

「河川から海洋に至る N, P, Si 輸送の連続性の意義」

独立行政法人 国立環境研究所 水圏環境研究領域 海洋環境研究室 原島 省

本資料は、国立環境研究所地球環境センターニュース (2000, vol.10-7), および同センターウェブサイト (<http://www-cger.nies.go.jp/cger-j/c-news/vol10-7/cont10-7.html>) に「シリカ欠損に関する地球環境問題 - SCOPE, IGBP/LOICZ 共催ワークショップ開かれる - 」という題名で掲載されたものをもとに作成したものです。その後、同ワークショップの第2回目がベトナムで開催されたり、研究のほうも進展があったりしましたが、その部分は研究集会時に口頭で報告させていただきたいと思います。

1. はじめに

人間活動の増大は、窒素、リン、有害化学物質など多くの物質の環境に対する負荷を増大させ、それらは最終的に海に流入する。ところが、中には人為影響でかえって陸からの供給が減ってしまう物質もある。海域で重要な役割を果たしているシリカ(ケイ酸: SiO_2)がそうである。主な原因としては、世界的な人口増加がダム建設などの水利用形態の変化をもたらし、このため自然に溶出してくるシリカが海に来るまでに「落ちてしまう」ことが一因であると考えられている¹⁾。この問題が、窒素、リンの負荷増大とともに、地球環境問題として重要視されはじめた。

SCOPE(注1)とIGBP-LOICZ(注2)は、この問題に関するワークショップを、1999年10月3～5日にスウェーデンのリンチェピン市で共催した。概要については、ウェブサイト"SCOPE-Si Workshop Home Page, <http://data.ecology.su.se/scopesi/scopesi.htm>" で参照できる。参加者は、世界各国からの海洋学、陸水学、システム生態学等様々な分野の50名ほどの研究者である。日本からは筆者1人であったが、地元スウェーデンが13名のほか、ベトナム2名などアジア地域から招待された参加者が意外に多かった。本報告では、このワークショップの議論の内容と合わせ、これに関連した研究やモニタリング及び過去のデータから得られた知見について述べる。

2. 地球規模のケイ素の循環

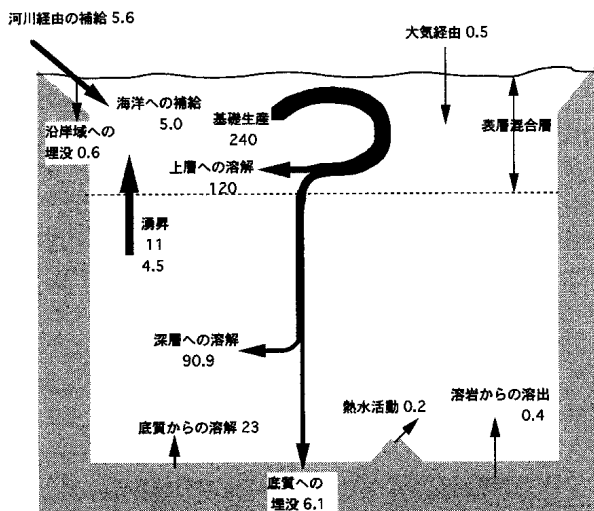
本来、シリカは地殻を形成するありふれた元素である。雨水や河川水が岩石のケイ酸塩鉱物に接触すると、その風化作用でシリカあるいは溶存ケイ酸($\text{Si}(\text{OH})_4$)の形で溶け出し、最終的には海洋に入ってくる。

海洋でのシリカの役割は非常に大きい。「魚とはケイ藻である」というのは、ある著名な海洋生態学者の言であるが、海洋の食物連鎖が主にケイ藻による基礎生産(光合成)から出発することを、簡潔に表現している。これにならえば「日本人は稲とケイ藻であるが、戦後は小麦と牧草に変わりつつある」といえるかもしれない。

もうひとつ大事なことは、シリカからはガラスができることである。この透明な素材を細胞の殻として利用することで、水惑星の環境に最大限に適応したのが、ケイ藻類である。彼らは、二酸化炭素、リン酸、硝酸などを吸収し、日光をよく通すカプセルの中に葉緑体をそなえ、効率よく光合成を行って

