



Vol. 459 No. 7245
21 May 2009

五次元でのデジタル記憶：DVDサイズのディスクに1.6テラバイトをつめ込む方法

DIGITAL STORAGE IN FIVE DIMENSIONS: How to cram 1.6 terabytes onto a DVD-sized disk

光記憶デバイスにより多くのデータをつめ込むため、材料科学では記録媒体に、文字どおり「次元を追加する」方法が探索されてきた。今回、スウィンバーン工科大学（オーストラリア）の研究グループが、記憶容量を数桁増やす可能性のある五次元光記録技術を開発した。追加された次元は、光の波長と偏光であり、おなじみの3つの空間次元と合わせると1ポリウム内で実に五次元の記録が実現され、その結果、DVDサイズのディスクで1.6テラバイトの理論容量が得られる。この新システムは、ポリマー層に埋め込まれた金ナノロッド基材の表面プラズモン共鳴（SPR）によるフォトサーマル・リシェイピング（photothermal reshaping）を使っている。クロストークのない読み出しは、二光子発光によるものである。今回の技術は、セキュリティー・パターンングや多重光記憶にすぐにも応用可能である。 [Letter p.410 参照](#)

生化学：Na⁺、K⁺-ATPアーゼの構造

Na⁺、K⁺-ATPase structure

Na⁺、K⁺-ATPアーゼは、ATPによって駆動されるイオンポンプで、動物細胞の細胞膜を挟んでナトリウムおよびカリウムイオンの濃度勾配を作り出す。ナトリウムイオンが細胞から排出される一方で、カリウムイオンは細胞に取り込まれ、神経細胞での活動電位の発生など、多くの重要な過程で使われる濃度勾配が作られる。今回、サメ直腸腺由来で、ヒトのものとの相同性が非常に高いNa⁺、K⁺-ATPアーゼの結晶構造が、2.4オングストローム分解能で決定された。この構造は、タンパク質の作用機構の多くを詳細にわたって解明するのに役立つ。それに加えて、強心配糖体はこのナトリウム・カリウムポンプの阻害剤なので、心臓病の治療法の解明にもかかわってくる。

[Letter p.446 参照](#)

植物：ターゲットは植物遺伝子

On target: plant genes in play

作物の収量向上および病害抵抗性の遺伝子操作による改良は、選択的に遺伝子を修飾する効率的な方法が存在しないため、範囲が限られていた。目的に合わせて設計したジंकフィンガーヌクレアーゼを使う、ジंकフィンガータンパク質は、この不足を補うものとなりそうだ。ジंकフィンガーヌクレアーゼは人工キメラタンパク質で、細胞のDNA修復装置がもつ天然の認識機構により、標的の遺伝子座に配列特異的な二本鎖DNA切断箇所を作り出す。今回、2組の研究グループがこの新しい技術をうまく使っ

た研究を報告している。Shuklaたちは、トウモロコシの遺伝子*IPK1*の修飾により、この重要な作物に除草剤に対する耐性を導入し、同時にフィチン酸代謝を変化させた。Townsendたちは、タバコの*SuR*遺伝子座を標的として、除草剤イミダゾリノンおよびスルホニル尿素への抵抗性を与えることに成功した。この方法では遺伝子ターゲティングが高頻度で起こるので、植物の内在遺伝子を修飾する際の定番的な手法となるかもしれない。

[Letters pp.437, 442, N&V p.337 参照](#)

宇宙：火星の水は冷えても凍らない

Martian water runs cold

観測によれば、火星地形の特徴の多くは液体の水によって作られたように見える。一方で、初期火星についての気候モデルからは、火星表面の全球平均気温が0℃以上になることはめったになかったという結果が得られ、両者の折り合いはうまくつけられていない。Fairénたちは、この矛盾を解決できそうな説を提案している。彼らは、火星探査機の着陸地点から得られたデータに表れているとおりに、玄武岩の風化作用で生じた化学組成を設定して、火星での流体の凍結や蒸発過程をモデル化し、風化作用によって溶質を含むようになった流体は、0℃を相当下回る温度でもかなりの割合が液体状態のままであることを見いだした。このことは、我々が見ている火星表面の地形が、塩分を含む液体の水の流れによって削り出された可能性を示唆している。

[Letter p.401 参照](#)

