

ヒッパルコス星表による Excel を使った太陽近傍恒星の HR 図の作成

2013.11.12 北里小学校 上野智士

ヒッパルコス星表のデータをもとに Excel のグラフ機能（散布図）を利用して、手軽に HR 図を作成します。さらに、恒星のタイプが直感的に理解しやすいように恒星の半径と色を反映させた HR 図を VBA を使って作成します。

なお、ネット上の公式や近似式などの情報をかき集めて作成したものですので、正確性について保障はありません。ご容赦を！

■ヒッパルコス星表（HR 図を作成）

ヒッパルコス（Hipparcos）とは、1989年8月8日に欧州宇宙機関によって打ち上げられ、1993年まで運用された高精度視差観測衛星。日本ではヒッパルコス衛星と呼ばれることが多い。

1993年6月の観測終了までに、118,274個の恒星の視差を1,000分の1秒角の精度で調べあげ、半径1,000パーセクの範囲の星の位置を精密に定めることができた。この時得られたデータはヒッパルコス星表としてまとめられ、用いられている。（@Wikipedia）



□ダウンロード

国立天文台の ftp サイトからダウンロード

国立天文台／天文データセンター 天文データアーカイブセンター
→「天文カタログコレクション（毎日更新）」 http://dbc.nao.ac.jp/cjads_J.html
→1. Astrometric Catalogues http://dbc.nao.ac.jp/c_index.html
→1239 NASA CDS The Hipparcos and Tycho Catalogues HIP, Tyc by
ESA, 1997
→NASA <ftp://dbc.nao.ac.jp/DBC/NASAADC/catalogs/1/1239/>
→ hip_main.dat.gz

■（おまけ）イェール輝星目録（こちらは星座早見のデータとしての利用に最適）

視等級 6.5 等星よりも明るい恒星の星表。イェール輝星表（Yale Catalog of Bright Stars）、イェール輝星目録（Yale Bright Star Catalogue）また、単にイェール星表（Yale Catalog）とも。第四版からイェール輝星目録になっている。恒星の座標（赤道座標の 1900 年分点と 2000 年分点および銀河座標）、固有運動、測光データ、スペクトル型、主なカタログ番号などの情報が掲載されており、注記が充実しており、第 4 版の巻末には約 450 の星の固有名の一覧もある。（@Wikipedia）

□ダウンロード

国立天文台／天文データセンター 天文データアーカイブセンター
→「天文カタログコレクション（毎日更新）」 http://dbc.nao.ac.jp/cjads_J.html
→5. Combined Data
→5050 NASA CDS NAOJ Yale Bright Star Catalog, 5th Revised Edition,
Preliminary Version HR by Hoffleit, Warren, 1991
→<ftp://dbc.nao.ac.jp/DBC/NASAADC/catalogs/5/5050/>
→catalog.dat.gz

□必要項目の選択、CSV ファイル化

hip_main.dat は、1 行 449 文字の固定長データ、約 12 万行（約 50M の巨大テキスト！！）

このままでは、Excel で利用できないので、適当なテキスト処理ツール等を利用して、csv ファイルにする。マクロを使えば可能でしょうが、12 万行の処理には、相当な時間を要すものと思われるので、高速に処理できるツールを利用した方がよいでしょう。

今回は、awk を利用（gawk 3.1.5 for Windows）。固定長データから必要項目を切り出してコンマ区切りの csv ファイル化する。今回、以下の項目を取り出す。

○選択項目

行頭からの文字数(byte)	項目	項目番号	
9～ 14(6)	HIP 番号	H1	
18～ 28(11)	赤経 (hm s)	H3	※HR 図には不要
30～ 40(11)	赤経 (d m s)	H4	※HR 図には不要
42～ 46(5)	実視等級 (mag)	H5	
80～ 86(7)	三角視差 (秒角)	H11	
120～125(6)	三角視差標準誤差	H16	
246～251(6)	B-V 色指数	H37	※今回の HR 図は、これを使用
253～257(5)	B-V 標準誤差	H38	
436～447(12)	スペクトル型	H76	※今回の HR 図では、不要

