

6回 地球の物質循環／地球規模の炭素循環・窒素循環・リン循環

動植物の身体の9割以上、ほとんど全部を占めるのは酸素、炭素、水素の三大元素。例えば人体の構成元素は酸素61、炭素23、水素10と、これだけで94%にあたる。これらの三大元素は、植物は大気と土壌中から得られ、人間を含む動物も植物を通して間接的に大気と土壌中から獲得している。

今回は、三大元素の炭素について、また生物の構成元素として重要な窒素とリンについて地球規模の循環を学ぶ。

地球の炭素循環

(一財) 高度情報科学技術研究機構参照

概要

地球の炭素循環は、大きく地球上の炭素循環と海洋中の炭素循環に分けられる。大気中炭素の収支の主要な構成要素は、人間活動からの排出量、大気中の増加量、大気と海洋間の交換量、大気と陸上生物圏との間の交換量である。一方、海洋中の炭素貯蔵量も物理・化学および生物学的な過程を通して、気候のフィードバックにより影響されることが考えられる。

炭素循環とは地球の生態系における炭素の流れであり、生物・大気・陸域・海洋・土壌間の炭素循環に、物理的・化学的・生物学的・社会的な作用が相互に働いている。

石油・石炭など化石燃料の消費や、森林破壊などの人間活動によって大気中に放出される二酸化炭素は、炭素換算で年間約8Gt (Gt: 10億トン)。このうちの約2Gtを海洋が吸収し、約1Gtを森林が吸収、その他の地球規模の吸収が約1Gtあるとしている。そして、残りの約4Gtが大気中に残留すると見積もっている。大気中の温室効果ガスとりわけ二酸化炭素の増加が気候変動を起こすことは疑いない。

(別文献からの図では人間活動の炭素排出量は5.5Gtと算出されている)

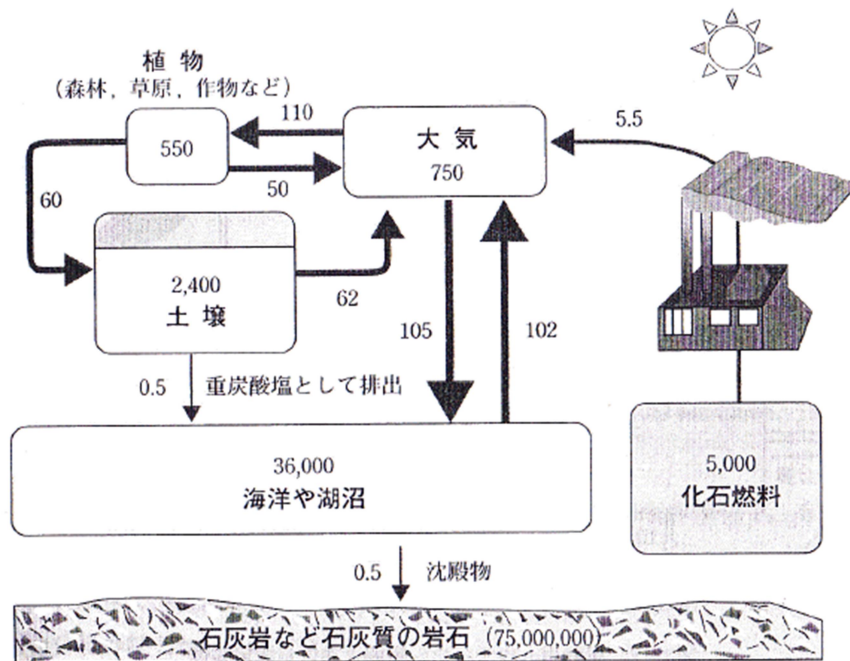


図3-1 地球規模から見た炭素循環 (多くのデータに基づき Brady と Weil が計算したもの、2002a)

大気中CO<sub>2</sub>濃度の現在の測定値と過去数十万年前のアイスコア中のCO<sub>2</sub>濃度の分析値との比較から、周期的な氷河期・間氷期の大气組成と地球の平均気温とは明確な範囲内で変動してきた。しかし、現在はその範囲から明らかに逸脱してしまったことが分かってきた。現在、地球大気のCO<sub>2</sub>濃度は間氷期の最大値より約100ppmv (ppmv：百万分の一体積比) 高い。最近のCO<sub>2</sub>濃度の上昇は、疑うべくもなく人間活動の所産である。