地球：「爆撃」に耐えた冥王代地球上の生命

Life on a hostile Earth

41億年前から38億年前にわたる期間は、地球の環境条件はかなり極端なものであったろうと予想されている。月の地殻の試料、隕石やほかの太陽系物質から得られるデータはすべて、この期間が、地球やほかの内惑星がすさまじい衝突を被った、後期重爆撃期として知られる時期であったことを示している。初期地球の生息環境が繰り返し破壊されたことはほとんど確実であり、生命は生き残れなかっただろうと考えられている。だが実際は、この爆撃が年代の若い地球に及ぼした熱的影響はよくわかっておらず、この分野ではさまざまな推測が行われている。O AbramovとS Mojzsisは、後期重爆撃期に地球のリソフェアに衝突がもたらした熱的影響を調べるために構築した計算機モデルから得られた結果について報告している。地球の生命居住可能領域から生命体が完全になくなったとする説得力のあるシナリオは見つからなかった。そして、リボソームRNAの祖先から得られた、地球の生命が好熱性細菌あるいは超好熱性細菌から生じたことを示す証拠は、今回のモデルが示唆する広範囲にわたる熱水活動と一致する、と彼らは結論している。

[Letter p.419, N&V p.335 参照](#)

ナノテクノロジー：複雑になったナノ材料

Nanomaterials get complex

ナノテクノロジーの重要な目標は、プログラム可能な自己集合によって複雑な三次元ナノ構造体を形成することである。構成要素としてDNAを用いることで、二次元デザイナー構造体や特定の三次元構造体を作製できる段階にまで合成技術は進展してきた。Douglasたちは、DNA折り紙技術を改良して、どのような形であれ、作りたい三次元物体のほとんどすべてを、さまざまなDNAらせんの位置を巧妙に制御しながら、10～100ナノメートルのスケールで作製できるようにしたことを報告している。この合成法では、ブリーツ構造をとるストランドの表面にDNAらせんが並べられ、ハニカム状の三次元構造体に組み立てられる。さまざまなストランドはリン酸基を介して結合している。この方法では、複雑な物体を作製できるが、組み立てに時間がかかる。しかし、ナノメートルスケールの形状をもつカスタムデバイスを組み立てる方法もあり、これは、四角ナットや細長い穴のあいた十字架、ワイヤーフレームでできた二十面体などのさまざまな形の物体の組み立てによって実証されている。

[Letter p.414, N&V p.331 参照](#)



Vol. 459 No. 7246
28 May 2009

生物医学のスーパーモデル誕生：生殖細胞系列での遺伝子伝達 がみられるトランスジェニック非ヒト霊長類

BIOMEDICAL SUPERMODEL: Germline transmission in a transgenic non-human primate

トランスジェニック技術による遺伝子操作を行いやすい非ヒト霊長類モデルは、疾患機構や再生医療、遺伝子治療などについての生物医学的研究に非常に価値があると考えられる。日本の7つの研究所による研究チームが、コモンマーモセット (*Callithrix jacchus*) を用い、トランスジェニック非ヒト霊長類を作出した。このトランスジェニックコモンマーモセットに組み込まれた導入遺伝子は、生殖細胞系列を介して次代に伝達され、子での発現がみられた。この研究では、増強型緑色蛍光タンパク質 (EGFP) を導入遺伝子として10の胚に導入している。5匹のトランスジェニックマーモセットのうち4匹の新生子組織でEGFPが発現し、残る1匹では胎盤で発現がみられた。2匹では生殖細胞に導入遺伝子の発現がみられ、1匹は健康なトランスジェニック新生子の父となった。

Article p.523, N&V p.515, Editorial p.483, News p.492 参照

圏の大きな炭素供給源となりうるほどの喪失速度であることがわかった。

Letter p.556 参照

生理：新しい化学受容器ファミリー

A new chemosensor family

哺乳類の嗅覚受容体としては、におい受容体、微量アミン関連受容体、1型および2型鋤鼻受容体スーパーファミリーの4種類が現在までに知られている。今回 Rivière たちは、マウスの鋤鼻感覚神経に発現する、もう1つの新規嗅覚受容体ファミリーを同定したことを報告している。このファミリーは、ホルミルペプチド受容体関連遺伝子ファミリー (FPR) の5つのメンバーにコードされている。FPRのメンバーは、これ以外では感染に対する免疫細胞応答を仲介することで知られており、FPRを発現する細胞は病気や炎症に関連するリガンドに反応する。こうしたリガンドは尿中に排泄されるので、FPRは個人の健康状態を感知している可能性が考えられる。 Letter p.574, N&V p.521 参照

