

大気・温熱・気圧

2024年4月15日

Minato Nakazawa, Ph.D.

<minato-nakazawa@people.kobe-u.ac.jp>

大気の温度, 気圧, 密度分布

▶ 地表高による層

▶ 対流圏：赤道では約17km,
極地方では約8kmまで

▶ 大気層：1~2 km

▶ 大気境界層

▶ 自由大気層

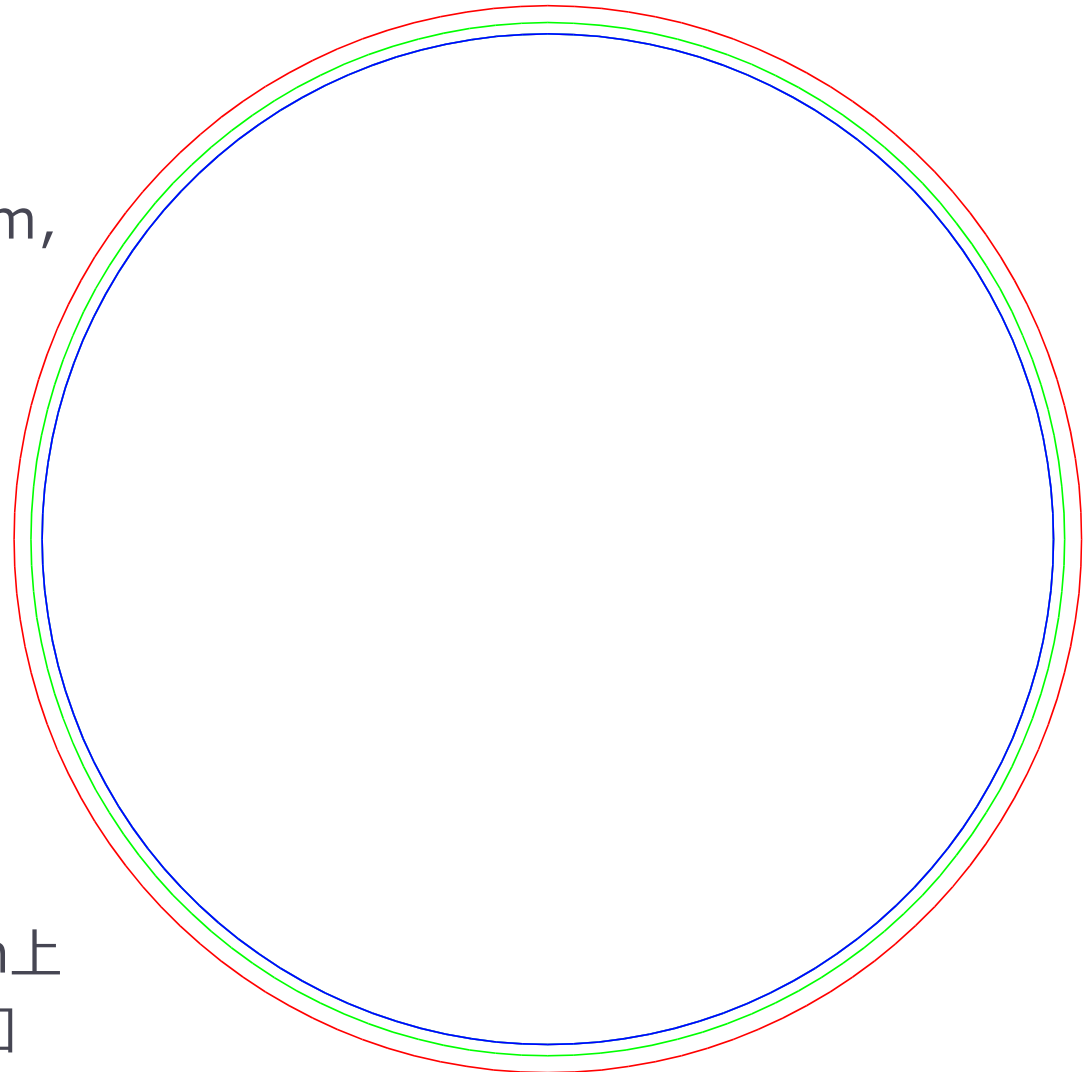
▶ 成層圏：対流圏の上,
地表から約50 km

(空気密度が約 1g/m^3 ,
気圧が約1 hPa) まで
オゾン層が約20~40km

▶ オーロラは100~200km上

▶ ISSは400 km上空を周回

▶ <https://www.youtube.com/watch?v=ANjy2RcEeGs>



物理的大気環境

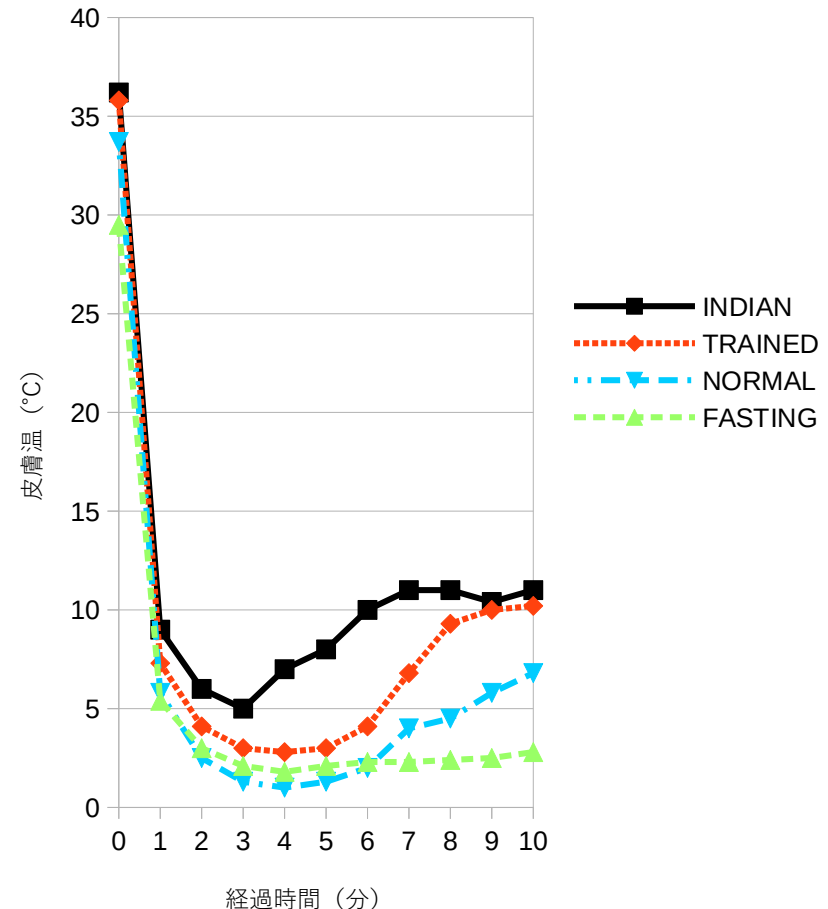
- ▶ 気温(temperature)
- ▶ 気湿(humidity)
- ▶ 気流(air current, air stream)または
気動(air movement)
- ▶ 熱輻射または熱放射(thermal radiation)
- ▶ 気圧(atmospheric pressure)
- ▶ 放射線または輻射線(radiation)→別の回に

気温(temperature)

- ▶ 緯度が1度上がると0.8°C下がる
- ▶ 対流圏では高度が1 km上がると5.5°C下がる
- ▶ 温度計で測定(アスマン通風乾湿計の乾球温)
- ▶ 常温動物は気温の変化に対応して産熱と放熱のバランスを取り体温の恒常性を保っている。保てないほど気温が変わると、高温では熱中症、低温では凍瘡、凍傷などの障害が起こる
 - ▶ ハンティング・リアクション(乱調反応, 寒冷血管反応)→右図参照
<https://doi.org/10.11227/seikisho1966.18.65>
 - ▶ <https://doi.org/10.1152/advan.00126.2014>
 - ▶ <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.02.009>
- ▶ 海女は一般の人に比べて低水温でも震えの出現が少ない
(cf.) <https://doi.org/10.1186/s40101-017-0146-6>

