



環境保全工学概論

大気・水圏環境化学研究室

大河内 博



1

大気・水圏環境化学研究室

2017年より、カンボジアで研究開始！！

大気汚染が熱帯スコール性豪雨生成、アンコール遺跡劣化、
土壌浸食に及ぼす影響

空気・水・森林の環境診断
環境浄化技術の開発



放射性物質の
森林内動態と森林除染



福島県浪江町の里山

富士山を「空」から眺める



協力：グリーンブルー

4 2018年度 環境保全工学概論

大河内



環境保全工学概論 大河内 担当分

日程	内容
① 6/4	環境中の物質循環
② 6/11	気 圏：微量気体とエアロゾル
③ 6/18	気 圏：大気汚染
④ 6/25	水 圏：水の構造と性質，水質汚濁の実態
⑤ 7/2	生物圏：森林生態系，放射性物質による汚染
⑥ 7/9	地球環境問題：越境大気汚染と酸性雨
⑦ 7/16	教場試験

* 成績評価：出席（小テスト/課題）＋試験

* 関数電卓必要



環境問題をどう解決するのか？

環境問題の解決 ➡ 正解はない！

では、どうするか？

- 1) 現状(現象)を正確に分析する.
- 2) その原因について確からしい仮説を立てる.
- 3) 調査・実験を繰り返して実証する.

そのためには...

正しい知識が必要！

だから、皆さんは学んでいる



大学で何を学ぶべきか？

どこまで知識を得ればいいのか、どこまで考えればいいのか、誰も教えてくれない。失敗を繰り返しながら、自分で身につけるしかない。

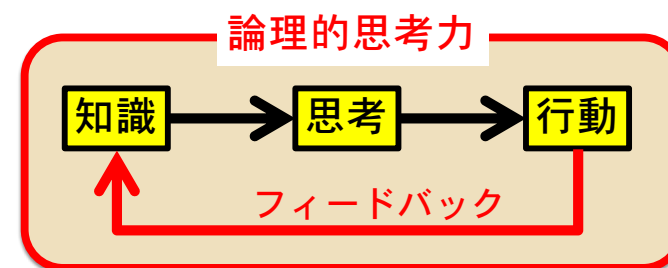
根拠のない自信を持っている諸君、自信をもてない諸君もいるでしょう。根拠のある自信を持つには様々な失敗を繰り返し、反省し、原因を分析し、必要であれば知識を得ること。この繰り返しです。

みなさんの潜在力は無限大です。大学時代に経験をたくさん積もう！



環境問題をどう解決するのか？

この手法は、環境問題の解決に限らない。



大学で学ぶ意義

知識を得ることはだけではない！

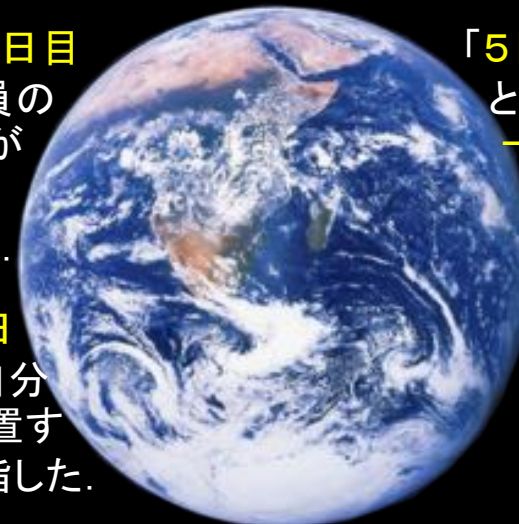
➡ 論理的思考力を身につける

宇宙から見た見た地球は
「blue marble (青いビー玉)」だった。

「1日目と2日目
は、乗組員の
それぞれが
自分の国
を指さした。」

3日目と4日
目には、自分
の国が位置す
る大陸を指した。

「5日目を過ぎる
と、全員が同じ
一つの地球に
住んでいる
ことを自覚
した。」



サウド宇宙飛行士(サウジアラビア)の言葉

宇宙船地球号

- ・提唱者：
バックミンスター・フラー
米国人・工学者
- ・提唱年：1962年
- ・考え方
地球：宇宙船
人類：操縦者
- ・地球を包括的にとらえ、資源・エネルギーの有限性を指摘



環境問題：
人間が操縦を誤った結果？

ガイア理論

- ・提唱者：
ジェームス・ラブロック
英国人・大気化学者
- ・考え方
地球：自浄作用をもつ生命体
人類：寄生虫？
- ・地球と地球に住む生物が相互に影響しあい、環境を形成
→地球と人類との共生



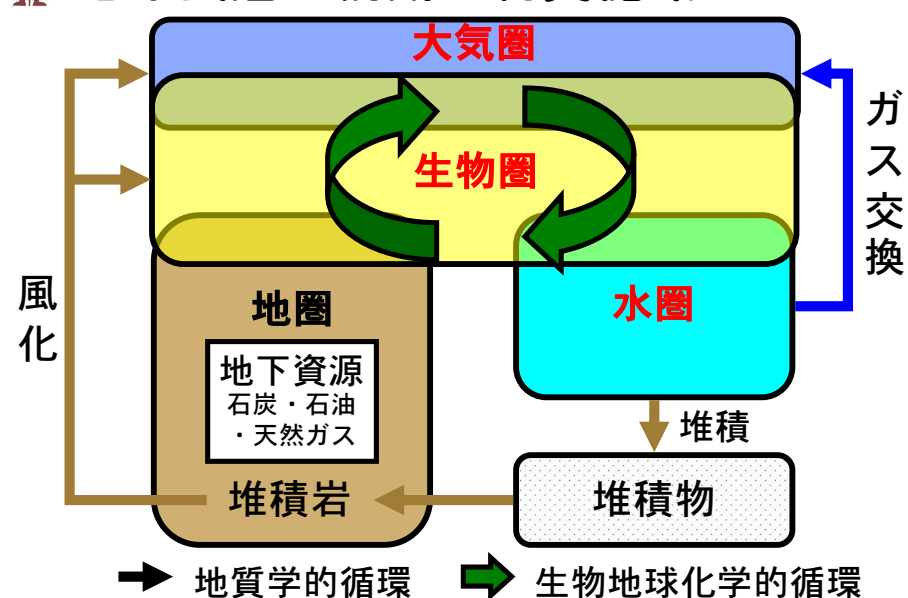
環境問題：
人間の影響が大きくなりすぎた??

