

はじめに

本書の目的は大学基礎レベルでの物理系地学分野の基礎事項をまとめ、物理学的な考え方を重視した演習問題を解くことで、読者が専門レベルへ進むための基礎学力を獲得しグローバルな視点からの地球や惑星の理解を深めることです。地球惑星科学の扱う対象は大変広く、分野としては宇宙や太陽系の構成と進化、大気や海洋の運動、地震や火山などの固体地球、地層や化石と地球の歴史、地球環境の変動、などが挙げられます。本書の内容はその一部である固体地球物理学分野となりますが、天文、気象、地球の歴史などとの境界領域も多少扱います。しかし、専門レベルでどの分野に進むにしろ物理学と数学の基本的知識は必要で、本書はそれらの習得にも役立つと期待されます。本書で使用する物理学と数学は大学基礎から専門の入門レベルまでとし、専門レベルの内容となる事項は付録に載せるようにしました。また、本文で引用した原著論文などの参考文献は詳細なリストを巻末にまとめました。

本文は主要分野の7つの章からなります。各章では、各分野の主要テーマごとに節を設けて基礎事項を解説し、幾つかの問題を解いていきます。問題の解答は同じ節内で詳細に解説し、本文の最後に簡潔にまとめるという形式は避けました。特に、数式の変形はなるべく途中を省略せず、紙面を眺めているだけでも式変形が追えることを目指しました。言うまでもなく、最初から解答を見ては学力は付きませんが、読者の目的によっては問題解説を本文のように通読してもよいと思います。

本書の原稿はLinux上で動く $\text{\LaTeX}$ を用いて電子組版しました。また、図については、その多くを[Wessel *et al.* 2019]のGMT (Generic Mapping Tools)を用いて作成しました。これらのシステムやユーティリティは全て無償で提供されており、開発の関係者に感謝致します。

最後に、編集・印刷・製本、電子出版への対応、さらには全国規模の広報活動を引き受けてくださった株式会社近代科学社の石井沙知編集長、他の皆様にお礼申し上げます。特に、近代科学社 Digital では $\text{\LaTeX}$ の原稿を受付可能だけでなく、優れたクラスファイルを提供していただきました。

2025年2月

田中 秀文

目次

はじめに	3
------------	---

第1章 惑星としての地球

1.1 ケプラーの法則	12
1.1.1 惑星の運動に関する 3 つの法則	12
1.1.2 ボーデの法則	12
問題 1.1	13
問題 1.1 解説	14
補足: 円錐曲線について	17
1.2 運動方程式と万有引力	18
1.2.1 運動の法則	18
1.2.2 等速円運動による加速度	18
問題 1.2	19
問題 1.2 解説	20
1.3 エネルギー保存則と運動量保存則	22
1.3.1 エネルギー保存の法則	22
1.3.2 運動量保存の法則	23
1.3.3 回転運動と角運動量	24
1.3.4 角運動量保存の法則	25
1.3.5 自転の角運動量と慣性モーメント	26
問題 1.3	27
問題 1.3 解説	31
1.4 太陽放射と地球表面温度	39
1.4.1 黒体放射の理論	39
1.4.2 太陽放射エネルギーと地球の表面温度	40
1.4.3 地球の温室効果ガス	40
1.4.4 ヘルムホルツによる太陽の年齢	41
補足: 気候変動について	41
問題 1.4	44
問題 1.4 解説	47

第2章 放射性元素と数値年代

2.1 放射性元素と放射壊変	52
2.1.1 放射性元素	52
2.1.2 放射壊変の時間変化	52
問題 2.1	53
問題 2.1 解説	53
補足: 関数の平均と確率密度について	55
2.2 主な数値年代測定法	57
2.2.1 C-14 法 (放射性炭素法)	57

2.2.2 K-Ar 法	57
2.2.3 Rb-Sr 法	58
問題 2.2	59
問題 2.2 解説	60

第3章 測地と重力

3.1 地球の形と大きさ	64
3.1.1 球としての地球	64
3.1.2 回転楕円体としての地球	64
問題 3.1	65
問題 3.1 解説	68
3.2 万有引力と重力	72
3.2.1 万有引力の法則と重力加速度	72
3.2.2 重力の測定	73
3.2.3 重力異常と重力探査	74
3.2.4 潮の干満と潮汐力	75
問題 3.2	76
問題 3.2 解説	78
3.3 アイソスタシー	82
3.3.1 アイソスタシーとアルキメデスの原理	82
3.3.2 アイソスタシーの証拠	83
3.3.3 マントルの流動性	84
3.3.4 マントル対流	85
問題 3.3	86
問題 3.3 解説	88
3.4 自転とコリオリ力	89
3.4.1 フーコーの振り子	89
3.4.2 角速度ベクトル	90
3.4.3 回転座標系での見かけの力	91
3.4.4 地衡風と傾度風	93
問題 3.4	95
問題 3.4 解説	96
補足: コリオリ力の局地座標系での表現	97
3.5 重力ポテンシャルとジオイド	99
3.5.1 ベクトル場とポテンシャル	99
3.5.2 重力ポテンシャル	100
3.5.3 ジオイド	101
3.5.4 重力補正と重力異常	102
3.5.5 フリーエア異常・ブーゲー異常と地下構造	103
問題 3.5	104
問題 3.5 解説	107
補足: 力が働かない球殻内部	109

補足：ポテンシャルが一定の球殻内部	110
-------------------------	-----

第4章 地震と断層

4.1 地震のマグニチュード	112
4.1.1 マグニチュードとエネルギー	112
4.1.2 マグニチュードと発生頻度	112
4.1.3 モーメントマグニチュード	113
問題 4.1	115
問題 4.1 解説	116
4.2 地震波の伝播	119
4.2.1 弾性体の波動	119
4.2.2 地震波の反射と屈折	121
4.2.3 走時曲線	122
4.2.4 ヘッドウェーブ	123
4.2.5 多層の地下の地震波伝播	124
4.2.6 多層の球内部での地震波伝播	126
問題 4.2	128
問題 4.2 解説	130
補足: 3 層地球モデルのシャドーゾーンについて	135
4.3 地震発生のメカニズム	136
4.3.1 断層の分類	136
4.3.2 P 波初動分布	137
4.3.3 震源球	138
4.3.4 発震機構の決定	139
問題 4.3	140
問題 4.3 解説	142
4.4 弾性体の力学と断層運動	145
4.4.1 応力と歪み	145
4.4.2 3 次元弾性体	146
4.4.3 主応力軸と主応力	146
4.4.4 断層帯の地殻歪み	147
4.4.5 地殻内の応力	148
4.4.6 小天体内部の圧力	149
問題 4.4	150
問題 4.4 解説	152

第5章 地球の熱と温度

5.1 地温勾配と地殻熱流量	158
5.1.1 地殻熱流量と熱伝導の法則	158
5.1.2 熱境界層としての地殻とマントル上層部	158
問題 5.1	159
問題 5.1 解説	162

5.2	大陸の地殻熱流量モデル	164
5.2.1	1次元定常熱伝導方程式	164
5.2.2	大陸地殻の1次元熱流量モデル	165
5.2.3	球の熱伝導モデル	167
	問題 5.2	168
	問題 5.2 解説	170
5.3	周期変動する地表温度の伝播	175
5.3.1	1次元非定常熱伝導方程式	175
5.3.2	熱拡散の距離と時間の特徴的スケール	176
5.3.3	一定周期で時間変動する地表温度の伝播	176
	問題 5.3	178
	問題 5.3 解説	179
5.4	海洋リソスフェアの半無限体冷却モデル	180
5.4.1	海洋リソスフェアの熱流量	180
5.4.2	半無限体冷却モデル	181
5.4.3	海洋リソスフェアの厚さの時間変化	181
5.4.4	海洋リソスフェアの熱流量の時間変化	182
5.4.5	ケルビンによる地球の年齢	182
	問題 5.4	183
	補足: 体積膨張率について	184
	問題 5.4 解説	186
5.5	マンツルの断熱温度勾配	188
5.5.1	熱対流	188
5.5.2	断熱温度勾配	189
5.5.3	断熱過程	189
5.5.4	マンツルの断熱温度勾配	190
5.5.5	ポテンシャル温度	191
	問題 5.5	191
	問題 5.5 解説	191

第6章 地磁気と古地磁気

6.1	現在の地磁気分布	194
6.1.1	地磁気3成分	194
6.1.2	磁気図	194
6.1.3	磁気双極子による近似	195
6.1.4	磁極と地磁気極	195
6.1.5	地磁気永年変化	197
6.1.6	惑星間空間での地磁気	197
	問題 6.1	198
	問題 6.1 解説	200
	補足: $M = 4\pi a^3 F_0 / \mu_0$ の単位について	200
6.2	地磁気ポテンシャル	203

6.2.1	磁気双極子のポテンシャル	203
6.2.2	地磁気の球関数表示	204
6.2.3	球関数のパターン	204
	問題 6.2	206
	問題 6.2 解説	207
6.3	地下電気伝導度	209
6.3.1	地下を構成する物質の電気抵抗	209
6.3.2	地磁気地電流法	210
	問題 6.3	211
	問題 6.3 解説	212
	補足： $\frac{\mu T}{2\pi} \left \frac{E}{B} \right ^2$ の単位について	213
6.4	古地磁気学の原理	214
6.4.1	地磁気逆転の発見	214
6.4.2	仮想的地磁気極	215
6.4.3	地心軸双極子仮説	216
6.4.4	フィッシャー統計	217
6.4.5	マツヤマ-ブリュンヌ地磁気逆転	218
	問題 6.4	219
	問題 6.4 解説	221
6.5	古地磁気と大陸移動説	225
6.5.1	極移動曲線 (APWP)	225
6.5.2	大陸の分裂と APWP	227
	問題 6.5	229
	問題 6.5 解説	231
6.6	海上地磁気縞状異常と海洋底拡大	234
6.6.1	海洋底が記録した古地磁気極性	234
6.6.2	磁気双極子による地磁気異常	235
6.6.3	地磁気極性タイムスケール	237
	問題 6.6	237
	問題 6.6 解説	238

第7章 プレートテクトニクスの幾何学

7.1	物理的観測による証拠	242
7.1.1	大陸と海洋底の地形	242
7.1.2	地震の分布	242
7.1.3	火山の分布	243
7.1.4	海上地磁気縞状異常による等年代線	244
7.1.5	主要なプレートの分布	246
7.2	プレートテクトニクスの幾何学：平面	247
7.2.1	プレートの境界と相対速度	247
7.2.2	トランスフォーム断層	247

7.2.3	3 重会合点.....	248
7.2.4	速度空間表示	249
7.2.5	速度空間作図例	250
問題 7.2		251
問題 7.2 解説		254
7.3	プレートテクトニクスの幾何学：球面	257
7.3.1	プレートの移動とオイラー回転	257
7.3.2	オイラー回転の回転行列	258
7.3.3	有限回転の非可換性	259
7.3.4	ベクトルとしての無限小回転	260
7.3.5	角速度ベクトル	261
7.3.6	プレート運動と無限小回転	262
7.3.7	オイラー極によるメルカトル図法	263
問題 7.3		264
問題 7.3 解説		268

付録 A 第 1 章の補足

A.1	主な単位，接頭語，物理定数，観測データ	276
A.2	2 次元回転行列の導出	278
A.3	天体スケールの力学的エネルギー保存則	279
A.4	エネルギー保存則による惑星の公転軌道の導出	280
A.5	地質時代の年代区分図	285

付録 B 第 3–5 章の補足

B.1	2 次元回転座標系でのニュートンの運動方程式	288
B.2	重力ポテンシャルから求める地球の扁平率	289
B.3	2 次元座標系での主応力と主応力軸の導出	292
	弾性定数の関係式について	295
B.4	半無限体表面の突然の加熱・冷却による熱伝導	296
	$\exp(-x^2)$ の 0 から ∞ の定積分について	298
	誤差関数と相補誤差関数のグラフと数値表	299

付録 C 第 6 章の補足

C.1	磁気の国際単位系 (SI)	302
C.2	ベクトル解析の公式	303
C.3	微分演算子の勾配 (grad)，発散 (div)，回転 (rot) と物理的解 釈	305
	スカラー場の勾配 (grad)	305
	発散 (div) とガウスの発散定理	306
	回転 (rot) とストークスの定理	307
C.4	静磁場のポテンシャルとラプラス方程式	309
	地磁気の球関数表示	311

C.5	マクスウェルの方程式と地下の電磁場	312
	マクスウェルの方程式	312
	真空中の電磁場	312
	地下の電磁場	313
C.6	球面三角法の主な公式	316

付録D 第7章の補足

D.1	線形変換に基づく回転行列の導出	318
	2次元の回転行列	318
	3次元の回転行列	319
	ロドリゲスの回転公式と回転行列	320
D.2	回転行列に対応するオイラー極と回転角	321
D.3	地心直交座標 (x - y - z) と局地座標 (n - e - d) の変換行列	323

付録E 用紙類と地図投影法補足

E.1	両対数グラフ用紙 (問題 1.1.1)	328
E.2	片対数グラフ用紙 (問題 1.1.2)	329
E.3	両対数グラフ用紙 (問題 1.3.4)	330
E.4	球面上の図形の投影	330
	ランベルト等面積投影	330
	ステレオ投影	331
	投影図の比較	332
	ランベルト等面積投影図 (極中心とシュミットネット, M サイズ)	333
	ランベルト等面積投影図 (極中心, L サイズ)	334
	シュミットネット (L サイズ)	335
E.5	数値表とグラフ用紙 (問題 6.1.1)	336
E.6	国際標準地球磁場 2020 年 (IGRF 2020) (問題 6.1.2)	337
E.7	古地理図の用紙 (問題 6.5.1: インド大陸の古緯度と古地理図)	338
E.8	オイラー極中心の世界地図と APWP (問題 6.5.3)	339
	参考文献	341
	索引	346

第1章

惑星としての地球

第1章では地球を含む惑星の公転について、軌道半径や公転周期の規則性を両対数と片対数のグラフで確認し、このような惑星の運動が運動方程式などの力学で説明されることを学びます。さらにエネルギーや角運動量などの概念を応用して、惑星や地球に関する物理現象を演習問題を通して考察します。最後に、黒体放射の理論を応用して太陽放射による地球や惑星の表面温度を推定し、さらに地球の気候変動について補足します。

