

地球環境論（地球の現在・過去・未来） 資料

宇部フロンティア大学 松本治彦

はじめに

最近の新聞の見出しを見ると、例えば「燃料電池車の発売」「最近、冬が寒いのはなぜ？」「彗星の気体から有機物？」「無人飛行機（ドローン）・電気飛行機？」「メタンハイドレートの埋蔵量は？」「エルニーニョとラニーニャ？」「北極振動・偏西風蛇行」「炭素社会から水素社会に」「PM2.5 ってなに？」「ナノマシン？」「宇宙太陽光発電？」などの記事が載っています。これらの内容をどのように理解すればよいのか？難しい世の中になりました。「理系の人間だからこれくらいのことは理解しているでしょう」とか、「文系の人間だから知らなくて当然です」と言いたくなるかもしれませんが、今の社会では、これら情報の理解度と真偽の判断が、各人のその後の人生に影響を及ぼすことがあります。

そこで、この授業では、受講する皆さんが地球の環境（地球の現在・過去・未来）について考える際に、知っておくべき自然科学系の話をします（もちろん、社会科学系の話もします。文系・理系の枠を超えた視点にチャレンジしています）。この授業の最も重要なことは「事実と意見」の区別と「時間と空間のスケール」を常に考えながら話を聞いていただくことです。なるべく、数式や化学式を使わないように話していきますが、これらを利用する際には、基本的な話からはじめて、理解しやすいように工夫をしています。この授業の受講後は、新聞で毎日のように取り上げられている自然科学系（地球の環境も含めて）の記事の内容がある程度、理解できるようになることを期待しています。

1 回「地球の歴史、何がわかっているの？そして、未来は？」

キーワード；【事実と意見の区別】【科学の特徴】【時間と空間のスケール】【授業概要】【参考図書の紹介】

【事実と意見の区別】

レポート・論文などを書くとき、第 1 に必要なことは、「事実と意見」を区別して取り扱うことです。例えば、アメリカの 5 年生の国語の教科書には次のようなくだりが書いてあります。

ジョージ・ワシントン
ジョージ・ワシントンは米国の最も偉大な大統領であった。

ジョージ・ワシントンは米国の初代大統領であった。

という 2 つの文が並び、どちらの文が事実の記述か、もう一つの文に述べてあるのはどんな意見か、事実と意見とはどう違うのか、とたずねています。（レポートの組み立て方から抜粋して改変）

事実とは、証拠をあげて裏付けすることができるものです。意見というのは何事かについてある人が下す判断です。他の人はその判断に同意するかもしれないし、同意しないかもしれないのです。

【科学の特徴】

宇宙の姿は、人類がどのように考え、また、その考え方を確かめるためにどのような観測や研究を行い、その結果を基にしてさらにまたどのように考え、その新たな考えを確かめるためにどのような観測や研究を行い、という理論（考え方）と実験（観測）の両輪を使って、先人たちが、自分たちの行ったこともないこの広大な宇宙を、これほどまでに克明に解明してきました。

科学の特徴は「書き換えられる」ということです。例えば、文学作品は、完成した後に世に出るため、書き換えられることはありません。しかし、現在も進みつつあるこの世界に生きている我々は、すべての物語が終わった後に歴史を見ているわけではないのです。今この瞬間にも、科学の歴史は作られているのです。科学では、これまで正しいとされていたことが、どんどん書き換わっていきます。それが、むしろ自然なのです。だから、

科学の世界では、本当に価値のあることは、知識なり情報なりの「結果」ではなく、それらをいかにして得たかという「過程」のほうです。結果は書き換えられても、過程はそうではない。そこで得られた「考え方」や「やり方」は、無駄になることなく、それらを踏まえて再び考えることで、新たな「考え方」や「やり方」に発展させることができます。科学では、結果よりも過程のほうが魅力的で貴重なのです。そして、この過程（考え方）は、宇宙に限らず、様々なことを考えるときにも活用できるのです。（すごい宇宙講義から抜粋して改変）

素粒子物理学の世界では、「素粒子が存在する兆候をとらえた」というためには、その確率が 99.9%以上である必要があります。また、「新粒子を発見した」とするためには、99.9999%以上まで、その確率を上げることが必要なのです。LHC で加速された粒子を高エネルギーで衝突させ、生成される粒子や現象を見るために設計された粒子検出器は二つあります（アトラスと CMS）。同様の実験を 2 つのグループが行っている理由は、1 つの測定結果だけでは科学的には信用されないからです。ダブルチェックすることが必要なのです。アトラスから生み出されるデータは 1 年間で約 3200 テラバイト、このデータを CD-R にコピーして積み上げると、7 km、活字の本に書き込むと 30 億冊。アトラスの実験には世界 38 か国の科学者約 3000 人が参加しています。

物質の基本的なものは現在、クォークとされていますが、だれもこれを単独で取り出すことに成功していません。しかし、素粒子物理学者は、クォークの実在を疑っていない。なぜなら、この存在を仮定すると、発見された（確率的な数値に基づいているが）たくさんの素粒子の存在理由や、個々の素粒子の性質、それらの相互作用の仕方など、確立された物理学の基本理念を損なうことなく説明できるからです（ヒッグス粒子と宇宙創成より抜粋して改変）。

「見つかった」と気持ちよく断言できないのは、どんな現象でも、所詮は確率でしか表現できないからです。実験で得られたデータは偽物かもしれない？我々はそういう可能性を常に考える必要があるのです。実験には、「ノイズ」と呼ばれる目的外の信号がつきもので、本当に欲しい信号はそれに隠れているものなのです。その信号が本物であるかどうか、ノイズの中での「埋もれ具合」を計算して、どれくらいの確率で本物なのか、定量的に評価するのです。

【宇宙に関する最近の研究状況】

- 過去 20 年間で、宇宙に関する研究が急激に進み、宇宙観は大きく変化
- 宇宙マイクロ波背景放射とは、生まれて間もない高温の宇宙で発せられた光の残照、宇宙誕生から 30 年後以降のものは残っている。
- 宇宙の温度は下がり続けている
- 宇宙の年齢は 137 億 2 千万歳（有効数字）
- 2013.3.22 日経 宇宙は 138 億歳？
- 2015.2.9 日経 宇宙暗黒時代、1 億年長い？
- 4 千億個の銀河
- 仮想粒子の存在（測定不可能な短時間に出現しては消滅する粒子のこと）
- 多宇宙の可能性

【時間と空間のスケール】

例えば、現在からさかのぼると、宇宙の誕生と人間の誕生を同列の時間スケールで考えるのが正しいのか、クォークと銀河の単位を同列で考えるのが正しいのか？

1 メートルは人間の大きさ、10 億メートルは月の軌道、10 億×10 億メートルは銀河の大きさ、10 億×10 億×10 億メートルは光で見える宇宙の果てとなります。

一方、10 億分の 1 メートルはナノ・サイエンス、(10 億×10 億) 分の 1 メートルは素粒子の標準モデルとなります。

光の速さは有限です。例えば地球から太陽までは光速で 8 分かかるので、我々が見ている太陽の姿は 8 分前の太陽、250 万光年先のアンドロメダ銀河は 250 万年前の光が地球に届いているのです。

科学技術の分野では、いまや物質をナノメートルのレベルでコントロールする時代を迎えています。素粒子加速器は「(10 億×10 億) 分の 1 メートル」よりも小さな世界で起きる現象を観察できるのです。つまり、ナノレベルの世界でさらにナノテクノロジーをやっているようなものなのです（重力とは何かより抜粋して改変）。

- 10 億年、1 億年、1 千年、100 年、10 年単位でデータの見方は異なる。
- 平均値の見方、どの地域の値を平均しているのか、見極めることが必要。
- 気候変動は、北極、南極、赤道、中緯度で状況は異なる。

【基本単位を知る】

大きな数と小さな数の接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^3	キロ	k	10^{-9}	ナノ	n
10^{21}	ゼタ	Z	10^2	ヘクト	h	10^{-12}	ピコ	p
10^{18}	エクサ	E	10^1	デカ	da	10^{-15}	フェムト	f
10^{15}	ペタ	P	10^{-1}	デシ	d	10^{-18}	アト	a
10^{12}	テラ	T	10^{-2}	センチ	c	10^{-21}	セプト	z
10^9	ギガ	G	10^{-3}	ミリ	m	10^{-24}	ヨクト	y
10^6	メガ	M	10^{-6}	マイクロ	μ	10^{-9}	ナノ	n

マクロワールドとは、ミクロン（1000 分の 1mm）以上の世界

宇宙（銀河、ブラックホール、惑星、恒星、彗星）、蒸気機関、自動車、自転車、バイク、大砲の弾、羽毛、砂、小石、動物、植物、微生物、ヒトなど

ミクロワールドとは、ナノメートル（100 万分の 1mm）以下の世界

分子、原子、原子核、素粒子、光子、陽子、中性子、電子、陽電子など

ミドルワールドとは、マクロワールドとミクロワールドの間の世界

細胞（DNA、RNA、タンパク質、ミトコンドリア、リボソーム、分子モーター）、ウイルス、バクテリア、筋肉（アクチン、ミオシン）、天然樹脂（ガンボージ、シェラック、ゴム）、合成高分子（シャンプー、リンス、界面活性剤）、石鹸、ミルクに浮かぶ脂肪の粒など

【授業概要】

1 回「地球の歴史、何がわかっているの？そして、未来は？」【事実と意見の区別】【科学の特徴】【時間と空間のスケール】【授業概要】【参考図書の紹介】

2 回「宇宙の始まり」【自然の大きさ】【質量と重さ】【素粒子】【電磁波】

3 回「地球の誕生・生物の誕生」【年代測定】【ウイルスとの共生】【光合成生物】【カンブリア爆発】【スノーボール・アースイベント】

4 回「人間社会の形成」【ヒトの進化】【人間活動】【自然生態系と人工生態系】

5 回「熱収支と四季」【太陽放射と地球放射】【温室効果】【1 日の最高気温は何時？】【1 年で最も寒い月は？】

6 回「水と大気の大循環」【大気の鉛直構造】【温度とは？】【大気の大循環】【海洋の深層大循環】

7 回「森林消失と生物種絶滅」【熱帯林の破壊】【乾燥地帯の農業】【再生への対処法】

8 回「オゾン層破壊・PM2.5」【紫外線】【オゾンとフロン】【オゾンホール】【PM2.5 とは？】

9 回「温暖化モデルと IPCC」【カオス】【IPCC の作業原則】【予防原則】【最近の気温は？】【私の見解】【天気予報】

10 回「間氷期・氷期サイクルと太陽活動」【氷期サイクル】【ミランコビッチサイクル】【太陽活動の異変】

11 回「海洋・大気の周期的変動」【北極振動】【太平洋・大西洋の振動】【偏西風の蛇行】【エルニーニョ・ラニーニャ・南方振動】【黒潮の蛇行】

12 回「化石燃料から再生可能エネルギーへ」【石油・石炭・天然ガス】【シェールガス】・【メタンハイドレート】【水力】【バイオ燃料】【地熱】【太陽電池】【風力】【波力】【原子力】

13 回「炭素社会から水素社会に」【燃料電池】【水素発電所】【水素ステーション】【人工光合成】

14 回「未来予測」【2050 年までの取り組みが大事】【宇宙のこと】【イノベーション加速】【人口予測】【遺伝子工学】【コンピュータ・ロボット技術】【軌道エレベータ】【ナノマシン】【レプリケーター】【テラフォーミング】

15 回「まとめ」

この授業の見どころ！

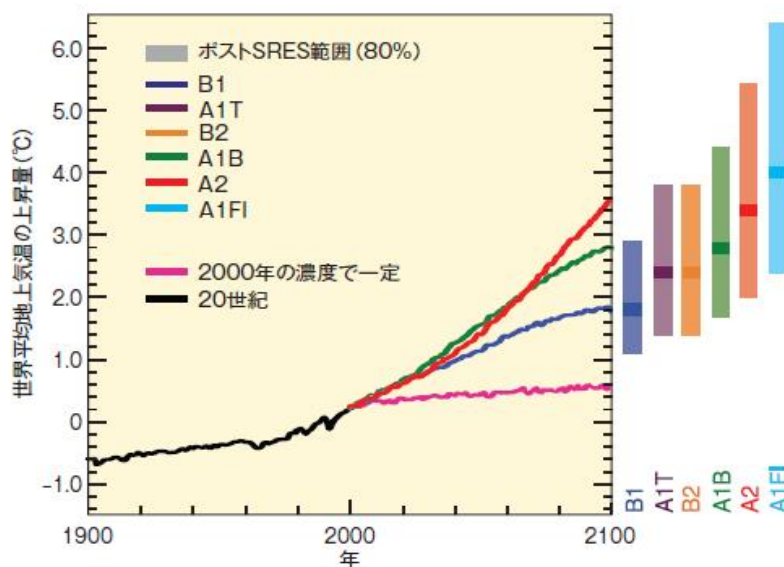
「地球のこと、どこまでわかっているの？」

- 地球の年齢；約 45.5 億年、生命誕生；何時、どの様にして誕生したか？現在は氷河時代(間氷期)！
- 2013.3.17 (海洋研究機構) マリアナ海溝、10,900m泥の中で発見 (原始的微生物の活発な活動)
- 乏しい栄養環境に適応した生態系の存在
- 従来説は、「深海ほど生物活動不活発」
- 生命起源の解明のカギ、「極限環境の生物の理解」につながる
- 地下生命圏、その規模は、地表の生物圏に匹敵？初期地球の隕石爆発の影響から逃れた子孫？
- カンブリア爆発；約 5 億年前、現存する全動物門が突然出現。
- このとき何が生じたのかはよく分かっていない。地球史研究における最重要課題。
- スノーボールアース・イベントのアリノアン氷河時代 (約 6 億 6500 万年～6 億 3500 万年前) の直後

生命誕生、どこで？



IPCCの予測



IPPC とは、

- 温暖化の科学的知見取りまとめ国連組織。
- 世界中の科学者がボランティアで参加。
- 学術論文を調べ、温暖化で何が分かって何が分かっていないかを、詳しく評価した報告書作成。
- 報告書は専門家・政府関係者チェックで修正。
- 最後に各国政府代表者が集まり、報告書の要約を一文一文承認し報告書完成。これが IPCC が「政府間パネル」と呼ばれる理由。

IPCC の作業原則とは、

- 定義されている役割は、包括的、客観的、オープンで透明な基礎に立ち、人間により引き起こされる気候変動のリスクに科学的基礎、その潜在的な影響および適応と緩和のオプションの理解に関連する科学的、技術的、社会経済的な情報を評価すること。
- 予測は正しいのか？
- 気候モデル研究者、モデルが不完全と認識。信頼性の指標として不十分。
- より定量的で、できるだけ客観的な信頼性のある情報が必要。
- 予測の不確かさを定量化の試み、研究途上。
- 予防原則は、環境に重大かつ不可逆的な影響を及ぼす恐れがある場合、科学的に不確かであっても規制措置を取るといった考え方。

100年間の無黒点日数ランキング

年	無黒点日数
1913	311
1901	287
1878	280
2008	266
2009	261
1902	257

炭素から水素社会に

- 燃料電池などの水素エネルギーは石油を不要にする
- 発電コストは、すでに石油火力よりも安く、将来的には天然ガスと同等になる
- 水素エネルギーが実用化された時、石油の時代は終わる

2050 年ごろのエネルギー（人工光合成の開発が進めば、下記の実現は大幅に早まる）

- 地熱発電
- 太陽光発電（家庭用中心）

- ・ 燃料電池（家庭用発電、水素を直接燃料に）
- ・ 波力、風力発電を使って水素を貯蓄する
- ・ 燃料電池車（水素を燃料とする）
- ・ スマートグリッドを使い、家庭用で電力が余った場合は、水素を作って貯蓄し、家庭用発電、車への燃料とする

核廃棄物が貴金属に（中性子をぶつけ元素を変換）？

【参考書の紹介】

この図書リストは、私が「地球の現在過去未来（地球環境論）」の講義の参考になっている図書の一部です。購入する必要はありません。

- ・ 新石油文明論、槌田敦、農山漁村文化協会、2004.
- ・ 資源物理学入門、槌田敦、日本放送協会、1985.
- ・ 土壌圏と地球環境問題、木村真人、名古屋大学出版会、1997.
- ・ 熱帯土壌学、久馬一剛、名古屋大学出版会、2001.
- ・ 中世のかたち（日本の中世1）、石井進、中央公論社、2002.
- ・ 倭国誕生（日本の時代史1）、白石太一郎、吉川弘文館、2002.
- ・ 環境と歴史、石弘之ほか、新世社、1999.
- ・ 地球倫理へ（21世紀問題群ブック6）、松井孝典、岩波書店、1995.
- ・ やさしい気象教室、島田守家、東海大学出版会、1997.
- ・ 地球物理概論、小嶋稔、東京大学出版会、1990.
- ・ 宇宙・物質・生命、高橋光一、吉岡書店、2004.
- ・ **気候温暖化の原因は何か、桜井邦朋、御茶の水書房、2003.**
- ・ 夏が来なかった時代、桜井邦朋、吉川弘文館、2003.
- ・ 気候変動（多角的視点から）、W.J.バローズ著、松野太郎監訳、シュプリンガー・フェアラーク東京、2003.
- ・ 一般気象学、小倉義光、東京大学出版会、1988.
- ・ フロン、富永健ほか、東京大学出版会、1990.
- ・ 成層圏オゾン、島崎達夫、東京大学出版会、1989.
- ・ 環境社会学、嘉田由紀子、岩波書店、2002.
- ・ 地球生態学、和田英太郎、岩波書店、2002.
- ・ 環境学序説、竹内和彦ほか、岩波書店、2002.
- ・ 環境ガバナンス、松下和夫、岩波書店、2002.
- ・ 都市環境論、花木啓祐、岩波書店、2004.
- ・ **未来のたね、アイリックニュート、NHK出版、2001.**
- ・ 量子進化、ジョンジョーマクファデン、共立出版、2005.
- ・ Atmosphere-ocean Dynamics、Adrian E.Gill、Academic Press、1982.
- ・ 最新・月の科学、渡部潤一、日本放送出版協会、2008.
- ・ 地球システムの崩壊、松井孝典、新潮社、2007.
- ・ 食料と環境、大賀圭治、岩波書店、2004.
- ・ ナノフューチャー21世紀の産業革命、J.ストーズ・ホール、斉藤隆史訳、紀伊国屋書店、2007.
- ・ 日本人はなぜ環境問題にだまされるのか、武田邦彦、PHP新書、2008.
- ・ リサイクル幻想、武田邦彦、文藝春秋、2008.
- ・ 気候と人間の歴史・入門[中世から現代まで]、E・ル＝ロワ＝ラデュリ、稲垣文雄訳、藤原書店、2009.
- ・ 一つの地球一つの未来、米国科学アカデミー編、富永健訳、東京化学同人、2000.
- ・ **ミドルワールド動き続ける物質と生命の起源、マーク・ハウ、三井恵津子訳、紀伊国屋書店、2009.**
- ・ 千年前の人類を襲った大温暖化、ブライアン・フェイガン、東郷えりか訳、河出書房新社、2008.
- ・ **地球環境 46億年の大変動史、田近英一、化学同人、2010.**

- ・ 地球温暖化の予測は「正しい」か？不確かな未来に科学が挑む、江守正多、化学同人、2010.
- ・ 繁栄（上・下）、マット・リドレー、早川書房、2010.
- ・ 破壊する創造者、フランク・ライアン、早川書房、2011.
- ・ 科学の未来、フリーマン・ダイソン、みすず書房、2006.
- ・ 温度から見た宇宙・物質・生命、ジノ・セグレ、講談社、2004.
- ・ 重力とは何か、大栗博司、幻冬舎、2012.
- ・ 大気の世界、ガブリエル・ウォーカー、早川書房、2008.
- ・ 図解気象学入門、古川武彦・大木勇人、講談社、2011.
- ・ 放射性物質の正体、山田克哉、PHP、2012.
- ・ セミたちと温暖化、日高敏隆、新潮文庫、2010.
- ・ データで検証・地球の資源、井田徹治、講談社、2011.
- ・ エネルギー進化論、飯田哲也、ちくま新書、2011.
- ・ 科学と人間の不協和音、池内了、角川書店、2011.
- ・ パラドクスだらけの生命、アンドレアス・ワグナー、青土社、2010.
- ・ 植物はすごい、田中修、中公新書、2012.
- ・ DNA 上・下、ジェームス・D・ワトソン、講談社、2010.
- ・ 生物多様性＜喪失＞の真実、ジョン・H・ヴァンダーミアー他、みすず書房、2010.
- ・ 宇宙が始まる前には、何があったのか？、ローレンス・クラウス、文藝春秋、2013.
- ・ すごい宇宙講義、多田将、イースト・プレス、2013.
- ・ 太陽に何が起きているのか、常田佐久、文藝春秋、2013.
- ・ 統計学が最強の学問である、西内啓、ダイヤモンド社、2013.
- ・ 生命の起源―地球が書いたシナリオ、中沢弘基、新日本出版、2006.
- ・ 階層構造の科学―宇宙・地球・生命をつなぐ新しい視点、坂口秀他編、東京大学出版会、2008.
- ・ 太陽系の化学―地球の成り立ちを理解するために、海老原充、裳華房、2010.
- ・ 科学技術をよく考える、伊勢田哲治他編、名古屋大学出版会、2013.
- ・ 統計学が最強の学問である「実践編」、西内啓、ダイヤモンド社、2014
- ・

2回「宇宙の始まり」

【自然の大きさ】

10億ごとのステップ

- ・ 10億×10億×10億メートル；光で見える宇宙の果て
- ・ 10億×10億メートル； 銀河の大きさ
- ・ 10億メートル； 月の軌道
- ・ 1メートル； 人間の大きさ
- ・ 10億分の1メートル； ナノ・サイエンス
- ・ (10億×10億) 分の1メートル；素粒子の大きさ（クォーク）

宇宙を膨らませているのは何か？

- ・ 宇宙がリンゴまで膨れ上がり、いったん止まり、余ったエネルギーがその中に溜まる。それが潜熱となってビックバンの原因に。
- ・ 潜熱は、物質が気体、液体、固体と状態を変える境目で、吸収・放出される熱のこと。
- ・ ビックバンは、宇宙に溜まった潜熱の一押しで起こったと考えられている。

図表20 宇宙創成と素粒子

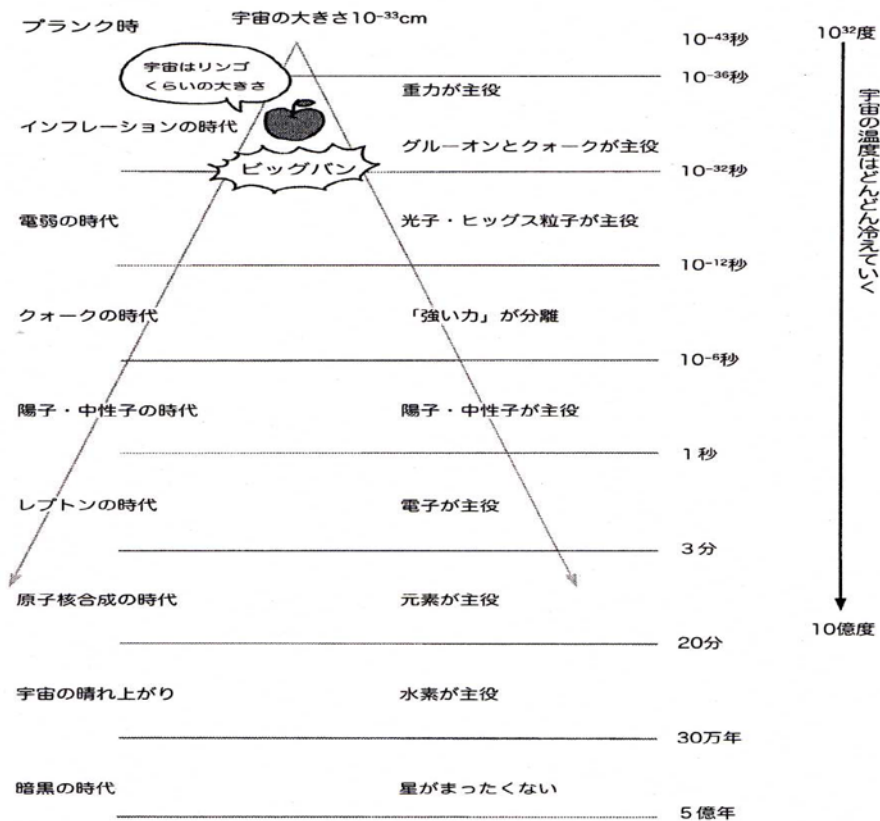
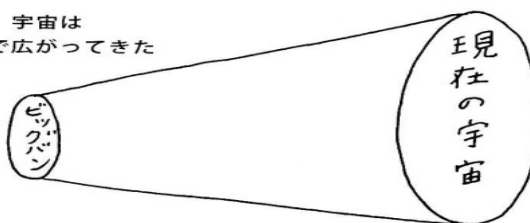


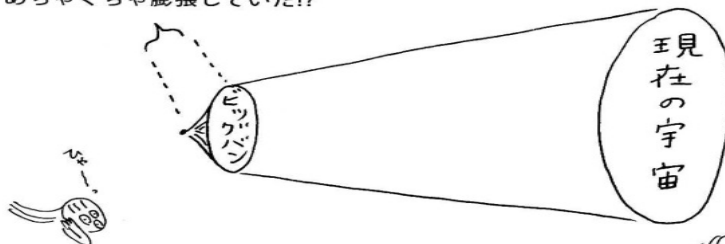
図52 * インフレーション理論

ビッグバン以降、宇宙は
一定のスピードで広がってきた



と... 3 分... ..

ビッグバンの直前に、一瞬のうちに
めちゃくちゃ膨張していた!?



宇宙誕生から
 10^{-36} 秒 ~ 10^{-34} 秒の間に
宇宙は 10^{30} 倍に膨らんだはず...

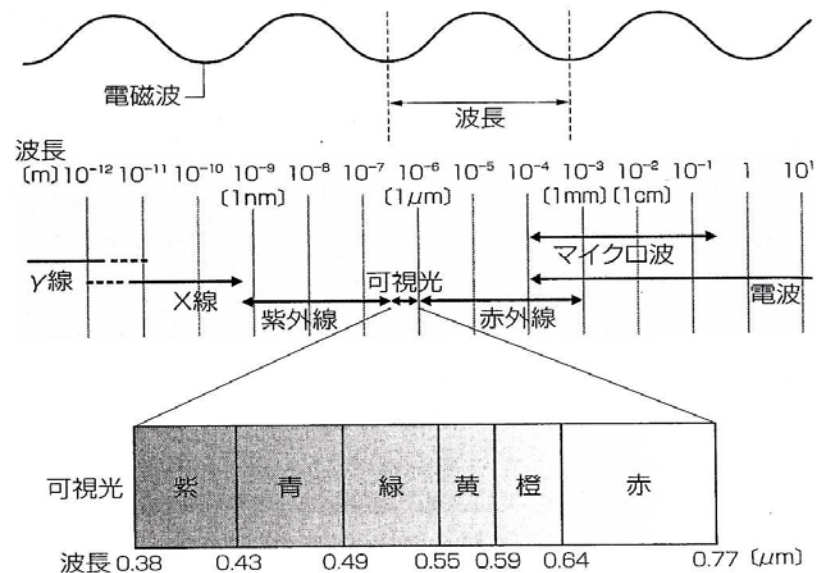


佐藤勝彦

電磁波とは

- 電気のあるところには、電界が発生。電気を使って電流が流れると、磁界が発生。この「電界」と「磁界」を合わせて「電磁界」といいます。そして、電界と磁界が相互に作用し合って空間を伝わっていく「電磁界」の波を電磁波といいます。
- 太陽光線、テレビの放送波など

電磁波（光、放射線、電波など）



電磁波の種類と用途			
周波数 (Hz:ヘルツ)	種類		用途
10^{22}	電離放射線	γ 線	医療 材料検査
10^{20}		X線	医療 材料検査 X線写真
10^{16}	電磁波	光	紫外線
10^{14}			可視光線
10^{12}			赤外線
10^{10}			遠赤外線
10^8		電波	サブミリ波
10^6			ミリ波
10^4			センチ波
10^2			極超短波
100			超短波
10			短波ラジオ
			中波
			長波
			超低周波

電波防護指針 諮問第89号「電波利用における人体防護の在り方」平成9年4月24日の図1「電磁波の周波数と電波の利用例」を参考に作成。

素粒子とは？

- この世の中のすべての物質が持っている最小単位
- 「素の粒子」で、英訳すると「エレメンタリー・パーティクル」
- 宇宙を形作っている、基本的なパーツ
- 物質を細かく見た時、これ以上細かく分けられない最小単位となるもの
- 17種類（ヒッグス粒子を含む）

クォーク

図表1 物質を細かく分けていくと……



クォークの種類

図表2 6種類のクォーク

アップクォーク	ダウンクォーク
チャームクォーク	ストレンジクォーク
トップクォーク	ボトムクォーク

パイ中間子

- クォーク 2つの組み合わせでつくる粒子
- 湯川秀樹（1907～1981）が 1935 年に存在を確認
- 1947 年、実験により発見

「小林・益川理論」

- クォークは最初、アップ、ダウン、ストレンジの 3つしか見つかっていなかった
- 残りのチャーム、ボトム、トップの存在を予言したのが小林誠、益川敏英（1973 年）
- 1990 年、アメリカの加速器で実験的に証明
- 2008 年にノーベル物理学賞

レプトン（軽い素粒子）

図表3 電子の仲間「レプトン」

素粒子	重さの比較	素粒子	重さの比較
電子	1	電子ニュートリノ	100万分の1以下
ミューオン	約200倍	ミューニュートリノ	100万分の1以下
タウ	約3500倍	タウニュートリノ	100万分の1以下

全ての物質を構成する素粒子

図表5 物質を構成する12種類の素粒子

クォーク		
アップクォーク	チャームクォーク	トップクォーク
ボトムクォーク	ストレンジクォーク	ボトムクォーク
レプトン		
電子	ミューオン	タウ
電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ

力を伝える素粒子「ゲージ粒子」

- 物質を構成する素粒子同士をくっつける力
- グルーオン→「グルー」は糊、「オン」は粒子
- 陽子同士を糊付けしてガチガチに固めている (強い力)
- 光子→「フォトン」、反発力を生み出す力
- 光子は電気・磁気を伝える (電磁力)を持つ
- 光子が電磁気力を伝える理論「量子電磁力学」で朝永振一郎が1965年にノーベル物理学賞
- ウィークボソン→「ウィーク」は弱い、「ボソン」はインドの物理学者の名前
- ウィークボソンは主にニュートリノの働きに関与する (弱い力)
- 電荷を持つWボソンと電荷を持たないZボソンの二種類
- 質量が陽子の80～90倍、そのため、短時間で別の粒子に崩壊 (重い粒子は長持ちしない)
- グラビトン→「重力子」、重力の力を伝えるためのゲージ粒子 (重力)
- 素粒子のレベルでは、他の力に比べて小さい

(重力を1とすると電磁気力は 10^{38} 倍)

ゲージ粒子の特徴

- 普通、物質は同じところに二つ以上は置くことができない→クォーク、レプトン
- ゲージ粒子は、同じところに複数存在する

素粒子のまとめ

図表9 標準理論と素粒子のまとめ

クォーク			ゲージ粒子
u アップクォーク	c チャームクォーク	t トップクォーク	
d ダウンクォーク	s ストレンジクォーク	b ボトムクォーク	γ 光子
レプトン			Z Zボソン
e 電子	μ ミューオン	τ タウ	W Wボソン
ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ	g グルーオン
			H ヒッグス粒子

自発的対称性の破れ

- 「対称性」という考え方は、この世の中を作り上げている基本的な性質
- 素粒子にはそれぞれ対になる粒子が存在
- テーブルにストローを垂直に立て、上から力を加えると、ある時点でどこかの向きに折れる。折れた方向は「たまたま」でしかない。決まっていない。これが「対称性が自発的に破れること」。
- 自発的は、「自然に」とか「たまたま」の意味
- 「自然的対称性の破れ」の仕組みを1960年の論文で解明したことで、2008年に南部陽一郎はノーベル

物理学賞をとった

ヒッグス粒子とは

- 「すべての物質を構成する“**素粒子**”に質量を与える粒子」素粒子
- 素粒子の世界では、直接目で見て「発見」と確認できない。
- 膨大な実験データから理論計算をし、確かさを極めていく作業。

粒子の実験に使う「加速器」とは？

- 宇宙の生まれた時と同じような極限的な高エネルギー状態を作り出す。
- 高エネルギー状態を作り上げて素粒子をつまみ出す。

セルンの全景



●CERNの全景。手前はジュネーブ空港。円周の巨大さがわかる
(写真提供：CERNアトラス実験グループ)