宇宙：系外惑星の位相を見る

Exoplanetary phases seen

ガリレオが最初に金星の位相変化を観測して、太陽系の幾何学的構造を明らかにしてから約400年が経つ。今回、ホットジュピター CoRoT-1b という系外惑星の位相を可視光で観測した結果が初めて報告された。CoRoT-1bは、系外惑星観測衛星 COROT (CONvection ROTation and planetary Transits) によって発見された最初の惑星である。COROTから得られた可視光データは軌道周期36回分に相当し、その解析結果から今回、CoRoT-1bの常に夜側の半球が完全にまっ黒であることが示された。昼側のフラックスは、親星からの入射光のわずかな部分の反射だが、可視光での位相曲線を支配している。これは、可視波長におけるこの惑星の位相変化が、太陽系の内惑星でみられるものと似ていることを意味している。 Letter 543 参照



細胞：細菌が乗っ取る腸上皮

Bacterial hijack

腸の上皮は、細菌が感染すると迅速に自己複製を行って、基底膜からはがれ落ちる。この過程は病原体に対する防御システムとなっているのだが、それにもかかわらず、多くの腸病原性細菌は腸上皮に定着する。今回、病原性細菌が宿主のこの防御法を回避する仕組みが明らかになった。赤痢菌の毒性因子 OspE (ほかの多くの腸病原性細菌にもみられる) が、インテグリン結合キナーゼに結合することにより、宿主細胞のマトリックスとの接着を強化するのである。それによって上皮の剥離が抑制され、腸上皮への細菌の定着が促進されるらしい。この知見からすると、OspE 因子によるインテグリン結合キナーゼ乗っ取りを阻止する小型の分子があれば、腸への細菌感染を防ぐのに効果があるかもしれない。 Letter p.578 参照

医学：自閉症にかかわる遺伝子変異

Susceptibility to autism

自閉症スペクトラム障害 (ASD) は、言語的コミュニケーションと社会的相互作用の障害を特徴とする、神経系発達障害および神経精神学的障害であり、この疾患への遺伝子の関与を示す証拠がいくつか得られている。この疾患は臨床的にも遺伝的にも複雑であり、それが疾患感受性因子の同定を難しくしている。しかし今回、互いに関連する2つの研究により、遺伝の関与が確認された。まず、全ゲノム関連解析から、自閉症と強い相関を示す6個の一塩基多型が明らかになった。これらの変異は神経細胞接着

分子 (カドヘリン9および10) をコードする2つの遺伝子の間に位置しており、ASDの発症に関係している可能性がある。もう1つの研究では、コピー数多型のスクリーニングにより、ASDの小児患者で2つの主要な遺伝子経路に生じている遺伝的多型が見つかった。この2つの変異は、以前の研究で神経疾患への関与が示されているユビキチン経路内と、神経細胞接着分子をコードする遺伝子内に生じている。

Article p.528, Letter p.569 参照

環境：永久凍土からの炭素放出

Permafrost carbon release

永久凍土の生態系には大気中のほぼ2倍の炭素が含まれており、永久凍土の土壌深くに蓄積されている大量の炭素は、温暖化しつつある地球に放出されれば気候変動に対する正のフィードバックとなる可能性がある。永久凍土の炭素プールの大部分は、何千年もかけて蓄積された「古い」炭素だが、永久凍土の土壌からの炭素放出速度はよくわかっていない。Schuur たちは、アラスカの長期観測地点で得た、正味の生態系炭素交換量と生態系呼吸の放射性炭素年代に関するデータを報告している。この観測地点では、1985年以来、永久凍土の温度が直接測定されており、1985年以降の温暖化が確認されている。この研究により、永久凍土の融解に伴って土壌炭素の大規模な喪失が起こっていることが明らかになった。その量は、数十年の間に、植物の生長が促進されて増えた炭素吸収量よりはるかに大きくなり、温暖化した地球では、永久凍土が生物



