されたことを示す。

出典: Westley *et al.* 2011

プロセスは、必然的に反復作業となるが、問題に共同で取り組む枠組の開発、将来についてのビジョンの共有、解決策を用いての実験、評価、学習から成る。このように展開されるボトム・アップの解決策は、地方の持続可能性を向上させることに寄与し、また当初のトップ・ダウンによる変化を補強し、それらのさらなる拡張を支援するものでなくてはならない(Weaver 2011)。またこれは、ドイツ地球環境変動諮問委員会(WBGU)によって提案されており、委員会、州に対しては、優先度の決定とその決定を明確なメッセージで示す権限を与えると同時に、市民に対しては、発言権を持たせ、意思決定に関与させ、政策においてより積極的な役割を果たせるよう、広範囲な機会を与える必要性を指摘する(WBGU 2011)。

ボトム・アップの対応について、ウェストリーら(Westley *et al.* 2011)は、たいいていの場合、危機にひんした時に明らかになる、学識や技術革新に関する莫大な蓄積があると指摘する。トップダウンで立案プロセスを求めるのとは対照的に、ボトムアップで成功するためには、地域のコミュニティに考えを聞くこと、利用できる資源や可能性について地域住民に情報を流すこと、彼等を信頼し、多種多様な革新的な対応が出てくるようにすることが必要である。ウェストリーらによって示された例の一つが、Box 7.6に要約される(Westley *et al.* 2011)。

考察

地球システムは、サブシステム間やサブシステム内での多くの相互作用、フィードバック、非線形性を含み複雑である。人間は、地球システムの不可欠な要素として、その莫大な数と活動を通して、地球システムを変化させつつあるが、これらの変化の影響は一様には分布せず、人々や場所によっては、他よりも大きな影響が及んでいる。全体として、地球システムが余りにも複雑であるため、地球システムへの人間による圧力の急激な増加が及ぼす結果を予想することは出来ないが、それを超えると突然の不可逆的な変化を生じる閾値に既に到達しているか、または到達しようとしていることは明らかである。これらの変化は、地球の基本的な生命維持機能に影響を与えるだろう。

その変化のいくつかに対処する努力が為され、本報告書の他の箇所で述べたいくつかの成功例はあるが、本分析は、地球システムに対する人為起源の圧力である根本的駆動要因、特に人口増加と過剰消費に対処するアプローチの必要性を指摘する。と同時に、地球システムの複雑さと生来の不確実性によりうまく対処できるアプローチを採用することが必要である。そのようなアプローチは、順応的ガバナンスのプロセスとして第15章と第16章で議論される。しかし、これらのアプローチは、地球システムに関するあらゆる側面についての持続的な長期モニタリングや観察、進展についての定期的な評価、また観察で調整の必要が示された場合に目標を調整することによって、下支えされなければならない。同時に、基礎研究と応用研究によって、地球システムについての理解が向上し続けなければならないし、持続不可能という難解な問題の解決策を見出すために、この知見が利用できるようにされなければならない。

参考文献

- ACIA (2004). *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge
- Afrane, Y.A., Lawson, B.W., Githeko, A.K. and Yan, G. (2005). Effects of microclimatic changes caused by land use and land cover on duration of gonotrophic cycles of *Anopheles gambiae* (Diptera: Culicidae) in Western Kenya Highlands. *Journal of Medical Entomology* 42, 974–980
- Allen, C.D. and Breshears, D.D. (1998). Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95, 14839–14842
- APF (2007). *Climate Change and Africa*. Document prepared jointly by the African Partnership Forum (APF) and the Secretariat of the New Partnership for Africa's Development (NEPAD) for the 8th APF Meeting in Berlin, 22–23 May, 2007
- Aragão, L.E.O.C., Malhi, Y., Roman-Cuesta, R.M., Saatchi, S., Anderson, L.O. and Shimabukuro, Y.E. (2007). Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters* 34, L07701
- Bamber, J.L., Riva, R.E.M., Vermeersen, B.L.A. and LeBrocq, A.M. (2009). Reassessment of the potential sea-level rise from a collapse of the West Antarctic ice sheet. *Science* 324, 901–903
- Barnett, J. and Adger, W.N. (2007). Climate change, human security and violent conflict. *Political Geography* 26, 639–655
- Barnosky, A.D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G.O.U., Swartz, B., Quental, T.B., Marshall, C., McGuire, J.L., Lindsey, E.L., Maguire, K.C., Mersey, B. and Ferrer, E.A. (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471, 5–7
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. and Palutikof, J.P. (eds.) (2008). *Climate Change and Water*. IPCC Technical Paper VI. IPCC Secretariat, Geneva
- Beniston, M. (2003). Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change* 59, 5–31
- Biasutti, M., Held, I.M., Sobel, A.H. and Giannini, A. (2008). SST forcings and Sahel rainfall variability in simulations of the twentieth and twenty-first centuries. *Journal of Climate* 21, 3471–3486
- Böning, C.W., Dispert, A., Visbeck, M., Rintoul, S.R. and Schwarzkopf, F. (2008). The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change. *Nature Geoscience* 1, 864–869. doi: 10.1038/ngeo362
- Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., Carlson, J.M., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., DeFries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Marston, J.B., Moritz, M.A., Prentice, I.C., Roos, C.L., Scott, A.C., Swetnam, T.W., van der Werf, G.R. and Pyne, S.J. (2009). Fire in the Earth system. *Science* 324, 481–484
- Briggs, R., Carpenter, S.R. and Brock, W.A. (2009). Turning back from the brink: detecting an impending regime shift in time to avert it. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106(3), 826–831
- Brondizio, E.S. and Moran, E.F. (2008). Human dimensions of climate change: the vulnerability of small farmers in the Amazon. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 1803–1809
