

大項目	2	持続可能な社会の実現に向けた地球的課題と国際協力			
中項目	2-2	持続可能な社会の実現と地球的課題			
小項目	2-2-1	世界の自然の大局を理解して地域多様性や地球的課題を考える基礎としての自然地理			
細項目 (発問)	2-2-1-1	自然環境ダイナミクス（地圏・水圏・気圏・生物圏の相互作用）と人間活動の関係は何ですか			
作成者名	須貝俊彦	作成・修正年	2017/2021/2023/2024	Ver.	1.3

## 発問の意図と説明

### 1. 地球規模の自然システムの成立について考えよう

#### ① 生命と地球の共進化

宇宙には、生物が生存可能な星が多数存在すると推定されています。しかし、地球以外に生命を宿す星は見られていません。生命の誕生には海が必要であると考えられています。海をもつ星は、程よい大きさでなければなりません。大き過ぎれば、分厚い大気をまとう木星のように、小さ過ぎれば、水や大気を引き付けられない水星のようになります。また、海をもつ星は、恒星から程よい距離になければなりません。金星のように太陽から近いと暑すぎ、火星のように遠いと寒すぎ、海はできません。地球は、約46億年前に太陽系第3惑星として誕生し、約40億年前に生命を宿し、生命と環境の共進化の歴史を刻んできました。生命活動が環境を変え、環境変化が生物の進化や絶滅を促し、生命と環境が相互に影響を及ぼす関係が続いてきました。今日の「人類の生存を可能にする」自然環境は、地球上での40億年におよぶ生命活動の歴史を経て形成されてきた一方で、人類は、自然環境に適応した身体や社会文化を数百万年かけて形成してきたといえます。

#### ② 自然システムとそれを構成する気圏、水圏、地圏、生物圏の各サブシステム

自然環境は、長い歴史を経て、様々な機能を有するようになったため、その全貌を正しく理解することは容易ではありません。自然環境を構成する個別要素に注目するだけでは、不十分です。自然環境の全体像を知るためには、自然環境を**自然システム**としてとらえる視点が有効です。すなわち、自然環境を**地圏**（固体地球）、**気圏**（大気）、**水圏**（海水・陸水）、**生物圏**（後述のように、生物圏から人間圏を分離する考え方もあります）によって構成されるシステムと見なし、自然システム全体の挙動を、地圏、水圏、気圏、生物圏の各サブシステムの挙動の総体として理解しようとする視点です（図1）。サブシステム間相互作用の実態把握が重要な課題であり、その鍵を握るのは、各サブシステムに出入りする**エネルギー**と**物質**の流れである、といえます。

エネルギーと物質が出入りするシステム（系）を**開放システム**、エネルギーのみが出入する系を**閉鎖システム**、エネルギーも物質も出入りしない系を**孤立システム**と呼びます（図2）。地圏、気圏、水圏、生物圏はすべて開放システムです。図1の薄緑色の太矢印は、各圏間の物質移動を表していて、炭素や水、窒素、硫黄など様々な物質があてはまります。一方、地圏、気圏、水圏、生物圏を包有する自然システム全体は、閉鎖システムとみなされます。まれに隕石が衝突することがあるので、厳密には疑似閉鎖システムです。

自然システム（地球）に出入りするエネルギーの流れを可視化しましょう。太陽の放射エネルギー（太陽放射）は、絶えず地球へ注がれています（図1の赤色の太矢印）。これと等量のエネルギーが地球から宇宙空間へ地球放射として放出され（図1の薄橙色の矢印）、地球のエネルギー収支はゼロになっています。地球放射は、大気温度（気温）が高いほど大きくなるので、エネルギー収支がプラスであれば、気温が上昇し支出を増やし、マイナスならば気温が低下し支出を減らし、収支がゼロになる気温（平衡温度）に落ち着きます。太陽放射に見合った気温になるわけです。ただし、太陽放射が一定であっても、大気中の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）や水蒸気（H<sub>2</sub>O）などの温室効果ガスが高濃度になると、平衡温度は高くなります。これらのガスは、ビニールハウスの透明なビニールのように、太陽放射の流入は妨げず、流出する地球放射を弱めるからです。もしも温室効果ガスが無くなったら、地球は全球凍結すると考えられますので、温室効果ガスは、地球が海を持つために不可欠といえます。ただし、温室効果ガス濃度の上昇は、地球を温暖化させるので、過ぎたるは及ばざるがごとし、です。次に、太陽の放射エネルギーが自然システムに流入後の流れに注目してみましょう。