Vol. 459 No. 7247
4 June 2009

百聞は一見にしかず：顕微鏡がもたらす新たな「神わざ」

SEEING IS ACHIEVING: New miracles from microscopes

今週号の News Features は、最近の顕微鏡技術の進歩によって開かれた、生命体をのぞく新しい「窓」についての一連の報告である。単平面照明顕微鏡 (SPIM) は、生体試料を生きたまま、光シートを使ってスキャンする技術によるもので、細胞生物学やシステム生物学でみごとな成果を挙げつつある。2 番目に取り上げられているオプトフルイディクス (光流体工学) 顕微鏡 (OFM) は、見るのに顕微鏡がいりそうなくらい小さなものだ。そのため、どんなところにもでも携帯可能である。大阪大学の超高压電子顕微鏡 (UHVEM) は、全く新規な使用方法が出てくるというような新技術ではないが、その際立った能力は電子顕微鏡の限界への挑戦を可能にしている。誘導ラマン散乱 (SRS) 顕微鏡は、生細胞内のラベリングされていない分子の画像化に著しく高い能力を発揮する。また、誘導放出制御 (STED) 顕微鏡は、蛍光タグの基本特性と二次光ビームを用いて、従来の光学顕微鏡の限界を超える分解能を実現している。生物学では、この非常に高い分解能をもつ顕微鏡を使う研究者の数が急増中で、順番待ちの列ができるほどだ。

Editorial p.615, News Features pp.629-639 参照

発生：心筋細胞を作り出す

Heart cell generation

心臓は損傷後の再生能力がほとんどないため、新しい心筋細胞の産生に必要な因子の解明には強い関心もたれている。竹内純と B Bruneau は、マウス中胚葉から心筋細胞への分化転換に必要な最小条件を調べ、心臓にある 2 つの転写因子と、BAF クロマチンリモデリング複合体の心臓特異的サブユニットだけで、マウス中胚葉から拍動する心筋細胞への直接分化が起こることを見いだした。さらにもう 1 つの転写因子を加えると、伸縮する心筋細胞への分化が促進され、非心筋性中胚葉遺伝子の発現が抑制された。心臓の細胞分化に対する必要条件が明らかになったことは、治療のための心筋細胞再生という長期目標達成を助けるものとなる。

Letter p.708, N&V p.654 参照

医学：B 細胞リンパ腫と A20 のつながり

A20 link to B-cell lymphoma

今回 2 つの研究グループが、NF- κ B シグナル伝達経路の負の調節因子である A20 タンパク質が、B 細胞リンパ腫の患者でしばしば不活化されていることを報告している。加藤元博たちは、A20 遺伝子を欠損した細胞が免疫不全マウスに腫瘍を形成し、また A20 を再発現させると腫瘍形成が抑制されることを明らかにした。Compagno たちは、A20 が B 細胞リンパ腫の患者の約 30 パーセントで不活化されていることを示している。そしてどちらの研究も、A20 タンパ

ク質が *in vitro* で細胞増殖を抑制し、細胞に自殺を促すことを明らかにしている。

Letters pp.712, 717 参照

地球：南極の氷河形成

The glaciation of Antarctica

約 3400 万年前の急速な全球気候変動のときに、南極氷床が初めて形成された際の仕組みについては、少なからぬ推測がなされてきた。いくつかの証拠は、南極山岳地帯の中央部が初期の氷床が形成された場所であることを示しているが、氷河の形成開始場所である可能性が最も高い地域、つまり現在の氷床の中心にある、氷河に覆われたガンブルツェフ山脈に沿った地域については、現在の氷床地形についての知識が極めて乏しい。2 回のシーズンに実施された氷貫通レーダーによる調査に基づいて、ガンブルツェフ山脈の地形の詳細な測量と分析が今回行われた。データから、最初に河川により刻まれ、氷の動きによりさらに深く彫られた山岳地形が明らかになった。3000 メートルの厚さの氷の下の地形は、典型的な高山峡谷地形がもっと極端になったものに似ており、夏季の平均気温が約 3°C だった 3400 万年以上前に発達したようである。

Letter p.690, Abstractions p.613 参照

遺伝：カンジダ属真菌のゲノム比較解析

Candida genomes compared

カンジダ属真菌の 6 種のゲノム塩基配列が決定され、カンジダ・アルビカンズ (*Candida*

albicans)、海洋性酵母、およびパン酵母のゲノムとの比較が行われた。カンジダ属真菌は、ヒトの日見真菌感染症の最も一般的な原因菌である。ゲノムの比較解析から、病原性をもつ種では遺伝子ファミリーが著しく拡大していることが明らかになった。種間の比較解析によって、遺伝コードの進化や、接合過程および減数分裂過程の構成など、カンジダ属真菌がもつ生物学的特性のほかの側面についても検討できた。

