

第 1 章 演習問題・解答例

演習問題 1.1

図 1.1 (沖・鼎, 2007) より, 地球の陸上の年間水収支 (降水量, 蒸発散量, 表面流出量, 基底流出量) を水高 (mm) で算定し, 蒸発散量が水収支に占める割合を算定しなさい.

解答例 1.1

地球の陸上の総面積 (南極大陸を除く) は, 各地目の面積を総計すると $133.9 \times 10^6 \text{ km}^2$ である. 水収支各項 ($\times 10^3 \text{ km}^3$) を総面積で除すと, 降水量 829 mm yr^{-1} , 蒸発散量 489 mm yr^{-1} , 流出量 340 mm yr^{-1} (表面流出量 114 mm yr^{-1} , 基底流出量 226 mm yr^{-1}) である. 蒸発散量が水収支に占める割合は, 59% である.

演習問題 1.2

図 1.1 (沖・鼎, 2007) より, 地球上の草原と森林の面積, 降水量, 蒸発散量, 流出量が地球の陸上の各項に占める比率を算定し, 比較しなさい.

解答例 1.2

草原が陸上に占める比率は 37% であり, 草原の水収支項が陸上の水収支項に占める比率は, 降水量 28%, 蒸発散量 32%, 流出量 22% である. 一方, 森林が陸上に占める比率は 30% で草原より狭いが, 森林の水収支項が陸上の水収支項に占める比率は, 降水量 49%, 蒸発散量 44%, 流出量 55% であり, いずれも草原の比率を上回っている. これより, 森林における水循環は草原の水循環より活発であることがわかる. ちなみに, 他の地目の水収支項が陸上の水収支項に占める比率は, いずれも草原における比率を下回っており, 地球上で森林の水循環が極めて重要な役割を果たしていることがわかる.

演習問題 1.3

図 1.1 (沖・鼎, 2007) より, 地球上の草原と森林の年間の降水量, 蒸発散量, 流出量を水高 (mm/yr) で算定し, 蒸発散量と流出量の対降水量比率を求め, 比較しなさい.

解答例 1.3

草原の降水量は 634 mm yr^{-1} , 蒸発散量は 429 mm yr^{-1} (68%), 流出量は 204 mm yr^{-1} (32%) である. 森林の降水量は 1374 mm yr^{-1} , 蒸発散量は 723 mm yr^{-1} (54%), 流出量は 623 mm yr^{-1} (46%) で

ある。この結果より、森林の蒸発散量は草原の約 1.7 倍であるが、森林ではそれを大きく上回る降水量があるため、森林からの流出量は草原の約 3.0 倍であり、森林の方が草原より水資源賦存量が豊かであることがわかる。ちなみに、他の地目の水収支項が陸上の水収支項に占める比率は、いずれも草原における比率を下回っており、地球上で森林の水循環が極めて重要な役割を果たしていることがわかる。

演習問題 1.4

地球の海洋の面積を $361.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ として、図 1.1 (沖・鼎, 2007) より、地球全体 (海上および陸上) の蒸発散量を水高 (mm yr^{-1}) で算定しなさい。また、地球の平均気温を 15°C とし、(7.1) 式より水の気化潜熱 (J kg^{-1}) を求め、地球の年間蒸発潜熱 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) を算定しなさい。さらに、図 4.1 (Trenberth et al. 2009) より地球上の平均日射量は 184 W m^{-2} であるとして、地球上では日射の何%が蒸発潜熱として消費されるか算定しなさい。

解答例 1.4

$$\text{地球の面積 } 361.3 \times 10^6 + 133.9 \times 10^6 = 495.2 \times 10^6 \text{ km}^2$$

$$\text{地球上の水の平均気化潜熱 } 2.5 \times 10^6 - 2400 \times 15 = 2.454 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$$

$$\text{地球上の年間日射量 } 184 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365.25 = 5806.6 \times 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$$

$$\text{地球上の年間蒸発量 } 436.5 + 65.5 = 502.0 \times 10^3 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$$

$$\text{地球上の年間蒸発量 (水高)} \frac{502.0 \times 10^3}{495.2 \times 10^6} \times 10^6 = 1014 \text{ mm yr}^{-1}$$

$$\text{地球上の年間蒸発潜熱 } 1014 \times 2.454 \times 10^6 = 2497.8 \times 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$$

$$\text{地球上の年間日射量に対する蒸発散潜熱の比率 } \frac{2497.8 \times 10^6}{5806.6 \times 10^6} = 0.430 (43\%)$$

第 2 章 演習問題・解答例

問題 2.1

一般的な森林施業における保育作業について、施業全体における位置付けとともに、簡潔に説明しなさい。

解答例 2.1

典型的な森林施業は、苗木を養生する「育苗」から始まり、「地拵え」した上で苗木を「植栽」し、「保育」作業を適宜行ったあと、「主伐」に至る。

実際の保育作業では「主伐」へ向けて、植栽木周囲の雑草木を刈り払う「下刈り」、侵入した不要木や不良木を伐倒する「除伐」、絡みついたつる植物を除去する「つる切り」、節をつくらないことや病虫害防除、積雪害防止、光環境改善などを目的とした「枝打ち」、植栽木の混み具合を調整する「間伐」などが進められる。

問題 2.2

ある林分において平均胸高直径 DBH が 22cm、立木密度が 1,800 本 ha⁻¹ である時の胸高断面積合計を求めよ。

解答例 2.2

胸高断面積 BA は胸高における樹幹の断面積で、 $BA = \frac{DBH^2}{4\pi}$ より計算すると、

$$BA = \frac{DBH^2}{4\pi} = \frac{22^2}{4\pi} = \frac{484}{4\pi} \approx 38.5 (\text{cm}^2) \text{ となる.}$$

以上より、胸高断面積合計は、 $38.5 \times 1800 \times \frac{1}{1000} = 69.3 (\text{m}^2 \text{ ha}^{-1})$ となる。

問題 2.3

わが国で森林水文学を学ぶ際には流域構造の理解が欠かせない。その意義を説明せよ。

解答例 2.3

流域とは、斜面と水系（流路、水路）によって成り立っていると捉えることができ、地形地質学的な側面と水文学的な側面に加えて植被状況からの視点も含めたアプローチが必要となる。

日本は温暖湿潤な気候帯に位置していることに加え、国土の 6 割を急峻かつ複雑な地形をもつ山地が占めている。さらに、山地の大半が森林に覆われている状況となっていることから、日本の森林における水文特性を把握するには流域構造の理解は欠かせない。

問題 2.4

河川密度とは何か？また河川密度に影響する要因を挙げよ。

解答例 2.4

河川密度とは、全水路の長さを流域全体の面積で割った値で、流域にどれくらいの割合で水路が発達しているかを示す。水系密度、谷密度、流路密度ともいう。河川密度は、表層地質による影響が強く、さらに斜面に植被が存在した場合には、地表流の発生を抑制させるといった影響もある。

なお、値が大きいほど降雨の影響が短時間で河川流量に表れ、ピーク流量も大きい傾向がみられる。一方、湿地や湖、貯水池の占める割合が増えると、ピーク流量が抑えられる傾向がある。

第3章 演習問題・解答例

問題 3.1 利水計画における水文量

農地における利水計画は一般に 10 年に一回の渇水を対象としている。表-1 に示した長崎地方気象台の年降水量データを使い、10 年に一回の確率で発生する少雨年の年降水量を求めなさい。なお年降水量の分布は正規分布であるものとする。

解答例 3.1

正規分布の母数 μ , σ の推定値は 3.3-4 式から $\hat{\mu} = 1956$, $\hat{\sigma} = 387$ となる。ここで年降水量を x として $s = \frac{x - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}$ とすると、 s は標準正規分布関数で示される。少雨年を対象としているので非超過確率 0.1 の標準正規分布の累積分布関数の逆関数値を求めればよい。エクセルの統計関数(norm.s.inv)を使うと-1.28 となり、 $\frac{x - 1956}{387} = -1.28$ であるから、10 年に 1 回の確率で発生する少雨年の年降水量は約 1460mm となる。

