

1. 気象計測と計測機器

植山 雅仁

1. 1 SI 単位とトレーサビリティ

気象計測に限らず計測において重要なことは、「誰がどこで測っても、計測結果を相互に比較することができる」ことである。そのためには、国際的に統一された単位系の利用と機器の正確な校正・標準化が必要となる。

国際単位系 (International System of Unit; SI 単位系)

SI 単位系では、自然界のさまざまな諸変量を、7つの基本単位の組み合わせで表現する。2019年5月以降、これらの基礎単位を基礎物理定数から導出できる新しいSIの定義が施行される(臼田, 2018)。

7つの基本単位：

長さ：メートル (m) [定義：光が真空中を単位時間で伝わる長さ]

質量：キログラム (kg) [定義：長さ、時間の定義とプランク定数からの導出]

時間：秒 (s) [定義：セシウム 133 原子の周波数]

電流：アンペア (A) [定義：電子1個の持つ電気の大きさ($1.602176634 \times 10^{-19}$ クーロン)から導出]

熱力学温度：ケルビン (K) [定義：時間、長さ、質量の定義とボルツマン定数から導出]

旧定義：水の三重点温度(273.16 K)を $1/273.16$ したもの

* ボルツマン定数：1 K が何 J のエネルギーに相当するか定数 $[J K^{-1} = kg m^2 s^{-2} K^{-1}]$

物質質量：モル (mol) [定義：アボガドロ数]

光度：カンデラ (cd) [定義：周波数 540×10^{12} Hz の単色光の発光効率]

トレーサビリティ

トレーサビリティとは、日本工業規格(Japanese Industrial Standard; JIS)により「不確かさがすべて表記された切れ目のない比較の連鎖によって、決められた基準に結びつけられ得る測定結果または標準の値の性質。基準は通常、国家標準または、国際標準」と定義されている。例えばトレーサビリティでつながっている温度計は、国際温度目盛りと補間温度計による国際標準（一次標準器）に基づき校正された二次標準器と校正の連鎖の中につながっている。言い換えれば、トレーサビリティでつながっているすべての温度計は何段階かの比較を伴って、国際温度目盛りと校正により繋がっており、精度が保証されている。

1. 2. 温度

温度計測機器

a. 液体封入温度計

原理：液体の膨張を利用（アルコール、水銀）

利点：取扱いが容易

欠点：破損しやすい、自動記録できない

測定機器：アスマン乾湿計

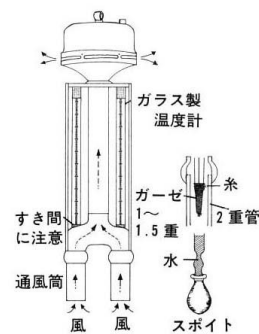


図 1. アスマン乾湿計

b. 熱電対温度計

原理：異金属接合部の熱起電力（ゼーバック効果）

利点：測温部を小さくできる、自動記録できる

欠点：微電圧を計測するためノイズが乗る場合がある

測定機器：銅—コンスタンタン熱電対

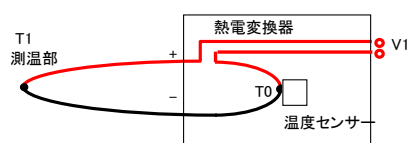


図 2. 熱電対温度計の回路

c. 電気抵抗温度計

原理：金属・半導体の電気抵抗

利点：取扱いが容易、自動記録できる

欠点：自己発熱、サーミスタを利用する場合は経年劣化

測定機器：サーミスタ温度計、白金抵抗温度計

d. 放射温度計

原理：物体の熱放射量

利点：非接触で計測可能、自動記録できる

欠点：射出率が既知でないといけない

気温を測定する際の注意

a. シェルター

測温部が直射日光や雨・雪にさらされると正しく気温が測定できないため、測温部をシェルター内に取り付ける。シェルターによる輻射熱の影響を低減するためシェルターを2重とし、外側のシェルターには高反射率の素材を利用する。

b. 通風

常に新鮮な外気を測温部にあてるために、電動ファン等でシェルター内を通気する。

ステファン・ボルツマンの法則

ある表面温度 (T_{surf} ; 単位は絶対温度) の物体から射出される長波放射量 (L) は、ステファン・ボルツマン (Stefan-Boltzmann) の法則を用いて以下のように計算できる。

$$L = \epsilon \sigma T_{surf}^4$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)、 ϵ は射出率を表す。放射温度計では、長波放射量を計測し、既知の射出率を用いて対象とする物体の表面温度を計測する。

表 1. 様々な地表面の射出率 (近藤, 2000)

地表面	射出率
土壌	0.95~0.98
アスファルト舗装	0.96
コンクリート	0.96
積雪	0.97
海面	0.96
森林	1.00
芝生	0.98

地球規模での温暖化

地表面近傍の気温は、19 世紀後半以降上昇している。1880~2012 年の間で、 0.85°C ($0.65 \sim 1.06^\circ\text{C}$) 昇温した (IPCC, 2013; 第 5 次報告書)。

