

## 論文内容の要旨

### Energy budget analysis on the role of the Southern Ocean in driving the global thermohaline circulation

(全球熱塩循環駆動における  
南大洋の役割に関するエネルギー収支解析)

浦川 昇吾

熱塩循環は高緯度域における局所的な深層水形成とその他の広大な海域における深層水湧昇によって構成される全球規模の循環である。この循環は多量の南北熱輸送を伴う。故にこの熱塩循環の駆動メカニズムを調べることは気候の形成・維持を考える上で重要である。熱塩循環は海面浮力フラックスの空間的差異によって生じる循環と考えられてきており、特に乱流混合による海洋内部への浮力の供給がその駆動に重要な役割を果たすと考えられている。故に先行研究のほとんどが熱塩循環を浮力収支の観点から議論している。しかしエネルギー論の観点から見た駆動メカニズムに関しては研究例が少ない。循環を維持するためにはそれに伴う運動エネルギー (KE) の粘性消散を補償する必要がある。この KE の供給源は風による直接の KE 供給と重力位置エネルギー (GPE) からのエネルギー変換の2つが考えられる。前者は風成循環を意味する。熱塩循環は海面浮力フラックスおよび乱流混合による海洋内部への浮力供給によって駆動される循環である。これらによる密度の増減は重力位置エネルギー (GPE) の増減を意味する。そのためエネルギー論から見た熱塩循環は GPE から KE へのエネルギー変換によって駆動される循環と定義できる。このエネルギー変換は海洋の密度場と循環を直接繋ぐものであり、熱塩循環の駆動そのものであると言える。浮力収支ではこのような直接の関連性を見出すことはできない。故に熱塩循環の駆動メカニズムはエネルギー論の観点から議論されることが望ましい。

熱塩循環駆動に用いられる GPE のソースの1つとして鉛直混合があり、熱塩循環のエネルギー論に関する先行研究の多くがこの GPE 注入量に対するものである。その主なものとして Munk and

Wunsch (1998) は 420GW の GPE が鉛直混合によって注入されるという見積りを示した。Huang and Jin (2006) は風なし矩形モデルを用いた理想化実験に基づき、鉛直混合によって獲得された GPE が KE へと変換され粘性消散を補償する描像を得た。その一方で、風を含めた現実的設定下での Gnanadesikan et al. (2005) の実験では KE から GPE へのエネルギー変換が起こる。これは風に伴う Ekman 湧昇/沈降の効果が原因であると考えられる。Ekman 湧昇(沈降)は比較的重い(軽い)水を押し上げる(下げる)ため、KE から GPE へのエネルギー変換につながる。この効果は風応力の強い南大洋で大きいと予想される。一方、獲得された GPE の全てが KE に変換されるわけではなく、その一部は鉛直対流やキャベリングによって消失する。このエネルギーシンクを考えることは KE へ変換される GPE 量を見積る上でも重要なことである。Gnanadesikan et al. (2005) はキャベリングがシンク項において支配的な役割を果たしていることを示唆している。キャベリングは状態方程式の非線形性から生じる現象であり、大西洋などから異なる温位・塩分特性を持った水塊が集まり、それらが中規模渦によって強く混合される南大洋において特に重要であると考えられている。全球熱塩循環は北大西洋深層水形成に伴う upper cell と南極底層水・周極深層水形成に伴う lower cell に大別される。本研究では upper cell と lower cell の駆動メカニズムを南大洋に着目して議論する。まずは低解像度の全球モデルを用いて GPE 収支を調べる。Upper cell は南大洋の風応力によって大きく強化されることが知られており (Toggweiler and Samuels, 1995; Hasumi and Suginohara, 1999)、この現象を通して upper cell の駆動メカニズムを明らかにする。次に南大洋におけるキャベリングの効果