問 3.2 3 母数対数正規分布による再現期間及び確率水文量の計算

例題 3.2 で得られた結果を使い、1982 年の年最大日雨量 448 mm の再現期間および 100 年確率日雨量を求めなさい。

解答例 3.2

1998 年の年最大日雨量を例題 3.2 で得られた母数 $a = 37.42$ を使い対数変換すると $\ln(448 - 37.42) = 6.02$ となる。 $z_i = \ln(x_i - a)$ の平均値 $\mu = 4.54$ 、標準偏差 $\sigma = 0.54$ が求められているので、 $s(z_i) = \frac{\ln(z_i - a) - \mu}{\sigma}$ とすると、問 3.2 と同様に標準正規分布関数で示される。 $s =$

$\frac{6.02 - 4.54}{0.54} = 2.74$ であるから 2.74 の標準正規分布の累積分布関数値をエクセルの統計関数

(norm.s.dist)を使うと $F(2.74)$ は約 0.997 と算出され、3.21 式から 448mm の再現期間は約 308 年として求められる。また 100 年確率日雨量の累積分布関数の値は 3.21 式から 0.99 であり、その逆関数値はエクセルの統計関数(norm.s.inv)を使うと 2.326 となる。100 年確率年最大日雨量を x_{100} とする

と $\frac{\ln(x_{100} - 37.42) - 4.54}{0.54} = 2.326$ であるから、約 370mm となる。

問題 3.3 データ数の違いが確率水文量に与える影響

表-2 示す年最大日雨量の 1981 年から 2010 年までのデータに対して 3 母数対数正規分布を適用し、100 年確率年最大日雨量を求めて問 3.3 の値と比較しなさい。

解答例 3.3

母数(a, μ, σ) は最小値 $x_{(1)}$:59 mm, 最大値 $x_{(30)}$:448 mm, 中央値 x_m :131.55 mm であるから、3.6-8 式から $a = 35.87, \mu = 4.58, \sigma = 0.63$ が算出される。

$s(z_i) = \frac{\ln(z_i - a) - \mu}{\sigma}$ とすると問 3.2 と同様に標準正規分布関数で示される。問 3.2 と同じく 100 年確率

年最大日雨量を x_{100} とすると $\frac{\ln(x_{100} - 35.87) - 4.54}{0.54} = 2.326$ であるから、約 462mm となる。これを問 3.2

の約 370mm と比較するとかなり大きいことが分かる。これは 30 年間の資料から求めた 100 年確率水文学量が外挿によって求められていることを示す。データ数の違いが確率水文学量には大きく影響することに留意しておく必要がある。

問 3.4 分布関数の違いが確率年に与える影響

表-3 (A) に示す土壌雨量指数の年最大値に対して、グンベル分布と一般化極値分布を適用し、1982 年の年最大値 326.7mm の確率年を求め、両者の確率年を比較しなさい。

解答例 3.4

最初に両分布に共通の L 積率 λ_r ($r = 1, 2, 3$)を確率重みつき積率 β_r ($r = 0, 1, 2$) から求める。小さい方から順番にデータを並べると、1 番目が $x_{(1)}=68.6$, 2 番目が $x_{(2)} = 87.6$, 3 番目が $x_{(3)} = 98.1$, 30 番目が最大値の $x_{(30)} = 326.7$ となる。3.10-12 式から $\beta_0 = 146.4, \beta_1 = 87.1, \beta_2 = 64.1$ が算出され、3-13 式から L 積率は $\lambda_1 = 146.4, \lambda_2 = 27.8, \lambda_3 = 8.28$ であるから、

グンベル分布の母数 a, c は 3.14 式から $a = \frac{27.8}{\ln(2)} = 40.1, c = 146.4 - 0.5772 \times 40.1 = 123.3$ とし

て求められる。一般化極値分布の母数 a, k, c , は 3.16-17 式から $k = -0.19$, 3.18 式から $a =$

$\frac{-0.19 \times 27.8}{(1 - 2^{0.19}) \Gamma(1 - 0.19)} = 32.5$, 3.19 式から $c = 146.4 + \frac{32.5}{0.19} \{1 - \Gamma(1 - 0.19)\} = 120.2$ として求められる。

これより 326.7mm の再現期間はグンベル分布が 3.24 式から $F(326.7) = 0.994$, 一般化極値分布が

3.26 式から $F(326.7) = 0.985$ となるので、グンベル分布による再現期間は $\frac{1}{1 - 0.994} = 167$ 年、一般

化極値分布による再現期間は $\frac{1}{1 - 0.985} = 67$ 年となる。データ数は同じであっても、分布関数の違いに

よって差が生じることに留意しておく必要がある。

問 3.5 適合度の評価

問 3.4 で用いたグンベル分布と一般化極値分布の適合度の評価を SLSC によって行いなさい。なおプロットイング・ポジション公式にはカナン公式を用いるものとする。

解答例 3.5

土壌雨量指数の標準変量を計算する。3.5 節の表記に従い土壌雨量指数 x_i の i を小さい値から並べた順位で示す。例えば最大値は $x_{30}=326.7$ となる。 x_{30} の標準変量 $s(x_{30})$ は、グンベルの場合、問 3.5 で得られた母数を使って、3.34 式から $s(x_{30}) = \frac{326.7-123.3}{40.1} = 5.07$ となる。一方で x_{30} の非超過

確率 p_{30} は 3.28 式にカナン公式を適用して $p_{30} = \frac{30-0.4}{31-0.8} = 0.98$ となる。公式により求められる $s^*(p_{30})$

は 3.36 式から $s^*(p_{30}) = -\ln\{-\ln(0.98)\}=3.90$ である。 x_{30} における両者の標準変量の差は $s(x_{30}) - s^*(p_{30}) = 1.17$ となる。これを $i = 1, 2, \dots, 29, 30$ まで繰り返していけば SLSC の定義式 (3.33 式)の分子が算出される。なお一般化極値の土壌雨量指数の標準変量は 3.36 式を使えばよい。3.33 式の分母は $|s_{0.99} - s_{0.01}| = |-\ln[-\ln\{0.99\}] + \ln[-\ln\{0.01\}]| = 6.13$ である。以上からグンベル分布:SLSC=0.051, 一般化極値分布:SLSC=0.036 が算出され、これより一般化極値分布がグンベル分布より適合度が高いと評価される。

第4章 演習問題・解答例

問題 4.1

均時差 $EoT(h)$ は次式によって計算できる.

$$EoT = \{0.0172 + 0.4281\cos\chi - 7.3515\sin\chi - 3.3495\cos(2\chi) - 9.3619\sin(2\chi)\}/60 \quad (E4.1)$$

$$\chi = 2\pi(D - 1)/D_y \quad (E4.2)$$

ここに, D は通日 (d), D_y は 1 年間の日数 (365.25 d) である.

E4.1, E4.2 式, 4.9 式, 4.10 式, 4.12 式を用いて, 北海道根室測候所 (北緯 $43^\circ 19.8'$, 東経 $145^\circ 35.1'$), 兵庫県明石天文科学館 (北緯 $34^\circ 39.0'$, 東経 $135^\circ 0.0'$), 沖縄県宮古島地方気象台 (北緯 $24^\circ 47.6'$, 東経 $125^\circ 16.7'$) に関する以下の値を求めよ.

- (1) 11 月 11 日の中央標準時正午 (12:00) における各地の時角, 真太陽時, 太陽高度, 太陽方位角を求めよ.
- (2) 11 月 11 日の各地の日の出・南中・日の入りの中央標準時刻および南中時太陽高度を求めよ

解答例 4.1

11 月 11 日の太陽赤緯 δ は, $-17.266 \text{ rad} = -0.30135^\circ$, 均時差は, 0.2632 h である.