観測された昇温は、都市ヒートアイランドや土地被覆の変化による観測値の影響を考慮しても有意である (IPCC, 2013; 第 5 次報告書)。

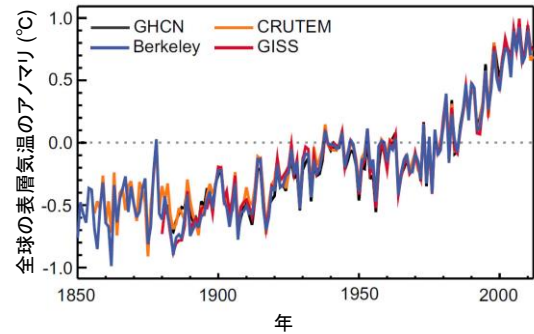


図 3. 全球の表層気温のアノマリ
1961-1990 年に対する相対値 (IPCC, 2013)

1.3. 降水量

降水量測機器

a. 転倒ます型雨量計

原理：転倒ますの転倒回数

注意：強風時、降雪時

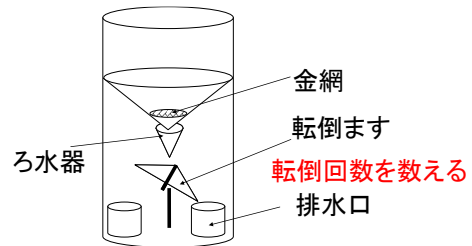


図 4. 転倒ます型雨量計

地球規模での降水量の変動

全球の陸上の降水量が変化したという確証は、中程度か低い (IPCC, 2013; 第 5 次報告書)。

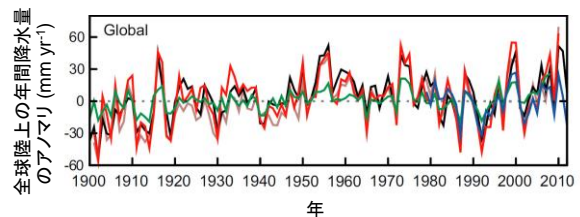


図 5. 全球陸上の年間降水量のアノマリ
1981-2000 年に対する相対値 (IPCC, 2013)

1.4. 湿度・水蒸気

水蒸気諸量

飽和水蒸気圧 (e_{sat}) : ある気温の大気を含むことできる水蒸気圧 (hPa)

テューテンズの式

$$e_{\text{sat}} = 6.1078 \exp \left[\frac{a(T - 273.15)}{T - b} \right]$$

$T > 273.15 \text{ K}$: $a = 17.27$, $b = 35.86$ (T: 気温 (K))

$T \leq 273.15 \text{ K}$: $a = 21.87$, $b = 7.66$

水蒸気圧 (e) : 大気中の水蒸気分圧 (hPa)

混合比 (m) : 乾燥空気 1 kg に含まれる水蒸気の質量 (kg kg^{-1})

$$m = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{Air}}} \frac{e}{p - e}$$

$m_{\text{H}_2\text{O}}$: 水蒸気の分子量 (18), m_{Air} : 空気の分子量 (28.96)

p : 気圧 (hPa)

比湿 (q) : 湿潤空気 1 kg に含まれる水蒸気の質量 (kg kg^{-1})

$$q = \frac{m}{1 + m}$$

相対湿度 (RH) : 飽和水蒸気圧と水蒸気圧の比

$$RH = e / e_{\text{sat}}$$

飽差 (VPD) : 飽和水蒸気圧と水蒸気圧の差 (hPa)

$$VPD = e_{\text{sat}} - e$$

露点温度 : 現在の水蒸気圧が飽和水蒸気圧となるときの温度 ($^{\circ}\text{C}$, K)