0°Cの水に浸したときの中指指尖の皮膚温の変化

(各群6名の平均値)



出典: 佐藤方彦『人間と気候: 生理人類学からのアプローチ』中公新書, 1987年より作図

気湿(humidity)

http://www.weather.co.jp/catalog_html/CYS-SY8.htm

▶ 大気中の水蒸気含量

▶ 絶対湿度 ($\text{H}_2\text{O g/m}^3$)

▶ 相対湿度

- 絶対湿度 / その温度における飽和水蒸気量 $\times 100$
- %単位。最大で100%。通常は相対湿度が
用いられる

▶ アスマン通風乾湿計 (右写真) の湿球温と乾球温から求める

▶ 湿度の身体影響

▶ 湿度が高いと水分や汗の蒸散が遅くなるので、放熱に影響がでる

▶ 通常は45~65%程度。80%以上で湿潤感、30%以下で乾燥感を感じることが多い
(ただし感覚は温度や風速とも関連する)。

cf.) 不快指数 = $0.81 \times \text{摂氏気温} + 0.01 \times \text{相対湿度} \times (0.99 \times \text{摂氏気温} - 14.3) + 46.3$



気流(air current)と気動(air movement)

- 気流: 大気の動き
 - 風: 地表面近くの水平方向の気流
- 気動: 室内の空気の動き
- **風向風速計**で測定する
 - 風速は10分間の平均(単位m/sec)。瞬間風速は0.25秒間隔測定の3秒間の平均値
- 気流や気動のヒトへの影響
 - 1 m/sec増えると体感温度がおよそ3°C下がる
 - 気象庁の「強風注意報」は概ね風速10m/sec超, 「暴風警報」は20m/sec超(地方により異なる)。
 - 概ね20m/sec超だと風に向かっては歩けない

<https://fieldpro.jp/wp-content/themes/fp2018/pdf/200-ws02.pdf>



熱輻射または熱放射(thermal radiation)

- 太陽や人工的な熱源から熱エネルギーが放射されること。
 - 太陽の熱放射 = 日射
 - 地上の輻射エネルギーの60%は赤外部（波長730～2300nmの光）, 39%は可視部（波長400～730nmの光）から得られる
- 黒球温度計で測定する