ヒッグス粒子の発見

- 2012.7.4 スイスのCERNセルン（欧州合同原子核研究機構）が発表
- 世界最大の円形加速器「LHC」周長 27 km
- 2チーム「アトラス」「CMS」の検出器
- 実験データ：CD-Rで7 km、本で30億冊
- ヒッグス粒子の質量算出；

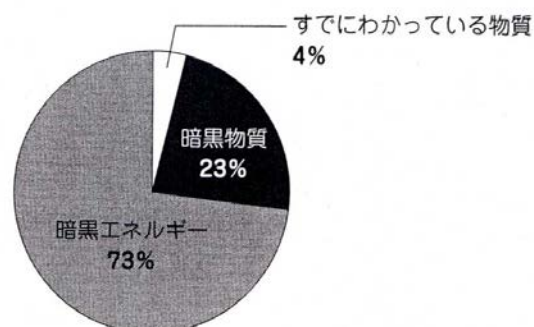
信頼性 99.9999%

この世にある質量の内訳

- ヒッグス場で与えられる質量は、**わずか2%**
- 残りの98%はクォークとクォークを結び付けるメカニズムが原因となって生じる
- 仮想粒子は、我々の質量の大部分と、宇宙の中で見えるものすべての質量を生み出している。
- 例えば、陽子の内部に3個のクォークがあるが、それ以外にも様々なものが存在している。
- 特に、クォーク間に働く強い力を伝える粒子と場を反映した**仮想粒子**が、たえず生まれたり、消えたりしている。仮想粒子が自発的に生じたり、消えたりしながら、場は陽子の内部でお互い同士やクォークと相互作用する。

宇宙の物質

図表19 宇宙の大半は暗黒物質と暗黒エネルギー



宇宙に存在する物質

- 宇宙に存在する物質は、現在 4%しか正体がわかっていない。これが標準理論で予言された 17 種類の素粒子
- 残りの 23%は「暗黒物質（ダークマター）」
- 73%「暗黒エネルギー（ダークエネルギー）」
- 暗黒は、光がないために天文観測では見ることができない
- 人間の五感に引っかからない
- 重力が作用している

質量と重さ

- 質量は、物質そのものが持つ基本的な量

「力は質量と加速度の積に等しい」

- 質量は 17 世紀から存在していた概念
- 質量は「エネルギーが集中している状態」
- エネルギーが集中していることで、この世界に存在する物質は、存在することができる
- $E=mc^2$ （エネルギー＝質量×（光の速度）²）
- 「重さ」は、物質そのものが持つ量でなく、場合で変わる
- ジェットコースター、地球と月での重さの違い
- 質量のある物質はすべてお互いに引き合う性質をもつ → 「万有引力」
- 万有引力により引っ張られる度合いが「重さ」

重力波

- 光は、電場と磁場の振動が波のようにして伝わっていくもの。
- アインシュタインは、重力も波のように伝わっていくことを予言、これを重力波と呼んでいる。
- 重力波は、物体が加速しながら運動するときに、周囲に伝わる時間や空間の揺れ。
- 人類はこれまで、もっぱら光を使って宇宙を見てきた。重力波が観測できれば、宇宙を見る新しい窓を開けることができる。
- 「暗黒物質」や「暗黒エネルギー」を探る研究

重力波を初めて観測 2014.3.18 日経

- 米カリフォルニア工科大学チームが観測。
- チームは「宇宙背景放射」を南極で設置の望遠鏡で詳しく分析、重力波が背景放射の光に影響を与えていることを発見、間接的に重力波の存在を確認した。
- 今回の成果はビックバン以前の宇宙の痕跡を初めて捉えたこと。ビックバンがなぜ起こったのか、我々の宇宙が、人間がなぜ存在するのかと言う根源的なテーマに迫ってきた。

宇宙誕生時の重力波観測、誤り！ 2015.1.31 日経

- 宇宙背景放射を分析、特徴的なパターンが宇宙急膨張の際の重力の名残りだと発表
- 米チームを含む国際チームが精密に検証
- このパターンはちりの影響との結論
- ただし、重力波やインフレーションが否定されたわけではない
- 重力波の探索は今後も続く
-

宇宙暗黒時代、1 億年長い？ 2015.2.9 日経

- 宇宙が約 138 億年前にビックバンで誕生した後、望遠鏡で観測できない「暗黒時代」が約 5 億 5000 万年後まで続いた可能性が高い
- 宇宙誕生の時期は、2013 年に約 137 億年から約 138 億年に更新されている
- 今回の成果で、宇宙の歴史はまた、書き換えられる可能性

3回「地球の誕生・生物の誕生」

「自然の歴史」時間的に俯瞰する；

地球の歴史を1週間で置き換えると、人類の歴史はわずか1秒（表1）

表1 地球誕生から現在までを1週間に置き換えた場合の時間経過

今から	曜日	時刻	内 容
46億年前 (45.5億年前)	日曜	午前0時0分0秒	地球誕生
35億年前 (38億年前?)	月曜	午後4時10分	バクテリア出現（現在、議論中である）
23億年前	水曜	午後0時0分	酸素をとりこむ細菌出現 (これも議論中)
4億年前	土曜	午前9時0分	安定したオゾン層形成
6500万年前	土曜	午後9時38分	恐竜が大絶滅
5000万年前	土曜	午後10時11分	大型の哺乳類が出現
3万年前	土曜	午後11時59分56秒	ホモサピエンス出現
1万年前	土曜	午後11時59分58秒	農耕がはじまる

自然の構造

(1) 原子よりも小さいものはあるか？ 水で考えてみる（図）

水は水素原子2個と酸素原子1個が結合した水分子が無数に集まったもの

水分子は高温になると非常に速い速度で空間を自由に飛び回る→水蒸気

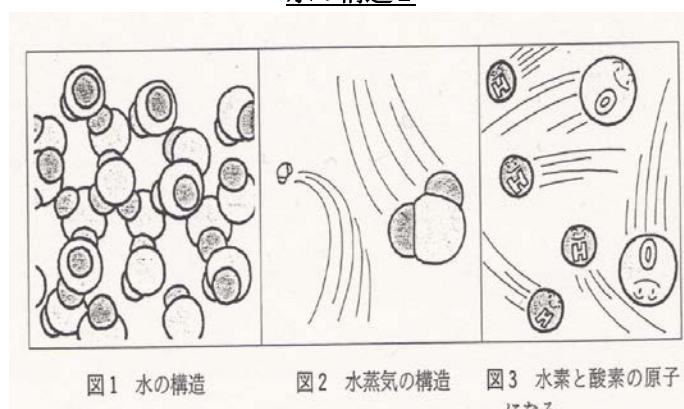
3000℃：全て水素と酸素の原子にまで分解

1000万℃：原子核と電子

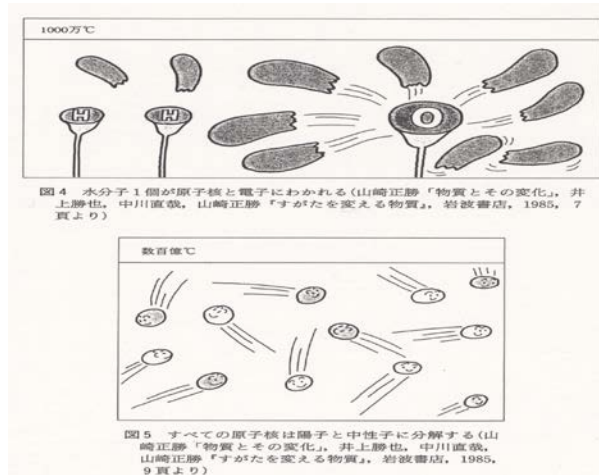
数百億℃：陽子と中性子

2兆3000億℃：クォーク

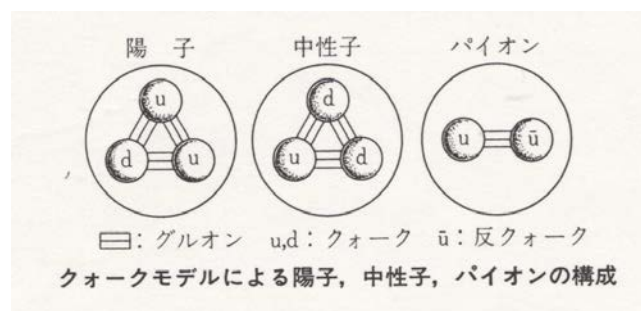
水の構造1



水の構造 2



クォーク



宇宙はどこまで大きいか？

地球は太陽系惑星の1つ、太陽系は2千億～4千億個の星の集団(天の川銀河)の一部、観測可能な宇宙では、4千億個の銀河

陽子・電子

ミクロの世界ではクォーク、マクロでは銀河、陽子8個と電子8個が結合すると、酸素原子、プラスの電気をもつ陽子1個とマイナスの電気をもつ電子1個が結合すると、水素原子、それぞれ原子は陽子や電子からなるが、それらをたして2で割ったような物質ではない水素原子2個と酸素原子1個からは水の分子ができる。水分子が無数に結合したものが水である。

4つの力から多様な物質が生まれた

- ・ クォーク間に働く強い力
- ・ 電子ー陽子間に働く電磁力
- ・ 放射崩壊を引き起こす弱い力
- ・ 天体を支配する重力
- ・ 銀河の誕生は宇宙誕生から10億年後

<強い力の由来、大きさ、放射能>

- ・ 強い力の由来; 原子核内の陽子と中性子の結びつき、電氣的斥力に打ち勝つ力、湯川秀樹、中間子
- ・ 物質の大きさ; 水分子10億分の1m、原子の大きさは水分子の10億分の1m、原子核の大きさは原子の100兆分の1m、陽子、中性子は原子核の1,000兆分の1m、クォークは陽子の1,000の1m
- ・ 放射能; 原子核がエネルギーの低い状態や別の原子核に変わる(崩壊)ときに、 α 、 β 、 γ 線を放出する性質

補足資料

- ・ 光とは何か？（すごい宇宙講義より抜粋）

- ・ 「137 億年までの宇宙の光が見られてしまった」って、普通に考えると「なんでそんな大昔のものが、今見られるの？」って思うでしょう？光は障害物がなければ永遠に進む。そして、宇宙は膨張しているので、光が進む空間そのものが伸びていつている。それにつれて、光はまるでバネが伸ばされるかのよう
- ・ 伸びられて、どんどん波長が長くなる。
- ・ そもそも「見る」とは、「(それぞれの波長の) 光を捕まえる」という行為。人間が自分の目で直接見ることのできるのは、「可視光」の領域の光だけ。それよりも短い波長（紫外線）や長い波長（赤外線）は人間の目では捕まえることはできません。ただ、そういう波長を捕えられる装置があれば、捕まえる（＝見る）ことができる。もうひとつ重要なことは、光が到達するのに、ある時間がかかるということ。

- ・ 光より速く遠ざかる星（すごい宇宙講義より抜粋）

- ・ 物質は光よりも速く移動できない。しかし、膨張速度は光よりも速い。宇宙が広がっているということは、空間が伸びているだけで、物体が移動しているわけではない。空間は別に光より速くても構わない。実際、星の後退速度を測ると、光よりも速く遠ざかっている星はいくらでも発見されている。

- ・ 素粒子とクォーク

- ・ 電子、光子、陽子、中性子、中間子などは、物質の基本単位で素粒子と呼ばれています。素粒子は大きく分けてレプトン（軽粒子）とハドロン（重粒子）に分類されます。20 世紀に入って素粒子は発見され続け、半世紀でその数は数百に達しました。そこで、さらに基本となる粒子の発見を求めることになりました。現在、強い力を及ぼしあう素粒子（ハドロン）はクォークという基本粒子からできていると考えられています。しかし、クォークを単独で取り出すことには誰も成功していません。この説が有力なのはクォークの存在を仮定すると、発見された多くの素粒子の性質などが無理なく説明できるからです。そこで、多くの物理学者はクォークの実在を信じています。レプトンの 1 つであるニュートリノの存在を観測によって実証したのが小柴昌俊東大名誉教授である。レプトンは 6 種類が見つかっています。

- ・ クォークの種類

- ・ クォークには質量の異なる 6 種類、up、down、strange、charm、bottom、top、これらのクォークにはさらにそれぞれ 3 種類あり、赤、青、緑のカラーで区別します。また、すべてのクォークには反粒子である反クォーク（電荷が反対で質量は同じ）があります。なお、カラーは補色となります。

- ・ 【4つの力】

- ・ 4つの力から多様な物質が生まれた！ 重力、強い力、弱い力、電気力（電磁力）

- ・ 重力：

- ・ 私たちは、地球の表面にへばりついて生きています。こん身の力を込めてジャンプしても、自分の身長をあまり大きく超えることはできません。高い山に登ると空気の密度が低くなり、酸欠となって高山病にかかります。これは、空気が地球の中心に向かって引き付けられ、上空の方が薄くなるためです。私たちが手にした石やボールを離すと下方に落ちます。質量のある物質はどんなものでも、地球の中心に向かって引っ張られる作用が生じますが、これは地球の重力によるものです。この重力は地球に独特のものではなく、質量をもつ物どうしの間に必ず働く“万有引力”と呼ばれる作用の一つです。
- ・ 「重力」は 2 つの物体の質量の積に比例するため、小さな質量の物質の間ではあまり影響力は持たないが、質量が大きくなるほど物質の生成に強い影響力を持つようになる。原子の密度の揺らぎ（凹凸）が生まれ、密度が少し高い部分では、「重力」が大きいため、まわりの原子を集めるようになる。質量が大きくなると、「重力」はますます強くなって、さらにたくさんの原子を集めることができるようになる。それらの原子は自らの「重力」によって収縮し、銀河が誕生する。

- ・ 電磁力；
- ・ 重力と同じように私たちが身近に感じる力は電磁的に力です。これらは電氣的なものと磁氣的なものとあるが、電流を導線に流せば、その周囲に磁氣の作用を生じることから、両者は本来密接に関わりあっている。重力の作用と違うところは、電氣力、磁氣力ともに、いつも引き合う力が生じるわけではなく、反発し合う力も生じる点です。電氣力についてみると、電荷には正と負の二種類があり、異種の電荷の場合には引力が、同種の電荷の場合には斥力が生じる。磁氣力の場合には、南北二つの異なった磁極があり、同種の磁極間には斥力が、異種の磁極間には引力が働きます。
- ・
- ・ 弱い力；
- ・ 陽子と中性子が多数で作る重い原子核の中には、不安定なものがあって、それらは放射性崩壊といわれる反応を起こして別の原子核に変わっていきます。中性子の数が多すぎて不安定となった原子核は、中性子を陽子に変えて安定となります。その際、電子と反電子ニュートリノを放射します。これがベータ崩壊と呼ばれる現象です。逆に、陽子の数が多すぎて不安定な原子核は、陽子が中性子に変換されて安定となります。このとき、陽電子とニュートリノを放射します。これを逆ベータ崩壊と呼ばれる現象です。このように、電子か陽電子を放射して原子核の構造を変えるときに働く力が、弱い力と呼ばれる作用です。
- ・
- ・ 強い力；
- ・ 電磁氣力の 100 倍ほどの大きさを持っている。クォークを結びつけて陽子や中性子を作るグルーオン（にかわ粒子の意味）の働き。また、陽子どうしに働く電氣的な斥力に打ち勝って中性子と共に原子核を作る π 中間子の働き。
- ・ 強い力の由来；
- ・ 原子の中心にある原子核は陽子と中性子（陽子と中性子をあわせて核子とよぶ）からつくられます。例えば、ウラン 235 は 92 個の陽子と 143 個の中性子からなっています。ところで、この分野での最大の謎は、原子核では陽子や中性子がどのような力で結びついているかでした。陽子どうしの電氣的斥力（斥力とは、2 つの物体に働く力で、相互の距離を遠ざけるように働く力です）に逆らってそれらを結びつけているので、電磁氣力よりも強くなければならないのです。そこでそれは強い力と呼ばれるようになったのです。この強い力の正体を暴いたのが、湯川秀樹博士です。プラスの電氣を持った原子核とマイナスの電氣の電子が引き合っているのと同様に、核子も未知の素粒子によって結びついているに違いないと考えたのです（1934 年）。計算によると、その素粒子の質量は、電子と核子の中間であることがわかりました。1947 年、予言通りの素粒子が発見され、湯川理論は世界の注目を浴びることになりました。

地球の誕生と進化

火の玉地球 （初期の数億年は全球凍結との説？）

水惑星 （海は最初から存在との説？）

陸・水惑星 （陸も最初から存在との説？）

生物の惑星、文明の惑星

地質年代の測定

物質の年代を認定する方法を知るのは「事実」か「意見」かの判断を下すのに必要です。また、地質学の年代測定は地球誕生後に様々な地層なのでどのようなことが起こったのかを議論する上で非常に重要です。

この測定法は、近年、急速に進歩しています。事例として、現在、最も古い時代の情報である西オーストラリア・ジャックヒルズで発見されたジルコンが約 44 億 400 万年前とした根拠について説明してみます。

岩石の中には、ジルコンのようにウランを豊富に含む鉱物が存在しています。とくにジルコンは、風化変質に対して強いので、堆積物の中の碎屑粒子（さいせつ粒子で砕けたくず（屑）からできている）として多く存在しています。

そこで、岩石サンプルだけでなく、碎屑物に含まれる粒子を使用して、地質学的な情報を得ることができるのです。自然界には ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{234}U が存在、 ^{234}U は ^{238}U の中間的なもの、最終的には、

- ・ $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ (半減期 44.7 億年)
- ・ $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ (半減期 7.04 億年)

となります。これを用いて 2 種類の年代測定ができるのです。

Th と U とは科学的に類似、Th/U は様々な地質現象を通じて、それほど大きな変化をしない。したがって、次の Th-Pb の年代測定が適用できます。 $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ (半減期 140 億年) すなわち、U、Th から Pb への 3 つの系列を用いて年代測定ができる。これらはそれぞれ独立の系列、個々に年代を描くことができる。同一試料で複数の系列を利用できる (ウラン、トリウム-鉛系列年代測定法)。

生物の誕生と進化

地球の環境が生物を生んだ。生物が存在する星は宇宙の中で、今のところ地球しか知られていない。

地球に生物が誕生したのは、下記のいずれが原因となっているか？

- ① 地球大気に酸素が含まれていたから
- ② 地球に海があったから
- ③ 地球の上空にオゾン層があったから

どれが正解ですか？

2015.3.17 日経 「土星衛星に熱水、なぜ注目、生命を育む要素そろう」

東大などの国際チームが土星の衛星エンセラダス (エンケラドス) の地下海に熱水など、生物が生息できる環境があることを発見。NASA は木星の衛星ガニメデに巨大な地下海の証拠を見つけた。生命が誕生し、生き続けるためには、水、炭素などの必須元素、エネルギーが 3 大要素。熱水、熱エネルギーの存在が明らかになった。3 大要素が揃った天体は地球以外では初めて。

生物の誕生はいまだに謎である！

オパーリン (1924：ソ連) 「原始大気から太陽の紫外線などのエネルギーによって作られた簡単な分子が、海の中でより複雑な分子になり、やがて生物に進化した」と推論。

ユーリー・ミラーの実験；原始大気にメタン・アンモニア・水素・水蒸気を用いた。現在では、その主成分は二酸化炭素・窒素・水蒸気と考えられている。

海底熱水噴火孔；グリシン濃度が高く、温度が高い

原始大気と宇宙線からアミノ酸合成後に、海洋中で生物に進化した説

生物のもとが地球外からの隕石によってもたらされ、海洋中で進化した説

原始の海はアミノ酸・ヌクレオチドのスープ

アミノ酸 → たんぱく質 ヌクレオチド → 核酸

たんぱく質・核酸 → 細胞 → 生物誕生

生物とは何か (生物の特徴)

物質代謝 (酵素→たんぱく質)、自己複製 (遺伝子→核酸)、外界との区切り (膜→脂質)

生物は原子・分子からできているが、それまでの物質とは全く異なる法則に従う

物質代謝：外部の環境とやり取りをしてエネルギーを引き出すこと。

自己複製：自分と同じものをつくる。

外界との区切り：生命の基本単位は細胞で、細胞が細胞膜で外部と区別される。

生物誕生後の地球環境

らん藻の誕生、光合成 (発生した年代は?)、原始大気の変化、細菌の多くが死滅 (酸素は猛毒)、無毒化する酵素、酸素呼吸する生物、地中・湖底 (破傷風など)、オゾン層形成、生物の陸上進出

シアノバクテリアの出現

出現年代は全く白紙の状態、約 35 億年前という高校教科書の記述は?、この問題は、地球表層への酸素放出の開始と密接に関係、極めて重要な問題

生物の進化

酸素量増加→新種出現、酸素濃度上昇→エネルギーの余分→動物の器官、組織の複雑化

酸素濃度の急増

1996年に22億2千万年～20億6千万年の地層から見積もられた酸素の生産量は、現在の12～22倍、「大酸化イベント」、酸素濃度の急増は24.5億年～20.6億年、シアノバクテリアの誕生は24.5億年ころかそれ以前、全球凍結（スノーボールアース）の原因、酸素急増と真核生物の出現（約19億年前）

スノーボールアース・イベント

「マクガニン氷河時代」約23～22.2億年前、「スターチアン氷河時代」約7.3～7億年前、「マリノアン氷河時代」約6.65～6.35億年前、1992年、カーシュビング「スノーボールアース仮説」、火山活動により二酸化炭素の蓄積で全球凍結状態から脱出できる、今から約5億年前に現存する全ての動物門出現、カンブリア爆発（いったい何が起こったのか？）は地球史の研究で最重要課題、マリノアン氷河時代直後に酸素急増、生物圏が破局的なダメージからの回復過程で、大きな進化促進か？

生物化石の認定

生物の硬い骨格は5億4200万年前以降である。それ以前のものは、ほとんどの生物は死後に酸化分解、生きていた時の形態が保存されていても、何をもってそれを生物の化石とするのか大変に難しい、地球上の生物に似た化石の真偽を判定するには、生物の形態だけでなく、もっと決定的な基準が必要。

生物誕生の研究状況

主要な構成元素、海がなければ現在のような生命であふれた惑星でないことは、生命の主要な構成元素が海水の元素組成に近いことから明らかです。人体の主要元素はH、O、C、N、Na、Ca、P、Sです。

これに対して海水の主要元素はH、O、Na、Cl、Mg、S、K、Caです。

海の形成、陸の形成時期の考察

大気や海洋には、地球内部や大陸地殻などの固体地球から様々な物質が供給され、長い時間をかけてそれらが蓄積した結果、現在の姿に。火成岩、海水、堆積物から物質収支を計算すると、収支が合わない元素は水、炭素、塩素、硫黄、窒素などで、大気・海洋の主要成分である。

これらの元素は「揮発性成分」、過剰分は地球内部から「脱ガス」。脱ガスの大部分は、地球形成期に発生。地球誕生時には大気も海洋もすでに形成されていたことになります。

- したがって、海は約46億年前の地球誕生時から存在し、最初から塩辛かったのはほぼ間違いない。
- ・また、アルゴン40とアルゴン36の比からも、大気や海洋の形成は地球の形成とほぼ同時期だった可能性を強く示しています。
- ・最古の岩石は約40億3100万年前のアカスタ片麻岩。
- ・これは変成岩で大陸地殻を構成する花崗岩が高い圧力で変化したものと考えられるので、約40億年前には大陸地殻が存在していた可能性を示しています。
- ・しかも花崗岩の形成に水が必要なので、これは海が存在も示しています。
- ・（2008年9月、約42億8000万年前の岩石を発見したという論文（ネイチャー掲載）が発表されています）。
- ・また西オーストラリアで発見されたジルコン（鉱物粒子）は約44億400万年前のものです。
- ・地球誕生の正確な年代は45.5億年前、この鉱物粒子が花崗岩に由来するものなら、地球誕生後1億年で大陸地殻、海が存在の可能性を示す、きわめて貴重な証拠となります（以上の内容は、主に田近より引用して改編）。

生命の痕跡

- ・生命の痕跡を岩石より探る研究は現在、暗礁に乗り上げています。それは次のようなことから明らか。
- ・硬い骨格をもつ生物が誕生したのは、5億4200万年前以降です。生物の体は死後、酸化分解。
- ・生きていた時の形態がそのまま保存されていても、何をもってそれを生物の化石であると認定するのは大変難しい。
- ・この認定問題は1996年、火星隕石中にバクテリアの化石が発見されたというニュースから。
- ・これが本物の生物化石としたら、火星にも生物が存在していたことになり、まさに世紀の大発見。
- ・しかし、火星隕石から発見されたフィラメント状の物質がバクテリアなのか、それとも無機物なのか、わからないのです。「明確な基準」がない。
- ・この事件以来、5億4200万年前以前の化石とされた石は、すべて証拠に決め手がなくなった。

- ・現在の高校・大学の教科書に掲載されている「シアノバクテリアの出現は約 35 億年前」にも問題が発生。
- ・2011 年 5 月発刊のアメリカ版大学生物学の教科書第 1 巻細胞生物学の第 1 章に生命最古の証拠として、以下の岩石が取り上げられています。
- ・「地質学者の J. ウィリアム・ジョプフは、オーストラリアで見つかった岩石の中に、鎖状あるいは塊状の、現代のシアノバクテリア（藍藻細菌）に非常によく似たものを発見した（1993.4.30 サイエンス）。
- ・ジョプフはこれらが単なる化学反応の結果ではなく、かつては生命を持っていたことを証明しなければならなかった。
- ・彼とその同僚は光合成の科学的根拠を探した。光合成で二酸化炭素を利用することが生命の大きな特徴であり、生成する糖質に炭素の同位元素である ^{13}C と ^{12}C を一定の割合で取り込むので、これが生命現象固有の科学的特徴となる。
- ・ジョプフはオーストラリアの岩石にこの化学的特徴が残っていることを示した。
- ・さらに、この試料を顕微鏡で観察すると、単なる化学反応の結果ではあり得ない生命体に特徴的な構造が明らかとなった。
- ・これらのことからオーストラリアで見つかったものは古代の生命体の痕跡であることが示唆された。」。
- ・ところが、この 1993 年「サイエンス」掲載の論文に対し、2002 年「ネイチャー」で事実を覆す論文がでた。
- ・問題の微化石は、玄武岩の中に挟まれている石英脈（深海底の環境を意味する）の内部から発見された。
- ・したがって、この玄武岩は海洋地殻を構成する岩石。石英脈は熱水の通り道に沿って海洋地殻内部に形成されたものです。
- ・シアノバクテリアは光合成を行う細菌なので、太陽の光が届く浅海が生息条件。
- ・「ネイチャー」の論文では、このバクテリアのような構造は無機的に作られたものであって生物化石でないと主張しています。

地下生命圏

- ・地球にサイズの大きい天体が衝突すると一時的に海水がすべて蒸発する「全海洋蒸発」が、地球誕生初期には数回程度生じていたと推定されています。
- ・この時期に生命は誕生と絶滅を繰り返し、その最後の系統が現在へとつながる生物の共通祖先となったとする考え方があります。
- ・一方、生物が海洋地殻内部の深い領域に逃れ、絶滅を免れているとの考え方もあります。
- ・実際に、現在でも「地下生命圏」があり、その規模は地表の生物圏に匹敵すると推定されています。
- ・これらの微生物の起源は古い可能性あり、初期地球における隕石爆発の影響から逃れた者たちの子孫かもしれません。
- ・生物の遺伝子解析では、熱に強い「好熱菌」もしくは「超好熱菌」と呼ばれるものが、最も古い系統に属すると考えています。
- ・最も初期の生命は、高温環境に適応していた可能性があります。
- ・このことは生命が海底熱水系のような高温環境で誕生した可能性を示しています。
- ・1977 年、アメリカの有人潜水艇アルビンがガラパゴスリフト深海底で発見した海底熱水活動は、地球科学における 20 世紀最大の発見の一つ。
- ・それは「深海熱水に未確認生物が高密度で生息していること」が発見されたからです。
- ・その生物の生活様式が深海熱水で運ばれる地球内部エネルギーに依存している事実が強烈。
- ・太陽光ではなく、地球の熱エネルギーを利用する微生物を共生させることで、植物的な生活を行う動物が密集する生態系が発見されたのです。
- ・深海熱水の発見は、生命誕生の場も提供。1953 年の「放電による模擬原始大気からのアミノ酸合成」の研究で、地球での生命誕生の可能性が示されたが、具体的な場に関する議論はなかった。
- ・深海熱水の発見以降、その環境が地球における生命誕生の場の最有力候補となった。
- ・この科学仮説は今も、様々な証拠とともに強化されている。1977 年の発見以降、2009 年までに約 550

か所の海底熱水を確認。

- ・そこには、未だ全貌がつかめないほど極めて多様な生物が生息。
- ・この分野の研究は多様な環境条件と多様な生態系を結びつける共通の原理の探求に進んでいます。
- ・東太平洋の共生微生物は、硫化水素をエネルギー源とするイオウ酸化細菌であること、メキシコ湾の共生微生物はメタンをエネルギー源とするメタン酸化細菌であることがわかりました。
- ・これらの発見により深海化学合成生態系が、海底下から供給される還元物質に依存する可能性を示しました。
- ・さらに、深海底熱水域に生息する様々な極限環境での微生物の研究で、化学合成生物に共生する微生物とは異なり、自由生活を行う深海底熱水微生物が多様なエネルギー代謝を利用して生態系の一次生産を支えていることも明らかになりました。
- ・熱水中の水素濃度上昇で水素と二酸化炭素からメタンを生成しエネルギーを得る微生物の優占が確認されたのです。
- ・この研究成果は、深海底熱水化学合成生態系の基礎生産や組成に最も強く影響を与える因子が硫化水素やメタンではなく、水素であることを示しています。
- ・さらに、熱水中の水素濃度は海底下の「水-岩石」反応に強く依存。
- ・つまり、水素の挙動が多様な環境条件と多様な生態系の複雑な結びつきを示す深海底熱水という「地質-生命」システムを理解する最も重要なカギ
(以上は主に高井から引用して改編)。
- ・また、2014年2月3日には、地球の深部1400キロでも水分が存在することを実験で確認したとの報告がでてきました。
- ・本当に地底に巨大な生物圏が存在しているかもしれません。

パンスペルミア説

- ・アミノ酸は宇宙から来たのか？生命を作るための材料物質の中で最も重要な物質はアミノ酸です。
- ・このアミノ酸が宇宙空間でできたのか（パンスペルミア説）、地球上でできたのか、意見は分かれています。
- ・炭素質の隕石の中にアミノ酸が含まれていることは事実です。
- ・このことが、パンスペルミア説の大きな根拠となっています。
- ・一般的にアミノ酸には右型と左型の鏡像異性体が存在します。
- ・ところが現在の生物中のタンパク質には左型しかありません。
- ・これは、生命発生時の地球に左型アミノ酸が多かったためと考えられますが、左型を卓越させるメカニズムは不明でした。
- ・しかし、マーチソン隕石中の一部のアミノ酸は若干左型に富んでいることが分かったのです。
- ・その後、円偏光を持った宇宙線を浴びながらアミノ酸生成が行われると鏡像異性体の関係が崩れることが実験で確かめられました。
- ・このことは宇宙空間では左型が卓越した状態のアミノ酸を作り出せることを意味しています。
- ・この発見でパンスペルミア説が、さらに有力になりました。
- ・近年、地球外にもさまざまな有機物が存在することがわかってきました。
- ・例えば、隕石からの熱水抽出液からは、多種類のアミノ酸が検出。
- ・また、1986年のハレー彗星接近時にはそのダストの質量分析が行われ、分子量100以上の複雑な有機物が多数存在することがわかりました。
- ・隕石や彗星に複雑な有機物が含まれていることから、これらにより地球に持ち込まれた有機物が、最初の地球生命の素材として用いられた可能性が示されたのです。
- ・彗星や隕石中に見られる有機物の多くは非常に複雑な有機物です。
- ・模擬星間物質に放射線を照射した時に生じるものは分子量数千の複雑な有機物でした。
- ・以上のことから、次のようなシナリオを描くことができます。
- ・原始大気や分子雲中の星間塵上で一酸化炭素・窒素などの単純な分子から、宇宙線エネルギーにより複雑な有機物が生じる。

- ・これは雑多な分子の集合体、大部分は役に立たない「がらくた分子」ですが、その一部は触媒活性に役立ち、アミノ酸や核酸塩基を生み出す能力があります。
- ・やがて、このがらくた分子の中に、自分自身を基質（酵素が作用する相手の物質）として自分と同じ分子を生み出すもの「自己触媒分子」が出現。この分子は、がらくた分子の供給が続く限り増殖していく。
- ・このような「がらくた分子」の中で、やがて自己触媒分子は周辺に存在するアミノ酸や核酸塩基を用いて機能を進化させ、「RNAワールド」に移行、やがて「共通の祖先」に至った】というものです。

