

7. cartopy の利用

現在、Basemap の開発は終了しているので、代替となる cartopy の利用を考えても良いでしょう。ここでは Basemap の代用として、似たような機能を提供している cartopy で作図する方法を紹介します。

7.1 cartopy の基本

7.1.1 地図を描く

cartopy は Basemap と似たように matplotlib 上で地図を表示するためのパッケージです。Basemap 同様に様々な図法に対応しており、等高線や陰影、矢印、矢羽等の作図を行うこともできます。まずは cartopy_sample.py で、正距円筒図法の作図を行なってみます。モジュールは import cartopy.crs as ccrs のようにインポートします。cartopy の場合も Basemap 同様、最初に matplotlib でプロット領域を作成するため、matplotlib もインポートします。サブプロットを生成する所では、matplotlib の fig.add_subplot を使います。これまで同様、最初の引数が縦に並べる数、2つ目が横に並べる数、3つ目がサブプロットのうちの何番目に当たるかを表します。ここでは、新たに projection オプションを使い、ccrs.PlateCarree()を与えることで、cartopy の正距円筒図法(6.2.1 節参照)を適用しています。ccrs.PlateCarree()のデフォルトでは東経 0 度が中央に来るようになっていますが、ここでは、central_longitude=180 を与えることで東経 180 度が中央に来るよう変更しています(図 7-1-2)。

```
import matplotlib.pyplot as plt
import cartopy.crs as ccrs

fig = plt.figure() # プロット領域の作成
# cartopy 呼び出し
ax=fig.add_subplot(1,1,1, projection=ccrs.PlateCarree(central_longitude=180))
```

ここまで設定では図枠が表示されるだけなので、ax.メソッドのようなインスタンスマソッドを使い作図してみます。まずは ax.coastlines を使い海岸線を描きます。fig や ax の作成時、海岸線作図時のそれぞれの挙動が気になる場合には、ipython3 --pylab を起動して cartopy_sample.py の各行を順番に入力し、

どのように表示されるか試しても良いでしょう。

```
ax.coastlines() # 海岸線を描く
```

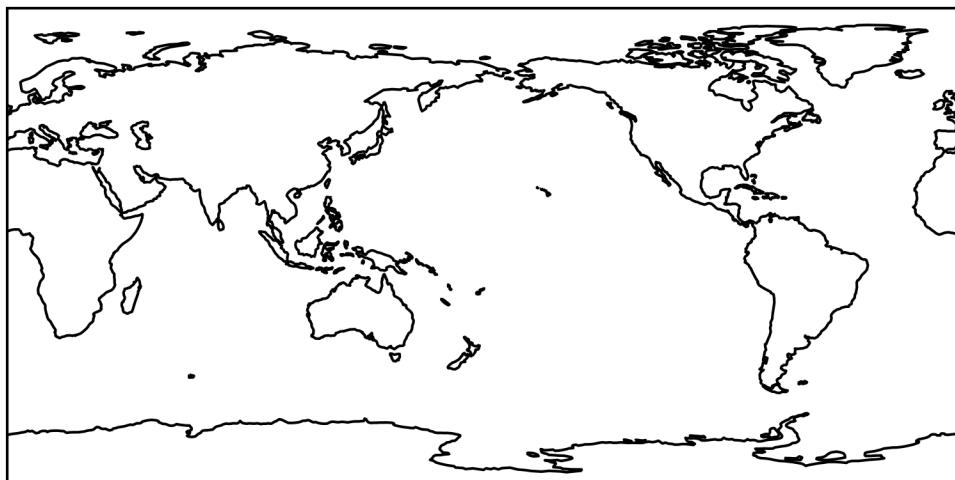


図 7-1-1 cartopy で海岸線を描く

7.1.2 経度線と緯度線を描く

Basemap の時と同様、描いた図に経度線と緯度線を加えることも可能です（図 7-1-2）。作図には cartopy_sample2.py を使いました。まず `ax.gridlines` で経度線・緯度線を描きます。正距円筒図法にするため、図法を指定する `crs` オプションに `ccrs.PlateCarree()` を与えます。ここで、経度線・緯度線の設定を行うために `ax.gridlines` の戻り値を `gl` に格納しています。経度線や緯度線を引く値は、`gl.xlocator` と `gl.ylocator` で与えます。その際に matplotlib の `ticker` に含まれる `FixedLocator` を利用しており、`gl.xlocator=mticker.FixedLocator(経度線を描く位置)` のように用います。こうすることで、指定した任意の位置に経度線を描くことができます。緯度線についても同様に行います。

```
import matplotlib.ticker as mticker
gl = ax.gridlines(crs=ccrs.PlateCarree())
gl.xlocator = mticker.FixedLocator(np.arange(0, 360, 30)) # 経度線
gl.ylocator = mticker.FixedLocator(np.arange(-90, 90, 30)) # 緯度線
```

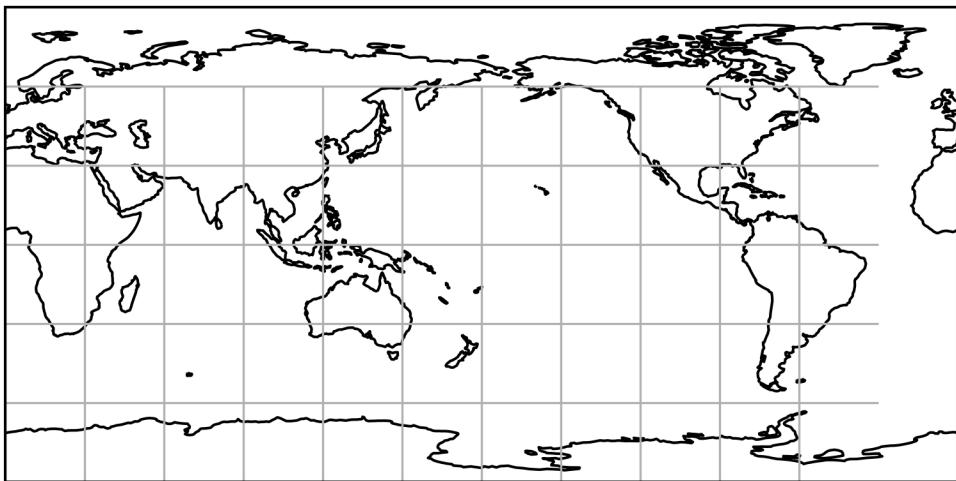


図 7-1-2 cartopy で経度線・緯度線を描く

図 7-1-2 を見ると、右端付近（東経 360 度付近）と上端付近（北極付近）の経度線・緯度線が描かれていないのが分かると思います。経度線を引く値 `np.arange(0, 360, 30)` は、開始点の 0 から終了点の 360 まで 30 毎の値を並べることを意味していますが、終了点の値は出力されません。試しに、ipython3 を起動して、次のように `np.arange(0, 360, 30)` を書き出してみます。

In [1]: `import numpy as np`

In [2]: `np.arange(0,360,30)`

Out[2]: `array([0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330])`

最後の値が 330 になっているのが分かると思います。このため、東経 330 度が最大になってしまいます。同様に緯度線を引く値 `np.arange(-90, 90, 30)` も、北緯 60 度が最大です。東経 360 度まで出力されるように、`np.arange(0, 360.1, 30)` としてみます。

In [3]: `np.arange(0,360.1,30)`

Out[3]: `array([0., 30., 60., 90., 120., 150., 180., 210., 240., 270., 300., 330., 360.])`

最後の値が 360 になりました。これを反映させたのが cartopy_sample3.py です。図 7-1-3 のように、右端付近や上端付近でも経度線・緯度線が引かれるようになりました。

```
gl = ax.gridlines(crs=ccrs.PlateCarree())
gl.xlocator = mticker.FixedLocator(np.arange(0, 360.1, 30)) # 経度線
gl.ylocator = mticker.FixedLocator(np.arange(-90, 90.1, 30)) # 緯度線
```

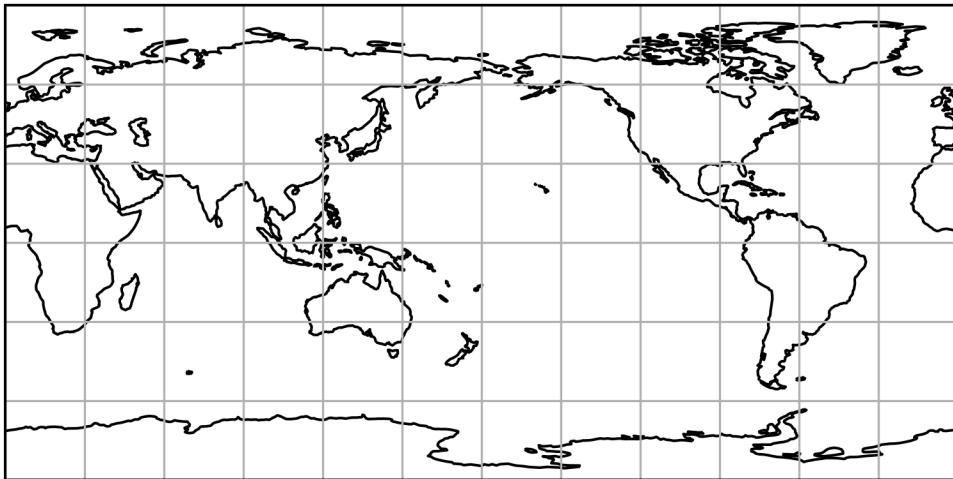


図 7-1-3 全ての経度線・緯度線が描かれるように修正した

7.1.3 経度線と緯度線の見た目を調整する

次に、経度線・緯度線の見た目を変える方法を紹介します。図 7-1-4 のように経度線・緯度線を細い赤破線で描くプログラムが、cartopy_sample4.py です。線の幅は linewidth で設定し（デフォルト値：1）、細線にするため 0.5 にしました。線の色は color（図 3-2-2、図 3-2-3 参照）、線種は linestyle です（表 3-2-1 参照）。それぞれ、赤色 ('r')、破線 ('--') に設定します。不透明度 alpha は 0.8 にしています。なお linewidth を lw、linestyle を ls、color を c とする省略形は、ここでは使うことができません。

```
gl = ax.gridlines(crs=ccrs.PlateCarree(), ¥
                   linewidth=0.5, linestyle='--', color='r', alpha=0.8)
```

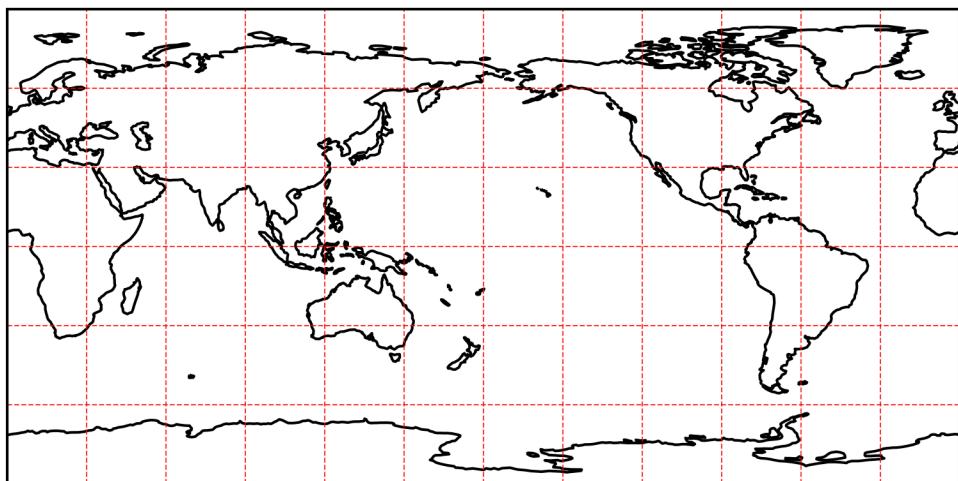


図 7-1-4 経度線・緯度線を赤破線で描く

これらのオプションを使い linewidth=1、黒色 ('r')、点線 (':') に設定して、幅 1 の黒点線で経度線・緯度線を描きます(図 7-1-5)。cartopy_sample5.py を使って作図しました。

```
gl = ax.gridlines(crs=ccrs.PlateCarree(),  
                   linewidth=1, linestyle=':', color='k', alpha=0.8)
```

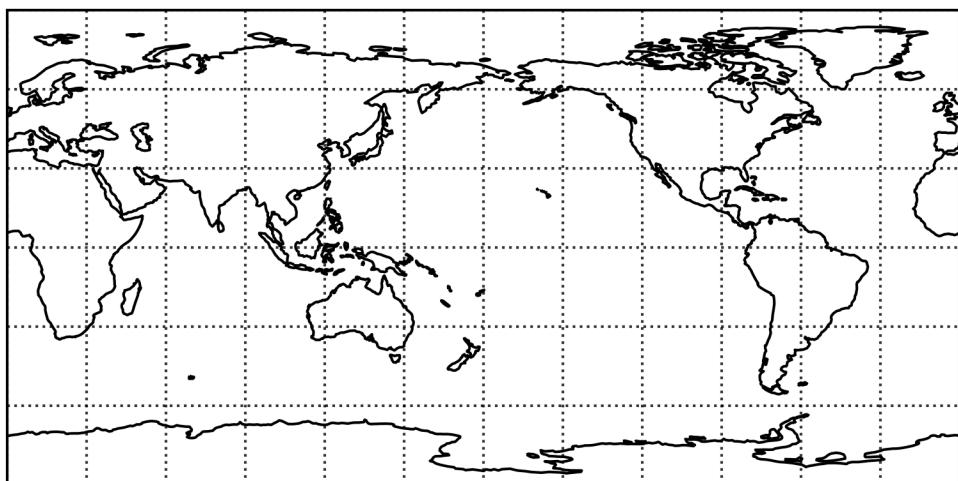


図 7-1-5 経度線・緯度線を黒点線で描く

なお ax.coastlines にも線の色、線の幅、線種、不透明度を指定するオプショ

ンがあり、`ax.coastlines(color='g')`のように指定できます（ここでは緑色）。

7.1.4 経度線と緯度線にラベルを付ける

`ax.gridlines` には、経度線と緯度線にラベルを付ける `draw_labels` オプションがあります。`draw_labels=True` とすることでラベルが付きます（図 7-1-6）。作図には `cartopy_sample6.py` を使いました。

```
gl = ax.gridlines(crs=ccrs.PlateCarree(), draw_labels=True,  
                   linewidth=1, linestyle=':', color='k', alpha=0.8)
```