（注）光自体は電磁波

<https://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/32/32.pdf>



熱中症(1)～温熱環境への不適應の典型例

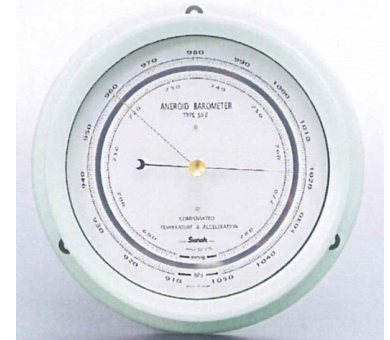
- 環境省「熱中症環境保健マニュアル」
https://www.wbgt.env.go.jp/heatillness_manual.php
- 日本生気象学会編
「日常生活における熱中症予防指針ver.3.1」
<https://seikishou.jp/cms/wp-content/files/yobousisin210603/20210604-114336.pdf>
- 定義「高温環境下で、体内の水分や塩分(ナトリウムなど)のバランスが崩れたり、体内の調整機能が破綻するなどして、発症する障害の総称」
- 死に至る可能性もあるが、予防可能であり、応急処置により救命可能
 - I度(めまい・失神, 筋肉痛・筋硬直, 大量発汗)
 - II度(頭痛, 吐き気等)
 - III度(意識障害・痙攣・手足の運動障害, 高体温)
という順で重症化。III度になると汗も出ないので外から冷やす必要

熱中症(2)～温熱環境への不応の典型例

- ヒトの体内環境は温度も電解質バランス(細胞内液と細胞外液のナトリウム, カリウム濃度勾配等)も狭い範囲に保たれており(=恒常性の維持), それができないと障害が起こる。ある程度の暑さまでは, 自律神経の作用で末梢血管が拡張し皮膚への血流が増すことで外気への熱伝導が起こったり, 発汗の蒸発による気化熱などで熱放散が可能。限界を超えた暑さだと放熱できなくなって体温が異常に上昇し, 脱水や低ナトリウム血症に陥り, 熱中症の症状を呈する(予防には局所冷却も有効)
- 目安としてWBGT(湿球黒球温度指数:日本では「暑さ指数」と呼ばれる)が重要。アウグスト温度計(自然の気流を受けるため)の湿球温(WB), 黒球温(GT), 乾球温(DB)から, 日射のある屋外では $0.7WB+0.2GT+0.1DB$ として, 屋内または日射のない屋外では $0.7WB+0.3GT$ として求める。運動指針として, WBGTが 31°C を超えたら原則として運動中止。 $28\sim 31^{\circ}\text{C}$ で嚴重警戒(激しい運動中止), $25\sim 28^{\circ}\text{C}$ で警戒(積極的休憩), $21\sim 25^{\circ}\text{C}$ で注意(積極的水分補給)という目安がある。
- 日本各地のデータが公開されている(<https://www.wbgt.env.go.jp/>)

気圧(atmospheric pressure)

- ▶ 空気の張力。単位は気圧(atm), mmHg, hPa
 - ▶ $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1013.25 \text{ hPa} \approx 1 \text{ kg重/cm}^2$
- ▶ 測定はアネロイド型気圧計等による(cf. 気象測器検定規則)
 - ▶ 五 液柱型水銀気圧計
 - ▶ 六 アネロイド型気圧計(気圧の変化により内部の圧力が安定している密閉容器(以下「気圧計用チャンバー」という。)が膨張又は収縮するという性質を用いて気圧を測定するものをいう。)
 - ▶ 七 電気式気圧計(気圧の変化により気圧計用チャンバーが膨張又は収縮してコンデンサーの静電容量又は共振部分の共振周波数が変化するという性質を用いて気圧を測定するものをいう。)
 - ▶ 八 ラジオゾンデ用気圧計
- ▶ 低地のヒトはほぼ1気圧下で生活し肺胞内の酸素分圧は101 mmHg。高地に行くと酸素分圧が下がるので高山病になることがある。ただし長くいると**高地適応**する。潜水中は高圧になるが、急に減圧すると血液中の窒素が発泡して空気塞栓を生じる(ケーソン病, 潜水病)



高地適応(次スライド参照)

- ▶ 生理的調節(physiological adjustment)
 - ▶ 血液の酸素分圧が低下(hypoxia)
 - 呼吸運動昂進(hyperventilation):初期はチェーン・ストークス型呼吸(cf. 睡眠時無呼吸症 sleep apnea)も見られ,呼吸昂進は1年ほど続く
 - ▶ 炭酸ガスが過剰放出され血液がアルカリ性に→腎機能昂進し尿中への重炭酸塩排出増加
- ▶ 高地馴化(acclimatization to high altitude)
 - ▶ 血液濃縮(RBC増加),肺の拡散能増加,右心室肥大,酸素解離曲線の右方シフト(ケチュア,海拔1,200mのシエルパ)
- ▶ 高地適応(adaptation to high altitude)
 - ▶ 酸素解離曲線の左方シフト(シエルパ)