(1)

北海道根室測候所

時角: $0.9689 \text{ h} = 14.533^\circ = 0.25365 \text{ rad}$, 真太陽時: $12.969 \text{ h} = 12 \text{ h } 58 \text{ min}$

太陽高度: $0.48786 \text{ rad} = 27.95^\circ$, 方位角: $0.27472 \text{ rad} = 15.74^\circ$

兵庫県明石天文科学館

時角: $0.2632 \text{ h} = 3.948^\circ = 0.06891 \text{ rad}$, 真太陽時: $12.263 \text{ h} = 12 \text{ h } 16 \text{ min}$

太陽高度: $0.65478 \text{ rad} = 37.52^\circ$, 方位角: $0.08299 \text{ rad} = 4.76^\circ$

沖縄県宮古島地方気象台

時角: $-0.3849 \text{ h} = -5.773^\circ = -0.10077 \text{ rad}$, 真太陽時: $11.615 \text{ h} = 11 \text{ h } 37 \text{ min}$

太陽高度: $0.83018 \text{ rad} = 47.57^\circ$, 方位角: $-0.14285 \text{ rad} = -8.18^\circ$

(2)

北海道根室測候所

日の出・日の入りの時角 ω_0 は $\pm 1.27322 \text{ rad} = \pm 4.86333 \text{ h}$

日の出: 6:10, 南中: 11:02, 日の入り: 15:54

南中時太陽高度: $0.51319 \text{ rad} = 29.40^\circ$

兵庫県明石天文科学館

日の出・日の入りの時角 ω_0 は $\pm 1.35071 \text{ rad} = \pm 5.15934 \text{ h}$

日の出: 6:35, 南中: 11:44, 日の入り: 16:54

南中時太陽高度: $0.657125 \text{ rad} = 37.65^\circ$

沖縄県宮古島地方気象台

日の出・日の入りの時角 ω_0 は $\pm 1.42672 \text{ rad} = \pm 5.44968 \text{ h}$

日の出: 6:56, 南中: 12:23, 日の入り: 17:50

南中時太陽高度: $0.83672 \text{ rad} = 47.94^\circ$

問題 4.2

福岡県福岡管区気象台(北緯 33° 34.9', 東経 130° 22.5')の 2002 年の月別の主な気象観測値を表 E4.1 に示す. 日照時間を変数とした 4.21 式(大槻他(1981)の経験定数), 雲量を変数とした 4.22 式(Black(1956)の経験定数), 気温日較差を変数とした 4.23 式(篠原他(2007)の経験定数)を用いて, 2002 年の福岡管区気象台における全天日射量を推定せよ.

表 E4.1 福岡管区気象台の 2002 年の月別気象観測値

月	気温		雲量 ¹⁾ 平均 (0~10)	日照時間 積算(h)	全天日射量 平均(MJ m ⁻²)
	平均(°C)				
	日最高	日最低			
1	11.1	5.1	6.9	112.7	7.7
2	12.2	4.9	6.2	148.1	12.0
3	16.9	8.7	5.3	201.6	15.9
4	20.8	13.0	7.3	139.5	15.6
5	23.1	16.3	7.2	145.9	15.9
6	27.8	20.3	6.2	210.8	20.1
7	31.5	25.0	7.3	156.3	16.9
8	31.6	24.9	7.0	189.1	17.7
9	28.5	21.2	5.8	201.5	17.2
10	23.0	15.2	5.3	171.2	11.9
11	15.2	7.8	5.9	145.3	9.6
12	12.1	6.1	7.5	79.5	6.2

解答例 4.2

表 E4.2 福岡管区気象台の 2002 年の月別日射関連推定値

月	可照時間 日量(h)	大気外水平面日射量 日量(MJ m ⁻²)	全天日射量 日量(MJ m ⁻²)		
			4.21 式	4.22 式	4.23 式
			1	10.07	19.32
2	10.82	24.10	10.59	10.03	9.95
3	11.83	30.52	14.36	15.08	14.76
4	12.86	36.31	13.60	11.28	16.44
5	13.76	40.14	14.63	12.88	14.90
6	14.21	41.54	18.37	17.28	17.82
7	14.02	40.78	15.22	12.67	14.09
8	13.27	37.77	16.03	12.86	13.70
9	12.28	32.73	15.35	14.79	13.51
10	11.21	26.25	11.58	12.97	11.89
11	10.31	20.66	8.88	9.15	8.70
12	9.80	17.68	5.72	5.13	5.36

問題 4.3

北海道札幌管区気象台(北緯 $43^{\circ} 03.6'$, 東経 $141^{\circ} 19.7'$)の2020年4月9,10,13日の7:00~8:00の日射関連気象観測値を表E4.3に示す. 周辺の地表面のアルベドを0.15と仮定し, 太陽高度 31.8° , 太陽方位角 -70.1° として, 4.31式を用いて東・南・西・北方位の傾斜角 30° 斜面の入射直達・散乱・反射・全天日射量を求めよ.

表 E4.3 札幌管区気象台の2020年4月の7:00~8:00の日射関連気象観測値

日射関連気象要素	2020/4/9	2020/4/10	2020/4/13
日照時間 n (h)	0.0	0.5	1.0
直達日射 S_p (MJ m^{-2})	0.00	0.65	2.91
散乱日射 S_d (MJ m^{-2})	0.32	0.77	0.27
全天日射 S_t (MJ m^{-2})	0.32	1.05	1.63

解答例 4.3

4.31b式より, 斜面太陽高度は, 東斜面 58.9° , 南斜面 36.9° , 西斜面 3.3° , 北斜面 18.2° である. 各斜面の日射入射成分(直達, 散乱, 反射, 全天)は表E4.4の通りである.

表 E4.4 札幌管区気象台の2020年4月の7:00~8:00の斜面日射推定値

入射成分	斜面方位	2020/4/9	2020/4/10	2020/4/13
直達日射	東	0.00	0.56	2.49
	南	0.00	0.39	1.75
	西	0.00	0.04	0.17
	北	0.00	0.20	0.91
散乱日射	東	0.30	0.72	0.25
	南	0.30	0.72	0.25
	西	0.30	0.72	0.25
	北	0.30	0.72	0.25
反射日射	東	0.00	0.01	0.02
	南	0.00	0.01	0.02
	西	0.00	0.01	0.02
	北	0.00	0.01	0.02
全天日射	東	0.30	1.29	2.76
	南	0.30	1.12	2.02
	西	0.30	0.77	0.43
	北	0.30	0.93	1.18

問題 4.4

雲量 $C=0$ の快晴で、太陽高度が 50° の時、標高 500m にある山地の気温が 30°C で、森林の樹冠表面温度が 30°C であったとする。この時の森林樹冠表面の純放射量を求めよ。なお、大気外日射量 S_{po} は太陽定数 $S_0 (=1367 \text{ W m}^{-2})$ と等しいと仮定し、樹冠表面下からの長波放射量や反射日射量は無視できるものと仮定すること。また、大気圧 p_a (hPa) は次式から推定すること(標準大気圧 $p_0 = 1013$ (hPa))。

$$p_a = p_0 \exp(-EL/8200)$$

ここに、EL は標高(m)である。

解答例 4.4

大気透過率は快晴なので 0.75 。大気圧 p_a は上式より 95.31 hPa 。大気路程は 4.18 式より 1.0864 。森林のアルベドは平均的な値 0.15 とする。

直達日射量 S_p は、4.17 式より $S_{po} = 1000.08 \text{ W m}^{-2}$ 。

水平面直達日射量 S_b は、4.15 式より $S_{po} = 866.10 \text{ W m}^{-2}$ 。

散乱日射量 S_d は、4.19 式より $S_{po} = 95.33 \text{ W m}^{-2}$ 。

全天日射量 S_t は、4.16 式より $S_{po} = 961.42 \text{ W m}^{-2}$ 。

反射日射量 S_r は、4.25 式より $S_{po} = 144.21 \text{ W m}^{-2}$ 。

30°C の黒体放射量は、4.1 式より 478.93 W m^{-2} 。

下向き長波放射量 L_a は、4.27 式より $L_a = 404.95 \text{ W m}^{-2}$ 。

上向き長波放射量 L_g は、平均的な射出率 0.97 を使用し、4.27 式より $L_g = 464.56 \text{ W m}^{-2}$ 。

純放射量 R_n は、4.20 式より $R_n = 757.60 \text{ W m}^{-2}$ 。

なお、下向き長波放射に対する樹冠の吸収率(=射出率= 0.97)を考慮した場合は、 $R_n = 745.45 \text{ W m}^{-2}$ 。

第 5 章 演習問題・解答例

問 5.1 混合比と比湿

混合比と比湿の違いを説明しなさい。

解答例 5.1

(湿潤) 空気中の水蒸気の質量と乾燥空気の質量の比が混合比であり、水蒸気の質量と湿潤空気の質量の比が比湿である。

問 5.2 前線や低気圧

以下(1)~(4)のうち、最も妥当なものを選びなさい。

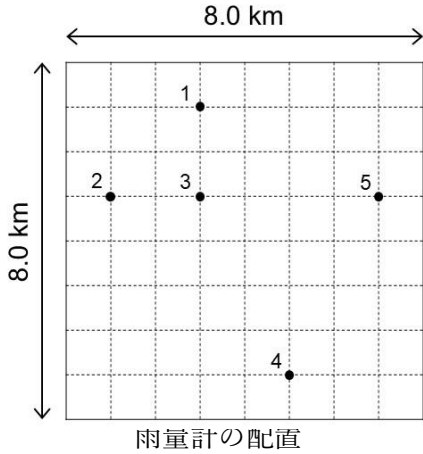
- (1) 温帯低気圧は寒気と暖気が接する所に発生し、偏西風の影響を受けて西から東に移動する。中心の東側には温暖前線が、西側には寒冷前線が張り出し、低気圧の移動に伴って、それぞれ北と南に移動していく。
- (2) 温暖前線では暖気が寒気に乗り上げて急激に上昇し、狭い範囲に強い降水をもたらす。寒冷前線では寒気が暖気の下に潜り込み、暖気をゆっくり押し上げながら移動して広い範囲に弱い降水をもたらす。
- (3) 台風は、赤道を挟む熱帯や亜熱帯の海上で発生した熱帯低気圧のうち、中心付近の最大風速が 32.7 m s^{-1} 以上のものである。中心風速によって、超大型、大型、中型などの階級に分けられる。
- (4) 海より陸地の方が熱容量が大きく、日射の吸収による温度上昇が大きいため、昼間は気温の高い陸上が高気圧となって、陸から海に向けて陸風が生じる。夜間は海面よりも陸面の温度低下が大きいため、逆に海から陸への海風が生じる。