■ ■ ■ p.12-38 : 省略 $\Rightarrow$ 次へ ■ ■ ■

得られた核とマントルの密度比は $R_c/R = 0.5$ を仮定した結果ですが、地球には金属鉄を主成分とする核があること、火星の核は地球より小さめであること、月は一様構造に近いが小さな金属核が存在するらしいこと、などの観測結果と符合します。

1.4 太陽放射と地球表面温度

1.4.1 黒体放射の理論

全ての電磁波を吸収する理論上の物体を黒体といいます。黒体はその温度に応じて光や赤外線などの電磁波によるエネルギーを、プランクの法則に従って放射します。その際、黒体の温度 T (単位は K) と最も強度が強くなる電磁波のピークの波長 λ_m (単位は μm) には次の関係が成立し、ウィーンの変位則とよばれます。

$$\lambda_m T = 2900. \quad (1.30)$$

図 1.22 は、プランクの法則により放射されるエネルギーを、電磁波の波長の関数として異なる温度で表したグラフです。温度が高くなるほど急激に放射エネルギーが大きくなり、そのピークが短波長へシフトすることが分かります。

一方、図 1.22 の温度 T のグラフを全ての波長について積分すると、温度 T での黒体表面から単位面積当たり毎秒放射されるエネルギー E (単位は W/m^2) となり、次のシュテファン-ボルツマンの法則とよべます。式中、 σ はシュテファン-ボルツマン定数です。

$$E = \sigma T^4 \quad (\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}). \quad (1.31)$$

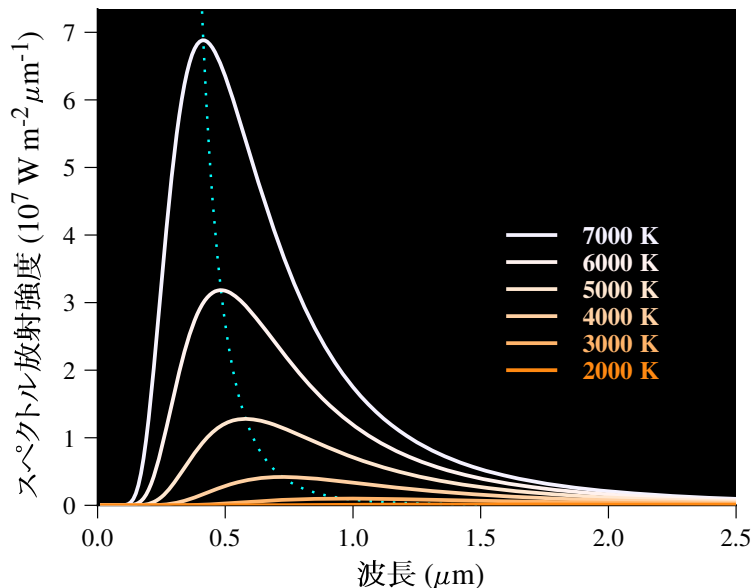


図 1.22 黒体放射のスペクトル。数字は黒体の温度 (K)、点線は各スペクトルのピークを示す。

全ての物体は近似的に黒体放射の理論に従ってエネルギーを放射します。太陽のような恒星では、エネルギーは主に光として放射され、表面温度の高い恒星ほどピークスペクトルの波長が短く、青白い光を放ちます。なお、太陽は 6000 K の黒体に近く、エネルギーのピークは約 $0.5 \mu\text{m}$ で、青-緑です。しかし、太陽光は全ての波長を含んだ連続光ですので、橙-黄がかった白色を呈します。また、地球も赤外線領域の電磁波によりエネルギーを宇宙へ放射しています。

1.4.2 太陽放射エネルギーと地球の表面温度

地球軌道上での 1 m^2 当たりの太陽放射エネルギーを太陽定数 S といい、観測値は 1361 W/m^2 です [国立天文台 2023]。これを地球表面全体で平均すると 4 分の 1 になり、地球表面 1 m^2 当たりの入射エネルギーは 340 W/m^2 となります。しかし、入射エネルギーの一定割合は地表で反射され宇宙空間へ戻り、この割合をアルベド（反射能）といいます。結局、地球表面 1 m^2 当たりの平均の入射エネルギー I はアルベドを α として次式で表されます。

$$I = \frac{1}{4}S(1 - \alpha). \quad (1.32)$$

地球のアルベドは約 0.3 で、これより地球表面の平均の入射エネルギーは 238 W/m^2 です。

地球表面温度を一定に保つには、太陽放射による入射エネルギーと同量のエネルギーが宇宙空間に放射される必要があります。大気のような温室効果ガスがない場合は、図 1.23(a) のように地球表面からの放射エネルギーが入射エネルギーと同じ 238 W/m^2 となり、シュテファン-ボルツマンの法則から地球の表面温度は -18°C となります（図の数字の単位は W/m^2 ）。

実際の地球の平均表面温度が 15°C に保たれているのは大気の温室効果のためです。地球表面温度 15°C は、地球表面からの放射エネルギー 390 W/m^2 に相当します。図 1.23(b) のように、温室効果ガスはこの地球放射の大部分と太陽放射の一部を一旦吸収しますが、吸収したエネルギーをあらゆる方向に再放射するので、地表面を暖めることになります。結局、温室効果により地表で 492 W/m^2 のエネルギーが出入りすることになりますが、大気の上面では温室効果ガスがない場合と同じ 238 W/m^2 のエネルギー収支であることには注意が必要です。

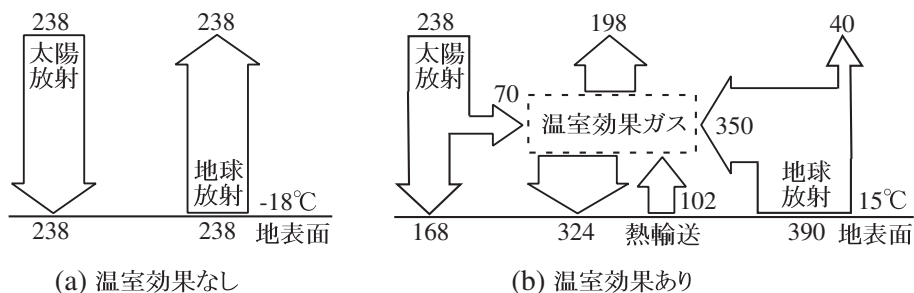


図 1.23 地球表面のエネルギー収支（数字は W/m^2 ）。(a) 温室効果がない場合と (b) ある場合。

1.4.3 地球の温室効果ガス

大気の 99% を占める窒素と酸素にはほとんど温室効果はありません。主要な温室効果ガスは、

温室効果の大きい順に、水蒸気 (60%)、二酸化炭素 (26%)、オゾン (8%)、その他 (6%) です [Kiehl & Trenberth 1997]. ここで重要な事実は、水蒸気の温室効果が格段に大きいことです。しかし、この事実から二酸化炭素の排出は地球温暖化にはあまり寄与しないと結論するのは誤りです。理由は、水蒸気は凝結や降水によりその含有量が地表の温度で決まり、大気中に長期に留まることはないからです [Schmidt 2005]. 二酸化炭素などの温室効果ガスは温室効果全体の 25% を主導的に担い、残りの 75% はそのフィードバックとしての水蒸気と雲の温室効果によるもの研究もあります [Lacis *et al.* 2010]. そのため逆に二酸化炭素が極端に減ると水蒸気による温室効果も同時に減少し、地球は氷河時代に戻ることになります。植物の光合成速度は二酸化炭素含有量にほぼ比例するので [彦坂・寺島 2013], 二酸化炭素の過度な減少は生命の危機となります。

1.4.4 ヘルムホルツによる太陽の年齢

太陽放射のエネルギー源は太陽中心部での水素の核融合反応で、太陽は誕生後 46 億年間輝き続けています。しかし、放射性元素や核分裂などが発見されていなかった 19 世紀中頃は、考え得る最大のエネルギー源は原始太陽形成時の重力エネルギーでした。ヘルムホルツはこの重力収縮によるエネルギーを計算し地球で受ける単位時間当たりの太陽放射エネルギーで除して、太陽の年齢を 2000 万年としました。続いてケルビンも同じ方法で太陽の年齢を推定し、内部の密度分布の違いで 2000–6000 万年としました。この数千万年という値はケルビンの熱伝導理論による地球の年齢とよく合い (問題 5.4.3), ケルビンは信頼度の高い結果と考えたようです。

これらの太陽の年齢の見積もりは現代では意味がありません。しかし、ガスやチリが集積することで解放される重力エネルギーは星の誕生に必要なエネルギー源として重要です。また、密度が極めて大きな中性子星やブラックホールの回りには高温の降着円盤が形成されますが、そのエネルギー源は重力エネルギーといわれています。

補足：気候変動について

本節で扱った黒体放射理論による地球表面のエネルギー収支は定常状態に対する基本原理です。太陽放射と地球放射のエネルギーバランスがくずれると、地球の表面温度は変化し、新たな定常状態に移行します。しかし、実際の移行過程は大変複雑で、それは気候システムには種々のフィードバックがあるためです。

正のフィードバックの例は短期 (10–100 日程度) に働く水蒸気の温室効果です。気温の増大で大気の水蒸気濃度が増えると温室効果も増大し気温はさらに上昇します。気温が減少する場合は逆の現象により気温はますます減少します。長期 (1000–10 万年程度) の例は氷雪の面積です。寒冷化で氷雪が増えると地球のアルベドが増大し、太陽放射の入力が減少して気温は下がりさらに氷雪が増えます。温暖化では逆のプロセスでますます温暖化が進みます。しかし、気候システムには気候の暴走を抑止する負のフィードバックもあります。

負のフィードバックとしては地球放射そのものがあります。地表温度が増大すると地球放射が増大することで地表を冷やし、地表温度を元に戻すように働きます。植生は短期 (1–100 年程度) の負のフィードバックです。気温が上昇すると植物の光合成が盛んになり、二酸化炭素 (CO_2) が消費され温室効果が低下して気温も低下します。岩石の風化は長期 (数十万–数百万年

程度)の例です。多くの岩石に含まれるケイ酸塩鉱物 (MgSiO_3 など) は雨水に溶けた CO_2 と反応して炭酸塩 (MgCO_3 など) となり CO_2 が消費されます。気温が高いほど風化作用は促進されて CO_2 が減少し、結果として気温も減少します。

一方、雲はその高さや水滴の大きさの違いなどによりフィードバックとしては正にも負にも働き、その正確な見積もりは難しいそうです。

以上のように、気候システムは大変複雑で CO_2 だけが気温を決めるわけではありません。そのため、現在 410ppm^3 に達した CO_2 濃度が近未来の気温に及ぼす影響については専門家の間で多くの議論があります ([赤祖父 2008, 丸山ほか 2020, 渡辺 2022] など)。その際に参考になる観測事象は地質時代の気候変動です。過去の気候変動は地質学分野のテーマですので本書ではその詳細は扱いませんが、以下に地質時代の気温と CO_2 の観測例について簡単に紹介します。

過去の気温の寒暖を示す証拠を気温のプロキシといい、樹木年輪の幅やサンゴ殻の元素組成など多数あります。連続で定量的なプロキシの 1 つは酸素の同位体比です。酸素同位体 ^{18}O を含む水分子は、通常の酸素 ^{16}O を含む水分子より重く蒸発しにくい性質があります。そこで酸素同位体比 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ を $\delta^{18}\text{O}$ と表し、その大小で過去の気温を推定します。その原理は、氷河期には海洋から蒸発した水蒸気が極域へ移動して氷河を形成するため、海水の同位体比は大きく、氷河の同位体比は小さくなることです ([酒井 2016, 14 章] など)。

$\delta^{18}\text{O}$ は広く地質時代の化石などに応用され、以下のような過去の気温の変動が明らかにされています ([増田 1996] など)。古生代⁴は概して気温は現代よりも高かったのですが、3 億年前頃には Gondwana 氷河時代とよばれる寒冷期もありました。中生代は全般的に温暖で、特に 1 億年前頃の白亜紀は温暖期で気温が現在よりも $10\text{--}15\text{ }^\circ\text{C}$ 程度高く、海水準も約 $200\text{--}300\text{ m}$ 高かったと考えられています。6600 万年前からの新生代に入ると寒冷化が進み、258 万年前からの第四紀は氷期と間氷期が繰り返し、現在は氷河時代の間氷期です。

地質時代の CO_2 濃度についても、植物プランクトンの炭素同位体比や植物の気孔密度など種々のプロキシを用いて推定されています。過去 4.5 億年間の CO_2 濃度は前述の中生代の温暖期には $500\text{--}2500\text{ppm}$ と高く、約 3 億年前の Gondwana 氷河時代には $100\text{--}500\text{ppm}$ と低くなり、気温との高い相関が見られます [IPCC 2021, Fig.2.3]。

第四紀の後半以降は、気温と CO_2 の高い相関が南極やグリーンランドの氷床コアで顕著に見られます。氷床には過去の大気が気泡として含まれ、気泡のガスクロマトグラフィにより CO_2 濃度が直接測定されます。南極では複数の地点で氷床コアの研究が実施され、それらの測定結果を統合して過去約 80 万年間の気温と CO_2 濃度の変動曲線が得られています。

その一例として、図 1.24 に南極ドームふじ氷床コアから得られた過去 35 万年間の測定結果を示します。これは [Kawamura *et al.* 2007] により公開された温度 ΔT (過去 1 万年の平均値からの差) と CO_2 濃度のデータを、それらの変動幅が同程度になるように縦軸を調整した図です (横軸の kyr BP は 1000 年前。BP は Before Present)。温度と CO_2 の変動曲線がほぼ重なり、 CO_2 の気候変動に対する大きな関与を示します。しかし、図をよく観察すると間氷期から氷期への移行期 (約 34, 24, 13 万年前) では CO_2 の減少は温度の減少よりも最大で数千年遅れてい

3 ppm (parts per million) は 100 万分率です ($100\text{ppm} = 0.01\%$)。

4 地質時代名と年代は付録 A.5 にあります。

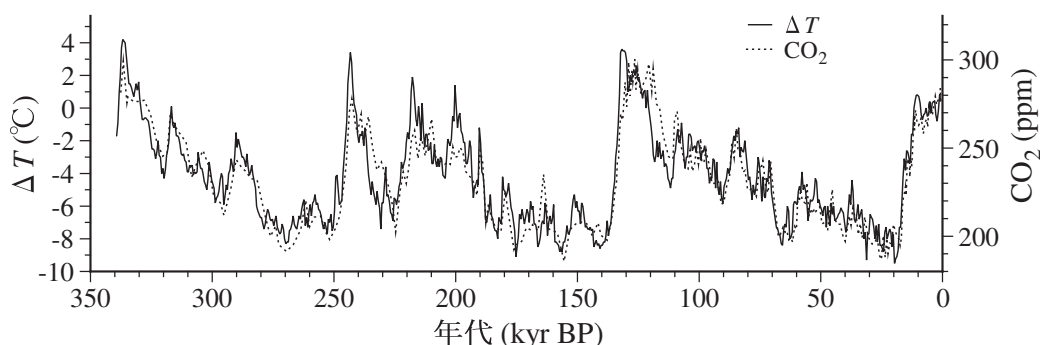


図 1.24 南極ドームふじでの過去 35 万年間の気温と CO₂ 濃度 [Kawamura *et al.* 2007]. 年代の kyr BP は 1000 年前 (BP は Before Present).