図 7-1-6 では、東経 0 度を中心とした図にしています。このようにしたのは、`draw_labels` オプションでうまくラベルの付く範囲が東経 0 度を中心とした場合のみであったためです。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, projection=ccrs.PlateCarree()) # cartopy 呼び出し  
gl.xlocator = mticker.FixedLocator(np.arange(-180, 180.1, 30)) # 経度線  
gl.ylocator = mticker.FixedLocator(np.arange(-90, 90.1, 30)) # 緯度線
```

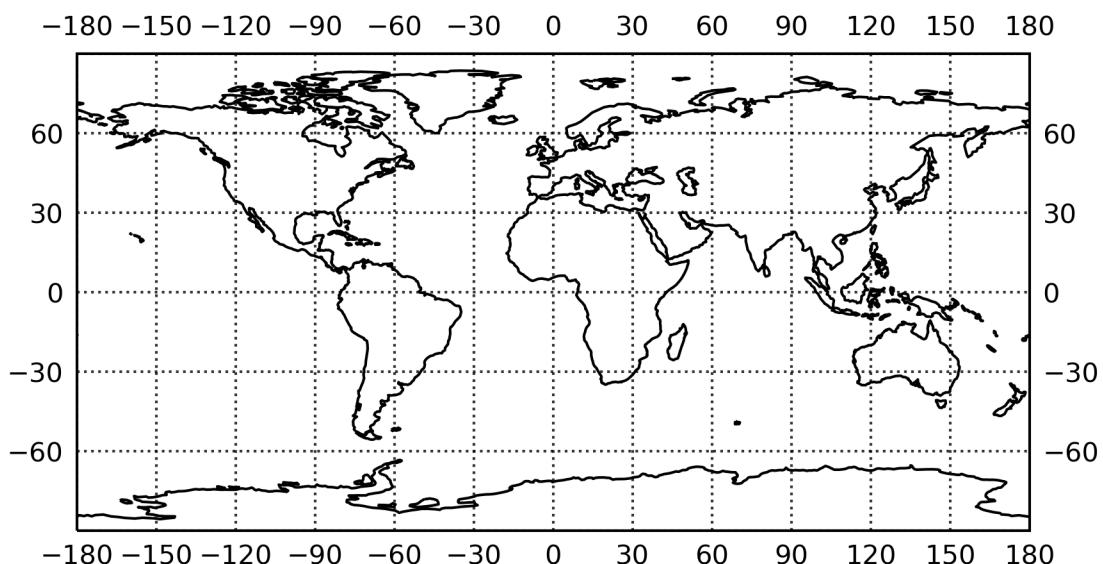


図 7-1-6 経度線・緯度線にラベルを付ける

東経 180 度を中心とした場合にどうなるかを示したものが、図 7-1-7 です。作図には cartopy_sample7.py を使いました。180 度より東側ではラベルが付かないという不具合が起こります。ax.gridlines の修正が待たれます。

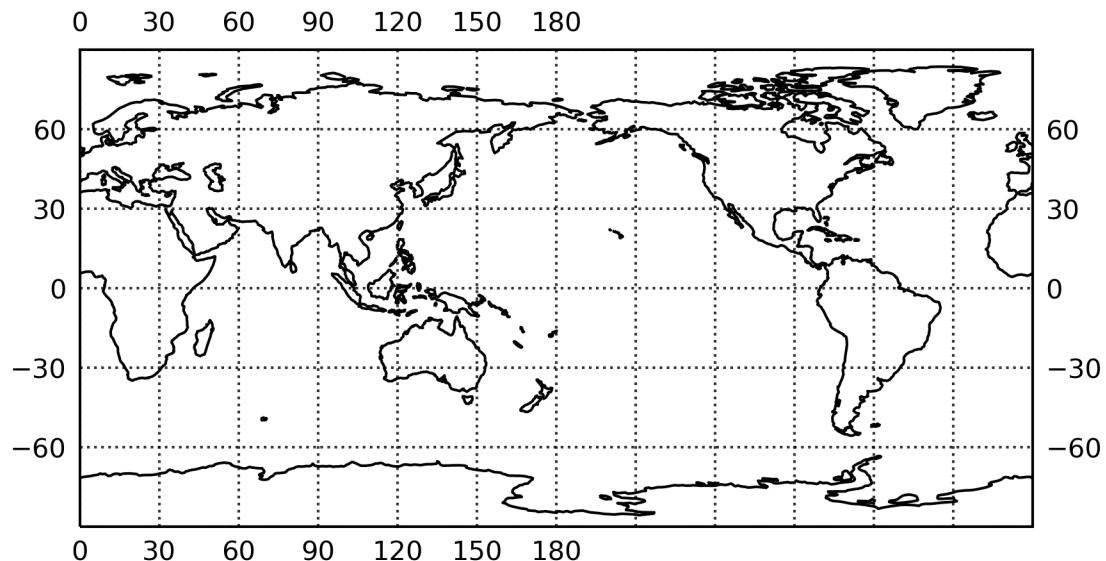


図 7-1-7 東経 180 度を中心とした場合

ラベルを描く方法は他にもあるので、ここでは matplotlib でラベルを描く ax.set_xticks、ax.set_yticks を使う方法を紹介します。この方法では、経度線と緯度線は ax.gridlines で描き、ラベルはこれとは別に ax.set_xticks、ax.set_yticks で描きます。共通して経度線と緯度線を描く値を使うので、xticks、yticks という配列を作つておき、それぞれの値を格納しておきます。dlon、dlat は、それぞれ経度線、緯度線ラベルを描く間隔を表しています。作図には cartopy_sample8.py を使いました。

```
# 緯度線、経度線とラベルを描く値
dlon, dlat = 30, 30
xticks = np.arange(0, 360.1, dlon)
yticks = np.arange(-90, 90.1, dlat)
```

まず ax.gridlines で、これまで同様に経度線と緯度線を描きます。

```

gl = ax.gridlines(crs=ccrs.PlateCarree(), draw_labels=False,
                   linewidth=1, linestyle=':', color='k', alpha=0.8)
gl.xlocator = mticker.FixedLocator(xticks) # 経度線を描く値
gl.ylocator = mticker.FixedLocator(yticks) # 緯度線を描く値

```

次に、`ax.set_xticks`、`ax.set_yticks` を使い、経度線と緯度線ラベルを描く値を指定します。オプションとして `crs` を与えることができ、`ccrs.PlateCarree()` を指定します。図 7-1-8 のように、180 度を中心として東経側にも西経側にもラベルが描かれるようになりましたが、経度表記に直したくなります。

```

ax.set_xticks(xticks, crs = ccrs.PlateCarree()) # 経度線ラベルの値
ax.set_yticks(yticks, crs = ccrs.PlateCarree()) # 緯度線ラベルの値

```

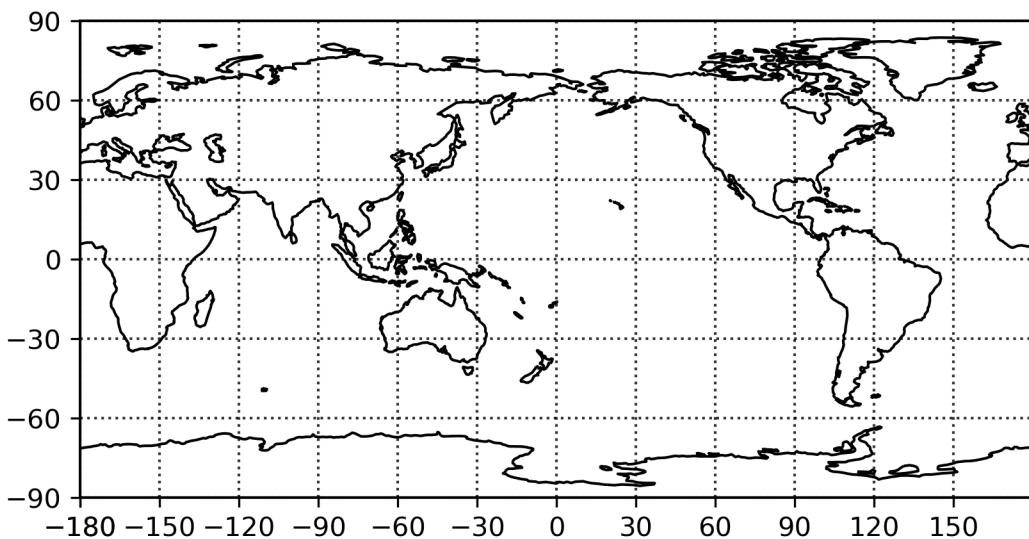


図 7-1-8 `ax.set_xticks`、`ax.set_yticks` を使い、経度線と緯度線ラベルを描いた

`cartopy_sample9.py` は、経度線・緯度線ラベルを度数表記に変えたプログラムです。経度線ラベルの表記を変えるには、`ax.xaxis.set_major_formatter` の書式を変更します。その際に、`cartopy.mpl.ticker` に含まれる [LongitudeFormatter](#) を使います。デフォルトのままでは東経 0 度が「0 °E」ではなく「0 °」と表示されてしまうため、オプションとして `zero_direction_label=True` を与えていま

す。図7-1-9のように、経度方向のラベルが180度を中心とした数字から東経(E)、西経(W)を区別した度数表記に変わりました。緯度線ラベルについても同様に、`ax.xaxis.set_major_formatter`の書式を変更します。緯度の場合は **LatitudeFormatter**ですが、赤道は「0°」表記で良いためデフォルトのまま使用しました。

```
from cartopy.mpl.ticker import LongitudeFormatter, LatitudeFormatter  
...  
# 目盛りの表示形式を度数表記にする  
ax.xaxis.set_major_formatter(LongitudeFormatter(zero_direction_label=True))  
ax.yaxis.set_major_formatter(LatitudeFormatter())
```

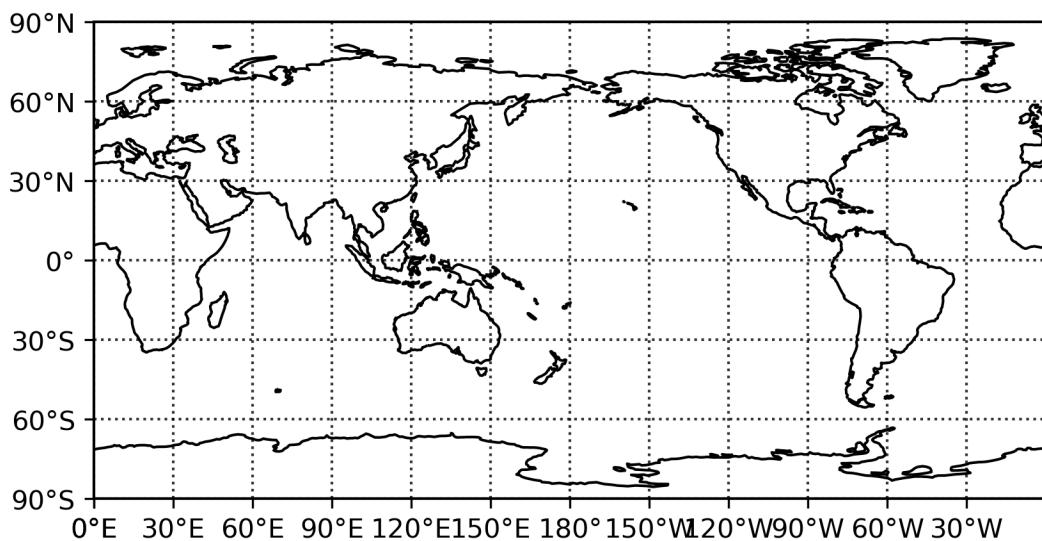


図7-1-9 度数表記に変える

7.1.5 経度線の間隔と経度線ラベルの間隔を別々にする

図7-1-9では、150°Wと120°Wのように一部のラベルが重なっています。ラベルの文字は少し小さいように思えますが、これ以上拡大すると隣のラベルと判別できなくなってしまうので、経度線は30度毎のまま、経度線ラベルだけ60度毎に描いてみます。経度線・緯度線を描く部分は変更ありませんが、経度線・緯度線ラベルを描くために、新たに `dlon_lab`、`dlat_lab` で経度線、緯度線ラベルの間隔を指定し、`xticks_lab`、`yticks_lab` という配列を作って、経度線、

緯度線ラベルを描く値を格納しておきます。経度線ラベルの間隔のみ 60 度にしておくことで、経度線の間隔は 30 度のままラベルの間隔を変更できます。作図には cartopy_sample10.py を用いました。