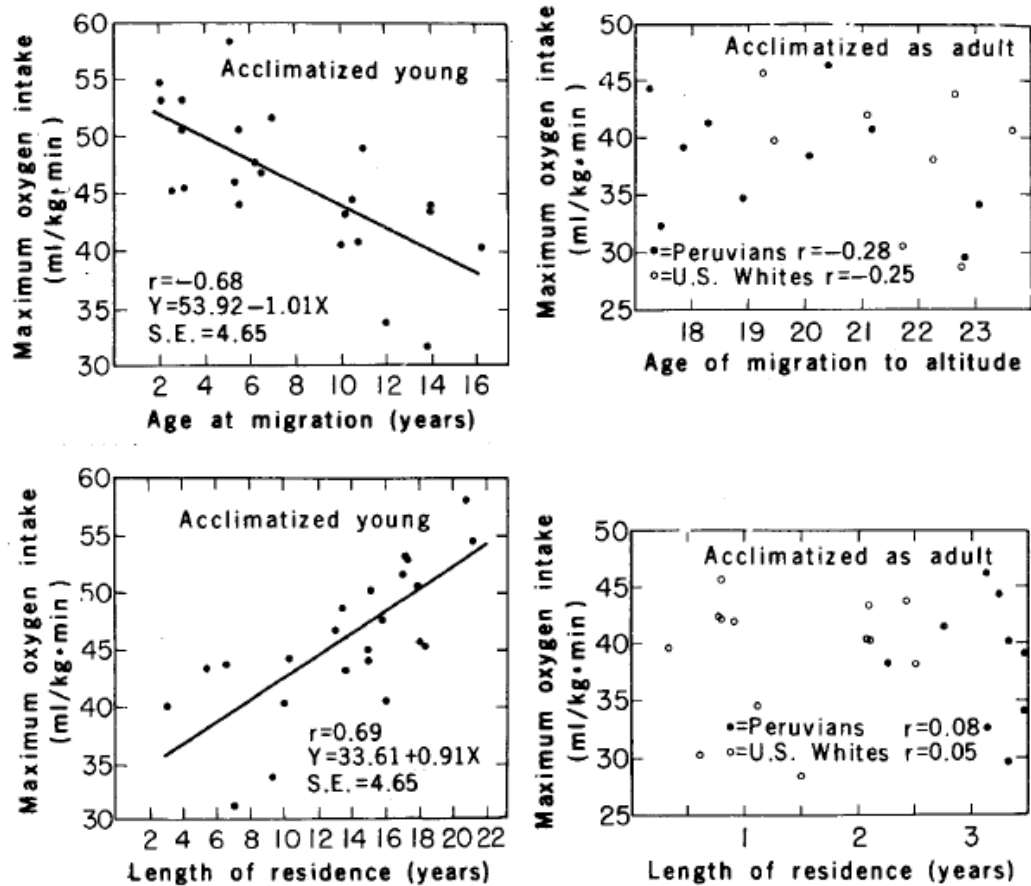


Fig. 1. Influence of developmental adaptation on aerobic capacity at high altitude. Among subjects acclimatized during the developmental period, age at migration and length of residency are significantly correlated with aerobic capacity, while this is not the case when the subjects are acclimatized as adults. Adapted from Frisancho et al. (1973).

Frisancho AR (1977) Developmental adaptation to high altitude hypoxia. *Int. J. Biometeor.*, 21: 135-146. <https://doi.org/10.1007/BF01553707>

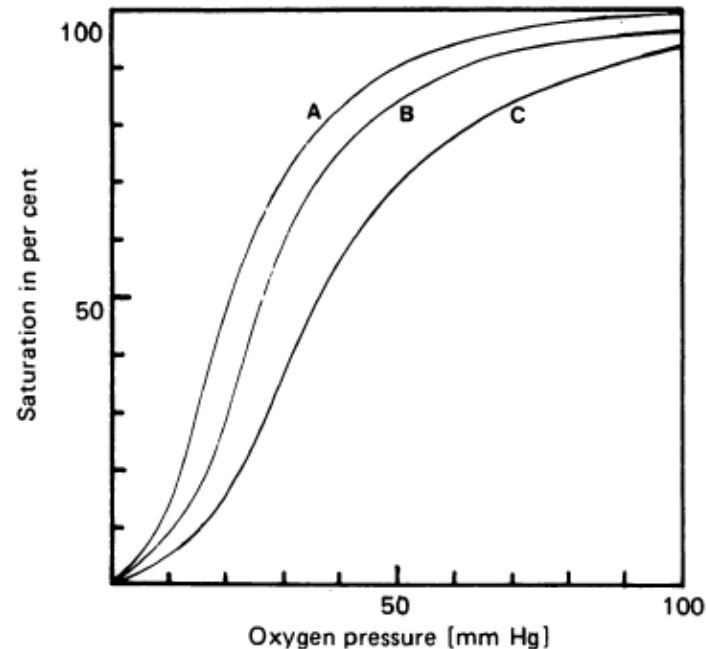


FIG. 2. Oxygen dissociation curves of blood of (A) Sherpas at high altitude; (B) Caucasians at sea level; (C) Sherpas at low altitude (1200 m above sea level). The Hill coefficient (n) calculated on blood of one Sherpa was 2.76.