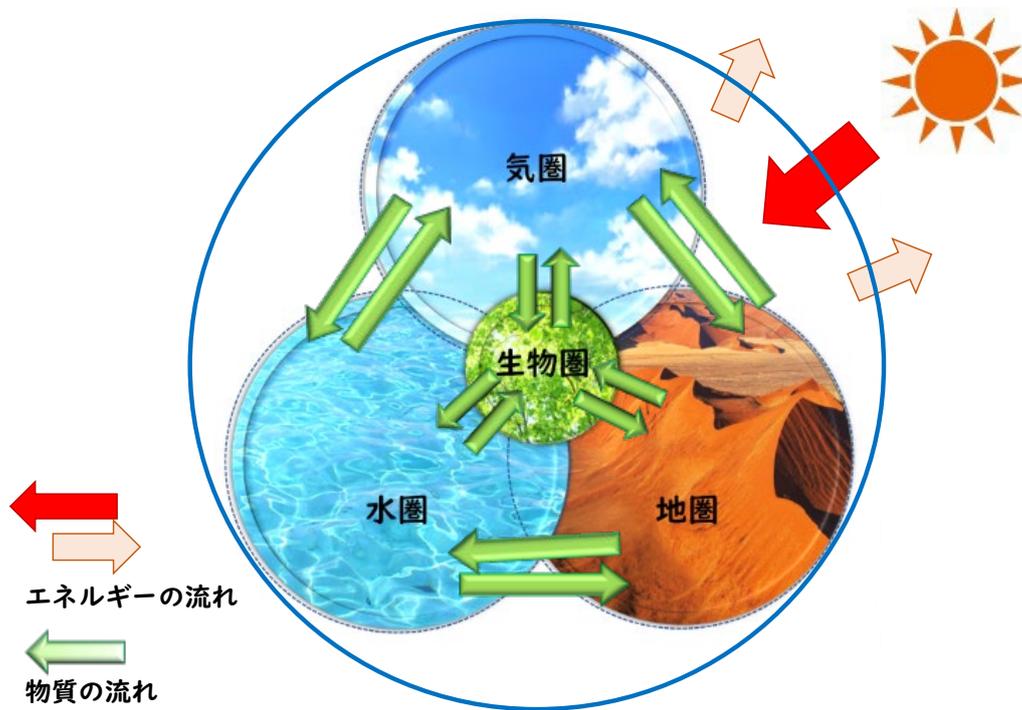


図1 自然システム（地球システム）とそれを構成するサブシステムである地圏、水圏、気圏、生物圏の関係 須貝俊彦作成

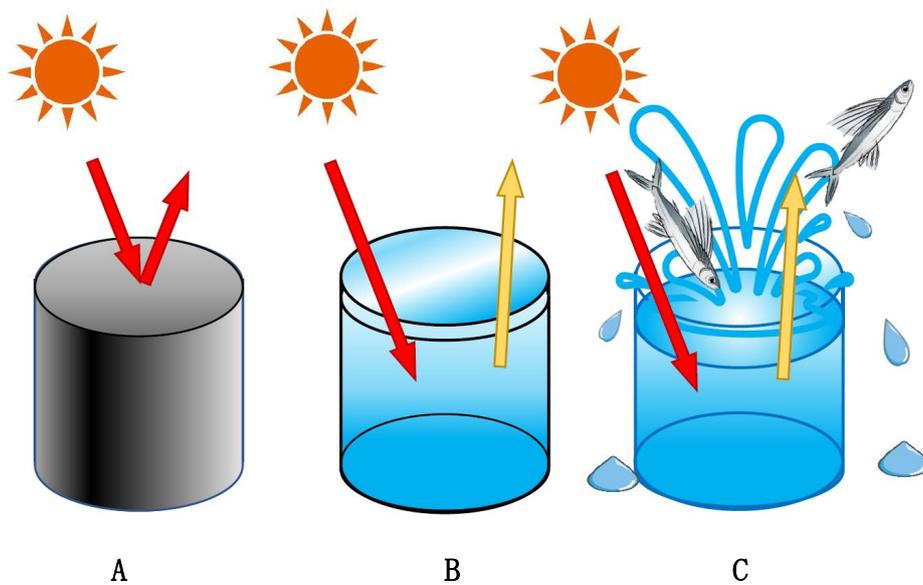


図2 三種類のシステム (系) A. 孤立システム、B. 閉鎖システム、C. 開放システム  
自然（地球）システムは疑似閉鎖システムとみなされる。地圏、水圏、気圏、生物圏や生物個体などのシステムは、開放システムとみなされる。Skinner ほか (2004) を参考に須貝俊彦作成

## 2. 自然システムと自然環境ダイナミクスについて考えよう

### ① 太陽放射に駆動される大気海洋循環

地球はほぼ球体なので、同一面積の地表面が一定時間に受ける太陽放射は、緯度が低いほど高くなります(図 3-d)。その結果、低緯度域では地面や海水面が暖まり、下層大気が熱膨張して低密度になり、上昇気流が生じやすくなります。上昇した大気は高緯度域へ向かって移動しつつ、冷やされて密度が増し、下降気流となって地表付近へ戻っていきます。これを大気の子午線(南北)循環または**ハドレー循環**と呼びます。

一方、地球は自転しているため、コリオリ力という見かけの力が働きます。コリオリ力は高緯度ほど大きくなるため、赤道から北極へ向かう大気は時計回りに、南極へ向かう大気は半時計回りに回転し、中緯度域で赤道とほぼ平行になり、偏西風帯を形成します。一方、ハドレー循環の下降気流は、回帰線から緯度 30 度付近に集中し、**亜熱帯高圧帯**を形成します。亜熱帯高圧帯の高緯度側に、フェレル循環と極循環が形成されます。