地球全体では、植物が二酸化炭素から有機分子に炭素を取り込む全光合成生産量の30%以上が海洋植物によるもので、残りの光合成量が陸上植物によるものである。年平均では、海産藻類（植物プランクトン）による炭素固定の総量は50Gt/年程度である。大局的にいえば、二酸化炭素は海流と共に地球の自転によって中緯度の辺りで下へ潜り、それが循環してきて赤道の辺りで湧出し、海洋中から大気中に放出される。

南半球では、中緯度の辺りで海洋が大気中の二酸化炭素をよく吸収しているが、北半球では海洋による二酸化炭素の吸収量があまり大きくなく、とりわけ北緯三十度から六十度の辺りでは二酸化炭素が放出されており、これは化石燃料消費の曲線とよく一致している。工業国が北半球の中緯度地方に数多くあることが原因とみられる。

大気中の二酸化炭素の循環経路に関する定量的な把握は、将来の地球環境を予測するためにも重要な課題といえる。なかでも、最大の吸収源である海洋の炭素循環のメカニズムの解明は急務とされている。現在、各国が様々な海域で物質循環研究を実施し、各海域におけるプロセス研究を行っている。

## 地球の窒素循環

動植物の90%以上を占める三大元素を除くと、人間では窒素2.6、カルシウム1.4、リン1.1（生体比）、トウモロコシでは窒素1.46、リン0.2、カリ0.9、カルシウム0.2（乾物比）と、いずれも窒素が最大比を占めている。窒素は容積にして大気中の78%を占めている。

生物はごく一部をのぞいて大気中の窒素を直接には利用できず、「固定された窒素」のみが利用可能である。従って地球上の生命活動にとって微生物を介しての窒素循環は極めて重要である。

窒素は、大気的主要成分として容積で78%を占め、重量では、約380Ttが大気中に存在している。一方、地殻中には、約1400Ttが存在する。この他、動植物の死骸等の堆積物中に400Ttが存在し、海水中に約2Ttが溶存しているものと考えられる。

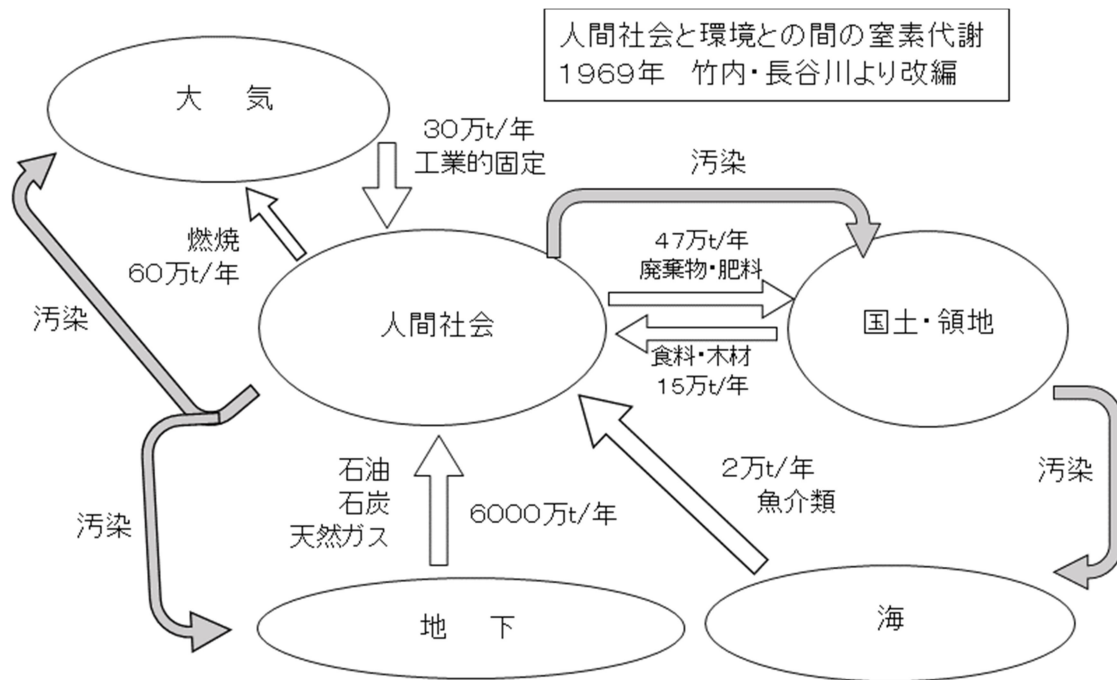
窒素は、タンパク質などの構成元素の一つとして生命現象を支えているが、その循環のシステムは自然界において長い時間をかけて成立したものであり、人類という生物もその延長上において生存が可能となっている。