Morpurgo G et al. (1976) Sherpas living permanently at high altitude: a new pattern of adaptation. *ProNAS*, 73: 747-751. <https://doi.org/10.1073/pnas.73.3.747>

化学的大気環境

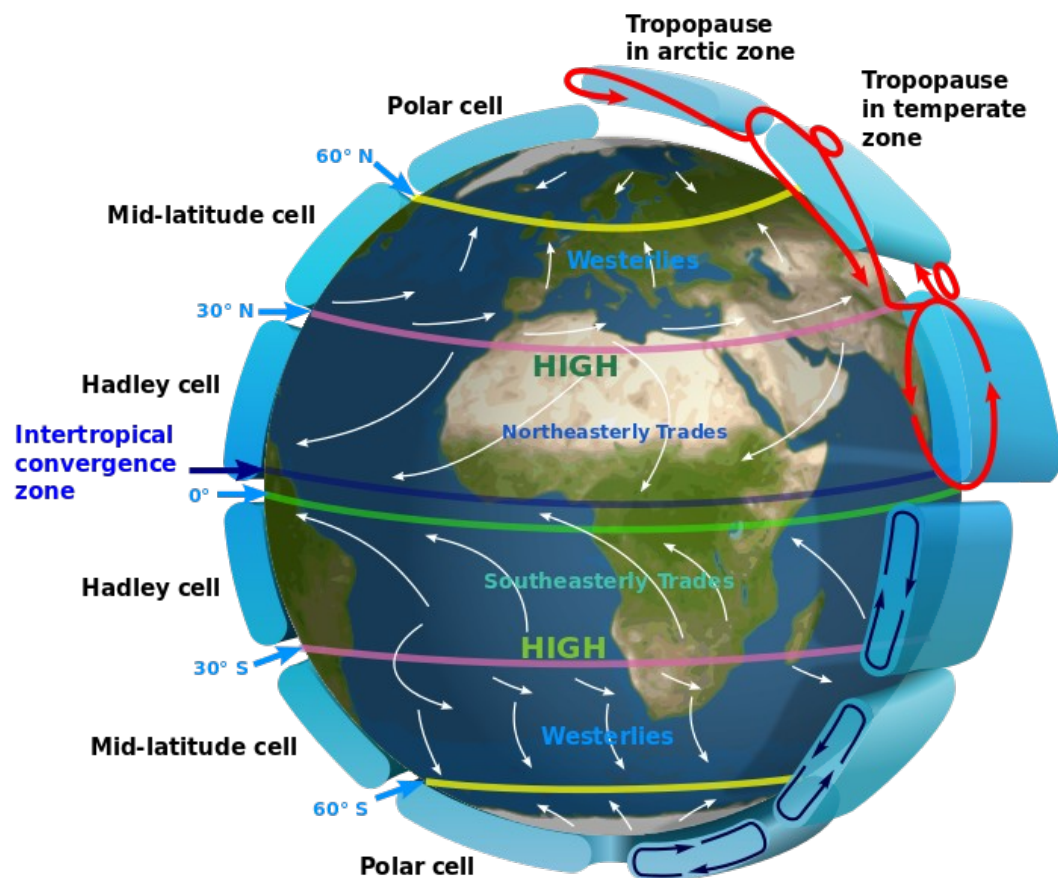
- ▶ 自然の大気の化学組成
 - ▶ 水蒸気を除いた乾燥空気では、窒素と酸素で99%以上
 - ▶ 残りの大部分はアルゴン
 - ▶ その他は0.04%
 - ▶ 二酸化炭素, メタン, 亜酸化窒素, オゾンなど
- ▶ 大気汚染物質
 - ▶ 二酸化硫黄, 二酸化窒素など, 人為起源の物質
- ▶ 水循環: 雲 → 降水 → 地表水 → 海 → 蒸発 → 雲
- ▶ 元素に注目すると, 炭素循環, 窒素循環など: 化学反応しながら生態系を循環

海面付近の乾燥した自然大気組成(容量比)

成分	%	ppm	
主成分	窒素(N ₂)	78.09	780900
	酸素(O ₂)	20.94	209400
少量成分	アルゴン(Ar)	0.93	9300
	二酸化炭素(CO ₂)	0.0318	318
微量成分	ネオン(Ne)		18
	ヘリウム(He)		5.2
	メタン(CH ₄)		1.3
	クリプトン(Kr)		1
	水素(H ₂)		0.5
	一酸化二窒素(N ₂ O)		0.25
	一酸化炭素(CO)		0.1
	オゾン(O ₃)		0.02
	アンモニア(NH ₃)		0.01
	二酸化窒素(NO ₂)		0.001
	二酸化硫黄(SO ₂)		0.0002

大気大循環による物質移動

- ▶ (cf.)岩坂泰信『空飛ぶ納豆菌:黄砂に乗る微生物たち』PHPサイエンス・ワールド新書, 2012年12月刊
- ▶ 大気大循環:緯度による熱収支の違いと地球の自転により大気が複雑に循環していること。南北方向には極循環, フェレル循環やハドレー循環, 東西方向には赤道貿易風や中緯度地方の偏西風(上空の強い偏西風がジェット気流と呼ばれる)
- ▶ 黄砂はタクラマカン砂漠で上空6 kmまで巻き上げられ, ジェット気流に乗って定常的に日本に到達するものと, ゴビ砂漠から上空2kmあたりを飛んでくる, 春に多いが夏は少ないものに分かれる。後者が大きな被害をもたらす