解答例 5.2

正答は(1). (2):暖気が寒気の上をゆっくり上昇していく場合が温暖前線であり、広い範囲に弱い降水をもたらす。一方で、寒気が暖気を急激に押し上げるのが寒冷前線であり、狭い範囲に強い降水をもたらす。(3):台風は北太平洋の南西部(北半球)に発生する熱帯低気圧のうち、最大風速が 17.2 m s^{-1} に達したものであり、風速 15 m s^{-1} 以上となる半径の大きさを 5 つの階級に分けられる。(4):海に比べて陸の熱容量が小さいために昼間は陸の温度上昇の方が大きい。昼間の陸地は海に対して低気圧となって海から陸に向けた海風が生じる。

問 5.3 面積雨量

5 台の雨量計が図のように配置された一辺が 8.0 km の正方形区において、ある日に観測された雨量は地点によって異なった(表). 正方形区の面積雨量を, 算術平均法とティーセン法を用いて求めなさい.

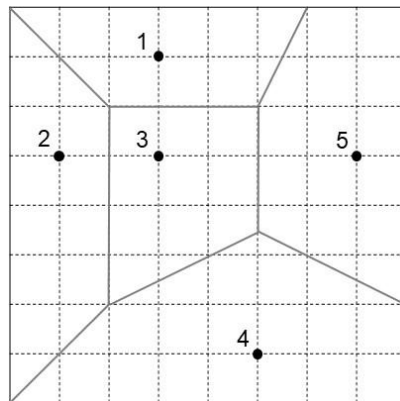


各雨量計で観測された日雨量

地点	1	2	3	4	5
日雨量(mm)	64.0	48.0	42.0	34.0	37.0

解答例 5.3

算術平均雨量は 45.0 mm. ティーセンポリゴンは下図のようになり, 雨量観測点 1~5 の支配面積 (km²) はそれぞれ 9, 12, 9.75, 18.5, 14.75 となるため, ティーセン法による面積雨量として 42.8 mm が求まる.



第 6 章 演習問題・解答例

問題 6.1 林内雨

林内雨とは何か、説明しなさい。

解答例 6.1

林内雨は森林の中に降る雨のことで、樹冠通過雨と樹幹流の 2 つを合わせたもの。または、林外雨から樹冠遮断損失を差し引いたもの。

問題 6.2 樹冠通過雨

樹冠通過雨は林外雨よりも量が少ないことが通常であるが、林外雨よりも多い量が観測されることがある。その理由を説明しなさい。

解答例 6.2

集中滴下点で樹冠通過雨を測定したため。または、霧により樹雨が発生したため。

問題 6.3 雨滴の運動エネルギー

測定面積 5000mm^2 の雨滴計を用いて、林外雨と、森林 A と森林 B の樹冠通過雨の雨滴を測定したところ、下表に示すような雨滴が測定された。

粒径 (mm)	1	2	3	4	5	6	7
林外雨							
雨滴個数	79000	11000	1200	80	3	-	-
落下速度 (m s^{-1})	4.0	6.5	7.9	8.7	9.1	-	-
森林 A の樹冠通過雨							
雨滴個数	33000	4700	1000	500	230	9	6
落下速度 (m s^{-1})	4.0	5.4	5.7	5.8	5.9	5.9	5.9
森林 B の樹冠通過雨							
雨滴個数	33000	4700	1000	500	230	9	6
落下速度 (m s^{-1})	4.0	6.5	7.7	8.2	8.4	8.4	8.4

このとき、(1)森林 A と B はどちらの方が樹高や枝下高が高いと考えられるか。(2)林外雨と樹冠通過雨の雨量 P_{OP} 、 P_{TF} をそれぞれ計算せよ。(3)林外雨と樹冠通過雨の雨滴の運動エネルギーの総量 KE_{OP} 、 $KE_{TF(A)}$ 、 $KE_{TF(B)}$ をそれぞれ計算せよ。

解答例 6.3

(1) 森林 B のほうが高い。

雨滴の落下速度が大きく、雨滴の落下距離が長いと考えられるため。

(2) 林外雨 21.5mm、樹冠通過雨 17.0mm。

式 6.1 を応用し、雨滴の総体積 (mm^3) を測定面積 (mm^2) で割ると雨量 (mm) が計算できる。粒径 d の雨滴の総体積は、 $n_d V_d = n_d (\pi d^3 / 6)$ で計算できるので、

$$P_{\text{OP}} = \frac{1}{A} \sum_{d=1}^7 n_d \left(\frac{\pi}{6} d^3 \right) = \frac{1}{5000} \cdot \frac{\pi}{6} (79000 \cdot 1^3 + 11000 \cdot 2^3 + \dots + 3 \cdot 5^3) = 21.5$$

$$P_{\text{Tf}} = \frac{1}{A} \sum_{d=1}^7 n_d \left(\frac{\pi}{6} d^3 \right) = \frac{1}{5000} \cdot \frac{\pi}{6} (33000 \cdot 1^3 + 4700 \cdot 2^3 + \dots + 6 \cdot 7^3) = 17.0$$

(3) 林外雨が 388.7 J m^{-2} 、森林 A の樹冠通過雨が 352 J m^{-2} 、森林 B の樹冠通過雨が 428.3 J m^{-2} 。

式 6.4 より、落下速度 v_d で落下する粒径 d の雨滴が n_d 個あるとき、それらの雨滴の運動エネルギーの総量は $n_d \cdot (1/2) \cdot \rho_w \cdot (\pi d^3 / 6) \cdot v_d^2$ で計算できるので、

$$\begin{aligned} KE_{\text{OP}} &= \frac{1}{A} \sum_{d=0}^7 n_d \frac{1}{2} \rho_w \left(\frac{\pi}{6} d^3 \right) v_d^2 = \frac{1}{5000 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{\pi \cdot 10^{-6}}{12} \sum_{d=0}^7 n_d d^3 v_d^2 \\ &= \frac{\pi}{5000 \cdot 12} (79000 \cdot 1^3 \cdot 4.0^2 + 11000 \cdot 2^3 \cdot 6.5^2 + \dots + 3 \cdot 5^3 \cdot 9.1^2) = 388.7 \end{aligned}$$

同様に、

$$KE_{\text{Tf(A)}} = \frac{\pi}{5000 \cdot 12} (33000 \cdot 1^3 \cdot 4.0^2 + 4700 \cdot 2^3 \cdot 5.4^2 + \dots + 6 \cdot 7^3 \cdot 5.9^2) = 247.0$$

$$KE_{\text{Tf(B)}} = \frac{\pi}{5000 \cdot 12} (33000 \cdot 1^3 \cdot 4.0^2 + 4700 \cdot 2^3 \cdot 6.5^2 + \dots + 6 \cdot 7^3 \cdot 8.4^2) = 428.3$$

問題 6.4 幹集水比

ある森林に 80mm の雨が降った。胸高直径 10cm と 20cm の樹木で、それぞれ幹集水比が 30、10 であった。どちらの樹木で、多くの樹幹流が発生していたか？