すみやかに増殖する。ケイ藻が現れたのは中生代で、地質年代的にはむしろ新参者と言える。ところが増殖効率が高いために、以前から生きていた先輩格のシアノバクテリアや、その他の微細藻類を凌駕してしまった。

ここで、図 1(Treguer ら²⁾ のレビューより引用)を参考に、地球規模のシリカの循環量の推定をみてみよう。外洋全体のサイクルとしては、図中央に示すように、溶存態のシリカが基礎生産として固定されて、有機物となり沈降する。この作用が生物ポンプと呼ばれ、海洋の二酸化炭素吸収をも担っている。これらの有機物のかなりの部分は再度溶解し、栄養塩として湧昇してくる。このような全外洋の循環量は年間 240 テラモル(10^{12} モル)と見積もられている。



河川	期間	Si (μ M)	N (μ M)	P (μ M)	Si:N	Si:P
流域が自然または準自然状態						
アマゾン河	Before 1972	187	3.2	0.4	58.4	468
	May-June 1976	111-121	7-11	0.3-0.75	12.9	221
マッケンジー河	1981-83	143	7.14	0.19	20.0	752
ユーコン河	1978-85	275	8.35	0.35	32.9	786
ザイール河	Nov. 1976	161	7.3	0.72	22.1	224
	May 1978	171	5.9	0.89	29.0	192
流域が既開発						
ミシシッピ河	1981-87	108	114	7.7	1.0	14
ゴア河	1981-84	120	147	4.6	0.7	26
ライン河	1976-78	130	310	14	0.4	9
セーヌ河	1976-82	120	372	20	0.3	6
中国の大川						
揚子江	June 1980	100-105	65	0.5-0.9	1.6	146
黄河	August 1986	128	64	1.1	2.0	116

図 1 シリカ循環量の再評価 . Treguer ら(1995)²⁾より作成 . 1 テラモル Si は約 0.028 ギガトン(10^9 トン)Si となる。

表 1 世界の大規模河川の窒素, リン, シリカ濃度(Vörösmarty ら⁹⁾ の総説より引用)。

これに対し、陸の風化作用から河川經由で年間 5.6 テラモルほどが海に補給される。このうち、0.6 テラモルが内湾や陸棚に取り込まれ、残りの 5.0 テラモルが外洋のサイクルに加わる。従って、外洋の循環量に対して、40 ないし 50 分の 1 程度が陸域から補給されることになる。ただし、これで外洋のシリカ濃度がどんどん増えていくということではなく、ほぼこれにつりあう量が海底に堆積して珪藻土となり、最終的には堆積岩となる。

3.河川によるケイ素補給の減少

ここで重要なのは、陸域から流入する 5.6 テラモルである。これがどうも減りつつあるらしいのである。表 1 は、世界の主要河川のシリカ(Si)、窒素(N)、リン(P)の濃度を示したものである。ユーコン川(アラスカ)や過去のアマゾン川など、流域がほぼ自然状態の河川では、Si が 200 マイクロモル/リットル前後だった。だったというのは、アマゾン川など、開発が進むにつれて Si 濃度が減りつつあるからである。ライン河やセーヌ河など、以前から開発されていた流域の河川では 100 前後に落ちてしまっている。N との相対比で見ると 1 を割っている。中国大陸を流れてくる揚子江や黄河でもこの傾向がある。

このような Si 補給の減少を招いた 1 つの原因として考えられているのは、合計が全世界で 36,000 を越えたといわれるダム(堰高が 12m 以上のものの合計)によってつくられる人造湖の増加である⁹⁾。シリカの補給は、雨水や流水と岩石あるいはケイ酸塩鉱物が直接ふれあうこと、すなわち風化溶出でおこるのであるが、停滞水域の増加はこのプロセスを減らしてしまう。1950 年から 1986 年の間に、世界中の河川の自然現存量の 700 % にあたる量が人造湖に貯留されるようになった。さらに Vörösmarty らは、貯水量/河川流量から算出される時間を、河川水のエイジングという考えで整理した⁹⁾。すなわち、河川が自然状態であれば平均 1 月ほどで海に達するが、堰ができることにより