大気汚染(air pollution)

- ▶ WHOの大気汚染の定義「戸外の大気中に人工的に持ち込まれた汚染物質が存在し、その量や濃度や存続時間が地域住民のかなり多数の人々に不快感を引き起こしたり、広い地域にわたって公衆衛生上の危害や、人間、動植物の生活を妨害するようになっている状態」
- ▶ 産業革命以後に急増
- ▶ 室内空気の汚染も問題

大気汚染物質(air pollutants)の区分

- ▶ 気体(gas)と粒子状物質(particle matter)
- ▶ 一次汚染物質と二次汚染物質
 - ▶ 一次汚染物質:発生源から直接大気に排出(二酸化硫黄, 二酸化窒素など)
 - ▶ 二次汚染物質:大気中の化学反応で生成(光化学オキシダントなど)
- ▶ 滞留時間
 - ▶ フロンは45年程度かそれ以上
 - ▶ 二酸化炭素は7年程度
 - ▶ オゾンは対流圏で1~4ヶ月, 下部成層圏で1~2年
 - ▶ 二酸化硫黄や二酸化窒素は数日~1ヶ月以下

硫黄酸化物(sulfur oxides) SO_x

- ▶ 二酸化硫黄(SO₂), 三酸化硫黄(SO₃), 硫酸ミストの総称
- ▶ 化石燃料が燃焼するときや硫化亜鉛からの金属精錬で二酸化硫黄が生成
- ▶ 工場や火山から出る硫化水素(H₂S)が空気中で酸化され二酸化硫黄に
- ▶ 空気中で二酸化硫黄が酸化されると三酸化硫黄に
- ▶ 二酸化硫黄が紫外線で励起され, 三酸化硫黄になって水と反応して硫酸ミストに
- ▶ 二酸化硫黄のバックグラウンド濃度は0.2~1.7 ppb, 対流圏での滞留時間は数日

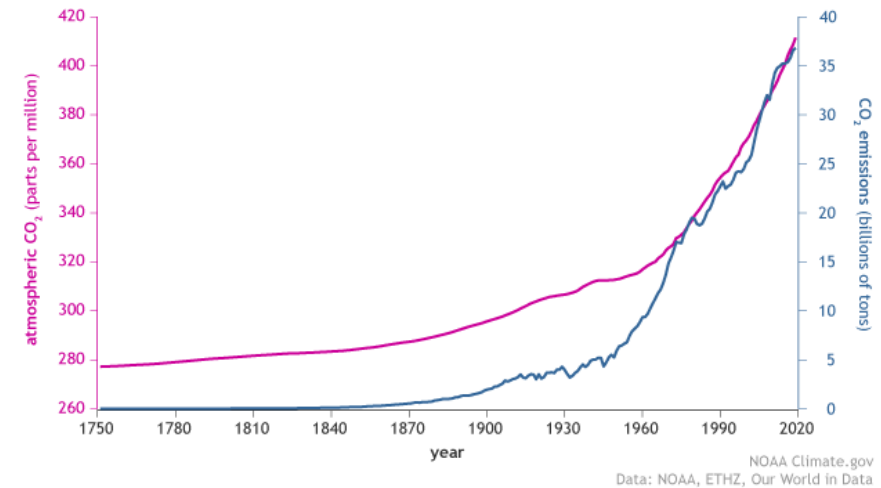
窒素酸化物(nitrogen oxides) NO_x

- ▶ 一酸化二窒素, 一酸化窒素(NO), 二酸化窒素(NO₂)などの総称
- ▶ 大気汚染物質としては主に一酸化窒素と二酸化窒素。バックグラウンド濃度は1~10 ppb, 滞留時間は数日~1ヶ月以下
- ▶ 生成経路は2通り
 - ▶ フューエルNO_x:化石燃料に含まれる含窒素成分が燃焼時に酸化
 - ▶ サーマルNO_x:空気中の窒素が高温燃焼時に酸化されて生成
- ▶ 最初に生成するのは主として一酸化窒素, 空気中で酸化して大部分が二酸化窒素に。大気上層部では双方向
- ▶ 一酸化二窒素は土壌細菌により生成。対流圏では安定無害
- ▶ 二酸化窒素の測定は, フィルムバッジまたはフィルタに吸着させ, 溶出させてからザルツマン法で発色させて定量→後期実習する