解答例 6.4

胸高直径 20cm の樹木。

式 6.5 から樹幹流体積 V_{sf} を求める。

$$\text{胸高直径 10cm の樹木: } V_{\text{sf}} = 30 \cdot 80 \cdot \left(0.1/2\right)^2 \pi = 18.8$$

$$\text{胸高直径 20cm の樹木: } V_{\text{sf}} = 10 \cdot 80 \cdot \left(0.2/2\right)^2 \pi = 25.1$$

問題 6.5 樹冠遮断プロットによる雨水配分の総ざらい

スギ林に 100m^2 の樹冠遮断プロットを作り、林外雨、樹冠通過雨、樹幹流の観測を 1 年間続けた。プロット内には 15 本のスギがあり、平均胸高直径は 20cm であった。年間の総雨量は林外雨が $1,500\text{mm}$ 、樹冠通過雨が $1,100\text{mm}$ であり、樹幹流量はスギ 1 本当たり 1000 リットルであった。このとき、(1)プロットに降り注いだ樹幹流量を水高で求めよ。(2)このプロットの林分全体の幹集水比を求めよ。(3)このプロットにおける年間の遮断損失量と遮断損失率を求めよ。

解答例 6.5

(1) 150 mm

$$1000(\text{L}) \times 15(\text{本}) / 100(\text{m}^2) = 150$$

(2) 21.2

$$F_{\text{SF}} = 1000 / (1500 \times (0.20/2)^2 \pi) = 21.2$$

(3) 250mm 、 16.7%

$$1500 - 1100 - 150 = 250$$

$$250 / 1500 \times 100 = 16.7$$

第7章 演習問題・解答例

問 7.1 地表面の熱収支

地表面において吸収された正味の放射量(純放射量)の分配先として, 主なものを3つ挙げよ.

解答例 7.1 潜熱フラックス, 顕熱フラックス, 地中熱流量

問題 7.2 ボーエン比

有効エネルギーが同じ条件下で蒸発散量が増加するとボーエン比の値はどのように変化するか, その理由も含めて答えよ.

解答例 7.2

蒸発散量が増加すると潜熱フラックスが増加し, その分顕熱フラックスが減少する. ボーエン比は顕熱フラックスを潜熱フラックスで割った値であるため, その値は減少する.

問題 7.3 水蒸気の輸送

以下の文中の空欄に該当する語句を答えよ. なお, 同じ番号の空欄には同じ語句が入る. 空気中の水蒸気のフラックスは空気中の[(1)]の勾配に水蒸気の輸送に関わる全コンダクタンスを掛けることで求められる. 空気密度や気圧を定数とすると, [(1)]の勾配は[(2)]の勾配の関数として表わされる. 完全湿面である地表面と大気間の水蒸気のフラックスは地表面の[(3)]における[(4)]と大気の[(2)]の差に依存する.

解答例 7.3

(1) 水蒸気密度 (2) 水蒸気圧 (3) 温度 (4) 飽和水蒸気圧

問 7.4 顕熱・潜熱フラックスの空気力学的な制御

地面修正量が 5 m, 粗度長が 0.5 m の森林において, 高さ 10 m における風速が 5 m s^{-1} だった時, 同高度における空気力学的コンダクタンスを求めよ(小数点第3位を四捨五入).

解答例 7.4

7.24 式から

$$g_a = \frac{k^2 u(z)}{\left(\ln \frac{z-d}{z_0}\right)^2} = \frac{0.4^2 \times 5}{\left(\ln \frac{10-5}{0.5}\right)^2} = 0.15 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$$

問題 7.5 水収支法

ある流域において、年降水量が 1700 mm、年流出量が 900 mm、年の前後での流域内の貯留水の変化量が 0 mm だった場合の年蒸発散量を求めよ。

解答例 7.5

7.34 式から

$$E = P - (Q + \Delta S) = 1700 - 900 = 800 \text{ (mm)}$$

第 8 章 演習問題・解答例

問 8.1 経験モデルによる蒸発散量の推定

Zhang 式(8.1 式)を利用して, 我が国の平均的な年降水量(1600 mm)及び年平均気温(16°C)での蒸発散量を求めよ. また式(8.2 式)を利用して, 改良 Zhang 式で蒸発散量を算定し, 両者を比較しなさい.

解答例 8.1

8.1 式で E_0 は 1410mm であり, 与えられた年降水量(=1600 mm)では, 蒸発散量 ET は 1134.1mm となる. 8.2 式を用いると E_0 は 977.1mm となり, 921.1mm となる. 改良 Zhang 式を用いると 213mm 小さくなる.

問 8.2 蒸発速度の蒸発潜熱への変換

蒸発散速度 $0.15 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を蒸発潜熱 W m^{-2} に変換しなさい. 水の気化潜熱 λ には, 2454 J g^{-1} を用いよ.

解答例 8.2

蒸発速度と気化潜熱の積より, 368.1 W m^{-2} となる.

問 8.3 Penman-Monteith 式を用いた蒸発散量の計算

草地と森林の蒸発散量 λE を, Penman-Monteith 式を利用して, 樹冠面が濡れている時と濡れていない時, それぞれ計算せよ. なお, 森林と草地で大気条件は同じとし, 大気飽差は 0.2 kPa とし, 有効放射量は 100 W m^{-2} とする. 飽和水蒸気圧曲線の勾配, 空気の密度, 定圧比熱, および乾湿計定数にはそれぞれ, $\delta=0.145 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\rho=1.204 \text{ kg m}^{-3}$, $C_p=1010 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\gamma=0.066 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ (それぞれ 20°C の時の値)を利用する. 空気力学的抵抗は, 森林で 10 s m^{-1} (植生高 20m , 風速 2 m s^{-1} を想定), 草地で 100 s m^{-1} (植生高 0.15m , 風速 2 m s^{-1} を想定)とする.

解答例 8.3

与えられたそれぞれの値を 8.3 式に代入することで, 森林では, 樹冠が濡れている ($r_c=0$) とき $\lambda E=184 \text{ W m}^{-2}$, 乾いている ($r_c=60$) とき $\lambda E=64 \text{ W m}^{-2}$ となる. 草地では, 樹冠が濡れている ($r_c=0$) とき $\lambda E=80 \text{ W m}^{-2}$, 乾いている ($r_c=60$) とき $\lambda E=68 \text{ W m}^{-2}$ となる. 樹冠が濡れている時 ($r_c=0$) に, 森林と草地の λE の差が大きい.

第9章 演習問題・解答例

問題 9.1 樹幹流量の計測

ある森林では立木密度が 1000 本/ha であり、林分平均樹幹流率が 10%である。この森林の平均的な樹木で貯留式タンクを用いて樹幹流を計測する場合、降水量 100 mm のイベントをオーバーフローなく計測するためにはどれくらいの大きさのタンクが必要か？

解答例 9.1

降水量 100 mm (= 0.1 m) のイベントでは 1ha に $0.1 \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 10\%$ で 100 m^3 の樹幹流量がもたらされる。1 ha に 1000 本の木があるため、(平均的な樹木での) 1 本あたりの樹幹流量は $0.1 \text{ m}^3 (= 100,000 \text{ cm}^3)$ となる。つまり 100 L のタンクが必要となる。

問題 9.2 蒸発散の年変動

降水量が十分なある年において、竹林の蒸散量は針葉樹林より 20%多かったが、遮断蒸発は 50%少なく、両者を合わせた蒸発散は、針葉樹林と竹林でまったく同じであった。この年よりもさらに降水量が多い年では、針葉樹林と竹林、どちらの蒸発散が多くなると予想されるか？なお、両者の林床面蒸発は無視できるほど小さいと仮定する。

解答例 9.2

針葉樹林。降水量が多い年では、蒸散に比べて遮断蒸発の割合が大きくなると予想される。遮断蒸発量は竹林よりも針葉樹林の方が多いため。

問題 9.3 通水コンダクタンス

土壌のポテンシャルが -0.5 MPa で、葉のポテンシャルが -1.5 MPa であった・樹液流計測に基づいて水の輸送量を計測したところ、 $1.2 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。SPAC モデルで表現される通水コンダクタンスはどれくらいか？

解答例 9.3

土壌及び葉のポテンシャル、水の輸送量を式(9.7)に代入すると、 $1.2 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ となる。

問題 9.4 間伐による蒸発散量の変化

ある森林において、蒸発散に占める割合は、蒸散で 50%、遮断蒸発で 40%、林床面蒸発が 10%であった。間伐により蒸散量は 20%、遮断蒸発量は 10%それぞれ低下し、林床面蒸発は 50%上昇した。間伐後の蒸散は間伐前の蒸散の何%となったか？

解答例 9.4

間伐前の蒸発散を 100 とすると, 蒸散は 50, 遮断蒸発は 40, 林床面蒸発は 10 である. それぞれ間伐による変化を考慮すると, 蒸散は 40, 遮断蒸発は 36, 林床面蒸発は 15 となり, 合計 91 となる. 間伐前の蒸散が 100 であるため, 間伐後の蒸発散は間伐前の 91% である.