図 3-c によれば、低緯度帯と 40~50 度の緯度帯に降水量のピークがあります。それらと、図 3-b の大気循環の上昇流を示す上向き矢印の位置が概ね一致しています。上昇流によって雲ができ、降水が生じやすくなるためです。地圏に出入りする水の収支をみると、低緯度帯と 40~50 度付近ではプラス、亜熱帯高圧帯ではマイナスとなっています。水収支がプラスの場所は森林、マイナスの場所には砂漠やステップがみられます。

今一度、図 3-d をみましょう。太陽放射、地球放射ともに低緯度域で高いのですが、前者の南北傾度がより大きく、全球のエネルギー収支は、低緯度でプラス、高緯度でマイナスとなっています。この差を解消するエネルギー移動(熱輸送)が低緯度から高緯度へ恒常的に生じています。この熱輸送の 1/3 程度を上記述べた大気循環(図 3-b)が担っています。残りの 2/3 程度は、**海洋循環**が担っています。すなわち、海洋表層水が、北(南)半球では時計(反時計)回りに大きな円を描くように、太平洋、大西洋、インド洋を循環することで多量の熱が高緯度側へ運ばれています。大陸の東岸沖を高緯度側へ向かう**暖流**と、大陸の西岸沖を低緯度側へ向かう**寒流**と、赤道沿いを西へ向かう海流が、循環系をなしていることを確認しましょう。