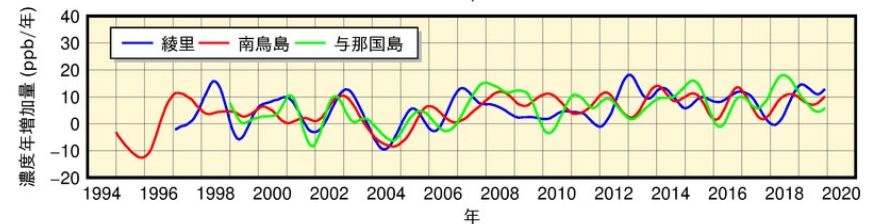
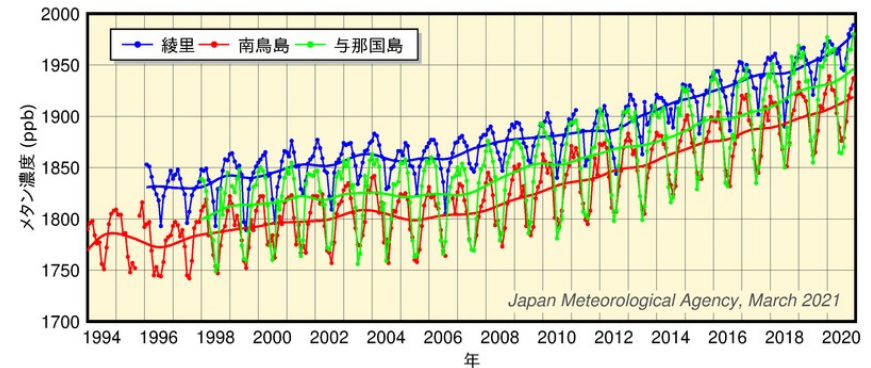
その他の気体(測定はガス検知管法や専用機器等)

- ▶ オキシダント: オゾン, PAN(パーオキシアシルナイトレート)などKI(aq)を加えるとIを生じる物質。そのうち, NO₂以外を光化学オキシダントと呼ぶ
 - ▶ オゾンのバックグラウンド濃度は地表で0.02ppm, オゾン層では3~6ppm。PANのバックグラウンド濃度は1ppb以下
- ▶ 二酸化炭素: バックグラウンド濃度約400ppm(最近は増加傾向, 右図参照)。海洋→大気→生物圏を約7年で循環
- ▶ メタン: 集約畜産の進展に伴い増加→温室効果
[http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/magazine/pdf/mgz09801\(5\).pdf](http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/magazine/pdf/mgz09801(5).pdf)
- ▶ 一酸化炭素: バックグラウンド濃度0.1ppm。不完全燃焼や成層圏でのメタンの酸化で生成
- ▶ 塩素, 塩化水素: バックグラウンド濃度1ppb以下。
- ▶ ハロカーボン: 冷媒としてのフロンなど。これまでに数百万トンが放出された。現在は特定フロンは製造なし
- ▶ 有害大気汚染物質(hazardous air pollutants)とくに生物に有害な物質。200種類以上がリストされているが, 大気汚染防止法で指定されているのは21物質(cf. ダイオキシン特措法)
- ▶ 悪臭物質(次の次のスライド)

CO₂ in the atmosphere and annual emissions (1750-2019)



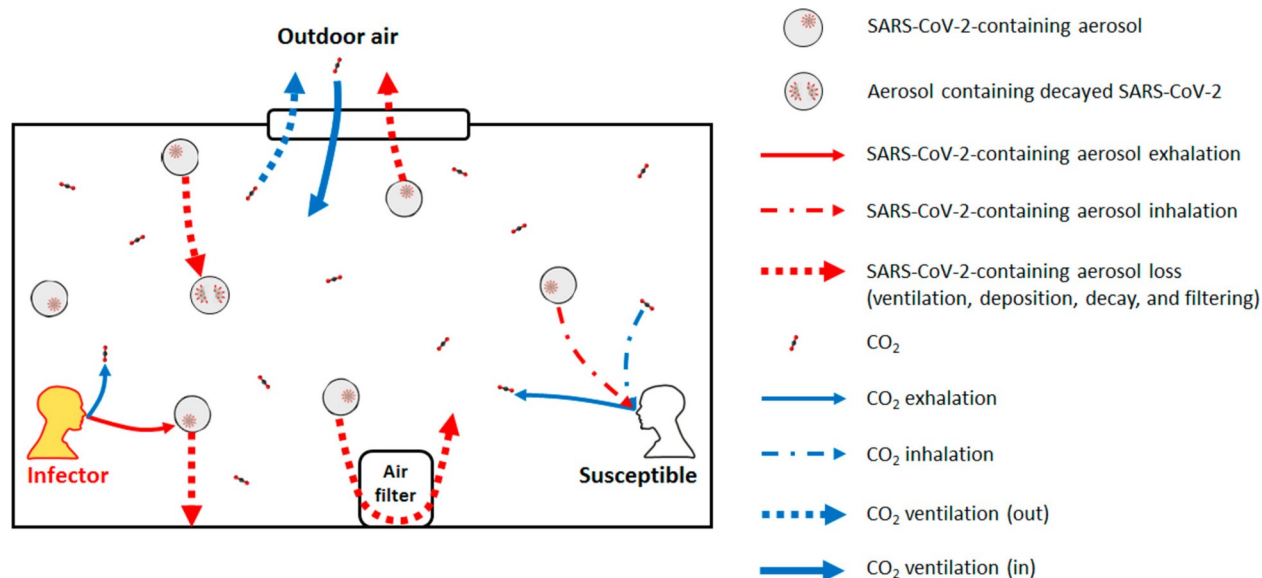
<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>