多くの生物は自ら大気中の窒素ガスを利用することはできず、植物はアンモニウム塩や硝酸塩などの化合物となることによって、窒素を利用することができるようになる。人類は、食糧増産のための化学肥料を考案し工業的な空中窒素固定を進めることができるようになった。生物により摂取された窒素は有機窒素に形を変え、生物から排泄される。また、生物が死んだ後に微生物によって再び無機窒素に分解されることが自然の窒素循環に見られる。

窒素循環には様々な試算があるが、デルウィッチによれば、生物自身による窒素固定量は、およそ5400万トン（陸上で4400万トン/年、海で1000万トン/年）、人類による工業的窒素固定は3000万トン/年であると推計されている。

まず、人類の主たる経済社会活動の場とその外部との窒素の循環をみると、人間が使用している窒素を3つに大別して考えると、第一に、化石燃料があげられる。第二は、肥料を中心とする工業的固定、第三が衣食住、特に食料によるものとなる。これらの量的な割合は、それぞれおよそ4：2：1であると推計されている。一方、我々が環境中に排出している窒素の量は、化石燃料の燃焼によるものが約6000万トン、廃棄物・肥料として約4700万トンと推計され、総計で約1億700万トン/年の窒素を使用し、環境中に1億700万トン/年の窒素を排出していると考えられる。

窒素は、生態系の重要な構成元素であり、肥沃度等植物生産の重要な部分をなすとともに湖沼等の富栄養化の重要原因物質になっていることから、世界を巡るその収支がどうなっているかは、人間の生存基盤の現状を判断する重要な指標となる。



化石燃料等を燃焼させることによる大気中への窒素酸化物の放出は、近年、特に大都市地域を中心とする窒素酸化物に係る大気汚染といった問題をもたらしている。大気に放出された窒素酸化物は、硫酸酸化物とともに、雲粒などに取り込まれて複雑な化学反応を繰り返し最終的には、強い酸性を示す降雨又は乾いた粒子状物質として降下する、いわゆる酸性雨の原因物質となっている。

こうした酸性雨による影響は、ヨーロッパ、北米、中国等世界的な規模で発生し、スウェーデン、ノルウェー、カナダ等の湖沼では、魚が死滅するなどの影響が見られる

自然林の地下水中の硝酸性窒素濃度は、5 mg/Lを越えることはほとんどないとされ、高濃度の硝酸性窒素が見られる場合には、過剰な施肥、畜産排水や生活排水の土壌浸透処理など人間活動に起因する。

農地などに施用された窒素は、酸化されてその一部が硝酸となり、水の降下浸透に伴って下層に浸透する。その後、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>といった形態で地中や水中に存在し、地下水汚染の問題や湖沼、内湾といった閉鎖性水域等における富栄養化問題などの原因の一つとなっている。

施肥等の窒素負荷が地下水汚染を引き起こした例として岐阜県各務原市の硝酸性窒素汚染をみてみよう。同市では、昭和 40 年代の名古屋市のベッドタウン化により、大型住宅団地の造成が進んだ。この大型住宅団地への給水のため、ニンジンを中心とした園芸団地において水源の試掘を行ったところ、水道水質基準(10mg/l)を大幅に越える硝酸性窒素が検出された。硝酸性窒素は、嫌気的環境で亜硝酸性窒素を経て窒素ガス等に変わる。亜硝酸性窒素は、特に乳児にメトヘモグロビン血症(チアノーゼ症状)を引き起こすなどの影響から、水道水質基準が設定されている。各務原市の硝酸性窒素汚染は、専門家グループによる数年に及ぶ調査により肥料が原因であるとされた。農業団体も示された科学的根拠に理解を示し、行政、農業団体、生産者が相協力して施肥改善に取り組み始めた。施肥量を従来より 30%減ずることにより、硝酸性窒素濃度 20mg/L 以上の高濃度汚染地域が縮小してきている。なお、にんじん生産についても、過繁茂生育が軽減され、病害虫の発生が減少したことにより、可販収量の増加等が見受けられ、同地域でのニンジン生産は結果的に収益性が 15%増加したという好影響も見られた。

次に、東京湾流域における富栄養化を例にとる。東京湾流域における窒素負荷は主として、生活排水、工場排水、その他(畜産排水、農耕地等)から発生していると考えられる。

東京湾流域では、特に 1950 年代以降に人口、家畜頭数の著しい増加が見られたが、宅地需要等を反映して水田及び畑地は減少している。東京湾流域において発生した総窒素負荷量は、昭和 54 年度実績で 364.9 トン/日、59 年度で 334.4 トン/日、平成元年度で 319.5 トン/日と近年ほぼ横ばいの状況で推移している。