### ② 地熱に駆動されるプレート循環

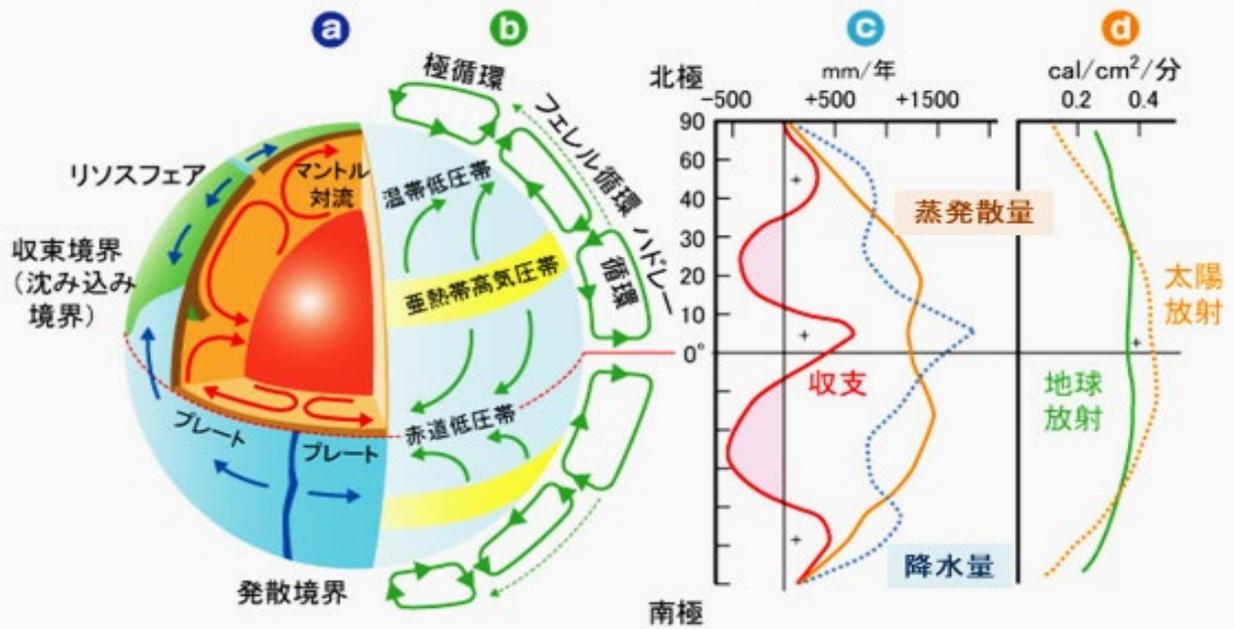
①では太陽放射が大気(気圏)と海洋(水圏)の循環を駆動していることを述べました。他方、地圏環境を特徴づける**プレート運動**は、**マンテル対流**に駆動されています。自然システムが外部から受けるエネルギーは太陽放射ですが、地球内部にも熱源があり、地表へ向かって熱が移動しています。熱エネルギーの流れは太陽放射に比べ、はるかに小さいですが(詳細は次頁)、プレートが年間数~数十 cm の速さで水平移動する原動力となっています。大気循環における上昇流と下降流に相当する流れが、マンテル対流にもあって、上昇部に「広がるプレート境界」が、下降部に「狭まるプレート境界」が位置しています(図 3-a)。深部から湧きあがる熱いマンテル物質がプレート境界を押し広げて新たなプレートをつくり、集まってきて行き場の無くなった古く冷たい高密度のプレートが地球の深部へ戻っていきます。これを**プレート循環**といいます。

### ③ 水循環・岩石循環と地形変化

水収支がプラスの陸域では、余剰の降水は河川水(一部は地下水を経て)となって地圏(地表)を潤した後、海へ戻ります(図 4)。海面から水が蒸発し、水蒸気を含んだ大気が移動し、水蒸気は雲となり、降水となり、その一部が再び河川水になります。このように水は、地球表層を循環し、その一部が河の流れをつくっています。このため無降水期が続けば、河川はたちまち干上がってしまいます。冬雨型の地中海性気候地域の中小河川の多くは夏に枯れます。逆に、豪雨や多量の雪解け水によって河川が増水すると(洪水といいます)、河川水は勢いを増し、上流では谷や斜面を侵食し、多量の土砂を下流へ運搬し、下流域から河口・沿岸海域に土砂を堆積します。こうして河川は地形も変化させます。

堆積した土砂は地下に埋もれ、新たに堆積する土砂の重みで隙間がつぶれて密度が増し、長時間のうちに固結した堆積岩に変わります。堆積岩は、地下深部の高温・高圧環境下で変成岩になったり、溶けてマグマになった後に冷えて固まり火成岩になったりします。これらの岩石は、地殻の隆起によって上昇し、上部が侵食されることで、地表に近づきます。地表付近は水や酸素が豊富で、温度や圧力が低く、地下深部と環境が異なるため、地下深部でできた岩石は、気圏や水圏と接する新しい環境下では、酸素や水と化学反応を起こしたり、重みから解放されて節理ができたりして、変質していきます。これを風化といいます。風化を受けた岩石(岩盤)は、重力や流水などの作用によって容易に侵食されて土砂となり、重力や河川や氷河や風の作用によって運搬され、堆積岩のもとになります。このように、地圏においても、物質は姿を変えながら循環していて、これを岩石循環といいます。岩石循環は、水循環とプレート循環をつなぐ循環で、その速さも中間的です。