地球生理学，地球システム科学へ発展

SDGs：2016年～2030年までの国際目標



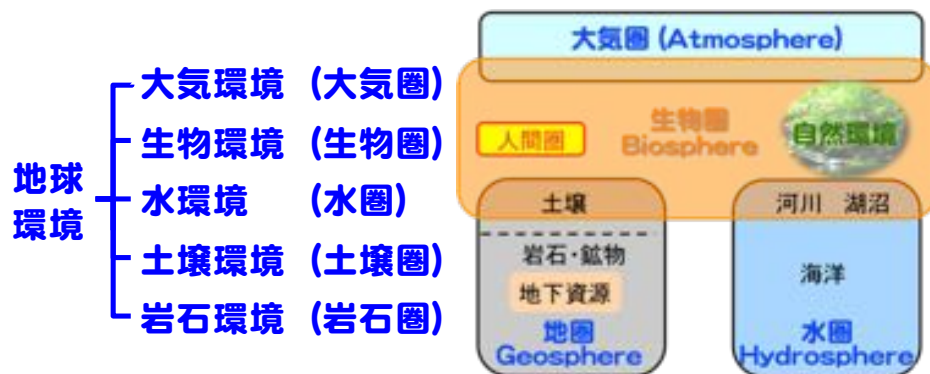
地球表層の構成と物質循環





環境とは？

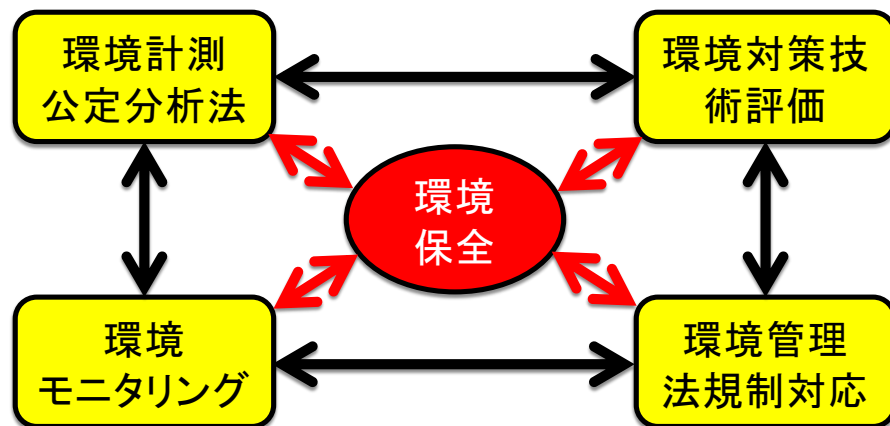
生物を取り巻いている生物の生活に影響を与えているすべてのもの



環境保全工学の目的と意義

リスクアセスメント

リスクマネジメント

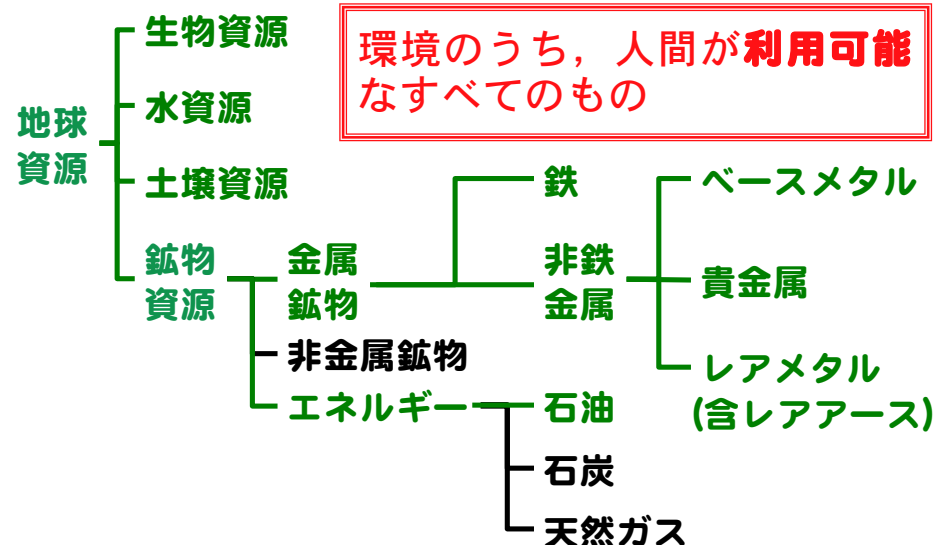


目的: 環境変化によるヒトや生態系への被害軽減

評価: 定量的 → 環境基準・排出基準(環境基本法)



資源とは？



環境リスクとは？

➤ 環境リスク

物質または状況が一定の条件の下で、環境に害を生じる可能性(エンドポイント)

①よくない出来事が起こる可能性

②よくない出来事の重大さ：評価が困難

➤ 環境リスクのアプローチ

人の健康リスク e.g. 発がんリスク

生態系リスク e.g. ダム



環境汚染物質のリスク削減対策

➤ 工程内対策(In-Plant Technology)

: 未然防止策

ex.CO₂の排出抑制

効率的

➤ 除去技術(End of Pipe Technology)

ex.CO₂の国定化(地下圧入, 森林吸収)

環境では低濃度であるため濃縮が必要

→ コスト, 時間, 環境質のムダ

基本: 何が問題か? 発生源は何か?



ハザード: 代表的な環境汚染物質

無機物	<ul style="list-style-type: none"> ・温室効果ガス: 二酸化炭素, 一酸化二窒素など ・ガス: 二酸化硫黄, 窒素酸化物, 一酸化炭素, オゾン ・重金属: 六価クロム, カドミウム, 鉛, ヒ素, 水銀 ・硝酸および亜硝酸 ・放射性物質 ・シアン化合物 ・煤塵
有機物	<ul style="list-style-type: none"> ・塩素化炭化水素: ジクロロメタン, トリクロロエチレン, テトラクロロエチレンなど ・芳香族炭化水素: ベンゼン, トルエン, キシレン, ベンゾ(a)ピレンなど ・アルデヒド類: ホルムアルデヒド, アセトアルデヒド ・ポリハロ化合物: DDT, ダイオキシン類, フロン類など ・有機水銀化合物, 有機スズ化合物, 有機リン化合物



環境汚染物質によるリスク評価

1) **ハザード**の同定: 何がリスクの原因物質か?

Ex. ベンゼン, 水銀, PM2.5, 放射性物質

2) **エンドポイント**の決定: 良くない出来事は何か?

Ex. 発がんによる死亡率

3) **曝露解析**: ハザードに**曝露される経路と曝露量**

曝露量 = (環境中濃度) × (曝露係数) × (吸収率)

4) **用量反応関係**: **しきい値(反応率ゼロ)**の有無

曝露量: 低 → 影響: なし or 低

曝露量: 高 → 影響: 高

法律の性格			法律名	規制などの内容
基本的事項を規定			環境基本法	・環境保全に関する施策の基本事項を規定 ・環境基準の設定(大気, 水質, 土壌など)
環境への排出に関する規制	環境媒体の体系	大気	大気汚染防止法	・工場・事業場に対する排出規制, 総量規制 ・自動車排ガス規制のための許容限度の設定
			自動車NOx・PM法	大都市において, 窒素酸化物および粒子状物質の排出量削減のための車両規制
		水質	水質汚濁防止法	工業・事業場に対する排水規制・総量規制
			湖沼保全対策特別措置法	指定湖沼周辺における排水規制
		土壌	土壌汚染防止法	市街地における土壌汚染に関する調査と対策
			農用地の土壌汚染防止等に関する法律	重金属などにより汚染された農用地の対策
	特定物質の体系	ダイオキシン類対策特別措置法	・耐用一日摂取量および環境基準の設定 ・大気・水への排出規制, 土壌汚染の対策	
製造, 輸入に対する規制			化学物質審査規制法(化審法)	・新たに製造, 輸入される化学物質の審査 ・残留性や毒性が高い化学物質の製造規制
環境への排出・移動量の届出			化学物質排出把握管理促進法(化管法)	化学物質の事業所からの排出, 移動量届出(PRTR制度), 国による排出・移動量の集計

物質を輸送する媒体

- ①地球表層の構成と物質循環
- ②物質を輸送する媒体



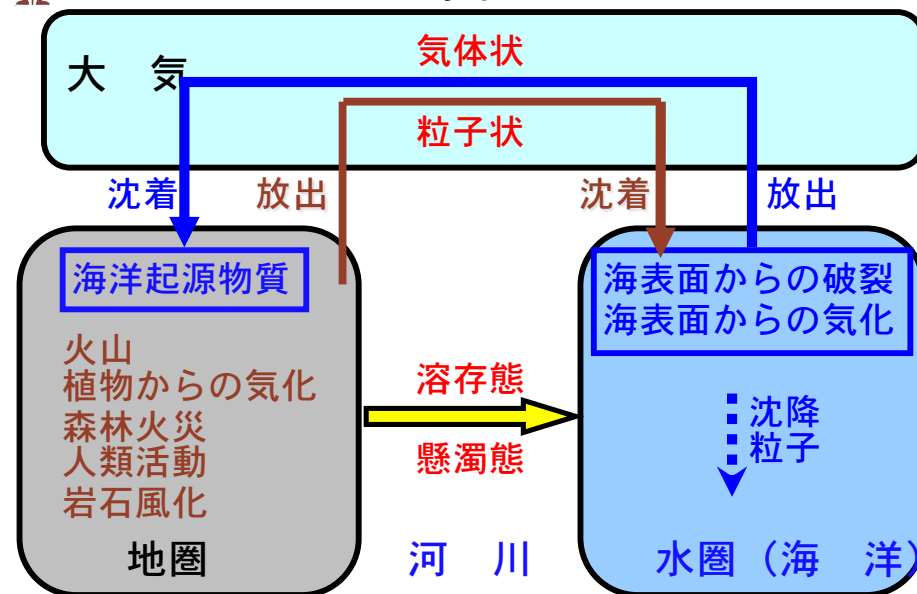
物質を輸送する媒体

- ① 大 気: 地球の自転 気圧差 降水
- ② 河 川: 重力 (高所→低所)
- ③ 海 洋: 地球の自転 風 密度差
- ④ 生 物
例) プラクトンによる水中養分吸収
- ⑤ 人 類
例) 動植物、地下資源から製品製造と廃棄