```
dlon_lab, dlat_lab = 60, 30 # 経度線・緯度線の間隔  
xticks_lab = np.arange(0, 360.1, dlon_lab) # 経度線ラベルを描く値  
yticks_lab = np.arange(-90, 90.1, dlat_lab) # 緯度線ラベルを描く値
```

経度線ラベル、緯度線ラベルを描く部分では、これら xticks_lab、yticks_lab を使います。

```
ax.set_xticks(xticks_lab, crs=ccrs.PlateCarree()) # 経度線ラベル  
ax.set_yticks(yticks_lab, crs=ccrs.PlateCarree()) # 緯度線ラベル
```

目盛り線ラベルのサイズは、`ax.axes.tick_params` で設定します。オプションとして `labelsize=12` とすれば、文字サイズが 12 ポイントに設定されます。

```
ax.axes.tick_params(labelsize=12) # 目盛り線ラベルのサイズを指定
```

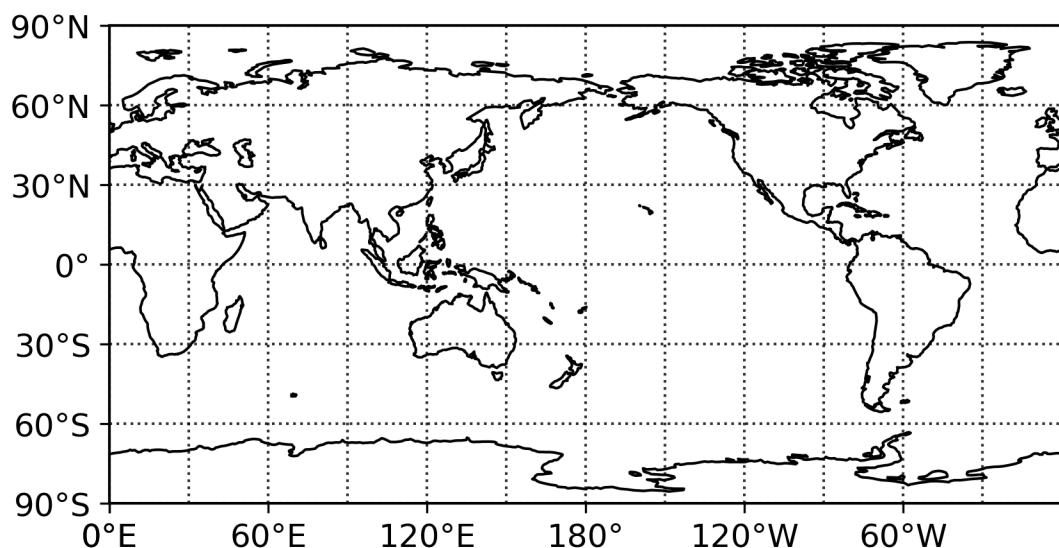


図 7-1-10 経度線を 30 度毎、経度線ラベルを 60 度毎に描く

`ax.axes.tick_params` では、他にも多くの項目を変更可能です（表 7-1-1、図 7-1-11）。オプションのうち、`axis` と `which` は変更を x 軸と y 軸のどちらに適用するや主目盛り、副目盛りのどちらに適用するかを指定するものです。指定がない場合は全てに同じ変更が適用されます。

目盛り線の設定は、幅を `width`（デフォルト：1）、長さを `length`（デフォルト：3.5）、色を `color`（デフォルト：黒）で変更できます。目盛り線の向きは、デフォルトでは枠線の外側（`direction='out'`）ですが、内側に変更することもでき、その場合には `direction='in'` とします。

目盛り線ラベルは、目盛り線とは別に設定するようになっており、色を `labelcolor`（デフォルト：黒）、ラベルを回転させる角度を `labelrotation`（デフォルト：0）で変更します。

表 7-1-1 matplotlib の `axes.Axes.tick_params` で使用可能なオプション一覧

オプション	説明
<code>width</code>	目盛り線の幅、デフォルト：1
<code>length</code>	目盛り線の長さ、デフォルト：3.5
<code>color</code>	目盛り線の色、デフォルト： <code>'k'</code> （黒）
<code>direction</code>	目盛り線の向き、 <code>'in'</code> , <code>'out'</code> , <code>'inout'</code> 、デフォルト： <code>'out'</code> （外側）
<code>bottom, top, left, right</code>	下、上、左、右の目盛り線を描くかどうか、デフォルト： <code>bottom</code> と <code>left</code> が <code>True</code>
<code>pad</code>	目盛り線とラベルの間隔、デフォルト：4
<code>labelsize</code>	目盛り線ラベルの文字サイズ、 数字か次の文字列： <code>'xx-small'</code> , <code>'x-small'</code> , <code>'small'</code> , <code>'medium'</code> , <code>'large'</code> , <code>'x-large'</code> , <code>'xx-large'</code>
<code>labelcolor</code>	目盛り線ラベルの色、デフォルト： <code>'k'</code> （黒）
<code>labelrotation</code>	目盛り線ラベルを回転させる角度、デフォルト：0
<code>labelbottom, labeltop, labelleft, labelright</code>	下、上、左、右の目盛り線ラベルを描くかどうか、 デフォルト： <code>bottom</code> と <code>left</code> が <code>True</code>
<code>axis</code>	x 軸、y 軸のどちらに適用するか、 <code>'x'</code> , <code>'y'</code> , <code>'both'</code> 、デフォルト値： <code>'both'</code> （x、y 軸両方）
<code>which</code>	主、副どちらに適用するか、 <code>'major'</code> , <code>'minor'</code> , <code>'both'</code> 、デフォルト値： <code>'both'</code> （両方）
<code>zorder</code>	目盛り線とラベルが描かれる順番

`ax.axes.tick_params(オプション)` : 変更したい項目を指定

`ax.axes.tick_params(オプション, axis='x')` : x 軸で変更したい項目を指定

`ax.axes.tick_params(オプション, axis='y')` : y 軸で変更したい項目を指定

`ax.axes.tick_params(オプション, axis='x', which='major')` : x 軸の主目盛りについて、変更したい項目を指定

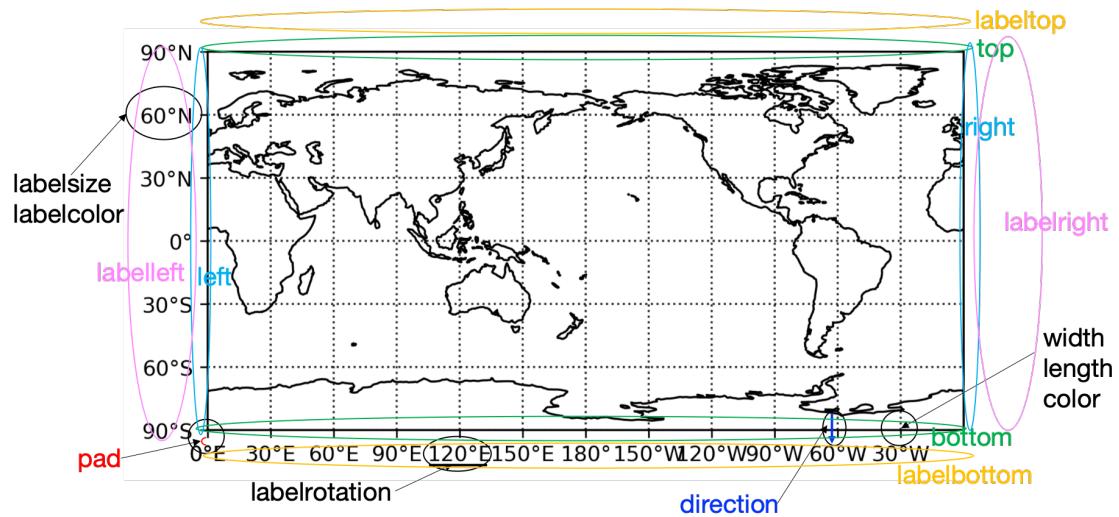


図 7-1-11 ax.axes.tick_params で変更される箇所

図枠の下側、上側、左側、右側に目盛り線を付けるかどうかを決める bottom、top、left、right オプションがあり、デフォルトでは下側と左側だけに目盛り線が付きます。目盛り線ラベルを描くかどうかは、labelbottom、labeltop、labelleft、labelright オプションで設定し、こちらもデフォルトでは下側と左側だけに付くようになっています。

これらのオプションを使い、図枠の上側と右側にも目盛り線と目盛り線ラベルを付けてみます（図 7-1-12）。作図には、cartopy_sample11.py を使いました。上側と右側に目盛り線を付けるため、top=True、right=True としています。また上側と右側の目盛り線ラベルは、labeltop=True、labelright=True で付けます。

```
ax.axes.tick_params(labelsize=12,
                    top=True, right=True, labeltop=True, labelright=True)
```

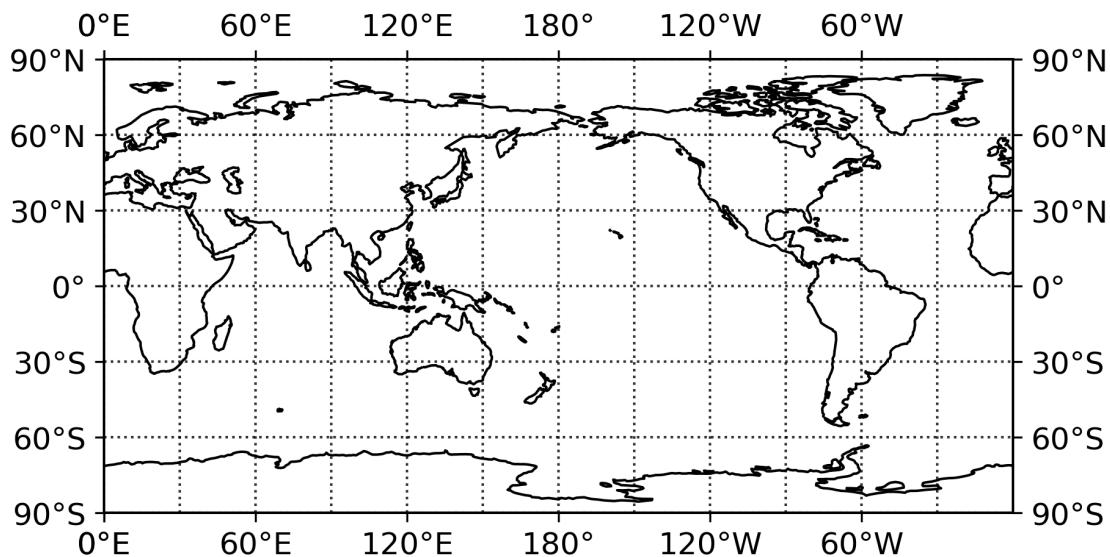


図 7-1-12 図枠の上側と右側にも目盛り線と目盛り線ラベルを付ける

7.1.6 陸と海を塗り分けて描く

cartopy でも Basemap 同様に陸と海を塗り分けるツールが提供されています。ここでは、`cartopy.feature` を使って塗り分けてみます（図 7-1-13）。作図には `cartopy_sample12.py` を使います。ここでは、変更される部分が分かりやすくなるように、プログラム中の `ax.coastlines()`を無効にしているため、海岸線は描かれていません。`cartopy.feature` を使って作図する際には、初回のみデータのダウンロードが行われるため、ネットワークに接続されていない環境では `cartopy_sample12.py` でエラーが発生します。

最初に、作図に必要な `cartopy.feature` を import して `cfeature` として利用します。`ax.add_feature(cfeature.塗り潰す対象)`で色を付けることができ、陸に色を付ける場合は `cfeature.LAND`、海に色を付ける場合が `cfeature.OCEAN` です。なお `cfeature.OCEAN` では、海洋に加えて湖のうちカスピ海だけは塗り潰されています。

```
import cartopy.feature as cfeature
ax.add_feature(cfeature.LAND) # 陸に色を付ける
ax.add_feature(cfeature.OCEAN) # 海に色を付ける
```

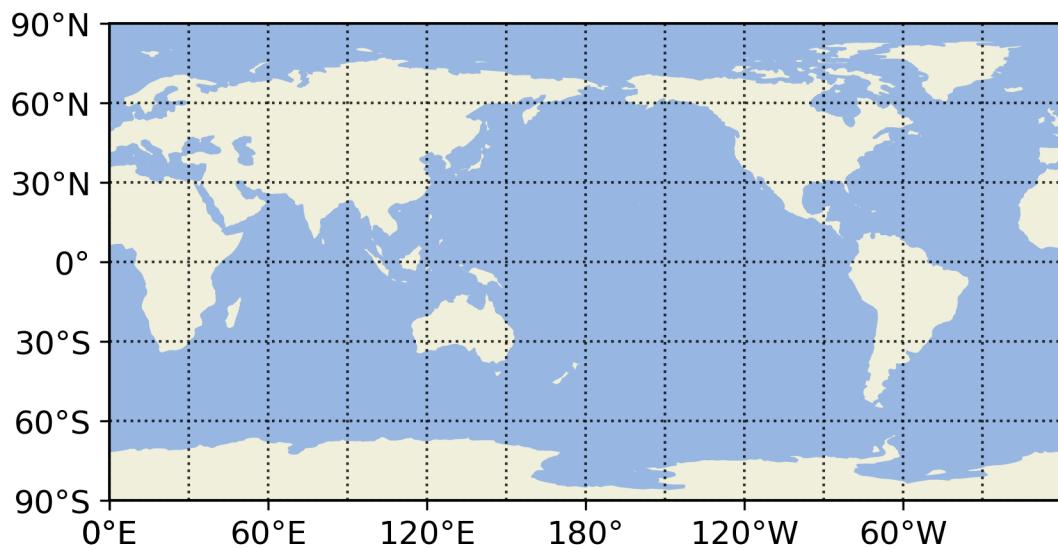


図 7-1-13 陸と海を塗り分ける

7.1.7 海岸線と湖、川を描く

さらに、海岸線と湖、川を追加していきます（図 7-1-14）。海岸線を追加するには cfeature.COASTLINE、湖を描くには cfeature.LAKES、川を描くには cfeature.RIVERS を使います。黒実線の海岸線に加え、五大湖やバイカル湖、アマゾン川、ナイル川など主要な湖や河川が水色で表示されるようになりました。作図には、cartopy_sample13.py を使いました。

なお海岸線を描く場合、デフォルトでは ax.coastlines よりは太い線になります。線の太さは linewidth オプションを使うことにより変更可能で、少し細い線にするため linewidth=0.8 としています。他には不透明度を表すオプション alpha（0～1 の範囲、1 で不透明、0 で透明）も利用可能です。