地球上で有機分子を作る地球説

- ・地球上でアミノ酸を作る研究もあります。有名な「ミラーの実験」はその先駆的なものです。「ミラーの実験」では、「初期地球大気に CH_4 や NH_3 が含まれていた」という前提のもので雷放電実験を行いアミノ酸の生成に成功しました。しかし、その後の研究で「 CH_4 や NH_3 に富んだ大気」は考えにくいことがわかりました。
- ・初期地球のマグマオーシャンは岩石中の揮発性成分を大気にもたらすと同時に、大気の組成をコントロールする役目も果たしていました。
- ・このようなことから、初期大気は CO 、 CO_2 、 N_2 に富んでいたと考えられるようになりました。
- ・一般に CO_2 、 N_2 からのアミノ酸生成は極めて困難であり、「ミラーの実験」の結果を初期地球に適用できるかどうか懐疑的意見が生まれました。
- ・しかし、2008 年 12 月に日本の研究者らが隕石が海洋に衝突することで、 N_2 、 NH_3 などができることを実験で証明。
- ・隕石は海洋に衝突すると隕石・海水・地殻が蒸発して衝突蒸発雲発生。隕石・微惑星には、金属鉄・硫化鉱物などの還元剤を含むことが多い。
- ・これらが衝突蒸気雲の中で還元剤として作用すれば、生体有機分子を作るための NH_3 などを作れると物質・材料研究機構の中沢弘基が提唱（中沢 2006）。このアイディアで、東北大学と物質・材料研究機構のグループが、実験を行いました。
- ・実験後の試料より、 N_2 を NH_3 に還元できることを確認。次に、この NH_3 が炭素と反応しアミノ酸、アミン、カルボン酸などの有機分子を生成することを確認。
- ・実験条件をさらに隕石海洋衝突状態に近づければ、生成される有機分子の種類も増す可能性があります（以上は主に掛川から引用して改編）。

アミノ酸から生命までの過程？

- ・アミノ酸から生命誕生へつなげるには、ペプチドを作らなければならないのです。
- ・ペプチドがさらに結び付きタンパク質となり、次のステップに進みます。
- ・その一連の「化学進化」の中でペプチド生成が、固体地球と生命起源との最も重要な接点になります。
- ・（ここで、ペプチドなどの言葉について説明を加えておきます）。
- ・ペプチド結合とは、二つ以上のアミノ酸分子の間で、一方のアミノ基ともう一方のカルボキシル基とが脱水縮合してできる結合のことです。
- ・縮合とは複数の化合物が互いの分子内から水など小分子を取り外しながら結合することです。
- ・したがって、脱水縮合とは水分子を取り外しながら結合することです。
- ・ペプチドとは、2 個以上のアミノ酸がペプチド結合により縮合してできた化合物のことです。
- ・火山噴気孔、干潟、海底熱水孔などでペプチド生成が行われたとする仮説が過去の研究で提案され、実験が行われてきた。
- ・既存の説を想定した実験で確かにペプチドは生成されますが、ペプチド自身の寿命が数分しかなく、その後は分解されるなどの問題が発生。
- ・そこで新たに登場したのが「地殻内胚胎説」。
- ・（ここで、「胚胎」とは、物事の起こる原因を含み持つとの意味なので、「地殻内胚胎説」とは地殻の中が「生命誕生のポイント」であるとの説と解釈できます。）
- ・まず、海洋中の粘土で海水中のアミノ酸などが吸着、海底に沈殿。沈殿後にアミノ酸は粘土と海洋地殻内深部に埋没、温度・圧力で変化。

- ・生命発生前の堆積物中では、アミノ酸が分解・消費されずに地下深部に。
- ・地下深部がアミノ酸の貯蔵庫の可能性。アミノ酸同士を結合させるにはエネルギーが必要ですが、地下には地熱としてエネルギーが存在。
- ・さらに地下の圧力でアミノ酸分子同士の反応。アミノ酸が結合しペプチドを生成する反応は脱水反応（アミノ酸同士の結合で水分子が離れてしまうこと）。
- ・堆積物が圧縮される過程で間隙水（隙間にある水）も移動。その過程でアミノ酸が結合してできた水も移動しやすくなり、さらにペプチド生成反応が進むことが期待。
- ・また一部の粘土鉱物にはアミノ酸の結合を促進させる触媒効果あり。アミノ酸同士の結合が地下深部で行われ、タンパク質に進化との仮説。
- ・この地殻内胚胎説のもとに、海底堆積物深部を想定した高温高压実験を東北大学のグループが行い、グリシン、バリン、アスパラギン酸などのアミノ酸が容易に重合し、ペプチド（例えば、グリシンが10分子が結合した10量体）が生成されていることを確認。
- ・一連の実験の中での注目は、ペプチドが高温環境でも長時間にわたり安定して存在できたこと。地質時間の中で化学進化が進行することを考えると、生命につながる物質が長時間安定に存在できることは、化学進化の次のステップへの大きなカギとなります（以上は主に、掛川から引用して改編）。

遺伝子から攻める

- ・遺伝子に関する解説は、2013年5月5日読売新聞掲載の「揺らぐ「遺伝子」の概念」が詳しいので、この記事の抜粋を以下に掲載。
- ・「人間の全遺伝情報のなかで、生命活動を担う遺伝子は、広大な砂漠に点在するオアシスのようなものだと考えられていました。
- ・ゲノムのほとんどの部分は不毛な砂漠のようなものであり、役割のない「ジャンク（くず）」と呼ばれていました。
- ・命を紡ぐ遺伝子は、その中で輝くオアシスのように例えられたのです。この見方を覆す研究成果が昨年9月、ネイチャーに発表。
- ・日米欧の国際チームが、これまでジャンクと呼んでいた部分も含め、ゲノムの約8割に何らかの働きがある可能性を明らかにしたのです。
- ・「遺伝子の概念に再考を迫る成果だ」。ネイチャーの解説記事はそう指摘しました。
- ・従来、タンパク質を作る情報を持つDNAの領域を遺伝子と呼んでいた。
- ・遺伝子の情報はRNAと呼ばれる伝令役の分子に読み取られ、タンパク質が作られる。
- ・しかし、国際チームは、タンパク質を作る情報を持たないのに、RNAに読み取られる部分が、ゲノムの約7割に上ることを突き止めた。
- ・新たに示されたゲノムの働きの大半が、RNAによるもの。これらのRNAの一部は、遺伝子の働きを制御するなどの役割が分かっている。しかし、99%以上は明確な機能が分かっていない。
- ・一方、国立遺伝学研究所の斉藤は「大半のRNAに働きはなく、無駄に読まれているだけではないか」と指摘。
- ・細胞内のすべての反応に意味があるわけではなく、ゲノムの大半はやはりジャンクではないかを見る。
- ・果たして、遺伝子はゲノムの中のオアシスなのか。議論の行方によって、遺伝子という概念が大きく揺らいでいます。
- ・ヒトゲノムの実相が見え始めた一方、人類は、微生物のゲノムの大規模改変という新技術に近づいています。
- ・以上のように、ゲノムの中のRNAの働きについての研究が今後、急速に進むことによって、生命活動の具体的なことが解明される可能性があります。

細胞の研究

- ・2010年5月21日、サイエンスは「人工生物」作製に成功との論文を掲載。人工的に合成したゲノムを持つ細菌。
- ・作ったのはJ・グレイグ・ベンター研究所。解読済みのマイコプラズマ細菌のゲノム情報を基に、4種類の遺伝文字（塩基）を機械で順番通り並べ、ゲノムの断片を作成。

- ・次に、大腸菌と酵母の中で断片をつなぎ合わせて、人工のゲノムを作製。
- ・これを別の細菌に移植してゲノムを置き換え、人工的に合成した細菌が増殖することを確認。
- ・この研究の最も重要な点は「生命の本質は情報」。生命誕生に関する研究の重要な要素となります。
- ・山中伸弥教授は、体の様々な組織に変わる iPS 細胞の作製で、2012 年のノーベル生理学・医学賞を受賞しました。
- ・老化する運命であった細胞の時間を生まれたところに巻き戻す「初期化」に iPS 細胞で成功したのです。
- ・初期化とは、細胞の過去をいったん消去し、様々な細胞に育つ受精卵のような状態に戻す操作です。
- ・これは「生命科学の常識を覆した」研究と評価されています。初期化を可能にした 4 種類の遺伝子「山中 4 因子」を特定、
- ・2006 年にマウスの皮膚細胞で作製、2007 年には人間の皮膚細胞で作製に成功しました。これも、老化した（成長した）細胞をもとの状態に戻すという点で、生命誕生に関する研究の重要なヒントになります。

ミドルワールドの世界

- ・以下の内容は英国の物理学者マーク・ホウが 2009 年に執筆した「ミドルワールド（動き続ける物質と生命の起源）」をコンパクトにまとめたものです。
- ・これは、ミクロとマクロの間の大きさの物質がランダムに動き回る、ブラウン運動から始まる研究分野の話です。
- ・例えば細胞の中で起こる生命現象は、ランダム性（無秩序）や小刻みな動きがあり、それを予測するのは不可能。
- ・細胞には水があります。水に溶けているカルシウム、マグネシウム、亜鉛、カリウムなどのイオンや塩類は、細胞の活性を制御する化学信号や引き金として働き、重要な役割を演じます。
- ・しかし細胞は、一般に何百何千という原子からなるもっと複雑な分子をたくさん含んでいます。これらの巨大分子には、タンパク質、酵素、DNA、RNA、分子モーターなどがあります。これらの巨大分子は、直径数ナノメートルから 1000 分の 1 ミリメートルです。
- ・細胞の中は、どこにでもブラウン運動がみられます。生命の基本的しくみとして避けられない重要な意義を持っています。
- ・光ピンセットの開発で、この動き回る DNA を絶対零度近くまで冷却し、動きを減速させることに成功。この方法でミドルワールドからの生命誕生の研究は加速。
- ・ミドルワールドは、大別すると 2 つの部分「物質」と「生命」に分けられます。しかし、物質と生命の相違は、ぼんやりとした領域。ポリマー、界面活性剤、そして膜は、タンパク質、分子モーター、細胞へと次第に変化すると考えています。

ウイルスとの共生

- ・突然変異以外の推進力については、この 10 年、20 年の間に理解が進んだ。進化は、何種類もの変化と自然選択の組み合わせで起きるということ、そして現在もなおそれが続いている
- ・一般の人はよくウイルスと細菌を混同するが、両者は実は根本的に異なったもの。
- ・ウイルスの DNA は多くの場合、直線状の塊、人間の遺伝子に似ている。一方、細菌の DNA は一つのリング。
- ・ウイルスは進化、変異という面では突出。驚くべき速さで変異する。その速さは細菌の 1000 倍、そしてその細菌自体、人間の約 1000 倍の速さで変異する。
- ・この変異の速さが医学においては重要な問題となる。変異が速ければ、抗生物質や抗ウイルス剤があっても、すぐに耐性を持ってしまう可能性が高い。
- ・HIV-1 などのウイルスも、人間に恐ろしい病気を引き起こすと同時に、進化に大きく関与している可能性が高い。
- ・ウイルスは本当にどこでも存在する。この地球上にいるどの生物であれ、中を探せば必ずと言っていいほどウイルスが見つかる
- ・現時点で知られているウイルスは 5000 株。
- ・海もウイルスで満ちていることが分かったのはほんの最近。

- ・海のウイルスの特性？
- ・膨大な数が存在するのは確実、影響力は大きい
- ・現在では、生物の大部分にウイルスが侵入していることがわかっている。
- ・2014.3.30 日経「巨大ウイルスは生物？」の記事

恐竜の絶滅

- ・白亜紀の末期、6500 万年前に直径約 10 kmの隕石が今のメキシコ・ユカタン半島に衝突、巻き上がった土ぼこりが地球を覆って太陽光を遮り寒冷化したためとの説が有力
- ・2014.3.10 日経 白亜紀末の生物絶滅に新説；
- ・千葉工業大学・大野上席研究員ら、巨大隕石の衝突で硫酸の海が生じたためとする新説を発表。
- ・衝突後の地球を岩石を使って再現した実験で突き止めた。
- ・ネイチャー・ジオサイエンス（電子版）に 10 日発表。



4回「人間社会の形成」

人類誕生と進化

人類はサルから進化したけど、人類が生まれたのはいつからか？

- 1) 火を使ったとき
- 2) ことばを使ったとき
- 3) 直立 2 足歩行をして道具を作ったとき
- 4) 死者を埋葬するようになったとき
- 5) 洞窟絵画を残したとき

この5つのうち、どれが正解か？

木に上った哺乳類

最初の哺乳類は地上を這い回るだけの小さな生物

その中から木に上るのが現れた（樹上には恐竜がいない、鳥の卵、昆虫、果実などが豊富）

大きな両眼を持ち、すぐれた視力で、握力の強い哺乳類が出現（霊長類）



環境に適応した個体が生き延びて子孫を残していくという自然選択の働きによる

直立 2 足歩行

霊長類は多くの種に分化。その中に、草原に進出した種がヒヒとひと科の動物（この部分は現在、議論になっている）、ヒヒは鋭い犬歯で肉食動物から身を守った

ひと科の動物は知能はあるが、犬歯はほとんど発達せず、大型の肉食動物から逃げて小動物・植物を食べて暮らした



やがてひと科の動物は直立するようになった。その方が敵を早く発見でき、自由になった手で棒をつかんで振り回したり、石を投げたりすることができる。



直立2足歩行はますます促進され、手が歩行から開放されて道具の製作などに使われるようになった。そのことが大脳、特に記憶・言語・思考などの中枢を発達させた。



この直立2足歩行をはじめたひと科の動物が最初の人類

ラミダス猿人「アルディ」



人類の起源

- ・ 猿から人が分かれた理由は一般に、気候が寒冷化したことが原因か？
- ・ 熱帯雨林が減り、サバンナが広がり、サバンナに取り残された猿が、帰るべき森を失って人への道をたどり始めたとする説が有力。
- ・ 今から 500 万年前、地球環境は大きく変化。

現生人類とネアンデルタール人との違い

- ・ おばあさん仮説；進化生物学者の長谷川真理子氏、現生人類だけにおばあさんが存在。
- ・ ネアンデルタール人、他の人類には存在しない。
- ・ おばあさんとは、生殖年齢を遥かに過ぎた、すなわち卵子のなくなったメスのことを意味する。
- ・ おばあさんが存在すると、お産はより安全になり、子どもの世話もより手間がかからなくなり、次の出産までの間隔も短くなる。
- ・ すべては人口増加に結びつく。現生人類は人口増加が著しく、その結果、アフリカを出て世界各地に拡散。加えて、現生人類はネアンデルタール人に比べ、言葉の発音能力が高い。

日高敏隆の説

- ・ 子どもたちは、集団の中のさまざまな人たちと、それぞれどのようにつきあうべきかを学んでいったにちがいない。
- ・ 大集団で生きるという生きかたをする動物であった人間は、おそらくずっと大昔から、このように生き、育っていくように、種として遺伝的にプログラムされていたにちがいない。
- ・ そしてその遺伝的プログラムは、今のわれわれでも変わってはいない。

なぜ、1万年前なのか

- ・ 約1万年前に、ライフスタイルの転換が起こった理由は、その時大きな気候変動があったからでは？
- ・ グリーンランドの氷床や南極大陸の氷床を採集、その中に含まれる気泡から昔の大気を取り出し、分析する事が盛んに行われている。
- ・ その結果、過去 22 万年前まで、それぞれの時代の気候変化を推定。それは気泡に含まれている二酸化炭素量や、酸素の同位対比の測定などに基づく。
- ・ 現在は、間氷期。グリーンランドの氷から推定された過去の温度変化は、約1万年前に始まっている。それ以前は氷期で、間氷期に比べ数度から 11 度くらい温度が低い。
- ・ 柱状資料からの温度変化で驚くのは、現在の間氷期の温度変化。ほとんど一定と思えるくらいに安定。
- ・ この安定した気候が、人間に農耕牧畜を始めさせたことは十分に考えられる。
- ・ 1万 2000 年前から 12 万年前くらいまでの氷期とくらべるとその安定性は際だっている。氷期の間は数十年くらいの間に 6 度くらいの温度変化が繰り返されているのに対して、現在に至る間氷期はそれが 2 度

以内くらいにおさまっている。

- ・ 約 2 万年前の氷期のとき、北米大陸は現在のニューヨークやセントルイスあたりまで厚さ 1000 メートルを越えるローレンタイド氷床におおわれ、ヨーロッパはスカンジナビア氷床によってイギリスやドイツ北部あたりまでおおわれている。
- ・ この氷期が終わり間氷期に入る直前（1 万 2000 年くらい前）、ヤンガードリアスと呼ばれる寒の戻りの時期がある。この間には、10 年くらいの間に、6 度前後も温度変化があった。
- ・ 現在いわれている地球化温暖化の温度上昇率は、10 年間に全球年間平均気温で 0.3 度、間氷期前の人類は気候の大変な激動期を生き延びた事になる。

生態学的地位の変化

人類は火を発見して生活は大きく変化
寒冷な場所でも住めるようになった
火により、食生活は著しく豊かで安全になった
火は、超大型動物を追い込むのにも利用
大勢での共同作業で言語能力が備わる
人類は、生態的地位を変えた

食物連鎖の頂点

自然界の食物連鎖の頂点に立った人類
その後、人類は、他の動物には見られないことをはじめた → **農耕牧畜**
作物の栽培と家畜の飼育は新しい食物連鎖を生み、人工的な生物界を形成
これが今からおよそ 1 万年前のこと
ただし、自然の恵みの豊かな地域では、今でも原始の生活を守っている

↓

人類は、道具を使って自然に働きかけ、その生存に必要な物質を生産し、自然全体を人間中心の世界、人間生活圏へと変えた
人類は、出現してから今日までに脳容積が 3 倍になった。人類の脳が進化したのは、道具によって自然に積極的に働きかけたから
人類は、自然の中で生物を超えた存在

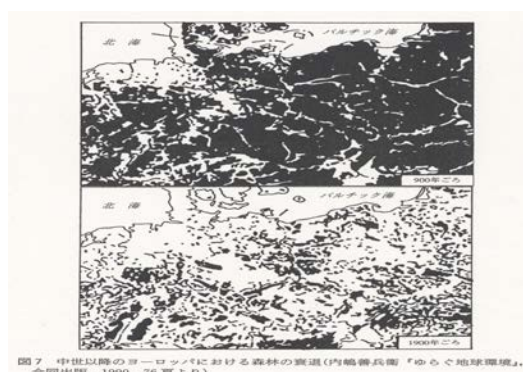
気候変動と人間活動の変化

人間生活圏の形成

地上の生態系は長い間、主として気候に支配されてきた
1 万年前に人間が農耕牧畜を始めて、それまで地表を覆っていた森林は急速に農耕地や放牧地に変化
20 世紀に入り、工業化・都市化が世界各地で始めると、地表はますます人工物で覆われ、その結果、生物種の絶滅が急速に進み、生態系が単純化された

人間活動による森林の消滅

中世以降のヨーロッパ森林衰退



自然生態系と人工生態系

生物種の絶滅＝生態系の単純化

農耕牧畜、人工的世界の形成、食料の安定的な供給確保

森林のような複雑な自然生態系を畑・田などの単純な人工生態系へ置き換えた

人間生活圏の形成により、多くの生物種絶滅、今日の絶滅速度は、恐竜時代の 100 万倍以上といわれている

生態系；生物は互いにかかわりを持つと共に、まわりの環境とも深い関係を保ち、1 つのまとまりを作っている。

このまとまりを生態系と呼んでいる。

生態系の事例

フラスコに水と竹の煮汁を入れ、野外に放置すると、バクテリア、原生動物、クロレラ、藍藻、ワムシなどの生物から生態系が作られる。半年で個体数は、それぞれ食べたり食べられたりしながら、一定の数に落ち着く。これらの生物間には「食べる－食べられる」だけでなく「抑える」「生産する」「競争する」「自己抑制する」が複雑に絡み合っ、生物個体数が一定に保たれ、フラスコの生態系が成立する。

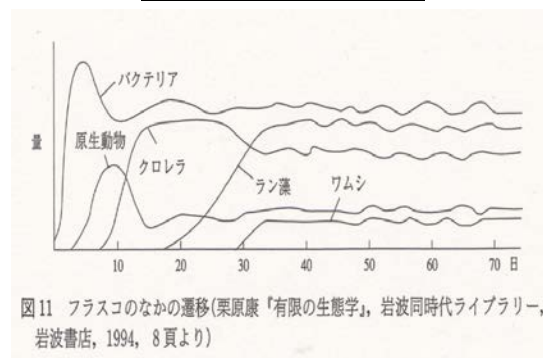
↓

この生態系でバクテリア以外の種を全滅させると、はじめはバクテリアが急速に増えるが、その後に急速に減る。これは食料が不足し、さらに自らの排泄物によって環境汚染が生じたためである。

フラスコの中の生物



フラスコの中の時間変化



自然生態系の単純化

極端に単純化された生態系では、物質循環が起こらず、生物は資源枯渇と環境汚染によって、死滅する。つまり、ある種の絶滅はその種の絶滅にとどまらず、他の種も巻き添えにする。

生態系の単純化は、生物に依存する人間の生存基盤を危うくすることを意味している。

人間活動による生態系の単純化

開発工事によるさんご礁の破壊。さんご礁は「海の熱帯林」と呼ばれ、多様な生物種が生息している。



さんご礁の破壊は「海の砂漠化」の道を進む

人工生態系の単純化

農耕地の省力化のため、殺虫剤、除草剤などの農薬散布で種の減少がおこる。



生態系の単純化による、生態系は不安定となり、ある種の動物の大発生を誘発する



事例；キンモンホソガの大発生— 農薬をあまり使わないりんご園で発生したキンモンホソガが農薬を頻繁に散布するりんご園に侵入して、そこで大発生して、りんご園が全滅



農薬をあまり使わないりんご園では、天敵（昆虫）がガを食べて大発生を抑えていた。

生物濃縮

アザラシの事件：有機塩素化合物は脂肪に溶けやすいので、一度体内に取り込むと、外部に排出されない。



海に排出された PCB がプランクトンの体内に蓄積



体内の濃度は海水の数千倍。これを食べる魚の PCB 濃度はプランクトンの 10～100 倍



その魚を食べるアザラシの体内の PCB 濃度は異常に高くなる



海に溶け込んだ微量の化学物質は直接吸収、食物連鎖で全ての生物に高濃度に蓄積



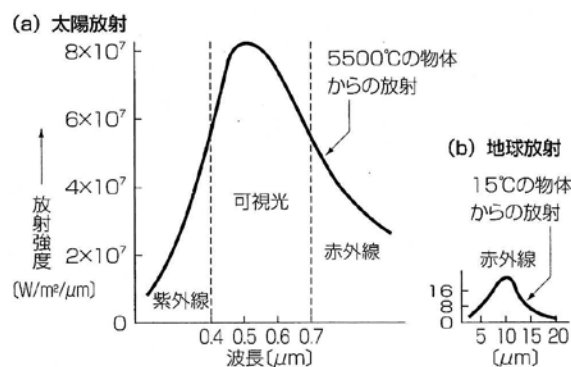
人間も生物濃縮から逃れることはできない

- * 生物濃縮；海に溶け込んだ微量の化学物質は直接吸収や食物連鎖を通して全ての生物に高濃度に蓄積される。これを生物濃縮と呼ぶ。

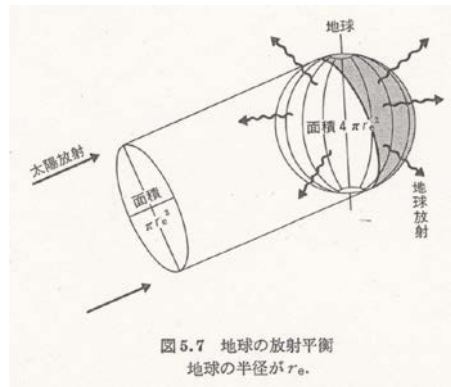
5回「熱収支と四季」

物体からは、常に電磁波が出ている（絶対零度でない限り）

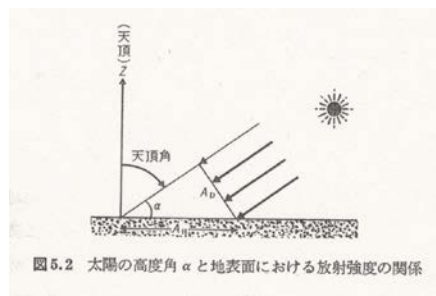
太陽放射と地球放射



地球は太陽放射を面で受け取る



太陽の高度と放射強度



夏至と冬至の日射量

赤緯 δ : 太陽光線と赤道面となす角

夏至 $\delta = 23.5$ 度、冬至 $\delta = -23.5$ 度

東京 夏至の正午 :

$$\alpha = 90 - 35 + 23.5 = 78.5 \text{ 度}$$

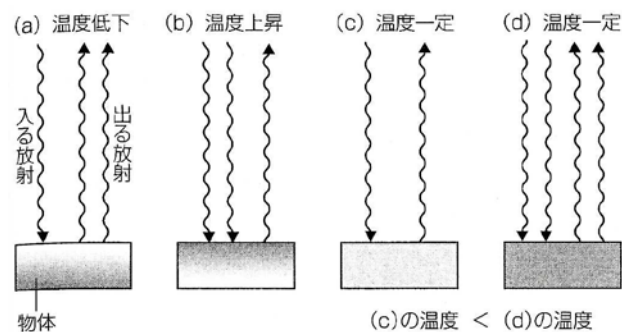
冬至の正午 :

$$\alpha = 90 - 35 - 23.5 = 31.5 \text{ 度}$$

$$\sin 31.5 / \sin 78.5 = 0.533$$

冬至の正午の日射量は夏至の 53%

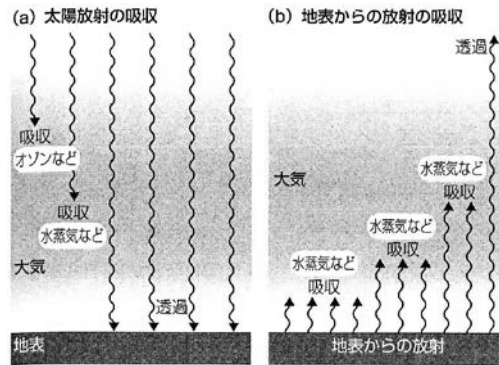
放射と吸収のバランスで温度が決まる



放射による大気の温められ方

- 大気は「透明」であるため光を通す（可視光の電磁波の進行を妨げない）
- $0.32\mu\text{m}$ 以下の紫外線はオゾン層のオゾンで吸収
- 赤外線は多くは水蒸気が吸収
- 地表に到達した太陽放射の大部分は可視光
- これが地表を温め、
- 地表から赤外線を放射（地球放射）

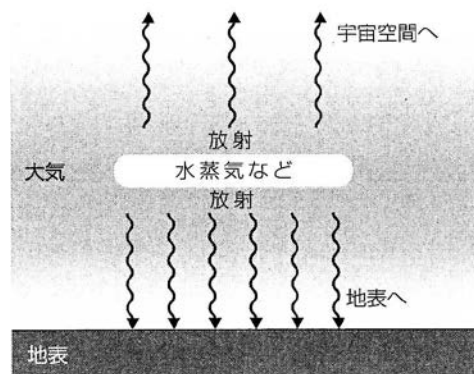
大気によって吸収された放射



温室効果

- 温められた大気は、そこに含まれる水蒸気から赤外線を放射
- 一部は宇宙へ、多くは地表に、地表を再び温める
- 地球全体で平均すると、大気から地表への放射は、太陽放射で地表に届くエネルギーの2倍もある
- このように大気や地表の温度が高く保たれることを、温室効果という
- 雲は太陽放射の可視光を反射する働きをするが、雲を作る水滴は赤外線をよく吸収し、またよく放射する性質がある

大気による放射（向きに注意）

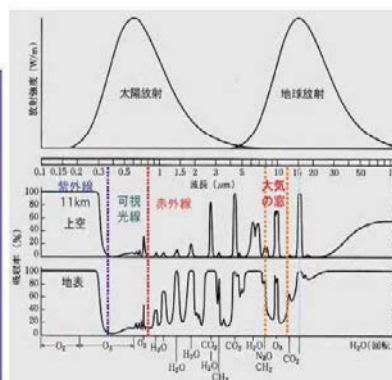


大気の吸収特性

大気の吸収特性

太陽放射
可視光線として
地表まで入射

地球放射
 $12\mu\text{m} <$
 H_2O により
ほぼ100%吸収
 $15\mu\text{m}$
 CO_2 による吸収
 $8-12\mu\text{m}$
大気の間
→ Freon-11,
 O_3 が吸収



(図は環境地球科学 第2巻 1992)

伝導と対流による大気の温められ方

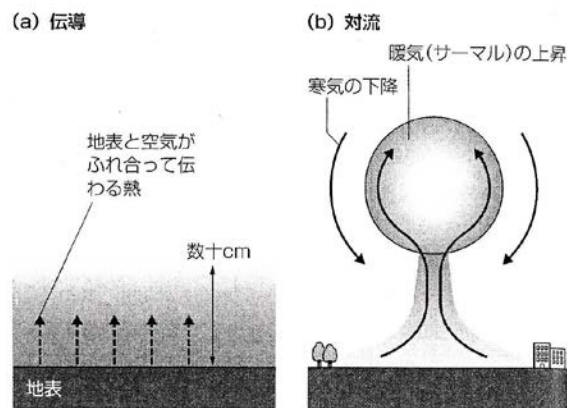
伝導

- 温度の高い部分から低い部分へ、物質の内部を移動する熱の伝わり方（粒子が周囲と衝突し合いながら小刻みに震える運動の「激しさ」が伝わる）
- 空気は、固体、液体に比べて伝導が起こりにくい、断熱材に空気が使われる
- 熱伝導率；岩石 0.3、水 0.6、空気 0.025
- 伝導で熱せられるのは、空気が動かないと仮定すると、地表からわずか 10 cm
- 夏の日差しの強いときには、地面から数十cmの空気の温度は 50℃、1.5m で 30℃台、温度計の置き場所が大事
- 地表から 1.5m の高さで、風通しがよく直射日光が当たらない場所に置くことが国際ルールで決められている

対流

- 実際には、地表で熱伝導により熱せられた空気のかたまりは、浮力を受けて浮かび上がり、サーマルとなる。
- 上昇したサーマルと入れ替わるように冷たい空気が下降し、鉛直方向の空気の流れが起こる。この流れが対流
- 対流は水蒸気を運ぶことでも、地表から大気へ熱を伝えている（潜熱）
-

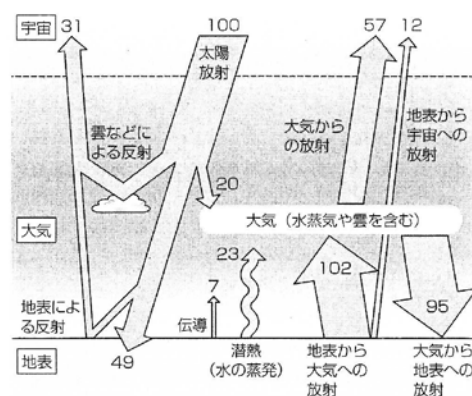
熱の伝導と対流による大気の温まり方



地球の熱収支

- 地球が平均的な気温を一定に保っているのは、熱の出入りが平衡状態にあるため
- 大気に雲が増えるとアルベドが増加し、地球の気候は寒冷化すると考えられている。
- しかし、雲の量がどのような要因によって増減するのは、まだ十分に明らかにされていない

地球の熱収支



地球温暖化と二酸化炭素による温室効果の関係は？

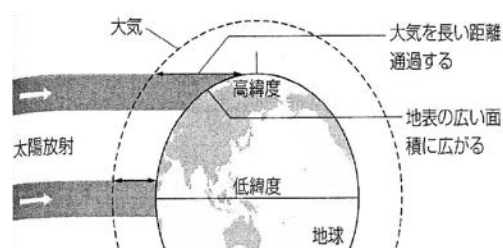
- 温室効果が最も大きいのは水蒸気
- 二酸化炭素も水蒸気に次いで大きい
- 大気中の分子数も水蒸気の方がずっと多い
- 地球温暖化が進む過程では、熱収支に関する均衡がわずかに崩れる