Article p.657 参照

量子情報科学：もつれた振動

Entangled vibrations

重ね合わせと量子もつれは量子力学の特徴であり、通常、電子スピンや光子の偏光などの特性に対して存在することが証明されている。今回、大きなスケールではばねや振り子としておなじみの、力学的振動子の間の量子もつれが実証され、このような難解な現象が、我々の日常でみられる身近な存在に一歩近づいたといえそうだ。Jost たちは、離れた力学的振動子の間の量子もつれを実証した。この系は、異なる位置に保たれている 2 対の原子イオンの振動状態からなる。このような実験から、より大きなスケールの力学的振動子のもつれ状態を生成し、トラップイオンを使った量子情報処理をスケールアップする道が開かれるかもしれない。

Letter p.683, N&V p.653 参照

ナノテクノロジー：ブリンクしないナノ結晶

Nonblinking nanocrystals

半導体ナノ結晶は、単一生体分子のラベリングなど多くの用途に役立っている。しかし、ナノ結晶は「ブリンクする」、つまり連続励起のもとで断続的に点滅するので、応用範囲はあまり広くなりそうもない。ブリンクの原因はまだわかっていないが、ナノ結晶の帯電と関係があるらしい。ところが今回、ZnSe 半導体シェルで覆われたナノ結晶 CdZnSe コア (ZnSe から CdSe へ急激に変化するのではなく、半径方向に徐々に変化していく) を用いることによって、この「ブリンク」問題が解決された。このナノ結晶は、帯電しているにもかかわらず、連続的に発光する。理論モデルからは、この原因は、なだらかな閉じ込めポテンシャルによって電荷と励起電子間の相互作用の効率が低下することにあると考えられる。こうして作られたナノ結晶はまだデバイス対応ではないが、今後の開発によって、生体画像化技術やレーザー、太陽電池など、さまざまな用途に使えるようになりそうだ。

Letter p.686, N&V p.649 参照



Vol. 459 No. 7248
11 June 2009

月の周りの環：新世代の日食観測

RING AROUND THE MOON: A new generation of solar eclipse research

太陽コロナについて有意義な観測成果を挙げるのに、もう皆既日食まで待つ必要はない。地上に設置、あるいは人工衛星に搭載したコロナグラフを使えば、コロナの観測は日常的に行えるからだ。しかし J Pasachoff が、Review (世界天文年に向けて執筆依頼され、www.nature.com/nature/focus/yearofastronomy/ にまとめられているシリーズの 1 つ) で述べているように、新世代の日食研究は、空間的、時間的、また宇宙空間では達成しがたいスペクトル分解能の領域で、人工衛星による太陽の観測と、地上からの観測を結びつけている。宇宙空間に打ち上げられる太陽望遠鏡の数は増えつつあるので、最終的には、地上からの観測に完全に取って代わるかもしれない。しかし、今後 6 億年ほど経って太陽から月までの距離が離れ、月の円盤では小さすぎて太陽光を完全にさえぎれなくなるまでは、日食は地球から見られる最高のショーの 1 つであり続けるだろう。表紙は、2008 年 8 月 1 日にモンゴルで観測された皆既日食の際に撮影された、太陽の東縁の写真 25 枚から合成されたものである。

[Review p.789 参照](#)

の応答の表現としては不完全であることが最近の研究で示唆されている。Matthews たちは今回、新しい尺度として、炭素 - 気候応答 (carbon-climate response ; CCR) を提案している。この方法では、単純化した気候モデルや、最近のモデルの相互比較から得られたさまざまなシミュレーション結果、歴史的制約を組み合わせて用いて、排出の時期と大気中 CO₂ 濃度とは無関係に、炭素が 1 兆トン排出されると 1.0 ~ 2.1°C の全球温暖化をもたらすことが示される。この CCR 値は 21 世紀に対するモデル予測と一致する。

[Letter p.829 参照](#)