汚染物質の排出 → 輸送 被害の拡大



地球表層での物質の動き

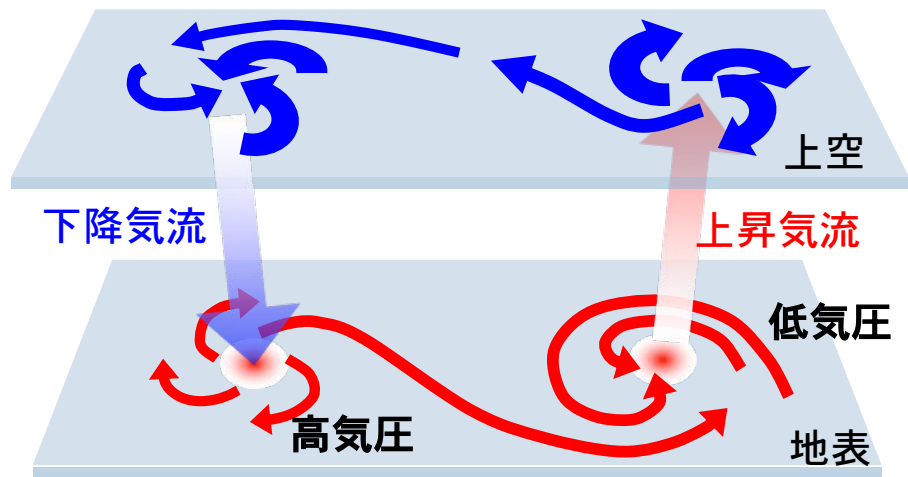


大気における物質輸送の支配要因

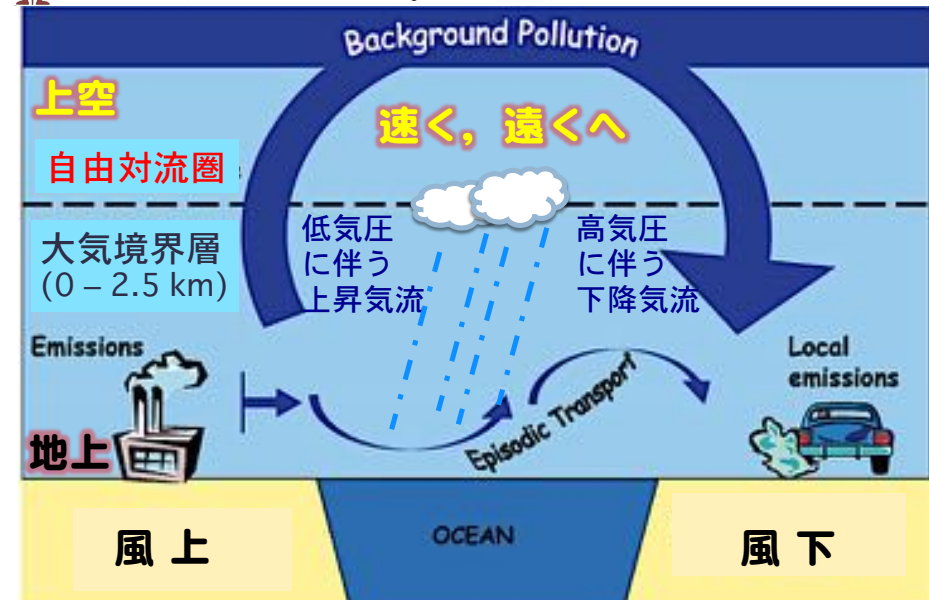
- 物質特性: 放出量 到達高度 滞留時間
- 大気特性: 風向 風速
 - a. 地球規模の大規模な流れ
 - 中緯度域(緯度30-60度): 偏西風
中心は高度12 km付近
夏(15 m/s) < 冬(35 m/s)
 - 熱帯域(赤道-緯度30度): 貿易風
 - b. 季節風: 夏は海→陸、冬は陸→海
 - c. 海陸風: 昼は海→陸、夜は陸→海