○参考(gawk で hip_main.dat から選択項目を csv ファイル化するバッチファイルの例)

```
rem HIP番号,赤経hms,赤緯dms,実視等級,スペクトル型,三角視差,三角視差誤差,B-V色指数,B-V誤差
gawk "{print substr($0,9,6),¥",¥",substr($0,18,2),¥",¥"substr($0,21,2),¥",¥"substr($0,24,5),¥",¥",
substr($0,30,1),¥"1,¥",substr($0,31,2),¥",¥",substr($0,34,2),¥",¥",substr($0,37,4),¥",¥",substr($0,42,5),
¥",¥",substr($0,436,12),¥",¥",substr($0,80,7),¥",¥"substr($0,120,6),¥",¥",substr($0,246,6),¥",¥",substr(
$0,253,5)}" hip_main.dat > hip_hr.csv
exit
```

□Excel での必要項目の計算

(1)恒星の絶対等級 M

視差角 p(今回は、ミリ秒角)から距離 d(pc)を求め、次の式に代入して、絶対等級 M を求める

$$d = 1000/p$$

$$M = m - 5\log_{10} d + 5 \quad (m; \text{実視等級})$$

(2)表面温度 T

今回、次の2つの方法を使用

$$(a) \quad T = 9000 / ((B-V) + 0.85)$$

$$(b) \quad T = 3.939654 - 0.395361(B-V) + 0.2082113(B-V)^2 - 0.0604097(B-V)$$

※Sekiguchi, M, & Fukugita. M (2000). A study of the B-V color-temperature relation の(2)式より5項以降を略

(3)恒星の半径 R/Rs (太陽半径との比)

$$R/R_s = (T_s/T)^2 (L/L_s)^{1/2}$$

L_s 太陽の光度、R_s 太陽の半径、T_s 太陽の表面温度(5800K)、M_s 太陽の絶対等級(4.84mag)

L 恒星の光度、R 恒星の半径、T 恒星の表面温度、M 恒星の絶対等級

$$L/L_s = 10^{0.4D_m} \quad D_m = M_s - M \quad (\text{絶対等級の差})$$

(4)恒星の表示色 (表面温度 T から3刺激値 XYZ を求め RGB に変換)

○色度座標 xy ← 表面温度 T

恒星の色の目安として、最大波長のみで色を推定。今回、次の2つの方法を使用

(a)近似式の利用で3刺激値を得る

xy色度図上の黒体軌跡(Plankian locus in xy space)の近似式を利用し、色度座標x、yを求める

$$x = -0.2661239 \cdot 10^9 / T^3 - 0.2343580 \cdot 10^6 / T^2 + 0.8776956 \cdot 10^3 / T + 0.179910 \quad (1667K < T < 4000K)$$

$$x = -3.0258469 \cdot 10^9 / T^3 + 2.1070379 \cdot 10^6 / T^2 + 0.2226347 \cdot 10^3 / T + 0.240390 \quad (4000K < T < 25000K)$$

$$y = -1.1063814x^3 - 1.34811020x^2 + 2.18555832x - 0.20219683 \quad (1667K < T < 2222K)$$

$$y = -0.9549476x^3 - 1.37418593x^2 + 2.09137015x - 0.16748867 \quad (2222K < T < 4000K)$$

$$y = +3.0817580x^3 - 5.87338670x^2 + 3.75112997x - 0.37001483 \quad (40000K < T < 25000K)$$

(Wikipedia「Planckian locus」 http://en.wikipedia.org/wiki/Planckian_locus による)

(b)黒体放射の分光分布と CIE の等色関数の積を可視波長域で積分して3刺激値を得る

(VBA で関数を定義して計算、シートの再計算に相当時間を要した。)