```
ax.add_feature(cfeature.COASTLINE, linewidth=0.8) # 海岸線を描く  
ax.add_feature(cfeature.LAKES) # 湖を描く  
ax.add_feature(cfeature.RIVERS) # 川を描く
```

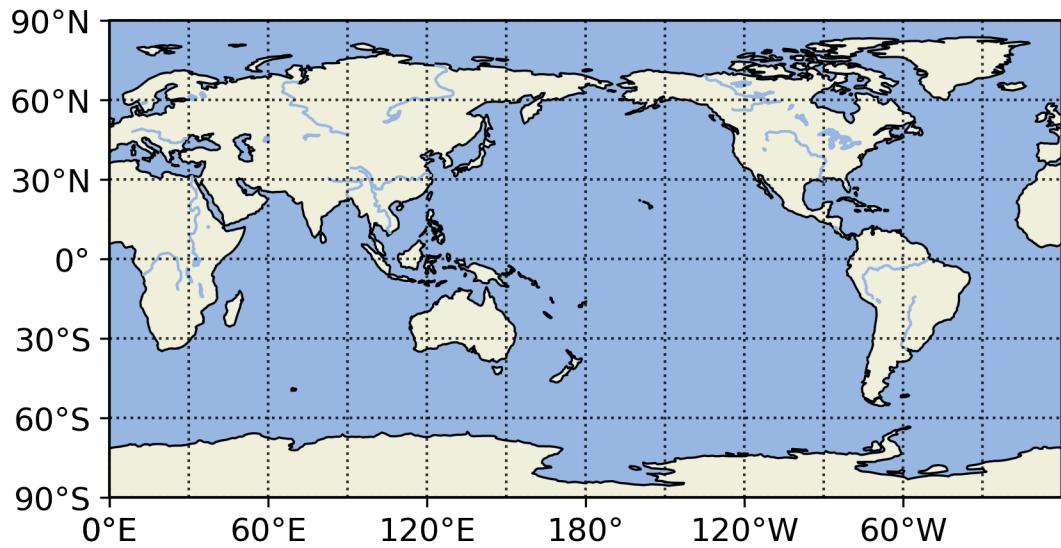


図 7-1-14 海岸線と湖、川を描く

7.1.8 陸上に国境線を描く

陸上に国境線を描くこともでき、`cfeature.BORDERS` を使います。点線で国境線が描かれるようになりました（図 7-1-15）。破線にするためのオプションとして `linestyle='--'`、線の幅を細くするため `linewidth=0.8` を加えています。作図には、`cartopy_sample14.py` を使いました。

```
ax.add_feature(cfeature.BORDERS, linestyle='--', linewidth=0.8) # 国境線
```

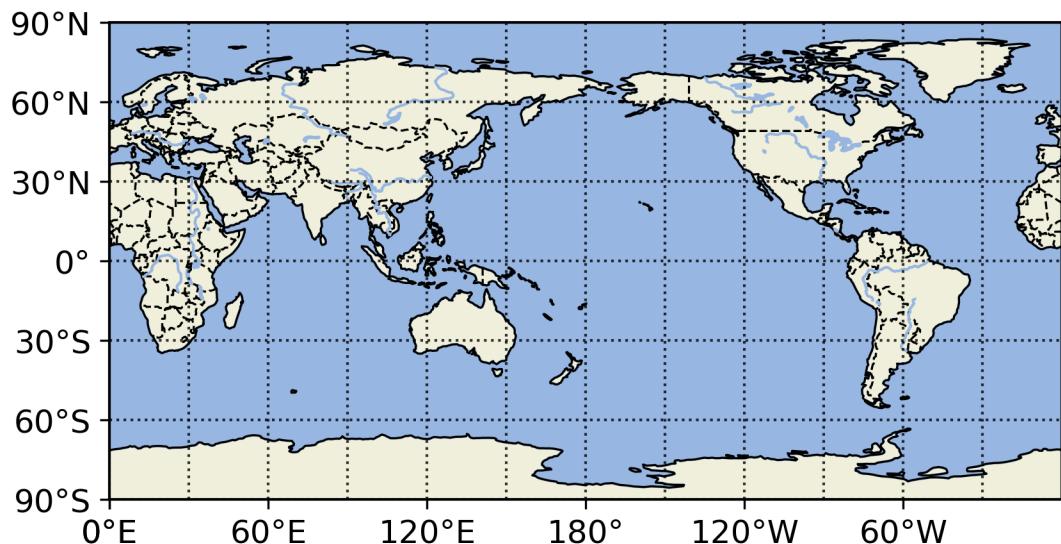


図 7-1-15 国境線を描く

7.1.8 陸や海、湖を指定した色で塗り潰す

cartopy.feature はデフォルトでも綺麗に陸と海が塗り潰されているので、変更する必要はないかもしれません、色を指定して塗り潰すことも可能になっています。その際には、オプションとして color を使います。ここでは、Basemap の時に陸と海の塗り分けを行った図 6-1-9 と同じ色を付けてみます（図 7-1-16）。陸を緑色にするために color='g'、海と湖を水色にするために color='aqua' としています。湖の周りが黒線にならない違いはありますが、図 6-1-9 と似た図になりました。作図には、cartopy_sample15.py を使いました。

```
ax.add_feature(cfeature.LAND, color='g') # 陸を緑色で塗り潰す  
ax.add_feature(cfeature.OCEAN, color='aqua') # 海を水色で塗り潰す  
ax.add_feature(cfeature.LAKES, color='aqua') # 湖を水色で塗り潰す
```

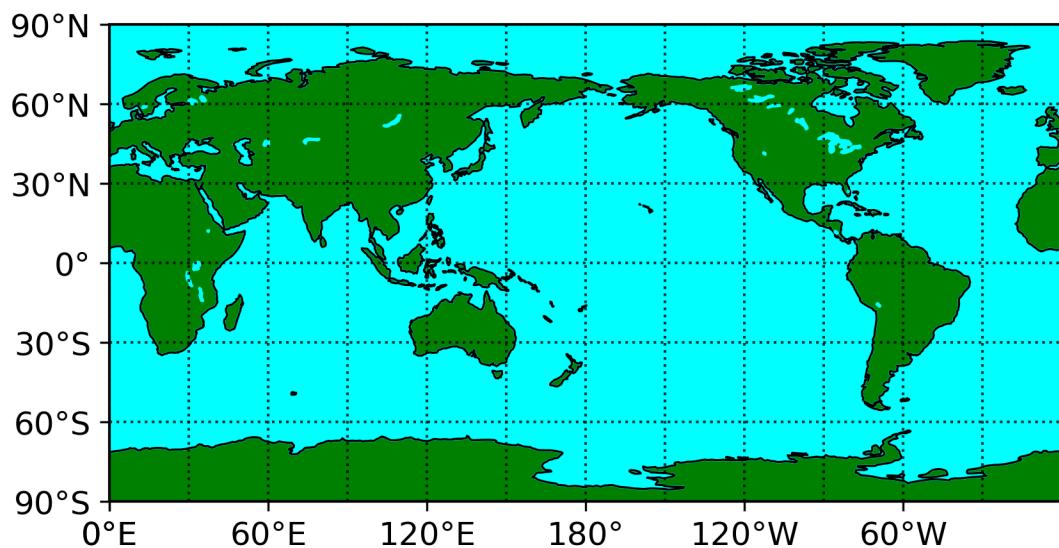


図 7-1-16 陸を緑色、海と湖を水色で塗り潰す

なお、川と海岸線、国境線を描く所でも color オプションは有効ですが、意図していない部分まで塗り潰されてしまうので、使わない方が良いでしょう。

7.2 cartopy を使った等高線、陰影の作図

ここでは、Basemap の所で行ったように、気象データの形式の 1 つである NetCDF データを読み込み、作図を行います。気象データの形式や読み込みについては、6.4 節を参照してください。6.5.3 節で行った時と同様に、7 月の平均値を等高線、2018 年 7 月の海面更正気圧 (SLP) 偏差を陰影で作図できるようにしていきます。作図には、月平均した SLP データの NetCDF ファイル (slp.mon.mean.nc) が必要なので、まだダウンロードしていない場合には、`basemap_nc2bin.py` でダウンロードしておきます。

7.2.1 等高線を描く

まずは SLP データを利用して等高線を作成します（図 7-2-1）。作図には `cartopy_contour.py` を使いました。`basemap_contour6.py` で図 6-5-6 を作図した時と同様に、NCEP 再解析データの NetCDF ファイルを読み込み、取り出した 1 次元の経度データを `lon`、1 次元の緯度データを `lat`、空間 2 次元、時間 1 次元の SLP データを `slp` という変数に格納しています。

```
file_name = "slp.mon.mean.nc"
nc = netCDF4.Dataset(file_name, 'r') # NetCDF データの読み込み
lon = nc.variables["lon"][:] # 経度データ
lat = nc.variables["lat"][:] # 緯度データ
slp = nc.variables["slp"][:] # SLP データ
nc.close() # ファイルを閉じる
```

次も同様に、7 月の SLP 平均値を計算して `slp_jul` に格納します。時間平均を行なったので、`slp_jul` は空間 2 次元のデータです。プログラム中では、作成したデータのサイズを numpy 配列名.shape を使って書き出しており、`lon: (144,), lat: (73,), slp: (860, 73, 144), slp_jul: (73, 144)` のように、`lon` と `lat` は 1 次元、`slp` は 3 次元、`slp_jul` は 2 次元のデータとなっていることが分かります。このメソッドでは、配列の形状をタプルで書き出すので、1 次元の場合でもカンマが付いています。

```
tstr = (1981 - 1948) * 12 + 6 # 開始点：1981 年 7 月  
tend = (2010 - 1948 + 1) * 12 # 終了点：2010 年の 12 月  
slp_jul = slp[tstr:tend:12, :, :].mean(axis=0) # 7 月の SLP 平年値
```

cartopy で等高線を描くコマンドは、**ax.contour(引数 1, 引数 2, 引数 3)**です。5.2 節で紹介した matplotlib の plt.contour と同じですが、ax を定義した際に cartopy の正距円筒図法を適用したので、正距円筒図法上で等高線を描くようになっています。5.2 節の場合と同様、ax.contour の 1 番目の引数は x 軸上の位置、2 番目の引数は y 軸上の位置で、3 番目の引数は等高線を描くための z 軸データに当たります。z 軸データとしては、2 次元の slp_jul を用います。x, y 軸データとしては、1 次元の経度・緯度データ lon, lat から np.meshgrid を使って作成した 2 次元データ x, y を使います。x, y も形状を書き出しており、x: (73, 144)、y: (73, 144) のように 2 次元であることが確認できます。4 番目の引数として、等高線を描く値を与えることができ、その clevs は、5.2 節のときと同様に 4 hPa 毎に設定しています。4 番目の引数を与える代わりに levels=clevs としても同じです。

```
x, y = np.meshgrid(lon-180.0, lat) # 経度、緯度データ  
clevs = np.arange(np.floor(slp_jul.min() - np.fmod(slp_jul.min(), 20)), ¥  
                  np.ceil(slp_jul.max()) + 1, 4)  
ax.contour(x, y, slp_jul, clevs, linewidths=0.8, colors='k')
```

等高線を描く際には、5.2 節で紹介した plt.contour のオプションが利用できます（表 5-2-1）。ここでは、線の幅を linewidths=0.8（デフォルト 1）、線の色を colors='k'（黒色）に設定しました。

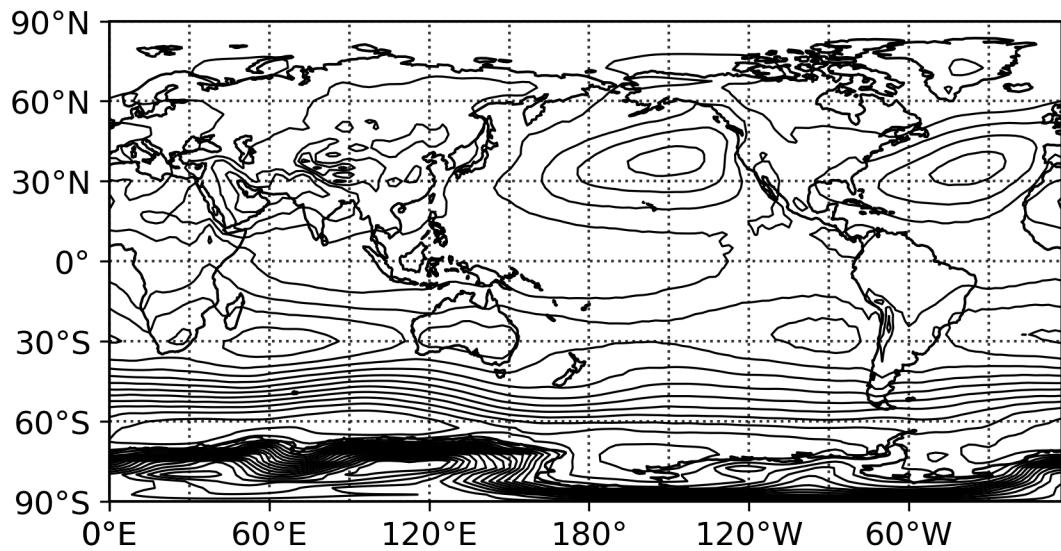


図 7-2-1 NCEP 再解析データの 1981 年から 2010 年までの 30 年間の 7 月 SLP を平均して等高線を描いた

7.2.2 等高線ラベルを描く

図 6-5-6 のような等高線になりましたが、等高線に気圧を示すラベルが付いていません。ラベルを付けるには、Basemap で等高線ラベルを付けた時と同様に、等高線を描いた値 cs.levels を clevels に格納し、ax.contour の戻り値 cs にある、cs.clabel に clevels を渡す方法を使います (cartopy_contour2.py)。ここでは、clevels[::5]を与えて 5 飛ばし (4 hPa 毎に等高線を描いたので 20 hPa 毎) に等高線ラベルを描いています (図 7-2-2)。