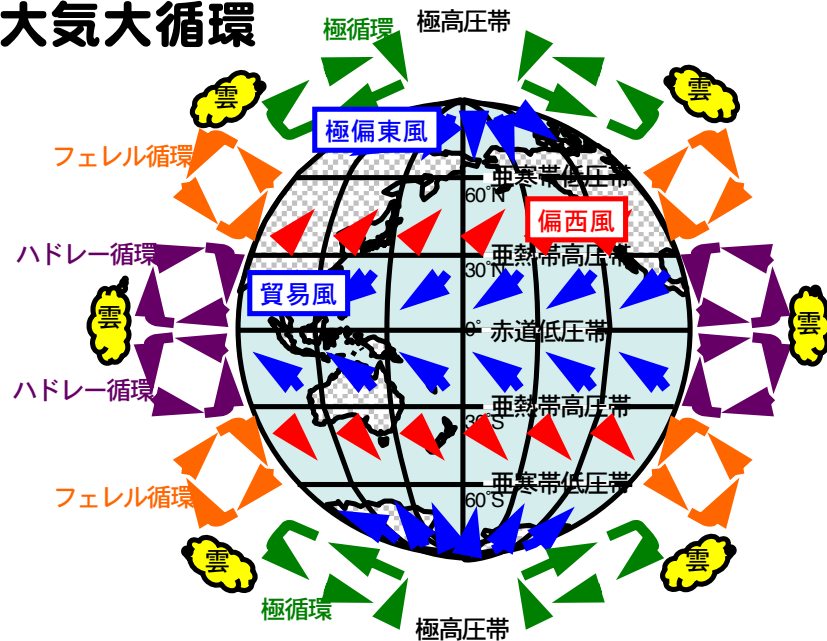
大気の動き：低気圧と高気圧



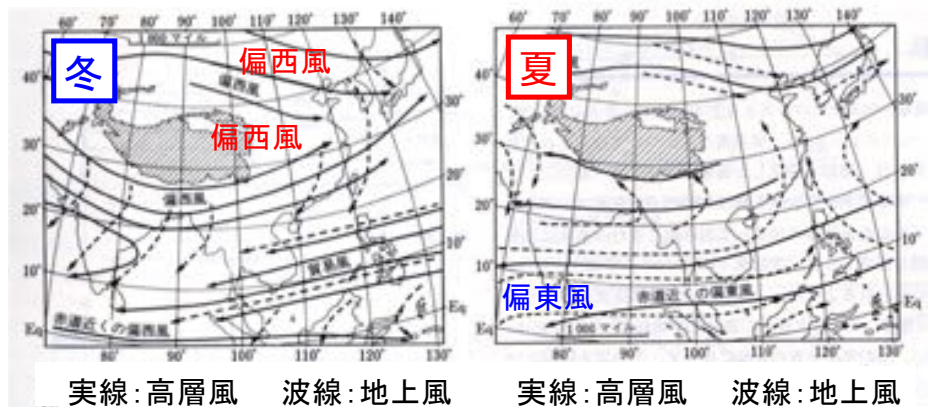
大陸間輸送・半球大気汚染



大気大循環



季節による変化：季節風

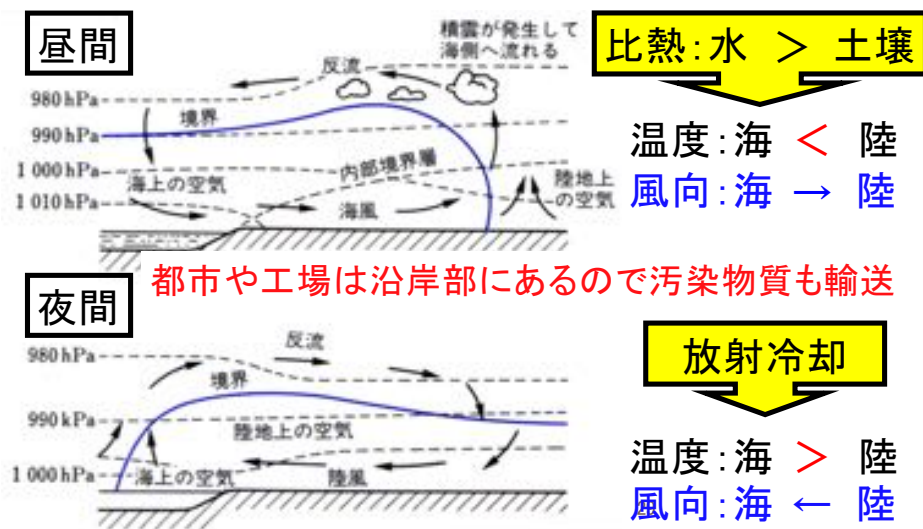


大陸に高気圧
日本: 地上部で北西風

大陸に低気圧
日本: 地上部で西～南西風



1 日周期の変化：海陸風



地球規模の粒子状物質の大気輸送

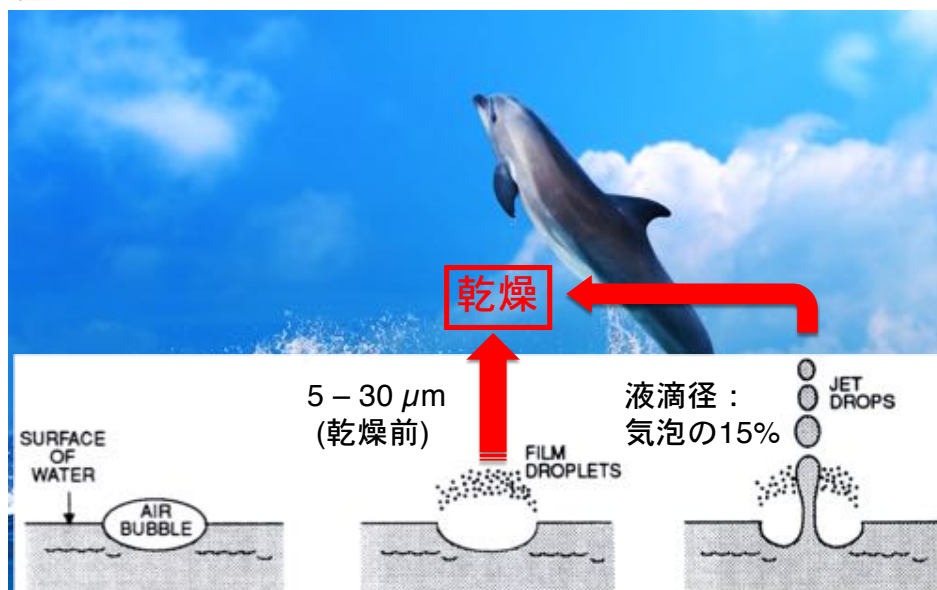
種 類	輸送量(10 ⁹ kg/y)
海塩粒子	1000 - 1500
土壌粒子	500 - 750
火山灰	25 - 50
森林火災起源	35