$Me(\lambda) = c_1/\lambda^5 \{ \exp(c_2/\lambda/T) - 1 \}^{-1}$	[W・m ⁻³]	黒体放射の分光分布
$\exp(x) = e^x$		
$c_1 = 2\pi hc^2 = 3.741771 \times 10^{-16}$	[W・m ²]	
$c_2 = hc/k = 1.438775 \times 10^{-2}$	[m・K]	
$h = 6.626196 \times 10^{-34}$	[J・s]	プランク定数
$c = 2.9979250 \times 10^8$	[m/s]	真空中の光速
$k = 1.380622 \times 10^{-23}$	[J/K]	ボルツマン定数

$X = a \int Me(\lambda) \cdot x_-(\lambda) d\lambda$		
$\rightarrow X_1 = \sum x_-(\lambda) / \lambda^5 / (\exp(1.439 \times 10^7 / \lambda / T) - 1)$		$\lambda : 380 \rightarrow 780$ (5nm 刻)
$Y = a \int Me(\lambda) \cdot y_-(\lambda) d\lambda$		
$\rightarrow Y_1 = \sum y_-(\lambda) / \lambda^5 / (\exp(1.439 \times 10^7 / \lambda / T) - 1)$		$\lambda : 380 \rightarrow 780$ (5nm 刻)
$Z = a \int Me(\lambda) \cdot z_-(\lambda) d\lambda$		
$\rightarrow Z_1 = \sum z_-(\lambda) / \lambda^5 / (\exp(1.439 \times 10^7 / \lambda / T) - 1)$		$\lambda : 380 \rightarrow 780$ (5nm 刻)
$x = X_1 / (X_1 + Y_1 + Z_1)$		
$y = Y_1 / (X_1 + Y_1 + Z_1)$		

※CIE の等色関数 $x_-(\lambda)$ 、 $y_-(\lambda)$ 、 $z_-(\lambda)$ の 5nm 刻の csv データは、CVRL のサイト (<http://www.cvrl.org/>) よりダウンロード
csv データ: <http://www.cvrl.org/database/data/cmfs/ciexyz31.csv>

○3刺激値 XYZ ← 色度座標xy

Y=1.0 ※明度(輝度)を 1.0 に固定

X=(Y/y)x

Z=(Y/y)(1-x-y)

○RGB 値 ← 3刺激値

CIE 国際電気標準会議 の CIE61966-2-1 規格により変換

$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$

○γ補正

• 一般的なディスプレイを対象に γ 補正し (γ=2.2)、VBA の rgb() 関数の引数のために 256 階調化

$$R' = R^{1/2.2} \times 255 \quad G' = G^{1/2.2} \times 255 \quad B' = B^{1/2.2} \times 255$$

• VBA 用の 8 桁カラーコードを計算

$$\text{rgb} = R' + G' * 256 + B' * 256 * 256$$

□HR 図の作成

○グラフ挿入(散布図)で作成

B-V と視差角について、標準誤差から精度の低いデータをはじく(今回は誤差 10% 未満)。

これにより、恒星データ数約 20000 となる。

「B-V の列」と「絶対光度の列」をグラフ範囲に指定して、グラフの挿入を選択する。XY 軸の範囲やマーカーの種類等を変更する。単純に恒星をプロットするだけならこれで完成。

○VBA を利用して作成

恒星の半径と色を反映させた HR 図を描くために VBA を利用。ワークシート上に「B-V」と「絶対光度」によりオートシェイプの「円/楕円」を挿入する。「円/楕円」の大きさとして「太陽との半径比 R/Rs」と「表面温度 T から求めた RGB 値」を指定する。

※今回使用した PC 環境では、恒星 20,000 個のプロットに分単位の時間を要した。

□恒星の半径と色を反映させたHR図のためのVBAの例

(グラフ用シート名:HR 図 2 / 恒星データシート名:HIP データ / 等色関数)