https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/ch4_trend.html

室内環境における二酸化炭素濃度

- 換気の指標となる(二酸化炭素分圧が高いことは酸素分圧が低い可能性が高いことも意味する)
 - 呼気が主な発生源である場合, エアロゾルと似た増え方をすると考えられるので, COVID-19感染リスクの代替指標となる(下図参照, 出典論文は下記URLで全文読める)
<https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00183>
 - CO2モニタとネットワーク
 - 機械: Pocket CO2 Sensor, プラチナマップAir
<https://chofu.keizai.biz/headline/3436/>
<https://sites.google.com/view/pocket-co2/>
<https://prtmes.jp/main/html/rd/p/000000018.000043899.html>
 - ネットワーク: ambient (<https://ambidata.io/>), 換気向上委員会 (<https://kanki-kojo.business.site/>), 等
- 消火装置事故の問題
 - https://news.tv-asahi.co.jp/news_society/articles/000213230.html
 - 外気中は約400ppm(0.04%)で, 3%程度までは顕著な影響はないが(それ自体の毒性は低い), 20%で致死
https://www.jstage.jst.go.jp/article/safety/37/5/37_352/_pdf



悪臭物質

悪臭物質	主要発生源事業場	敷地境界線における規制基準(ppm)
アンモニア	畜産農業, 鶏糞乾燥場, 複合肥料製造業, でん粉製造業, 化製場, 魚腸骨処理場, フェザー処理場, ごみ処理場, し尿処理場, 下水処理場等	1~5
メチルメルカプタン	クラフトパルプ製造業, 化製場, 魚腸骨処理場, ごみ処理場, し尿処理場, 下水処理場等	0.002~0.01
硫化水素	畜産農業, クラフトパルプ製造業, でん粉製造業, セロファン製造業, レーヨン製造業, 化製場, 魚腸骨処理場, フェザー処理場, ごみ処理場, し尿処理場, 下水処理場等	0.02~0.2
硫化メチル	クラフトパルプ製造業, 化製場, 魚腸骨処理場, ごみ処理場, し尿処理場, 下水処理場等	0.01~0.2
二硫化メチル	クラフトパルプ製造業, 化製場, 魚腸骨処理場, ごみ処理場, し尿処理場, 下水処理場等	0.009~0.1
トリメチルアミン	畜産農業, 複合肥料製造業, 化製場, 魚腸骨処理場, 水産缶詰製造業等	0.005~0.07
アセトアルデヒド	アセトアルデヒド製造工場, 酢酸製造工場, 酢酸ビニル製造工場, タバコ製造工場, 複合肥料製造工場, 魚腸骨処理場等	0.05~0.5
スチレン	スチレン製造工場, ポリスチレン製造・加工工場, SBR (耐衝撃性ポリスチレン)製造工場, FRP (強化プラスチック)製造工場, 化粧合板製造工場等	0.4~2

粒子状物質の区分

- ▶ 生成過程の違い: 粉じん(dust), フューム(fume), 煙(smoke), 霧(fog)
- ▶ 大気中の挙動の違い
 - ▶ 降下煤じん(粒径 $10\mu\text{m}$ 以上)
 - ▶ 浮遊粒子状物質(suspended particle matter=SPM)(それ以下)
 - ▶ PM10: 吸入性粉じん(respirable dust)
 - ▶ PM2.5: 有害物質も多く, 喘息や気管支炎を生じやすい
 - ▶ ナノ粒子
- ▶ 測定法: フィルタ+ポンプによる秤量または自動測定機
- ▶ サイズの違い(実際の大気中の粒子状物質のサイズ分布は二峰性)
 - ▶ 粗粒子(course-mode particle): 粒径数 μm ~数十 μm : 土壌, 路面由来の粉じん, タイヤ由来, 工場粉じん, 花粉など。数時間以内に沈降, せいぜい数十km以下の移動
 - ▶ 微小粒子(fine-mode particle): 粒径 $1\mu\text{m}$ 以下: 燃焼由来, とくにディーゼル粉じん(diesel exhaust particle=DEP)。大気中半減期が数日から数週間, 数百km以上移動

PM2.5について

- PM2.5とは、粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の微粒子のことで、人が吸い込むと肺の奥まで入り込みやすく、肺がん、呼吸器、循環器への悪影響が懸念されている。一次粒子と二次粒子からなり、成分としては様々な物質や微生物を含む。
- 日本気象協会による分布予測は、独自気象予測モデル SYNFOSSと米国環境保護庁(EPA)が中心となり開発を進めている化学輸送モデルCMAQの組み合わせ。東アジア対象
 - 全国[<https://tenki.jp/pm25/>]、兵庫県[<https://tenki.jp/pm25/6/31/>]
- 神戸市のPM2.5のページ
<https://www.city.kobe.lg.jp/a66958/kurashi/recycle/kankyohozen/air/pm25.html>
- 兵庫県の注意喚起
<https://www.kankyo.pref.hyogo.lg.jp/taiki/pm25alert/index.html>
- 論文
 - 伏見ら(2011) https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/46/2/46_2_84/_pdf
* 大気環境学会誌に掲載されているレビュー論文
 - Li et al. (2023) <https://www.nature.com/articles/s41598-023-43119-5>
* 虚血性脳卒中との関係を示している。Scientific Reports
 - Sharma et al. (2020) <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00155-3>
* 健康影響についてのレビュー論文