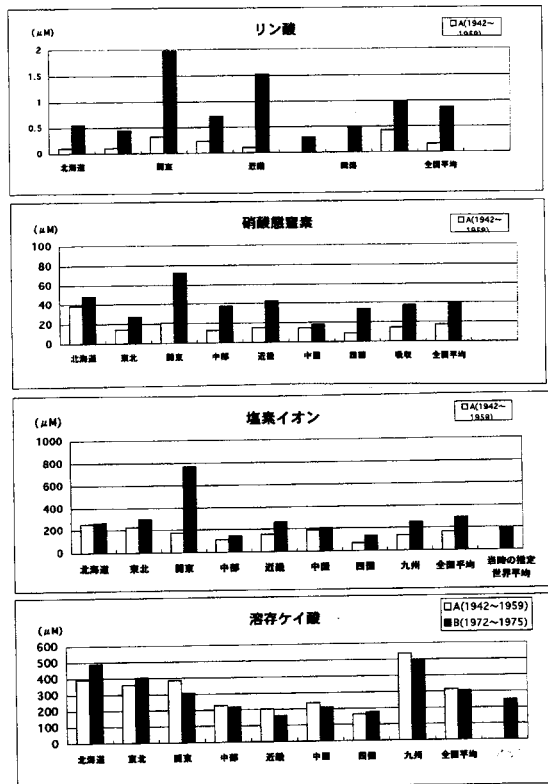


図2 高度成長期の前(1942～56年、計225河川)と後(1972～1975年、計173河川)における日本の河川の各イオン濃度の変化。森井⁶⁾のデータから(財)海洋化学研究所が作成したもの。リン、窒素、塩素などほとんどの成分が増加しているのに対し、シリカのみ減少している。

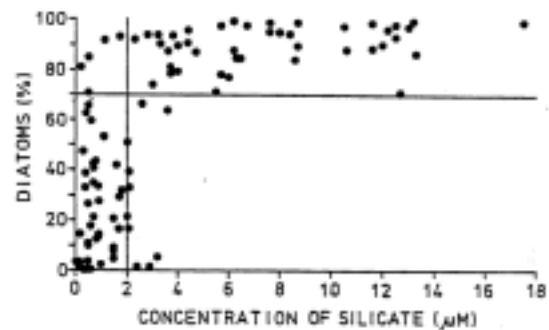


図3 海水のシリカ濃度と植物プランクトン細胞のうちケイ藻が占める割合の相関。Egge と Aksnes³⁾がメゾコズム(隔離水塊) 実験で求めたもの。

河川水が停滞し、海に来るまでに統計上 2 ヶ月ほど余計に年をとるのである。この間に Si が失われたり、他にも様々なことが起こる。さらに、停滞水域に富栄養化が加わると、淡水性のケイ藻が Si を吸収してしまうことも強まり、海に流入する Si の減少はさらに促進される。

このような問題を考える時に不可欠なのは、人間活動の増大と河川水質の変遷を関連づける過去のデータである。表 1 でもわかるように、N や P はともかく、Si の濃度の資料になると非常に限られて

くる。幸いなことに、我が国でも長期変化を伺い知ることのできるデータが採取されていた。小林純(注 3)、森井ふじらのグループは、全国を 8 つのブロックに分け、高度成長期の前(1942～56 年、計 225 河川)と後(1972～1975 年、計 173 河川)に、各河川のイオン濃度を計測していた⁶⁾。このデータによると、リン酸、硝酸態窒素など、おおかたの物質濃度が軒並み上昇しているのに対し、シリカ濃度だけが確かに下がっており、しかもその傾向は関東圏と近畿圏などでよりはっきりしている(図 2)。

4. ケイ素が減ると海で何が起こるか？

N や P が増大し、しかも Si が減少すると、海域にどんなことが起こるのだろうか？通常、海では春季に大規模なケイ藻の増殖(スプリングブルーム)が起こる。これは健康な海の証しであり、これを捕食する動物プランクトンをはじめ、甲殻類、魚さらには人間というような食物網が形成される。初夏になるとケイ藻が N、P、Si を使いつくしてしまって、スプリングブルームが終了する(注 4)。この時、もし窒素やリンが過剰に残っていると、ケイ素を必要としない渦鞭毛藻類などが増殖する。

図 3 は、Egge ら³⁾が、シリカ濃度がケイ藻の占有率にどのように影響するかを、メゾコズム(海域を筒状に隔離して中の生態系の変遷を調べる方法)で実験的に調べた例である。これによればシリカの濃度が 2 マイクロモル/リットルを割ったあたりからケイ藻の割合が減り、他のプランクトンに置き換わることが多いという。これは隔離した水塊での実験であるが、実際の海域ではどのようなになっているのだろうか。