黄砂

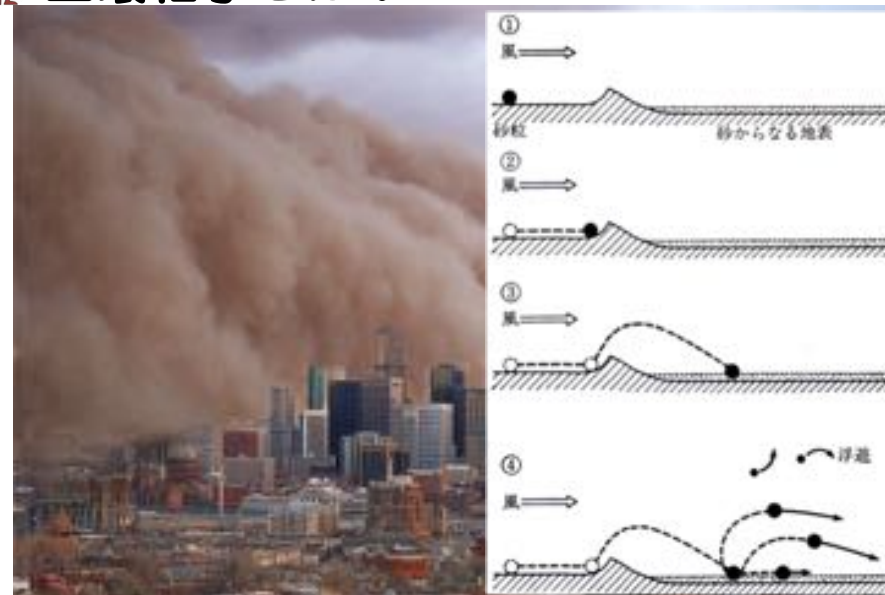
- ・ 春に中国大陸奥地→日本
- ・ 移動速度 500 km/日



海塩粒子とは？

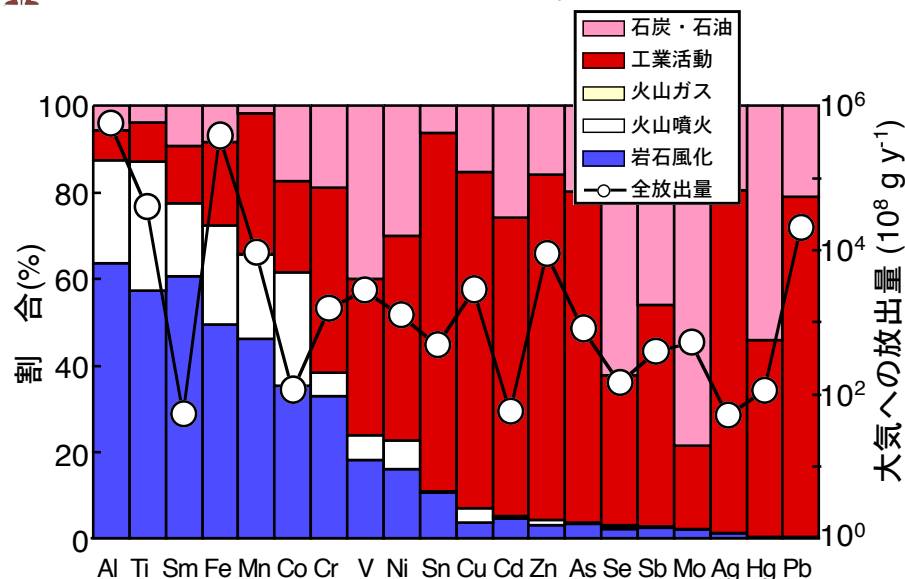


土壌粒子とは？

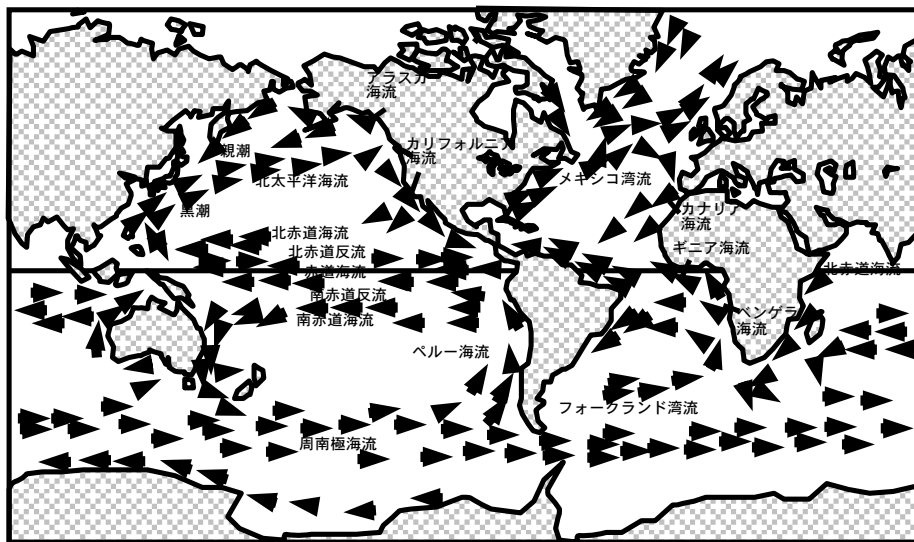




地上から大気への元素放出量



海洋循環：風成循環（表層海流）



海洋循環

➤ 風成循環：海面上の風と地球の自転

- ・亜熱帯循環：中緯度地方

北半球：時計回り 南半球：反時計回り

黒潮(日本海流)：亜熱帯循環の一部

幅：100 - 200 km、表面流速：1.5 m/s

- ・海洋組成を均質化（表面～500 m）

➤ 熱塩循環：海水の密度差

- ・高緯度：海水は低温 → 高密度 → 沈降

- ・深層水：高緯度 → 低緯度（1 cm/s 以下）

- ・陸供給物質の海洋全体へ拡散

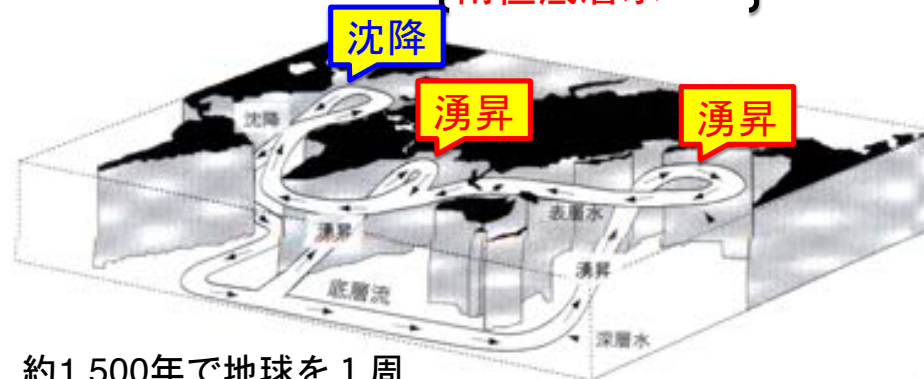


海洋循環：熱塩循環（深層循環）

北極海と南極海で海水が氷結

➡ 表層海水の塩分濃度：増加

➡ 表層海水の沈降 { 北大西洋深層水
南極底層水 } を形成



約1,500年で地球を1周



河川を通じた物質輸送

河川：陸から海へ物質を輸送するパイプ

世界河川の年間流量： 40×10^{15} L
 河川中の溶存成分濃度：100 mg/L
 河川中の懸濁物質濃度：400 mg/L

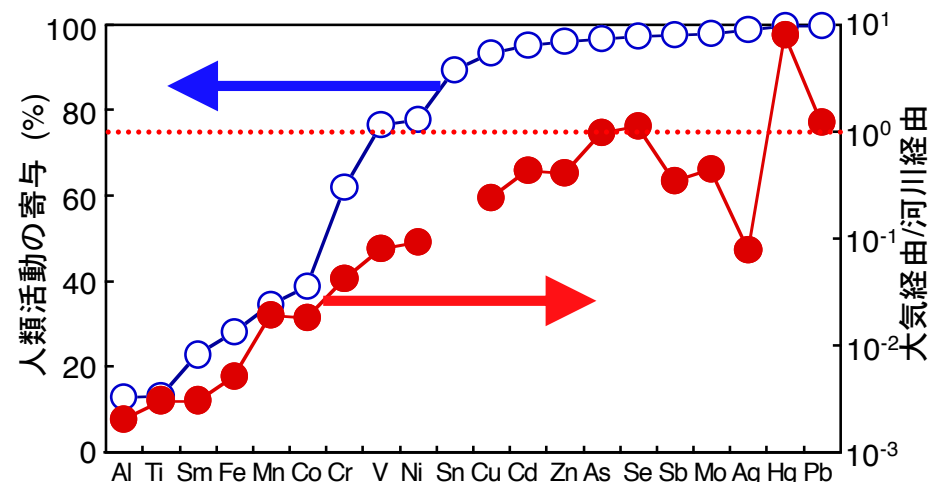
年間輸送量 20×10^{12} kg

- 溶存物質： 4.0×10^{12} kg
- 懸濁物質： 16×10^{12} kg
 (無機物： 12×10^{12} kg)

大気経由の土壌粒子輸送量より1桁大

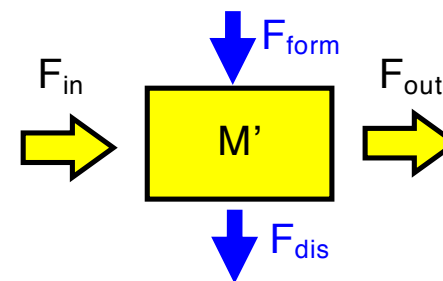


海洋への流入経路：大気 vs 河川



物質収支 (Mass Balance) とは？

ある系に投入した物質質量と、その系から得られた物質質量との収支



化学反応を伴う場合

$$\text{物質収支 } M' = F_{\text{in}} - F_{\text{out}} + F_{\text{form}} - F_{\text{dis}}$$

蓄積項 流入項 流出項 生成項 消失項

平均滞留時間

①物質収支とは？

流速と流束

②定常状態と平均滞留時間

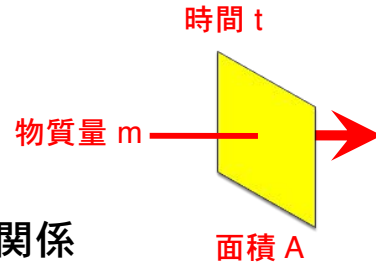
③水の分布と平均滞留時間

④海水中元素濃度と平均滞留時間



流速と流束

- 流束 Flux = $m/(A \cdot t)$
単位時間に単位面積
を通過する物質質量



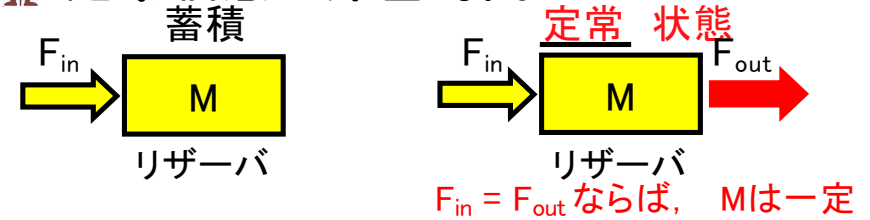
- 流速 Flow と流束 Flux の関係

$$\begin{aligned} \text{Flux} &= \frac{\text{Flow}}{\text{area}} = \left(\frac{\text{amount}}{\text{time} \times \text{area}} \right) = \left(\frac{\text{concn} \times \text{vol}}{\text{time} \times \text{area}} \right) \\ &= \left(\frac{\text{concn} \times \text{area} \times \text{height}}{\text{time} \times \text{area}} \right) = \left(\frac{\text{concn} \times \text{height}}{\text{time}} \right) \\ &= \text{concn} \times \text{speed} \end{aligned}$$

地球表層における水の分布と滞留時間

水の種類	貯留量(10^3 km^3)	割合(%)	滞留時間
海水	1,350,000	97.5	3200 年
氷雪	24,230	1.75	9700 年
地下水	10,100	0.73	840 年
湖沼水	219	0.016	17 年
土壌水	25	0.001	0.3 年
河川水	1.2	0.00009	13 日
水蒸気	13	0.0009	10 日
合計	1,384,000 (淡水分 35,015)	100 (淡水 2.5%)	

定常状態と滞留時間



- 平均滞留時間(mean residence time) τ

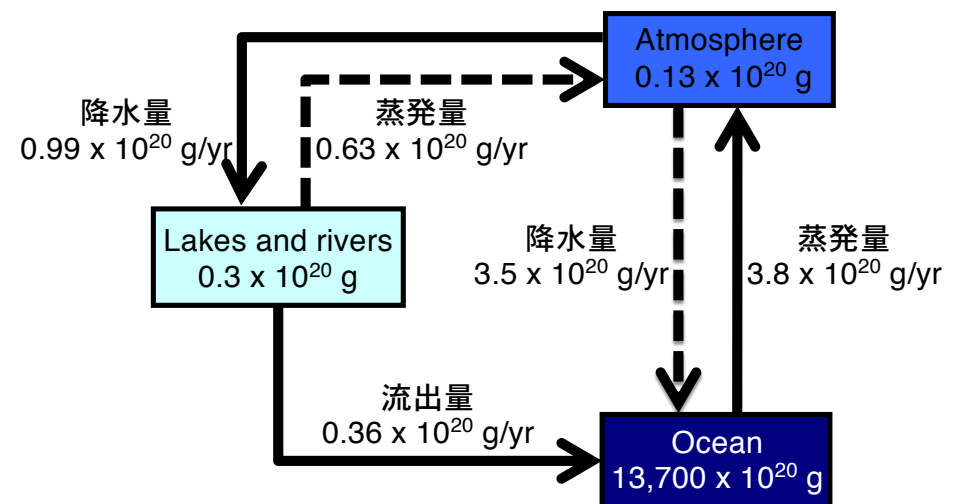
大気圏, 海洋など, ある系に物質が入り,
それが系から出るまでの平均の時間

$$\tau = \frac{M}{D}$$

M: 貯蔵源中の貯留量
D: 貯蔵源への供給速度

安定な物質 → 平均滞留時間: 大

水循環のボックスモデル





水の滞留時間の算出

- ・ 海洋 : 3550年

$$\frac{13,700 \times 10^{20} \text{ g}}{(0.36 + 3.5) \text{ g/y}} = 3550 \text{ y}$$

- ・ 大気 : 11日

$$\frac{0.13 \times 10^{20} \text{ g}}{(3.8 + 0.63) \times 10^{20} \text{ g/y}} = 0.03 \text{ y} = 11 \text{ days}$$