ます。これは CO₂ 濃度の変化が海洋を含む炭素循環の過程で気温に遅れるためと思われます。また、氷期から間氷期への移行期（約 25, 14, 2 万年前）でも、CO₂ の増加は温度の増加から 500–1000 年程度遅れているようです。これらの現象は気候変動を主導する原因は CO₂ ではないことを示します。実際、この論文では種々の元素測定や理論計算も実施し、ミランコビッチサイクルが氷期–間氷期の繰り返しの原因と結論しています。

ミランコビッチサイクルとは地球軌道要素の変動による北半球高緯度の夏の太陽放射の増減が気候変動に影響するという理論です（[増田・阿部 1996] など）。ミランコビッチ理論では地球軌道の 3 要素の変動が地表の年平均太陽放射に影響すると考えます。それらの軌道要素は、(i) 公転軌道の離心率（現在 0.0167）、(ii) 自転軸の傾角（現在 23.4°）、(iii) 自転軸の歳差運動です。それらが及ぼす太陽放射の変動周期は、軌道離心率が約 10 万年と 40 万年、自転軸傾角が 4.1 万年、自転軸歳差運動が 1.9 万年と 2.3 万年です⁵。実際、図 1.24 の鋸歯状の変動は約 10 万年周期が目立ちますが、[Kawamura *et al.* 2007] の周波数解析では振幅の大きい順に 11.1, 4.1, 2.3 万年で、ミランコビッチサイクルと一致します。

問題 1.4.5 の簡単なモデルで考察しますが、軌道離心率の変動により地球が受ける太陽放射への影響は大変小さいです。高度なミランコビッチ理論からも、離心率起源の 10 万年周期の変動の振幅は 4 万年や 2 万年周期の 1/10 以下です。しかし、図 1.24 も含めて過去 100 万年間の $\delta^{18}\text{O}$ による気温の変動は 10 万年周期が卓越しています。この理論と観測の齟齬は [Abe-Ouchi *et al.* 2013] のモデルで説明されます。この論文では大気と氷床のフィードバックに加えて氷床融解後のアイソスタシー（3.3 節）による地表の隆起の遅れなども組み入れた包括的な物理モデルを構築し、10 万年周期や鋸歯状の変動を特徴とする過去 40 万年間の気候変動を正しく再現しています。また、CO₂ は気候変動を増幅するが主導はしないと結論しています。

5 歳差運動の周期は約 2.6 万年ですが、春分点や近日点が移動するために 1.9 万年と 2.3 万の 2 つの周期が現れます。

問題 1.4

問題 1.4.1

ヘルムホルツの方法により、密度一定の条件で太陽の年齢を見積もります。重力収縮のエネルギーとは物質が無限遠から落下して集積するときの重力エネルギーです。図 1.25 のように、半径 r まで成長した質量 M_r の原始太陽に無限遠から質量 dm の物質が集積するとき、重力エネルギー E_G の増分 dE_G は G を万有引力定数として、問題 1.3.2(1) の式から次式で表されます。

$$dE_G = \frac{GM_r dm}{r}.$$

ここに、 M_r と dm は物質の密度を ρ として次のように表されます。

$$M_r = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho, \quad dm = 4\pi r^2 \rho dr.$$

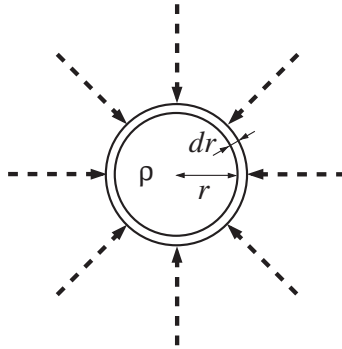


図 1.25 原始太陽に無限遠から物質が落下して重力エネルギーを得る重力収縮。

- (1) 重力収縮が終了後の太陽の半径と質量を R と M とするとき、 dE_G を r で 0 から R まで積分して E_G を与える次式を導きなさい。

$$E_G = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}.$$

- (2) 万有引力定数を $6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ 、太陽半径を $6.96 \times 10^5 \text{ km}$ 、太陽の密度を 1410 kg/m^3 として重力エネルギーを計算し、太陽定数を 1360 W/m^2 、地球軌道半径を $1.50 \times 10^8 \text{ km}$ として太陽の年齢を求めなさい。

問題 1.4.2

ウィーンの変位則とシュテファン-ボルツマンの法則を用いて、太陽の表面温度や放射エネルギーに関する以下の問いに答えなさい。

- (1) 太陽スペクトルのピークは波長 $\lambda_m = 0.5 \text{ } \mu\text{m}$ にあります。太陽の表面温度 T は何 K か？
 (2) 天文学では天体の全表面から毎秒放射されるエネルギーをその天体の光度といい、単位は

ワット (W) です⁶。では、太陽光度 L を太陽定数 S と地球の軌道半径 a を用いて表しなさい。また、 S を 1360 W/m^2 、 a を $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ として L を求めなさい。

(3) 太陽光度 L と表面温度 T から太陽の半径 R を求める式を導き、値を計算しなさい。

問題 1.4.3

前問では、太陽スペクトルのピークの波長や太陽定数の観測値から、太陽の表面温度や半径を求めました。この問題では逆に、太陽の表面温度や半径が知れているとして、太陽定数や地球の表面温度について考察します。

(1) 太陽表面温度を T 、太陽半径を R 、地球軌道半径を a とし、シュテファン–ボルツマンの法則を用いて太陽定数 S を表す式を導きなさい。

(2) 太陽表面温度を 5800 K 、太陽半径を $6.96 \times 10^5 \text{ km}$ 、地球軌道半径を $1.50 \times 10^8 \text{ km}$ として S を計算しなさい。

(3) 地球の表面全体で平均して受ける毎秒 1 m^2 当たりの太陽放射エネルギー I は、式 (1.32)、

$$I = \frac{1}{4} S (1 - \alpha)$$

で表せることを説明しなさい。また、その値を前問で得た S を用いて計算しなさい。但し、地球のアルベド α は 0.3 とします。

(4) 大気の温室効果を考慮しない場合、地球の表面温度は何 $^{\circ}\text{C}$ か？

(5) 実際の表面温度が 15°C の場合、地球表面の 1 m^2 当たり毎秒放射されるエネルギーは何 W/m^2 か？ この場合の地球のエネルギー収支を、次の 3 つの条件に基づいて計算し、図 1.26 に記入しなさい：(i) 太陽放射エネルギーは全て地表に吸収される、(ii) 地球放射エネルギーの一定部分は温室効果ガスに吸収される、(iii) 温室効果ガスは地表と宇宙へ等しいエネルギーを放射する。

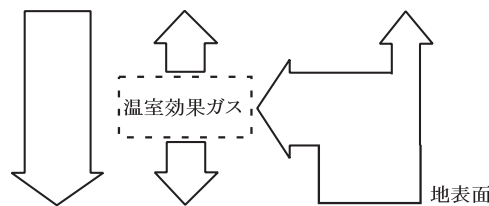


図 1.26 単純化した温室効果による地球表面のエネルギー収支（解答記入用）。

問題 1.4.4

金星は厚い雲のためにアルベド α が 0.78 と大きく、月につぐ明るい天体です。また、地表で 90 気圧にも達する二酸化炭素 97% の大気による温室効果で、地表の温度は太陽に近い水星よりも高い状態です。この問題では、金星における太陽放射のエネルギー収支について考えます。

⁶ 星の光度は一般的に光源の明るさを表す光度とは異なります。後者は 1 立体角（ステラジアン，sr）当たりの光のエネルギーを、黄緑色を最も明るく感じる人間の感覚に合うよう換算した量で単位はカンデラ (cd) です。

- (1) 金星軌道上で 1 m^2 に毎秒受ける太陽放射エネルギー（金星での太陽定数） S を計算しなさい。但し、太陽表面温度を 5800 K 、太陽半径を $6.96 \times 10^5 \text{ km}$ 、金星軌道半径を $1.08 \times 10^8 \text{ km}$ とします。
- (2) 仮に金星には雲がなく、アルベドが月や水星と同レベルの 0.05 で、温室効果もないとするとき、金星表面の温度 T は何 $^{\circ}\text{C}$ か？
- (3) 実際には、金星のアルベドは 0.78 です。温室効果がない場合の金星表面の温度は何 $^{\circ}\text{C}$ か？
- (4) 実際の金星表面の温度は 460°C です。いま、金星表面におけるエネルギーのつり合いが、温室効果によるエネルギーの増幅率 f を導入して次式で表されるとします。

$$\frac{1}{4}fS(1 - \alpha) = \sigma T^4.$$

温室効果による増幅率 f を計算しなさい。

問題 1.4.5

ミランコビッチサイクルのうち公転軌道の離心率 e の影響を考えます。太陽を焦点とする長半径 a の楕円軌道を式 (1.1),

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}$$

で表します。地球表面の 1 m^2 当たりの入射エネルギー I は変動の割合だけを考えると、式 (1.32) の $1/4$ とアルベドを省略します。また、入射エネルギーは r^2 に反比例するので、地球と太陽の距離が r のときの I は、

$$I = S \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$$

と表せます。但し、 S と r_0 は太陽定数と 1 au の距離です。地球が受ける太陽放射の年平均値 $\bar{I}$ は I を時間 t で 0 から周期 T まで積分し、次の式で得られます。

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T I dt = \frac{Sr_0^2}{T} \int_0^T \frac{1}{r^2} dt. \quad (1.33)$$

一方、ケプラーの法則より次式の地球の描く面積速度は一定です（1.3 節、及び付録 A.4 を参照）。

$$\frac{1}{2}r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const.}$$

これを楕円の面積 πab を周期 T で除した式と等置すると、次の関係式が得られます。

$$dt = \frac{T}{2\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}} r^2 d\theta. \quad (1.34)$$

- (1) 式 (1.34) を示し、式 (1.33) の積分を θ に変数変換して次の $\bar{I}$ を与える式を導きなさい。

$$\bar{I} = S \left(\frac{r_0}{a} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}.$$

- (2) 離心率 e は 0 と 0.06 の間で変動します（現在 0.0167 ）。長半径 a は一定とし、 e が 0 と 0.06 の場合では太陽放射の年平均値は何 % 異なるか？

問題 1.4 解説

問題 1.4.1 解説

- (1) 重力エネルギー E_G の積分は問題 1.3.2(1) で導いた式を使用して,

$$\begin{aligned} E_G &= \int \frac{GM_r}{r} dm = \int_0^R G \frac{4\pi r^3 \rho}{3} \frac{1}{r} 4\pi r^2 \rho dr = \int_0^R \frac{16\pi^2 G \rho^2}{3} r^4 dr \\ &= \frac{16\pi^2 G \rho^2}{15} R^5 = \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho \right)^2 \frac{9}{15} \frac{G}{R} = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}. \end{aligned}$$

- (2) 太陽質量と重力エネルギーは次のようになります.

$$\begin{aligned} M &= \frac{4\pi}{3} (6.96 \times 10^8)^3 \times 1410 = 1.991 \times 10^{30} \text{ kg}, \\ E_G &= \frac{3}{5} \times 6.67 \times 10^{-11} \times (1.991 \times 10^{30})^2 \div 6.96 \times 10^8 = 2.279 \times 10^{41} \text{ J}. \end{aligned}$$

一方, 太陽の全表面から毎秒放射されるエネルギー (太陽光度) L は太陽定数に地球軌道を半径とする球の面積を掛けて,

$$L = 1360 \times 4\pi \times (1.50 \times 10^{11})^2 = 3.845 \times 10^{26} \text{ W (J/s)}$$

ですので, 太陽の年齢は

$$E_G/L = 2.279 \times 10^{41} \div 3.845 \times 10^{26} = 5.927 \times 10^{14} \text{ s} = 1.879 \times 10^7 \text{ yr}.$$

太陽の年齢はヘルムホルツによる値とほぼ同じ, 約 19 Myr (1900 万年) となりました⁷.

問題 1.4.2 解説

- (1) 式 (1.30) のウィーンの変位則より

$$T = \frac{2900}{0.5} = 5800 \text{ K}.$$

- (2) 太陽定数を地球軌道半径の球の全表面について合計し,

$$L = 4\pi a^2 S.$$

値を計算すると,

$$L = 4 \times \pi \times (1.5 \times 10^{11})^2 \times 1360 = 3.845 \times 10^{26} \text{ W}$$

となり, 約 $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ です.

- (3) L は式 (1.31) を太陽の表面積について合計すると, $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ ですので,

$$R = \frac{1}{T^2} \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma}}.$$

⁷ 太陽の密度として, 平均密度 1.41 g/cc ではなく中心部ほど密度が大きくなるモデルでは, 重力エネルギーは約 3 倍となり, ケルビンによる数千万年の年齢となります.