```
cs = ax.contour(x, y, slp_jul, clevs, linewidths=0.8, colors='k') # 等高線
clevels=cs.levels # ラベルを付ける値
cs.clabel(clevels[::5], fontsize=12, fmt="%d") # 等高線ラベル
```

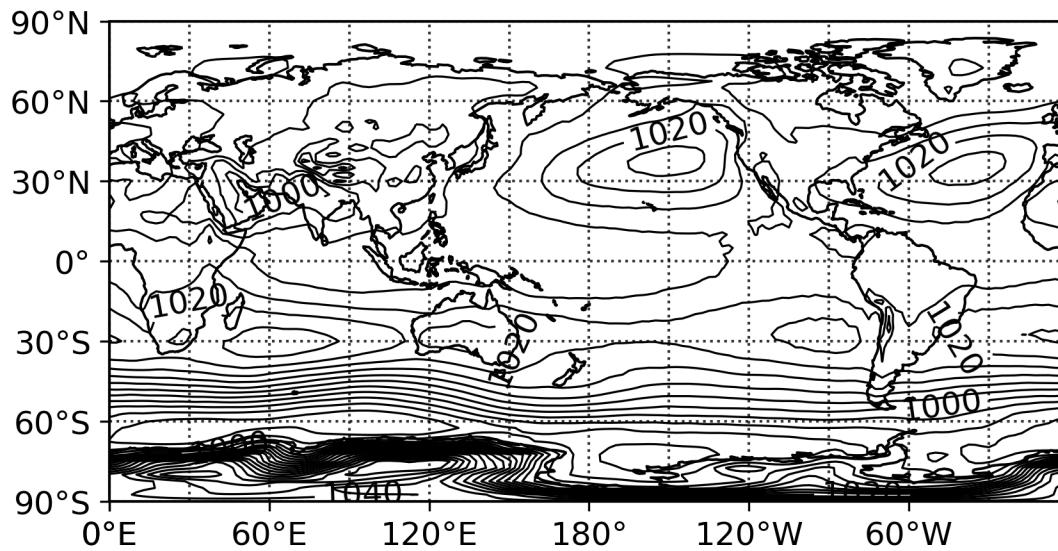


図 7-2-2 等高線ラベルを描いた

7.2.3 陰影を描く

それでは、2018年7月のSLP偏差を陰影で描きます（図7-2-3）。図6-5-7とほとんど同じ図になりました。作図にはcartopy_contourf.pyを用いました。6.5.3節同様に2018年7月の偏差を計算し、slp_anomに格納しておきます。陰影の範囲の決め方も同様に、正が赤、負が青で領域の範囲の中央が0になるようにしております、clevsの範囲の両端は、偏差の絶対値の最大値よりも1大きい値にしています。

陰影を描くコマンドは、`ax.contourf(引数1, 引数2, 引数3)`です。matplotlibの`plt.contourf`と同じなので、5.3節で紹介した`plt.contourf`のオプションが利用できます（表5-3-2）。1番目から3番目までの引数は等高線を描く`ax.contour`と同じで、x軸上の位置、y軸上の位置、z軸データを与えます。4番目の引数には陰影を描く値`clevs`を与えていますが、等高線の場合と同様、引数を与える代わりに`levels=clevs`とも記述できます。陰影を描く色は`cmap`オプションで色テーブルの名前から設定することができ、`cmap='bwr'`（青～白～赤と変化）としました。色テーブルの名前は、図4-5-7にあるものが利用できます。

```

n = (2018 - 1948) * 12 + 6
slp_anom = slp[n, :, :] - slp_jul # 2018 年 7 月の偏差
work = max(np.abs(np.floor(slp_anom.min())), np.abs(np.ceil(slp_anom.max())))
clevs = np.arange(-(work+1), work + 1) # 陰影を描く値
ax.contourf(x, y, slp_anom, clevs, cmap="bwr") # 陰影を描く

```

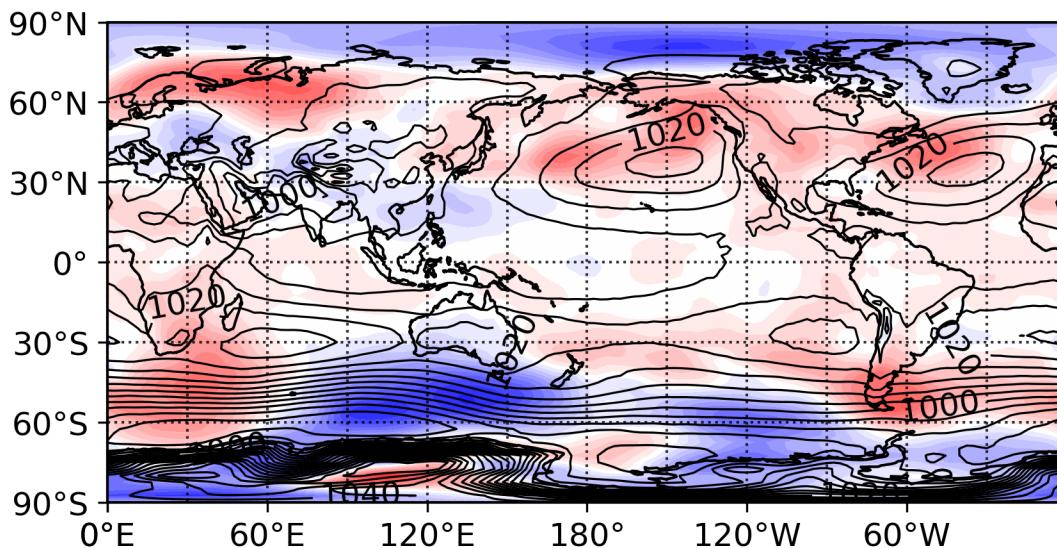


図 7-2-3 2018 年 7 月の SLP 偏差を陰影で描いた

7.2.4 カラーバーを付ける

作成した図にカラーバーを付け、陰影の値が分かるようにしていきます。作図には `cartopy_contourf2.py` を用いました。カラーバーを付けるには、5.3.3 節、6.5.3 節で行なったように `plt.colorbar` を使います。`cartopy` の場合には、これまでのように `plt.contourf`、`m.contourf` の直後に `plt.colorbar` を行っても、カラーバーの作成に必要な情報がないためエラーになります。代わりに `ax.contourf` の戻り値を `im` に格納しておき、`plt.colorbar` の 1 番目の引数として渡すことでカラーバーを作成します。カラーバーはデフォルトで縦方向ですが、そのままでは図枠の上下に大きくはみ出してしまうので、`shrink=0.55` で大きさの調整をしています。カラーバーにラベルを付ける方法は、これまでと同じで `plt.colorbar` の戻り値 `cbar` に対して `cbar.set_label` を使います。

```
im = ax.contourf(x, y, slp_anom, clevs, cmap="bwr")
cbar=plt.colorbar(im, shrink=0.55)
cbar.set_label('SLP anom. in Jul. 2018', fontsize=14)
```

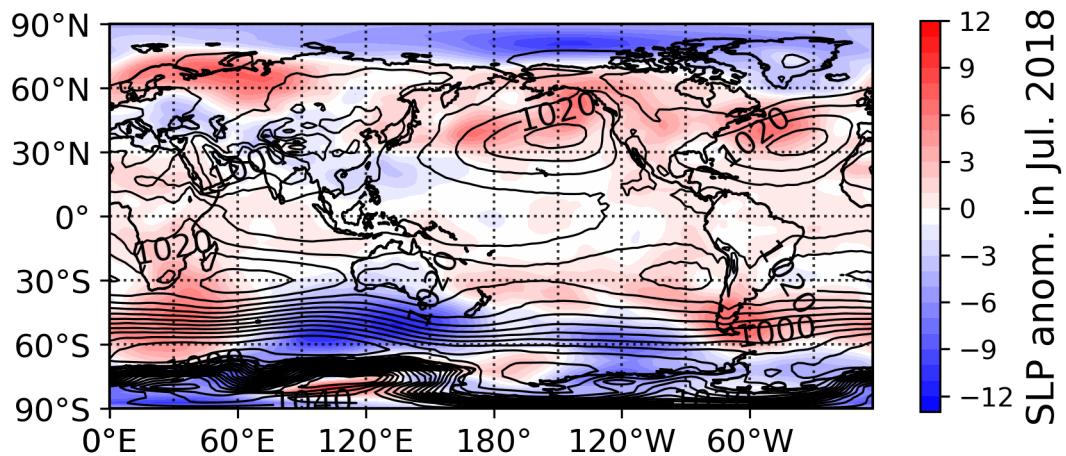


図 7-2-4 カラーバーを付けた

`plt.colorbar` では大きさの調整の他にも、表 5-3-1 に載せた様々なオプションを使用することができます。これらのオプションを使いカラーバーを水平にして大きさやカラーバーとグラフの間の間隔を調整したものが図 7-2-5 です。作図には `cartopy_contourf3.py` を用いました。カラーバーは、`shrink=0.8` で大きさを調整し、水平方向にするために `orientation='horizontal'`、カラーバーとグラフの間の間隔を調整するために `pad=0.08` を使いました。

```
cbar=plt.colorbar(im, shrink=0.8, orientation='horizontal', pad=0.08)
```

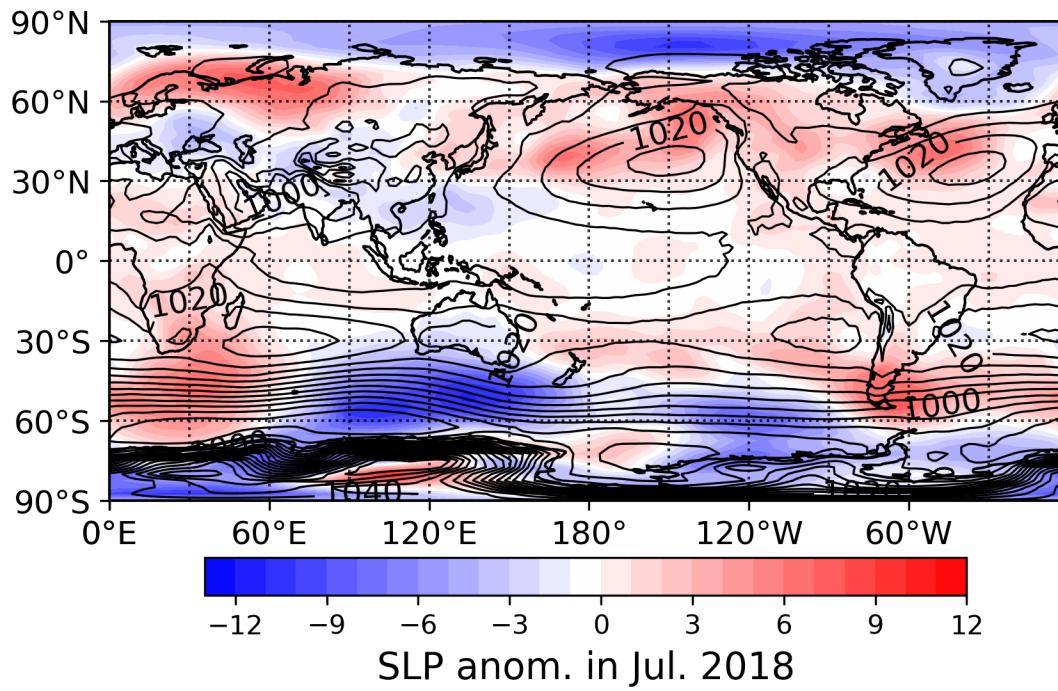


図 7-2-5 水平のカラーバーを付けた

cartopy でも matplotlib 同様に、`ax.set_title` を使い図のタイトルを付けることが可能になっています（図 7-2-6）。ここでは `fontsize` オプションを使い文字を大きくしています。作図には、`cartopy_contourf4.py` を使いました。