- Bronen, R. (2010). Forced migration of Alaskan indigenous communities due to climate change. In *Environment, Forced Migration and Social Vulnerability* (eds. Afifi, T. and Jäger, J.). pp.87–98. Springer Verlag, Berlin
- Brown, O. and Crawford, A. (2009). *Climate Change and Security in Africa*. A study for the Nordic-African Ministers of Foreign Affairs Forum, 2009. International Institute for Sustainable Development (IISD), Winnipeg
- Brown, J.H., Valone, T.J. and Curtin, C.G. (1997). Reorganization of an arid ecosystem in response to recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94, 9729–9733
- Canadell, J.G., Le Quééré, D., Raupach, M.R., Field, C.R., Buitenhuis, E., Ciais, P., Conway, T.J., Gillett, N.P., Houghton, R.A. and Marland, G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS* 104, 18866–18870
- Carpenter, S.R. and Bennett, E.M. (2011). Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. *Environmental Research Letters* 6, 014009. doi: 014010.011088/011748-019326/014006/014001/014009
- CBD (2010). *Global Biodiversity Outlook 3*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal
- Chao, K.J., Phillips, O.L., Baker, T.R., Peacock, J., Lopez-Gonzalez, G., Vásquez Martínez, R., Monteagudo, A. and Torres-Lezama, A. (2009). After trees die: quantities and determinants of necromass across Amazonia. *Biogeosciences* 6, 1615–1626
- CIDA (2002). *Gender Equality and Climate Change: Why Consider Gender Equality when Taking Action on Climate Change?* Canadian International Development Agency (CIDA), Hull
- Cochrane, M.A. and Barber, C.P. (2009). Climate change, human land use and future fires in the Amazon. *Global Change Biology* 15, 601–612
- Crutzen, P.J. (2002). Geology of mankind. *Nature* 415, 23–23
- Cruz, R.V., Harasawa, H., Lal, M., Wu, S., Anokhin, Y., Punsalma, B., Honda, Y., Jafari, M., Li, C. and Huu Ninh, N. (2007). Asia. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Parry, M.L., Canziani, O.F., Paulutkof, J.P., van de Linden, P.J. and Hanson, C.E.). pp.469–506. Cambridge University Press, Cambridge
- da Rocha, H.R., Manzi, A.O., Cabral, O.M., Miller, S.D., Goulden, M.L., Saleska, S.R., R-Coupe, N., Wofsy, S.C., Borma, L.S., Artaxo, P., Vourlitis, G., Nogueira, J.S., Cardoso, F.L., Nobre, A.D., Kruijt, B., Freitas, H.C., von Randow, C., Aguiar, R.G. and Maia, J.F. (2009). Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *Journal of Geophysical Research* 114, G00B12
- da Silva-Nunes, M., Codeço, C.T., Malafronte, R.S., da Silva, N.S., Juncansen, C., Muniz, P.T. and Ferreira, M.U. (2008). Malaria on the Amazonian frontier: transmission dynamics, risk factors, spatial distribution, and prospects for control. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 79(4), 624–35
- de Menocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L. and Yarusinsky, M. (2000). Abrupt onset and termination of the African humid period: rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Reviews* 19, 347–61
- de Young, B., Barange, M., Beaugrand, G., Harris, R., Perry, R.I., Scheffer, M. and Werner, F. (2008). Regime shifts in marine ecosystems: detection, prediction and management. *Trends in Ecology and Evolution* 23, 402–409
- Dwyer, E., Pinnock, S., Grégoire, J.-M. and Pereira, J.M.C. (2000). Global spatial and temporal distribution of vegetation fire as determined from satellite observations. *International Journal of Remote Sensing* 21(6/7), 1289–1302
- EIA (2011). *World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions outside the United States*. US Energy Information Administration, Washington, DC
- Eldredge, N. (2001). *The Sixth Extinction*. American Institute of Biological Sciences. <http://www.actionbioscience.org/newfrontiers/eldredge2.html> (accessed 16 September 2011)
- Estes, J.A., Terborgh, J., Brashares, J.S., Power, M.E., Berger, J., Bond, W.J., Carpenter, S.R., Essington, T.E., Holt, R.D., Jackson, J.B.C., Marquis, R.J., Oksanen, L., Oksanen, T., Paine, R.T., Pickett, E.K., Ripple, W.J., Sandin, S.A., Scheffer, M., Schoener, T.W., Shurin, J.B., Sinclair, A.R.E., Soulé, M.E., Virtanen, R. and Wardle, D.A. (2011). Trophic downgrading of planet Earth. *Science* 333, 301–306
- Eyring, V., Shepherd, T.G. and Waugh, D.W. (2010). *SPARC Report on Evaluation of Chemistry-Climate Models*. SPARC Report No. 5. Stratospheric Processes And Their Role in Climate. WCRP-132, WMO/TD-No. 1526