値を計算すると、

$$R = \frac{1}{5800^2} \sqrt{\frac{3.845 \times 10^{26}}{4 \times \pi \times 5.67 \times 10^{-8}}} = 6.91 \times 10^8 \text{ m}$$

となり、約 69 万 km です（公式には 69 万 6000 km）。なお、 R の式は問 (2) の L を代入して次式で表すこともできます。

$$R = \frac{a}{T^2} \sqrt{\frac{S}{\sigma}}.$$

問題 1.4.3 解説

- (1) 太陽の放射する全エネルギーを地球軌道半径の球の表面積で割り、

$$S = \frac{(\sigma T^4) \times (4\pi R^2)}{4\pi a^2} = \sigma T^4 \left(\frac{R}{a} \right)^2.$$

- (2) 値を計算します。

$$S = 5.67 \times 10^{-8} \times 5800^4 \times \left(\frac{6.96 \times 10^5}{1.50 \times 10^8} \right)^2 = 1381.4 \text{ W/m}^2.$$

有効数字 3 桁と考え、1380 W/m²（観測値は 1361 W/m²）。

- (3) 地球の半径を R_E とし、地球の断面積 πR_E^2 で受けた入射エネルギーを地球の表面積 $4\pi R_E^2$ で平均すると、4 分の 1 に減少します。

$$\frac{\pi R_E^2 S}{4\pi R_E^2} = \frac{1}{4} S.$$

さらに地球のアルベド α で宇宙空間に戻される分を差し引き、式 (1.32) となります。

$$\frac{1}{4} S(1 - \alpha).$$

問 (2) の値を用いて計算すると、

$$1380 \times 0.7 \div 4 = 241.5 \approx 242 \text{ W/m}^2.$$

- (4) $\sigma T^4 = 242$ を T について解いて、

$$T = \sqrt[4]{\frac{242}{5.67 \times 10^{-8}}} = 255.6 \text{ K}.$$

摂氏では -17.4 。よって、約 -17°C です。

- (5) $E = \sigma T^4$ に $T = 15^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$ を代入して、

$$E = 390.08 \text{ W/m}^2.$$

エネルギー収支は、入射エネルギー 242 W/m² と放射エネルギー 390 W/m² を固定し、地表面や大気上面でエネルギー収支が差し引きゼロとなるように定め、図 1.27 のようになります。なお、温室効果ガスによるエネルギー放射は宇宙空間より地表面に多く入力されるので、実際のエネルギー収支はこの図とは異なります（図 1.23(b) が公式の収支に近い）。

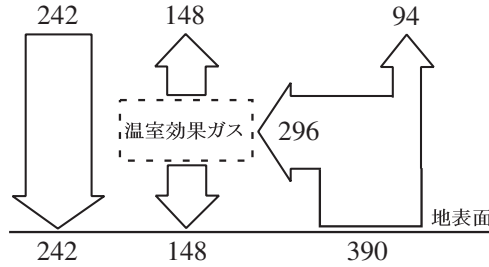


図 1.27 単純化した温室効果による地球表面のエネルギー収支の計算結果。

問題 1.4.4 解説

- (1) 地球での値の約 2 倍となります。

$$S = 5.67 \times 10^{-8} \times 5800^4 \times \left(\frac{6.96 \times 10^5}{1.08 \times 10^8} \right)^2 = 2664.8 \approx 2665 \text{ W/m}^2.$$

- (2) 単位面積当たりの平均のエネルギー E は、

$$E = 2665 \times (1 - 0.05) \div 4 = 632.9 \text{ W/m}^2$$

となり、地表面の温度 T は、

$$T = \sqrt[4]{\frac{632.9}{5.67 \times 10^{-8}}} = 325.0 \text{ K}.$$

よって、 $325 - 273 = 52 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

このように、太陽に近い金星では地表面が地球の場合より高温になります。このため、惑星形成後の間もない頃、金星では水蒸気が宇宙空間へ散逸し、二酸化炭素の大気が残ったと考えられています。それに対して、地球では海が形成され、二酸化炭素は海に吸収され、さらに石灰岩として固定されました。

- (3) 同様に計算して、

$$E = 2665 \times (1 - 0.78) \div 4 = 146.6 \text{ W/m}^2, \quad T = \sqrt[4]{\frac{146.6}{5.67 \times 10^{-8}}} = 225.4 \text{ K}.$$

よって、 $225 - 273 = -48 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

- (4) 問題の式を変形して、

$$f = \frac{\sigma T^4}{S(1 - \alpha)/4}.$$

これに $T = 460 \text{ }^\circ\text{C} = 733 \text{ K}$ と問 (3) で求めた $S(1 - \alpha)/4 = 146.6 \text{ W/m}^2$ を代入して、

$$f = \frac{5.67 \times 10^{-8} \times 733^4}{146.6} = 111.65.$$

増幅率はおおよそ 112 倍となります。

以上のように、金星は高いアルベドのために太陽放射はその 22% である約 147 W/m^2 しか入射しません。これは金星よりも太陽から遠い地球での太陽放射 ($\sim 238 \text{ W/m}^2$) より小さいエネルギー量です。しかし、厚い CO_2 の大気の強力な温室効果のために、その 100 倍以上のおおよそ 16000 W/m^2 の赤外線放射が金星表面に入力していることになります。

問題 1.4.5 解説

- (1) 一定値の面積速度を表す式を、楕円の面積を周期で割った値に等しいとします。

$$\frac{1}{2}r^2\frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi ab}{T}.$$

これを式 (1.3) の $b = a\sqrt{1-e^2}$ の関係を利用し変形すると、式 (1.34) となります。

$$dt = \frac{T}{2\pi a^2\sqrt{1-e^2}}r^2d\theta.$$

この関係より、式 (1.33) を θ で積分します。

$$\begin{aligned}\bar{I} &= \frac{Sr_0^2}{T} \int_0^T \frac{1}{r^2} dt = \frac{Sr_0^2}{T} \int_0^{2\pi} \frac{T}{2\pi a^2\sqrt{1-e^2}} \frac{1}{r^2} r^2 d\theta \\ &= \frac{S}{2\pi\sqrt{1-e^2}} \left(\frac{r_0}{a}\right)^2 \int_0^{2\pi} d\theta = S \left(\frac{r_0}{a}\right)^2 \frac{1}{\sqrt{1-e^2}}.\end{aligned}$$

- (2) $1/\sqrt{1-e^2}$ は $e=0$ では 1, $e=0.06$ では 1.0018 となります。よって、最も扁平な楕円軌道の場合でも、地球に入射する年平均太陽放射は約 0.2% 増加するだけです。

第2章

放射性元素と数値年代

放射性元素が放射線を放出して別の元素が生成される現象を放射壊変といいます。この章では時間とともに放射性元素（親元素）が減少し、生成された元素（子元素）が増加する過程が指数関数で表せることを学びます。さらに、放射壊変を利用して年代を測定する数値年代測定の原理と、代表的な年代測定法について学びます。なお、放射壊変では熱エネルギーが発生するため、固体地球の熱的現象として重要ですが、これについては第5章で学びます。

■ ■ ■ p.52-316 : 省略 $\Rightarrow$ 次へ ■ ■ ■

付録 D

第7章の補足

球面上のプレートテクトニクスの幾何学を理解するために必要な回転行列や座標変換について補足します：

D.1 線形変換に基づく回転行列の導出，及びロドリゲスの回転公式

D.2 回転行列に対応するオイラー極と回転角

D.3 地心直交座標 (x - y - z) と局地座標 (n - e - d) の変換行列

D.1 線形変換に基づく回転行列の導出

2 次元の回転行列

2 次元の回転行列については付録 A.2 で幾何学に基づいて導きましたが、ここでは線形変換に基づく導出を解説します。

線形代数ではベクトルの回転は線形変換であり、行列で表します。図 D.1(a) よりベクトル $\mathbf{r} = (x, y)$ は基底ベクトル $\mathbf{e}_1 = (1, 0)$ と $\mathbf{e}_2 = (0, 1)$ を用いて、

$$\mathbf{r} = x\mathbf{e}_1 + y\mathbf{e}_2 \quad (\text{D.1})$$

と表せます。A を回転の線形変換とすると、角度 θ 回転後のベクトル $\mathbf{r}' = (x', y')$ は、

$$\mathbf{r}' = A\mathbf{r} = A(x\mathbf{e}_1 + y\mathbf{e}_2) = xA\mathbf{e}_1 + yA\mathbf{e}_2 \quad (\text{D.2})$$

となります。また、回転後の基底ベクトル $A\mathbf{e}_1$ と $A\mathbf{e}_2$ はそれぞれ図 D.1(b) より $(\cos \theta, \sin \theta)$ と $(-\sin \theta, \cos \theta)$ ですので、

$$A\mathbf{e}_1 = \cos \theta \mathbf{e}_1 + \sin \theta \mathbf{e}_2, \quad A\mathbf{e}_2 = -\sin \theta \mathbf{e}_1 + \cos \theta \mathbf{e}_2 \quad (\text{D.3})$$

のように $\mathbf{e}_1$ と $\mathbf{e}_2$ を用いて表されます。式 (D.3) を式 (D.2) に代入して、

$$\mathbf{r}' = [(\cos \theta)x - (\sin \theta)y]\mathbf{e}_1 + [(\sin \theta)x + (\cos \theta)y]\mathbf{e}_2$$

となります。 $\mathbf{r}' = x'\mathbf{e}_1 + y'\mathbf{e}_2$ ですので、

$$x' = (\cos \theta)x - (\sin \theta)y, \quad y' = (\sin \theta)x + (\cos \theta)y$$

の関係を得ます。これをベクトルの縦表記で表すと、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

ですので、回転行列は次のようになります。

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (\text{D.4})$$

この行列は回転後の基底ベクトル $A\mathbf{e}_1$ と $A\mathbf{e}_2$ を縦表記にして横に並べた形になっています。一

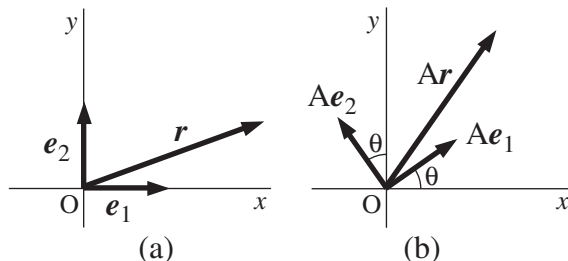


図 D.1 2次元におけるベクトル $\mathbf{r}$ と基底ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ の回転。

般に、回転後の基底ベクトルを f_1 と f_2 で表すと回転行列は次のように表せます。

$$A = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{1x} & f_{2x} \\ f_{1y} & f_{2y} \end{pmatrix}.$$

3次元の回転行列

3次元の場合も同様に、回転後の基底ベクトル Ae_1, Ae_2, Ae_3 をそれぞれ f_1, f_2, f_3 とおくと、回転後のベクトル r' は、

$$r' = Ar = A(xe_1 + ye_2 + ze_3) = xf_1 + yf_2 + zf_3$$

です。で、 r' や r を縦表記として、ベクトル r の回転は次式で表せます。

$$r' = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \end{pmatrix} r. \quad (D.5)$$

これを成分で表示すると次のようになります。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{1x} & f_{2x} & f_{3x} \\ f_{1y} & f_{2y} & f_{3y} \\ f_{1z} & f_{2z} & f_{3z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (D.6)$$

3次元直交座標系でベクトルを1つの座標軸の回りに回転する場合、回転後の基底ベクトルを図 D.2 から求めて回転行列を導きます。例えば、図 D.2(a) の z 軸の回りの回転では、

$$f_1 = (\cos \theta, \sin \theta, 0), \quad f_2 = (-\sin \theta, \cos \theta, 0), \quad f_3 = (0, 0, 1)$$

です。で、回転行列 A_z は式 (D.6) より、

$$A_z = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

となります。同様に、 x 軸と y 軸の回りの回転行列は次のようになります。

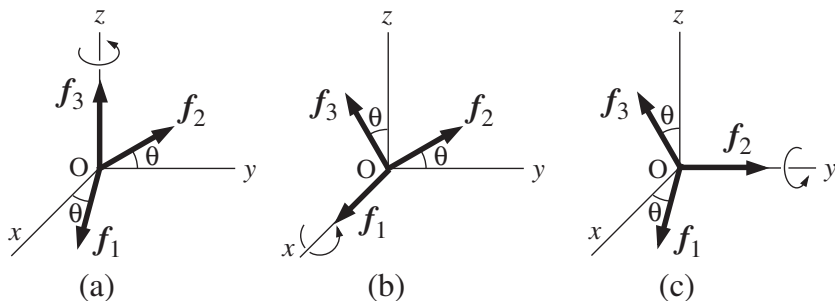


図 D.2 3次元基底ベクトルの1つの座標軸の回りの回転。(a)は z 軸、(b)は x 軸、(c)は y 軸の回りに θ 回転した様子を示す。

$$A_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad A_y = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

ロドリゲスの回転公式と回転行列

任意の軸の回りの回転を表す一般的なオイラー回転については、シュミットネットを用いた幾何学的方法を 6.5 節の問題 6.5.2 で扱いました。また、その回転を表す回転行列を 7.3 節の式 (7.4) に示しました。この式は幾何学的方法の 5 段階の手順のそれぞれに対応した 5 つの 3 次元回転行列を掛け合わせることで導くことができます。しかし、式の変形は大変複雑ですので、ここではロドリゲスの回転公式とよばれるベクトル表現の回転公式を利用して導出します。

ベクトル表現の回転公式の導出

図 D.3(a) は OP で表されるベクトル r が単位ベクトル u の方向の OQ の回りに角 θ 回転する様子で、回転後のベクトル r' は OP' です。図 D.3(b) は u を真上から見た様子で、 QP と QP' をベクトル d と d' とします。ベクトル積 $u \times d$ は u と d に垂直で QPP' のなす平面内にあります。図の (a) から、

$$r' = \overrightarrow{OQ} + \overrightarrow{QP'}. \quad (D.7)$$

OQ は r の u への射影ですので、

$$\overrightarrow{OQ} = (r \cdot u)u. \quad (D.8)$$

図 (b) のベクトル d は、図 (a) の QP を OP と OQ で表して、

$$\begin{aligned} d &= \overrightarrow{QP} = \overrightarrow{OP} - \overrightarrow{OQ} \\ &= r - (r \cdot u)u. \end{aligned} \quad (D.9)$$