恒星の半径、色を反映させた HR 図を作成するマクロ

```
Sub drawHR2()  
  Dim i As Long  
  Dim x, y As Integer          'オートシェイプの挿入座標  
  Dim r_rs As Single          '半径比  
  Dim x0, x1, x2, y0, y1, y2, xm, ym As Integer  'オートシェイプの座標計算用  
  Dim rgb_f, rgb_l As Long    'オートシェイプの塗り色、線色 (rgb値)  
  Dim name As String  
  Dim oShape As Shape         'オートシェイプの一時保管用  
  'セルをHR図の軸の目盛として利用するためにセル幅、高さを調整する  
  '標準フォントを設定(セル幅の設定単位と pt の関係を一定にするため)  
  Application.StandardFont = "MS ゴシック"  
  Application.StandardFontSize = 12  
  xm = 180: ym = 24           'x軸、y軸の表示倍率 1→(pt)  
  x1 = 20: x2 = 20: y1 = 50: y2 = 30  '1,2行、1,2列のセル幅、セル高の調整用(pt)  
  x0 = x1 + x2 + xm * 0.5: y0 = y1 + y2 + ym * 10  'グラフの原点の位置  
  'セル高をy軸の目盛単位(5等級)に合わせて設定  
  Worksheets("HR 図 2").Rows(1).RowHeight = y1  
  Worksheets("HR 図 2").Rows(2).RowHeight = y2  
  For i = 3 To 8  
    Worksheets("HR 図 2").Rows(i).RowHeight = ym * 5  
  Next  
  'セル幅をx軸の目盛単位(0.5)に合わせて設定  
  '(○-3.75)/6の部分は、ptをセル幅独特の単位に変換するため(excelの設定によっては変更する必要)  
  Worksheets("HR 図 2").Columns(1).ColumnWidth = (x1 - 3.75) / 6  
  Worksheets("HR 図 2").Columns(2).ColumnWidth = (x2 - 3.75) / 6  
  For i = 3 To 8  
    Worksheets("HR 図 2").Columns(i).ColumnWidth = (xm * 0.5 - 3.75) / 6  
  Next  
  'オートシェイプの円と一等星名テキストボックスをすべて削除  
  For Each oShape In Worksheets("HR 図 2").Shapes  
    If oShape.AutoShapeType = msoShapeOval  
      Or (oShape.Type = msoTextBox And oShape.name <> "表題") Then oShape.Delete  
  Next  
  '恒星のプロット  
  For i = 2 To 20178  
    r_rs = Worksheets("HIP データ").Cells(i, 30).Value + 1  
    rgb_f = Worksheets("HIP データ").Cells(i, 32).Value  
    rgb_l = Worksheets("HIP データ").Cells(i, 33).Value  
    x = Worksheets("HIP データ").Cells(i, 28).Value * xm + x0  
    y = Worksheets("HIP データ").Cells(i, 29).Value * ym + y0  
    Worksheets("HR 図 2").Shapes.AddShape(msoShapeOval, x - r_rs / 2, y - r_rs / 2, r_rs, r_rs).Select  
    Selection.ShapeRange.Fill.Solid  
    Selection.ShapeRange.Fill.ForeColor.rgb = rgb_f  
    Selection.ShapeRange.Line.Weight = 0.5  
    Selection.ShapeRange.Line.ForeColor.rgb = rgb_l  
  Next  
  '一等星名(太陽)の表示  
  For i = 2 To 23  
    x = Worksheets("一等星").Cells(i, 3).Value * xm + x0  
    y = Worksheets("一等星").Cells(i, 4).Value * ym + y0  
    name = Worksheets("一等星").Cells(i, 2).Value  
    Worksheets("HR 図 2").Shapes.AddTextbox(msoTextOrientationHorizontal, x - 6, y - 6, 12, 12).Select
```

```

Selection.Characters.Text = "・" + name
Selection.ShapeRange.Fill.Visible = msoFalse
Selection.ShapeRange.Line.Visible = msoFalse
Selection.AutoSize = True