```
ax.set_title("Jul. SLP & anom. in Jul. 2018", fontsize=20)
```

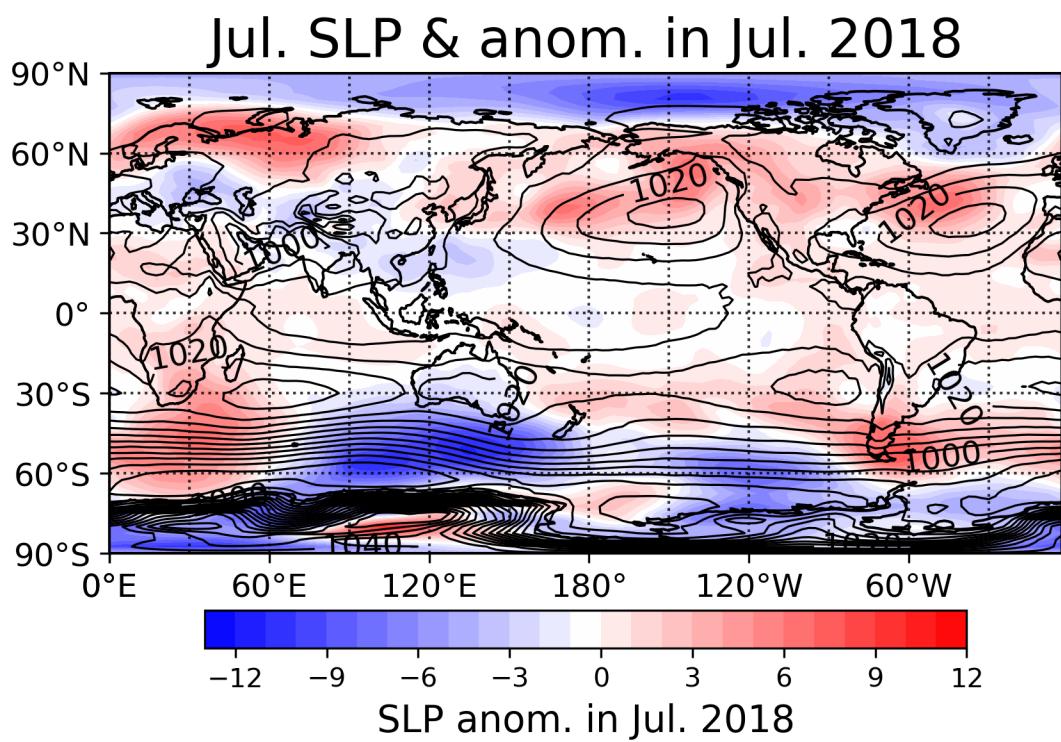


図 7-2-6 タイトルを付けた

7.3 cartopy を使った矢羽、矢印の作図

cartopy では Basemap 同様に矢羽や矢印を描くことができます。ここでは、7.2 節で作成した 7 月の SLP 平均値の等高線に矢羽や矢印を描いていきます。作図には SLP データの NetCDF ファイルに加え、東西風、南北風データの NetCDF ファイル (uwnd.mon.mean.nc, vwnd.mon.mean.nc) も必要なので、ダウンロードしていない場合には basemap_nc2bin.py でダウンロードしておきます。

7.3.1 矢羽を描く

矢羽を描くには、`ax.barbs(引数 1, 引数 2, 引数 3, 引数 4)`を使います。1 番目の引数が x 軸上の位置、2 番目の引数が y 軸上の位置で、3 番目の引数が東西風データ、4 番目の引数が南北風データに当たります。5.1.1 節の plt.barbs と同じなので、表 5-1-1 のオプションが利用可能です。矢羽を描くためのサンプルプログラムは、cartopy_barbs.py です。SLP、東西風、南北風データの 3 ファイルを読み込むために、file_names と var_names にそれぞれのファイル名と NetCDF ファイルに格納されたデータ名を識別するための変数名を定義しておきます。これらを zip に渡してループを回し、file_name、var_name に同じ番号の要素がセットで入るようにしています。nc.variables で読み込んだデータは、Numpy の ndarray になっており、それらをループが回る毎にリスト d に追加していきます。そのため、リストの要素 d[0] が SLP、d[1] が東西風、d[2] が南北風に対応します。

```
# 読み込むファイル名と変数名
file_names = ["slp.mon.mean.nc", "uwnd.mon.mean.nc", "vwnd.mon.mean.nc"]
var_names = ["slp", "uwnd", "vwnd"]
d = list()
for file_name, var_name in zip(file_names, var_names):
    nc = netCDF4.Dataset(file_name, 'r') # NetCDF データの読み込み
    lon = nc.variables["lon"][:] # 変数の読み込み（経度）
    lat = nc.variables["lat"][:] # 変数の読み込み（緯度）
    d.append(nc.variables[var_name][:]) # 変数の読み込み（データ）
    nc.close() # ファイルを閉じる
```

次に SLP、東西風、南北風それぞれについて、1981～2010 年の 7 月平均値を計算します。例えば SLP の場合、`d[0][tstr:tend:12,:,:]` のように 1981～2010 年の 7 月のデータを取り出します。最初の `d[0]` は、リストの 0 番目の要素を取り出すことを意味します。取り出された `d[0]` は ndarray になっているので、時間軸 (`axis=0`) にスライス記法 `[tstr:tend:12,:,:]` を適用することで、7 月のデータを取り出すことができます。最後の `.mean(axis=0)` はこれまで同様、時間軸について算術平均を行うことを意味しています。

```
# 1981～2010 年の 7 月平均値
tstr = (1981 - 1948) * 12 + 6
tend = (2010 - 1948 + 1) * 12
slp = d[0][tstr:tend:12, :, :].mean(axis=0) # SLP の 7 月平均値
u = d[1][tstr:tend:12, :, :].mean(axis=0) # 東西風の 7 月平均値
v = d[2][tstr:tend:12, :, :].mean(axis=0) # 南北風の 7 月平均値
```

7.2.1 節、7.2.2 節と同様に等高線を描いてラベルを付けた後、`ax.barbs` に `color='r'` オプションを与えることで赤色の矢羽を描いています（図 7-3-1）。また、6.5.5 節の Basemap の所で解説した矢羽を間引く方法（3 グリッド毎に描くために`[:,::3,::3]` の記法を使う）、風速の小さい場所に丸印が描かれないようにする方法（`sizes=dict(emptybarb=0.0)` オプション）も使いました。なお、矢羽を描くために用いる東西風、南北風データの単位が m/s なので、短矢羽が 5 m/s、長矢羽が 10 m/s、旗矢羽が 50 m/s で描かれます。

```
ax.barbs(x[:,::3,::3], y[:,::3,::3], u[:,::3,::3], v[:,::3,::3],
          sizes=dict(emptybarb=0.0), length=4, color='r')
```

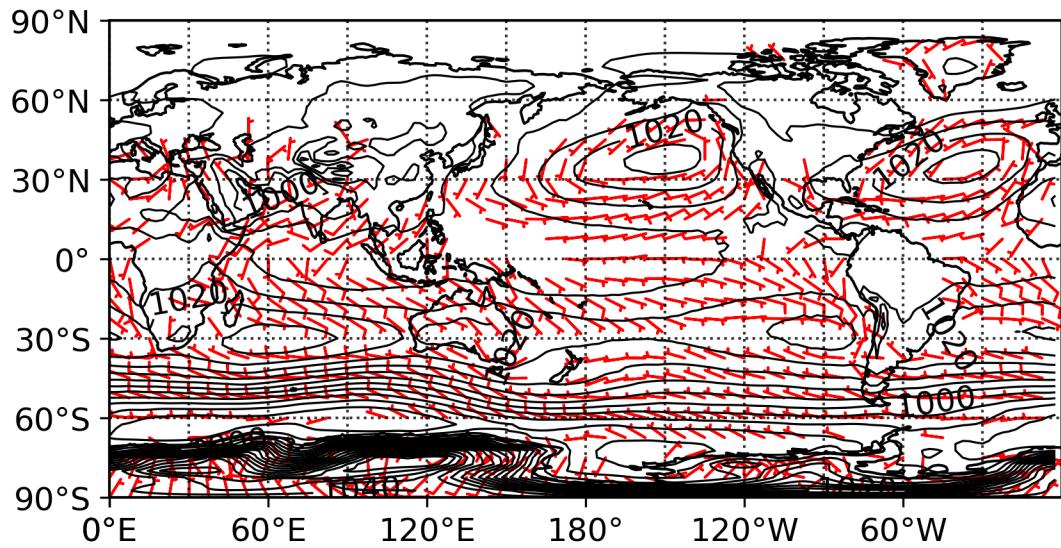


図 7-3-1 1981～2010 年の 7 月平均値から矢印を描く

7.3.2 矢印を描く

矢印を描くには、`ax.quiver(引数 1, 引数 2, 引数 3, 引数 4)`を使います。引数は矢印の場合と同じで、x 軸上の位置、y 軸上の位置、東西風データ、南北風データになります。矢印を描くプログラムは `cartopy_quiver.py` です。`ax.quiver` は 5.1.4 節の `plt.quiver` と同じなので、表 5-1-2 のオプションが利用可能です。ここでは、色を指定する `color` オプションを付けて赤矢印を描きました（図 7-3-2）。

```
ax.quiver(x[::3, ::3], y[::3, ::3], u[::3, ::3], v[::3, ::3], color='r')
```

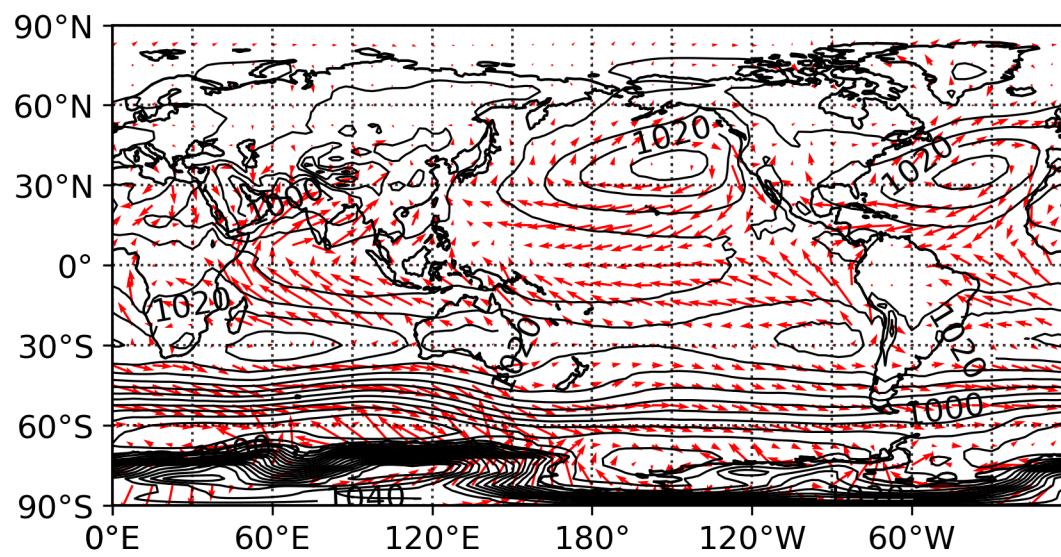


図 7-3-2 1981～2010 年の 7 月平均値から矢印を描く

7.4 cartopy で利用できる図法

cartopy でも Basemap のように、様々な図法を利用して作図することができます。ここでは cartopy で作図する方法についてのみ解説するので、図法については 6.2 節の解説を参照してください。

7.4.1 正射投影図法

6.2.2 節で紹介した正射投影図法（あるいは平射図法）で作図する方法です。作図を行うプログラムは、`cartopy_proj.py` です。正射投影図法で作図するには、`projection` オプションに `ccrs.Orthographic()` を与えます。図 7-4-1 のように地球儀風の図ができました。Basemap の所で行った図 6-2-1 の右上の図の場合と同様に、東経 180 度、北緯 45 度を中心に描いたので、北太平洋が手前側に来ています。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, ¥
                     projection=ccrs.Orthographic(central_longitude=180.0, ¥
                     central_latitude=45.0))
ax.set_title("projection='ccrs.Orthographic'") # タイトルを付ける
```

正射投影図法の場合にも経度線・緯度線を描く間隔を指定でき、次のように経度線・緯度線を 10 度毎に付けるようにしました。ラベルを付けることはできないため、ラベルの設定はありません。

```
# 緯度線、経度線を描く値
dlon, dlat = 10, 10
xticks = np.arange(0, 360.1, dlon)
yticks = np.arange(-90, 90.1, dlat)
gl = ax.gridlines(crs=ccrs.PlateCarree(), draw_labels=False, ¥
                   linewidth=1, linestyle=':', color='k', alpha=0.8)
gl.xlocator = mticker.FixedLocator(xticks) # 経度線を描く値
gl.ylocator = mticker.FixedLocator(yticks) # 緯度線を描く値
```

さらに、`ax.set_title` で図にタイトルを付けました。

```
ax.set_title("projection='ccrs.Orthographic'") # タイトルを付ける
```

```
projection='ccrs.Orthographic'
```