第 10 章 演習問題・解答例

問 10.1

下記の用語の意味を簡潔に説明しなさい

- (1) 飽和側方流
- (2) 飽和地表流
- (3) パイプ流
- (4) マニング式
- (5) 浮遊砂

解答例 10.1

(1) 降雨時に土層を鉛直浸透した水が、基岩面などの透水性が低い面に達した後に、飽和状態で地中を斜面下方に側方移動する流れ。

(2) 降水時に斜面土層内から地表に現れ、飽和状態で流下する地表流。発生形態からホートン型表面流とは区別される。

(3) 降雨時に、土壌中で植物根の枯死・腐朽や地中の小動物の通路などをもとに形成された孔径が数 cm 程度に達する特に大きなパイプ状の経路を通過する飽和側方流のこと。特に流速が大きくなることから飽和側方流の重要性を増大させている。

(4) 開水路において流量を計算する経験式の一つ。流量は径深と動水勾配に比例し、粗度係数に反比例する。式が簡単で精度が高いため、よく用いられる。

(5) 流量の増加に伴って、溪床から跳躍し、流れの乱れに支持されて落下、停止しにくくなり、浮遊状態で輸送される粒径の小さい砂礫のこと。輸送される状態のことを指すため、発生は粒径だけでなく、流量や勾配にも依存する。

問題 10.2

(1) 渓流水が 3 つの End-member の混合によって形成されていることが判明している。2 つのトレーサー濃度が表の通りであるとき、2 つの時刻 t1, t2 の渓流水において 3 成分の寄与率を計算し、それぞれの時刻で最も寄与が大きい End-member を選びなさい。

	EM_a	EM_b	EM_c	渓流水 t1	渓流水 t2
$\delta^{18}\text{O}$	-5	-8	-6	-7.5	-6.1
SiO_2	2	8	15	8.1	9.7

(2) 渓流水が 3 つの End-member の混合によって形成されていることが判明しているが、下記 2 つのトレーサーではうまく 3 成分分離が出来なかった。この理由を考えるとともに、この問題を解消するにはなにを行うべきかを記しなさい。

	EM_a	EM_b	EM_c
$\delta^{18}\text{O}$	-5	-8	-6
SiO_2	5	2	4

解答例 10.2

(1) 3成分分離は 10.4 式および 10.5 式にて $n=3$, $m=2$ として以下の式を用いる.

$$f_a + f_b + f_c = 1$$

$$C1_a f_a + C1_b f_b + C1_c f_c = C1_s$$

$$C2_a f_a + C2_b f_b + C2_c f_c = C2_s$$

ここで, $C1$ は $\delta^{18}\text{O}$, $C2$ は SiO_2 濃度である.

この連立方程式を解くと, (f_a, f_b, f_c) は $t1 = (0.1, 0.8, 0.1)$, $t2 = (0.3, 0.2, 0.5)$ となる. 従って, 最も寄与が大きい End-member は $t1$ では EM_b, $t2$ では EM_c である.

(2) この2つのトレーサーで Mixing diagram を作成すると, 3つの End-member が1本の直線上にプロットされるため, 多角形を構成できず, 3成分分離を実行できない. 3つの End-member は正しいことが判明しているため, 三角形を構成できる別のトレーサーを用いた検討を行う必要がある.

問 10.3

流路幅 2 m, 河道勾配 0.01 の矩形断面を持つ水路において, 水深 30 cm で水が流れている. 粗度係数として, コンクリートを想定した場合の 0.015, および砂利を想定した場合の 0.025 を用い, それぞれ場合の平均流速 (m/s) を求めよ. ただし, 小数第 3 位まで有効とする.

解答例 10.3

径深 R は

$$R = (2 \cdot 0.3) / (0.3 + 2 + 0.3) = 0.231$$

コンクリートの場合

$$v = (1/0.015) \cdot 0.23^{0.667} \cdot 0.01^{0.5} = 2.509$$

砂利の場合

$$v = (1/0.025) \cdot 0.23^{0.667} \cdot 0.01^{0.5} = 1.505$$

なお, マニングの粗度係数の一覧については, 下記などを参照 (2022/7/25 閲覧).

https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/jigyousya/technical_information/consultant/binran/etsuran/qgl8v10000005ecr-att/sekkei03_04.pdf

第 11 章 演習問題・解答例

問題 11.1 合理式によるピーク流量とそのときの水深の推定

流域面積 $A=5\text{km}^2$ の流域に、 $r_p=30\text{mm h}^{-1}$ の降雨があった。流出係数 $f_p=0.7$ であるときピーク流量 Q を算出なさい。また、この流量が流れる溪流の川幅 B は 7m の矩形断面流路であり、マンニングの粗度係数 $n=0.05\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 、河床勾配 i_0 は 0.10 の流路であり、この時の水深 h を推定なさい。ただし、流量と溪流断面勾配の関係は、以下のマンニング式を用い、流量 Q 、流速 v 、流路断面積 A_c 、マンニングの粗度係数 n 、河床勾配 i_0 、径深 hr 、水深 h 、川幅 B とする場合、以下の式で表される。ただし、径深と水深は近似できるものとする。

$$Q = vA_c = \frac{\sqrt{i_0}}{n} hr^{2/3} Bh \quad (\text{演習の式 1})$$

解答例 11.1

本文中の式(11.5)から、合理式による流量は以下のように算出される。

$$Q = (1/3.6) \times 0.7 \times 30 \times 5 = 29\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ となる。}$$

算出された流量と、上記(演習の式 1)式を用いる。(演習 1)式のマンニング式において、径深と水深は近似できるものとすることから、 $hr=h$ とする。その結果、(演習 1)式は以下のように変形できる。

$$Q = \frac{\sqrt{i_0}}{n} h^{5/3} B \quad (\text{演習の式 2})$$

この式にそれぞれを代入して計算すると、 $Q=44.27h^{5/3}$ となり、 $h^{5/3}=0.66$ となる。結果として、水深 h は 0.78m が得られる。このことから、降雨時の流量の増加とともに水深の増加が推定できる。

問題 11.2 貯留関数によるパラメータ

貯留関数において、貯留量 S に対して有効降雨量と流出量の関係は、本文式(11.7)および(11.8)から以下のように決定される。

$$\frac{dS}{dt} = R_e - Q \quad (11.7)$$

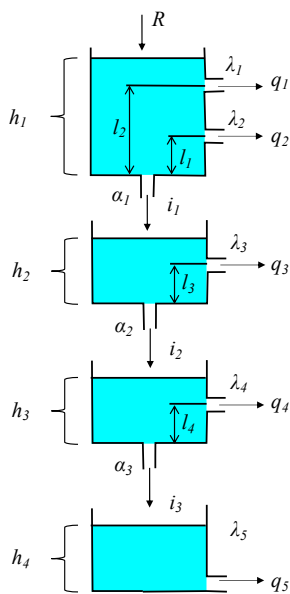
$$S = kQ^p \quad (11.8)$$

この流出モデルにおいて、流域における条件(植生、土壌、地形、地質など)の違いは、どのパラメータの大小などに影響するか述べよ。

解答例 11.2

モデルのパラメータは観測される流量に対して、モデルによる計算結果の適合性を調整する。本モデルでは、流量に対してパラメータを与えることで貯留量を推定することが可能である。そこで、流域の諸条件(植生、土壌、地形、地質)は、流量にかかる係数 k と p に関係してくる。

問題 11.3 タンクモデルによる流出計算



ここでは、本文中の図 11.5 の 2 段タンクから発展して、下記の図のような直列 4 段のタンクモデルを考える。

この直列 4 段モデルのパラメータと初期貯留水深が表 1 のように与えられている。このタンクモデルを用いて、表 2 に示した 14 日間の日降雨量から、総日流出高 (mm d⁻¹) およびピーク日流出高 (mm d⁻¹) を計算しなさい。ただし、蒸発散量については、降雨日については 0mm d⁻¹、無降雨日については 4mm d⁻¹ とする。