```

Next

‘予めシート上に「表題」という名前のテキストボックスを配置しておく

```
Worksheets("HR 図 2").Shapes("表題").ZOrder msoBringToFront
```

End Sub

表面温度tからrgbを求める関数の例(a)

※ x y 色度図上の黒体軌跡の近似式を利用

Function getRGB_VBA(r,Y) ‘VBA の RGB()関数と同じ形式の値を返す

```
Dim rgb_array()
```

```
rgb_array = getRGB(r,Y)
```

```
getRGB_VBA = rgb_array(0) + rgb_array(1)*256 + rgb_array(2)*256*256
```

End Sub

Function getRGB(t,Y) ‘rgb の各値を配列として返す

’単純に表面温度(最大波長)のみで色を推定

```
Dim i As Integer
```

```
Dim x0, y0, X, Z As Double
```

```
Dim rgb(3), mtrx(9)
```

’sRGB(CIE 61966-2-1)

```
mtrx(0) = 3.2410 : mtrx(1) = -1.5374 : mtrx(2) = -0.4986
```

```
mtrx(3) = -0.9692 : mtrx(4) = 1.8760 : mtrx(5) = 0.0416
```

```
mtrx(6) = 0.05563 : mtrx(7) = -0.2040 : mtrx(8) = 1.0570
```

’xy空間の黒体軌跡の近似式(Wikipedia「Planckian locus」Approximation による)

```
If t < 4000 Then
```

```
x0 = -0.2661239 * (10 ^ 9 / t ^ 3)
```

```
x0 = x0 - 0.234358 * (10 ^ 6 / t ^ 2)
```

```
x0 = x0 + 0.8776956 * (10 ^ 3 / t)
```

```
x0 = x0 + 0.17991
```

```
Else
```

```
x0 = -3.0258469 * (10 ^ 9 / t ^ 3)
```

```
x0 = x0 + 2.1070379 * (10 ^ 6 / t ^ 2)
```

```
x0 = x0 + 0.2226347 * (10 ^ 3 / t)
```

```
x0 = x0 + 0.24039
```

```
End If
```

```
If t < 2222 Then
```

```
y0 = -1.1063814 * (x0 ^ 3)
```

```
y0 = y0 - 1.3481102 * (x0 ^ 2)
```

```
y0 = y0 + 2.18555832 * x0
```

```
y0 = y0 - 0.20219683
```

```
Elseif t >= 2222 And t < 4000 Then
```

```
y0 = -0.9549476 * (x0 ^ 3)
```

```
y0 = y0 - 1.37418593 * (x0 ^ 2)
```

```
y0 = y0 + 2.09137015 * x0
```

```
y0 = y0 - 0.16748867
```

```
Else
```

```
y0 = 3.081758 * (x0 ^ 3)
```

```
y0 = y0 - 5.8733867 * (x0 ^ 2)
```

```
y0 = y0 + 3.75112997 * x0
```

```
y0 = y0 - 0.37001483
```

```
End If
```

```

' Yxy→XYZ
X = (Y / y0) * x0
Z = (Y / y0) * (1 - x0 - y0)
' XYZ→sRGB
rgb(0) = mtrx(0) * X + mtrx(1) * Y + mtrx(2) * Z
rgb(1) = mtrx(3) * X + mtrx(4) * Y + mtrx(5) * Z
rgb(2) = mtrx(6) * X + mtrx(7) * Y + mtrx(8) * Z
For i = 0 To 2
  If rgb(i) < 0 Then rgb(i) = 0
  rgb(i) = rgb(i) ^ (1 / 2.2)      'ガンマ補正 γ = 2.2
  rgb(i) = Round(rgb(i) * 255)
  If rgb(i) > 255 Then rgb(i) = 255
Next
getRGB = rgb
End Function

```

表面温度tからrgbを求める関数の例(b)