## 図と表のページ



**a** プレート運動とマンテル対流 **b** 大気の大循環モデル **c** 水収支 **d** 熱収支

図3 自然環境システムのダイナミクス(須貝 2005 を改変). 太陽放射に駆動された大気海洋大循環とマンテル対流に駆動されたプレート運動が自然環境の地域特性を生み出している。

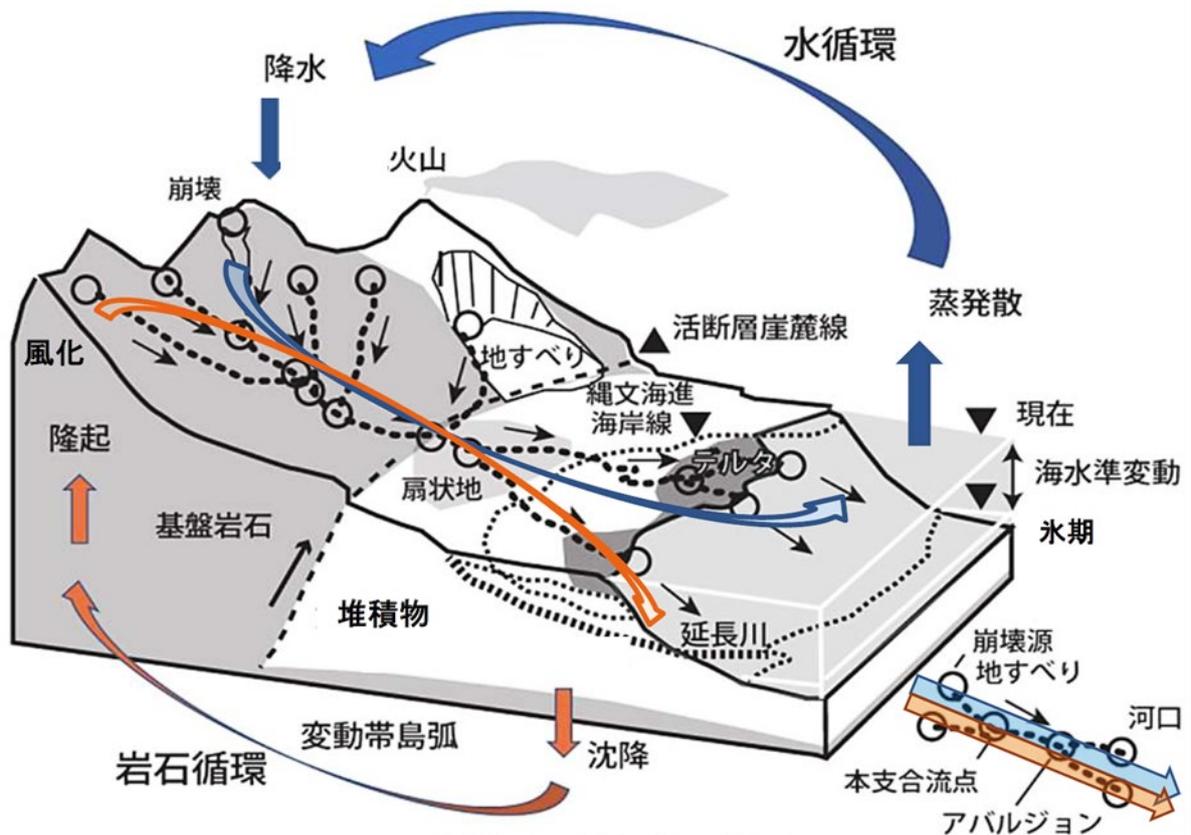


図4 地球表層での水循環および岩石循環とそれらの相互作用による地形形成  
須貝俊彦作成

水と土砂の移動

### 3. 自然システムと人類の関係について考えよう

#### ① 自然システムにおけるエネルギーの流れと地形形成

自然システムの地球表層域におけるエネルギーの流れ (図5) をみると、地熱は太陽放射の1万分の1程度に過ぎないことが分ります。しかし、地熱エネルギーは、地殻変動や地震・火山活動などを通じて、地表の起伏を成長させ、プレートの衝突帯では巨大山脈を形成します。このように地熱エネルギーによる内的営力が作用して形成される大規模な地形は、大地形と呼ばれます。一方、太陽放射は、風・波や河川・氷河による侵食・運搬・堆積作用を通じて、地形を変化させます。このように太陽放射による外的営力が作用して形成される地形は、比較的小規模なので小地形と呼ばれることがあります。