- Ezcurra, E. (ed.) (2006). *Global Deserts Outlook*. Division of Early Warning and Assessment, United Nations Environment Programme, Nairobi
- Finkel, M.L. and Law, A. (2011). The rush to drill for natural gas: a public health cautionary tale. *American Journal of Public Health* 101, 784–785
- Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M. and Gowman, L.M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire* 18, 483–507
- Foley, J., Asner, G., Costa, M., Coe, M., Defries, R., Gibbs, H., Howard, E., Olson, S., Patz, J., Ramankutty, N. and Snyder, P. (2007). Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 25–32
- Foley, J.A., Coe, M.T., Scheffer, M. and Wang, G.L. (2003). Regime shifts in the Sahara and Sahel: interactions between ecological and climatic systems in northern Africa. *Ecosystems* 6(6), 524–539
- Folke, C., Jansson, Å., Rockström, J., Olsson, P., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Crépín, A.-S., Daily, G., Danell, K. and Ebbesson, J. (2011). Reconnecting to the biosphere. *Ambio*. doi: 10.1007/s13280-011-0184-y
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L. and Holling, C.S. (2004). Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology and Systematics* 35, 557–581
- Francis, J.A. and Hunter, E. (2006). New insight into the disappearing Arctic sea ice. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 87(46)
- Frantzeskaki, N. and de Haan, H. (2009). Transitions: two steps from theory to policy. *Futures* 41, 593–606
- Frantzeskaki, N. and Loorbach, D. (2010). Towards governing infrasystem transitions: reinforcing lock-in or facilitating change? *Technological Forecasting and Social Change* 77, 1292–1301
- Gelcich, S., Hughes, T.P., Olsson, P., Folke, C., Defeo, O., Fernández, M., Foale, S., Gunderson, L.H., Rodríguez-Sickert, C., Scheffer, M., Steneck, R.S. and Castilla, J.C. (2010). Navigating transformations in governance of Chilean marine coastal resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(39), 16794–16799. doi:10.1073/pnas.1012021107
- Gille, S.T. (2002). Warming of the Southern Ocean since the 1950s. *Science* 295(5558), 1275–1277. doi:10.1126/science.1065863
- Gillett, N.P., Weaver, A.J., Zwiers, F.W. and Flannigan, M.D. (2004). Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophysical Research Letters* 31, L18211. doi:10.1029/2004GL020876

- Goldammer, J.G. and de Ronde, C. (eds.) (2004). *Wildland Fire Management Handbook for Sub-Saharan Africa*. Global Fire Monitoring Centre (GFMC), Freiburg
- Graversen, R.G., Mauritsen, T., Tjernstrom, M., Kallen, E. and Svensson, G. (2008). Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature* 451, 53–56
- Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X. and Briggs, J.M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science* 319, 756–760
- Grin, J., Rotmans, J. and Schot, J. (2010). *Transitions to Sustainable Development: New Directions in the Study of Long-Term for Transformative Change*. Routledge, New York
- Hall, C.A.S. and Day, J.W. (2009). Revisiting the limits to growth after peak oil. *American Scientist* 97(3), 230
- Hansen, J. and Nazarenko, L. (2004). Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101, 423–428
- Hays, J.D., Imbrie, J. and Shackleton, N.J. (1976). Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science* 194, 1121–1132
- Hessl, A.E. (2011). Pathways for climate change effects on fire: models, data, and uncertainties. *Progress in Physical Geography* 35, 393–407
- Hewitt, R.P., Watkins J.L., Naganobu, M., Tshernyshkov, P., Briërley, A.S., Demer, D.A., Kasatkina, S., Takao, Y., Goss, C., Malyshko, A., Brandon, M.A., Kawaguchi, S., Siegel, V., Trathan, P.N., Emery, J.H., Everson, I. and Miller, D.G.M. (2001). Setting a precautionary catch limit for Antarctic krill. *Oceanography* 15(3), 26–33
- Hill, S.L., Murphy, E.J., Reid, K., Trathan, P.N. and Constable, A.J. (2006). Modelling Southern Ocean ecosystems: krill, the food-web, and the impacts of harvesting. *Biological Reviews* 81, 581–608
- Hoelzmann, P., Jolly, D., Harrison, S.P., Laarif, F., Bonnefille, R. and Pachur, H.-J. (1998). Mid-Holocene land-surface conditions in northern Africa and the Arabian Peninsula: a data set for the analysis of biogeophysical feedbacks in the climate system. *Global Biogeochemical Cycles* 12, 35–52