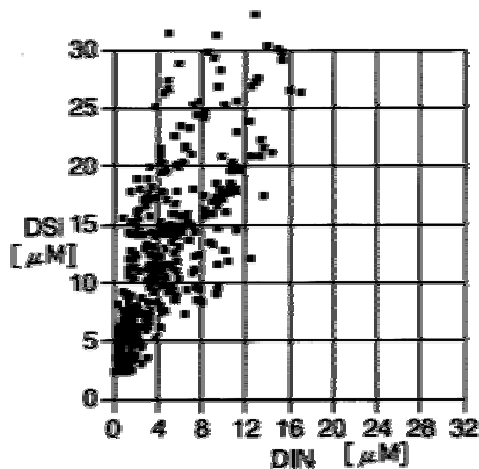


図 4 フェリー利用の海水サンプリングにより瀬戸内海中部の備讃瀬戸(133.75E - 134.15E)で得られた溶存無機窒素(横軸)と溶存ケイ素(縦軸)の相関

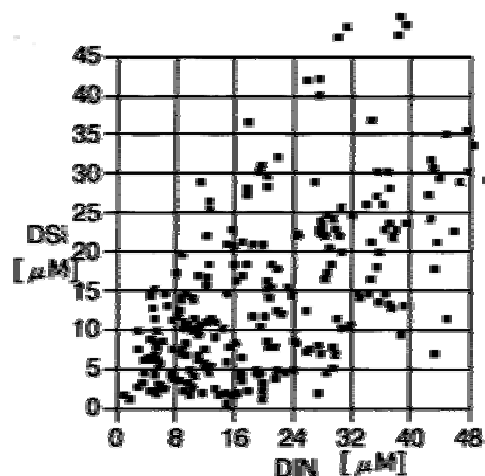


図5 フェリー利用の海水サンプリングにより大阪湾(135.15 以東)で得られた溶存無機窒素(横軸)と溶存ケイ素(縦軸)の相関

国立環境研究所地球環境研究センターでは、1991 年より 2000 年まで瀬戸内海を航行するフェリーにより、栄養塩や植物プランクトン特性の長期モニタリングを継続した^{4),5)}。図 4 は、それらのデータから、瀬戸内海中部の備讃瀬戸付近の溶存態無機窒素(DIN)、溶存態ケイ素(DSi)の相関を示したものである。この海域では、春のブルームで DIN と DSi がともに吸収され、夏以降の生物分解で増加する、という規則的な変化が現れる。そして、グラフの左上半分にデータ点が多いということは、

Si が不足することは少なく、枯渇するのは N であることが推定される。

これに対し、図 5 は大阪湾のデータを同様に表したものであるが、全く対照的である。図 4 とは異なり、Si が枯渇(2 マイクロモル以下を一応枯渇と考える)しても N が過剰に存在するような様子がみとれる。1994 年から 2000 年の全データを 0.2 度の経度幅ごとに平均すると、大阪湾に近づくほど DSi/DIN 比が低くなることがわかった。

5. 内水面でのシリカの変化

大阪湾でなぜこのような Si 欠損、N 過剰が起こるのだろうか？流入する淀川水系を遡って水質の変化をおってみよう。図 6 は、建設省によって毎月計測され、水質年表(毎年刊)⁷⁾として公開されているモニタリング地点の一部と、さきほど紹介したフェリーモニタリングの航路を示している。琵琶湖に流入する野洲川の計測点におけるシリカ濃度は、1983～1998 年の期間で、平均値が 191 マイクロモル/リットルあった。標準偏差は降雨等の影響を反映していると思われるが、だいたい 43 程度であり、かなり安定して 200 前後の濃度のシリカが補給されているといっていよい。

ところが、琵琶湖の湖水ではこれが 20～30 マイクロモル程度に落ちてしまうの

である。野洲川の河口では、平均 31 マイクロモルであったが、これは野洲川の水が湖水で希釈されたことによると考えられる。湖水でシリカ濃度が低くなる原因としては、次の 3 点が考えられる。