図 (b) で、 $|d| = |d'| = |u \times d|$ であり、 d と $u \times d$ は垂直ですので、

$$\overrightarrow{QP'} = d' = \cos \theta d + \sin \theta (u \times d).$$

これに式 (D.9) を代入し、 $u \times u = 0$ に注意して変形すると、

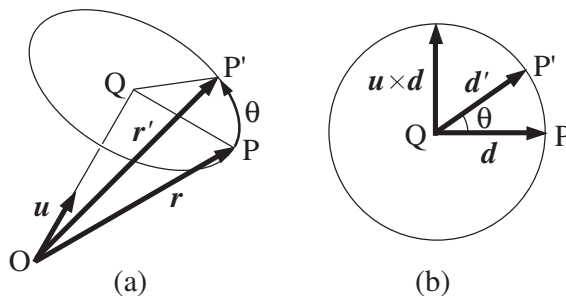


図 D.3 ロドリゲスの回転公式の導出。(a) ベクトル r が単位ベクトル u の回りに角 θ 回転する見取り図。(b) u を真上から見た平面図。

$$\overrightarrow{QP'} = \cos \theta \mathbf{r} - \cos \theta (\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}) \mathbf{u} + \sin \theta (\mathbf{u} \times \mathbf{r}) \quad (\text{D.10})$$

となります．式 (D.8), (D.10) を式 (D.7) に代入し，次のロドリゲスの回転公式を得ます．

$$\mathbf{r}' = (1 - \cos \theta)(\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}) \mathbf{u} + \cos \theta \mathbf{r} + \sin \theta (\mathbf{u} \times \mathbf{r}). \quad (\text{D.11})$$

回転行列の導出

まず，直交座標系 x - y - z における基底ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ を式 (D.11) に従って回転させ，回転後の基底ベクトル $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \mathbf{f}_3$ とします．そして，次式に従って回転行列を決定します．

$$A = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_1 & \mathbf{f}_2 & \mathbf{f}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{1x} & f_{2x} & f_{3x} \\ f_{1y} & f_{2y} & f_{3y} \\ f_{1z} & f_{2z} & f_{3z} \end{pmatrix}. \quad (\text{D.12})$$

式 (D.11) の $\mathbf{r}$ に $\mathbf{e}_1 = (1, 0, 0)$ を代入し，次のベクトルの内積と外積の公式，

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x b_x \\ a_y b_y \\ a_z b_z \end{pmatrix}, \\ \mathbf{a} \times \mathbf{b} &= \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_y b_z - a_z b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b_x \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

を利用して計算すると $\mathbf{r}'$ として $\mathbf{f}_1$ は次のようになります．

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} f_{1x} \\ f_{1y} \\ f_{1z} \end{pmatrix} &= (1 - \cos \theta) u_x \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} + \cos \theta \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \sin \theta \begin{pmatrix} 0 \\ u_z \\ -u_y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} u_x u_x (1 - \cos \theta) + \cos \theta \\ u_y u_x (1 - \cos \theta) + u_z \sin \theta \\ u_z u_x (1 - \cos \theta) - u_y \sin \theta \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

同様に， $\mathbf{e}_2$ と $\mathbf{e}_3$ から $\mathbf{f}_2$ と $\mathbf{f}_3$ を求め，式 (D.12) から回転行列は次のようになります．

$$\begin{pmatrix} u_x u_x (1 - \cos \theta) + \cos \theta & u_x u_y (1 - \cos \theta) - u_z \sin \theta & u_x u_z (1 - \cos \theta) + u_y \sin \theta \\ u_y u_x (1 - \cos \theta) + u_z \sin \theta & u_y u_y (1 - \cos \theta) + \cos \theta & u_y u_z (1 - \cos \theta) - u_x \sin \theta \\ u_z u_x (1 - \cos \theta) - u_y \sin \theta & u_z u_y (1 - \cos \theta) + u_x \sin \theta & u_z u_z (1 - \cos \theta) + \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (\text{D.13})$$

D.2 回転行列に対応するオイラー極と回転角

回転行列が数値などで与えられたとき，対応するオイラー極と回転角を求める式を導きます．

これは、例えば複数回の段階回転を 1 回の全回転で表したいときに使用できます。

地球中心を原点とする直交座標は、 x と y を赤道上でそれぞれ経度が 0° と 90°E 、 z を北極の方向へ取ります。求めるオイラー極の緯度と経度を (λ, ϕ) 、その方向の単位ベクトルを $\mathbf{u}$ 、回転角を θ とします。オイラー極の緯度経度は単位ベクトルの成分で次式で表されます。

$$\sin \lambda = \frac{u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} = u_z, \quad (-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ) \quad (\text{D.14})$$

$$\tan \phi = \frac{u_y}{u_x}. \quad (-180^\circ \leq \phi \leq 180^\circ) \quad (\text{D.15})$$

式 (D.15) で経度 ϕ を求めるときは逆正接関数の角度の任意性に注意する必要があり、同様の理由からここでは回転角 θ を次の範囲に限定します。

$$0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ. \quad (\text{D.16})$$

いま、任意の回転行列 A を

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

とするとき、これを対応する $\mathbf{u}$ と θ で表すと次の通りです (式 (D.13)).

$$\begin{pmatrix} u_x u_x (1 - \cos \theta) + \cos \theta & u_x u_y (1 - \cos \theta) - u_z \sin \theta & u_x u_z (1 - \cos \theta) + u_y \sin \theta \\ u_y u_x (1 - \cos \theta) + u_z \sin \theta & u_y u_y (1 - \cos \theta) + \cos \theta & u_y u_z (1 - \cos \theta) - u_x \sin \theta \\ u_z u_x (1 - \cos \theta) - u_y \sin \theta & u_z u_y (1 - \cos \theta) + u_x \sin \theta & u_z u_z (1 - \cos \theta) + \cos \theta \end{pmatrix}.$$

これらの 2 つの行列から各成分の対称性を考慮して次式が得られます。

$$a_{32} - a_{23} = 2u_x \sin \theta, \quad (\text{D.17})$$

$$a_{13} - a_{31} = 2u_y \sin \theta, \quad (\text{D.18})$$

$$a_{21} - a_{12} = 2u_z \sin \theta. \quad (\text{D.19})$$

式 (D.15), (D.17), (D.18) から経度 ϕ は次式で求まります。

$$\tan \phi = \frac{a_{13} - a_{31}}{a_{32} - a_{23}}. \quad (\text{D.20})$$

前述の角度の任意性については、 $\sin \theta \geq 0$ ですので式 (D.17) と (D.18) の正負で判断し、 $-180^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ とします。また、 $u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1$ を考慮して式 (D.17)–(D.19) から、

$$\sqrt{(a_{32} - a_{23})^2 + (a_{13} - a_{31})^2 + (a_{21} - a_{12})^2} = 2 \sin \theta \quad (\text{D.21})$$

ですが、この式と (D.19), (D.14) から緯度 λ を求める次式を得ます。

$$\sin \lambda = \frac{a_{21} - a_{12}}{\sqrt{(a_{32} - a_{23})^2 + (a_{13} - a_{31})^2 + (a_{21} - a_{12})^2}}. \quad (\text{D.22})$$

回転角 θ の決定は、式 (D.21) ではなく対角成分の和から導かれる次式、

$$a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1 = 2 \cos \theta \quad (\text{D.23})$$

を使用して $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ として求めます。但し、行列の各成分 a_{ij} は誤差を含むことが多いので、多くの情報を利用するために、式 (D.21) と (D.23) を組み合わせ、 θ は次式から求める方がよいかもしれません。

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{(a_{32} - a_{23})^2 + (a_{13} - a_{31})^2 + (a_{21} - a_{12})^2}}{a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1}. \quad (\text{D.24})$$

この場合は、 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ となるように注意が必要です。

D.3 地心直交座標 (x - y - z) と局地座標 (n - e - d) の変換行列

1つのベクトルを異なる2つの直交座標で表すときの座標の変換行列を導きます。原点 O を地球中心とし赤道上で 0°E と 90°E の方向を x と y 、自転軸の北極方向を z とした座標系（地心直交座標系）を x - y - z 座標とします。また、（緯度、経度）が (λ, ϕ) の地点を原点とし北、東、鉛直下を n, e, d 軸とする局地座標系を n - e - d 座標とします。

図 D.4 のように、 x - y - z 座標系の基底ベクトルを i, j, k 、 n - e - d 座標系の基底ベクトルを n, e, d で表します。任意のベクトル v は次のように2通りに表すことができます。

$$v = v_x i + v_y j + v_z k = v_n n + v_e e + v_d d.$$

これより v_x, v_y, v_z は、

$$v_x = v \cdot i = v_n n \cdot i + v_e e \cdot i + v_d d \cdot i,$$

$$v_y = v \cdot j = v_n n \cdot j + v_e e \cdot j + v_d d \cdot j,$$

$$v_z = v \cdot k = v_n n \cdot k + v_e e \cdot k + v_d d \cdot k$$

となるので、次の座標の変換行列を導入します。

$$A = \begin{pmatrix} n \cdot i & e \cdot i & d \cdot i \\ n \cdot j & e \cdot j & d \cdot j \\ n \cdot k & e \cdot k & d \cdot k \end{pmatrix}. \quad (\text{D.25})$$

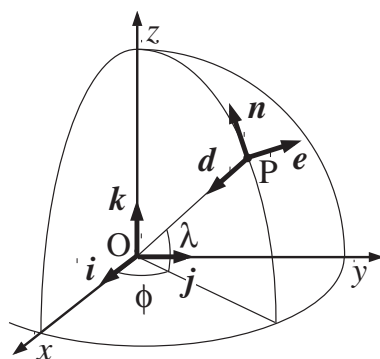


図 D.4 地心直交座標系 x - y - z と局地座標系 n - e - d .

そこで同じベクトルを局地座標で表したものを v_L とすると、局地座標から地心直交座標への変換は次式となります。

$$\mathbf{v} = A\mathbf{v}_L. \quad (\text{D.26})$$

同様に、 v_n, v_e, v_d は、

$$v_n = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = v_x \mathbf{i} \cdot \mathbf{n} + v_y \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} + v_z \mathbf{k} \cdot \mathbf{n},$$

$$v_e = \mathbf{v} \cdot \mathbf{e} = v_x \mathbf{i} \cdot \mathbf{e} + v_y \mathbf{j} \cdot \mathbf{e} + v_z \mathbf{k} \cdot \mathbf{e},$$

$$v_d = \mathbf{v} \cdot \mathbf{d} = v_x \mathbf{i} \cdot \mathbf{d} + v_y \mathbf{j} \cdot \mathbf{d} + v_z \mathbf{k} \cdot \mathbf{d}$$

となり、変換行列は A の転置行列です。

$${}^t A = \begin{pmatrix} \mathbf{n} \cdot \mathbf{i} & \mathbf{n} \cdot \mathbf{j} & \mathbf{n} \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{e} \cdot \mathbf{i} & \mathbf{e} \cdot \mathbf{j} & \mathbf{e} \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{d} \cdot \mathbf{i} & \mathbf{d} \cdot \mathbf{j} & \mathbf{d} \cdot \mathbf{k} \end{pmatrix}. \quad (\text{D.27})$$

よって、 $\mathbf{v}$ の地心直交座標から局地座標への変換は次式となります。

$$\mathbf{v}_L = {}^t A \mathbf{v}. \quad (\text{D.28})$$

ここで、

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix}$$

を式 (D.25) と (D.27) へ代入すると、各変換行列は次のようになります。

$$A = \begin{pmatrix} n_x & e_x & d_x \\ n_y & e_y & d_y \\ n_z & e_z & d_z \end{pmatrix}, \quad (\text{D.29})$$

$${}^t A = \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z \\ e_x & e_y & e_z \\ d_x & d_y & d_z \end{pmatrix}. \quad (\text{D.30})$$

次に、これらの行列の各成分を n - e - d 座標の原点の緯度経度 (λ, ϕ) で表しますが、基底ベクトル $\mathbf{n}, \mathbf{e}, \mathbf{d}$ の各成分は幾何学を用いて容易に決定できます。例えば、ベクトル $\mathbf{n}$ は図 D.4 のように経度 ϕ の子午面上にあり、 z 軸への射影の大きさは $\cos \lambda$ ですので、 $n_z = \cos \lambda$ となります。また、 $\mathbf{n}$ の x - y 面への射影の大きさは $\sin \lambda$ で、さらに x 軸と y 軸へ射影し、正負も考慮して、 $n_x = -\sin \lambda \cos \phi$, $n_y = -\sin \lambda \sin \phi$ となります。 $\mathbf{e}$ と $\mathbf{d}$ も同様にして、結局 $\mathbf{n}, \mathbf{e}, \mathbf{d}$ の各成分は次式となります。

$$\begin{aligned} n_x &= -\sin \lambda \cos \phi, & n_y &= -\sin \lambda \sin \phi, & n_z &= \cos \lambda, \\ e_x &= -\sin \phi, & e_y &= \cos \phi, & e_z &= 0, \\ d_x &= -\cos \lambda \cos \phi, & d_y &= -\cos \lambda \sin \phi, & d_z &= -\sin \lambda. \end{aligned}$$

これらを式 (D.29) に代入し、式 (D.26) より v_L の局地座標から地心直交座標への変換は、

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \lambda \cos \phi & -\sin \phi & -\cos \lambda \cos \phi \\ -\sin \lambda \sin \phi & \cos \phi & -\cos \lambda \sin \phi \\ \cos \lambda & 0 & -\sin \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_n \\ v_e \\ v_d \end{pmatrix} \quad (\text{D.31})$$

となります。同様に、式 (D.30) と (D.28) より v の地心直交座標から局地座標への変換は次式となります。

$$\begin{pmatrix} v_n \\ v_e \\ v_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \lambda \cos \phi & -\sin \lambda \sin \phi & \cos \lambda \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ -\cos \lambda \cos \phi & -\cos \lambda \sin \phi & -\sin \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}. \quad (\text{D.32})$$