気温は緯度と季節によりどう変わるのか？

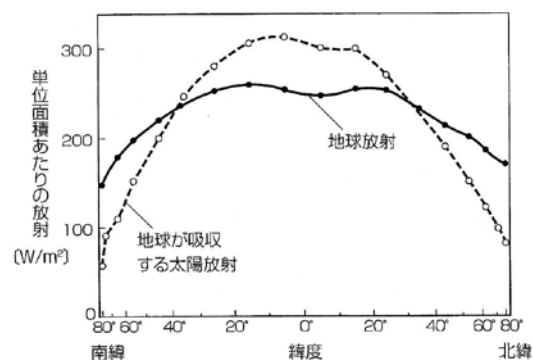
緯度による温度の違い

- 太陽放射の差し込み方が違う
- 同じ強さの太陽放射をみると、高緯度の方が広い面に広がる、したがって同じ面積で比較するとエネルギーが少ない
- また、高緯度の方が光線が大気中を通過する距離が長い
- 単位面積あたりに供給される太陽放射は、高緯度の方が少ない

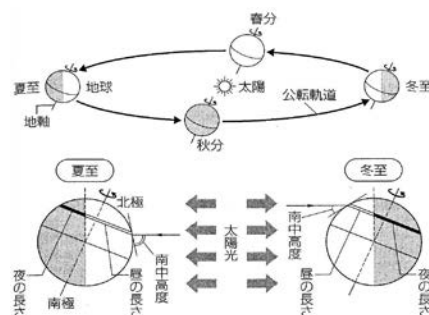
緯度による太陽放射の差し込み方の違い



緯度ごとの太陽放射と地球放射



地球の公転と季節



季節変化の起こる理由

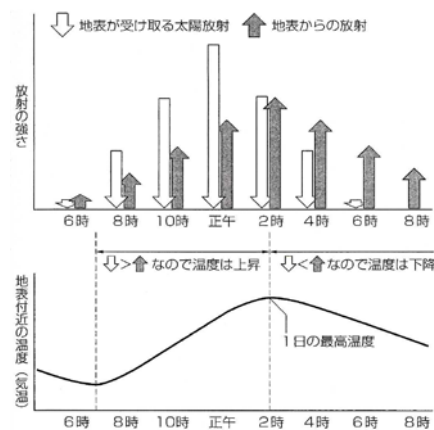
- 南中高度は、夏至の日が最も高い。しかし、最も気温の高いのは8月ごろ
- このずれは、1日の最高気温が南中時刻よりも遅れるのと同じ
- 「太陽放射>地球放射」なら気温は上がる局面、逆に「太陽放射<地球放射」なら気温は下がる局面
- 気温がピークになる8月ごろ、やっと「太陽放射=地球放射」になり、その後気温は下がる

1日の気温変化はどのように生じるか

1日の最高気温が正午から少し遅れるのはなぜか

- 地表が受け取る太陽放射のエネルギーは、太陽が南中する正午ごろに最も大きい
- 太陽高度が大きいほど太陽放射は地表を強く温める
- 正午から2時間前後遅れて最高気温を記録
- 日の出から正午まで、太陽放射を吸収した地表の温度は上昇を続け、地表からの地球放射も増加し続ける。ここで、地表温度が上昇するのは、地表の吸収するエネルギーの方が、放射するエネルギーよりも大きいから
- 地表温度は正午を過ぎてもすぐには低下しない
- 太陽放射が地表からの放射と同じ大きさに減少するまで、地表温度の上昇は続く

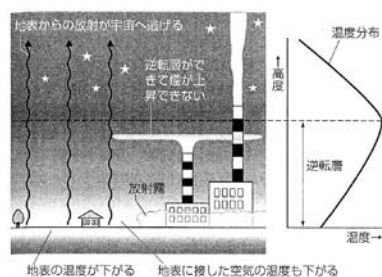
1日の太陽放射と地球放射の量



明け方が最も低温なのはなぜか？

- 地球放射は、日没後もずっと続く。このため、地表温度は日の出まで低下が続く。このような地表からの放射によっておこる温度低下を**放射冷却**という
- 放射霧；地表付近の空気が冷えることで水蒸気が凝結し、霧が発生すること
- 逆転層；夜間に放射冷却が進むと、地表付近ほど温度が低い状態になった層ができる。このとき、上昇気流が起こりにくい。低い煙突からのばい煙が上昇できずに、層内に漂う
-

放射冷却



砂漠や高原では1日の気温差が大きい？

- 砂漠の大気が非常に乾燥している
- 温室効果があまり働かない
- 夜間の放射冷却がどんどん進む
- 砂漠の乾いた砂は空隙に空気をたくさん含むので、日射による熱が地中にあまり伝わらない
- 表面に熱が集中してたまり、より地表温度が高くなるため、その熱が空気へ伝わって昼間の気温が上がる

- ・ 高原はその上空にある大気の厚さが低地よりも薄い
- ・ 大気が少ない分、含まれる水蒸気量も少ない、温室効果は働きにくい、夜間の放射冷却が進みやすい
- ・ 山岳地帯は昼間でも風が吹けば急に温度が下がる。熱せられた地表面により温められた空気は、風によって容易に吹き飛ばされ、同じ高度にある低温の空気と入れ替わる

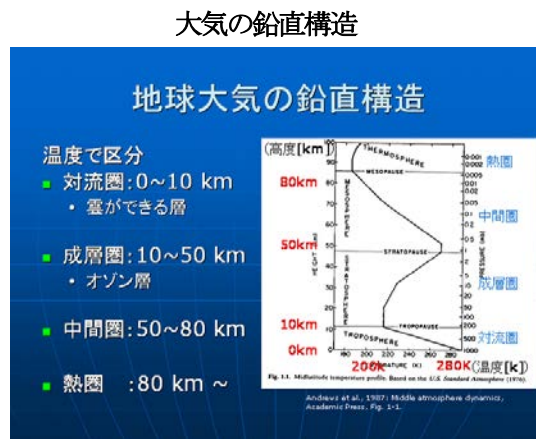
熱帯夜となるのはなぜか？

- ・ 日本の夏は大気が湿っていることが多いので、温室効果が強く働く
- ・ 夜に上空が雲に覆われた場合も、雲が地表からの赤外線を吸収して下方に再放射するので、地表での気温は下がりにくい
- ・ が雲に覆われた場合も、雲が地表からの赤外線を吸収して下方に再放射するので、地表での気温は下がりにくい

6 回「水と大気の大循環」

<大気の大循環>

大気の鉛直構造（温度による区分）



対流圏 : tropo sphere

”トロポ“はギリシャ語で回る、混ざるの意味（日々の大気運動の全て）、厚さ 11 km、温度は 1 km で 6.5℃ 低下、雲、雨、温帯低気圧、前線、台風など

対流圏界面 : tropo pause

高度とともに温度がほとんどかわらない、本来“ポーズ”は止まる、限界の意味、現在では、界面の意味に統一

成層圏 : strato sphere

温度は高度とともに上昇（50 km で 270 K）、大気層は安定で上下混合起こりにくい？

実際には色々な形態の運動あり大気の化学組成は 80 km まで一定

成層圏界面 : strato pause 高度 50 km で温度極大少量のオゾンが紫外線を吸収する

中間圏 : meso sphere 高度とともに温度低下、高度 80 km ~ 90 km で極小

中間圏界面 : meso pause

高度 80 km までは乾燥空気の化学成分の割合は高度によらない。それより高度が増すと、空気の成分は軽い気体分子や原子の割合が増す

熱圏 : thermo sphere 温度が高い

波長 0.1 μm 以下の紫外線を熱圏の窒素、酸素が吸収

高度 200 km の空気密度は地面近くの 10 億分の 1（真空状態に近い）

温度とはいったい何なのか？

気体分子論：気体は多くの分子からなる。分子は互いに衝突しながらあらゆる方向に飛び回る。

分子の運動エネルギー $K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} kT$ ただし、質量 m 、速さ v 、温度 T 、ボルツマン定数 k 、分子、原子の運動エネルギーの平均値の大小を示すものが温度である。

全ての分子、原子が静止し、運動エネルギーがゼロとなったとき、絶対零度（ -273°C ）

熱圏は高温であるが空気も非常に薄い

我々が熱圏にいても、皮膚に衝突する分子や原子の数が少なく、熱さを感じない！

外気圏：exo sphere “エクソ”はギリシャ語で外側を意味する。

分子・原子同士が衝突するのは極めてまれ、分子・原子は弾丸の軌道を描いて運動

大気による紫外線の吸収

熱圏では窒素・酸素→波長 $0.1\mu\text{m}$ の紫外線を吸収する。

高度 110 km の領域では、酸素分子→波長 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ の紫外線を吸収する。

オゾン層では波長 $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ を吸収する。

色々な層が紫外線吸収して、地表の生物を保護している。

空気の平均分子量

空気は色々な気体の混合物なので、空気の分子というものはありません。空気のような混合物の分子量は、それを構成する各気体の分子量とその気体が占める割合で重みをつけた平均値で表します。大気下層では、窒素（78%）、酸素（21%）、アルゴン（1%）を占めるので、空気の平均分子量は、

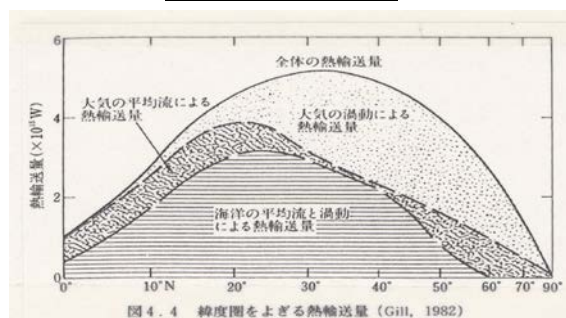
$$28 \times 0.78 + 32 \times 0.21 + 40 \times 0.01 = 28.96 \text{ となる。}$$

オゾン層

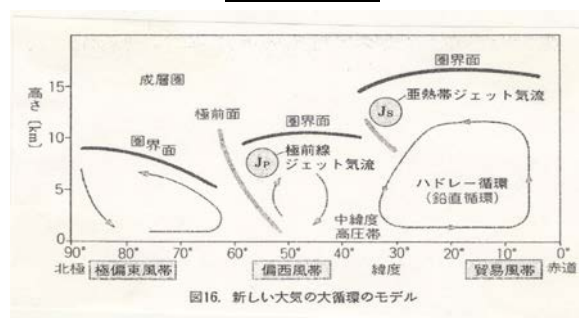
オゾン層、オゾン層の維持過程、オゾン層の密度分布をみると、極大の高度は高緯度ほど下層にある。高緯度では夏より春にオゾン密度が大きい。オゾン生成は日射量に依存。地球規模の大気の流れによってオゾンが輸送される。オゾンは不安定、紫外線を吸収して酸素分子と酸素原子に分裂、生成消滅の繰り返し、平衡状態を維持。高度 25 km を中心にした層、オゾン分子の割合は気体分子 100 万個で1個、オゾンの生成維持過程、酸素分子→紫外線 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ 吸収して2つの酸素原子に分裂、 $\text{O}_2 + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$

（ M は第3の分子で触媒の役割）

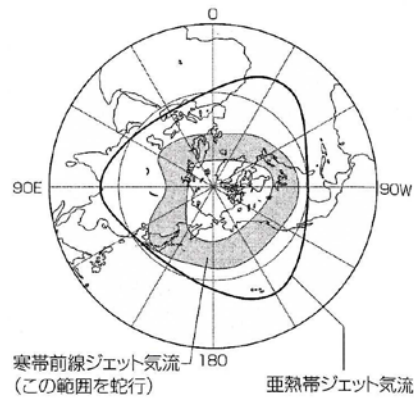
各流れによる熱輸送



大気の大循環



ジェット気流の位置



海の表層大循環

世界の海洋表層とは→ 0～1000m、赤道を挟み南北対象である。

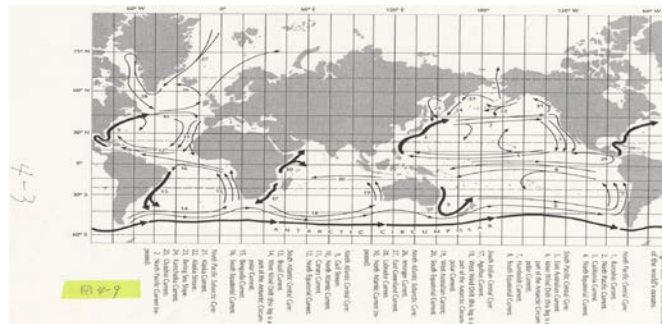
北半球は時計回り、南半球は反時計回りの循環流である。

大洋の西岸に強い流れがある。

駆動力は風と海水の密度差による。

海上の卓越風と卓越海流

海の表層大循環



海の渦の観測



海の深層大循環

深層水の流速測定法：炭素放射性同位体の濃度で測定

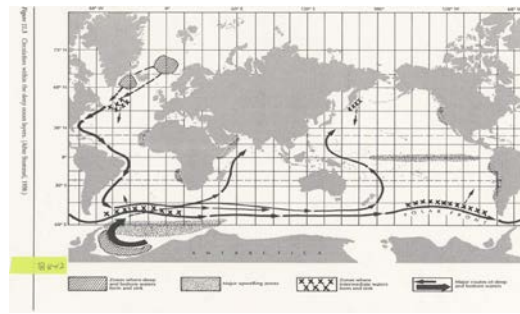
イルミンガー海 → 南極が 700 年かかる。

南極→オーストラリア南端が 600 年かかる。

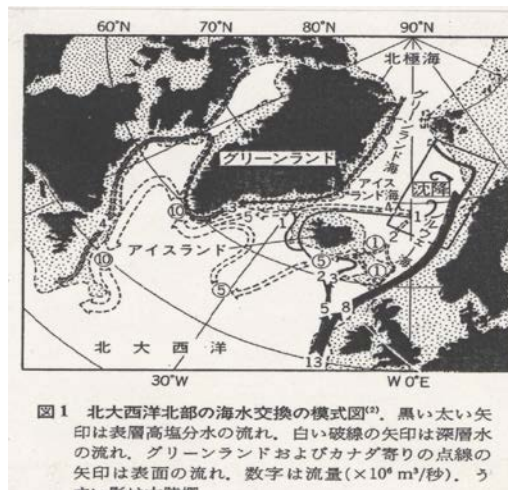
オーストラリア南端→北太平洋北部が 700 年かかる。

北太平洋の中層水が世界で最も古い水！！ 放射性物質を深海に放棄するとどうなるか？

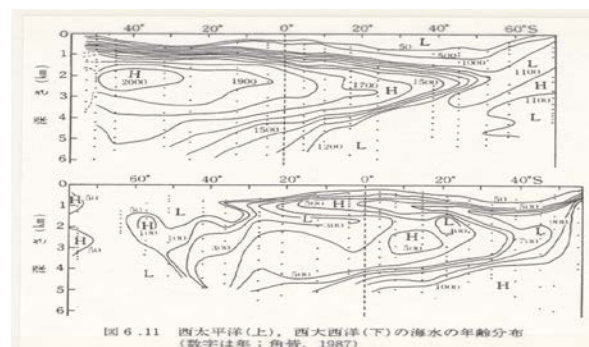
海の深層大循環



海水の潜りこむ海域



海水の年齢測定

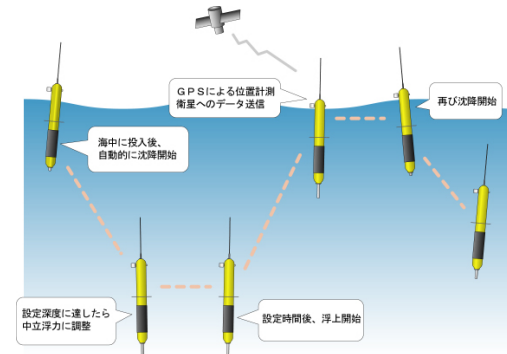


海洋循環の謎に迫る

- ・ 大規模海流の変化が引き金となり、世界が凍る。2004年に公開されたこの映画「デイ・アフタートゥモロー」はフィクションだが、現実には海は気候に大きな影響を与える。
- ・ 海水の循環には、黒潮などの表層の海流の他に、流れが深さ数千メートルの深海におよぶ地球規模の大規模な海流がある。これが深層大循環。
- ・ 海水は、水温が低く、塩分が高いほど重い。南極や北極近くでは海水が大気に冷やされる。
- ・ 海水が凍って氷ができれば、氷は塩分を取り込まないので、周囲の海水の塩分は高くなる。こうして、大西洋の北部や南極近くで海水が沈降して深層大循環が生まれる。
- ・ 海がため込む熱量は、大気の約1000倍。かりに海水全体が0.01度分の熱量を大気に放出すれば、気温は10度も上昇する。海のわずかな変化が気候に大きく影響する。
- ・ 深層大循環は地球規模で熱を運ぶので、その姿が変われば気候への影響も大きい可能性がある。

- ・ 気候変動を知るには、海の詳細な観測が欠かせない。
- ・ 海の観測は容易ではない。人工衛星で観測できるのは海の表面だけ。海中は測器を下して観測するほかはないが、広い海にくまなく観測船を出すのは難しい。
- ・ そこで 2000 年から始めた世界規模の試みが、日本も参加する「Argo (アルゴ) 計画」。
- ・ 海中を漂流する自動測定装置 (アルゴフロート) が、10 日間隔で深さ 2000 m まで潜って水温や塩分を測定する。約 3500 台が稼働している。
- ・

深海用プロファイリングフロートにより観測図



7回「森林消失と生物種絶滅」

熱帯林の特徴

森林のタイプ：降水の量と期間で異なる

熱帯雨林：常緑広葉樹の高木（50mの高さ）、熱帯季節林：落葉樹のある季節林

サバンナ：小高木の下に草本が密生、マングローブ林：潮間帯に生息

熱帯雨林の大きさ



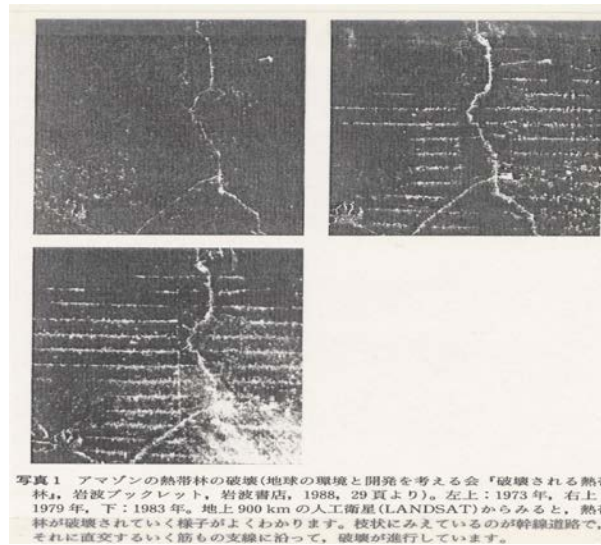
マングローブ林



熱帯林の破壊

過去 50 年で熱帯林は半減、アマゾンでは 2 年間で日本の面積の森林消滅、2075 年には全ての熱帯林が消滅？

アマゾン熱帯林破壊の様子



養分貯蔵庫

熱帯林は地球植物の 50%以上を占める。

養分貯蔵庫は地上部植物体（温帯林では土壤中）である。

高温多湿な気候条件下ではバクテリアの活動が活発、落葉は急速な分解され、リン、カリウム、カルシウムなどの養分となる。

熱帯雨林の植物は養分をすばやく吸い上げる（樹木自体に蓄える）ので、生育速度が速い。したがって、熱帯雨林の破壊は生態系の養分貯蔵庫も奪う。

砂漠化（生物の多様性破壊）

熱帯雨林生態系は多様で、地球上の生物 3000 万種の大部分が生息している。例えば、インドネシアのカリマンタン熱帯林では 700 種の樹木発見されている。また、ペルーでは 1 本の豆科の木から 43 種のアリ発見されている。したがって、熱帯雨林の破壊は多様な生物種も消失 することになる。

熱帯林と大気との相互作用

光合成で二酸化炭素の吸収と酸素の放出を放出する。熱帯林は温帯林などと違い、1 年中豊かな緑を保ち、地球の二酸化炭素の重要な吸収源、酸素の供給源である。アマゾンの熱帯林だけで化石燃料の二酸化炭素の 25%を吸収し、地球全体の酸素 30%を供給している。

熱帯林破壊の原因

東南アジアでは日本の輸入国は東南アジアに集中し、1 国の森林全て伐採した。このような商業的伐採が熱帯林破壊の最大原因となった。また、マングローブ林とエビ養殖。熱帯木材で外貨獲得をした。ラテンアメリカでは、フォルクスワーゲン社の放牧場のために、東京都の 2 倍の森林を一度に焼いた。ハンバーガー、フランクフルトソーセージ、ブラジル国民には大きな損失を与えた。

砂漠化と土壌の塩類化

土壌劣化（不合理な土壌管理、または生物生産性を上げるあまり起こる土壌の生産性の低下を伴う土壌荒廃を意味する。）、現代の土壌劣化の主要な部分は、砂漠化と土壌の塩類化である。乾燥地、半乾燥地への大量の灌漑水の導入による新しい農業形態の導入が土壌の塩類化を加速。砂漠化の定義（砂漠化とは乾燥地、半乾燥地、乾

燥半湿潤地帯において、気候変化、人類の活動など、様々な要因に起因して起こる土地の劣化である)、土地の劣化(土壌の有する生物生産機能が低下すること)

人為的要因

塩類集積による土壌の荒廃化、樹木の過度の伐採による土地の裸地化、家畜の過放牧による被覆植生の退化、乾燥地を含む開発途上国での爆発的な人口増加、食糧確保のために、乾燥地、半乾燥地への大量の灌漑水の導入による新しい農業形態の創出、従来の自然生態系に基づく **dry farming** の排除

湿潤地域の土壌では、塩類は雨水で洗い流されるので、土壌中の濃度は低い

乾燥地域の土壌では、塩類は雨水で洗い流されることは少なく、土壌中に残留する

塩類集積が乾燥地でよく生じる理由

乾燥地特有の土壌中の水分移動の特性、土壌中の水分は年間の大部分、土層の下方から上層へ移動、同時に土中に存在する大量の水溶性塩類が表層土へ移動する。

Dry farming (乾地農法)

熱帯地域の降雨依存型農業地帯の農業形態をドライファーミングと呼んでいる。

その土地で永続的な農業展開

自然環境との調和に立って考える、土地に与えられた自然の恩恵と制限を最大限に利用した合理的な技術の中から見出せるものがあるはず。

塩害で壊滅した農地 (パキスタン)



塩類化した土壌の断面 (インド)



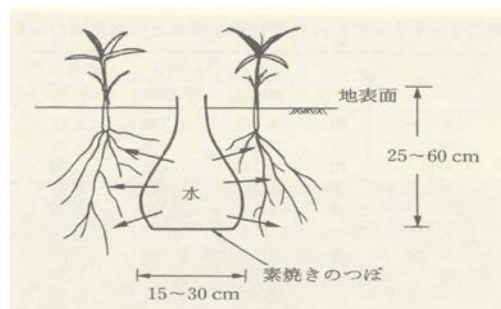
過放牧の例



ドライファーマーミングによる農耕地



クーゼ（中近東諸国）



灌漑と非灌漑の収穫差

表 3-4 イランにおける作物別灌漑地と非灌漑地の収量

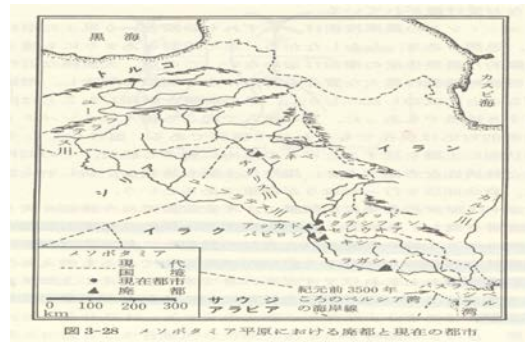
作物	収量 (kg/ha)		収量比 (A/B)
	灌漑(A)	非灌漑(B)	
メロン類	5,561	1,735	3.21
キビ	1,404	459	3.06
ミレット類	1,140	438	2.60
コムギ	1,182	482	2.45
イモ類	4,772	2,000	2.39
アルファルファ	2,784	1,187	2.35
オオムギ	1,153	508	2.27
野菜類	8,270	3,676	2.25
モロコシ	1,080	672	1.61
ワタ	1,133	957	1.18
マメ類	586	512	1.14

イラン・アルマナック（1989）より

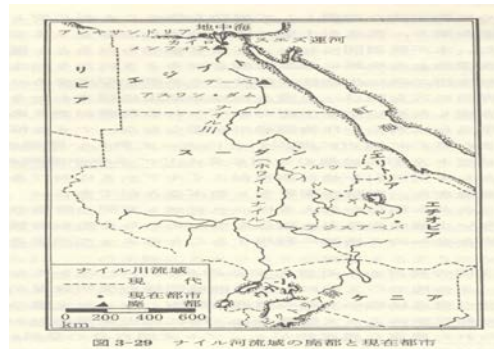
古代文明の衰退と土壌の荒廃

メソポタミア文明の灌漑農業と塩害、ユーフラテス川からチグリス川へ水路を建設して、その間を灌漑して農業を営んだ。

メソポタミア平原の廃都



ナイル川の廃都市



熱帯雨林再生への対処法

- ・ リオ以前は、環境保全⇔経済・開発
- ・ リオ以後は、自然資源は誰によって、そして誰のために、どのように保護されるにか？に関する対立
- ・ 一番の問題は、「環境保全はお金をどれだけかけるか次第で決まる」と考えていること
- ・ これは、経済成長、国際貿易、消費とも関係
- ・ 生産的経済領域の環境、人々の生計の破壊
- ・ 点在する「原生自然」指定地、保全と生産との人工的分離、人々と自然の人工的分離、自然資源、生物多様性、文化の多様性を破壊
- ・ 新たな考え方は、「生産土台として、生物多様性」を保存することを基盤とする。
- ・ 自然と人々の生計がともに保護される
- ・ 人にも自然にも優しい
- ・ 環境保全は生産、投資、および貿易から分離されることはない
- ・ 熱帯林問題は、様々な生態的、経済的、政治的、文化的、歴史的要因が複雑に絡み合っている
- ・ 安易な解答ではなく、問題の本質を探ろうとする誠実さが必要

熱帯土壌

- ・ 豊かな火山性土壌、ある程度豊かな沖積土壌、豊かで扱いにくい湿地土壌、極端に不毛な酸性土壌、すぐに浸食される山腹土壌などが、モザイク状に点在
- ・ 雨林地域の農業計画はの大半は、土壌を確認せずに進められている

伐採後の再生

- ・ 最善の策は、そのまま放置すること
- ・ ハリケーン後の森林は比較的急速に再生、これを真似た伐採方式の工夫
- ・ 重機を用いた伐採は、普通の伐採に比べてはるかに重大
- ・ 伐採後の二次活動、最大の影響は農業進出
- ・ 伐採後の回復期間、長くて 50 年、生物多様性に対する被害はごくわずか

解決への道

- ・ 開発された農地やプランテーションに着目
- ・ ここが、熱帯林を救い、生物多様性を保全するカギとなる
- ・ ここを「環境にやさしい」方法で利用する
- ・ 農地のような人手の入った生態系でも、生物多様性はきわめて高い
- ・ 日本でいえば、水田や里山などでの身近な生物の多様性

8回「オゾン層破壊・PM2.5」

紫外線

太陽の紫外線 (UV)、UV-A、UV-B、UV-C の 3 つの波長領域がある。

UV-A (0.32~0.40 μ m) 日焼け、UV-C (0.28 μ m以下) 高度 40~50 k mで吸収

UV-B (0.28~0.32 μ m) 大部分はオゾンに吸収、UV-B を吸収するのはオゾンだけ
地表の UV-B 量は成層圏のオゾン量に依存する。

オゾン濃度の減少は地表の UV-B を増大して、地上生物に悪影響する。

フロン

無色透明、無臭の気体・液体、化学的反応しにくい、熱に安定、大気中のフロン寿命 75~110 年

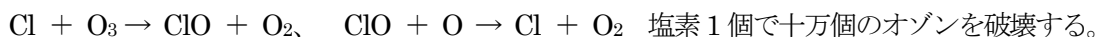
成層圏でのフロン分解

高度 25~35 k mで強い紫外線 UV-C で分解



成層圏のオゾン分解

塩素 Cl→オゾン O_3 と反応、一酸化塩素 ClO→酸素原子 O と反応、再び Cl→再びオゾン O_3 と反応



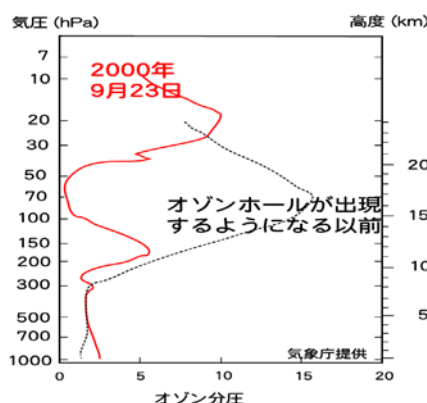
オゾンホール

南半球上空の極渦の中の大気、気温 -90°C (冬季)、極域成層圏雲の発生 (シャーベット PSC)、
塩素化合物の反応→気体中に比べて一万倍以上の速さで反応する。

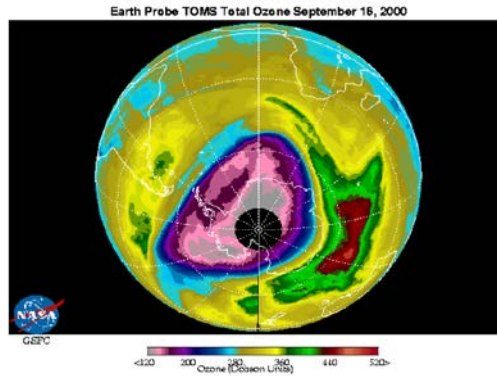
オゾン破壊の影響

成層圏のオゾン破壊、2 つの物理的影響。大気の温度構造が変化する。成層圏の温度分布が変化。気候変動、一度
起これば、地球上生物は適応が難しい。地上に到達する UV-B 増加、生体への紫外線の影響、皮膚がん、白内障、
免疫機能低下、農作物など他の多くの生物への影響は？

オゾン濃度の鉛直分布



南極のオゾンホール



光化学スモッグ

- ・ 1970 年、東京の住宅地で児童が目の痛み、大気汚染源のない場所、新大気汚染。
- ・ 強い太陽光で光化学反応、過酸化物質（オキシダント）が生じる現象
- ・ 原因物質は窒素酸化物・揮発性有機化合物（VOC）

VOC

- ・ VOC の発生源は工場（溶剤）、自動車など。
- ・ VOC が大気中で光分解を受けて反応性に富む物質（ラジカル）を生成、NO が NO₂ に酸化。
- ・ O₃ は生成される一方、オゾン（光化学オキシダント）濃度上昇。
- ・ 光化学オキシダントは、太陽の光、VOC の存在が必要、太陽光の強さ、VOC 濃度、反応時間で高濃度域の場所が決定。
- ・ 沿岸都市が発生源の場合、日中は海より汚染物質が内陸に移動し光化学反応、海から遠い内陸側で高オゾン濃度に。

PM2.5

- ・ 光化学大気汚染が発生は、夏季で日差しが強く、風が弱いとき。
- ・ PM2.5 が厄介なのは、髪の毛（70μm）、スギ花粉（30μm）より小さく、肺の奥まで入りやすい。肺で炎症を起こし全身に影響を及ぼす。たばこ作用が似ている。
- ・ 粒子状物質（particulate matter, particulates）とは、マイクロメートル（μm）の大きさの個体や液体の微粒子のことを言う。
- ・ 主に、燃焼で生じた煤（すす）、風で舞い上がった土壌粒子（黄砂など）、工場や建設現場で生じる粉塵のほか、燃焼による排出ガスや石油からの揮発成分が大気中で変質してできる粒子などからなる。
- ・ 粒子状物質という呼び方は、これらを大気汚染物質として扱うときに用いる。
- ・ 粒子状物質は主に人の呼吸器系に沈着（付着）して健康に影響を及ぼす。
- ・ 粒子の大きさにより体内での挙動や健康影響は異なる。
- ・ その影響度を推し量る測定基準として、大きさにより分類した PM10 や PM2.5（日本では微小粒子状物質とも言う）、日本では浮遊粒子状物質（SPM）などの指標が考案された。
- ・ 疫学的には、粒子状物質の濃度が高いほど呼吸器疾患や心疾患による死亡率が高くなるという有力な報告がある。
- ・ また、PM10 や浮遊粒子状物質よりも PM2.5 のほうが健康影響との相関性が高い。
- ・ これらに基づきアメリカや EU、次いで世界保健機関（WHO）、これに続いて世界各国が、PM10 や PM2.5 濃度の基準値を定めている。
- ・ 日本では、1972 年に設定された最初の環境基準が SPM（≒PM6.5 - 7.0）であり、当初から小さい微粒子を採用していた。
- ・ しかし、PM2.5 に関しては環境基準の設定が遅く、世界で採用され始めた 1997 年から 12 年たった **2009 年** によりやく設定されている。

光化学反応の発生

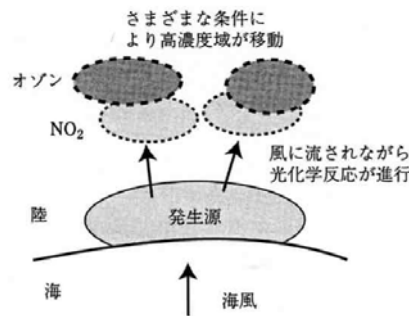
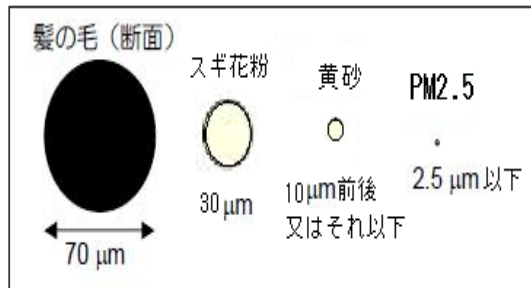
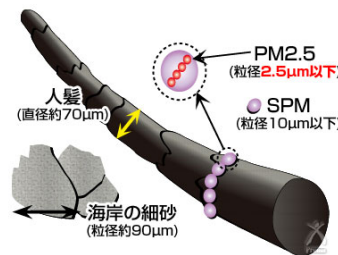


図 5.5 夏の晴天時における光化学反応の発生.