表 1 タンクモデルの各パラメータと初期貯留水深

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	α_1	α_2	α_3
0.2	0.2	0.05	0.01	0.001	0.2	0.05	0.01
l_1	l_2	l_3	l_4	h_1	h_2	h_3	h_4
40	15	15	15	5	20	50	300

注) $\lambda_1 \sim \lambda_5$: 流出孔の係数(1 d⁻¹), $\alpha_1 \sim \alpha_3$: 浸透孔の係数(1 d⁻¹)

$l_1 \sim l_4$: 流出孔の高さ(mm), $h_1 \sim h_4$: 初期貯留水深(mm)

表 2 日降水量

日付	1	2	3	4	5	6	7	8	9
日降水量	12.0	55.0	10.5	30.0	2.0	0.0	0.0	4.5	6.0

日付	10	11	12	13	14
日降水量	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0

注) 日降水量の単位は mm d⁻¹

解答例 11.3

降水量 R, 蒸発散量 E として、計算当該日を t 日目、全日までの計算で得られる水深残高を $h'(i-1)$ とするとき、第一段タンク内の貯留高 h_1 を用いると、以下の式がなり立つ。ただし、蒸発散量 E については、降雨に対して、降雨日と無降雨日の数値を当てはめる。

$$h_1(t) = h'_1(t-1) + P(t) - E(t) \quad (\text{演習の式 3})$$

この日の 1 段目のタンクの流出量と 1 段タンクから 2 段タンクへの浸透量は、以下のように算出される。

$$q_1(t) = \lambda_1 (h_1(t) - l_1) \quad (\text{演習の式 4})$$

$$q_2(t) = \lambda_2 (h_1(t) - l_2) \quad (\text{演習の式 5})$$

$h_1(t) - l_1$ が負の値になる場合は 0 となる。

$$i_1(t) = \alpha_1 S(t) \quad (\text{演習の式 6})$$

この日の水深残高は、

$$S'_1(t) = S_1(t) - q_1(t) - q_2(t) - i_1(t) \quad (\text{演習の式 7})$$

第二段以下のタンクについては、上段タンクから浸透量をタンクへの入力として同時に計算を行う。たとえば、第二タンクについては、上記(演習の式 3)を 2 段タンク用に置き換える。

$$h_2(t) = h'_2(t-1) + i_1(t) \quad (\text{演習の式 8})$$

これらを繰り返して、 $q_1 \sim q_5$ までの計算を行い、当日の流出量の合計値を計算する。

蒸発散量については、第一タンクの貯留高が 0 になった場合、第二タンクから差し引くものとする。

以上の計算から、14 日間の総降雨量 123.0mm に対して、流出量は 75.3mm、ピーク流量は 18.0mm となった。

問題 11.4 基本高水について

基本高水と計画高水の違いを説明しなさい。

解答例 11.4

基本高水とは、対象河川の基本基準点において洪水防御計画の基本となる流量であり、ダムや遊水地の貯留施設における流量調整を受けない状態で河川を流下する流量をハイドログラフもしくはピーク流量である。

計画高水とは、計画基準点を通過するピーク流量やハイドログラフのうち、流量貯留施設等で流量調整を受け、河川を安全に流下させることができる流量である。

第 12 章 演習問題・解答例

問題 12.1

森林土壌 100 cm³ 採土して土壌のみの重量を測定し、112.5 g を得た。絶乾重量は 82.5 g で、固相体積が 30 cm³ であった。含水比、体積含水率、飽和度を求めよ。なお、水の密度は 1 g cm⁻³ とする。

解答例 12.1

液相の重量: $W_W = 112.5 - 82.5 = 30.0 \text{ g}$, 液相の体積: $V_W = \frac{30.0 \text{ g}}{(1 \text{ g/cm}^3)} = 30.0 \text{ cm}^3$

$$w = \frac{W_W}{W_S} = \frac{30.0 \text{ g}}{82.5 \text{ g}} = 0.363636 \approx 0.36$$

$$\theta = \frac{V_W}{V} = \frac{30.0 \text{ g} / (1 \text{ g/cm}^3)}{100 \text{ cm}^3} = 0.3$$

$$S = \frac{V_W}{V_V} = \frac{30 \text{ cm}^3}{70 \text{ cm}^3} = 0.4285 \approx 0.43$$

三者とも単位は無次元で割合として表される。

問題 12.2

圧力水頭 -1000 cmH₂O のとき、単位体積当たりのマトリックポテンシャルはいくらか。

解答例 12.2

単位体積当たりのマトリックポテンシャル = 圧力水頭 × 重力加速度 $9.8 \text{ m/s}^2 = -98 \text{ kPa}$

問題 12.3

晴天が続く土壌深 20 cm のマトリックポテンシャル -24.5 kPa の時の全ポテンシャルを求めよ。地下 1 m の水面を基準とし、一般的な森林土壌なので、圧ポテンシャルと浸透ポテンシャルはゼロとする。

解答例 12.3

$$\begin{aligned} \psi_t &= \psi_g + \psi_m \\ &= 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 0.8 \text{ m} + (-24.5 \text{ kPa}) = 0.8 \text{ kPa} - 24.5 \text{ kPa} = -23.7 \text{ kPa} \end{aligned}$$

問題 12.4

図 12.10 において高さが異なる2つバケツが長さ L の飽和した土をもつ円筒の両端にあるときの流量 Q が発生した. 円筒内土壌の飽和透水係数を求めよ. ただし, $\Delta h = (h_1 - h_2) = 30 \text{ cm}$, $L = 30 \text{ cm}$, 円筒断面積 $A = 19.6 \text{ cm}^2$, 流量 $Q = 20 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ であった.

解答例 12.4

まず流量 q_1 を求め, ダルシー式に数値を代入し, 単位時間当たりの長さで飽和透水係数を求める.

$$q_1 = \frac{Q}{A} = \frac{20}{19.6} \cdot \frac{1}{60} = 0.017 \text{ (cm/s)} = -K_s \cdot \frac{-0.3}{0.3}$$

$$K_s = 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$$

問題 12.5

不飽和透水係数と圧力水頭の関係を表した図 12.11 において, 圧力水頭が減少すると指数関数的に透水性が落ちるのはなぜか.

解答例 12.5

団粒構造(図 12. 3)の二次粒子のレベルでメニスカス(二次粒子間でできるが表面張力)と毛管水(太い間隙含む)がある場合の連続した土壌水と, 水分が減少してシルト粒子や粘土集合体レベルにおけるメニスカスと毛管水(細い間隙のみ)では水の通りやすさが違うことと, 粘土集合体からとなり合う一次粒子のメニスカスなどの連続する水の距離や水の連続性が水分減少で大きく低下するため.

第 13 章 演習問題・解答例

問題 13.1

不圧地下水と被圧地下水のそれぞれに関し、存在形態と涵養プロセスについて説明しなさい。

解答例 13.1

13 章 1 項の記述の通り。

問題 13.2

風化した花崗岩の透水性を降雨強度と比較して説明しなさい。

解答例 13.2

図 13.2 によると、かなり風化が進んだ D_L 級花崗岩の透水係数の平均値はおおむね $5 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ である。単位を変換すれば $3 \text{ mm (10min)}^{-1}$ や 18 mm h^{-1} となるから、豪雨時以外には降雨強度を上回る値となる。一方、風化の度合いが相対的に小さい C_L 級花崗岩の透水係数の平均値はおおむね $2 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ である。単位を変換すれば $0.12 \text{ mm (10min)}^{-1}$ や 0.72 mm h^{-1} となるから、小規模降雨時であっても降雨強度を下回る値である。ただし、1 年間の値に換算すれば $6,300 \text{ mm year}^{-1}$ であり、年間降水量を上回る値となる。よって、厚い土壌層の存在などによって降雨の浸透強度が十分に平準化されれば、かなりの量の雨水が風化基岩内に浸透することが考えられる。

このような風化基岩の透水性は、風化基岩内において無視できない地下水の涵養や流動が起きているという、図 13.8 や図 13.9 に示した観測結果と整合している。

第 14 章 演習問題・解答例

問題 14.1

多量必須元素 9 つを答え、それらを大気由来と岩石由来に分けなさい。

解答例 14.1

水素 (H), 炭素 (C), 酸素 (O), 窒素 (N), カルシウム (Ca), カリウム (K), マグネシウム (Mg), 硫黄 (S), リン (P)