なお、ベクトル n , e , d の各成分は以下のようにしても求めることができます。図 D.4 から基底ベクトル n - e - d は i - j - k を、(1) y 軸の回りに $-(90^\circ + \lambda)$ 回転 ($+y$ から見て時計回り) してから、(2) z 軸の回りに ϕ 回転 ($+z$ から見て反時計回り) すると得られます (原点の平行移動は考慮しません)。回転行列 T は 7.3 節の式 (7.2) の A_y と A_z を利用すると次のようになります。

$$\begin{aligned} T &= \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-(90^\circ + \lambda)) & 0 & \sin(-(90^\circ + \lambda)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-(90^\circ + \lambda)) & 0 & \cos(-(90^\circ + \lambda)) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -\sin \lambda \cos \phi & -\sin \phi & -\cos \lambda \cos \phi \\ -\sin \lambda \sin \phi & \cos \phi & -\cos \lambda \sin \phi \\ \cos \lambda & 0 & -\sin \lambda \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

付録 D.1 の式 (D.5) や (D.12) によると、この回転行列 T の第 1 列、第 2 列、第 3 列はそれぞれ基底ベクトル n , e , d となります。結局、この回転行列 T は式 (D.29) の A を表します。

付録 E

用紙類と地図投影法補足

各種グラフ用紙をまとめ、球面上の投影法について補足します：

E.1–E.3, E.5 問題解答用各種グラフ用紙

E.4 球面上の図形の投影，及びシュミットネットの用紙類

E.6 国際標準地球磁場 2020 年 (IRGF 2020)

E.7 古地図の用紙 (インド大陸の古緯度)

E.8 オイラー極中心の世界地図 (ヨーロッパと北米の APWP)

■ ■ ■ p.328-340：省略 $\implies$ 次へ ■ ■ ■

参考文献

- [Abe-Ouchi *et al.* 2013] Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M.E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi, and H. Blatter, Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature*, **500**, 190–194, 2013. doi: 10.1038/nature12374
- [赤祖父 2008] 赤祖父俊一, 『正しく知る地球温暖化』, 183pp., 誠文堂新光社, 東京, 2008. ISBN9784416208182
- [Alken *et al.* 2021] Alken, P., E. Thébault, C.D. Beggan, H. Amit, J. Aubert, J. Baerenzung, T.N. Bondar, and other 58 authors, International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation, *Earth Planets Space*, **73**:49, 1–25, 2021. doi: 10.1186/s40623-020-01288-x
- [Amante & Eakins 2009] Amante, C. and B.W. Eakins, *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis*, 19pp., NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, Boulder, 2009. doi: 10.7289/V5C8276M
(<https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>)
- [Anderson *et al.* 2011] Anderson, B.J., C.L. Johnson, H. Korth, M.E. Purucker, R.M. Winslow, J.A. Slavin, S.C. Solomon, and other three authors, The global magnetic field of Mercury from MESSENGER orbital observations, *Science*, **333**, 1859–1862, 2011. doi: 10.1126/science.1211001
- [安藤ほか 1996] 安藤雅孝・角田史雄・早川由紀夫・平原和朗・藤田至則 (著), 地学団体研究会 (編), 『地震と火山 (新版地学教育講座 2 巻)』, 191pp., 東海大学出版会, 東京, 1996. ISBN4486013026
- [Argus & Gordon 1991] Argus, D.F., and R.G. Gordon, No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 2039–2042, 1991. doi: 10.1029/91GL01532
- [Bird 2003] Bird, P., An updated digital model of plate boundaries, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, 1027, 2003. doi: 10.1029/2001GC000252
(http://peterbird.name/publications/2003_pb2002/2003_pb2002.htm)
- [Bond *et al.* 2017] Bond, H.E., G.H. Schaefer, R.L. Gilliland, J.B. Holberg, B.D. Mason, I.W. Lindénblad, M. Seitz-McLeese, and other seven authors, The Sirius System and Its Astrophysical Puzzles: Hubble Space Telescope and Ground-based Astrometry, *Astrophys. J.*, **840**:70 (17pp), 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa6af8
- [Bukowinski 1999] Bukowinski, M., Taking the core temperature, *Nature*, **401**, 432–433, 1999. doi: 10.1038/46696
- [Bullard *et al.* 1965] Bullard, E., J.E. Everett, and A.G. Smith, The fit of the continents around the Atlantic, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, **A258**, 41–51, 1965. doi: 10.1098/rsta.1965.0020
- [Butler 1992] Butler, R.F., *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*, 319pp., Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1992. ISBN086542070X
- [Byerlee 1978] Byerlee, J., Friction of rocks, *Pure. Appl. Geophys.*, **116**, 615–626, 1978. doi: 10.1007/BF00876528
- [Cagniard 1953] Cagniard, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting, *Geophys.*, **18**, 605–635, 1953. doi: 10.1190/1.1437915
- [Campbell 2001] Campbell, W.H., *Earth Magnetism: A Guided Tour Through Magnetic Fields*, 151pp., Harcourt/Academic Press, Massachusetts, 2001. ISBN0121581640
- [Constable 2007] Constable, S., 5.07 Geomagnetism, pp.238–276, in M. Kono, Ed., *Treatise on Geophysics*, vol. 5, *Geomagnetism*, 589pp., Elsevier, Amsterdam, 2007. ISBN9780444636140
- [Cox & Hart 1986] Cox, A., and R.B. Hart, *Plate Tectonics: How It Works*, 392pp., Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1986. ISBN086542313X
- [DeMets *et al.* 1990] DeMets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus, and S. Stein, Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, **101**, 425–478, 1990. doi: 10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x
- [DeMets *et al.* 1994] DeMets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus, and S. Stein, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191–2194, 1994. doi: 10.1029/94GL02118
- [DeMets *et al.* 2010] DeMets, C., R.G. Gordon, and D.F. Argus, Geologically current plate motions, *Geophys. J. Int.*, **181**, 1–80, 2010. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x

- [Dziewonski & Anderson 1981] Dziewonski, A.M., and D.L. Anderson, Preliminary reference Earth model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297–356, 1981. doi: 10.1016/0031-9201(81)90046-7
- [England *et al.* 2007] England, P.C., P. Molnar, and F.M. Richter, Kelvin, Perry and the Age of the Earth, *Am. Scientist*, **95**, 342–349, 2007. doi: 10.1511/2007.66.342
- [Fisher 1953] Fisher, R.A., Dispersion on a sphere, *Proc. Roy. Soc. A*, **217**, 295–305, 1953. doi: 10.1098/rspa.1953.0064
- [Fowler 2005] Fowler, C.M.R., *The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics (Second Edition)*, 685pp., Cambridge University Press, Cambridge, 2005. ISBN0521893070
- [深尾 1985] 深尾良夫, 『地震・プレート・陸と海—地学入門 (岩波ジュニア新書 92)』, 228pp., 岩波書店, 東京, 1985. ISBN9784005000920
- [Gee & Kent 2007] Gee, J.S., and D.V. Kent, 5.12 Source of oceanic magnetic anomalies and the geomagnetic polarity timescale, pp.455–507, in M. Kono, Ed., *Treatise on Geophysics, vol. 5, Geomagnetism*, 589pp., Elsevier, Amsterdam, 2007. ISBN9780444636140
- [Gripp & Gordon 2002] Gripp, A.E., and R.G. Gordon, Young tracks of hotspots and current plate velocities, *Geophys. J. Int.*, **150**, 321–361, 2002. doi: 10.1046/j.1365-246X.2002.01627.x
- [Haneda *et al.* 2020] Haneda, Y., M. Okada, Y. Suganuma, and T. Kitamura, A full sequence of the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal in the Chiba composite section, Central Japan, *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, 44, 2020. doi: 10.1186/s40645-020-00354-y
- [原・広井 2014] 原康夫・広井禎, 日本の高校物理の磁場も B だけがよい, 『大学の物理教育』, **20**, S34–S37, 2014. doi: 10.11316/peu.20.S_S34
- [原島 1966] 原島鮮, 『熱力学・統計力学』, 300pp., 培風館, 東京, 1966.
- [原島 1969] 原島鮮, 『基礎物理学 I』, 352pp., 学術図書出版社, 東京, 1969.
- [播磨屋ほか 1993] 播磨屋敏生・西田泰典・笹谷努・小賀百樹, 『地球の理』, 204pp., 学術図書出版社, 東京, 1993. ISBN4873613280
- [彦坂・寺島 2013] 彦坂幸毅・寺島一郎, 植物と二酸化炭素, 『化学と生物』, **51**, 250–256, 2013. doi: 10.1271/kagakutoseibutsu.51.250
- [IPCC 2021] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2391pp., Cambridge University Press, Cambridge, 2021. doi: 10.1017/9781009157896
- [入船ほか 1995] 入船徹男・小室裕明・鈴木尉元・多田堯・西村敬一 (著), 地学団体研究会 (編), 『地球内部の構造と運動 (新版地学教育講座 5 巻)』, 186pp., 東海大学出版会, 東京, 1995. ISBN4486013050
- [Kanamori 1977] Kanamori, H., The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **82**, 2981–2987, 1977. doi: 10.1029/JB082i020p02981
- [兼岡 1998] 兼岡一郎, 『年代測定概論』, 315pp., 東京大学出版会, 東京, 1998. ISBN9784130607223
- [Kawamura *et al.* 2007] Kawamura, K., F. Parrenin, L. Lisiecki, R. Uemura, F. Vimeux, J.P. Severinghaus, M.A. Hutterli, and other eleven authors, Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years, *Nature*, **448**, 912–917, 2007. doi: 10.1038/nature06015
- [Kiehl & Trenberth 1997] Kiehl, J.T., and K.E. Trenberth, Earth's annual global mean energy budget, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 197–208, 1997. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2
- [木村 1983] 木村竜治, 『地球流体力学入門—大気と海洋の流れのしくみ—』, 247pp., 東京堂出版, 1983. ISBN4490200684
- [北野 2015] 北野正雄, 磁場は B だけではうまく表せない (講義室), 『大学の物理教育』, **21**, 73–76, 2015. doi: 10.11316/peu.21.2_73
- [小玉 1999] 小玉一人, 『古地磁気学』, 248pp., 東京大学出版会, 東京, 1999. ISBN4130607251
- [国立天文台 2023] 国立天文台 編, 『理科年表 令和 5 年』, 1208pp., 丸善出版, 東京, 2022. ISBN9784621307366
- [小松・早川 1968] 小松勇作・早川康式, 『微分積分学』, 271pp., 朝倉書店, 東京, 1968.
- [河野 1986] 河野長, 『地球科学入門—プレート・テクトニクス』, 195pp., 岩波書店, 東京, 1986. ISBN4000056670

- [Lacis *et al.* 2010] Lacis, A.A., G.A. Schmidt, D.Rind, and R.A. Ruedy, Atmospheric CO₂: Principal control knob governing earth's temperature, *Science*, **330**, 356–359, 2010. doi: 10.1126/science.1190653
- [Langseth *et al.* 1976] Langseth, M.G., S.J. Keihm, and K. Peters, Revised lunar heat-flow values, *Proc. 7th Lunar Sci. Conf.*, 3143–3171, 1976.
- [Lemoine *et al.* 1998] Lemoine, F.G., S.C. Kenyon, J.K. Factor, R.G. Trimmer, N.K. Pavlis, D.S. Chinn, C.M. Cox, and other eight authors, *The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*, 584pp., NASA Technical Publication (TP) 1998-206861, Maryland, 1998.
- [Le Pichon 1968] Le Pichon, X., Sea-floor spreading and continental drift, *J. Geophys. Res.*, **73**, 3661–3697, 1968. doi: 10.1029/JB073i012p03661
- [Luzum *et al.* 2011] Luzum, B., N. Capitaine, A. Fienga, W. Folkner, T. Fukushima, J. Hilton, C. Hohenkerk, and other five authors, The IAU 2009 system of astronomical constants: the report of the IAU working group on numerical standards for Fundamental Astronomy, *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, **110**, 293–304, 2011. doi: 10.1007/s10569-011-9352-4 (<https://aa.usno.navy.mil/publications/asa>)
- [Maling 1973] Maling, D.H., *Coordinate Systems and Map Projections*, 255pp., George Philp and Sons, London, 1973. ISBN9780540009749
- [丸山ほか 2020] 丸山茂・戎崎俊一・川島博之・デビッド アーチボルド・木本協司・伊藤公紀・中村元隆 ほか 3 名, 『地球温暖化「CO₂ 犯人説」は世紀の大ウソ』, 396pp., 宝島社, 東京, 2020. ISBN9784299000828
- [増田 1996] 増田富士雄, 第 5 章 地質時代の気候変動, pp.157–219, in 住明正・平朝彦・鳥海光弘・松井孝典 (編), 『岩波講座 地球惑星科学 11 気候変動論』, 272pp., 岩波書店, 東京, 1996. ISBN9784000107310
- [増田・阿部 1996] 増田耕一・阿部彩子, 第 4 章 第四紀の気候変動, pp.103–156, in 住明正・平朝彦・鳥海光弘・松井孝典 (編), 『岩波講座 地球惑星科学 11 気候変動論』, 272pp., 岩波書店, 東京, 1996. ISBN9784000107310
- [Matsumoto *et al.* 2015] Matsumoto, K., R. Yamada, F. Kikuchi, S. Kamata, Y. Ishihara, T. Iwata, H. Hanada, and S. Sasaki, Internal structure of the Moon inferred from Apollo seismic data and selenodetic data from GRAIL and LLR, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 7351–7358, 2015. doi: 10.1002/2015GL065335
- [Maus *et al.* 2009] Maus, S., U. Barckhausen, H. Berkenbosch, N. Bournas, J. Brozena, V. Childers, F. Dostaler, and other sixteen authors, EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**, Q08005, 2009. doi: 10.1029/2009GC002471 (<https://www.nci.noaa.gov/products/geomagnetic-data>)
- [McElhinny & McFadden 2000] McElhinny, M.W. and P.L. McFadden, *Paleomagnetism: Continents and Oceans*, 386pp., Academic Press, San Diego, 2000. ISBN0124833551
- [McKenzie & Morgan 1969] McKenzie, D.P. and W.J. Morgan, Evolution of triple junctions, *Nature*, **224**, 125–133, 1969. doi: 10.1038/224125a0
- [水谷・渡部 1978] 水谷仁・渡部輝彦, 第 4 章 地球熱学, pp.169–223, in 上田誠也・水谷仁 (編), 『岩波講座 地球科学 1 地球』, 318pp., 岩波書店, 東京, 1978. ISBN9784000102711
- [Mochizuki *et al.* 2011] Mochizuki, N., H. Oda, O. Ishizuka, T. Yamazaki, and H. Tsunakawa, Paleointensity variation across the Matuyama-Brunhes polarity transition: Observations from lavas at Punaruu Valley, Tahiti, *J. Geophys. Res.*, **116**, B06103, 2011. doi: 10.1029/2010JB008093
- [Moritz 2000] Moritz, H., Geodetic Reference System 1980, pp.128–133, in O.B. Andersen, Ed., *The Geodesist's Handbook 2000*, 222pp., International Association of Geodesy, Masala, 2000. (<https://office.iag-aig.org/>)
- [Müller *et al.* 2008] Müller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest, Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q04006, 2008. doi: 10.1029/2007GC001743
- [Ness *et al.* 1975] Ness, N.F., K.W. Behannon, R.P. Lepping, and Y.C. Whang, Magnetic field of Mercury confirmed, *Nature*, **255**, 204–205, 1975. doi: 10.1038/255204a0