PM_{2.5}



日本の環境基準

SPM ; 1 時間値の 1 日平均値 100μg/m³以下、かつ 1 時間値が 200μg/m³以下であること

PM_{2.5} ; 1 年平均値 15μg/m³以下、かつ 1 日平均値が 35μg/m³以下であること

- 中国の粒子状物質濃度は経済発展などにより、資料が確認できる 1990 年ごろにはすでに深刻なレベルに達していた。例えば、上海における 1990 年の PM₁₀ の年平均濃度は 350μg/m³を超えており、WHO 暫定目標で最も緩い暫定目標 1 の 5 倍以上であった。
- 粒子状物質による大気汚染の深刻さを浮き彫りにしたのが、2011 年 11 月に北京アメリカ大使館が始めた独自観測値の公表である。
- 同大使館は独自の PM_{2.5} や空気質指数 (AQI) の監視を行い、ツイッターで公表を開始した。翌 2012 年 5 月には上海アメリカ総領事館も同様の公表を開始した。これにより、中国の行政当局が発表している値と大使館の値が比較されてインターネット上で騒ぎとなり、当局が公表を差し止めるよう要求する事態となった。
- その後、当局は方針を変えて測定・発表を始めている。
- 2013 年 1 月の汚染は「1961 年以来最悪 (北京日本大使館)」、「歴史上まれにしか見られないほど (中国気象局)」とされるレベルで、風が弱かったため 3 週間継続、呼吸器疾患増加、工場の操業停止、道路・空港の閉鎖等の影響がでた。
- 12 日は北京市内の多くの地点で環境基準 (日平均 75μg/m³) の 10 倍近い 700μg/m³を超え、月間でも基準を達成したのは 4 日間だけ。

- ・ 中国の汚染と同時期に、九州北部のいくつかの地点で環境基準（日平均値）の3倍程度の1時間値を観測するなど、西日本で一時的に高濃度のPM2.5が観測された。
- ・ 市民の関心の高まりで、2月8日時点での国立環境研究所の大気汚染広域監視システム「そらまめ君」のWebサイトがアクセス困難になる事態、環境省は2月12日にPM2.5の特設ページ「微小粒子状物質（PM2.5）に関する情報」を設置。2月には自治体独自の情報提供を検討・開始するところも出た。
- ・ 環境省は同年2月に専門家会合を開催してPM2.5の注意喚起に関する暫定的な指針を決定し、今後も知見が得られれば適宜見直しを行うとした。

「たばこ PM2.5 の塊、禁煙のない居酒屋、北京並み、脳卒中やがんリスク高まる。日本禁煙学会は、こんな見解を発表」。

- ・ 2.5μm以下の微粒子はタバコの煙で、フィルターを介せずに周囲に広がる副流煙に多い。
- ・ 自由に喫煙できる居酒屋のPM2.5濃度は568μg/m³、中国政府が「最悪」としたときの北京の大気とほぼ同じ。禁煙席でも、喫煙席とガラスや壁で完全に仕切られていない場合、336μg/m³。
- ・ 国の環境基準値は1日平均で35μg/m³、外出自粛の暫定指針は70μg/m³。多くの専門家は短時間でも悪影響はあると結論付けている。

2013.12.7 日経、低燃費の直噴ガソリン車、PM2.5粒子数が従来の10倍

- ・ 低燃費のガソリン車として日本や欧州市場で投入され始めた直接燃料噴射式のガソリン乗用車が排出する微小粒子状物質（PM2.5）の数が、従来のガソリン車の10倍以上であることが、国立環境研究所の調査で分かった。2012年に日本メーカーから発売された新型エンジンの約4割に採用

2014.1.6 読売、PM2.5高精度で分析、発生源の推定可能に

- ・ 東大などが新装置開発、現行装置の2倍となる8種類以上の成分を分析でき、発生したの特定が期待できる。装置のポンプで大気を吸引し、そこに含まれるPM2.5に2種類のレーザーを当て、発する光の色の違いなどから、成分を調べる。

2014.2.16 読売 インド、PM2.5深刻、排ガス急増、中国に匹敵

- ・ インドの大気汚染が中国に匹敵する深刻な事態に。ニューデリーでは、昨年11月～今年1月の3か月で、PM2.5濃度が月平均250μg/gラム前後を記録。
- ・ 1日平均ではWHO基準の24倍の600μg/gラムを超す日もあった。
- ・ 危機意識の低い政府や自治体は具体的な対策を示さず、国民の健康が脅かされている。ニューデリーの冬は近年、北京と同様に「濃霧」に包まれるようになった

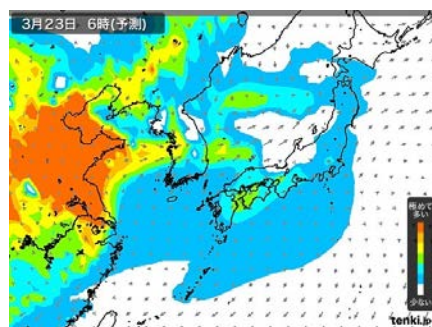
2014.2.28 日経 PM2.5 宇宙から監視、越境汚染、早めに注意喚起

- ・ 政府は、PM2.5などの大気汚染物質を宇宙から観測する体制の整備に乗り出す。
- ・ 2017年度に打ち上げる予定の人工衛星に汚染物質の濃度を広い範囲でとらえるセンサーを搭載する。
- ・ 中国などから飛来するとみられるPM2.5などを宇宙から監視し、早期の注意喚起や発生源の特定などにつなげる。NASAなどとも連携して地球規模の観測網をつくり、国境を超える環境問題の解決を目指す。

2015.3.23 読売 {PM2.5 九州・山口高濃度、福岡など4件、今年最初の注意喚起情報}

22日、PM2.5濃度が高くなり、各地で1時間当たりの濃度が100マイクログラムを超えた。福岡、佐賀、長崎、山口県は、外出や屋外での運動を控えるよう呼びかける注意喚起情報を出した。この日は、黄砂も観測されている。

気象庁のPM2.5予測 2014.3.23



9回「温暖化モデルと IPCC」

世界平均地上気温変化

- CMIP5（世界気候研究計画の第5期結合モデル相互比較計画）の複数のモデルによりシミュレーションされた時系列（1950年から2100年）。
- 1986～2005年平均に対する世界平均地上気温の変化、予測と不確実性の幅（陰影）の時系列を、RCP2.6（青）とRCP8.5（赤）のシナリオについて示した。
- 黒は、復元された過去の強制力を用いてモデルにより再現した過去の推移。

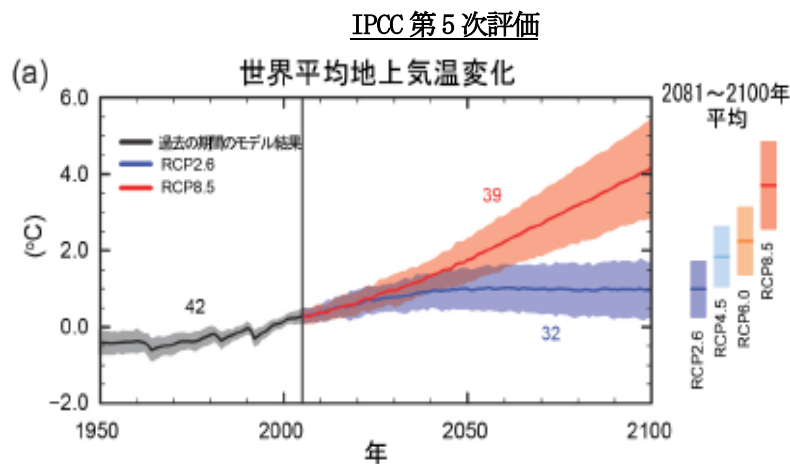
全ての RCP シナリオに対し、2081～2100 年の平均値と不確実性の幅を彩色した縦帯で示している。数値は、複数モデルの平均を算出するために使用したモデルの数を示している。

RCP（代表的濃度パス）シナリオ

- Representative Concentration Pathways
- RCP2.6；今後すぐに強力な温室効果ガスの排出規制の実施された場合
- RCP4.5；排出規制有で、放射強制力のピークが今世紀中に来る場合
- RCP6.0；放射強制力のピークが来世紀中になる場合
- RCP8.5；温室効果ガスの排出がずっと増加の場合

放射強制力 (radiative forcing)

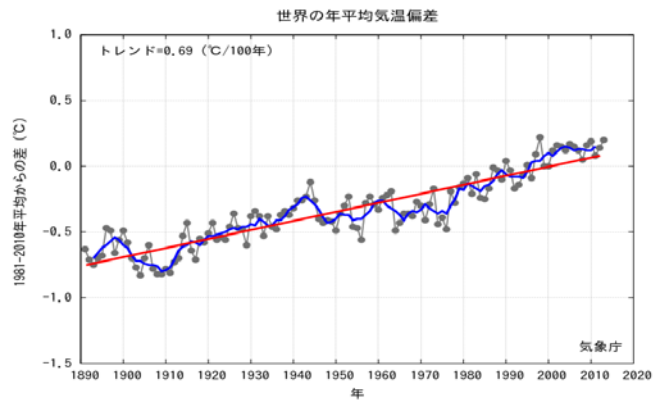
- 放射強制力とは、何らかの要因により地球気候系に変化が起こった時に、その要因が引き起こす放射エネルギーの収支（放射収支）の変化量 (W/m^2) として定義されている。
- RCP シナリオの 2.6、4.5、6.0、8.5 は大気への二酸化炭素の増加による放射強制力 (W/m^2) を表している。



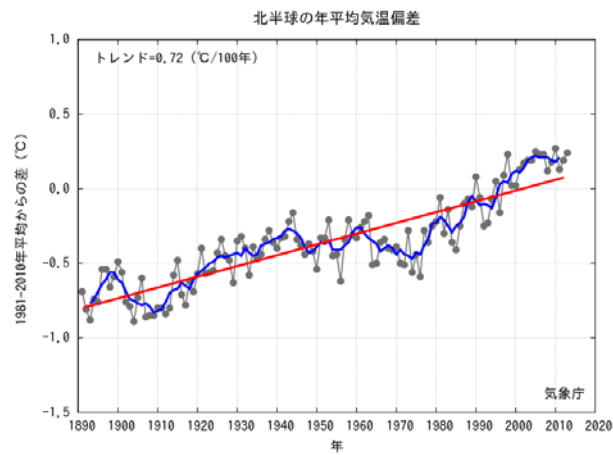
世界平均海面水位予測

- 21 世紀にわたる世界平均海面水位の上昇予測（1986～2005 年平均との比較）。CMIP5 と諸過程に基づくモデルの組み合わせによる予測を RCP2.6 シナリオ、RCP8.5 シナリオについて示す。可能性が高い幅は陰影部分で示されている。
- 全ての RCP シナリオに対し、2081～2100 年の平均について可能性が高い予測幅を彩色した縦帯で、対応する中央値を水平線で示している。

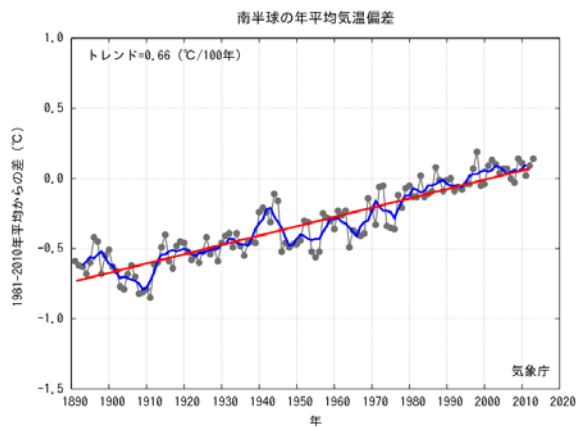
1890～2012 年の気温（世界；気象庁）



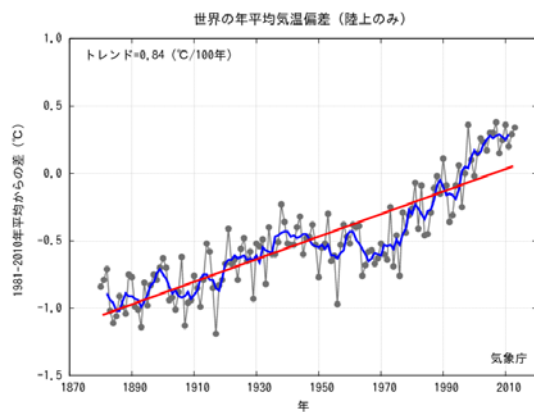
1890～2012 年の北半球気温（気象庁）



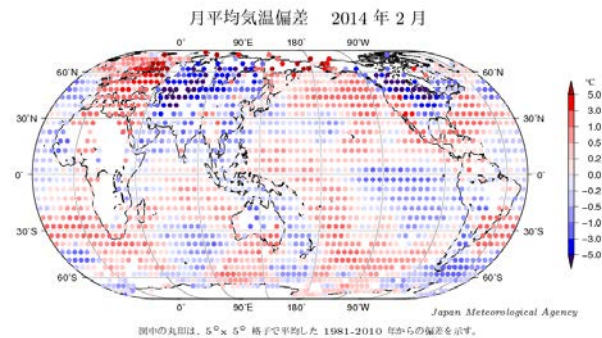
1890～2012 年の南半球気温（気象庁）



1890～2012 年の陸上気温（世界；気象庁）



2014 年冬の気温 (2 月)



IPCC とは

- 「気候変動に関する政府間パネル」
- (Intergovernmental Panel on Climate Change)
- 温暖化の科学的知見とりまとめ (国連組織)
- 活動は世界中の科学者がボランティアで行う
- 約 500 人の科学者 (主執筆者) が分担し世界中の学術論文を調べる (800 人執筆協力者)
- 現在、温暖化について何が分かっていて何が分かっていないのかを、詳しく評価した報告書を作る。
- IPCC は研究組織でなく、現状の知見を整理する組織
- 報告書は約 2000 人の専門家や政府関係者がチェック
- 各国政府代表者が報告書の要約を一文一文承認して完成
- これが IPCC が「政府間パネル」と呼ばれる理由

IPCC の作業原則

- 定義されている役割は、包括的、客観的、オープンで透明な基礎に立ち、人間により引き起こされる気候変動のリスクに科学的基礎、その潜在的な影響および適応と緩和のオプションの理解に関連する科学的、技術的、社会経済的な情報を評価すること

パラメタ化、チューニング

- 格子の量では表せないミクロな現象について、その効果のみをマクロな格子の量を使って推定して、マクロな量の方程式に組み込む。
- 係数の決め方、モデルの中の不確定な係数の値を決める作業、答えが現実合うように決める

予測は正しいか

- 解いている方程式の中に半経験的な部分があり、精密に方程式を解いても正しい答えに近づくかどうか分からない問題を含む。
- 気候モデル研究者は、気候モデルが完全でないことをよく知っている。
- 信頼性の指標として不十分である。より定量的で、できるだけ客観的な信頼性の情報、裏を返せば不確かさの情報を予測に付与することを考える必要がる。
- この予測の不確かさを定量化する試みは、世界的にもまだまだ研究途上である。

予防原則

- 社会的に重要な判断でこのような不確かさを伴う場合には「予防原則」という考え方がある。
- 予防原則は、環境に重大かつ不可逆的な影響を及ぼす恐れがある場合、科学的に不確かであっても規制措置を取るといった考え方。

カオス

- 1961 年に、気象学者ローレンツが発見した数学モデル
- 天気予報をコンピュータで 3 回予測したところ、3 回とも全く違う答えが出た。これは、最初の予測は小数点以下が 6 ケタであるのに、検算は小数点以下を 3 ケタで計算したことが原因。
- 従来、数学では小数点の違いは、予測の精度の違いぐらいにしか影響を及ぼさないと考えられていたが、

最初のわずかな違いは全く違う結論を導き出す（初期値敏感性）。

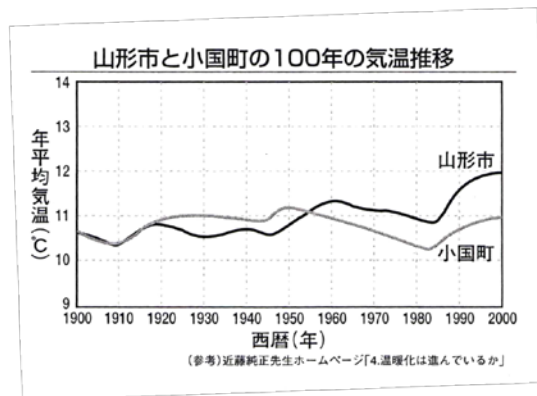
過去 150 年間の温度測定

- IPCC の第 4 次報告書では、過去 100 年間に地球の平均地表気温は 0.7°C 上昇。過去 150 年間ぐらいは、地球の温度は温度計で測定
- ただし、世界の全地点で測られているわけではない。これは、過去に存在しているデータを最大限に使い、あとは統計的に推定し出てきた数字（この点が、最も問題な部分です。この値が地球の平均気温を本当に表しているのか疑問がわく）
- モデルの性能を確かめる方法；
- 過去の温度分布に対応しているかどうかを調べる。
- 過去の温度分布の信頼度が低ければ、性能を確かめることは不可能。

ヒートアイランド現象の影響

- 都市ではヒートアイランド現象（人間活動での熱、緑の減少、アスファルトの蓄熱など）による温度上昇
- 日本では過去 100 年間に平均で 1°C 上昇、都市部では $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 上昇、しかし、都市の面積は地球全体からみると非常の狭いので、都市化の影響は地球の平均気温にはほとんど影響ないことが確かめられている（この部分も非常に疑問が残る）。

地域別の気温



20 年ぐらいの予測

- 20 年ぐらいの予測は、温暖化のシグナルが自然変動のノイズに比べて十分に大きくなく、はっきりとなにかが起これといった科学的な解析がやりにくい
- 近未来の気候の変動は半分が温暖化、半分が偶然によって支配されると考える
- 偶然の部分はどう扱うか？

数十年での気候変動

- 最近数十年の地球温暖化が ENSO の振る舞いと密接に関連
- 地球の気候変動は数十年スケールが存在する。1920 年からの気温上昇の中で数十年スケールの気候変動が重なって起こっている。
- 北大西洋振動（NAO；数年から数十年で変動）
- 数十年太平洋振動（IPO；20 年の周期、50～60 年の長周期も）
- 北極振動（AO）と南極振動（AO）

熱収支に与える雲の影響

- 地球表面の約 60% は常に雲に覆われている。
- 雲は太陽放射を反射する。
- 雲は太陽放射と地球放射の両方を考える必要がある。
- 雲があると、晴天時に比べて、宇宙へ放射するエネルギー（地球放射）は少なくなる（毛布効果）。
- 雲が持っている 2 面性。厚い雲、薄い雲、雲の中の温度、高い雲、低い雲で効果は異なる。
- 地球全体で平均すると雲により、地球が吸収する太陽放射量 $48\text{W}/\text{m}^2$ 減少、宇宙に放射する熱量は $31\text{W}/\text{m}^2$

減少する。

- つまり、雲は地球の気候を冷却させる効果を持つ（衛星による観測）。
- 地域的な気候に与える影響については分かっていない。
- 毛布効果は熱帯地域で最大、極に向かって減少する。
- 両半球の緯度 30°C よりも極側の海洋では、冷却効果。北太平洋、北大西洋で大きく、 $50\sim 100\text{W}/\text{m}^2$ にもなる。
- 北緯 45° にある雲の領域が 35° まで南側に移動すると、北半球では平均して $3\text{W}/\text{m}^2$ の放射冷却効果が生まれる。
- 雲の変化は、気候に大きく影響を与える。
- IPCC では、大気中の水（水蒸気、雲、降水）の影響を取り除いている。
- IPCC では、大気中の水は二次的なフィードバックにすぎない、対流圏での熱の再配分を起こすだけなので、放射強制力には含めない？
- 産業革命以前でも、現在でも、地球の気温を高く保っている温室効果の主因は、大気中の水（8割から9割）。湿った空気には水分子が5%、二酸化炭素は0.04%。
- 大気中の水による熱の移動は現在でも、よく解明されていない。
- 太陽活動の変化、宇宙線の量、雲の形成に関係あり

気温と炭酸ガスの変化

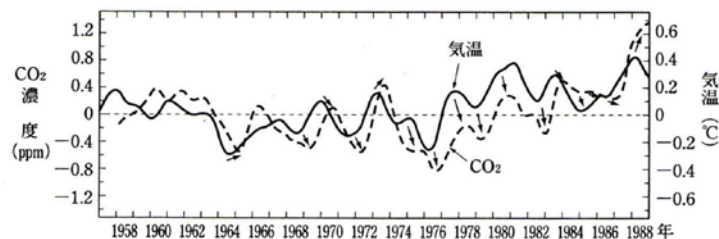


図1 気温の変化と炭酸ガス濃度の変化の対応

気温の変化と二酸化炭素濃度の変化の対応。CO₂の変化は気温の変化より遅れていることがわかる

根本『超異常気象』中公新書p.213より

私の見解

- 今後、気温が低下し、大気中二酸化炭素濃度低下の場合、人類放出の二酸化炭素が温暖化の原因ではなくなる
- 気温低下し、大気中の二酸化炭素濃度が依然として上昇の場合、二酸化炭素が温暖化の主な原因ではなくなる。
- 気温上昇で二酸化炭素濃度が上昇するか、二酸化炭素濃度上昇で気温が上昇するのか結論は出ていない。
- 過去の間氷期にこれほど二酸化炭素濃度が上昇したことはない（南極の氷床コアを見る限りでは）。
- 過去に人間により、大気にこれほど多くの二酸化炭素を排出したことはない。
- 実験室レベルで二酸化炭素濃度上昇で気温は上昇する。
- 自然で二酸化炭素がどの程度気温上昇に貢献するか？
- ヒートアイランド、水蒸気、雲、海洋・極域の数十年周期変動、太陽活動及びそれに伴った間接的な影響を把握することが必要
- 二酸化炭素排出で大気二酸化炭素濃度が上昇したか？
- 二酸化炭素が温暖化の主な原因？
- 結論後では対策は手遅れ
- リスクはあっても人間による影響を少しでも減らす必要
- そのために地震国で原発の危険性を負うこともナンセンス
- IPCC 予測は今の技術状況での予測、
- イノベーションによる改善は？

- IPCC 見積もりの限界を認識する必要
- 平均値の取り扱いに注意が必要、気温の精度を加味した予測が必要

天気と天候

天気予報

気候変動や気候変化という用語が意味する内容を理解するには、まず、天気と気候の違いについて認識する必要がある。単純に説明すると、天気とはある時間帯に大気中で生じた現象を意味するのに対し、気候とは、長年にわたって集計されたデータによる統計に基づいて、一年のある時期に生じやすいと予測される現象を意味している。

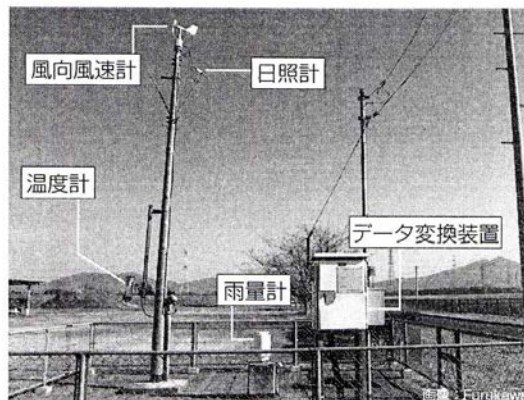
天気予報

- 現在の天気予報は、高性能スパコンで行う
- このコンピュータは世界中から気象観測データを集め、自身の内部に地球大気の現状を再現
- 再現方法は、地球大気を水平方向、鉛直方向に細かく区切った格子を作る
- 格子点の一つ一つに、空気の温度、気圧、風向・風速、水蒸気量、水滴や氷晶の量などの情報を与え、数値で地球大気を再現

アメダスなどで地上観測を行う

- 天気予報に必要な気象観測は、全国の気象台などの観測所で行われている
- 雲、風向・風速、気温、気圧などの最も基本的な観測は「地上気象観測」とよばれ、観測データは、国内のみならず国際的にも利用されている。
- アメダス (AMeDAS) は英語表記の Automated Meteorological Data Acquisition System の頭文字をとってつけられた名前で「自動気象データ収集システム」。

アメダス観測所



- 全国約 1300 か所に無人の観測所設置、主に降水量を観測
- そのうち約 850 か所は風向・風速、気温、日照時間も観測、さらに積雪量を観測する観測所もある。約 160 か所の地方気象台や特別地域気象観測所、航空測候所などの気象官署の観測データも、アメダスのシステムに組み込まれている
- 観測で得られたデータはネットワークを通じて気象庁のコンピュータに自動的に集められる

ゾンデで高層観測を行う

- 数値予報を行うには、コンピュータに入力するデータとして、地上だけでなく上空の気象データが不可欠、「ラジオゾンデ」と呼ばれる観測機器、気球の観測装置は上空の気象を探索（ドイツ語の sonde）し、地上に無線（英語の radio）で送信されることから、ラジオゾンデと呼ばれる。気球は毎分 300m 程度の速さで上昇し、高度約 30 km まで観測できる。
- ラジオゾンデは、気圧、気温、湿度の観測装置、これに風の観測装置を入れた観測機器をレーウィンゾンデという。レーウィンは「ra(dio)win(d)」の略で、無線を使った風の観測という意味。
- 図はレーウィンゾンデを飛ばす時の様子。日本でこれを行う測候所は十数カ所、全世界では約 1000 か所
- わずかに海上の気象観測船から行う場合もある。これらの高層気象観測は、数値予報に必要不可欠なデ

ータを得ることができるので、世界中で時刻を合わせて1日2回行われる

- 気球の高度や位置を知る方法として、カーナビゲーションシステムに使われるGPS受信機を搭載する

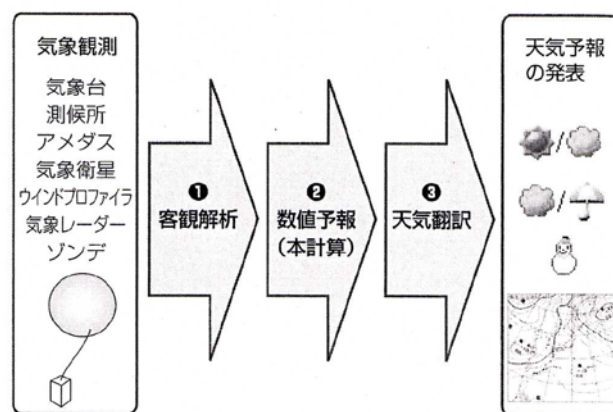
ウインドプロファイラで高層気象観測を行う

- ウインドプロファイラは、地上の装置から高度約6 kmまでの風向や風速を観測でき、上昇流や下降流も観測できる。全国に約30カ所あり、空のアメダスとも呼ばれる
- その観測原理は、ドップラー効果による。電波を出すものと観測者が、相対的に近づいたり遠ざかったりしている場合、電波が元の波長よりも短くなったり長くなったりする

気象衛星

- 気象観測に利用されているリモートセンシングの代表は気象衛星
- 衛星には静止衛星と極軌道衛星の2種類
- 前者は自転周期と合わせて地球を周回するよう、赤道の上空の軌道を西から東に飛行
- そのため、地上から見るといつも同じ場所に見える
- このような人工衛星の飛行が実現するのは、必ず赤道上空の高度約3万6000 kmの軌道と決まっている
- 静止衛星は、「ひまわり」の他にヨーロッパ、中国、アメリカ、ロシアがそれぞれ分担して打ち上げられ、運用、極軌道衛星は、地球をほぼ南北に周回している。高度800 kmから1000 kmの軌道から観測
- 日本は、アメリカの衛星「NOAA」が観測したデータを受信して、利用
- 衛星が観測した生のデータは、地上基地で受信後、「気象衛星センター」で処理、そこでやっと画像なる

数値予報の流れ



コンピュータはどのように予報を行うのか

コンピュータで地球大気を再現する「客観解析」

- 数値予報は大気の状態をコンピュータの中で再現し、物理法則に基づいてシミュレーションする方法
- 初めの段階は、コンピュータに与える初期データの準備
- 大気を格子に区切って、それぞれの格子点に温度や気圧などの気象データを与える必要がある
- 現実の大気の温度や気圧などは、格子点だけに存在しているわけではなく、その間の空間を連続的に変化、できるだけ細かい格子にしたほうが実際の地球大気に近づく
- 数値予報の結果は、各格子点の温度や気圧などとして出力、格子点の細かい予報のきめ細かさにつながる
- 格子点を細かくし過ぎると、それだけ計算の量が増え時間がかかる
- 予報の時間的・空間的な広がりや、コンピュータの能力に合わせ、適正な細かさにする必要がある
- 日本の気象庁に数値予報が導入したのは1959年（スウェーデン、アメリカ、ソ連につぎ、4番目）
- その後、5年から8年ごとにバージョンアップをし、2006年には1秒間に21兆5000億回計算する能力を持つ
- 地球大気全体をシミュレーションの対象とする「全球モデル」（2007年から使用）は大気の鉛直方向を60層に分け、水平方向には1辺20 kmに分けた格子が使われている
- 海洋上など、観測のあまり行われていない領域、飛行機などのデータは観測時間がずれ、格子点と実際

の観測点は一致しない。

- このようなデータが空白になったり、空間的、時間的にずれていたりする場合でも、すべての格子点に同時刻でのデータを与えなければ、数値計算を始めることはできない。
- そこで、時間的・空間的に近い周囲のデータから、適切な方法で推測し、足りないところを埋めるデータを作り出す。その際、直近の過去に行われた数値予報の結果を、推定値として利用することも行われている。
- 入手されたすべての観測データを調整して、数値予報の初期値として入力するデータをすべてそろえる作業を客観解析あるいはイニシャリゼーションという。
- これは、地球大気をコンピュータの中に再現する作業
- この結果を基に、現状の気象を表す各種の天気図を作成
- 観測データは、解析に使う前に様々な角度から品質管理を行い、誤観測の除去や修正をする
- この膨大な作業は、スーパーコンピュータにより自動化されている。

予報モデルの種類

予報モデルの種類	モデルを用いて発表する予報	予報領域と水平解像度	予報期間	実行回数
メソ数値予報モデル	防災気象情報	日本周辺 5 km	～33 時間	1 日 8 回
全球数値予報モデル	分布予報、時系列予報、府県天気予報、台風予報、週間天気予報	地球全体 20km	～9 日間	1 日 4 回
台風アンサンブル数値予報モデル	台風予報	地球全体 60km	5 日間	1 日 4 回
週間アンサンブル数値予報モデル	週間天気予報	地球全体 60km	9 日間	1 日 1 回
1 ヶ月アンサンブル数値予報モデル	異常天候早期警戒情報、1 ヶ月予報	地球全体 110km	1 ヶ月	週 2 回
3 ヶ月・暖寒候期アンサンブル数値予報モデル	3 ヶ月予報、暖寒候期予報	地球全体 180km	～7 ヶ月	月 1 回