#### ② 太陽放射と炭素循環と人類

図5によれば、太陽放射の約0.1%が光合成に使われています。光合成によって一次生産者が有機物をつくり(炭素固定)、食物連鎖を支えています。また、一部の光合成生産物(木材や生物の死骸など)が起源となって、石炭・石油・天然ガスなどの化石燃料が極めてゆっくりと生成します。人類による化石燃料の消費エネルギーは、光合成に使われる太陽放射の1割程度ですが、化石燃料として新たに地下に蓄えられるエネルギーよりも大きいため、化石燃料は近い将来、枯渇すると予想されています。これを炭素循環でみると、気圏から地圏への移動量は小さく、地圏から気圏への移動(炭素燃焼)量が加速度的に増大し、大気中のCO<sub>2</sub>濃度が上昇しているということになります。炭素を介さずに、太陽放射を直接、あるいは間接に、水力や波や潮汐力や風力などを利用して資源化できれば、CO<sub>2</sub>濃度上昇を抑制しやすくなります。地熱の資源利用も考えられます。

気圏と生物圏の間の炭素移動については、森林伐採を含む土地利用の変化によって、生物圏から気圏への炭素移動量が逆方向の移動量を上回る状態が続いており、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を上昇させる原因となっています。一次的に生物圏に固定された炭素、ほぼ恒久的に地圏に固定された炭素(のもつエネルギー、太陽放射の貯金のようなもの)を人類は多量に消費し、生物圏と地圏から気圏へ炭素を放っているということになります。

#### ③ 狩猟革命、農業革命、産業革命と自然システムにおける人間圏の分化

人間活動が炭素循環に大きな影響を与えるようになるのは、いつ頃からでしょうか。人間活動の総量は「一人当たりの活動量」と「人口」の積によって与えられます。河野(2000)による過去4万2千年間の人口推計によれば(図6)、4万年前に百万人足らずだった人口は、(1)3万8千年前頃、中期旧石器時代から後期旧石器時代への過渡期の**狩猟革命(鋌業革命)**によって数百万人に増えました。石器の良質な材料が得やすくなり、食料を確保し易くなった結果と考えられます。(2)1万~7千年前、新石器時代への移行期の**農業革命**によって、数千万人に増えました。植物の栽培化と動物の家畜化(農牧業)によって、安定的に食料を確保できるようになった結果と考えられます。(3)イギリスで18世紀中葉にはじまった**産業革命**(化石燃料を運動エネルギーに変換する**蒸気機関**の発明を柱とした工業化)を経て、1億人から数十億人に激増しました。工業化の進展による生活水準の向上と死亡率の低下、窒素固定(化学肥料の製造)による農業生産の増大(第二の農業革命と呼ぶことがあります)があいまって、人口が激増していると考えられます。産業革命後は、多量のエネルギーを使えるようになり、大規模な土木工事業や土地開発、企業的農牧業が活発に行われるようになり、地形変化が顕著となっています。沿岸低地の大規模開発は、自然災害に対する新たなリスクの増大を招いています。

人類は、農業革命を経て、光合成による炭素固定機能を能動的に利用するようになり、産業革命を経て、化石燃料から多量のエネルギーを得るようになり、自然システムにおける炭素や窒素などの物質循環を変容させるに至りました。農業革命後、あるいは産業革命後の人間活動の巨大化をもって、人間圏を生物圏から独立させ、新たなサブシステムとして人間活動をとらえようとする考え方が広がっています。生物と環境の共進化による自然システムの変容の歴史は、人類活動によって、新たな段階に突入した、といえそうです。

#### 参考文献

河野 綱果 (2000) 世界の人口第2版. 東京大学出版会

Bloom A. L. (1978) Geomorphology. A systematic analysis of late cenozoic landforms. Prentice-Hall