- ・ 河川 & 湖沼 : 110日

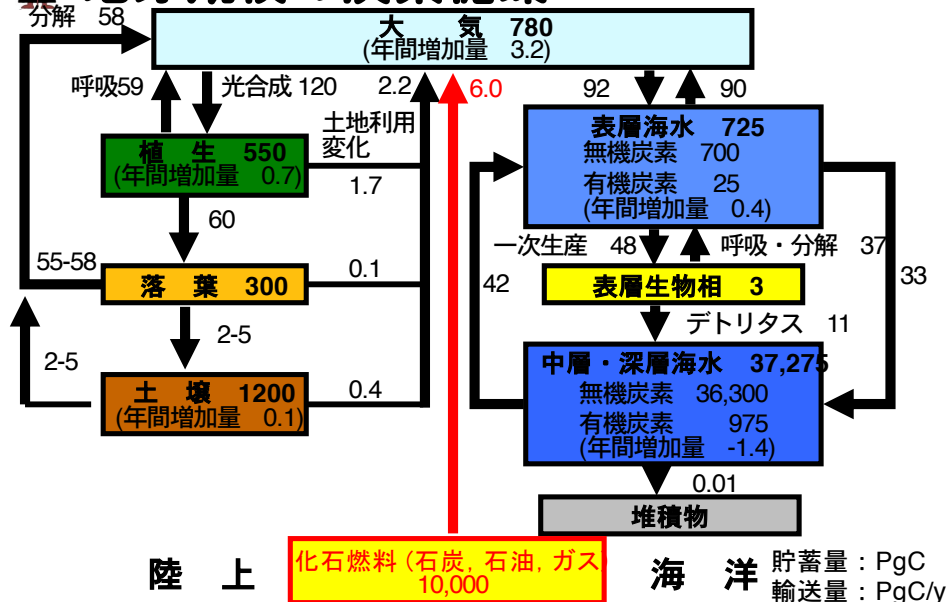
$$\frac{0.3 \times 10^{20} \text{ g}}{0.99 \times 10^{20} \text{ g/y}} = 0.303 \dots \text{ y} = 110 \text{ days}$$

地球規模の物質循環

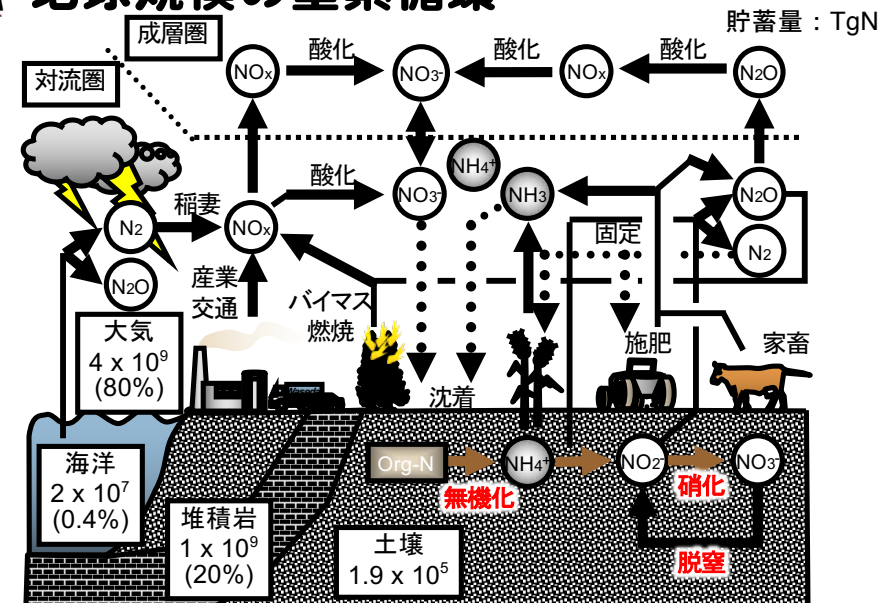
- ①炭素循環
- ②窒素循環
- ③硫黄循環
- ④重金属循環 : 地球規模の汚染



地球規模の炭素循環



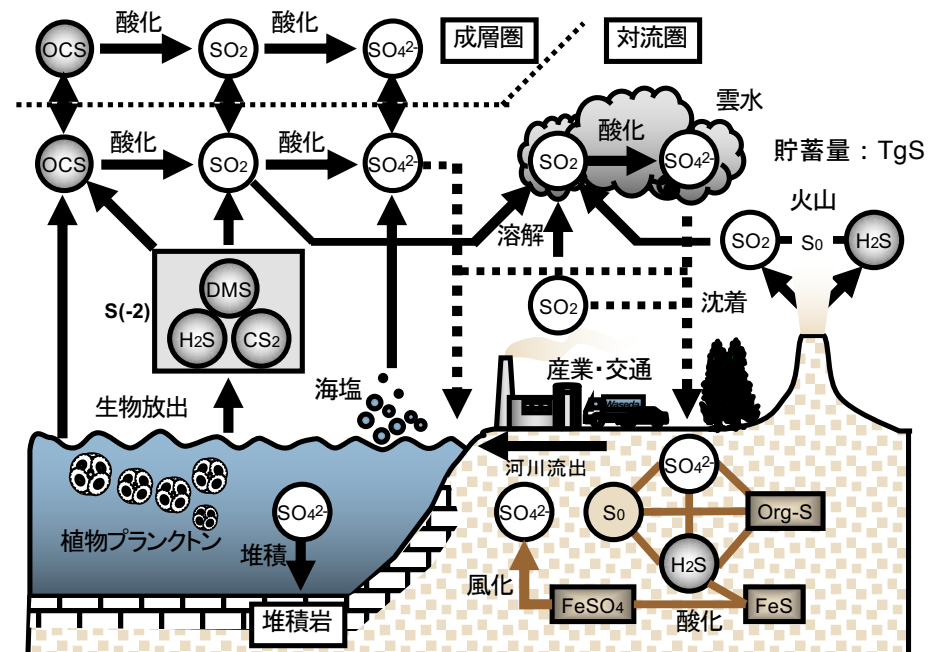
地球規模の窒素循環





地球規模の窒素の放出

発生源	放出量 ($\times 10^{12}$ g/y)
化石燃料燃焼	24
土壌(自然+人為)	12
森林火災	8
稲妻	5
アンモニアの酸化	3
航空機	0.5
成層圏からの輸送	0.1



地球規模の硫黄の放出

$$\text{SO}_2 \begin{cases} \text{人為起源(化石燃料)}: 80 \times 10^9 \text{ kg-S/y} \\ \text{自然起源}: 70 \times 10^9 \text{ kg-S/y} \end{cases}$$

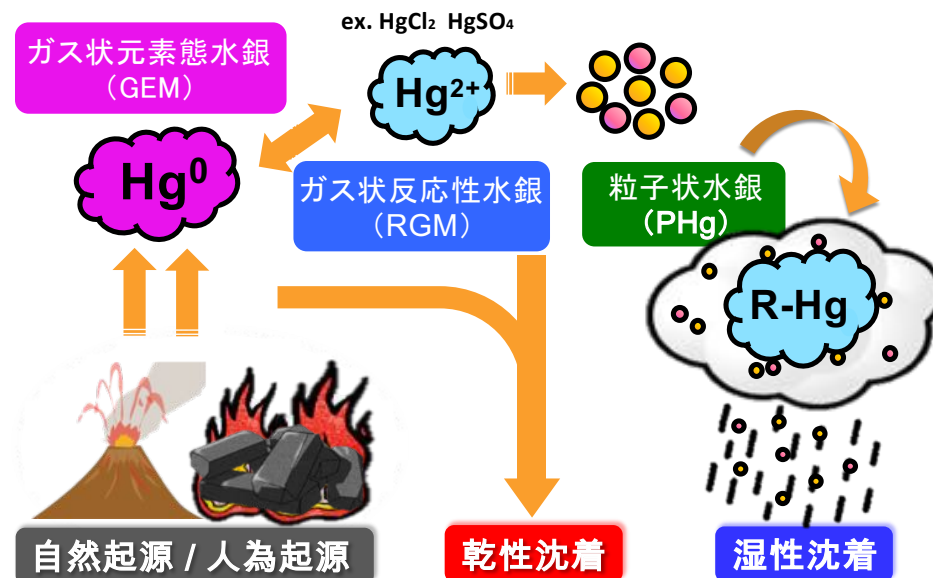
人為起源 \approx 自然起源

➤ SO_2 以外: 主に 生物起源

化合物	分子式	濃度(ppb)	平均滞留時間
硫化カルボニル	COS	0.07 – 0.6	0.5 – 20 y
二硫化炭素	CS_2	0.03 – 0.6	0.02 – 1 y
硫化ジメチル	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$	0.03 – 0.06	0.8 – 1 d
硫化水素	H_2S	0.01 – 4	0.5 – 3 d
二酸化硫黄	SO_2	0.01 – 0.1	3 – 7 d