主として食物を中心に東京湾流域における窒素の流れを試算したところ、東京湾流域に生活する人間の食料として、流域外より 295 トン、流域内の農業生産より 1 日当たり 45 トンの窒素が供給され、我々の食生活を支えた後、生活廃棄物として 319 トン、農業より 78 トンの窒素が排出される。これらの窒素の一部は浄化処理されるものや自然の脱窒作用により大気中に返されるものがあるため、東京湾への窒素負荷量は、1 日当たり人間よりの 171 トンを始めとして、約 294 トンと試算されている。

この試算は、農業生産のリサイクル利用がないとの仮定で試算されていること、流域外から産業への窒素の流入が不明であることなどさらに検討を要する部分がある等の点に留意する必要がある。しながら、全体として窒素流量の経年変化を見てみると、流域外からの流入量が大幅に増加している。

また、1935 年時点の東京湾への窒素流入は 1 日当たり 64 トンと 1990 年の約 4 分の 1 であるとされている。流域外からの流入量の増加した主要な原因は、東京圏への人口、産業の集中により、化石燃料の使用、食料の需要が集中したことによるものと考えられ、こうした社会的要因が窒素循環の片寄りを引き起こしている。こうして、東京湾では流入する窒素負荷により富栄養化現象が生じ、利水障害などの影響が現れている。

## 地球のリン循環

岡山理科大学 生物地球学部 植物生態研究室参考

リンは、生物体の構成物質として重要であるが、基本的には岩石の風化による供給が主である。

造岩鉱物が風化され、その構成物質である P、K、Ca、Mg などが溶出し、植物が利用可能な状態になる。このような岩石の風化および植物体への吸収は、菌根菌の働きが大きく貢献している。

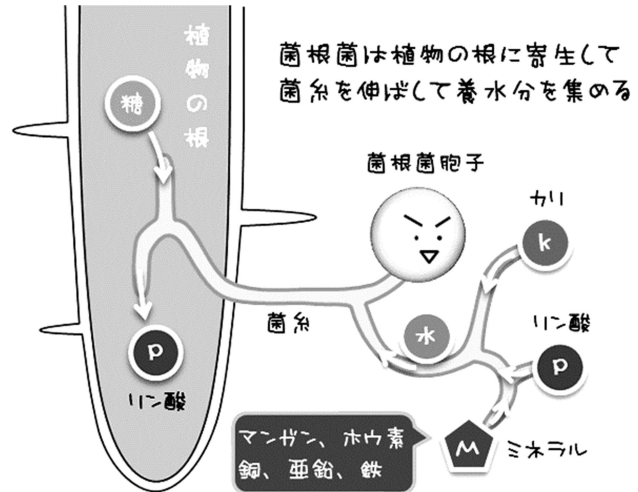
植物に吸収されたこれら栄養分は植物から動物へと移行し、生態系中を循環するが、長期的には水の流れにしたがって川から海へと流亡する。

川や海から再び陸上へもどる経路は2つある。1つは海底などに堆積した泥土が岩石となり、やがて地殻変動によって陸になり、この堆積岩が再び風化するという、とてつもなく長い地質学的年代における循環である。

もう一つは、食物連鎖によるもの。

- 植物プランクトン
- 動物プランクトン
- 小型動物
- 魚
- 水鳥

という食物連鎖により、陸上へともたらされるものである。カゲロウ類などの水生昆虫が羽化し、陸上に飛来する場合には、水界から陸上へ相当量のリンを回帰させることになるし、水鳥の糞が堆積したグアノやこれが変性したリン鉱石なども、基本的には動物によるリンの陸上への回帰である。水生昆虫の豊かな水域は、これら動物によって栄養塩類が除去され、水質浄化に関しても、良好な生態系であるといえよう。



## リン循環の問題

地球と気象・地震を考える ブログ参照

生物にとって非常に重要なリンであるが、過剰と不足の両面から問題になっている。

### 過剰ゆえの問題

リンは自然界においては基本的には不足しがちな物質なため、生物はそれを取り込むことに敏感である。とくに水生生物の繁殖を左右する重要な元素である。

1970年代～80年代にかけて琵琶湖や霞ヶ浦などで藻類・植物プランクトンが大発生し水質の悪化が起こった。その原因は当時の合成洗剤に含まれていた縮合リン酸塩洗剤（代表はトリポリリン酸ナトリウム）。その後メーカーによる無リン洗剤の開発が行われ水質の改善が進んだ。