図 6 野洲川と琵琶湖野洲川河口の水質モニタリング地点および CGER で実行中のフェリーモニタリングの航路図。水質年表(河川協会編)の計測地点図をもとにして作成したもの。

[1]琵琶湖内部で淡水性ケイ藻によって Si が吸収されてしまう。この傾向は人為起源の N と P の負荷でさらに強まる。

[2]琵琶湖内部でシリカが非生物的な過程で他の物質と結びつき、共沈してしまう。

[3]野洲川水のほうが湖水よりも低温なため、シリカを含む水が水温躍層付近(深度約 15m)に潜ってしまう。

モニタリングのデータからいえることは以下のようなものである。

[1]高度成長期以前から長期的にみると、確かに河川のシリカ濃度が減少していること。

[2]すべての海域ではないが、閉鎖性海域でシリカ/窒素比が小さい海域が存在すること。

[3]風化溶出したシリカは、山地性河川を流れている間は十分な量が存在しているが、停滞水域で減少してしまうこと。

なお、非ケイ藻類の増殖がすなわち赤潮であるということではないが、赤潮は概ね非ケイ藻類の異

常繁殖で起こされることが多いため、赤潮発生情報は非ケイ藻類発生1つの指標になる。水産庁瀬戸内海漁業調整事務所のデータ⁸⁾によれば、備讃瀬戸よりも東にある播磨灘や大阪湾で赤潮の発生する件数が多い。すなわちDSi/DIN比が低い海域と符合する。ただし、渦鞭毛藻類による有害赤潮に限っていえば播磨灘が最も多い。大阪湾は、琵琶湖でDSi/DIN比の下がった河川水を受け取るが、DSiの絶対濃度としては一般的海洋表層のDSiよりも高いため、大阪湾ではケイ藻のブルームを助けるのだろうと考えられる。淀川のDSi/DIN比が低いことは、大阪湾に直接に効いてくるよりも東部瀬戸内海全体の非ケイ藻赤潮を助長するという解釈が成り立つかもしれない。

また、重要なことは、栄養塩組成が植物プランクトン組成を支配する(ボトムアップコントロール)だけでなく、逆に、植物プランクトン(特に増殖スピードの速いケイ藻類)の活動が栄養塩組成を決める(トップダウンコントロール)要素もあることである。溶存態栄養塩は植物プランクトンが吸収し残した量であることも同等である。したがって、単純な解釈は禁物であり、simpleかつrobustな生態系モデルの構築が必要となる。

6. ワークショップでの議論

話は前記のワークショップに戻る。ここでは、plenary sessionはなく、数人の代表者による基調講演とグループ議論、全員による議論とレポート草案作成に割り当てられた。筆者も前述の知見をアブストラクトとして提出しておいた。驚いたことは、2人の基調講演者が事前にホームページでこれを見て引用してくれたことである。オランダ海洋研究所のProf. Van Bennekomは、「琵琶湖はダム湖でなく自然の湖であるが、シリカ濃度が山地性河川で200マイクロモルあるのに、湖水では1桁低くなることはspectacularである。」と述べた。また、地球環境における河川流入の役割を永年研究してきた、アメリカのProf. J. D. Millimanは、「日本の各地域の長期変動データによって、シリカが減少していることが示されたが、塩素イオン増加と相関があることもデータの信頼性を示している。」とコメントしてくれた。

基調講演の後、全員がWG1「河川の生物地球化学的過程」、WG2「沿岸海域の水質と生態系の関連」、WG3「シリカ変動と炭素循環」の3つのワーキンググループに別れて議論を行った。筆者が加わったWG2の議論内容は、主に以下のようである。

Si/(N, P)の減少と関連するケイ藻類→非ケイ藻類の遷移については、北海南部、黒海、日本の沿岸海域、五大湖やデンマークの河口域などで確認されているが、データの裏付けは十分とはいえない。また、海洋の擾乱の影響でシリカ減少が隠されてしまうことがあるので、純粹に陸域の影響をみることが必ずしも容易ではない。また、これまでのケイ藻の生活史や季節サイクルについては、主に温帯での知見に基づいているが、今後は熱帯・亜熱帯地域における挙動を研究すべきだ。

その後、再び全員が集合して、それぞれの議論報告と全体討論になった。WG1では、化学平衡から考えて、全くの自然状態ではシリカの濃度はどのくらいになるはずか?(人為影響分を理論的に評価できるか?)の議論も行われたが、結論にまでは至らなかったようである。

