HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ブリューワードブソン循環（成層圏の大気大循環）
Author(s)	藤原，正智
Relation	低温環境の科学事典 （河村公隆ほか編，2016年刊）
Issue Date	2016-07
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/72340
Type	book part
File Information	Brewer-Dobson_circulation_Fujiwara.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

1-7 ブリューワー–ドブソン循環(成層圏の大気大循環)

Brewer–Dobson circulation

子午面循環，大気微量成分，大気波動

ブリューワー–ドブソン循環とは，成層圏（高度 10～50 km）における鉛直方向・南北方向のゆっくりとした大気大循環のことであり，大気質量や大気微量成分の輸送を担うものである．イギリスの Brewer と Dobson がそれぞれ水蒸気，オゾンの観測により初めにその存在を推察したことからこの名称で呼ばれている．

この循環は（図），熱帯の対流圏界面（高度～16 km）において対流圏から入り上昇した後，成層圏においては両方の半球の高緯度へと至り，下降して対流圏に戻る．上部成層圏から中間圏（50～80 km）にかけては夏半球で上昇し冬半球で下降する循環がある．これは後述のように力学的メカニズムが同様なので，しばしばブリューワー–ドブソン循環とあわせて議論される．熱帯対流圏界面を通過してから高緯度の対流圏界面に至るまでの時間は経路によって数年から 10 年である．

成層圏・中間圏においては，東西方向に比較的速い流れが卓越している．その流れは，さまざまな大気波動の存在によって，日々南北に変動している．このような東西方向に速い流れにより，成層圏における気温や大気微量成分の濃度は，短い時間スケール（最短で 10 日間程度）で東西方向にはほぼ均一になっている．そこで，成層圏の季節変動や年々変動をみる際には，気温や東西風や大気微量成分濃度を東西方向に平均し，さらに時間的にも平均をとったうえで（たとえば 3 ヶ月），横軸に南北方向（子午線方向），縦軸に鉛直方向をとった面内，つまり子午面内に諸量を図示する（右図）．ブリューワー–ドブソン循環はこの面内における二次元循環であるので，成層圏子午面循環，平均子午面循環などとも呼ばれる．

Brewer は，第二次世界大戦中，イギリス上空の上部対流圏から下部成層圏の領域において航空機による水蒸気測定を行った．その結果，下部成層圏の水蒸気濃度が直下の対流圏界面の飽和水蒸気濃度よりずっと低い（気温が高すぎる）ことを発見し，イギリス上空の下部成層圏の空気の起源が直下ではなく，より低温である熱帯の対流圏界面にあることを見抜いた．一方，Dobson は，自ら開発したオゾン全量分光光度計を世界各地に送ることで 1929 年までにオゾン全量の緯度分布を明らかにした．彼は 1956 年の論文で，極域下部成層圏というオゾン生成域から遠く離れた領域においてオゾンの濃度が高いことを説明するには，極向きに流れ極域で下降する循環の存在が不可欠である，と指摘している．

その後，1960 年代には，熱帯での大気圏内核実験に伴う放射性細塵の観測や熱帯での大規模火山噴火に伴い生成した成層圏エアロゾルの観測に基づいて，熱帯と中緯度の間には不完全ながら輸送障壁があることも発見されている．1990 年代には，人工衛星による熱帯下部成層圏の水蒸気観測によ

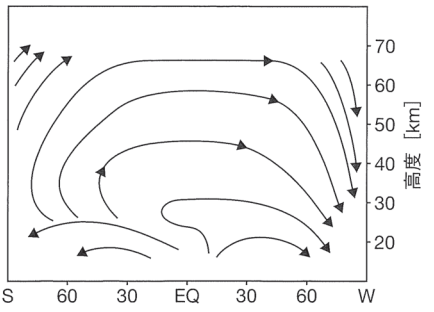

図　ブリューワー–ドブソン循環の概念図を流線で示したもの[1]．縦軸は高度，横軸中央の EQ は赤道，左端の S は夏極，右端の W は冬極を示す．

り，熱帯対流圏界面の気温の季節変化により生成された水蒸気濃度の濃淡パターンが1ヶ月に0.5～1 km程度の速度で上昇していくようすが明瞭にとらえられた．また，1990年代から2000年代初頭にかけて，大気微量成分の観測データにより極渦内における下降速度も定量化された．さらに，1970年代以降の中高緯度における継続的な六フッ化硫黄や二酸化炭素の測定により，平均大気年代（mean age of air，熱帯対流圏界面を通過してからその地点に至るまでの時間）とその長期変化の推定も行われている．

ブリューワードブソン循環および中間圏循環の駆動源は，対流圏で生成し上方伝播してくるさまざまな大気波動である．ロスビー波，総観規模波が成層圏循環に，大気重力波が中間圏循環に主としてかかわる．これらの波が砕ける（砕波する）際に，持っていた運動量が平均風に渡され平均風が加速・減速する「波と平均流の相互作用」という力学過程が本質である．赤道上空の空気塊と極上空の空気塊を比べると，地球の自転と地球が球体であることにより赤道上空の空気塊の方がはるかに大きな東西方向の運動量を持っている．したがって，赤道上の空気塊が極方向へ動くためにはその運動量を減らす摩擦力の役割を果たす過程が必要であり，砕波がこれを担っているのである．つまり，砕波による摩擦力の大きさが循環の強さを決めている．このような正しい理解がなされたのは1970年代以降である．気象力学の運動方程式系を変形し，子午面循環に関して波による熱と運動量の輸送を正しく考慮する形にすることで，単純な東西平均操作（オイラー平均）による描像と微量成分分布から推察される正しい描像（ラグランジュ平均，粒子追跡平均）とのずれの原因が理解された．この式変形を変形オイラー平均と呼び，それによる子午面循環を残差子午面循環と呼ぶ．

大気微量成分の分布を決める輸送過程としてのブリューワードブソン循環は，残差子午面循環，ロスビー波等による水平混合，乱流拡散の三者があわさったものであるといえる．水平混合は特に中緯度で重要である．また，成層圏と中間圏の気温分布は，オゾン，二酸化炭素，水蒸気分布に影響を受けた放射伝達過程により決まる気温分布が，ブリューワードブソン循環に伴う熱力学過程（上昇域で降温，下降域で昇温）により変調を受けるかたちで決まっている．

地球温暖化の進行に伴い，ブリューワードブソン循環は加速することが多くの気候モデルにより予測されている（⇨1-9「温暖化に伴う中層大気の変化」）．その主な原因は，温暖化により亜熱帯偏西風ジェットが強化かつ上方変位し，その結果この領域における砕波による摩擦力が強化することにある．ブリューワードブソン循環の加速により，下部成層圏のオゾンは熱帯で減少し中高緯度で増加することが予想されている．各種フロンや一酸化二窒素のようなオゾン層破壊物質の寿命は，光分解効率の変化を考慮しなければ，短くなることが予想されている．さらに，中高緯度における成層圏から対流圏へのオゾン輸送量は増加することが予想されている．ただし，現在利用可能な各種観測データには種々の限界があるため，循環強化の証拠を得ることは容易ではない．〔藤原正智〕

文　献

1）Butchart, N., 2014, *Rev. Geophys.*, **52**, 157.