水銀の大気への放出と挙動





水銀の大気放出量(10^{10} g/y)

水銀の使用によって	0.24
石炭の燃焼によって	0.3
石油の燃焼によって	0.16
セメントの生産過程から	0.01
硫化鉱物の精錬、ばい焼から	0.3—3

人類活動による放出計

1.0—3.7

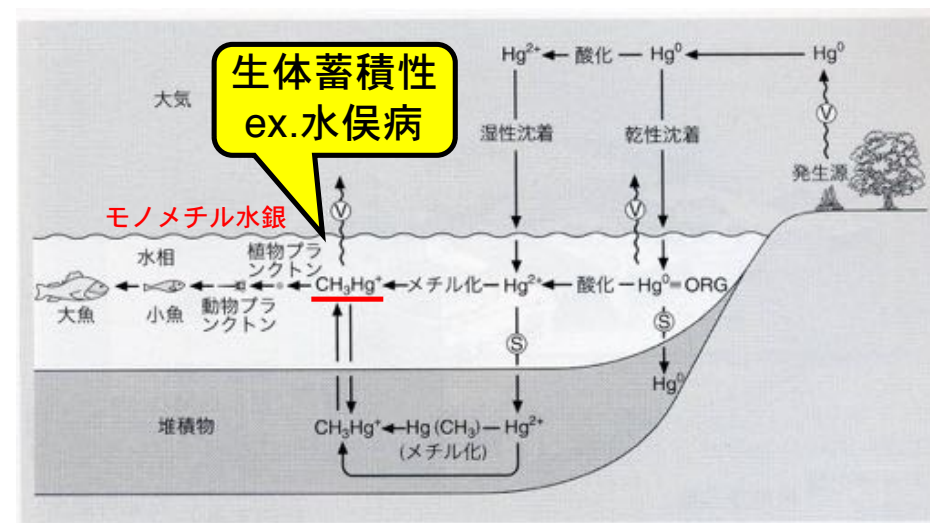
GEM(Hg^0)について

- 大気中**95%以上**
- **難溶(水) + 化学的不活性**
 - **大気中寿命: 1~2 年**
 - + アジアの水銀排出量: **大**
 - cf. 世界の水銀排出量: **54%**
 - 風下地域に**広域拡散**



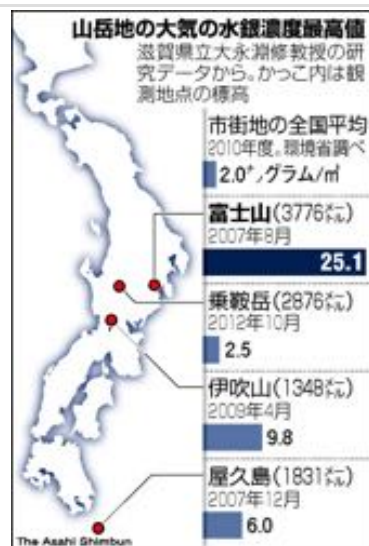
地球表層の水銀の動態と発生源

大気中: ほとんどが**ガス状の水銀元素 (Hg^0)**



富士山頂の大気、高濃度水銀検出 市街地の10倍、中国から飛来か

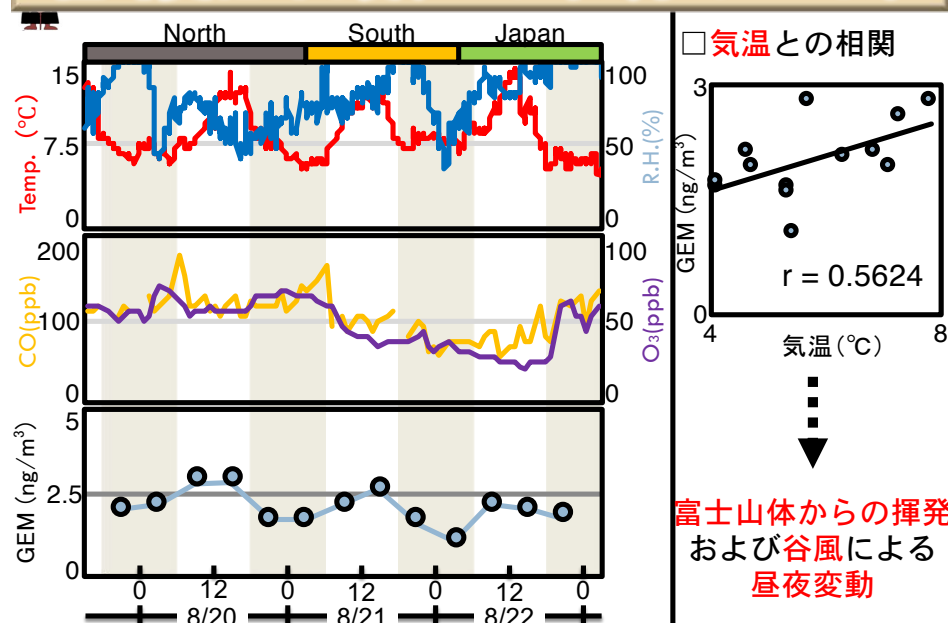
朝日新聞 2013年4月16日



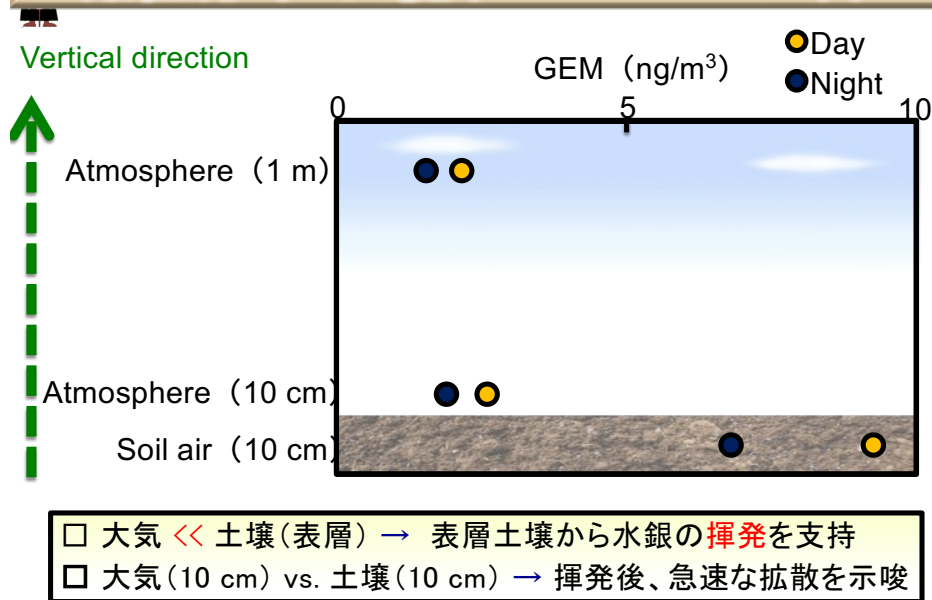
標高3776メートルの富士山頂の大気中から、最大で市街地の平均濃度の10倍を超える水銀が検出された。調査した滋賀県立大などの研究チームは、中国大陸から流れ込む大気に乗ってほかの汚染物質とともに運ばれてくるとみている。水銀は人体に有害で水俣病の原因物質としても知られる。滋賀県立大の永淵修教授らは環境省の助成を受け、2007年から毎年夏に専用装置を富士山頂に持ち込んで水銀濃度を測定。07年8月下旬に1立方メートルあたり25.1ナノグラム(ナノは10億分の1)の最高値を記録した。仮に1年間、同じ濃度が続いても大気汚染防止法に基づく指針値(年平均40ナノグラム以下)は下回るが、07年の市街地の全国平均(2.2ナノグラム)の11倍という数字だった。気象データを分析したところ、最高値を記録した時は中国東北地方や朝鮮半島を経由してきた大気が流れ込んでいたことが判明。一方、太平洋側からの大気が流れ込んでいた11、12年は2ナノグラム前後だった。

ほかに、屋久島の黒味岳(1831メートル地点)、滋賀・岐阜県境の伊吹山(1348メートル地点)、北アルプス・乗鞍岳(2876メートル地点)でも、中国大陸から北西の風が入り込むと水銀濃度が高まることが確認された。昨年10月の乗鞍岳での観測では、大陸からの寒波で初雪が降った際に濃度が上がり、半日で0.5ナノグラムから2.5ナノグラムまで5倍に跳ね上がった。永淵教授は「大陸からの水銀の越境汚染が裏付けられた。観測態勢を強化して実態を解明することが必要だ」と話している。