- Howarth, R., Santoro, R. and Ingraffea, A. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change* 106, 679–690
- Huber, S., Fensholt, R. and Rasmussen, K. (2011). Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change* 76, 186–195
- Huybrechts, P. (2009). Global change: west-side story of Antarctic ice. *Nature* 458, 295–296
- ICIMOD (2010a). *Mountain GeoPortal*. International Center for Integrated Mountain Development, Kathmandu. <http://geoportal.icimod.org/Downloads/FreeDataDownloads.aspx>
- ICIMOD (2010b). *Understanding Mountain Poverty: Exploring the Specificities of Poverty in the Mountain Areas of the Greater Himalayan Region*. International Center for Integrated Mountain Development, Kathmandu
- ICIMOD (2009). *Local Responses to Too Much and Too Little Water in the Greater Himalayan Region*. International Center for Integrated Mountain Development, Kathmandu
- IEA (2011). *World Energy Outlook 2011 Special Report: Are We Entering a Golden Age of Gas?* International Energy Authority, Paris
- IPCC (2007). *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge
- IUCN (2008). *Lebanon's National Forest Fire Management Strategy, Second Draft*. http://cmsdata.iucn.org/downloads/forest_strategy_english_final_may09_1.pdf (accessed 11 August 2011)
- Johnson, B., Kanagy, L., Rodgers, J. and Castle, J. (2008). Chemical, physical, and risk characterization of natural gas storage produced waters. *Water, Air, and Soil Pollution* 191, 33–54
- Kitzes, J., Wackernagel, M., Loh, J., Peller, A., Goldfinger, S., Cheng, D. and Tea, K. (2008). Shrink and share: humanity's present and future Ecological Footprint. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 467–475
- Kouris-Blazos, A. and Wahlqvist, M. (2000). Indigenous Australian food culture on cattle stations prior to the 1960s and food intake of older Aborigines in a community studied in 1988. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition* 9, 224–231
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.H., Haberl, H. and Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics* 68(10), 2696–2705
- Krey, V., Canadell, J., Nakicenovic, N., Abe, Y., Andruleit, H., Archer, D., Grubler, A., Hamilton, N.T.M., Johnson, A., Kostov, V., Lamarque, J., Langhorne, N., Nisbet, E., O'Neill, B., Riahi, K., Riedel, M., Wang, W. and Yakushev, V. (2009). Gas hydrates: entrance to a methane age or climate threat? *Environmental Research Letters* 4, 034007. doi:034010.031088/031748-039326/034004/034003/034007
- Kumssa, A. and Jones, J.F. (2010). Climate change and human security in Africa. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 17, 453–461
- Kuuskräa, V.A. and Stevens, S.H. (2009). *Worldwide Gas Shales and Unconventional Gas: A Status Report*. Advanced Resources International, Inc., Arlington, VA
- Lawrence, D.M., Slater, A.G., Tomas, R.A., Holland, M.M. and Deser, C. (2008). Accelerated Arctic land warming and permafrost degradation during rapid sea ice loss. *Geophysical Research Letters* 35, L11506
- Leadley, P., Pereira, H.M., Alkemade, R., Fernandez-Manjarrés, J.F., Proença, V., Scharlemann, J.P.W. and Walpole, M.J. (2010). *Biodiversity Scenarios: Projections of 21st Century Change in Biodiversity and Associated Ecosystem Services*. Technical Series No. 50. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal
- Le Quéré, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R.A., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.R., Majkut, J., Metz, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitch, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R. and Woodward, F.I. (2009). Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* 2, 831–836. doi: 10.1038/ngeo689
- Le Quéré, C.L., Rödenbeck, C., Buitenhuis, E.T., Conway, T.J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metz, N., Gillett, N. and Heimann, M. (2007). Saturation of the Southern Ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science* 316(5832), 1735–1738
- Levin, S.A. (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems* 1, 431–436
- Lewis, S.L., Brando, P.M., Phillips, O.L., van der Heijden, G.M.F. and Nepsstad, D. (2011). The 2010 Amazon drought. *Science* 331, 554
- Liu, Y., Stanturf, J. and Goodrick, S. (2010). Trends in global wildfire potential in a changing climate. *Forest Ecology and Management* 259 (4), 685–697