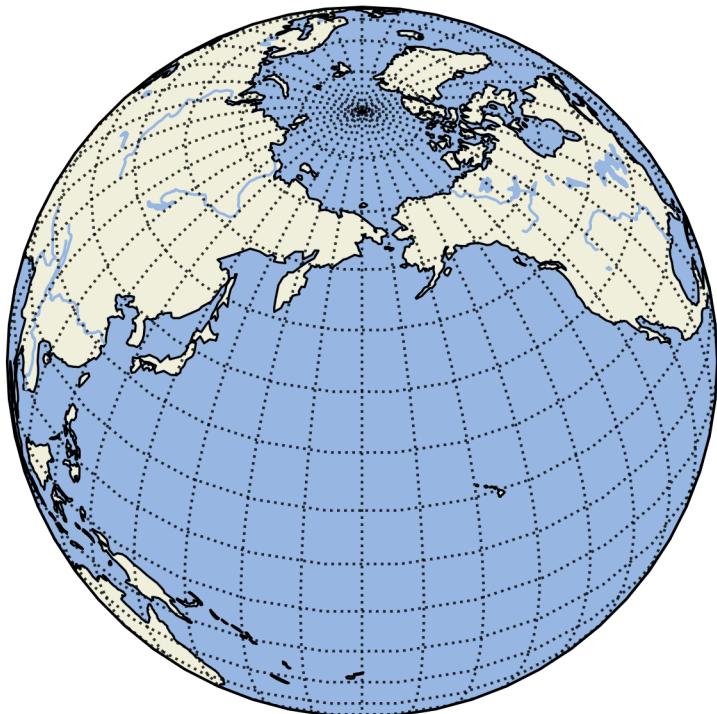


図 7-4-1 正射投影図法で描く

7.4.2 メルカトル図法

6.2.3 節で紹介したメルカトル図法でも作図することができます（図 7-4-2）。作図を行うプログラムは、`cartopy_proj2.py` です。メルカトル図法で作図するには、`projection` オプションに `ccrs.Mercator()` を与えます。ここでは、太平洋側を中心にするため中心経度 `central_longitude=180.0` とし、南緯 60 度から北緯 60 度の範囲で描くため、`min_latitude=-60.0`、`max_latitude=60.0` としました。経度線は 30 度毎、経度線は 15 度毎に描きました。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, ¥
                     projection=ccrs.Mercator(central_longitude=180.0, ¥
                                              min_latitude=-60.0, ¥
                                              max_latitude=60.0))
ax.set_title("projection='ccrs.Mercator'")
```

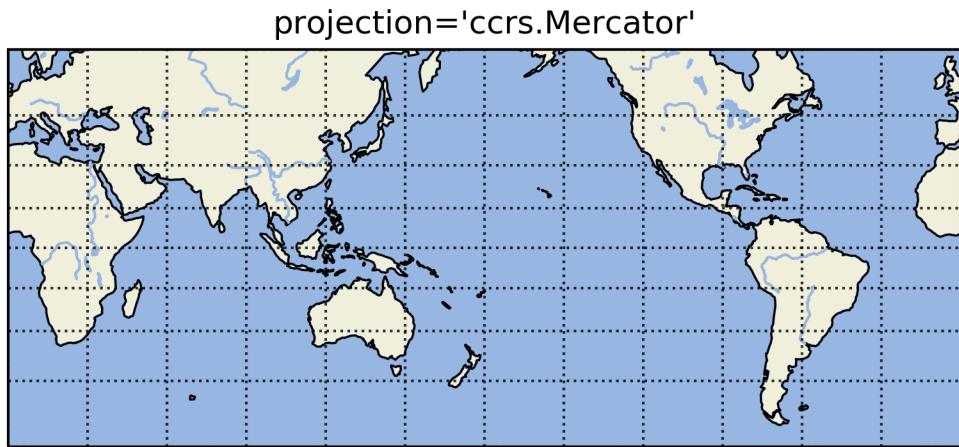


図 7-4-2 メルカトル図法で描く

メルカトル図法の作図では、東経 0 度を中心の図では、`ax.gridlines` で `draw_labels=True` とすれば、目盛り線ラベルを付けることができます。中央を東経 180 度とした場合には、経度帯の半分しか目盛り線ラベルがつかないため、ここでは、ラベルを付けていません。

7.4.3 ランベルト正角円錐図法

6.2.4 節で紹介したランベルト正角円錐図法も試してみます（図 7-4-3）。作図を行うプログラムは、`cartopy_proj3.py` です。ランベルト正角円錐図法で作図するには、`projection` オプションに `ccrs.LambertConformal()` を与えます。ランベルト正角円錐図法では、図の中心経度と中心緯度の設定によって図の歪みなどが変わってくるため、対象となる領域に近い点を指定した方が良いでしょう。ここでは、6.2.4 節の場合と同じ、中心経度 `central_longitude=180.0`、中心緯度 `central_latitude=60.0` を使いました。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, ¥
                     projection= ccrs.LambertConformal(central_longitude=180.0, ¥
                                                       central_latitude=50.0))
ax.set_title("projection='ccrs.Mercator'")
```

ランベルト正角円錐図法の場合には、`ax.gridlines` で `draw_labels=True` とし

た場合にエラーとなります。

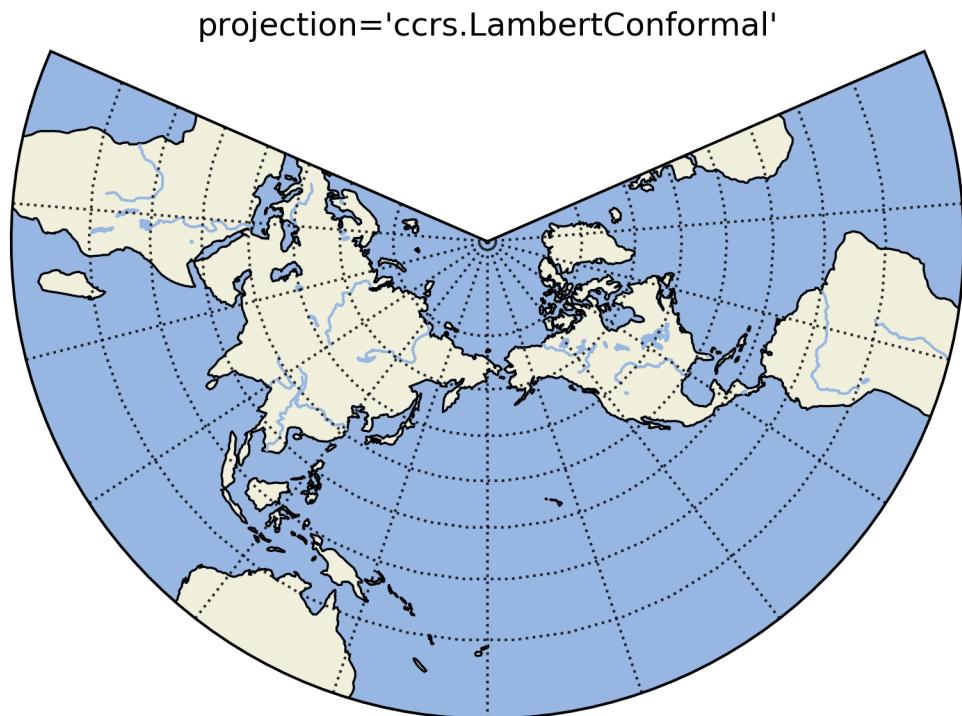


図 7-4-3 ランベルト正角円錐図法で描く

ランベルト正角円錐図法では両極を同時に描けないので、地球全体を把握するための図よりは領域を限定した図に適しています。`ax.set_extent` を使うことで日本周辺に限定することもできます(図 7-4-4)。作図は `cartopy_proj4.py` で行いました。中心経度は東経 135 度、中心緯度は北緯 35 度に設定しました。`dlon`、`dlat` を変更し、経度線、緯度線は 10 度毎に描きました。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, ¥
                     projection=ccrs.LambertConformal(central_longitude=135.0, ¥
                     central_latitude=35.0))
ax.set_extent([100, 170, 10, 70]) # 領域の限定
```

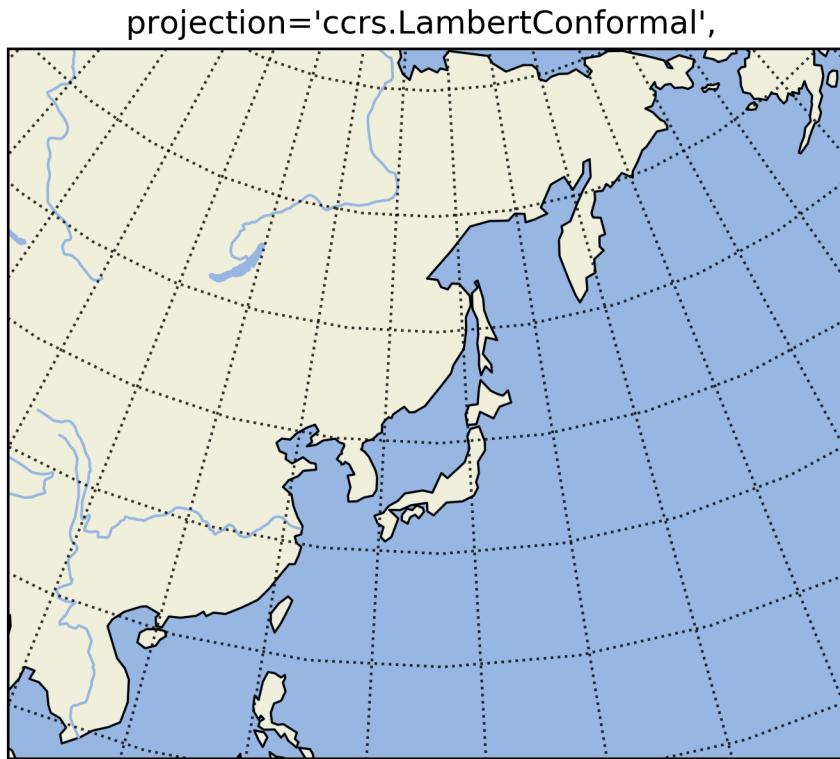


図 7-4-4 ランベルト正角円錐図法で日本周辺だけを描く

7.4.4 極投影図法

6.2.5 節で紹介した極投影図法（ポーラーステレオ図法）で描くことも可能です（図 7-4-5）。作図は cartopy_proj5.py で行いました。南極を中心とする極投影図法で作図する場合、projection オプションに `ccrs.SouthPolarStereo()` を与えます。北極を中心とする場合には、`ccrs.NorthPolarStereo()`です。極投影図法では作図する領域を指定する必要があり、ここでは、南極から南緯 20 度までの全経度帯を `ax.set_extent([-180, 180, -90, -20], ccrs.PlateCarree())`で指定しています。ここで `ccrs.PlateCarree()`を省略するとうまく作図できません。`dlon, dlat = 30, 10` に設定して経度線を 30 度毎、緯度線を 10 度毎に描きました。指定したのは南緯 20 度までですが、図 7-4-5 のように、南緯 20 度の緯度円に外接するような四角形の領域まで描かれます。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, projection=ccrs.SouthPolarStereo())
ax.set_extent([-180, 180, -90, -20], ccrs.PlateCarree())
ax.set_title("projection='ccrs.SouthPolarStereo'")
```

```
projection='ccrs.SouthPolarStereo'
```

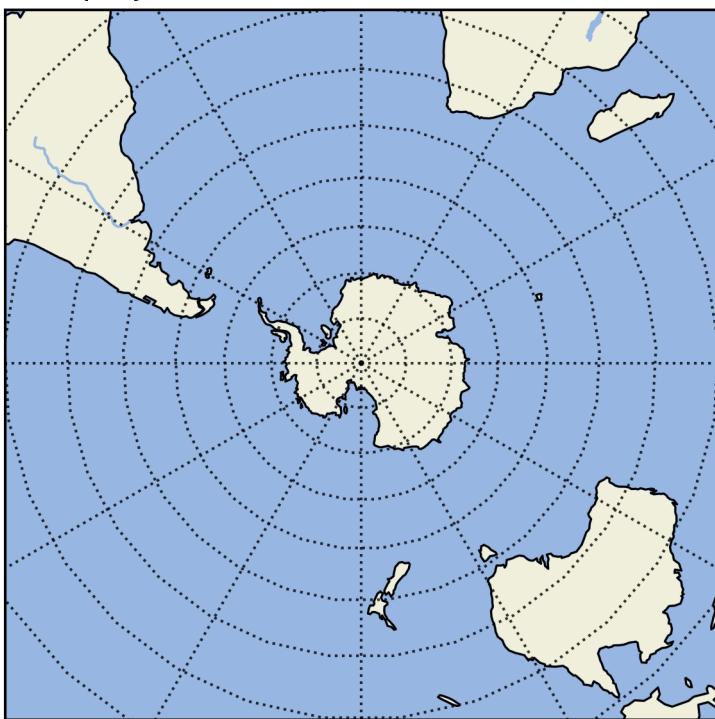


図 7-4-5 極投影図法で南極周辺を描く

cartopy では、作図範囲を南緯 20 度の緯度円までに限定することができます。cartopy_proj6.py で行っています（図 7-4-6）。cartopy を呼び出した際のサブプロット（軸 : axes）は、左下の座標が (0.0, 0.0)、右上の座標が (1.0, 1.0) です（図 7-4-7）。サブプロットの端が図 7-4-5 の図枠に対応しており、この領域は ax.transAxes で参照することができます。そのため、中心座標を (0.5, 0.5) とした半径 0.5 の円を作成すれば、この円は図枠の四角形と接することができます。円形の領域内だけ表示させることができれば、南緯 20 度の緯度円に限定できるようになります。ここでは、matplotlib に含まれている `matplotlib.path` を使い、このモジュールを `mpath` で参照しています。`mpath.Path` に円形の領域を渡して領域内だけ表示させることで、南緯 20 度の緯度円に限定しています。まず `center` に中心 (0.5, 0.5) の座標を、`radius` に半径 0.5 を入れています。次に $0 \sim 2\pi$ の範囲で位相 `theta` を作成し、中心 (0.0, 0.0)、半径 1 の円を構成する座標を計算して、`verts` に格納しています。最後に、`verts * radius + center` の計算を行った結果を `mpath.Path` に渡し、円形の領域