数値予報の計算手法と「カオス」

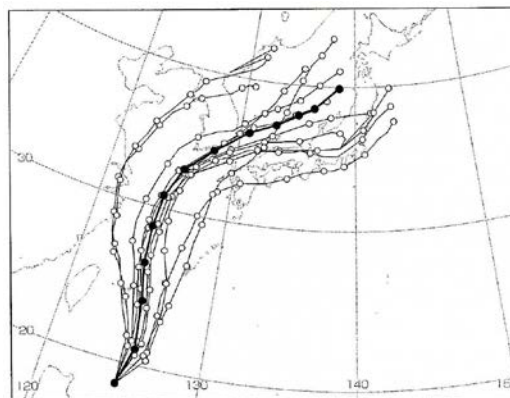
- 2 番目の段階が数値予報の本番。初期値が用意され、本計算を行う。
- この時使われるプログラムが「数値予報モデル」
- 数値予報モデルには地球表面の地形の他、法則や方程式を基にした連立方程式が組み込まれている。
- 式の変数は、温度、気圧、風の速度（東西、南北、鉛直方向の成分）、水蒸気量、雲の水量（氷を含む）
- 各変数に初期値を与え、ほんの少し先の時間後に各変数がどのように変化するかを導く。そこで、得た値を新しい初期値とし、さらに少しだけ先の値を導く。小刻みな時間間隔で何度も繰り返し、知りたい時間後の値を導くのが数値予報の計算方法
- 時間間隔は全球モデルで 10 分。84 時間あるいは 216 時間先まで予報
- 繰り返し数は約 500 回あるいは約 1300 回。格子点の数の多さに加えて、このような繰り返し計算を行うので、高性能のコンピュータが必要
- 大気の運動を表す方程式が非線形であることは、大気現象が本質的に複雑系と呼ばれる現象であることと関係
- 複雑系とは、要素が多数集まって、複雑に関係し合いながらまとまっている様子を表す言葉
- 例えば、台風で「風」と「水蒸気の凝結」は互いに原因でもあり結果でもあり、相互作用している。風、水蒸気は先の方程式の 9 つの変数の一部、さらに、「温度」「気圧」などすべての要素が複雑に関係し、台風という現象が起こっている

数値計算に使う法則や方程式

- 複雑系の大気の運動を予測するとき、数式がすっきりとは解けないで小刻みな繰り返し計算が必要ということ以外にも、非常に深刻な問題がある
- 「初期値敏感性」。木の葉を例にとると、同じ 1 点から全く同じ条件で木の葉を落としても、落とす時のほんのわずかな違いでも、結果は全く違ってくる

- 初期値がほんのわずかに異なるだけで、将来の運動の道筋が全く異なってしまう性質のことをいう。
- 数値予報に当てはめると、初期値のわずかな違いが、やがては非常に大きな違いとなりうる。複雑系の現象が初期値敏感性をもつため将来の予測が一義的に決定できないことは、カオス（chaos＝混沌）と呼ばれる。
- 例えば、図は台風の中心位置を数値予報で予想したもの。図のたくさんの進路は、わずかに初期値を変えた 11 通りの予想を表す。最初のうちは、予想はそれほど違わないが、ある程度時間がたつと、初期値による違いが非常に大きくなっている。
- つまり数値予報は、初期値がわずかに違っても短期の予報はほぼ一致するが、長期ではばらつきが大きい。これは数値予報の原理的な限界。
- しかし、長期の予報も必要とされるので、アンサンブル予報という工夫がされている。
- アンサンブル予報は、初期値敏感性を克服し、なるべく予報期間を長くするために開発された技術
- 基本的な考え方は、実際の観測データだけでなく、わざと少しずつずらした多数の初期値を用意し、それぞれの初期値について独立に通常の数値予報を行う
- 予報結果のばらつき具合から、最も実現性の高い予報を見出す
- 結果にばらつきがあっても、極端に他とは異なるものだけを除外し、残ったものを平均化したりすると、ある程度「確からしい予報」を見つけ出すことができる
- 図の 1 本だけ太い線で描かれているが、それがアンサンブル予報の結果
- 週間天気予報や 1 か月予報、台風予報では、アンサンブル手法が用いられた数値予報モデルが使われている。
- 「週間アンサンブル予報モデル」と「1 か月アンサンブル予報モデル」では約 50 通りの数値予報を行い、「台風アンサンブル予報モデル」では 11 通りの数値予報を行う。
- 計算回数が多いので、これらのモデルでは、格子点の数を「全球モデル」より少なくして、計算の負担を減らす。このように、数値予報は、長期の予報では限界がありながらも工夫して結果をだし、かなり高い信頼度で結果を出している。
- 数値予報結果は、気温、気圧、風などの要素が格子点上の値として得られるので、格子点値あるいは GPV（Grid Point Value；ジーピーブイ）と呼ばれる。
- その後、コンピュータは、数値予報の結果を天気図の形に表現し直した各種の「予想天気図」も描画して出力する。

台風の予想進路



数値予報の結果を天気翻訳する「ガイダンス」

- 数値予報の結果である格子点値や予想天気図は、そのまま天気予報にはならない。
- 次に 3 番目の段階がある。計算のしやすさのため、数値予報モデルに表現されている地形は簡略化しており、実際の地形との間には違いがある。
- また、発表される天気予報に必要な「晴れ」「曇り」「霧」「最高・最低気温」「降水確率」などは、数値予報の格子点値としては出てこない。
- さらに、予報区、代表地点に対応した予報はできない

- このような事情から、数値予報がはじき出した結果は、人が利用できる天気予報となるように、後処理を行う必要がある。
- このような作業は天気翻訳と呼ばれ、翻訳の結果作成される資料をガイダンスあるいは予報支援資料という。
- ガイダンスは数値予報が終了すると、その格子点値を用いてコンピュータが自動的に計算して出力する。
- さらに、発表される各地方の天気予報の案文もコンピュータによって自動的に作成、ガイダンスは天気予報を行う予報官や気象予報士が頼りにする「虎の巻」。
- これらのガイダンスは、気象庁の内部だけでなく、民間の気象事業者にも配信。各メディアの天気予報がほとんど同じなのは、このような事情の影響かもしれない。

雨を細かに予報する

- 2007 年から使われている数値予報モデルのうち、最もきめ細かいのは「メソモデル」、格子点の間隔は 5 km、1 日 8 回、3 時間おきの予報
- このモデルには上昇気流や水蒸気の凝結、雨や雪、あられなどの落下といった雲の中で起こる現象でもたらされる効果を取り入れられている
- 天気予報の最も重要な役割の一つに、大雨による災害を防ぐことがある。「集中豪雨」とか「ゲリラ豪雨」とかよばれる短時間で狭い地域に集中して降る雨に備えるには、時間的空間的にきめ細かい予報が必要。気象庁は数値予報モデルの解像度をさらに向上させることに取り組んでいる

気象レーダーとアメダスの連携

- リモートセンシング技術のひとつで、パラボラアンテナを用いて電波をビーム上に発射し、雨粒に当たって戻る電波を受け取る
- 反射して戻るまでの時間から雨粒までの距離がわかり、アンテナの向きからその方向がわかる
- 反射してくる電波の強度から雨量強度を推測する計算をする
- 1 つのレーダーで観測できる範囲は 200 km、気象庁では約 20 のレーダーサイトのデータをつなぎ合わせて、全国的なレーダー画像を作成
- 気象レーダーは、空気中の水滴を観測して降水量を推定、それは地上の降水量と一致しているとは限らない
- そこで、地上のアメダスなどの雨の観測データと照合して、レーダー観測結果の画像を補正したレーダー解析雨量（雨量解析図）を作成
- アメダスだけではまばらな点の集まり、気象レーダーと組み合わせて、連続的な面として情報が得られる
- 気象レーダーには、ドップラー効果を利用でき、雨粒や昆虫などの動きから風を観測することもできる
- きめ細かく雨の状況を把握することが可能。雨域の移動方向や速度を調べ、その雨域がそのまま移動すると仮定すれば、短時間後の雨の領域が予測できる
- 実際には、メソモデルの数値予報と組み合わせて雨域の移動を予測する。このようにして作成されるのは、降水短時間予報と呼ばれる予報
- 6 時間先までの雨の区域と強度の予測を地図に表し、1 時間おきに発表
- 1 時間おきの予報では、集中豪雨への対策では遅い場合もある
- そのため、数値予報結果を用いず、雨雲が現状の動きを続けると仮定することで、10 分ごとの雨の区域と強度を 1 時間先まで予報するレーダー降水ナウキャストという予報もある
- これは、積乱雲にともなう落雷や竜巻の発生の予報にも使われる。これは気象庁のホームページでいつでも見られる

予報官はどんなことをしているのか

- 昭和 30 年代の地方気象台では、予報官は気象庁から短波放送を受信して、各地の気象観測データを入手
- ついで、観測値を手書きでプロットして天気図を作成。等圧線を描き、低気圧や前線、雨域の位置などを確定し、最新の地上天気図を作成、また、短波放送で一種のファックスを利用して、本庁からの高層天気図などを受信
- さらに、本庁などから、低気圧の今後の推移などの留意点が指示報として送られる

- 予報官は、これらの天気図などの資料を基に、自分の経験を加味して「南の風、晴れ時々曇り、夕方から一時雨」などの予報を案出し、天気予報として発表。作業の大半は人力、一番肝心な予報の案出の部分も、予報官の総合的な知恵。
- しかし、天気予報作業の形態は、近年、観測の自動化、コンピュータの普及、数値予報の精緻化によって予測精度が格段に向上、大きな変貌を遂げた
- 予報作業全体がシステム化され、予報官の作業及び役割も大きく変化。
- 本庁、地方の気象台の予報作業室の卓上にはワークステーションが置かれ、壁面には大型の液晶ディスプレイがある。ワークステーションは LAN で本庁のデータバンクとつながり、予報官はいつでも必要なデータを参照することができる。
- 予報官はマニュアルにしたがってパソコンを操作、天気予報文の原案が画面上に現れる。予報官が必要に応じて修正し、最後にエンターキーを押せば、公式な気象庁の天気予報として日常的に情報を必要としているメディアなど各所に流れる。
- 予報官の仕事の重点は、近年、通常天気予報よりも、気象注意報や警報を発表する判断に移っている。また、一度、発表すれば、切り替えや解除のタイミングも重要となる。県や市町村の防災担当者との連絡も必要で、メディアとの問い合わせにも対応が必要。その意味で現在の予報官には、社会活動を見据えた総合的判断が要請される。
- 明治初期に気象事業が始まって以来、気象予報は、気象庁の仕事で、民間では行われなかった。
- しかし、予測技術や通信技術の向上により、気象情報が広く共有可能になり、民間にも業務を解放すべきとの規制緩和政策の流れを受けるようになった。
- 1993 年、気象業務法が改正され、気象庁以外の者による天気予報の道が開かれた。気象事業者に対する気象資料の提供の体制も確立され、民間でも数値予報の結果やガイダンスを入手して、それをもとに天気予報を行うことができる。
- また、民間の気象事業者が予報を行う場合は、気象予報士をおかなくてはならない。
- 米国では米国気象学会が認定した天気キャスターがメディアで活躍、日本のような予報士制度を持っている国は非常に珍しい。
- 1994 年以来、すでに 13 万人が受験、合格者は約 8000 人に達する。
- 民間で予報する気象事業者は約 50 社。農業や建築・レジャー産業は天気に業務が左右されるし、コンビニエンスストアも天気次第で売れる商品が異なるなど、天気に左右される業種は結構多い。

10 回「間氷期・氷期サイクルと太陽活動」

氷期サイクル

大気中の二酸化炭素濃度は地球史を通じて低下

本来期待されるよりも実際の二酸化炭素濃度が高い時期は「温暖期」、低い時期は「寒冷期」

二酸化炭素の時間的変化

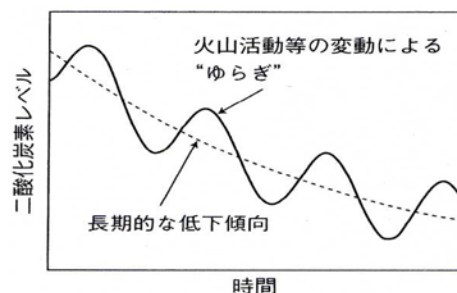


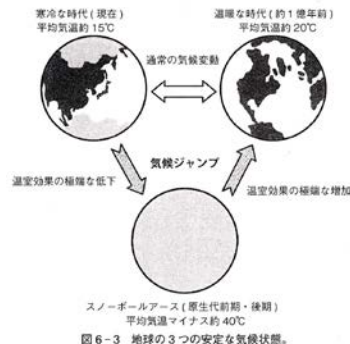
図 5-1 地球史を通じた二酸化炭素レベルの低下。

増加と減少を繰り返しながらも全体的には低下してきた。

カンブリア爆発

- 約5億年前、現存する全動物門が突然出現。
- このとき何が生じたのかはよく分かっていない。地球史研究における最重要課題。
- 最後のスノーボールアース・イベントであるマリノアン氷河時代（約6億6500万年～6億

3500万年前）の直後



- 現在の地球は地球史的にみれば**寒冷な氷河時代**。
- ただし、氷河時代の中では温暖な間氷期として位置づけられる。
- 地球の誕生以来、地球環境は変動し続けており、これからも同じ状態が長期的に継続することはないだろう。
- このことも、過去の地球環境の変動記録を調べれば明らかである。地球環境は変動することが本質だからである。

温暖な時代

- 1億年前は全球平均温度は現在よりも6～14℃も高く、海洋深層水の温度は現在の2℃に対して17℃もあったと推定

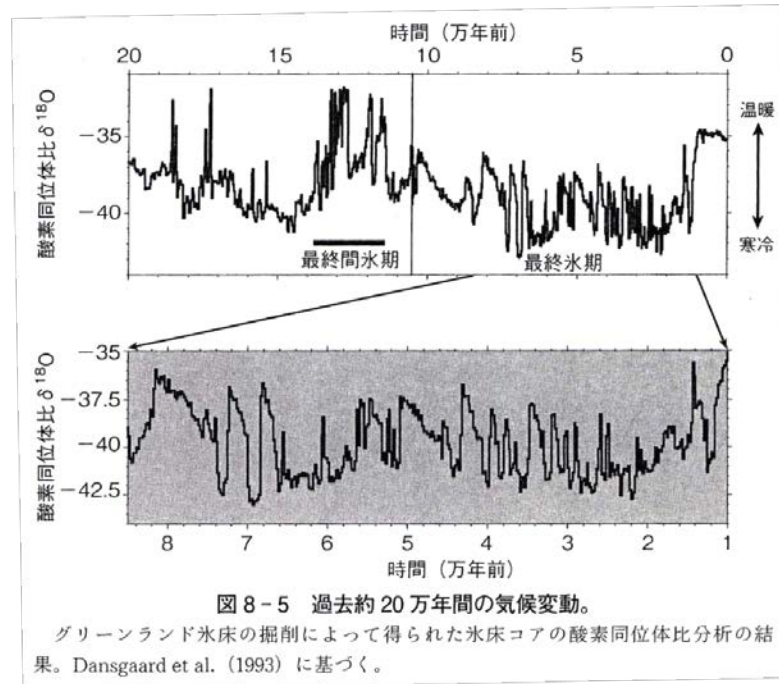
2400万～500万年前

- 約2400万年前に世界的な海水準低下
- 約1500万年前にはさらになる寒冷化
- 約1000万年前の南極氷床は現在の規模をしのぐほど発達
- 約600万年前ごろまでには現在と同じような海洋の循環が確立
- ちょうど私たちヒトの遠い祖先がゴリラやチンパンジーなどの類人猿と分岐したころ（800万～500万年前）。

ミランコビッチサイクル

- 270万年前から、地球には周期的な気候変動が訪れた。氷期－間氷期サイクルである。深海堆積物の底生有孔虫の酸素同位体比の研究から、その変動は70回ほど起こっていたことが知られている。地球公転軌道要素の変動による日射量の変動（ミランコビッチ・サイクル）がきわめて有力視されている。

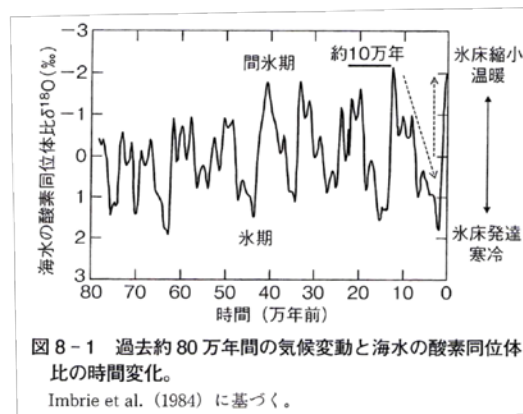
過去 20 万年の気候変動



最終間氷期の温度

- 最終間氷期の気候は、じつは現在よりも温暖だったことがわかっている。現在よりも、気温にしておよそ 3～5℃、海水準は 4～6 メートルも高かった。現在よりも温暖な気候のため、グリーンランドや南極の氷床が融けていたのだろうと考えられる。これは、温暖化した将来の地球の姿を示唆しているようで恐ろしい。
- このように考えると、将来の地球環境の変動を予測するためには、現在の地球の姿だけではなく、過去の地球の変動についても理解する必要があることがよくわかる。

過去 80 万年間の気候変動



氷期と間氷期の繰り返しは、これからも続く可能性が高い。

氷期と間氷期は約 10 万年の周期、氷期・間氷期サイクルは、地球の軌道要素の天体力学的な変動によって生じると考えられている。

セルビアのミランコヴィッチによる**仮説**。

地球の自転軸の傾き・軌道の離心率の変動・歳差運動（コマの回転軸が首振り運動）などに起因。

軌道要素の変動に起因した日射量変動が氷期・間氷期サイクルの原因であることは、おそらく間違いない。

ヤンガードリアス

いまから約 1 万 2900 年前、最終氷期が終わって後氷期（現在の間氷期のこと）へと移行する気候の

温暖化の過程で突然、寒冷化が生じたことが知られている。約 1 万 2900～1 万 1500 年前のあいだ、地球は氷期に逆戻りしてしまった。それが「ヤンガードリアス」と呼ばれるイベント。この最後では、急激な温度上昇（10 年で 1℃）。黒点活動との関連が指摘されている。

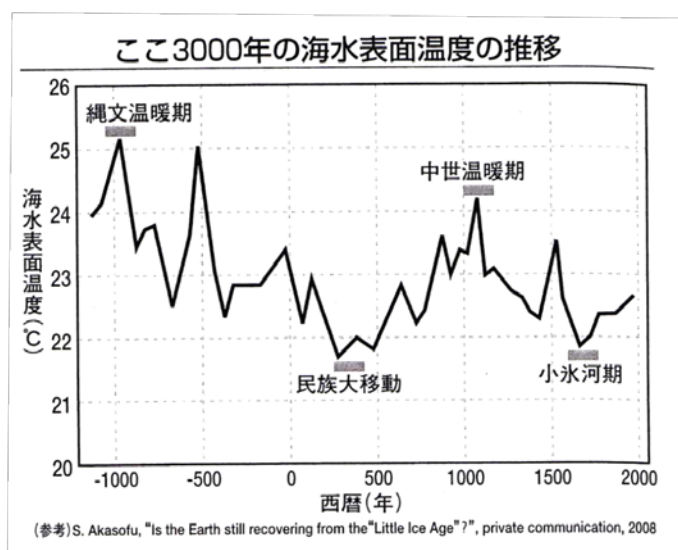
最近の 1 万年

最近 1 万年間は気候が例外的に安定している。それが、人類が文明を築くことができた重要な要因とも考えられる。

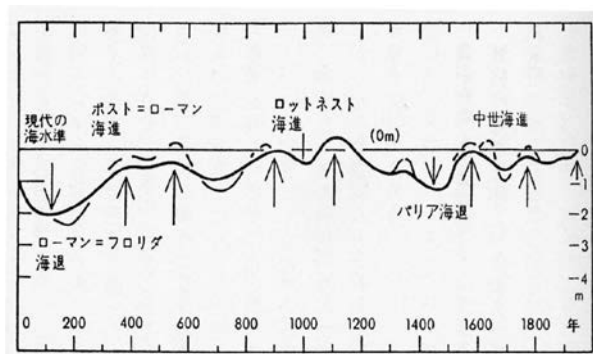
実際、過去の文明が戦争などの人為的要因以外で打撃を受けたり滅んだりしたのは、地域的な乾燥化による水不足や冷夏で農作物の凶作などが重要な要因。

過去 1 万年にわたる相対的に安定した気候状態が、人類文明の発展に欠かすことのできない条件だったのはほぼ間違いない。

最終氷期のように突然かつ急激な気候変動が繰り返し生じたら、一つの文明を長期的に維持することはかなり困難だったかもしれない。



「海面の歴史的変動」



太陽活動の異変

太陽フレア

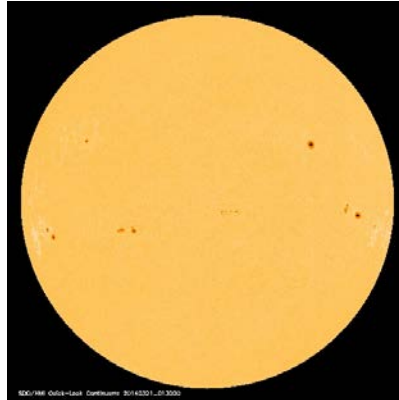


太陽放射の変動

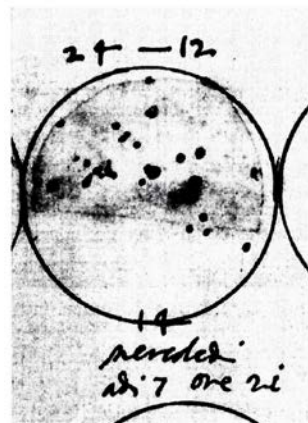
1970 年代の終わりに打ち上げられた気象衛星ニムガスや太陽観測衛星ソーラー・マックスは、10 年の長期観測を行い、太陽放射は 0.1%ほどと変動の幅は小さいが、太陽が放射する光エネルギーの総量が変化することを明らかにした。

その後の衛星の観測結果も含めて、測定結果はこの総量が約 11 年周期で増減を繰り返している

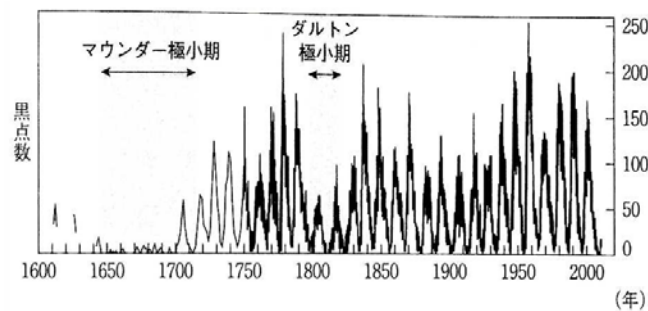
太陽の黒点



黒点の測定方法



黒点数の 11 年周期



横軸の 10 年ごとの目盛を見ると、黒点数が約 11 年周期で増減していることがわかる。

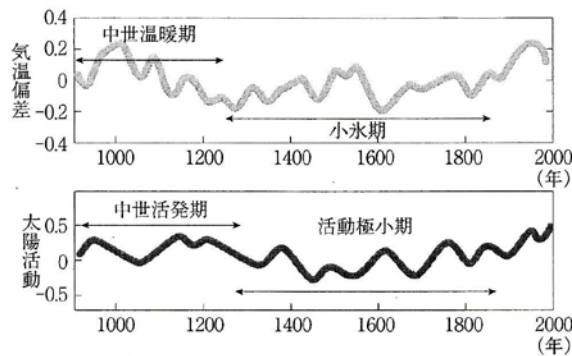
しかし、1645 年～1715 年ごろにかけての約 70 年間はほとんど黒点が見られず、1800 年前後の約 30 年間も黒点の数が顕著に少ない。

マウンダー極小期；1645 年～1715 年

ダルトン極小期；1800 年前後の 30 年間

1850 年ごろから以降、現在に至るまで、光球面に現れる黒点の数は平均して大きくなり続けている。

地球温暖化のゆくえ

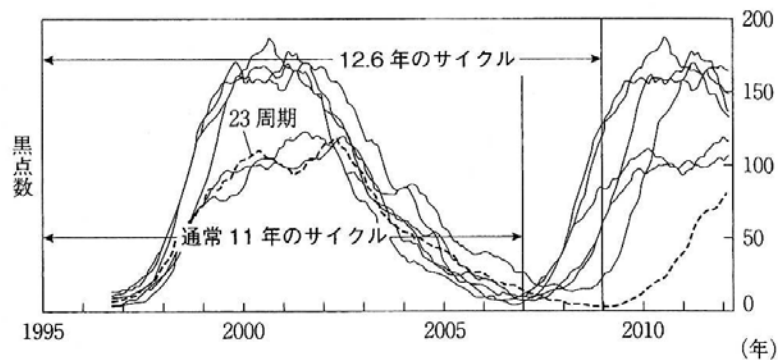


マウンダー極小期

17 世紀以降の太陽黒点の消長で、黒点の多少は約 11 年周期で変動し、山に大小がある。17 世紀には黒点がほとんどなく、これをマウンダー期と呼んでいる。

この時期に地球上の各地は非常に寒かった。1800 年や 1810 年代は黒点数が少ないが、このころは日本でも寒く、江戸では「隅田川が両国橋より上流は凍った」とか大阪では「諸川ことごとく凍る」などの記述が残っている。

過去 7 サイクルの黒点数の推移



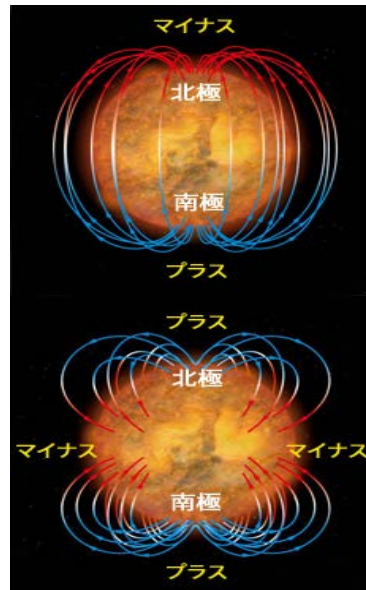
実線で示した過去 6 サイクルの黒点数は 11 年間で上昇～下降カーブを描いているが、点線で表した 23 周期は上昇から下降に、12.6 年かかっている。

23 周期は元々黒点の少ない極小期が長いだけでなく、黒点数が多いはずの極大期でも少ない。ダルトン極小期のころは、13 年、マウンダー極小期のころは、14 年もかかっている。

100 年間の無黒点日数ランキング

年	無黒点日数
1913	311
1901	287
1878	280
2008	266
2009	261
1902	257

太陽の磁場構造の変化



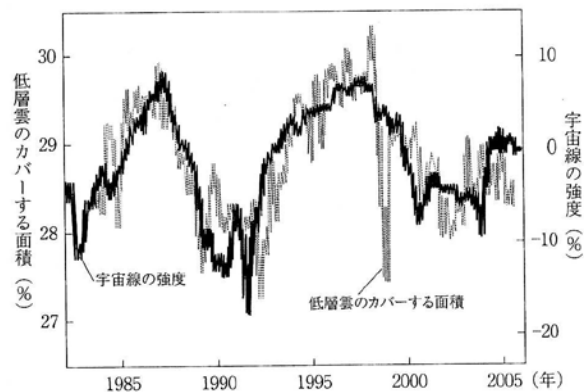
これまでは太陽の南極（N 極）から出た磁力線が北極（S 極）に入る 2 重極の構造（上）。

2012 年秋には北極が N 極になりつつある。その結果、赤道付近が S 極となる 4 重極構造がみられる。

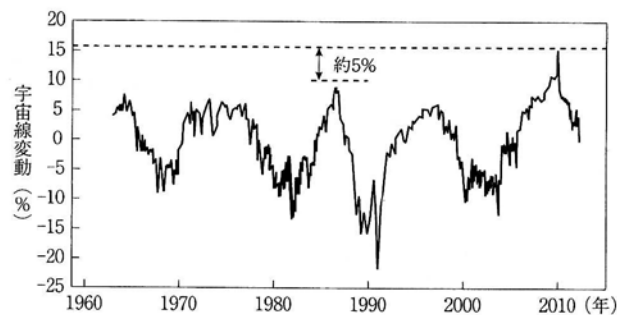
2012.4.29 読売「太陽、重なる異変の兆し、磁場 4 重極化・黒点周期の乱れ、地球の大気に影響予測も」

太陽の磁場に異変が起きている。ふつう太陽には地球と同じように N 極と S 極が一つずつあるが、まもなく N 極と S 極が 2 個ずつになる「4 重極構造」に変化しそうだという。太陽の黒点数が増減する周期にも変化の兆しがあり、寒冷化など地球の気候変動につながる可能性も指摘されている。

宇宙線と雲の関係



観測史上最多の宇宙線放射量



宇宙線の量

地球付近に到来する宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子群の数も変化。

この数も 11 年周期で変化、その変化量は 20%

強制効果

黒点の数が、平均 11 年周期で変動していることは 18 世紀初めころから知られていたが、太陽の明るさも同じ周期で増減を繰り返していることが分かった。

この明るさは、黒点数が多い時に増加し、少ない時に減少する傾向を示す。

わずか 0.1% なのでこの変動が気候変動に直接関与するとは考えられないが、気候変動を引き起こすように働く何かしらの強制効果 (forcing effect)はあるかもしれない。この問題は、今後の研究にその解決がゆだねられる。このわずかな減少が 50 年続けば蓄積効果が現れ、気温が寒冷化する

過去 100 年で最低レベルの太陽極小期

太陽黒点の出現は約 11 年の周期で大きく変化することが、長期にわたる観測から知られている。

この周期には 1755 年を起点に太陽黒点数が極小となる時期を区切りとして通し番号がつけられており、現在は第 23 サイクルから第 24 サイクルへ切り替わる極小期にあたる。

よって、太陽面上に黒点がほとんどないのは当然なのだが、今回の極小期は前回、前々回とは異なる特徴を持っていることが徐々に明らかとなってきた。

その一つが、太陽面上に全く黒点が見られない日（無黒点日）の多さである。

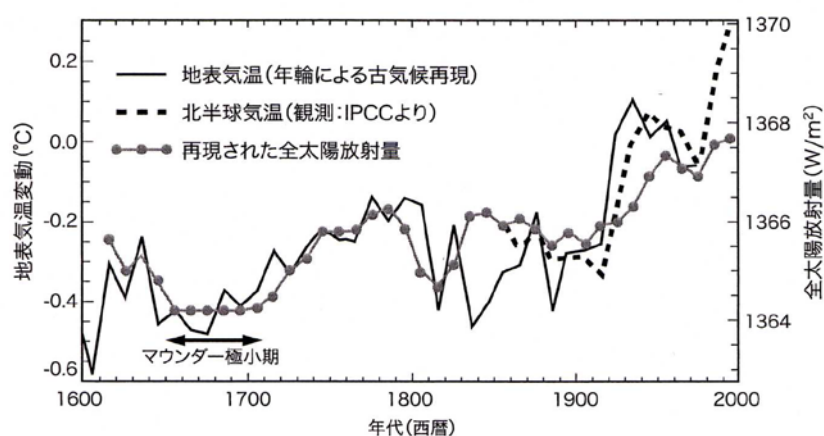


図 2.22 過去 400 年間の古気温変動と全太陽放射量の比較。
1645～1720 年に太陽黒点がほとんど存在しなかった太陽活動の極小期(マウンダー極小期)が存在した。この時期と寒冷気候の卓越した時代(小氷河期: Little Ice Age)とが一致している。Lean(2000)より。

太陽活動は、光球面上に現れた黒点の数で、その活発さが表される。この黒点数の数え方について、光球面には、黒い“しみ”のように見える黒点は、たいていの場合、何個かが群れを成して現れる。光球面上にいくつ群れがあるかを、まず数え、それを 10 倍する。次いで、それらの群れの中にいくつ黒点があるか、一つずつ数える。この数と先程求めた黒点群の数を 10 倍したものを加え合わせた数が、相対黒点数 (Relative Sunspot Number、略して RSN)と呼んでいる。