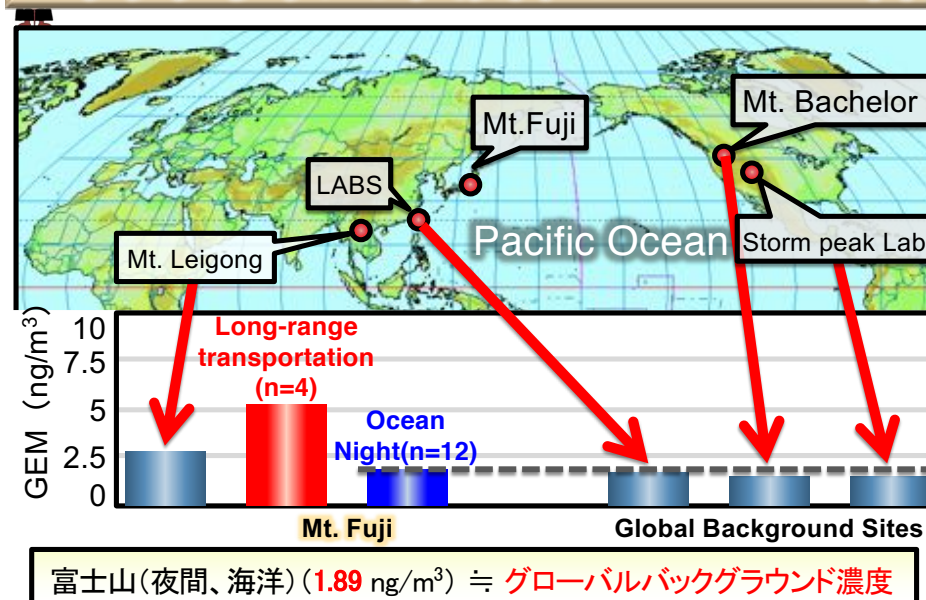
経時変化: 山頂(2017年8月19~22日)



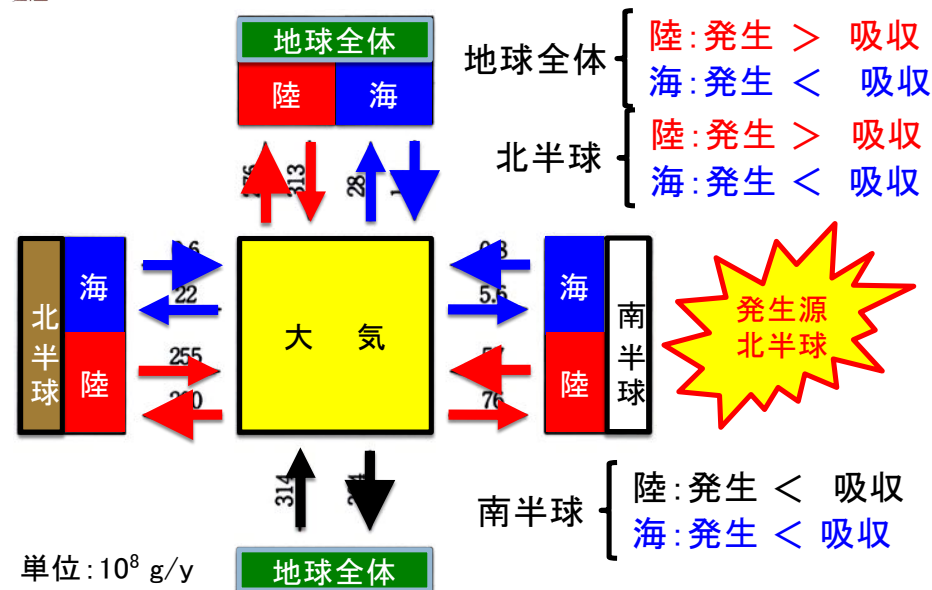
鉛直分布：山麓（2015～2017年）



バックグラウンド大気（2014～2017年）



地球表層におけるヒ素の収支



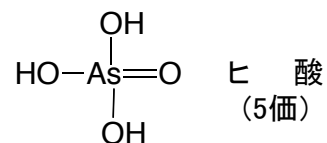
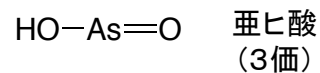
地球表層のヒ素の動態と発生源

発 生 源	北半球から 大気へ (10 ⁸ g/年)	南半球から 大気へ (10 ⁸ g/年)	地球全体から 大気へ (10 ⁸ g/年)	(%)
海から				
海水気泡破裂	0.12	0.16	0.28	0.4
ガス体として	0.5	0.6	1.1	1.4
地殻から				
風化エアロゾル	1.6	0.77	2.4	3.1
ガス体として	0.005	0.002	0.007	0.0
火山から	35	35	70	89.7
森林の山火事から	1.1	0.5	1.6	2.1
陸上の生物活動による発散	1.7	0.9	2.6	3.3
天然現象による大気への放出合計	40	38	78	100.0
石炭の燃焼	5.0	0.5	5.5	2.3
石油の燃焼	0.038	0.004	0.042	0.0
まき(木)の燃焼	5.4	0.6	6.0	2.5
晶焼き	5.0	0.6	5.6	2.4
ごみ焼却	3.9	0.4	4.3	1.8
製鉄、製鋼	38	4	42	17.8
銅、鉛、亜鉛の精錬	140	12	152	64.4
鉱山の採鉱による発散	0.12	0.01	0.13	0.1
ヒ素含有化学薬品から	1.8	0.2	2.0	0.8
ヒ素含有農薬から	17	2	19	8.1
繊維り機から	0.21	0.02	0.23	0.1
人類活動による大気への放出合計	216	20	236	100.0
天然と人類による放出合計量	256	58	314	

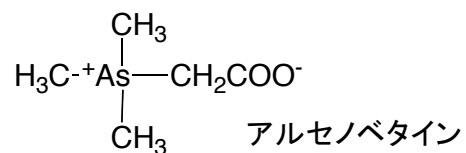
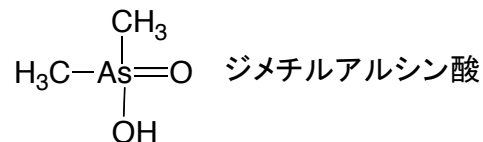


主なヒ素化合物

無機ヒ素化合物



有機ヒ素化合物



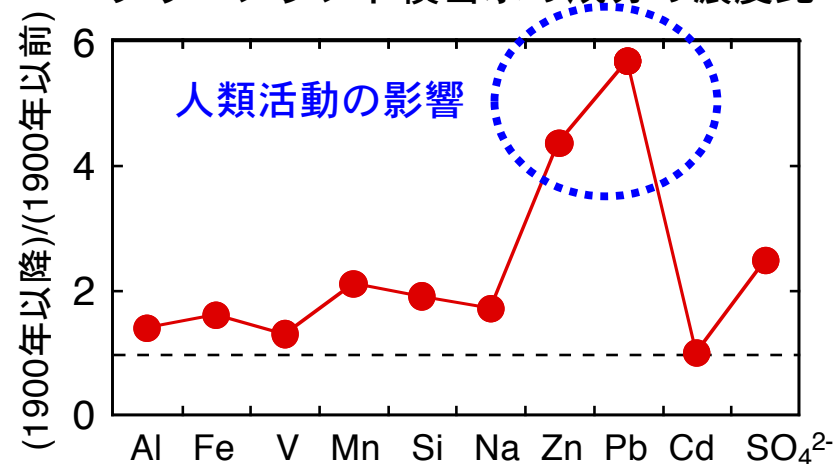
毒性: 無機ヒ素(3価) > 無機ヒ素(5価) > 有機ヒ素

魚介類: 無機ヒ素 → アルセノベタイン(無毒)



重金属による地球規模の汚染

グリーンランド積雪氷の成分の濃度比



付録：接頭辞

単語	記号	意味
Femto(フェムト)	f	10 ⁻¹⁵
Pico(ピコ)	p	10 ⁻¹²
Nano(ナノ)	n	10 ⁻⁹
Micro(マイクロ)	μ	10 ⁻⁶
Milli(ミリ)	m	10 ⁻³
Centi(センチ)	c	10 ⁻²
Hecto(ヘクト)	h	10 ²
Kilo(キロ)	k	10 ³
Mega(メガ)	M	10 ⁶
Giga(ギガ)	G	10 ⁹
Tera(テラ)	T	10 ¹²
Peta(ペタ)	P	10 ¹⁵