を作成します (circle)。`ax.set_boundary` は、図枠の領域を限定するために使っており、範囲としてサブプロットの四角形の領域に内接する円形の領域 circle を渡すことで、南緯 20 度の緯度円になります。

```
import matplotlib.path as mpath
center, radius = [0.5, 0.5], 0.5
theta = np.linspace(0, 2*np.pi, 100)
verts = np.vstack([np.sin(theta), np.cos(theta)]).T
circle = mpath.Path(verts * radius + center)
ax.set_boundary(circle, transform=ax.transAxes)
```

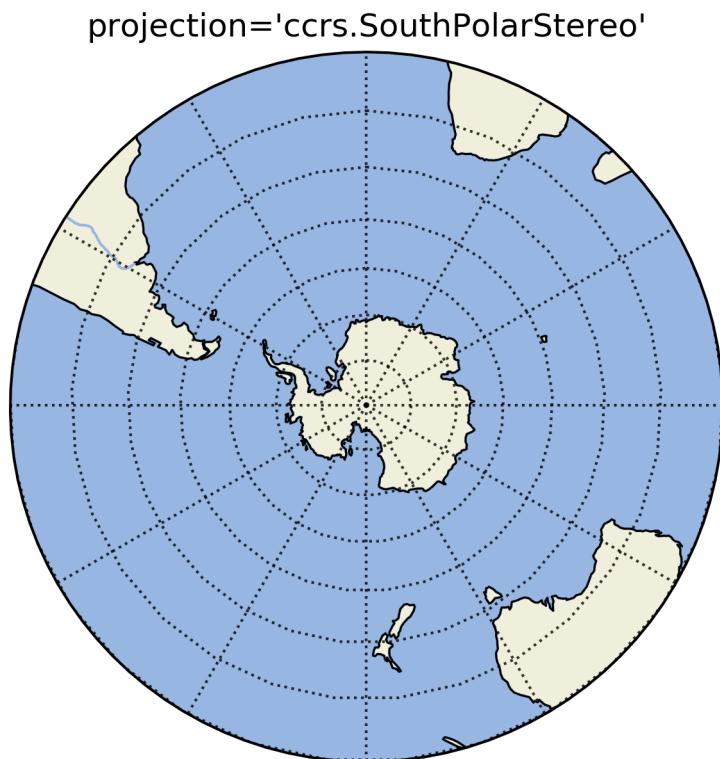


図 7-4-6 作図範囲を南緯 20 度の緯度円までに限定する

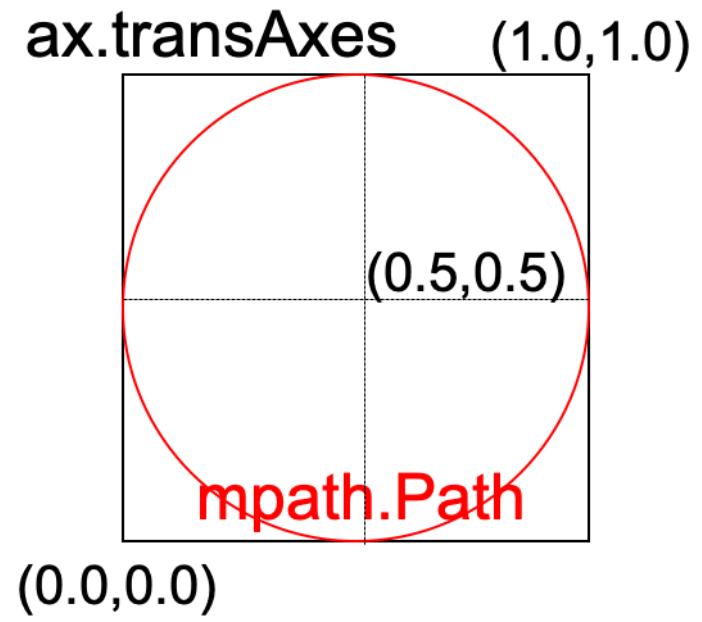


図 7-4-7 ax.transAxes の領域と mpath.Path で設定した円形領域との関係

7.4.5 モルワイデ図法

6.2.6 節で紹介したモルワイデ図法も試すことができます（図 7-4-8）。作図には、`cartopy_proj7.py` を使いました。モルワイデ図法の場合、`projection` オプションに `ccrs.Mollweide()` を与えます。太平洋側を中心にするために、中心経度 `central_longitude=180.0` としました。`dlon, dlat = 30, 30` と設定し、経度線、経度線を 30 度毎に描きました。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, +
                     projection=ccrs.Mollweide(central_longitude=180.0))
ax.set_title("projection='ccrs.Mollweide'")
```

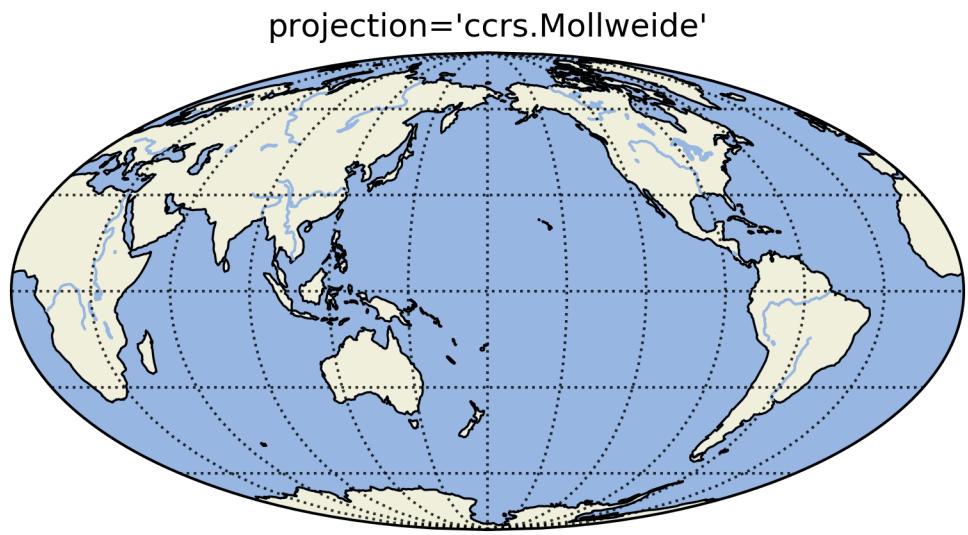


図 7-4-8 モルワイデ図法で描く

7.4.6 ロビンソン図法

6.2.7 節で紹介したロビンソン図法も試すことができます（図 7-4-9）。ロビンソン図法の場合には、projection オプションに `ccrs.Robinson()` を与えます。cartopy_proj8.py で作図しました。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, ¥  
                     projection=ccrs.Robinson(central_longitude=180.0))  
ax.set_title("projection='ccrs.Robinson'")
```

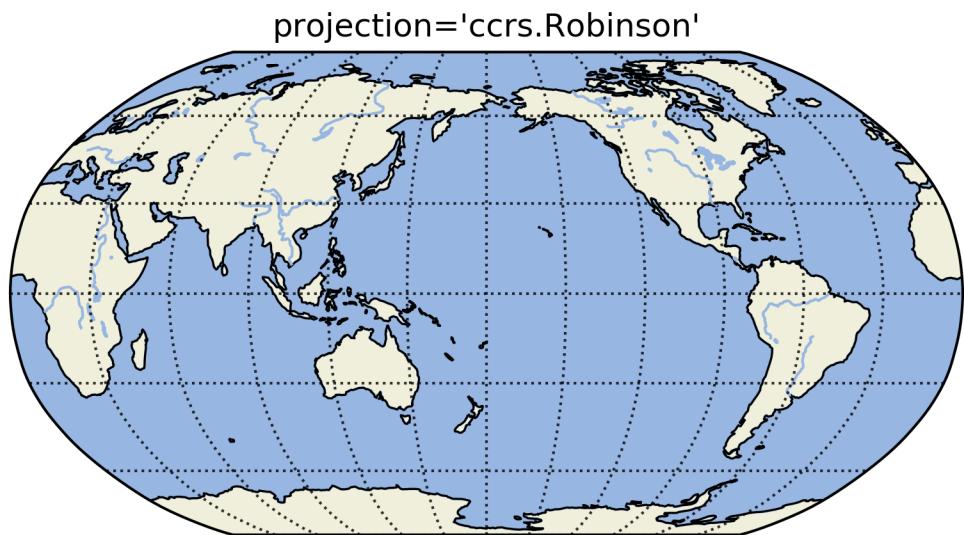


図 7-4-9 ロビンソン図法で描く

7.4.7 ランベルト正積円筒図法

6.2.8 節で紹介したランベルト正積円筒図法も利用できます（図 7-4-10）。作図には、`cartopy_proj9.py` を用いました。ランベルト正積円筒図法の場合は、`projection` オプションに `ccrs.LambertCylindrical()` を与えます。`dlon, dlat = 30, 15` と設定し、経度線を 30 度毎に、経度線は極域ほど幅が狭くなっていることが分かるように 15 度毎に描きました。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, ¶
    projection=ccrs.LambertCylindrical(central_longitude=180.0))
ax.set_title("projection='ccrs.LambertCylindrical'")
```

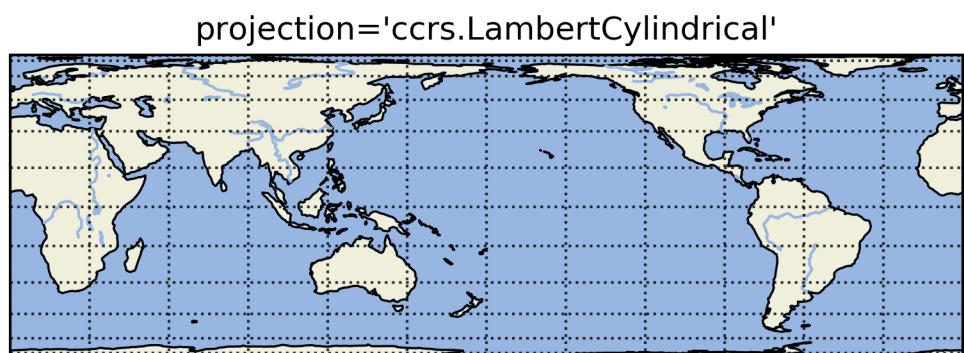


図 7-4-10 ランベルト正積円筒図法で描く

7.4.8 ミラー図法

6.2.9 節で紹介したミラー図法で描く機能もあります（図 7-4-11）。ミラー図法で描くには、projection オプションに `ccrs.Miller()` を与えます。赤道付近は図 7-4-2 と似ていますが、両極まで描くことが可能になります。作図には、`cartopy_proj10.py` を用いました。

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1,  
                     projection=ccrs.Miller(central_longitude=180.0))  
ax.set_title("projection='ccrs.Miller'")
```

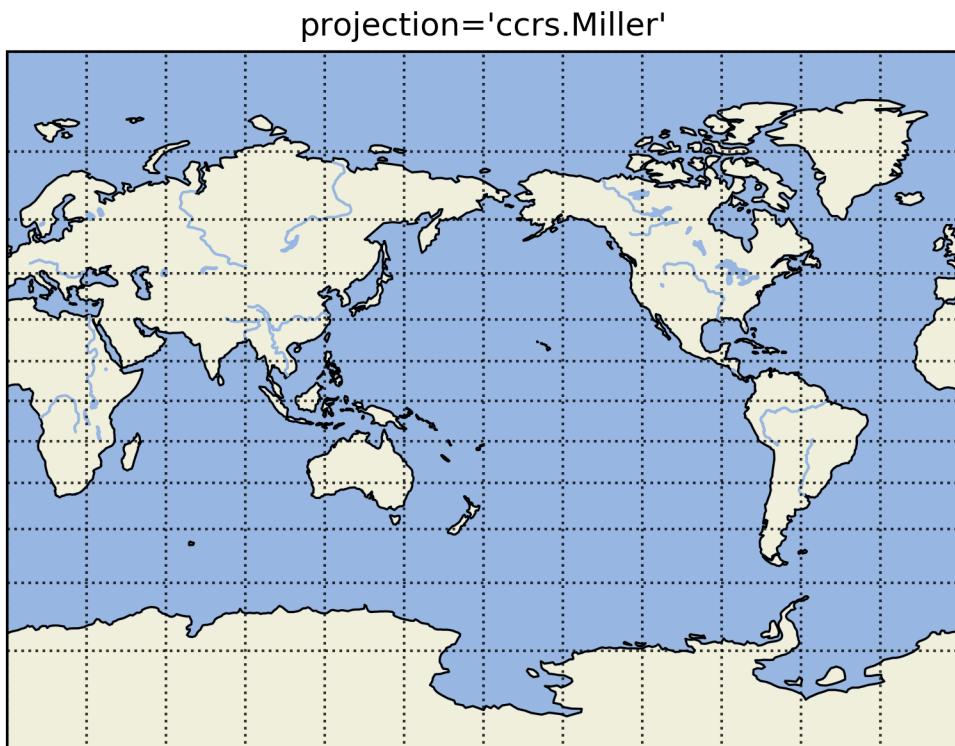


図 7-4-11 ミラー図法で描く