水谷武司 (1999) 物理地形学概説. 大明堂

Skinner B. J., Porter S. C. and Park J. (2004) Dynamic Earth 5<sup>th</sup> edition. Wiley

須貝俊彦 (2005) 第1章環境のダイナミクス、自然環境の評価と育成. 東京大学出版会

参照 URL (2024年3月参照)

東京大学自然環境変動学分野 HP introduction <http://changes.nenv.k.u-tokyo.ac.jp/introduction/>

## 図と表のページ

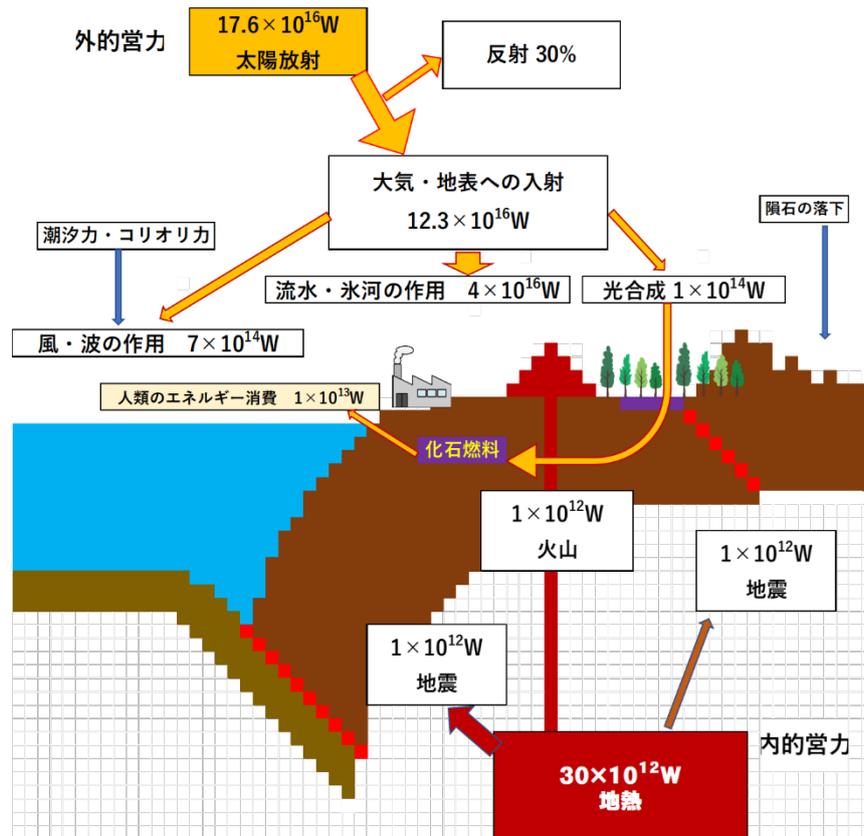


図5 自然システムの特に地球表層域におけるエネルギーの流れ（1年あたりのおおよその値）

（Bloom1978; 水谷武司 1999 を参照して須貝俊彦作成）。太陽の放射エネルギーが外的営力となり、地球内部の地熱エネルギーが内的営力となって地表に作用し、地球表層物質を移動・循環させている。

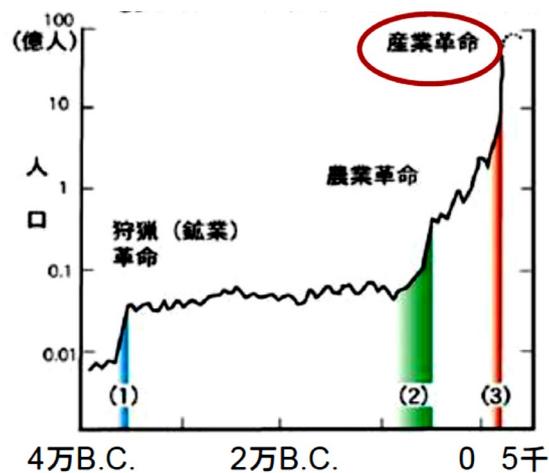


図6 4万2000年前以降の世界人口推計値と人類史上の3大革命

河野稠果（2000）に加筆した須貝俊彦（2005）を一部改変