- Loorbach, D. and Rotmans, J. (2010). The practice of transition management: examples and lessons from four distinct cases. *Futures* 42, 237–246
- Loorbach, D. and Rotmans, J. (2006). Managing transitions for sustainable development. In *Understanding Industrial Transformation: Views from Different Disciplines* (eds. Olshoorn, X. and Wieczorek, A.J.). Springer, Dordrecht
- Loorbach, D., Frantzeskaki, N. and Thissen, W. (2011). A transition research perspective on governance for sustainability. In *European Research on Sustainable Development* (eds. Jaeger, C.C., Tàbara, J.D. and Jaeger, J.). pp.73–89. Springer, Berlin-Heidelberg
- Luethi, D., Le Floch, M., 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, 379–382
- MA (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, DC
- Ma, X., Xu, J.C., Luo, Y., Aggarwal, S.P. and Li, J.T. (2009). Response of hydrological processes to land cover and climate change in Kejie watershed, southwest China. *Hydrological Processes*. doi:10.1002/hyp.7233
- Manney, G.L., Santee, M.L., Rex, M., Livesey, N.J., Pitts, M.C., Veefkind, P., Nash, E.R., Wohltmann, I., Lehmann, R., Froidevaux, L., Poole, L.R., Schoeberl, M.R., Haffner, D.P., Davies, J., Dorokhov, V., Gernandt, H., Johnson, B., Kivi, R., Kyrö, E., Larsen, N., Levelt, P.F., Makshtas, A., McElroy, C.T., Nakajima, H., Parrondo, M.C., Tarasick, D.W., von der Gathen, P., Walker, K.A. and Zinoviev, N.S. (2011). Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature* 478(7370), 469–475. doi:10.1038/nature10556
- Maslanik, J., Stroeve, J., Fowler, C. and Emery, W. (2011). Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011. *Geophysical Research Letters* 38, L13502. doi:10.1029/2011GL047735
- McConnell, J.R., Edwards, R., Kok, G.L., Flanner, M.G., Zender, C.S., Saltzman, E.S., Banta, J.R., Pasteris, D.R., Carter, M.M. and Kahl, J.D.W. (2007). 20th-century industrial black carbon emissions altered Arctic climate forcing. *Science* 317, 1381–1384
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. and Behrens III, W.W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books, New York
- Mertz, O., Mbow, C., Nielsen, J.O., Maiga, A., Diallo, D., Reenberg, A., Diouf, A., Barbier, B., Moussa, I.B., Zorom, M., Ouattara, I. and Dabi, D. (2010). Climate factors play a limited role for past adaptation strategies in West Africa. *Ecology and Society* 15(4), 25. <http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art25/>
- Myers, N. and Knoll, A.H. (2001). The biotic crisis and the future of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98, 5389–5392
- Nair, U.S., Wu, Y., Kala, J., Lyons, T.J., Pielke, R.A. and Hacker, J.M. (2011). The role of land use change on the development and evolution of the west coast trough, convective clouds, and precipitation in southwest Australia. *Journal of Geophysical Research* 116, D07103. doi:07110.01029/02010J014950
- Nature (2009). Earth's boundaries? *Nature* 461, 447–448. doi:10.1038/461447b
- NASA Earth Observatory (2010). *If Earth has Warmed and Cooled throughout History, What Makes Scientists Think that Humans are Causing Global Warming Now?* National Aeronautics and Space Administration. <http://earthobservatory.nasa.gov/blogs/climateqa/if-earth-has-warmed-and-cooled-throughout-history-what-makes-scientists-think-that-humans-are-causing-global-warming-now/>

- NASA GISS (2011). Surface Temperature Analysis. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- Nicol, S. and Robertson, G. (2006). Ecological consequences of Southern Ocean harvesting. *Books Online 2006*, 48–61. http://www.publish.csiro.au/paper/9780643090712_03 (accessed 19 November 2011)
- Nijssen, B., O'Donnell, G.M., Hamlet, A. and Letterman, D.P. (2001). Hydrological sensitivity of global rivers to climate change. *Climate Change* 50, 143–175
- NOAA (2011). *Current Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/>
- Noticewala, S. (2007). At Australia's bunny fence, variable cloudiness prompts climate study. <http://www.nytimes.com/2007/08/14/science/earth/14fenc.html?pagewanted=print> (accessed 10 September 2011)
- Olsson, P., Folke, C. and Hughes, T.P. (2008). Navigating the transition to ecosystem-based management of the Great Barrier Reef, Australia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, 9489–9494