WG3でもいろいろな結果が紹介されたが、ケイ藻といっても善玉ばかりでなく、近年カナダ大西洋沿岸で有害なケイ藻が出現している、という話が興味深かった。

なお、このワークショップの第2回目は、2000年9月にベトナムのNha Tran市で開かれた。欧米諸

国が、自国以上にアジアにおいて水環境問題が最重要課題であると考えていることが読み取れる選択である。

7. まとめ

シリカに関する事柄はこのような古くて新しい問題であり、降雨や河川のプロセスが関連しているため、気候変動や酸性雨、ひいては、人口問題や世界中の河川事業の総量をどうすべきかなど、社会経済部門の問題等とリンクしてくることもあると思われる。

一方、環境省の地球環境研究総合推進費により、平成 14 年度からのプロジェクトとして「グローバル水循環系のリン・窒素負荷増大とシリカ減少による海洋環境変質に関する研究」(担当機関: 国立環境研究所、水産総合研究センター、信州大学、滋賀県立大学、岡山大学、九州大学) が開始されているので、逐次知見も充実させてゆく予定である。

このような問題を議論するためには、過去および現在進行のモニタリングによる時系列データに負うところが大きい。当方の定期航路モニタリングに協力していただいている、関西汽船株式会社と大阪商船三井株式会社、河川モニタリングを管理しておられる建設省河川局及び(社)河川協会、貴重なデータを提供していただいた、水産庁瀬戸内海漁業調整事務所および(財)海洋化学研究所に深謝する次第である。

(注 1) SCOPE: Scientific Committee on Problem of Environment. すなわち「環境問題科学委員会」のこと。ICSU(国際学術連合)の下に設けられ、環境問題に関する科学面からの取りまとめや、行政施策への勧告などを行っている。

(注 2) LOICZ: Land Ocean Interactions in the Coastal Zone. すなわち「沿岸海域における陸海相互作用研究計画」のことであり、IGBP(国際地球圏生物圏研究計画)の一環としておこなわれている。

(注 3) 小林純先生は岩波新書「水の健康診断」(1971)を著されており、ご存じの方もおられると思う。

(注 4) プラクトンは、無機元素を吸収して光合成を行うが、その際、おおそ

$C:N:P(Si)=106:16:1(:16)$ というレッドフィールド比と呼ばれる比率に従って各元素が取り込まれる。シリカの殻を作らない微細藻類には Si の比率はあてはまらず、また Si の 16 という数値についても、ケイ藻の種によって若干差異がある。陸水や沿岸海域のケイ藻では、より大きな数値を示す傾向があると考えられる。

参考文献

- 1) Ittekkot, V., Humborg, C. and Schäfer, P. 2000: Hydrological alterations and marine biogeochemistry: a silicate issue?, *BioScience* **50**, 776-782 (2000).
- 2) Tréguer, P. *et al.* 1995, The Silica Balance in the World Ocean: A Reestimate, *Science*, **268**, 375-379.
- 3) Egge, J. K. and Aksnes, D. L. 1992, Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition, *Marine Ecology Progress Series*, **83**, 281-289.
- 4) Harashima, A. *et al.* 1997, Monitoring algal blooms and related biogeochemical changes in the adjacent seas of Japan, in Kahru, M. *et al.* (eds.) *Monitoring algal blooms*, Springer, pp.85-11.

- 5)原島 省, 功刀正行(編) 2000: 「フェリー利用による海洋環境モニタリングおよび関連研究に関する総合報告書」地球環境研究センター CGER M006-2000 180 ページ.
- 6)森井ふじ 1991, 水圏無機成分の分析とともに、海洋化学研究, 5, 34-52.
- 7)建設省河川局 (社)河川協会, 水質年表(毎年刊).
- 8)水産庁瀬戸内海漁業調整事務所, 瀬戸内海の赤潮(毎年刊).
- 9)Vörösmarty *et al.*, 1995, The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world, *Ambio*, 26, 210-219.
- 10)Vörösmarty *et al.*1998, Drainage basins, river systems, and anthropogenic change: the Chinese example, Galloway *et al.* (eds.) 1998, *Asian Change in the Context of Global Climate Change*, Cambridge Univ. Press, pp219-244.