※プランクの放射則と CIE の等色関数を利用

```

Function getRGBCIE(t, YY)
  Dim X, Y, Z, M, c2 As Double
  Dim x0, y0 As Single
  Dim i As Integer
  Dim CIE_x(94), CIE_y(94), CIE_z(94), rmd(94), rgb(3), mtrx(9)
' sRGB(CIE 61966-2-1)
  mtrx(0) = 3.2406: mtrx(1) = -1.5372: mtrx(2) = -0.4986
  mtrx(3) = -0.9689: mtrx(4) = 1.8758: mtrx(5) = 0.0415
  mtrx(6) = 0.0557: mtrx(7) = -0.204: mtrx(8) = 1.057
  c2 = 1.438775 * 10 ^ 7
  For i = 0 To 94 Step 2
    rmd(i) = Worksheets("等色関数").Cells(i + 2, 1).Value
    CIE_x(i) = Worksheets("等色関数").Cells(i + 2, 2).Value
    CIE_y(i) = Worksheets("等色関数").Cells(i + 2, 3).Value
    CIE_z(i) = Worksheets("等色関数").Cells(i + 2, 4).Value
    M = (rmd(i) ^ 5) * (Exp(c2 / rmd(i) / t) - 1)
    X = X + CIE_x(i) / M
    Y = Y + CIE_y(i) / M
    Z = Z + CIE_z(i) / M
  Next
  x0 = X / (X + Y + Z)
  y0 = Y / (X + Y + Z)
' xyY→XYZ
  X = (YY / y0) * x0
  Z = (YY / y0) * (1 - x0 - y0)
' XYZ→sRGB
  rgb(0) = mtrx(0) * X + mtrx(1) * YY + mtrx(2) * Z
  rgb(1) = mtrx(3) * X + mtrx(4) * YY + mtrx(5) * Z
  rgb(2) = mtrx(6) * X + mtrx(7) * YY + mtrx(8) * Z
  For i = 0 To 2
    If rgb(i) < 0 Then rgb(i) = 0
    rgb(i) = rgb(i) ^ (1 / 2.2)      'ガンマ補正 (γ = 2.2)
    rgb(i) = Round(rgb(i) * 255)
    If rgb(i) > 255 Then rgb(i) = 255
  Next
  getRGBCIE = rgb(0) + rgb(1) * 256 + rgb(2) * 256 * 256
End Function

```

□参考

- ヒッパルコス星表から HR 図を描くという基本プランについて
今回の教材は、ほぼこのサイトのパクリ
Yossi.Okamoto の地学探検へようこそ！ <Hipparcos 衛星データの加工と H-R 図>
<http://www.tennoji-h.oku.ed.jp/tennoji/yossi/Astro/>
- HR 図の作成と各種の天文計算式(半径比等)について
研究課題・発展課題のページに「HR 図を作る」課題がある
SDSS SkyServer <http://skyserver.sdss.org/edr/jp/>
- Plankian locus (黒体軌跡)の近似式について
近似式の導出方法はよく分かりません
Wikipedia「Planckian locus」 http://en.wikipedia.org/wiki/Planckian_locus
- 恒星カタログ、恒星色の計算について
星空横丁 <http://hoshizora.yokochou.com/index.html>
- XYZ 表色系について
京都市立芸術大学 藤原隆男 情報科学講義資料「色空間の変換」
<http://w3.kcu.ac.jp/~fujiwara/infosci/colorspace/index.html>
- B-V と表面温度の関係式(b)について
このサイトで Sekiguchi.M, & Fukugita. M (2000)の論文の関係式を見つけた
Norihsa Washitake's blog <http://washitake.com/blog/archives/165>
- CIE 等色関数のデータについて
2 度視野、10 度視野の 1nm 刻、5 度刻のデータ、他が公開されている
Colour & Vision Research laboratory <http://www.cvrl.org/>
- XYZ 表色系とプランクの放射則、その他色の計算全般について
今回の教材作成で初めて色彩工学なる分野のあることを知りました
「色再現工学の基礎」大田登 著 コロナ社
「色彩工学入門」篠田博之、藤枝一郎 著 森北出版株式会社