大気由来:水素 (H), 炭素 (C), 酸素 (O), 窒素 (N),

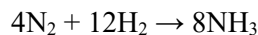
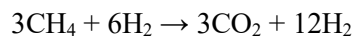
岩石由来:カルシウム (Ca), カリウム (K), マグネシウム (Mg), 硫黄 (S), リン (P)

問 14.2

大気から陸地への窒素の流入(インプット)に対しての、人為的影響を説明しなさい。

解答例 14.2

大気中の窒素ガス(N₂)の固定量が、人間活動により増加した。1つは、マメ科植物や早生樹であるハンノキなど、根粒菌が共生する植生の分布拡大により、生物的窒素固定量が増加した。もう1つは、肥料として利用するために、水素と窒素を結合してアンモニアを合成し(ハーバー・ボッシュ法、以下式)、人工的に窒素固定を行うようになった。人工的窒素固定量は、生物的窒素固定量(自然と人為的の両方を含む)と雷による窒素固定量を合わせた量よりも多い。(14.2.2.を参照)



大気からの窒素沈着量も、人間活動により増加した。化石燃料の燃焼により、大気中の窒素化合物が増加し、その結果窒素沈着量も増加している。

問題 14.3

森林での栄養塩の乾性沈着量を測定するためには、林外での湿性沈着量(降雨時にのみ測定)に加え、どのような項目を測定する必要があるか説明しなさい。

解答例 14.3

降雨は、森林内で樹冠通過雨や樹幹流として林内に到達する。樹木に乾性沈着した栄養塩は、降水に洗脱されるため、林外雨に比べ、樹冠通過雨や樹幹流の栄養塩濃度が高くなる傾向がある。そこで、樹冠通過雨・樹幹流の栄養塩量と林外雨の栄養塩量の差を用いて乾性沈着量を推定した

いところだが、栄養塩の一部は樹冠で吸収・吸着されること、降水が樹冠を通過するときに葉や枝から栄養塩が溶脱されることも考慮しなければならない。乾性沈着量は、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{乾性沈着量} &= (\text{樹冠通過雨}^* + \text{樹幹流}^* + \text{吸収・吸着量}) \\ &\quad - (\text{湿性沈着量} + \text{溶脱量}) \times \text{含まれる栄養塩量} \end{aligned}$$

したがって、樹冠通過雨と樹幹流の栄養塩量と、樹冠における吸収・吸着量と溶脱量を測定する必要がある。ただし、吸収・吸着量と溶脱量の測定は難しい。

第 15 章 演習問題・解答例

問題 15.1 炭素循環の基礎

陸域生態系における炭素循環を表す以下の略語とその関係について、説明しなさい。[GPP, NPP, NEP, NEE, RE, R_a , R_h]

解答例 15.1

本文 15.1 節を参照

問題 15.2 気孔コンダクタンスと細胞間隙二酸化炭素濃度

個葉の光合成・蒸散速度を測定した。 $A = 12.0$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $E = 4.5$ ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $w_i = 0.045$ (mol mol^{-1}), $w_a = 0.020$ (mol mol^{-1}), $c_a = 380$ ($\mu\text{mol mol}^{-1} = \text{ppm}$), $g_{bw} = 1.42$ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) のとき、気孔コンダクタンス g_{sw} ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) と細胞間隙 CO_2 濃度 c_i ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) を計算しなさい。簡易計算のため、式 15.8 および式 15.9 で左辺補正項は無視してもよい。

解答例 15.2

$$g_{sw} = 0.206 \text{ (mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}, c_i = 275 \text{ (}\mu\text{mol mol}^{-1}\text{)}$$

式 15.8 および 15.9 に数値を代入して解く。その際、 E の単位を $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に変換するのを忘れないようにする。

問 15.3 呼吸の温度依存

葉温 25°C のとき、葉面積当たり葉呼吸速度が $1.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。 Q_{10} 式の Q_{10} が 2, Arrhenius 式の ΔH_a が 50,000 の場合、それぞれの式を用いて、葉温 34°C の時の呼吸速度を推定しなさい。

解答例 15.3

$$Q_{10} \text{ 式: } 1.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}, \text{ Arrhenius 式: } 1.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

式 15.12, 式 15.13 に数値を代入する。温度の増加とともに指数関数的に呼吸速度が増加する。Arrhenius 式のほうが高温での増加が若干緩やかとなる。

問 15.4 GPP の単位変換

表 15.1 によると、熱帯林の面積は 17.5 億 ha で、GPP は $40.8 \times 10^{15} \text{ gC yr}^{-1}$ である。日中を 12 時間として、熱帯林における単位土地面積当たりの日中平均群落総光合成速度を $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の単位で求めなさい。

解答例 15.4

日中平均群落総光合成速度 $12.3\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

問 15.5 様々な森林と降水量の関係

なぜ降水量が十分ある地域にしか森林が成立しないのか, 説明しなさい.

解答例 15.5

本文 15 章はじめ, および 15.5 節を参照.

第 16 章 演習問題・解答例

問題 16.1 地形と気象因子による流出量への影響

本章においては、森林の土壌・植生が流出量に及ぼす影響を論じてきた。また地質による影響についても 10 章で若干言及している。これらの因子の他にも気象や地形も流出量に影響を及ぼす。気象因子の中の降水量と地形因子の中の標高による影響について、それぞれ以下の論文を参照するなどして論ぜよ。

- ・鈴木賢哉・田中隆文(2010) : 量水観測試験における植生タイプ以外の要因を含む多変量解析による影響評価, 水文・水資源学会誌, 23. 312-322
DOI: 10.3178/jjshwr.23.312
- ・玉井幸治(2020) : 山地森林域における積雪・融雪が森林流域からの流出特性に及ぼす影響—標高による効果と森林樹木の被覆による効果—, 水利科学, 376. 66-83
DOI: 10.20820/suirikagaku.64.5_66

解答例 16.1

問に例示した論文を参照した場合の回答の一例を以下に示す。

降水量: 鈴木・田中(2010)は気象因子のうちの降水量, 森林植生の状態を示す因子として植生タイプ, 森林土壌の状態, 森林施業による森林土壌の変化を示す指標として施業の方法の 4 つの項目に着目し, 138 流域における単独流域法での施業によって変化した流出量への影響度を数量化I類によって比較した。流出変化量への影響度は, 降水量, 施業の方法, 森林土壌の状態, 植生タイプの順で大きかった。

標高: 玉井(2020)は地形・地質のうち標高に着目し, 宝川試験地4流域の融雪流出量と 9~10 月の降雨による流出量を並行流域法によって比較した。融雪と降雨による流出量の両方とも, 標高の高い流域からの流出量が多い傾向にあった。また流域内の最終標高が1m 高くなると融雪流出が 0.07~0.09 日の割合で遅くなる結果も示されていた。

問題 16.2 森林による水源涵養機能保全のための森林管理

本章においては、森林の水源涵養機能は土壌による働きが大きいことが示された。一方で、木材生産機能も、森林の重要な機能である。明治以降「過度な森林利用によって林地が荒廃していた時代には災害が多かったこと」、「樹木根系には斜面崩壊を抑制する機能のあること」が報告されている。このことを踏まえ、日本森林学会誌、水文・水資源学会誌、森林総合研究所研究報告などの学術雑誌の論文 2 報以上を参照し、森林の水源涵養機能と木材生産機能両立のための森林管理について論ぜよ。

解答例 16.2

本課題に関しては、人によって多様な考えがありうるので、正解は提示しない。論文 2 報以上を参照し、それらの結果や結論を根拠に、自身の考えを展開すること。なお、本課題に関する論文には、以下のようなものがある。

例:「明治以降における森林利用と災害史のレビュー」

多田 泰之 (2018) : 国土の変遷と災害, 水利科学, **363**. 121-137. DOI : 10.20820/suirikagaku.62.4_121

例:「樹木根系による斜面崩壊を抑制する機能」

執印康裕他 (2009) : 分布型表層崩壊モデルによる樹木根系の崩壊防止機能の定量的評価について, 日本緑化工学会誌, **35**. 9-14. DOI: 10.7211/jjsrt.35.9

例:「木材生産, 斜面崩壊抑制, 生物多様性を考慮した林地ゾーニング手法の一例を提示」

伊藤哲他 (2013) : 木材生産性, 土砂流出リスク及び溪畔林保全を考慮した自然林再生のための小集水域ゾーニング, 景観生態学, **18(2)**. 139-147 DOI: 10.5738/jale.18.139