- O'Riordan, T. (2008). Some reflections on the conditions for favouring integrated sustainability assessment. *International Journal of Innovation and Sustainable Development* 3(1–2), 153–162
- Osborn, S.G., Vengosh, A., Warner, N.R. and Jackson, R.B. (2011). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108, 8172–8176
- Pagani, M., Liu, Z., LaRiviere, J. and Ravelo, A.C. (2010). High Earth-system climate sensitivity determined from Pliocene carbon dioxide concentrations. *Nature Geoscience* 3, 27–30
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. and Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988–993
- Parry, B. (2008). *Amazon: An Extraordinary Journey Down The Greatest River On Earth*. Penguin Books, London
- Pascual, M., Ahumada, J.A., Chaves L.F., Rodó X., and Bouma, M. (2006). Malaria resurgence in the East African highlands: temperature trends revisited. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103(15), 5829–5834. doi:10.1073/pnas.0508929103
- Petoukhov, V.A. and Semenov, V.A. (2010). A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *Journal of Geophysical Research* 115, D21111
- Phillips, O.L., Aragão, L.E.O.C., Lewis, S.L., Fisher, J.B., Lloyd, J., López-González, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C.A., van der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T.R., Bánki, O., Blanc, L., Bonal, D., Brando, P., Chave, J., de Oliveira, Á.C.A., Cardozo, N.D., Czimczik, C.I., Feldpausch, T.R., Freitas, M.A., Gloor, E., Higuchi, N., Jiménez, E., Lloyd, G., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Neill, D.A., Nepstad, D., Patiño, S., Peñuela, M.C., Prieto, A., Ramírez, F., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Thomas, A.S., ter Steege, H., Stropp, J., Vásquez, R., Zelazowski, P., Dávila, E.A., Andelman, S., Andrade, A., Chao, K.-J., Erwin, T., di Fiore, A., Honorio C., E., Keeling, H., Killeen, T.J., Laurance, W.F., Cruz, A.P., Pitman, N.C.A., Vargas, P.N., Ramírez-Angulo, H., Rudas, A., Salamão, R., Silva, N., Terborgh, J. and Torres-Lezama, A. (2009). Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science* 323, 1344–1347
- Pielke, R.A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmoud, R., McAlpine, C., Hossain, F., Goldewijk, K.K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P. and de Noblet, N. (2011). Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Climate Change* 2, 828–850. doi:10.1002/wcc.144 <http://wires.wiley.com/WileyCDA/WileyArticle/wisid-WCC144.html>
- Plümper, T. and Neumayer, E. (2007). The gendered nature of natural disasters: the impact of catastrophic events on the gender gap in life expectancy, 1981–2002. *Annals of the Association of American Geographers* 97(3), 551–566
- Pollard, D. and DeConto, R.M. (2009). Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature* 458, 329–332
- Poncelet, A., Gemenne, F., Boussetta, H. and Martiniello, M. (2010). A country made for disasters: environmental vulnerability and forced migration in Bangladesh. In *Environment, Forced Migration and Social Vulnerability*. (eds. Afifi, T. and Jaeger, J.), Springer, Berlin
- Prentice, I.C. and Jolly, D. (2000). Mid-Holocene and glacial-maximum vegetation geography of the northern continents and Africa. *Journal of Biogeography* 27, 507–19
- Purkey, S.G. and Johnson, G.C. (2010). Warming of global abyssal and deep Southern Ocean waters between the 1990s and 2000s: contributions to global heat and sea level rise budgets. *Journal of Climate* 23, 6336–6351. doi:10.1175/2010JCLI3682.1
- Qin, B., Liu, Z. and Havens, K. (2007). *Eutrophication of Shallow Lakes with Special Reference to Lake Taihu, China*. Springer, Dordrecht
- Ramanathan, V. and Carmichael, G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience* 1, 221–227
- Reynolds, J.F. and Stafford Smith, D.M. (eds.) (2002). *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem Workshop Report 88. Dahlem University Press, Berlin
- Roberts, C.J. and Wooster, M.J. (2008). Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46(4), 1200–1218
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F.S., Lambin, E., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J. (2009a). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14, 32. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss32/art32/>
- Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J.A. (2009b). A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475
- Rotmans, J. (2006). Tools for integrated sustainability assessment: a two-track approach. *The Integrated Assessment Journal* 6, 35–57
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C., Gurevitch, J. and GCTE-NEWS (2001). A meta-analysis of the response of soil respiration, nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126, 543–562
- Schaefer, K., Zhang, T., Bruhwiler, L. and Barrett A.P. (2011). Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming. *Tellus B* 63(2), 165–180
- Schellnhuber, H.-J. (2009). Tipping elements in the Earth system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106(49), 20561–20563. doi:10.1073/pnas.0911106106
- Schmidt, G.A., Ruedy, R.A., Miller, R.L. and Laci, A.A. (2010). Attribution of the present-day total greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research* 115, D20106
- Screen, J.A. and Simmonds, I. (2010). The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature* 464, 1334–1337
- Serreze, M.C. and Barry, R.G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis. *Global and Planetary Change* 77, 85–96
- Sherman, K. and Hempel, G. (2008). *The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas*. United Nations Environment Programme, Nairobi
- Shindell, D. and Faluvegi, G. (2009). Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geoscience* 2, 294–300
- Steffen, W., Crutzen, P.J. and McNeill, J.R. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of Nature? *Ambio* 36, 614–621
- Steffen, W., Andrae, M.O., Bolin, B., Cox, P.M., Crutzen, P.J., Cubasch, U., Held, H., Nakidenovic, N., Scholes, R.J., Talala-McManus, L. and Turner, B.L. (2004a). Abrupt changes: the Achilles' heels of the Earth system. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 46, 8–20
- Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P.D., Jäger, J., Matson, P.A., Moore III, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.J., Turner II, B.L., Wasson, R.J. (2004b). *Global Change and the Earth System*. Springer, Berlin
- Stephenson, S., Smith, L. and Agnew, J. (2011). Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic. *Nature Climate Change* 1, 156–160
- Stockholm Resilience Centre (2009). *Tipping Towards the Unknown*. University of Stockholm. <http://www.stockholmresilience.org/research/researchnews/tippingtowardstheunknown.57cf9c5aa121e17bab42800021543.html> 20
- SWIPA (2011). *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) – Executive Summary 2011*. Arctic Monitoring and Assessment Programme
- Takahashi, T., Sutherland, S.C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R.A., Chipman, D.W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Sabine, C., Watson, A., Bakker, D.C.E., Schuster, U., Metzl, N., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T., Nojiri, Y., Körtzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., Olafsson, J., Amarson, T.S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Wong, C.S., Delille, B., Bates, N.R. and de Baar, H.J.W. (2009). Climatological mean and decadal change in surface ocean p CO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56, 554–577
- Tarnocai, C., Canadell, J., Schuur, E., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23
- TEEB (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB*. <http://www.teebweb.org/TEEBSynthesisReport/tabid/29410/Default.aspx>
- Thompson, D.W.J. and Solomon, S. (2002). Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science* 296(5569), 895–899. doi:10.1126/science.1069270
- Turner, G.M. (2008). A comparison of *The Limits to Growth* with 30 years of reality. *Global Environmental Change* 18, 397–411
- Turner, J., Bindschadler, R., Convey, P., di Prisco, G., Fahrback, E., Gutt, J., Hodgson, D., Mayewski, P. and Summerhayes, C. (2009). *Antarctic Climate Change and the Environment*. Scar and Scott Polar Research Institute, Cambridge

- UNEP (2011a). *Decoupling Natural Resource Use And Environmental Impacts From Economic Growth. A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. United Nations Development Programme, Nairobi
- UNEP (2011b). Nellemann, C., Verma, R., and Hislop, L. (eds). *Women at the Frontline of Climate Change: Gender Risks and Hopes*. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal
- UNEP (2007). *Global Environment Outlook 4: Environment for Development*. United Nations Development Programme, Nairobi
- USEPA (2009). *Measurement of Emissions from Produced Water Ponds: Upstream Oil and Gas Study 1*. National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Cincinnati
- USGCRP (2009). *Global Climate Change Impacts in the United States* (eds. Karl, T., Melillo, J.M., and Peterson T.C.). US Global Change Research Program. Cambridge University Press, Cambridge. 188 pp. <http://www.globalchange.gov/what-we-do/assessment/previous-assessments/global-climate-change-impacts-in-the-us-2009>
- van der Werf, G.R., Dempewolf, J., Trigg, S.N., Randerson, J.T., Kasibhatla, P.S., Giglio, L., Murdiyarso, D., Peters, W., Morton, D.C., Collatz, G.J., Dolman, A.J. and DeFries, R.S. (2008). Climate regulation of fire emissions and deforestation in equatorial Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, 20350–20355
- van Nes, E.H. and Scheffer, M. (2007). Slow recovery from perturbations as a generic indicator of a nearby catastrophic shift. *American Naturalist* 169, 738–747
- Vergara, W. and Scholz, M.S. (2010). *Assessment of the Risk of Amazon Dieback*. World Bank, Washington, DC
- von Braun (2007). *The World Food Situation. New Driving Forces and Required Actions*. International Food Policy Research Institute, Washington, DC
- WBGU (2011). *World In Transition. A Social Contract for Sustainability*. German Advisory Council on Global Change, Berlin
- Weaver, P.M. (2011). Pragmatism and pluralism: creating clumsy and context-specific approaches to sustainability science. In *European Research on Sustainable Development* (eds. Jaeger, C.C., Tabara, J.D. and Jaeger, J.). pp.173–186. Springer-Verlag, Berlin
- Westley, F., Olsson, P., Folke, C., Homer-Dixon, T., Vredenburg, H., Looibach, D., Thompson, J., Nilsson, M., Lambin, E., Sendzimir, J., Banarjee, B., Galaz, V. and van der Leeuw, S. (2011). *Tipping towards Sustainability: Emergent Pathways of Transformation*. Prepared for the 3rd Nobel Laureate Symposium on Global Sustainability: Transforming the World in an Era of Global Change, Stockholm. <http://www.stockholmresilience.org/seminarandevents/seminarandeventvideos/>
- Wigley, T. (2011). Coal to gas: the influence of methane leakage. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-10011-10217-10583
- Wolfenden, L., Hardy, L.L., Wiggers, J., Milat, A.J., Bell, C. and Sutherland, R. (2011). Prevalence and socio-demographic associations of overweight and obesity among children attending child-care services in rural and regional Australia. *Nutrition and Dietetics* 68, 15–20
- WWF (2010). *Living Planet Report 2010*. WWF–World Wide Fund For Nature, Gland
- Wysham, D.B. and Hastings, A. (2008). Sudden shifts in ecological systems: intermittency and transients in the coupled Ricker population model. *Bulletin of Mathematical Biology* 70, 1013–1031
- Xu, J., Grumbine, R.E., Shrestha, A., Eriksson, M., Yang, X., Wang, Y.U.N. and Wilkes, A. (2009). The melting Himalayas: cascading effects of climate change on water, biodiversity, and livelihoods. *Conservation Biology* 23, 520–530
- Xu, J.C., Shrestha, A.B., Vaidya, R., Eriksson, M. and Hewitt, K. (2007). *The Melting Himalayas: Regional Challenges and Local Impacts of Climate Change on Mountain Ecosystems and Livelihoods*. Technical paper. International Center for Integrated Mountain Development, Kathmandu
- Young, D.A., Wright, A.P., Roberts, J.L., Warner, R.C., Young, N.W., Greenbaum, J.S., Schroeder, D.M., Holt, J.W., Sugden, D.E., Blankenship, D.D., van Ommen, T.D. and Siegert, M.J. (2011). A dynamic early East Antarctic ice sheet suggested by ice-covered fjord landscapes. *Nature* 474, 72–75
- Zaks, D.P.M., Barford, C.C., Ramankutty, N. and Foley, J.A. (2009). Producer and consumer responsibility for greenhouse gas emissions from agricultural production—a perspective from the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters* 4, 044010
- Zalasiewicz, J., Williams, M., Haywood, A. and Ellis, M. (2011). The Anthropocene: a new epoch of geological time? *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369, 835–841
- Zalasiewicz, J., Williams, M., Steffen, W. and Crutzen, P. (2010). The new world of the Anthropocene. *Environmental Science and Technology* 44, 2228–2231