- [Ness 1994] Ness, N.F., Intrinsic magnetic fields of the planets: Mercury to Neptune, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **349**, 249–260, 1994. doi: 10.1098/rsta.1994.0129
- [大金 1994] 大金要次郎 (著), 地学団体研究会 (編), 『星の位置と運動 (新版地学教育講座 11 巻)』, 164pp., 東海大学出版会, 東京, 1994. ISBN4486013115
- [大久保 2004] 大久保修平 (編著), 日本測地学会 (監修), 『地球が丸いってほんとうですか? 測地学者に 50 の質問』, 277pp., 朝日新聞社, 東京, 2004. ISBN4022598522
- [Passe & Daniels 2015] Passe, T., and J. Daniels, *Past shore-level and sea-level displacements*, 33pp., Rapporteur och meddelanden 137, Geological Survey of Sweden, Uppsala, 2015. ISBN978-91-7403-291-8 (<https://apps.sgu.se/geolagret/GetMetaDataById?id=md-55d9f901-be56-4fa9-84ca-373fde91f7f5>)
- [Peale et al. 1979] Peale, S.J., P. Cassen, and R.T. Reynolds, Melting of Io by tidal dissipation, *Science*, **203**, 892–894, 1979. doi: 10.1126/science.203.4383.892
- [Press et al. 1992] Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing (Second Edition)*, 994pp., Cambridge University Press, Cambridge, 1992. ISBN0521431085
- [Richter 1986] Richter, F.M., Kelvin and the age of the earth, *J. Geol.*, **94**, 395–401, 1986. doi: 10.1086/629037
- [力武 1994] 力武常次, 『固体地球科学入門: 地球とその物理 (第 2 版)』, 267pp., 共立出版, 東京, 1994. ISBN4320046706
- [酒井 2016] 酒井治孝, 『地球学入門 (第 2 版) — 惑星地球と大気・海洋のシステム』, 332pp., 東海大学出版部, 秦野, 2016. ISBN9784486020998
- [Schmidt 2005] Schmidt, G., Water vapour: feedback or forcing?, *RealClimate*, 6 Apr 2005. (<https://www.realclimate.org/index.php/archives/2005/04/>)
- [瀬野 1995] 瀬野徹三, 『プレートテクトニクスの基礎』, 200pp., 朝倉書店, 東京, 1995. ISBN4254160291
- [Seton et al. 2014] Seton, M., J.M. Whittaker, P. Wessel, R.D. Muller, C. DeMets, S. Merkouriev, S. Cande, and other six authors, Community infrastructure and repository for marine magnetic identifications, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **15**, 1629–1641, 2014. doi: 10.1002/2013GC005176 (<http://www.soest.hawaii.edu/PT/GSFML/>)
- [Snyder 1987] Snyder, J.P., *Map projections: A working manual*, 383pp., USGS Professional Paper 1395, Washington, D.C., 1987. doi: 10.3133/pp1395
- [Stacey 1992] Stacey, F.D., *Physics of the Earth (Third Edition)*, 513pp., Brookfield Press, Brisbane, 1992. ISBN0646090917
- [杉村 1987] 杉村新, 『グローバルテクトニクス: 地球変動学』, 249pp., 東京大学出版会, 東京, 1987. ISBN4130621165
- [数研出版編集部 2018] 数研出版編集部 (編集), 『地学図録 視覚でとらえるフォトサイエンス (改訂版)』, 224pp., 数研出版, 東京, 2018. ISBN9784410290930
- [田部井ほか 2015] 田部井隆雄・里村幹夫・福田洋一, 2-1. 地球の形をどのように記載するか, in 日本測地学会, Web テキスト 測地学 (新装訂版), 2015. (<https://geod.jpn.org/web-text/part2/2-1/index.html>)
- [竹内 2011] 竹内均, 『地球科学における諸問題 (復刊)』, 386pp., 裳華房, 東京, 2011. ISBN9784785329020
- [Takahashi et al. 2019] Takahashi, F., H. Shimizu, and H. Tsunakawa, Mercury’s anomalous magnetic field caused by a symmetry-breaking self-regulating dynamo, *Nature Communications*, **10**:208, 2019. doi: 10.1038/s41467-018-08213-7
- [Tanaka 1999] Tanaka, H., Circular asymmetry of the paleomagnetic directions observed at low latitude volcanic sites, *Earth Planets Space*, **51**, 1279–1286, 1999. doi: 10.1186/BF03351601
- [巽 1995] 巽好幸, 『沈み込み帯のマグマ学: 全マントルダイナミクスに向けて』, 186pp., 東京大学出版会, 東京, 1995. ISBN4130607081
- [Tiesinga et al. 2021] Tiesinga, E., P.J. Mohr, D.B. Newell, and B.N. Taylor, CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2018, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **50**, 033105, 2021. doi: 10.1063/5.0064853 (<https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>)
- [Torsvik et al. 2012] Torsvik, T.H., R. Van der Voo, U. Preeden, C. Mac Niocaill, B. Steinberger, P.V.

- Dobrovine, D.J.J. van Hinsbergen, and other six authors, Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics, *Earth-Science Reviews*, **114**, 325–368, 2012. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.06.007
- [Tsuneta *et al.* 2008] Tsuneta, S., K. Ichimoto, Y. Katsukawa, B.W. Lites, K. Matsuzaki, S. Nagata, D. Orozco Suárez, and other seven authors, The magnetic landscape of the sun's polar region, *Astrophys. J.*, **688**, 1374–1381, 2008. doi: 10.1086/592226
- [Turcotte & Schubert 2002] Turcotte, D., and G. Schubert, *Geodynamics (Second Edition)*, 456pp., Cambridge University Press, Cambridge, 2002. ISBN978-0521666244
- [上田 1989] 上田誠也, 『プレート・テクトニクス』, 268pp., 岩波書店, 東京, 1989. ISBN4000059297
- [上嶋 2009] 上嶋誠, MT 法による電気伝導度構造研究の現状, 『地震』, **61**, S225–S238, 2009. doi: 10.4294/zisin.61.225
- [渡辺 2022] 渡辺正, 『「気候変動・脱炭素」14のウソ』, 176pp., 丸善出版, 東京, 2022. ISBN9784621307328
- [Wessel *et al.* 2019] Wessel, P., J.F. Luis, L. Uieda, R. Scharroo, F. Wobbe, W.H.F. Smith, and D. Tian, The Generic Mapping Tools version 6, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **20**, 5556–5564, 2019. doi: 10.1029/2019GC008515
- [Wilson 1965] Wilson, J.T., A new class of faults and their bearing on continental drift, *Nature*, **207**, 343–347, 1965. doi: 10.1038/207343a0
- [Yoder 1979] Yoder, C.F., How tidal heating in Io drives the Galilean orbital resonance locks, *Nature*, **279**, 767–770, 1979. doi:10.1038/279767a0
- [Yoder 1995] Yoder, C.F., Astrometric and geodetic properties of earth and the solar system, pp.1–31, in T.J. Ahrens, Ed., *Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants*, 376pp., American Geophysical Union, Washinton DC, 1995. ISBN0875908519

索引

A

APWP (apparent polar wander path). *see* 極移動曲線
au (astronomical unit)..... *see* 天文単位

B

BP (Before Present)..... 57

C

CMB (core-mantle boundary)..... *see* 核-マントル境界

E

EMAG2 (EMAG2 A 2-arc min resolution Earth
Magnetic Anomaly Grid)..... 236
ETOPO1 (ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief
Model)..... 83, 236, 242

G

Gal (= cm/s^2)..... 72
GPS (global positioning system)..... 101
GRS80 (Geodetic Reference System 1980) *see* 測地基
準系 1980

I

IGRF (International Geomagnetic Reference
Field)..... *see* 国際標準地球磁場

M

Ma (= 10^6 yr BP)..... 62

N

NUVEL-1A (Northwestern University Velocity
Model 1A)..... 264

P

Pa (pascal, N/m^2)..... 84
ppm (parts per million)..... 42
PREM (Preliminary Reference Earth Model)..... 155

S

SI (Le Système international d'unités) *see* 国際単位系

V

VDM (virtual dipole moment)... *see* 仮想的磁気双極子
モーメント
VGP (virtual geomagnetic pole)... *see* 仮想的地磁気極

W

WGS84 (World Geodetic System 1984) . *see* 世界測地
系 1984

あ

RRR 型 3 重会合点 (RRR (ridge-ridge-ridge) triple
junction)..... 248
RTF 型 3 重会合点 (RTF (ridge-trench-fault) triple
junction)..... 256
アイソクロン (isochron)..... 58, 235
アイソスタシー (isostasy)..... 82, 103, 184
アセノスフェア (asthenosphere)..... 158, 181
圧縮応力 (compressive stress)..... 146
アポロ計画 (Apollo project)..... 175
アルベド (albedo)..... 40
アンペールの法則 (Ampere's law)..... 210, 309

イオ (Io)..... 76
位置エネルギー (potential energy)..... 22, 100
隕石 (meteorite)..... 62
ウィーンの変位則 (Wien's displacement law)..... 39
ウェーゲナー (Wegener, Alfred)..... 225
ウルフネット (Wulff net)..... 332
運動エネルギー (kinetic energy)..... 22
運動方程式 (equation of motion)..... 18, 281
運動量 (momentum)..... 23
運動量保存則 (momentum conservation law)..... 23
衛星測位 (satellite positioning)..... 101
SH 波 (horizontally polarized S-wave)..... 121
S 波 (secondary wave, S-wave)..... 120
S-P 時間 (S-P time)..... 139
SV 波 (vertically polarized S-wave)..... 121
エトベス効果 (Eötvös effect)..... 77, 93
エネルギー保存則 (energy conservation law).... 23, 279
FFT 型 3 重会合点 (FFT (fault-fault-trench) triple
junction)..... 256
MT 法..... *see* 地磁気地電流法
M-B 地磁気逆転..... *see* マツヤマ-ブリュンス地磁気逆転
遠心力 (centrifugal force)..... 72, 92, 100, 288
円錐曲線 (conic curve)..... 17, 283
鉛直線偏差 (deflection of plumb line)..... 101
エントロピー (entropy)..... 189
オイラー回転 (Euler rotation)..... 229, 257
オイラー極 (Euler pole)..... 227, 257, 321
オイラーの定理 (Euler's rotation theorem)..... 227
応力 (stress)..... 145
大森公式 (Omori formula)..... 139
押し (push)..... 137
温室効果 (greenhouse effect)..... 40
温室効果ガス (greenhouse gas)..... 40

か

海溝 (trench)..... 242, 248
海上地磁気縞状異常 ((linear) marine magnetic
anomalies)..... 234
回転 (rot, rotation)..... 212, 307
回転行列 (rotation matrix)..... 258, 288, 318
回転座標系 (rotating reference frame)..... 91, 288
回転楕円体 (spheroid)..... 65
回転ベクトル (rotation vector)..... 261
壊変定数 (decay constant)..... 52
海洋地殻 (oceanic crust)..... 83
海洋底拡大 (seafloor spreading)..... 183, 234, 242
海洋リソスフェア (oceanic lithosphere)..... 180
海嶺 (ridge)..... 180, 234, 242, 247
ガウス (Gauss, Carl Frederich)..... 204
ガウス係数 (Gauss coefficient)..... 204, 311
ガウスの発散定理 (Gauss's divergence theorem) ... 306
角運動量 (angular momentum)..... 25
角運動量保存則 (conservation of angular
momentum)..... 26
拡散方程式 (diffusion equation)..... 176, 314
角速度 (angular velocity)..... 18
角速度ベクトル (angular velocity vector)..... 90, 261
拡大速度 (spreading velocity)..... 237, 245
核-マントル境界 (core-mantle boundary, CMB) ... 155
確率密度 (probability density)..... 55
重ね合わせの原理 (principle of superposition)..... 185
火山前線..... *see* 火山フロント

火山フロント (volcanic front) 243
 仮想的磁気双極子モーメント (virtual dipole moment, VDM) 29
 仮想的地磁気極 (virtual geomagnetic pole, VGP) 215
 片対数グラフ (semilog graph) 15
 K-Ar 法 (K-Ar dating, potassium-argon method) 57
 慣性モーメント (moment of inertia) 26
 慣性力 (inertial force) 92, 288
 間氷期 (interglacial stage) 43
 気圧傾度力 (pressure gradient force) 93
 気候システム (climate system) 41
 気候変動 (climate variation) 41
 起潮力 *see* 潮汐力
 逆極性 (reversed polarity) 215
 逆断層 (thrust fault) 137
 球関数 (spherical harmonics) 204, 311
 球面三角法 (spherical trigonometry) 219, 264, 316
 球面調和関数 (spherical surface harmonics) *see* 球関数
 極移動曲線 (apparent polar wander path, APWP) 226
 極座標系 (polar coordinates system) 280
 局地座標系 (local coordinate system) 97, 323
 曲率 (curvature) 64
 曲率円 (circle of curvature) 64
 曲率半径 (radius of curvature) 64
 巨大衝突説 (giant-impact hypothesis) 29
 グーテンベルグ-リヒター則 (Gutenberg-Richter law) 112
 クーロンの法則 (Coulomb's law) 307
 屈折波 (refracted wave) 122
 クロン (chron) 214
 傾斜 (dip) 136
 傾度風 (gradient wind) 94
 ケプラーの法則 (Kepler's laws) 12, 284
 ケルビン (Kelvin, Lord) 182
 ケレス (Ceres) 12
 古緯度 (paleolatitude) 215, 226
 剛性率 (shear modulus) 114, 120, 145, 295
 剛体振り子 (rigid body pendulum) 76
 勾配 (grad, gradient) 305
 鉱物アイソクロン (mineral isochron) 59
 国際単位系 (SI, Le Système international d'unités) 276, 302
 国際標準地球磁場 (IGRF, International Geomagnetic Reference Field) 194, 337
 黒体放射 (black body radiation) 39
 誤差関数 (error function) 181, 299
 古地磁気永年変化 (paleosecular variation) 216
 古地磁気極 (paleomagnetic pole) 226
 古地理図 (paleogeographic map) 226
 コリオリ因子 (Coriolis parameter) 93
 コリオリ力 (Coriolis force) 29, 92, 288