したがって、たった 1 個、光球面上に黒点がみつかったとき、この相対黒点数は 11 となる。

この値は、18 世紀半ば過ぎから用いられており、太陽活動の活発さを割合うまく表現することができることから、ずっと使われている。

1 1 回「海洋・大気の周期的変動」

海洋と気候

海洋は地球表面積の 70%、気候形成に大きな影響を及ぼす。

海洋の全熱容量は大気の約 1000 倍。海洋は熱の貯蔵庫、大気との熱交換を通して、大気の運動を支配。

海洋と大気の運動エネルギー源は太陽エネルギー。海洋は太陽放射により加熱、水温分布の不均一で海洋循環が

生じる。それと共に風の影響を受け海流が生じている。

大気は主に水蒸気に含まれる潜熱で海洋からエネルギーを受け取る。海洋・大気の運動は相互に絡み合っている。

海洋と連動した数十年周期の気候変動

海洋の変動は様々な過程と連動している。

たとえば、熱帯の長周期の雲量変動は海洋が吸収するエネルギー量に影響し、海氷面積の変動は極域で冷たい密度の高い海水が深海へと沈降する速度に影響を及ぼす。

このような変動は低緯度域で上昇する冷たい海水の温度に影響を与えるまでには数十年から数世紀もかかるので、それらは長周期の気候変動を生み出す可能性を持っている。

最も重要なのは大気状態の変動によって海表面の状態が変動し、それが再び大気の日候パターンに影響を及ぼすこと。

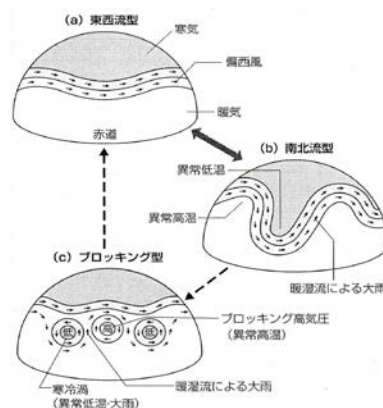
この大気と海洋間でのフィードバック過程が振動的変動を生じさせる原因であり、気候変動の周期性あるいは最近の約 100 年間で観測された気候変動の大部分を引き起こす主な原因となっている。

北極から南極までの世界各地で多くの「振動現象」が明らかになっている。これらの振動現象の中で最も大きなものが太平洋の中に存在。

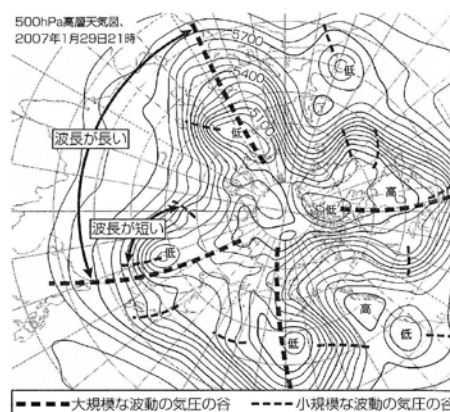
太平洋が持つ大きさと両半球の対称性は、長周期の大気海洋結合変動が存在するためには都合がよい。

数十年変動の振幅は熱帯東部太平洋域よりも北太平洋域で最大となる。

偏西風の蛇行



北極振動



北極振動

1998 年にデヴィッド・トンプソン (David W. J. Thompson) とジョン・ウォーレス (John M. Wallace) によって提唱された。

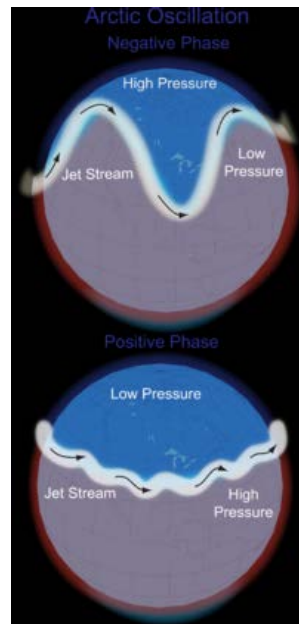
彼らは北半球の海面気圧の月平均の平年からの偏差を主成分分析して、第 1 主成分 (EOF) としてこのような変動が取り出されることを提唱した。

この変動は冬季に顕著に現れ、日本など中緯度の気候と強く関連するため、赤道側のエルニーニョ現象と並び

近年注目されている。

南半球においても南極と南半球中緯度の気圧が逆の傾向で変動する現象が見つかっている (南極振動 (AAO))。

北極振動の模式図



北極振動指数

北極振動指数が正の時は北極と中緯度の気圧差が大きくなり、その結果極を取り巻く寒帯ジェット気流 (極渦) が強くなる。

この結果、極からの寒気の南下が抑えられユーラシア大陸北部、アメリカ大陸北部を中心に平年より気温が高くなる傾向があり日本でも暖冬となる。

逆に北極振動指数が負の時はジェット気流が弱くなるため極からの寒気の南下が活発となり、平年より気温が低めとなる。

太平洋・大西洋の振動

北大西洋振動

北大西洋では、よく理解されていないもう1つの振動現象がある。

18世紀以降、グリーンランド西部が暖冬の年には、北ヨーロッパは厳冬になる傾向があるという事実から、この振動現象の存在が知られるようになった。

1920年代に Gilbert Walker 卿は、このシーソーパターンをアイスランドと南ヨーロッパの間の気圧差を用いることで定量化し、この振動現象を北大西洋振動 (NAO) と名付けた。

1870年以降、NAOは数年から数十年の時間スケールで顕著に変動していることがわかっている。

大西洋の海面水温の長期変動として、40°N付近の中緯度で平年より高く (低く)、その高緯度側及び低緯度側で低く (高く) なる三極パターンや、赤道に関して南北反対称な双極パターンが指摘されています。

一方、北大西洋には、冬のアイスランド低気圧とアゾレス高気圧がともに強まる (弱まる) 現象があることが古くから知られており、北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation : NAO) とよばれてきました。

また、冬季北半球の大気循環で卓越する変動パターンとして北極振動 (Arctic Oscillation : AO) が知られており、北極域と北半球中緯度の地上気圧がシーソーのように上昇と下降を繰り返しています。

AOとNAOの指数は高い相関を示すことなどから、NAOはAOの主要部分であるという見方もあります。

NAO/AOは、10日程度の短い時間スケールから年々、十年、それ以上の長期トレンドといった変動を示す。

十年以上の時間スケールでは、これらの大気の変動と海面水温の三極パターン・双極パターンの変動は互いに相関が高い (NAO/AOが負極のときに海面水温偏差パターンが現れやすい)。

こうした長期変動をもたらす要因は、十分に解明はされていません。

数十年太平洋振動 (PDO)

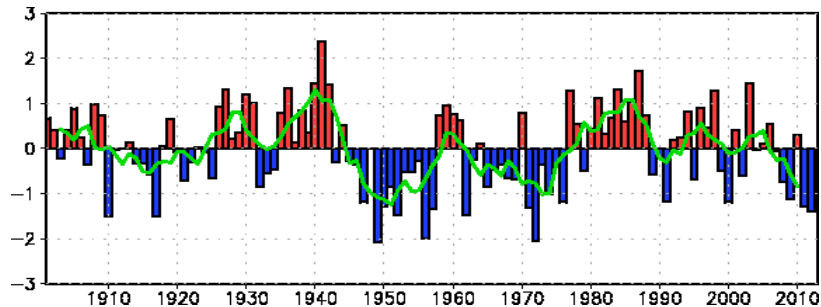
ニュージーランド海域での低温偏差と、南太平洋の東部海域での高温偏差パターンを伴う南半球の海面水温変動とも関係して変動している。これは数十年太平洋振動（PDO）として知られている。

この変動は、ほぼ 20 年の周期、50 年から 60 年の長周期の変動成分も存在する可能性がある。

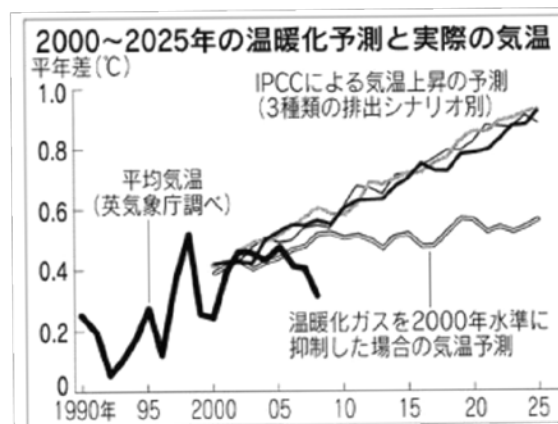
図は PDO 指数の時系列（1901 年～2012 年 2 月）であるが、2012 年 1・2 月の指数は -1.4 である。

10 年以上の長い周期の変動に注目すると、PDO 指数は 1980 年代はおおむね正の値（北太平洋中央部で海面水温が低い状態）で推移、1990 年代以降は数年の周期で正負を繰り返し、最近の数年は負の値が多い。

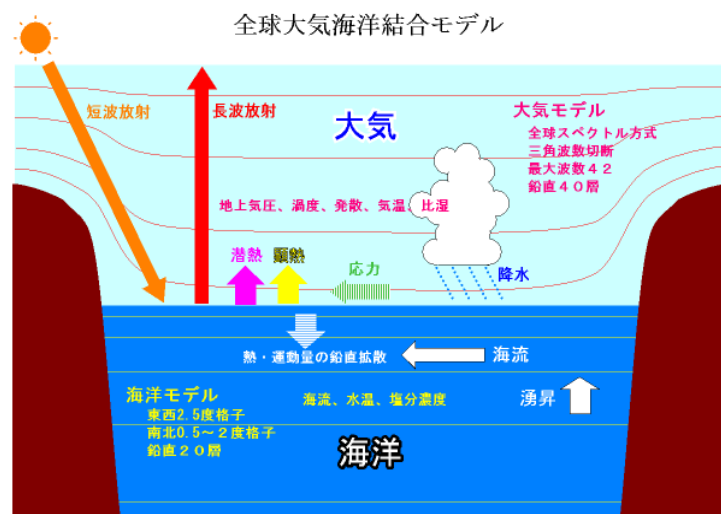
PDO 指数の時系列（1901 年～2012 年、棒グラフは指数の冬季平均値、実線は 5 年間移動平均値）



2008 年の気温（PDO の影響？）



海洋と大気の関係



エルニーニョ・ラニーニャの語源

ペルー漁民、クリスマスの小規模暖流をエルニーニョと。

エルニーニョはスペイン語で「El Nino」、英語で「The Child」「The Boy」「神の子イエス・キリスト」。

ラニーニャ「La Nina」はスペイン語で「女の子」。エルニーニョの反対現象。

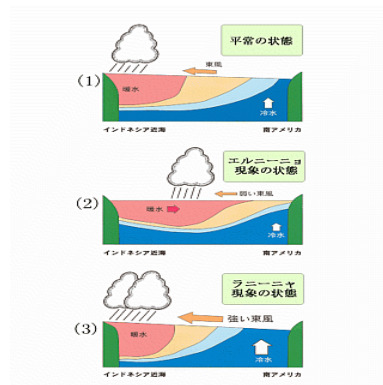
気象庁では、数年に一回、熱帯太平洋域で発生する現象をエルニーニョ現象、季節現象でペルー沖の海面水温上昇をエルニーニョとして区別。

エルニーニョ現象とラニーニャ現象；太平洋赤道域～南米ペルー沿岸海域で、海面水温が平年より高く、その状態が半年から1年半続く現象、数年に一度発生。

逆に、同じ海域で海面水温が平年より低い状態が続く現象がラニーニャ現象。

エルニーニョ現象時の典型的な海面水温(SST)の偏差

エルニーニョ現象とは



南方振動

エルニーニョ現象が注目される前、熱帯の大気には南方振動（Southern Oscillation）と呼ばれる現象あり。

Gilbert Walker 卿が 1920 年代に南方振動（SO）と名付けた「太平洋で気圧が高いとき、アフリカからオーストラリアにかけてのインド洋で気圧が低くなる」という現象。

南方振動は、インドネシア付近を中心とする地域と南太平洋東部の間の大規模な海面気圧のシーソー現象。

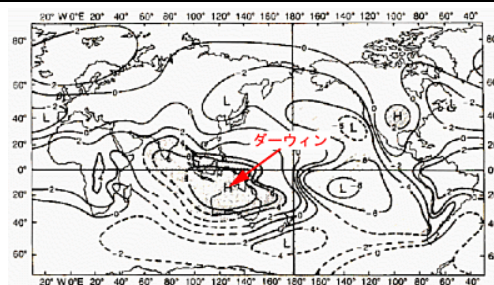
一方で気圧が高い時、もう一方では気圧が低い。2 つの中心を代表するダーウィンとタヒチの気圧差が南方振動指標。

赤道太平洋の海面水温は、エルニーニョとラニーニャの間で数年のリズムで変動、これが両地域の海面気圧差に。

この南方振動とエルニーニョ現象は、同一の現象のそれぞれ大気側、海洋側の側面として認識されている。

両者を併せたエルニーニョ・南方振動（El Nino & Southern Oscillation）ENSO エンソという言葉がよく使われる。

ダーウィンと各地の年平均の海面気圧偏差の相関係数



海面気圧偏差の相関係数の説明

係数が正の値のところはダーウィンの気圧が通常よりも高いとき、その場所の気圧も通常よりも高い傾向にある。

係数が負の値のところはダーウィンの気圧が通常よりも高いとき、逆に通常より低い傾向にある。数字の大きさがその傾向の程度を示す。

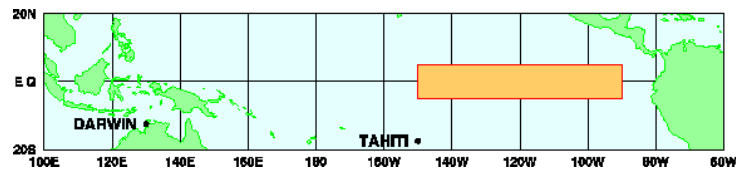
エルニーニョ・ラニーニャの定義

今のところ、世界共通の定義はない。気象庁では、エルニーニョ監視海域の海面水温の基準値（その年の前年までの 30 年間の各月の平均値）との差の 5 ヶ月移動平均値（その月および前後 2 ヶ月を含めた 5 ヶ月の平均をとった値）が 6 ヶ月以上続けて $+0.5^{\circ}\text{C}$ 以上となった場合をエルニーニョ現象、 -0.5°C 以下となった場合をラニーニャ現象とする。

ニャ現象と定義している

エルニーニョの監視海域

北緯 5 度と南緯 5 度、西経 150 度と西経 90 度で囲まれた領域

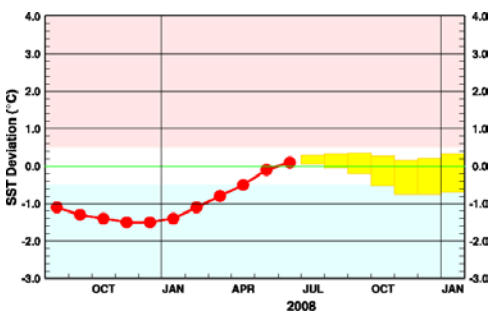


5 ヶ月移動平均値とは

例えば、10 月の 5 ヶ月移動平均値という、8 月～12 月の 5 ヶ月の平均のことで、下の例のエルニーニョ監視海域の海面水温の基準値との差では、 $+0.3^{\circ}\text{C}$ となる。

	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
基準値との差 ($^{\circ}\text{C}$)	-0.1	$+0.3$	$+0.2$	$+0.6$	$+0.5$	
5 ヶ月移動平均	...	...	$+0.3$	...	...	
	$(-0.1 + 0.3 + 0.2 + 0.6 + 0.5) \div 5 = +0.3$					

エルニーニョ監視海域の海面水温の基準値との差の 5 ヶ月間移動平均値の推移 (赤のポイント) とその後の予測 (黄色の部分)、基準値はその年の前年までの 30 年間の各月の平均値



異常気象、異常高温とは何を基準にしているのか？

異常気象とは、一般に過去に経験した現象から大きく外れた現象。人が一生の間にまれにしか経験しない現象。大雨や強風等の激しい数時間の気象から数ヶ月も続く干ばつ、冷夏などの気候の異常も含まれる。

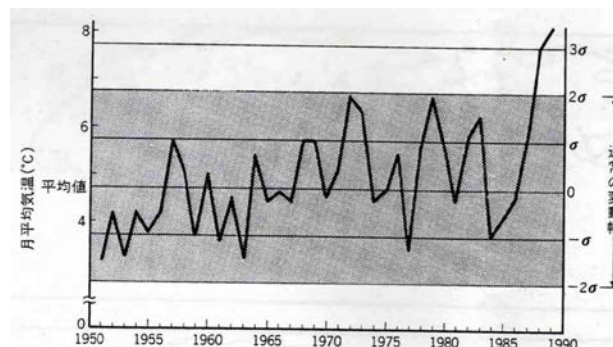
気象庁では、過去 30 年間に観測されなかったような値を観測した場合を異常気象としている。

異常高温、異常多雨は世界の天候監視では、次の基準で気温と降水量の異常を判断する。

月平均気温の平年差が平年値統計期間 (1981 年～2010 年) の標準偏差の 2 倍以上となった場合に異常高温とする。また、月降水量は平年値統計期間における最大値を上回る場合を異常多雨とする。

異常高温と標準偏差の関係

東京の 1 月の平均気温



平年値、冷夏、暖冬とは何を基準にしているのか？

平年値 ; 1981 年～2010 年の平均値で 10 年毎に更新。気温、降水量を「低い (少ない)」「平年並」「高い (多い)」の 3 階級で示す。30 年間の観測値を小さい順に並べ、最小～10 番目まで「低い (少ない)」、11 番目～20 番目が「平年並」、それ以上を「高い (多い)」。「冷夏」は、夏の平均気温が低い、「暖冬」は、冬の平均気温が「高い」

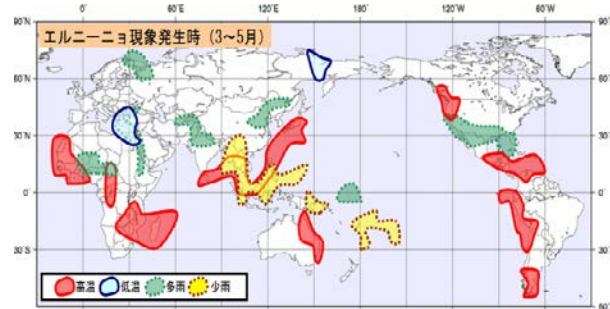
世界の気候に関する表現と注意

エルニーニョ現象は世界の天候に様々な影響を及ぼしている。過去のエルニーニョ現象発生時に現れた特徴的な天候を季節別にまとめている。

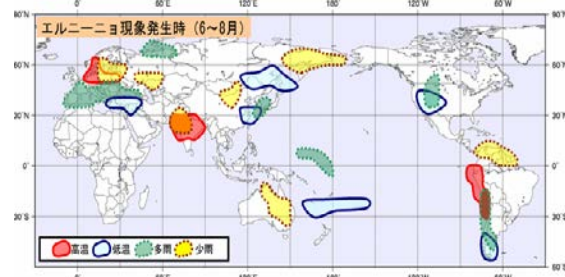
「高温傾向」「多雨傾向」という表現は、エルニーニョ現象発生時の天候をエルニーニョ・ラニーニャ両現象とも発生していない時期と比較したもの、通常用いている気温や降水量の「高い」「多い」という階級区分とは必ずしも一致しない。

1949年～2004年におけるエルニーニョ現象発生年とエルニーニョ・ラニーニャ現象とも発生していない年とで比較し、検定の結果、危険率10%未満で有意な差のあった地域をまとめた分布。

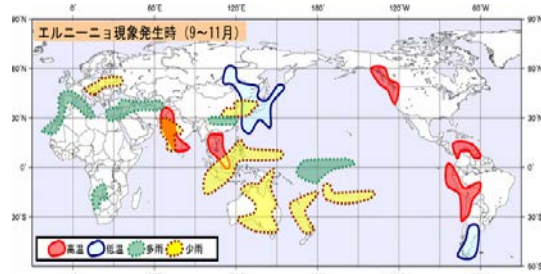
エルニーニョ現象に伴う北半球の春（3月～5月）の天候（南半球は秋）



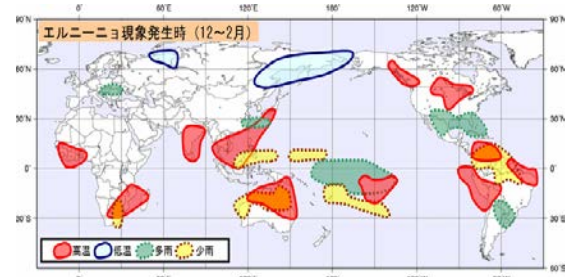
エルニーニョ現象に伴う北半球の夏（6月～8月）の天候



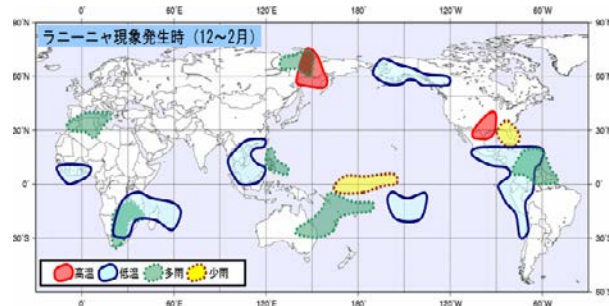
エルニーニョ現象に伴う北半球の秋（9月～11月）の天候



エルニーニョ現象に伴う北半球の冬（12月～2月）の天候



ラニーニャ現象に伴う北半球の冬（12月～2月）の天候



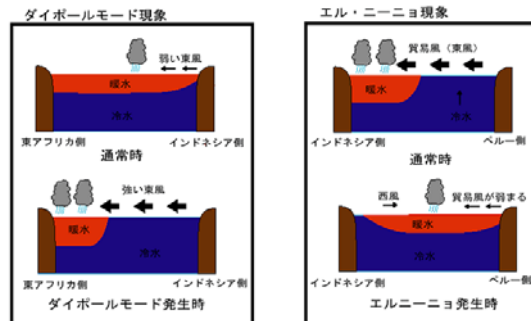
ダイポールモード現象

ダイポールモード現象（Indian Ocean Dipole (mode)、IOD）とは、インド洋熱帯地域で初夏から晩秋にかけて東部で海水温が低くなり、西部で海水温が高くなる大気海洋現象。

これに伴って起こる風や気候の変化を含み、エルニーニョ現象と同様に世界の気候に大きな影響を与えることが明らかとなった。

（参考資料）

ダイポールモード現象とエル・ニーニョ現象との比較



ダイポールモード発生時の様子

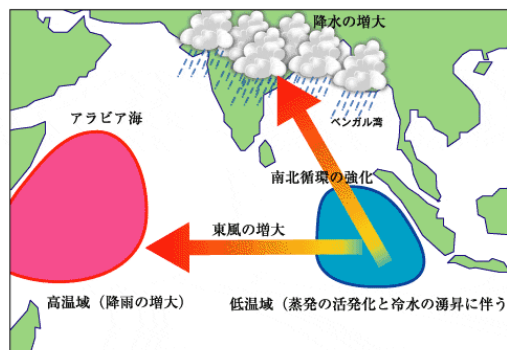
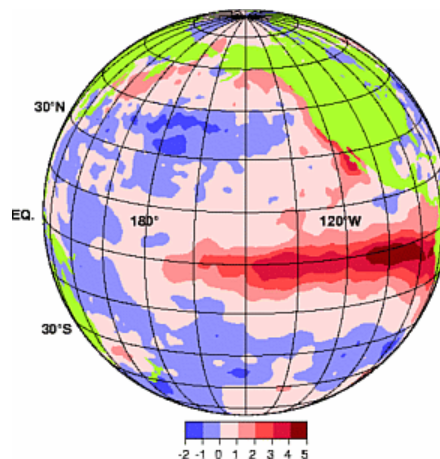


図2：IOD発生時の夏の状況

IODの指標が正の間は、インドネシア西岸沖が低温となりそこで下降した大気は対流圏下層を外部へ広がってゆく。この大気の流れの一部はベンガル湾やインドへ達し、そこで上昇流を強めるのでインドでは降水量が増加する。（IODの指標が負の時は反対の現象が起きる）もし1997年の様にエルニーニョと正のIODが同時に起これば、エルニーニョにより誘起されるインドの旱魃傾向は弱められることになる。すなわち、インドの降水に関してIODはエルニーニョと反対の影響を及ぼすと言える。

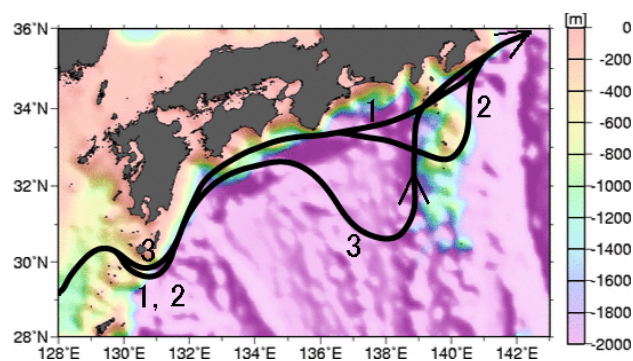
エルニーニョ最盛期（1997 年 11 月）の月平均海面水温平年偏差



【黒潮の蛇行】

- 黒潮は、1960 年代半～1970 年代半ばまで、非大蛇行の状態。
- 1970 年後半～90 年代はじめまで黒潮大蛇行が頻繁に発生。
- 90 年代中～2004 年前半まで非大蛇行の状態。
- 2004 年 7 月～05 年 8 月に大蛇行発生、その後は非大蛇行。
- 2013 年を通じて非大蛇行。 1 月下旬～4 月中旬まで、東海沖では、ほぼ東に直進。 5 月中旬に東海沖で北緯 31.5 度付近まで南下、6 月に最南位置は北上し、6 月中旬～7 月上旬の東海沖の最南下緯度は北緯 32.5 度付近。
- 8 月～9 月に再び東海沖で北緯 31.5 度付近まで南下。10 月～12 月は北緯 32 度付近まで南下、東経 136 度以東の最南位置が伊豆諸島の東でみられる時期も。
潮岬では、4 月、7 月～8 月中旬、および 10 月中旬～12 月上旬は離れて流れ、その他の期間は、おおむね接岸した流れ。

黒潮の蛇行



1 2 回「化石燃料から再生可能エネルギーへ」

エネルギー問題

1914 年アメリカ内務省は石油埋蔵量 10 年と予測、1939 年同内務省は 13 年間と声明、1970 年代カーター大統領「今後、10 年以内、全世界の確定石油埋蔵量をすべて使い果たす可能性がある」、1970 年の世界の石油埋蔵量 5500 億バレル、1970～1990 年の間に全世界で 6000 億バレルを消費、差し引きすると 500 億バレルのマイナス 1990 年までに未開発の埋蔵量 9000 億バレル、ある地域のタールサンド、タールシェール、オイルシェール埋蔵量 9 兆バレル、サウジアラビアの 20 倍

石油の商業生産あと 41 年 OK

2012.12.5 石油鉱業連盟、在来型石油で 2010 年まで 41 年、在来型天然ガスは 47 年と発表。

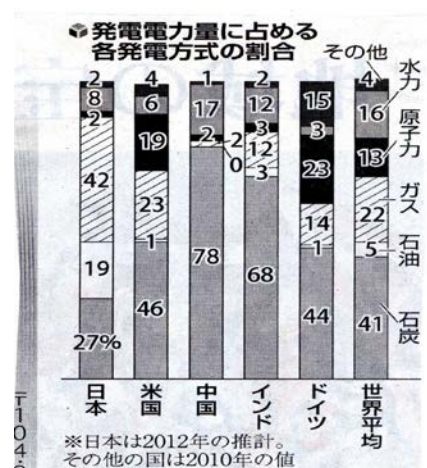
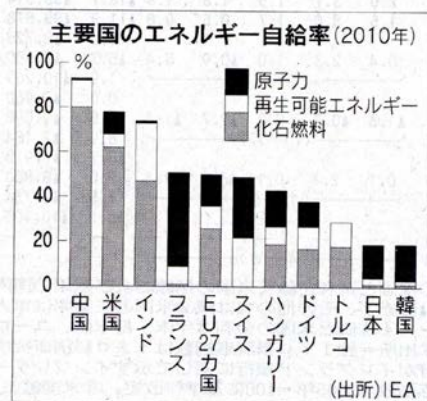
2010 年の石油生産量 293 億バレル、確認埋蔵量は 1 兆 2 千億バレル

資源問題

メタンハイドレート（静岡—和歌山県沖調査、国内天然ガス消費量の 14 年分）

海底熱水鉱床（金、銀、銅、亜鉛、鉛などの硫化物、数万～数百万トン、日本の排他的経済水域にある資源の埋蔵量は世界一）、コバルトリッチクラスト（マンガン団塊、希少金属のコバルトを多く含む）、天然ガス（東シナ海の白樺ガス田で約 6400 万バレル）、シェールガス、オイルシェール：岩盤内部の石油、取り出すには水圧で破碎など特殊な技術が必要、技術革新が進みコストが低下、採掘可能に

オイルシェール埋蔵量は従来型の原油 1 兆 3331 億バレル（2009 年時点、英 B P 調べ）並み



電源構成の推移



火力発電の電源比較

火力発電の主な電源の比較			
	発電コスト (円/キロワット時)	CO ₂ 排出量 (LNGを1とした場合)	主な課題
石炭	5	1.8	環境対策
石油	16	1.5	価格高騰、 調達先が 中東に集中
LNG	13	1	価格高騰

複合発電施設



最新鋭「石炭ガス化複合発電」

石炭を燃焼させてガス化、ガス用のタービンを回し、さらにその排熱で水を沸騰させ、蒸気タービンで発電。発電効率は60万kw級で48～50%に。

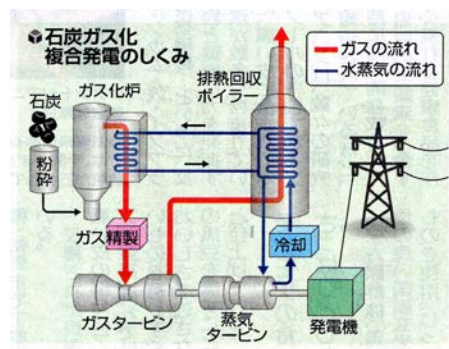
一般的石炭火力より20%アップ、100万kwで二酸化炭素の年排出量は5000万トンで、現在より50万トン減。これを、米国、中国、インドに普及させると、年間15億トン削減。これは、日本の11年度の温暖化ガス排出量13億800万トンより多い。2025年に実用化。

2014.4.6日経・東南アに日本の先端火力

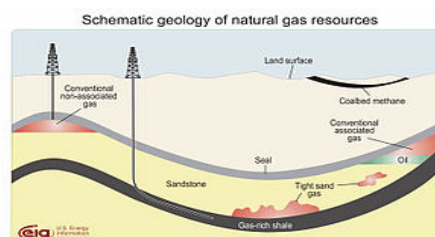
三井物産など受注へ（マレーシア、ミャンマー）、出力100万kw、超々臨界圧；石炭火力発電は、蒸気が高温・高圧であるほどエネルギー効率が低い。600度近くの「超々臨界圧」が最も効率が高い。

二酸化炭素は、東南アジアで方式よりも約2割削減できる。米国、中国、インドの石炭火力をすべてこれに変えると、二酸化炭素削減効果は、年間15億トン（日本の総排出量を上回る）

複合発電の仕組み



シェールガス





メタンハイドレート



産出場所

メタンハイドレートの産出場所



地球深部探査船「ちきゅう」



メタンハイドレートガスの炎



メタンハイドレートの分布予測



埋蔵の可能性地域



2020年までのエネルギー

東京ガスなどは家庭用燃料電池の寿命を従来の5倍に延ばす技術を開発し、実証実験を始めた。
日立製作所なども業務用燃料電池で長時間の連続稼働に成功。
燃料電池は火力発電所よりも発電効率が高く、優れた商品として普及を狙う。

燃料電池、太陽光発電、天然ガスを使った発電、既存の中で最も安全な原発の運転

2030 年までの経済産業省の目標と水素とガソリンのコスト比較

日本全体で燃料電池車を 1500 万台、水素ステーションを 8500 カ所を目標としている。

コスト：電気分解では水素 1 kg の生産に 8 ドル前後かかる。しかし、大量生産すると 3 ドル前後になる。

水素 1 kg でガソリン 3.8 リットル分のエネルギーが得られる上、燃料電池の効率はガソリンエンジンの 3 倍。

水素はガソリンに見劣りしない燃料。

地熱発電

日本には原発 20 基分の地熱発電が可能



2014. 3. 27 日経 地熱発電の事業化支援

政府、国内の地熱発電所の事業化支援に

大分（5 千キロワット）と福島（400 キロワット）の発電所（2015 年度の稼働）、建設費の債務保証、最大 8 割まで、初期投資の負担軽減に、12 年に国立・国定公園内開発、解禁、日本は地熱資源量で米国、インドネシアに次いで第 3 位、1 度設置すれば安定稼働

太陽電池、国内出荷 3 倍

太陽光発電協会は 2013 年度の太陽電池の国内出荷統計を発表。

出荷量は前年の 3 倍で 750 万キロワット（原発 7 基分）

固定価格買取制度、今後縮小される可能性

風と潮流、組み合わせ発電



太陽熱発電

太陽光発電は光を電気に変える

太陽熱は太陽の熱エネルギーで発生させる蒸気でタービンを回し発電する方法

一辺が数メートルの巨大な反射鏡（ミラー）で太陽光を集め、摂氏 400 度近くになる油状の熱媒体で蒸気を作る
出力 10 万キロワットの発電設備に必要な敷地は約 1.2 キロメートル四方。