一方なかなか改善しないのが産業由来のリンである。現在の農業では、窒素、リン酸、カリウムが化学肥料として農地に使用されるが、リン酸は与えただけの10%しか吸収されない。そのため収量を上げようとするとう過剰な投与が増える。これは土中の「リン酸」が増え、他の成分と結合するため、植物がすぐに使える状態にはならない。そのため農業関係者の間では肥料を与える方法・量・時期・他の肥料とのバランスなどが研究されている。

また畜産動物（牛・豚・鶏）の排泄物にはリンや窒素をはじめとして有機物も多く含まれ、本来は肥料としても有効である。しかし現状ではそれが廃棄物として処理され、畜舎からの排水を通して河川や湖沼などに入り込み、それが水質悪化の元になっている。

現代の日本は、回収技術や飼料の改良研究がされており、環境への影響は削減してきている。

不足ゆえの問題

基本的には人間が利用できる地球上の資源としての量は限られている。自然循環に従って鉱石が作られ人間が利用可能になる時間と、人類による消費速度の時間スケールが異なるので循環ができていないことが不足の大きな理由となる。先ほども挙げた農業用の三大肥料（窒素・リン酸・カリウム）の中では、リンが一番不足している。

水系では不足すると貧栄養化がおり、生態系全体に影響が出る。採掘可能なリン資源は20ギガトンで、可採年数は150年程度と言われており、資源としての有限性が切実な問題になってくる。

このことは石油や水と同じように今後希少資源をめぐる国際紛争が起こることも考えられ、実際歴史的に見ても、南米ペルー沖のロボス島やカリブ海の鳥島、そして太平洋のガラパゴス諸島を舞台にアメリカと利害の対立する国々の間で紛争が続いた。太平洋戦争時にはアンガウル島を巡って日米が攻防し、そこにもリン資源の争奪問題があった。

また太平洋のナウル共和国は、国土面積のうち8割がリン鉱石の鉱床でできており、戦後は輸出により国庫が潤い、税金のない国として有名であったが、すでに枯渇した。このほかにもいくつかの島がすでに枯渇している。

リンを含んだ鉱床は島だけでなく大陸の内部にあるが、石油や宝石と同じように世界的に埋蔵される場所が偏っている。化学肥料を必要とする日本は100%輸入に頼っており、工業的にもセラミックや医療分野の新素材として注目されはじめ、今後もさまざま分野で必要とされる見込みである。

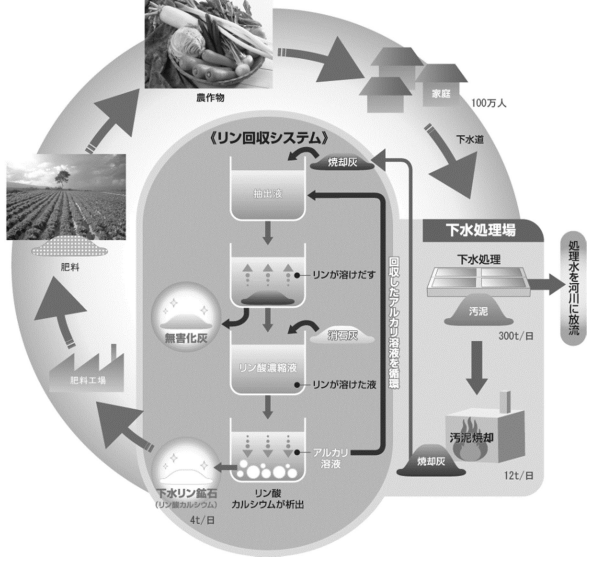
つまりリンやその化合物は国家戦略上も重要な物質といえる。特に農業分野での肥料としての役割はいまだに大きく、食料自給率の向上や食糧安全保障の課題も検討されているが、それらのことを考えるならば当然リンを筆頭にした肥料の安全保障も考えていかななくてはならない。

リンに関するまとめ

豊かになり栄養の取りすぎともいえる現代は、自らが出す排水にリンが多量に含まれており、しばしば海洋や湖水でプランクトンの増殖を呼び、赤潮の原因となっている。

これらはリンが過剰故の問題であるが、その一方で石油と同様に、資源枯渇を招いている問題が起こっている。

地球規模でリンの循環系の変化を捉え、人類の未来を見据えたリンの循環システムを構築する段階にきている。



図は日本下水道施設業協会のリン回収システム(岐阜市・鳥取市)