さ

差応力 (differential stress) 154
 サブクロン (subchron) 214
 差別侵食 (differential erosion) 169
 作用反作用の法則 (action-reaction law) 24
 サンアンドレアス断層 (San Andreas Fault) 253
 3 重会合点 (triple junction) 248
 酸素同位体比 (oxygen isotope ratio) 42
 C-14 法 (carbon-14 dating) 57
 ジオイド (geoid) 101
 ジオイド高 (geoid height) 101
 磁界 (magnetic field) 210, 302, 312
 磁気嵐 (geomagnetic storm) 198

磁気圏 (magnetosphere) 197
 磁気図 (magnetic chart) 194
 磁気双極子 (magnetic dipole) 195, 203
 磁気双極子モーメント (magnetic dipole moment) 195, 203
 磁気的ボーデの法則 (magnetic Bode's law) 29
 磁極 (magnetic pole) 196
 自己重力 (self-gravity) 78
 地震 (earthquake) 112
 地震のメカニズム解 (earthquake fault-plane solution) *see* 発震機構
 地震モーメント (seismic moment) 114
 磁束密度 (magnetic flux density) 194, 211, 302, 312
 実体波 (body wave) 121
 実体波マグニチュード (body wave magnitude) 113
 磁場 (magnetic field) 302
 磁北 (magnetic north) 194
 シャドーゾーン (shadow zone) 127, 135
 主圧縮軸 (axis of compression) 137
 収束型境界 (convergent boundary) 246
 重力 (gravity) 72
 重力異常 (gravity anomaly) 74, 102
 重力エネルギー (gravitational energy) 28, 41, 160
 重力加速度 (gravitational acceleration) 19, 72, 100
 重力収縮 (gravitational contraction) 41
 重力補正 (gravity reduction) 102
 重力ポテンシャル (gravitational potential) 100, 289
 主応力 (principal stress) 146, 292
 主応力軸 (principal axis of stress) 146, 292
 主張力軸 (axis of tension) 137
 シュテファン-ボルツマンの法則 (Stefan-Boltzmann law) 39
 主歪み (principal strain) 146
 シュミットネット (Schmidt net) 140, 221, 232, 266, 333
 小惑星帯 (asteroid belt) 12
 初期微動 (preliminary tremor) 139
 シリウス (Sirius) 20
 震央 (epicenter) 122, 242
 震央距離 (epicentral distance) 122
 真空の透磁率 (permeability of free space) 195, 303
 震源 (hypocenter) 122, 243
 震源球 (focal sphere) 138
 震源距離 (hypocentral distance) 122, 139
 伸縮歪み (normal strain) 145
 真北 (true north) 194
 スーパークロン (superchron) 237
 水準測量 (leveling) 101
 垂直線偏差 (deflection of the vertical) 101
 数値年代 (numerical age) 52
 スカラー場 (scalar field) 99, 305
 スカンジナビア (Scandinavia) 83
 スキンデプス (skin depth) 178, 210, 314
 ステレオ投影 (stereographic projection) 331
 ストークスの定理 (Stokes' theorem) 307
 ストレス・ドロップ (stress drop) 114
 スネルの法則 (Snell's law) 121
 スラブ (slab) 244
 スリップベクトル (slip vector) 138
 ずれ応力 (shear stress) 114, 120, 145
 ずれ歪み (shear strain) 114, 120, 145
 正規重力 (normal gravity) 102
 正極性 (normal polarity) 215
 静止座標系 (stationary reference frame) 91
 正断層 (normal fault) 137

精密度パラメータ (precision parameter)	217
世界測地系 1984 (World Geodetic System 1984, WGS84)	101
絶対年代 (absolute age)	see 数値年代
節面 (nodal plane)	138
全岩アイソクロン (whole rock isochron)	59
全磁力 (total force)	194
せん断応力	see ずれ応力
せん断歪み	see ずれ歪み
全反射 (total reflection)	122
双極子磁場 (dipole field)	196
走行 (strike)	136
走時曲線 (travel-time curve)	123
相似変数 (similarity variable)	297
相対速度 (relative velocity)	247
相補誤差関数 (complementary error function) ..	181, 299
測地緯度 (geodetic latitude)	67
測地基準系 1980 (Geodetic Reference System 1980, GRS80)	65, 101
速度空間 (velocity space)	249
素元波 (spherical wavelet)	121

た

体積弾性率 (bulk modulus)	120, 147, 295
体積歪み (volumetric strain)	119, 147
体積膨張率 (coefficient of volumetric expansion) ..	85, 184, 190
太陽定数 (solar constant)	40
太陽風 (solar wind)	197
太陽放射 (solar radiation)	40
大陸移動説 (theory of continental drift)	225
大陸地殻 (continental crust)	83
楕円体高 (ellipsoidal height)	101
縦ずれ断層 (dip-slip fault)	136
単振動 (simple harmonic motion)	74
断層面 (fault plane)	138
断熱温度勾配 (adiabatic temperature gradient) ...	158, 188
断熱過程 (adiabatic process)	189
断熱変化 (adiabatic change)	see 断熱過程
単振り子 (simple pendulum)	73
断裂帯 (fracture zone)	242, 248
地温勾配 (geothermal gradient)	158
地殻 (crust)	83
地殻熱流量 (terrestrial heat flow)	158
力のモーメント (torque)	24, 113, 146
地球温暖化 (global warming)	41
地球楕円体 (earth ellipsoid)	65, 101
地球潮汐 (earth tide)	76
地球放射 (terrestrial radiation)	40
逐次近似 (iterative approximation)	30
地衡風 (geostrophic wind)	93
地磁気異常 (magnetic anomaly)	235
地磁気緯度 (geomagnetic latitude)	202
地磁気永年変化 (geomagnetic secular variation) ...	197
地磁気エクスカージョン (geomagnetic excursion) ..	222
地磁気逆転 (geomagnetic reversal)	214
地磁気極 (geomagnetic pole)	196
地磁気極性タイムスケール (geomagnetic polarity time scale, GPTS)	214, 237
地磁気座標 (geomagnetic coordinates)	201
地磁気赤道 (geomagnetic equator)	201
地磁気地電流法 (magnetotelluric method)	210
地磁気ポテンシャル (magnetic potential of the geomagnetic field)	203

地質時代 (geologic time)	42, 285
地心緯度 (geocentric latitude)	67
地心軸双極子 (geocentric axial dipole)	195, 203
地心軸双極子仮説 (geocentric axial dipole hypothesis)	217, 226
地心直交座標系 (geocentric orthogonal coordinate system)	323
チバニアン (Chibanian)	215
中央海嶺 (mid-oceanic ridge)	242
潮汐力 (tidal force)	75
潮汐ロック (tidal lock)	30
直達波 (direct wave)	122
直交座標系 (orthogonal coordinates system)	280
地理緯度 (geographical latitude)	67
T 軸 (T-axis)	see 主張力軸
TTT 型 3 重会合点 (TTT (trench-trench-trench) triple junction)	248
低速度層 (low-velocity zone)	131, 175
テイラー-マクローリン展開 (Taylor and Maclaurin expansion)	61, 206
電気伝導度 (electrical conductivity)	209, 312
電場 (electric field)	312
天文単位 (astronomical unit)	12
電流密度 (current density)	210, 312
同位体 (isotope)	58
等速円運動 (uniform circular motion)	18
等年代線 (isochron)	58, 235
特徴的距離スケール (characteristic length scale) ..	176, 189, 297
特徴的時間スケール (characteristic time scale) ..	176, 189
トランスフォーム断層 (transform fault) ..	237, 242, 248

な

南極大陸 (Antarctica)	83
熱拡散率 (thermal diffusivity)	85, 175, 181, 296
熱境界層 (thermal boundary layer)	158, 181, 188
熱源 (heat source)	159
熱対流 (heat convection)	158, 188
熱伝導度 (thermal conductivity)	158
熱伝導の法則 (law of heat conduction)	158
熱伝導方程式 (heat-conduction equation) ..	165, 175, 296
熱伝導率 (thermal conductivity)	85
粘性率 (viscosity)	84
ノーマル	see 正極性

は

白亜紀 (Cretaceous)	86
白亜紀 (正極性) スーパークロン (Cretaceous Normal Superchron)	237, 244
破碎帯	see 断裂帯
波数 (wavenumber)	120
波線 (raypath)	121
波線パラメータ (ray parameter)	126
波長 (wavelength)	120
発散 (div, divergence)	212, 306
発散型境界 (divergent boundary)	246
発震機構 (focal mechanism)	138
ハッブル宇宙望遠鏡 (Hubble Space Telescope, HST) ..	22
波動方程式 (wave equation)	120, 313
波面 (wavefront)	121
半減期 (half-life)	53
反射波 (reflected wave)	122
半無限体 (half-space)	181, 296
半無限体冷却モデル (half space cooling model)	181
万有引力 (universal gravitation)	18

P 軸 (P-axis) see 主圧縮軸
P 波 (primary wave, P-wave) 120
P 波初動 (initial motion of P-wave) 137
非圧縮率 (incompressibility) see 体積弾性率
引き (pull) 137
歪み (strain) 145
非双極子磁場 (nondipole field) 196
左横ずれ断層 (left-lateral fault) 136
比抵抗 (resistivity) 209, 315
比熱 (specific heat) 85, 159
氷期 (glacial epoch) 43, 83, 185
標高 (orthometric height) 101
標準重力 (standard gravitation) 20
氷床コア (ice core) 42
表皮深さ see スキンデプス
表面波 (surface wave) 121
表面波マグニチュード (surface wave magnitude) ... 113
ブーゲー異常 (Bouguer anomaly) 103
フーコーの振り子 (Foucault's Pendulum) 89
フーリエの熱伝導の法則 (Fourier's law of heat conduction) see 熱伝導の法則
ファラデーの電磁誘導の法則 (Faraday's law of electromagnetic induction) 303
ファラロンプレート (Farallon plate) 253
フィードバック (feedback) 41
フィッシャー統計 (Fisher statistics) 217
伏角 (inclination) 194
フックの法則 (Hooke's law) 120, 145
プランクの法則 (Planck's law) 39
フリーエア異常 (free-air anomaly) 103
ブリュンヌクロン (Brunhes chron) 218
プレートテクトニクス (plate tectonics) 242
プロキシ ((climate) proxy) 42
平均寿命 (average life, mean life) 55
平行移動型境界 (translational boundary) 246
平行軸の定理 (parallel axis theorem) 27
閉鎖系 (closed system) 57
ベクトル解析 (vector calculus) 303
ベクトル場 (vector field) 99, 305
ヘッドウェーブ (head wave) 123
ヘルムホルツ (Helmholtz, Hermann) 41
変位電流 (displacement current) 313
偏角 (declination) 194
扁平率 (flattening) 65, 104, 289
ボーデの法則 (Bode's law) 12
ポアゾン比 (Poisson's ratio) 295
ホイヘンスの原理 (Huygens' principle) 121
崩壊定数 (decay constant) see 壊変定数 52
放射壊変 (radioactive decay) 52
放射性元素 (radioisotope) 52, 159
放射性炭素法 (radiocarbon dating) see C-14 法
放射性崩壊 (radioactive decay) see 放射壊変
放射年代 (radiometric age) see 数値年代
法線応力 (normal stress) 145
補償面 (compensation depth) 82

ホットスポット (hotspot) 242
ポテンシャル (potential) 99, 203, 309
ポテンシャル温度 (potential temperature) 191

ま

マグニチュード (magnitude) 112
マグネトテリク法 see 地磁気地電流法
摩擦応力 (frictional stress) 148
摩擦係数 (coefficient of friction) 148
マッカラーの公式 (MacCullagh's formula) 289
マツヤマクロン (Matuyama chron) 218
マツヤマ-ブリュンヌ地磁気逆転 (Matuyama-Brunhes polarity transition) 219
マントル (mantle) 83
マントル対流 (mantle convection) 85
見かけの力 (fictitious force) 91
右横ずれ断層 (right-lateral fault) 136
ミランコビッチサイクル (Milankovitch cycle) 43
無限小回転 (infinitesimal rotation) 260
面積速度 (areal velocity) 12, 26, 282
モーメントマグニチュード (moment magnitude) 113
モホロビッチ不連続面 (Mohorovičić discontinuity) 123

や

ヤング率 (Young's modulus) 145, 295
有限回転 (finite rotation) 259
横ずれ断層 (strike-slip fault) 136

ら

ラブラシアン (Laplacian) 310
ラプラス方程式 (Laplace's equation) 310
ラメの定数 (Lamé elastic constants) 146, 295
ランベルト等面積投影 (Lambert equal-area projection) 330
離心率 (eccentricity) 14, 17, 46, 67
リソスタティック (lithostatic) 147, 190
リソスフェア (lithosphere) 158, 181
リバース see 逆極性
流線 (streamline) 188
両対数グラフ (log-log graph) 13
臨界角 (critical angle) 122
臨界屈折波 (critically refracted wave) see 屈折波
累積分布 (cumulative distribution) 55
ルジャンドル陪関数 (associated Legendre polynomial) 204, 311
Rb-Sr 法 (Rb-Sr dating, rubidium-strontium method) 58
レイリー数 (Rayleigh number) 85
連星 (binary star) 19
ローレンツ力 (Lorentz force) 302
ロッシュ限界 (Roche limit) 78
ロドリゲスの回転公式 (Rodrigues' rotation formula) 259, 320