2050 年には世界の総発電量の約 1 割を占めるといわれている

洋上風力、地熱、バイオマス、海洋の発電能力、2030年に発電能力の1割に

2012年8月環境省、新目標

4種類の発電能力を1941万kwに（10年度の6倍）

海洋エネルギー（潮力、波力）

太陽光・水力は10%から25～30%に

化石燃料は63%から50%に（12年では88.4%）

原子力は26%から20～25%に

再生エネ、20年に13.5%

政府最終案、努力目標に（エネルギー基本計画）

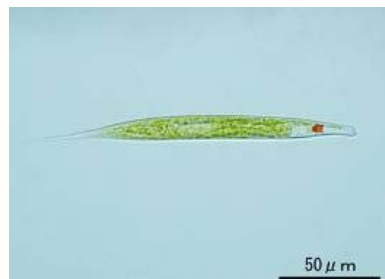
太陽光、風力、水力、地熱などで、国内総発電量の割合を12年度の10%から20年に13.5%、30年に2割超を目指す。13.5%のうち、水力を除くと12年度の1.6%から5.8%に高まる。

バイオ燃料

2010年3月8日日経「ミドリムシをバイオ燃料に」新日本石油と東京大学はプランクトンの一種であるミドリムシを原料にバイオ燃料の量産に乗り出す。

5年以内に量産技術を確認し、まず航空機の燃料として供給する。

農地がなくても水槽やプールで人工的に培養し、効率的に生産できる。



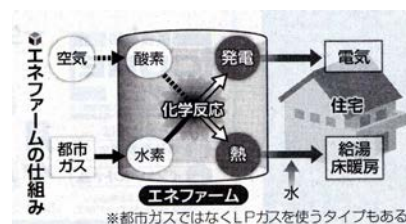
13回「炭素社会から水素社会に」

- 燃料電池などの水素エネルギーは石油を不要にする
- 発電コストは、すでに石油火力よりも安く、将来的には天然ガスと同等になる
- 水素エネルギーが実用化された時、石油の時代は終わる

燃料電池

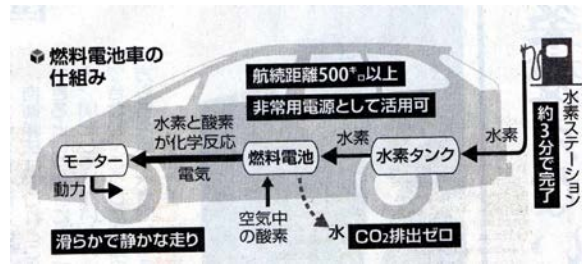


燃料電池の化学反応	
$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{電気}$	
燃料極	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
空気極	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$



導入価格200万、補助金50万、東京ガス、大阪ガス・10年代後半に50万円に

燃料電池車の仕組み



水素発電所

世界初の水素発電所とコスト

- 水素（ロケット燃料）は熱量がガスの2倍以上
- 水素発電所は、既存の天然ガス発電所の設備を利用
- 水素はガスと混ぜて燃やすが、水素の比率は7割。出力は9万kwで、標準家庭3万世帯分
- 発電コストは石油火力より低い
- 有毒ガス排出は激減
- 必要な水素は年2億m³（燃料電池車17万台分）
- 他のガス発電所に供給し、大量調達で発電コストは石炭火力並みに

水素燃料 実用化に前進 2013. 11. 18 読売新聞より抜粋

- 燃やしても二酸化炭素を排出しない水素は、枯渇しない**夢のエネルギー源**
- 大規模な貯蔵や運搬技術がないのが課題であったが、千代田化工建設がこの技術を世界で初めて開発
- 修正液にも使われている「メチルシクロヘキサン」という溶剤を使い、この液体から水素を取り出すと、体積が500倍になる（ポイントは、この溶媒と水素を分離する**触媒を開発**した）。
- 水素は酸素と反応させて電気や熱を作ったり、天然ガスと混ぜて燃やすこともできる
- 欠点は、体積がかさばるので運搬するには容積を小さくする必要がある
- 水素の保管は、マイナス253℃の極低温で液化したり、高圧でボンベに詰めたりするのが、一般的。
- 新技術を使うと、**常温・常圧で保管**できる。難しい管理は必要なく、既存のタンカーや石油タンクも転用できる。水素はエネルギーの世界地図を変える
- 千代田化工建設は、第1段階として、中東や東南アジアなどの天然ガス産出国で水素を作り、これをトルエンと化学反応させて液体にし、タンカーで日本に運ぶ。
- 第2段階は、20年ごろの開始を目指し、再生可能エネルギーの電力で水を電気分解して水素を作る。
- **触媒で太陽光と水を反応させて水素を取り出す技術開発**も進む（これが第3段階で現在、世界中がこの技術を開発中）
- 現在、第3段階の技術は40年ごろに導入されるとの見込み（この研究に集中投資すれば劇的に早まる可能性）
- これが実現できれば、日本はエネルギーを自給できる。
- 水素発電所は世界で初めて商用レベルの設備を建設する。発電規模は90MW（メガワット）を予定している。CO₂を排出しない発電設備として、原子力を代替する期待がかかる。
- 年間に利用する水素は6.3億N立方メートルを見込んでいる（N立方メートル＝圧力・温度・湿度に左右されないガスの実量を表す単位）。

有機ケミカルハイドライド法

- 水素を輸送・貯蔵する方法。ガスの状態にある水素を液体に転換する方法の一種で、トルエンとメチルシクロヘキサン（MCH）という2種類の液体を使う。
- トルエンと水素を反応させるとMCHになり、MCHの状態でも常温・常圧のまま輸送したり貯蔵したりすることが可能になる。
- 水素を利用する場合には逆の反応（脱水素）でMCHからガスにして取り出す。この脱水素には大量の熱が必要になるため、水素発電所の排熱を再利用する計画。
- すでに千代田化工建設が有機ケミカルハイドライド法を使った水素の輸送・貯蔵システムの実証試験を

進めている。

- 同じ神奈川県内の横浜市にある事業所にデモプラントと貯蔵タンクを建設して、大量輸送や長期貯蔵が可能なことを確認済みである。

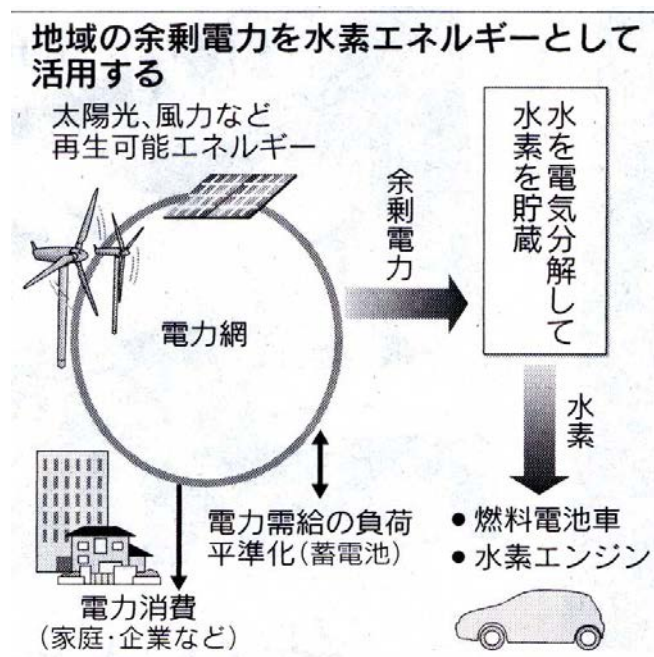
「大規模水素貯蔵・輸送システム」のデモプラント（左）と貯蔵タンク（右）」



水素が豊富な日本

- 3年前にできた北九州市スマートコミュニティ実証実験場；230世帯と50の事業所、八幡製鉄所とパイプライン、製鉄生産過程で生じる水素を燃料電池で発電、燃料電池車に利用
- トクヤマのカセイソーダ製造過程で生じる水素年間32.9億 m^3 、マツダの水素自動車に県が実験
- 石油精製、アンモニア製造、製鉄の副産物として大量発生、年間約360億 m^3 、総需要はこの半分、残りの半分で燃料電池車を年間1500万台動かせる

余剰電力、水素で貯蔵（再生エネ発電量アップに）



人工光合成

1. 明反応：太陽光のエネルギーで水を分解して水素イオンと電子と酸素を生成
2. 暗反応：明反応で得られた電子と水素イオンを用いて二酸化炭素からグルコースなどの糖類などを生成という2つの反応から成り立ちます。

これらの反応を人為的に再現した技術が「人工光合成」です。地球温暖化の原因と考えられている二酸化炭素を吸収するとともに、その二酸化炭素から燃料をつくり出す技術として、世界中から多くの注目を集めています。

2014/2/16 日経 水素発電設備、川重が世界初の量産 17年メド

川崎重工業は2017年をメドに、水素を燃料とする火力発電設備を、世界に先駆けて量産

水素は燃やしても二酸化炭素（CO₂）を排出しないほか、長期的に発電コストが天然ガス火力並みに下がる見通し、川重は自家発電設備として日本や、温暖化ガスの削減を急ぐ欧州などで売り込む。三菱重工業や米ゼネラル・エレクトリック（GE）なども開発を急いでいる。水素発電は 20 年以降に普及しそうだ。

2050 年ごろのエネルギー（人工光合成の開発が進めば、下記の実現は大幅に早まる）

- 地熱発電
- 太陽光発電（家庭用中心）
- 燃料電池（家庭用発電、水素を直接燃料に）
- 波力、風力発電を使って水素を貯蓄する
- 燃料電池車(水素を燃料とする)
- スマートグリッドを使い、家庭用で電力が余った場合は、水素を作って貯蓄し、家庭用発電、車への燃料とする

2014. 1. 15 日経 「水素価格、ガソリン並みに、JX、燃料電池車後押し、20 年メド」

- JX ホールディングは燃料電池車向けに低コストの水素供給に乗り出す。
- 水素を安全で大量に輸送できる技術を開発。2020 年をメドに新技術を使った供給網を整備する。
- 供給コストを 3 割程度削減、ガソリン並みに利用できる価格実現を目指す。
- 同社が水素の低価格化に動くことで、燃料電池車の普及に弾みがつきそうだ。
- JX 日鉱日石エネルギーが製油所で自社生産している水素をトルエンに溶かして液体化、常温・常圧の状態でトレーラーで水素ステーションに運ぶ技術を開発した。
- 車に充填する時点で、独自開発した触媒を使って気体に戻す。
- 現状の水素の生産・流通コストは 1 立方メートル当たり、145 円。今回開発した低コストの水素供給体制が整うと、同 100 円以下が実現する。
- 同じ走行距離でガソリン並みとなる同約 60 円に近づける計画。
- 燃料電池車が普及期に入る 20 年から液体輸送を実用化。一気に供給網を広げる方針。
- 燃料電池車は 1 回の燃料充てんで走れる走行距離はガソリン車並み
- 水素供給量が増え価格が下がれば車両の需要が増え車両価格の一段の引き下げにつながる
- トルエンで水素を液化する技術は千代田化工建設も開発を進めており、関連インフラの技術開発でも日本勢が世界をリードしている。

2014. 4. 17 読売 JX 日鉱日石エネルギー社長（一色誠一氏）、燃料電池車、五輪が契機に

- 水素ステーションを 2015 年までに独自に 40 か所
- 水素供給のネットワークと水素製造装置
- 1 万 1000 か所のガソリンスタンド
- 総合エネルギーステーション
- 各社が競争する段階は 2020 年か？
- 2030 年ごろには、「水素社会」が到来

2015. 3. 13 日経 三菱重が実験成功、5 年後に実用化も、宇宙太陽光発電へ一歩、送電もワイアレス

12 日、電気を無線で送る実験に成功。10 kW の電力をマイクロ波に変換し、500m 先に届けることができた。

1 4 回「未来予測」

環境とビジネスとの関係

これからのビジネスは、環境をキーワードとして取り込む必要があります。例えば、環境と科学、環境と経営、環境と水、環境と食糧、環境と資源エネルギー、環境とナノテク、環境とバイオ、環境とリサイクル、環境と IT などです。また、これまでにお話したことから、太陽電池、蓄電池（今のところ、リチウム電池、ニッケル水素電池）、燃料電池とメタンハイドレートが今後のビジネスには重要なキーワードとなることが明白です。例えば、これらの分野でのインフラ整備には莫大な資金の投資が考えられます。これは、21 世紀最大のビジネス・チャンスであり、今後はインフラ整備を環境の側面から見直し、色々なアイデアを創造することがビジネスに直結す

る時代が来たのです。

ここで、20 世紀の科学が環境の側面を考えずに近視眼的な技術開発で陥った失敗を火力発電を事例として説明します。旧式の火力発電の熱効率は 32%、火力発電の熱効率を上げるために技術開発が行われ、新式では熱効率は 40%となりました。ところが、新式の発電所は大型となり、しかも常に定常の出力を維持して運転することが必要になりました。その結果、原子力発電と同じように揚水発電所が必要となりました。この理由は、昼も夜も同じ出力で運転しているのに、夜に電力が余ることになります。電気は溜めておくことができないのです。そこで、夜の余った電力で水をくみ上げて昼間にそれを使うために揚水発電所を建設する必要性が生じたのです。結局、新式発電所の発電効率は、昼夜平均では 32%で、旧式の発電所と同じ熱効率となってしまいました。そのうえ、揚水発電所の建設のための経費、環境破壊、遠距離送電によるロスを勘案すると以前よりも効率は悪くなったのです。

また、環境問題が会社の経営に大きく影響してきました。トヨタ、キャノンなど日本で利益を確保している大企業は環境問題にも積極的に取り組んでいます（現在、一時的には業績不振）。これは、単に製品を作る過程で環境に配慮していることを指しているわけではありません。環境に配慮するというポリシーが新しい発想を生み出す原動力となっているのです。世界中の自動車産業は現在、電気自動車（今のところ、ハイブリッド車が主である）と燃料電池車の普及に焦点を絞っています。エネルギー業界も太陽発電と燃料電池による自家発電に本腰を入れ始めています。20 世紀は石油文明といわれていました。21 世紀は太陽発電と燃料電池の文明になるかも知れません。いずれにしても、企業でマイナスのイメージでしか捉えることのできなかった環境というキーワードは、今ではプラス思考で考える時代となったことは確かです（炭素社会から水素社会への転換）。

長期的未来の展望とこれから我々が進むべき方向

現在の私の見解

キーワードは事実（過去も含めた）、予測、そして未来への想像
ほんとうの現実、未来への夢や理想をふくんで動くもの

未来への入り口には、人口爆発、エネルギー危機、食糧危機、高齢社会など様々な課題がある。地球規模の難題である。これらの課題を解決するには（持続可能な社会の実現）、地球に住む人間一人一人の意識改革が必要。しかし、近未来は深刻な問題ばかりではない。明るい希望もある。気軽な宇宙旅行、人間とロボットが共存する社会、再生医療などがある。これらの希望を抱きながら、現在直面する課題に対処していくことが大事である。

21 世紀は、我々の世界観、人間観、生命・倫理観が問われる時代、特にこれからの半世紀は、未来を占う意味でも重要な期間になる。今後 50 年間、人口問題を始めとした諸問題を乗り切れば、新しい道が開ける。以下に、未来への想像について「未来のたね」より抜粋したので参考にしてください。（観とは、見方、見解の意）

プラス思考の大切さ

- 自分がやりたいこと、将来の希望が未来への社会へとつながる。したがって、プラス思考で物事を考えることが必要
- マイナス思考では将来の展望が開けない

未来は

アイデア、発見、発明が枯渇することはない

- 情報は物質よりもはるかに膨大である
- 豊かさは豊かさを呼ぶ
- 発明すればするほど、さらなる発明が可能になる
- 知識を生めば生むほど、それはさらなる知識を生む
- 現代社会を動かすイノベーションは「交換（アイデア）」

近い将来

「近い将来」とは、2050 年ごろまでのこと。これからの 50 年間に起こることが、その後の地球の運命を決定してしまう。一番の問題は、ゴミ捨て場が足りないということではない。廃棄物の多くが有害な物質を含んでいることである。放射性廃棄物はもっと深刻。

もうちょっと先の未来では、ゴミの問題は解決可能（ナノマシン）

人口

世界人口は、2050 年を境にして増加のスピードが緩くなり、2200 年には増加はとまる。そのころ人口は、約 120 億人と試算（この部分は、**最新情報では 2075 年 92 億人をピークに減少と予想**）。我々は、過剰人口が作り出すさまざまな問題を解決することが必要。環境問題、化石燃料、土地開発など。（ナノマシンの登場は 2100 年ごろ）

未来の食べ物

バクテリア。ほんの数時間で増殖、どんな汚いものでも食べる。人間に必要なたんぱく質その他の栄養素をもっている。「狩猟・採集時代」→「農耕時代」→「食糧は都市で生産する時代」

（最新情報では、2050 年には現在の農地面積でちょうど世界が食べていけると予想（農耕牧畜時代を維持?））

食糧マシン

人間に必要な栄養素は分子のかたちをしている。その分子は原子が結合したもの。

原子を自在に操れる「ナノマシン」は、必要な分子を組み立てることができる。

これから私たちはどのようにして地球と付き合っていけばよいのか？

- 92 億人の人間が他の生物と共存のため、我々の使う土地はできるだけ少なくする
- 次々と生じる地球環境問題の解決のために、常にイノベーションを続ける

時間スケール別に将来計画を立てる

↓

100 年、500 年、1000 年、1 万年、10 万年、100 万年、1 千万年、1 億年先の計画を立てて、イノベーションの速度を上げる

持続可能な発展

経済成長は、必ずしも悪いわけではない。科学と技術の進歩よい。ただし、その成長や発展が、未来の人たちに負債を残すようなものであってはならない。限りあるエネルギーを使い尽くしてはいけない。化石燃料とウランの使用は、持続可能な発展にはふさわしくない。生物種は、毎年、自然に誕生する数以上を減ぼしてはいけない。木を切り出した後には、苗木を植えるようにする。魚を獲るときには、稚魚の成長のことも考える。未来の人たちへも同じものを残しておくということを常に考えて行動する。

我々にはできることは？

「グローバルに考え、ローカルに行動する」。アジェンダ 21 のスローガン。地球全体の環境を守るには、地域の住民一人一人が責任ある行動をしなければならない。つねに、環境への影響を考えながら消費生活を送ること。

人間には自己変革と適応の能力がある。その能力は、時には短期間で発揮される。戦争や経済危機を体験しても、多くの人たちはそのたびごとに立ち直ってきた。それは変化に適応する能力があったから。

「未来のたね —これからの科学、これからの人間— より抜粋」

（アイリック・ニュート、作家、科学ジャーナリスト、翻訳家、オスロ大学天体物理学専攻 NHK 出版）

ナノマシン

1 ナノメートルは十億分の 1 メートル。体長百ナノメートルのマイクロロボットは「ナノマシン」あるいは「ナノロボット」と呼ばれる。普通の機械は、何十億個もの原子からなる部品を組み合わせでつくられる。しかし、ナノマシンの場合、部品を構成しているのは、わずかばかりの原子。歯車の原子は、せいぜい数百個。

ナノマシンの作り方？

アメリカの物理学者リチャード・ファインマン。ロボットアームを作る。このアームは、自分自身の十分の一のサイズの複製を作れるようにプログラムされている。つまり、最初のアームの長さが 1 メートルだとすると、

その複製の長さは十センチとなる。これを八回、繰り返せば、ナノマシン用のアームができる。ウィルスは他の生き物の体に入り込んで、その遺伝因子を変異させてしまう一種の自然界のナノマシン。

ナノマシンの必要性？

ナノマシンの活躍の場は、原子の世界。原子を自在に動かすことができれば、気体、液体、この宇宙に存在するあらゆる物質をコントロールできる。どんな物質も原子からなっているから。ナノマシンは土と水からでも豪華な食材を作り出せる。飢え・貧困の解決。食料、衣類、家、人間の生活に必要なものを作り出せる。

毒物の多くは、酸素、水素、炭素のような、まったく無害な元素からできている。毒物の構成要素となっている分子同士のつながりを切断できるナノマシンがあれば、危険な廃棄物の問題は、永久に解決。

ユニヴァーサルマシン

無数のナノマシンからなる「ユニヴァーサルマシン（万能マシン）」。ユニヴァーサルマシンは、ナノマシンに指示を与えるコンピュータで、物を作り出す製造機でもある。

自分が欲しいものをユニヴァーサルマシンに告げる。すると、ユニヴァーサルマシンは、それを作るのに必要な原材料を教えてくれる。次に、その原料を調達してそれをユニヴァーサルマシンのかなに入れる。そして始動ボタンを押す。しばらくすると、欲しかった品物ができあがっている。

ユニヴァーサルマシンは「ナノ・ゴミ箱」としても使える。家庭内で全てがリサイクルされ、外に出すゴミは無くなる。ユニヴァーサルマシンはたいていのものなら製品化してくれる。ただし、二つの条件だけは、どうしても必要。それは、必要な原材料がそろっていること、その品物がユニヴァーサルマシンそのものよりも大きくないこと。

ユニヴァーサルマシン発明以後の社会は、全ての物質的欲望が満たされる社会。飢えや貧困は、永久にない。ユニヴァーサルマシンを搭載した飛行機が大気圏を飛びまわって、温室効果ガスを次々に無害なガスに変えていく。

ナノマシンは2100年までに開発されるだろう。2500年までには、ナノマシンが建てた家に住む人もでてくる。そして、食べたい料理は、頭に描いただけで機械が作ってくれる。

遺伝子エリート

遺伝子操作で生まれた子どもは「遺伝子エリート」と呼ばれ、2100年以降には、地球の全人口の2,3パーセントは遺伝子エリートが占めるかもしれない。未来社会では、遺伝子エリートが様々な分野で主導権を握る。社会には「自然人」と「遺伝子エリート」のグループが存在する。この二つのグループの差はどんどん広がる。それは、人間の新しい種の誕生を意味する。

軌道エレベーター

1960年ロシアのユーリー・アルツターノ技師。奇抜なアイディア。アフリカ上空の地球静止軌道上から地上まで、一本のケーブルを垂らす。その端を地表に固定。静止軌道上に宇宙基地をつくって、地球との間に一本の「道」をつくる。2100年までに、簡単な構造の軌道エレベーターは可能。

建設費リニア並み

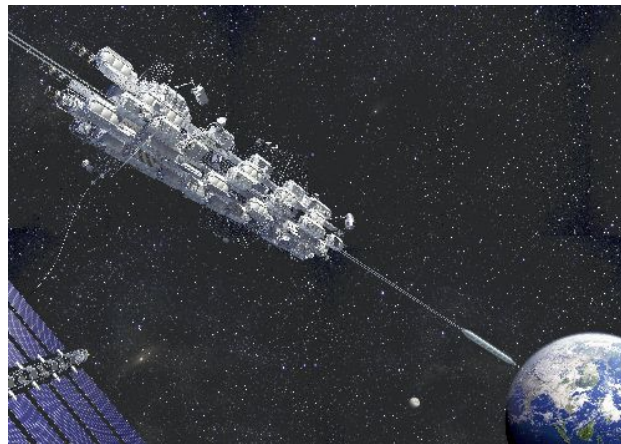
- ・ 大林組は、宇宙エレベーターを2050年に完成させる計画。スカイツリーの建設を手がけた技術者らが、具体的な数値計算や工学的検証に取り組んでいる。
- ・ 図中央は静止軌道ステーション、下方が筒状のエレベーター
- ・ 計画では、最初に打ち上げるのは幅2～5センチ、厚さ4マイクロ・メートルのベルト状のケーブル。カーボンナノチューブの繊維を加工し作る。
- ・ ケーブルが地上に達すれば、それを伝って補強用ケーブルを貼り付けていく装置を地上から送り出す。この作業を約500回重ねると、厚さが1.4ミリになり、100トン級エレベーターの運用が可能になる。
- ・ エレベーターは6両の電車ほどの大きさで、時速200キロで昇降。静止軌道上に大型ステーションを建造、その上下にも複数の施設を設置。
- ・ 総工費は約10兆円、リニア中央新幹線の東京―大阪間の建設費（9兆円）とほぼ同程度。1本作れば、2本目以降は既存の宇宙エレベーターを利用して建設できるため、割安になる。

利用価値

- ・ 用途は多岐。静止軌道ステーションは、無重力の宇宙環境を利用する大型実験拠点、静止衛星の投入や回収、修理も行える。

- ・ 月や火星と同じ重力になる位置には途中駅を設け、月面などでの活動を想定した訓練や実験もできる。
- ・ 静止軌道ステーションより先には、他の惑星に向かう宇宙船用の拠点設ける。強い遠心力が働くため、最小のエネルギーで宇宙船を放出できる。すべての施設は、宇宙旅行の観光地にもなる。
- ・ 宇宙に巨大な太陽光パネルを建造すれば、季節や天候、昼夜を問わず、太陽光を高効率で利用できる。カーボンナノチューブを長く延ばす技術は未確立、高速列車並みのスピードで長距離を昇降する駆動装置の研究開発もこれから。
- ・ 隕石や宇宙ごみの衝突防止対策のほか、万が一、ケーブルが切れた場合の安全システムの検討も不可欠。

大林組が計画する宇宙エレベーター案



宇宙の資源

宇宙空間にはエネルギー・原料がありあまっている。炭素の豊富な小惑星、金属の豊富な小惑星、水でできた彗星も何百万とある。

テラフォーミング

惑星環境工学「惑星の陸地（テラ）を地球のそのように造成する（フォーミング）」と言う意味。人間が火星に住むために、酸素を含んだ大気、水、適度の気温が必要。

レプリケーター（自己複製マシン）

自分自身をコピーできる機械。地球上の有機体は、レプリケーター。人間の体は、約 60 兆個の細胞からなる。その細胞 1 つ 1 つが、自分自身の正確なコピーをつくる。そもそも、我々はたった 1 つの細胞にすぎなかった。その細胞が自己分裂して 2 個になり、分裂を繰り返し 9 ヶ月後に一人の赤ちゃんの体が作れるだけの膨大な数の細胞まで増えた。自然界はレプリケーターだらけ。

レプリケーターは何に使えるか

レプリケーターの使命はいくつも考えられるが、まず地球的規模で破壊された自然を修復するのに用いられる。大気中の二酸化炭素を吸うレプリケーター。森林伐採跡に植樹して、新しい森を作らせるもの。ゴミを分解、産業廃棄物を無害化するもの。今の時点では、こういう仕事は多くの手間がかかる上に、費用もかさむ。でも、レプリケーターだったら、効果的かつすみやかに、それをやってくれる。

でも、ほんとうは、壮大な建設プロジェクトこそレプリケーターにふさわしい。たとえば、サハラ砂漠に内海をつくるようなプロジェクト。サハラ内海ができれば、その周辺に人が住めるようになる。また、砂漠地帯も肥沃な土地に生まれ変わるかもしれない。こうゆうところでは、掘削機使用のレプリケーターが活躍するだろう。もちろん、自己増殖するので、何百万台にも増え、とてつもなく大きなくぼ地をつくり、最後に運河をほって、大西洋の海水を引き入れる。あるいは、軌道エレベーターの建設にも、レプリケーターは大いに役に立つかもしれない。レプリケーターが 1 台あれば、我々は労せずしてなんでも手に入れることができる。そんなことから、あるアメリカの科学者は、これを「サンタクロース・マシン」と呼んだ。

宇宙で活躍するレプリケーター

1980 年に、NASA は最小の経費で、最大の効果が期待できるような宇宙開発の方法についてある科学者グループに依頼。科学者たちは月を例にとりて、その方法を検討し始めた。人間が月に住めるようになれば、そこから多くのものが得られると考えたからである。月に住むためには、住宅、工場、発電所、その他もろもろの施設が

必要になる。今の時点では、必需品はみな地球で製造し、それらを宇宙船で月まで運ばなければならない。これでは経費がかかりすぎる。必需品のほとんどを現地生産することが肝心。ここで、レプリケーターが登場する。NASA の科学者たちは、重量が百トンぐらいのレプリケーターが 1 台あれば、重要な仕事はすべてこなせるだろうと考えた。最初にレプリケーターを送り込む場所は、原料がたっぷりある地域でなければならない。これが最少の費用でできる、最も簡単な開発方法。レプリケーターはむしろ火星や金星のテラフォーミングにこそ、その真価を発揮する。火星の場合、レプリケーターは、火星の鉱物から酸素を作って、それを大気中に放出する。これができるば、火星の大気は速やかに変化する。火星では、地下水をくみ上げて、川や湖をつくることもできる。火星の開発に要する期間は、レプリケーターを使えば、大きく縮めることができる。使命を果たしたレプリケーターは自分自身を処理する。つまり、レプリケーター同士でお互いに解体しあう。だから、テラフォーミングの跡には、何も残らない。

未来のシナリオ（テクノロジーは進歩し続ける）

2020 年

- ・ 世界人口増加。食糧確保のため、遺伝子操作の技術が動物・植物に拡大
- ・ 最初のクローン人間誕生（?）、人類を火星へ送り込む計画が具体化（?）

2050 年

- ・ 産児制限の法的義務化、核融合発電所の運転開始、化石燃料が使用禁止
- ・ ロボット一千万台、仕事の多くをロボット行う、「考えるロボット」が実用化
- ・ 火星に植民地の建設開始

2014.6.6 日経「家族の一員」にロボット

- ・ ソフトバンク、20 万円を切るロボットを発売
- ・ 感情理解、話し相手に（高いコミュニケーション能力）
- ・ 2015 年 2 月に発売
- ・ 子どもの読み聞かせ、パーティの盛り上げ役
- ・ パナソニックは薬を運ぶ「ホスピーター」発売
- ・ セコムは監視ロボットを開発
- ・ サイバーダインは手足の不自由な人の動作を助けるタイプを開発
- ・ 経産省・NEDO によると、ロボット市場は 2035 年に 9 兆 7 千億（サービス分野は 4 兆 9 千億円）

2014.6.16 読売 「低価格ロボット普及支援」政府戦略、介護・農業など 4 分野

- ・ 政府のロボット戦略の全容
- ・ ロボットを人手不足や高齢化の問題解決の切り札と位置付け
- ・ 介護・農業・インフラ（社会資本）点検・災害、工事を重点 4 分野に集中支援
- ・ 国内市場規模 2012 年の約 7 千億から、20 年には 3 倍超の約 2.4 兆円に拡大
- ・ 東京五輪に合わせ、世界各国が性能を競う「ロボットオリンピック」も開く
- ・ インターネットに続く、「次の産業革命」の主役はロボット
- ・ 機能を絞り込んだ 10 万円程度のロボットを作れば、介護現場で一気に広まる（100 万台超）

2100 年

- ・ 世界人口 140 億人、情報端末機（IM）が一般家庭に普及、従来の通学制度は廃止
- ・ 人間の遺伝子操作、火星のテラフォーミングと最初の本格的な移住計画

2200 年

- ・ ナノテクノロジー、テラフォーミング開始時、火星の住人は何千人
- ・ 世界の最高齢者 200 歳、数百年の寿命を持つ「遺伝子エリート」誕生
- ・ ロボットの台数が人間の数を上回る。人間の一生の大半は働かないで暮らす

2300 年

- ・ どんな食糧でも、ユニヴァーサルマシンで作る、農業廃止、貧困は永久になくなる

- ・ レプリケーターの投入、軌道エレベーターの建設工事

2400 年

- ・ 軌道エレベーター完成、宇宙旅行が格安、月や火星は、旅行客でゴった返す

3000 年

- ・ 火星のテラフォーミング完了、火星へ移住、太陽系の惑星に人間の移住可能
- ・ 最初の「多世代宇宙船」と「たねの方舟」が、それぞれの目的地に到着する。
- ・ 「遺伝子エリート」と「自然人」との違い顕著、人間は、いくつもの種に分かれる

5000 年

- ・ 「たねの方舟」のいくつかから、新しい惑星で誕生した人類からの連絡

10000 年

- ・ 氷河期の兆し、ヨーロッパの大都市が次々に壊滅
- ・ 地球の人間の選択肢は3つ、赤道付近に移動、火星に移民、「宇宙の方舟」

100000 年

- ・ ホモ・サピエンス本来の種は絶滅、他の惑星で、それぞれの人類が誕生
- ・ 多くの人間は、肉体を捨てて、コンピュータ・プログラムとしての生命を選ぶ。これによって、銀河系のどこへでも自由に移動できるようになる。

1000000 年

- ・ 新しい人間が銀河系の惑星を次々に植民地化、人間以外の知的生命体がいることを信じ続けている科学者たちは、別の銀河系の調査に乗り出そうとする。