湿度計測機器

a. アスマン乾湿計

原理: 液体の膨張を利用、気化潜熱

$$e = e'_{\text{sat}} - \frac{A}{755} p (T_d - T_w)$$

T_d : 乾球温度, T_w : 湿球温度

e'_{sat} : 湿球温度に対する飽和水蒸気圧

$T_d > 273.15 \text{ K}$: $A = 0.5$

$T_d \leq 273.15 \text{ K}$: $A = 0.44$

b. 電子湿度計

- 原理：水蒸気・湿度に伴う電気抵抗の変化
- 利点：安価
- 欠点：経年劣化
- 測定機器：セラミックセンサ湿度計

c. 赤外線ガス分析計

- 原理：赤外線の吸光量
- 利点：高精度
- 欠点：高価、感度の変化

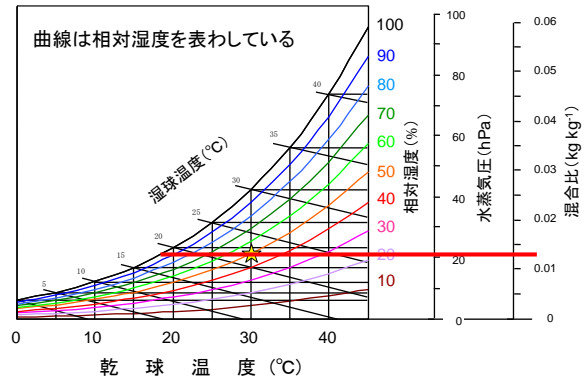


図 6. 湿り空気線図

湿り空気線

乾燥空気と水蒸気の混合気体、即ち湿り空気の状態を線図にしたもの。乾球温度と湿球温度から、相対湿度や絶対湿度を知ること利用できる。

地球規模での水蒸気変動

全球の比湿は、1970 年第以降上昇している可能性が高いが、近年では陸域での上昇が鈍っている(IPCC, 2013; 第 5 次報告書)。結果として、陸上での相対湿度の低下が観測されている(IPCC, 2013; 第 5 次報告書)。

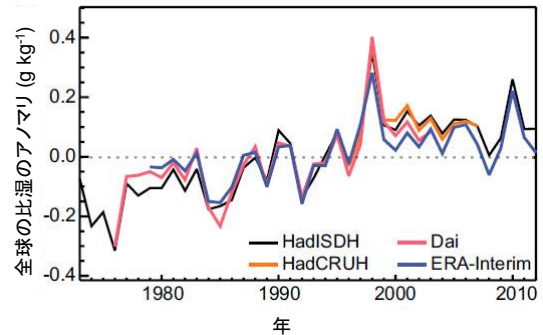


図 7. 全球の比湿のアノマリ

1979-2003 年に対する相対値 (IPCC, 2013)

1.5. 日射量

日射量計測機器

a. 熱電式

- 原理：熱エネルギーを計測
- 利点：広い波長域にわたって受光部表面の吸収率が一定
- 欠点：応答時間が遅い

b. 光電式

- 原理：フォトダイオード (受光エネルギーあたりの電流出力)
- 利点：応答速度がはやい
- 欠点：波長特性、波長幅

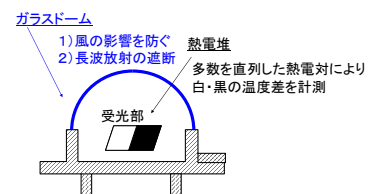


図 8. 熱電式日射計の模式図

地球規模での日射量の変動

1950 年以降、地表面での陸上での日射量は低下していた (dimming) が、1980 年代以降では上昇の傾向 (brightening) が観測されている(IPCC, 2013; 第 5 次報告書)。1950 年代から 1980 年代の日射量低下は、Global

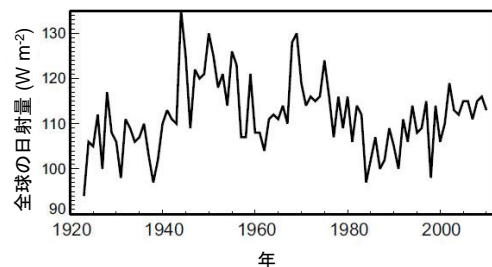


図 9. ストックホルムでの年間日射量 (IPCC, 2013)

Dimming として呼ばれている。

引用・参考文献

IPCC, 2013; 第5次報告 (Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.)

臼田孝 (2018), BLUE BACKS 新しい1キログラムの測り方, 講談社, 2018, 246pp.

近藤純正 (1994), 水環境の気象学 -地表面の水収支熱収支-, 朝倉書店, 350pp.

近藤純正 (2000), 地表面に近い大気の科学 理解と応用. 東京大学出版会, 東京, 324pp.

日本農業気象学会 (1997), 新訂 農業気象の測器と測定法. 農業技術協会, 東京, 345pp.

岡田益己 (2014), 日射量・光強度の正しい測り方. 生物と気象, 14, A1-3.

岡田益己(2010), 温度の正しい測り方 (1)温度計の校正. 生物と気象, 10, A3.

岡田益己(2010), 温度の正しい測り方 (3)熱電対の作り方・使い方. 生物と気象, 10, A4.

岡田益己・中村浩史 (2010), 温度の正しい測り方 (1)通風式放射よけの作り方. 生物と気象, 10, A2.

高見晋一 (2011), 生態環境としての光の計測. 生物と気象, 11, A1-7.

内山素行 (2000), 身近な気象・気候調査の基礎. 古今書院, 東京, 195pp.

文字信貴・平野高司・高見晋一・堀江武・桜谷哲夫, 1997: 農学・生態学のための気象環境学, 丸善株式会社, 199pp.

参考ホームページ

地球温暖化に関して

IPCC : <http://www.ipcc.ch/>

気象庁による IPCC AR5 訳文 : <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>

Wikipedia (内容に関して、精査が必要)

関連キーワード: 湿り空気線図、Global Dimming、トレーサビリティ (計測器)、国際単位系、新しいSIの定義

<http://ja.wikipedia.org>