細胞：ヒストンと白血病の関係

Histones and leukaemia

一部の急性骨髄性白血病 (AML) 患者に認められる染色体転座では、クロマチン結合タンパク質の PHD フィンガーがヌクレオポリリン NUP98 と融合する結果となる。このような融合タンパク質の 1 つが、AML を誘発する強力な腫瘍性タンパク質であることがわかった。PHD フィンガーに変異を導入して、Lys4 がトリメチル化されたヒストン H3 へ結合できないようにすると、腫瘍形成が起らなくなる。NUP98-PHD 融合タンパク質は、クロマチンと結合することで、発生上重要な遺伝子を活性状態にロックしてしまうらしい。したがって、ヒストン修飾の「エフェクター」の脱制御は、腫瘍形成を引き起こす可能性がある。

[Letter p.847 参照](#)

地球：台風で起こるゆっくり地震

An ill wind for slow earthquakes

大地震で発生した遠地震波は、遠く離れたところでもほかの地震の引き金となることが知られているが、大気圧の季節変動は微小地震活動を調節していることが明らかになった。C Liu たちは今回、気象条件が引き金となった地震という、意外な地質現象について報告している。台湾東部でポアホール型ひずみ計で得られたデータから、継続時間が分から秒ではなく、時間から分に至る地震現象である「ゆっくり地震」が、台風が引き金となって起きることがあるのがわかった。数値モデルでは、台風に伴って気圧が低下すると、高い応力がかかって破壊条件に近い断層がごくわずかに緩むことが示唆されている。台湾東部は圧縮変形が極めて大きい、大地震は少ない。この地域では、応力のかかった地域が、ゆっくり地震が繰り返して起きることによって分割され、長く連続した地震破壊が必要な大地震の発生が抑えられている可能性がある。

[Letter p.833 参照](#)

免疫：ヤツメウナギにもある 2 つの免疫系

Double immunity in lampreys

顎をもたない脊椎動物の末裔であるヤツメウナギとヌメウナギの適応免疫系は、その柔軟性という点でヒトに匹敵することから、免疫学者の注目を集めている。ヒトのそれぞれのリンパ球は、1 つの抗原の出現を見越して特有の受容体を発現しており、こうした受容体は V (variable) 遺伝子領域、D (diversity) 遺伝子領域と J (joining) 遺伝子領域から構成されている。一方、無顎脊椎動物は、ロイシンリッチリピートからなるタンパク質部分が、柄にあたる不変部分を介してリンパ球表面につながれた構造をもつ可変性リンパ球受容体を用いている。新たな研究により、ウミヤツメではヒトとの類似点がさらに多いことが明らかになった。ウミヤツメは区画化された適応免疫系をもっており、これには、哺乳類の適応免疫系のサイトカインを分泌する T 細胞や抗体を分泌する B 細胞に似た細胞が含まれる。このことは、T 細胞および B 細胞に似た細胞系列の間の分岐が早くに起こったことを示しており、つまり、ウミヤツメの免疫系はヒトの免疫系の前身にあたるか、もしくは、ヒトの免疫系と並行して進化したということになる。

[Article p.796, N&V p.784 参照](#)

宇宙：惑星が地球に衝突する可能性

Well did you ever...

太陽系内の惑星軌道が将来どのように進化

するかを数値計算によりモデル化するには、大規模なスケールの計算機能力を必要とする。それは主として、軌道運動するさまざまな質量の天体の相互依存関係によってもたらされる、カオス的要素のためである。J Laskar と M Gastineau は、JADE テラフロップ・スーパーコンピュータを使って、50 億年にわたる太陽系の進化に対して 2501 通りのシミュレーション解を得た。そして解全体の 1 パーセントで、水星の離心率が金星または太陽と衝突するまでに十分大きくなることを見いだした。意外なことに、高い離心率を与える解の 1 つでは、その後水星の離心率が減少するに伴って巨大惑星からの角運動量輸送が起き、これが約 33.4 億年後にすべての地球型惑星の軌道を不安定にして、水星、火星、金星のどれかが地球と衝突する可能性があることが示された。

[Letter p.817, N&V p.781 参照](#)

気候：気候 - 炭素応答の新しい尺度

Climate-carbon sensitivity

これまで、人間活動による CO₂ 排出に対する気候の応答を説明し予測する努力は、気候感度、すなわち CO₂ の倍増に伴う平衡温度の変化に注目してきた。この「チャーニー」感度は、1979 年にこの方法を初めて考案した気象学者のジュール・チャーニーにちなんで名付けられたものだが、炭素循環、エアロゾル、土地利用、土地被覆における変化を無視しているため、地球システム全体