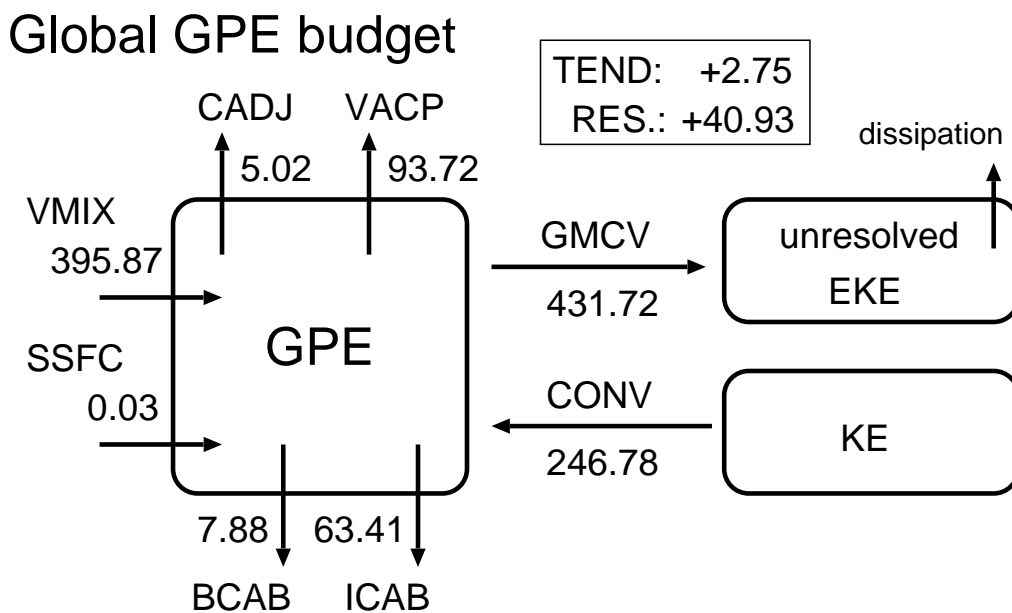


図 1: 低解像モデルに基づく全球 GPE 収支。VMIX: 鉛直混合、SSFC: 海面浮力フラックス、BCAB: 鉛直混合に伴うキャベリング、ICAB: 等密度面拡散に伴うキャベリング、CONV: エネルギー変換項、GMCV: 中規模渦移流効果による EKE へのエネルギー変換項、VACP: 状態方程式圧力依存性の寄与、CADI: 対流調節、RES: 残差項(数値拡散に伴うキャベリングの効果)、TEND: 時間変化項。単位は GW。

を定量的に調べるために、中規模渦を陽に解像する南大洋モデルを用いて数値実験を行う。その結果を元に lower cell の駆動メカニズムを考察する。

図 1 に低解像モデルに基づく全球 GPE 収支を示す。本研究でもエネルギー変換の全球積分値が GPE から KE へ向いている。併せて鉛直混合により多量の GPE が供給される。この GPE の大部分は中規模渦の移流効果による渦運動エネルギー (EKE) へのエネルギー変換によって消費される。中規模渦を表現しない低解像モデルではこのエネルギー変換は GPE のシンクを意味する。キャベリングによるエネルギー消失は数値拡散によるものも含めて全球で約 100GW であり、そのうち 7 割が南大洋で起きる。

Upper cell の駆動メカニズムは南大洋で風応力を 1.5 倍にしたケースとコントロールケースとの残差によって抽出できる。図 2 にその模式図を示す。まず南大洋の風応力によって KE が注入される。その一部が Ekman 湧昇/沈降の効果で GPE へ変換される。獲得された GPE の大部分は南大洋の中規模渦によって EKE へ変換されるが、一部は海盆を跨り大西洋へ輸送される。輸送された GPE が大西洋内部で KE へ変換され、upper cell 駆動に用いられる。

南大洋でのキャベリングによる GPE 消失率は先行研究で指摘されているものよりも小さいという結果を得たが、必ずしも無視できるものではない。これまでの結果は中規模渦を陽に解像しないモデルに基づくものであり、その妥当性は渦解像モデリングによって検証する必要がある。高解像モデルにおける南大洋でのキャベリングによる GPE 消失率は約 50GW である。特に 2000m 以深の深層に

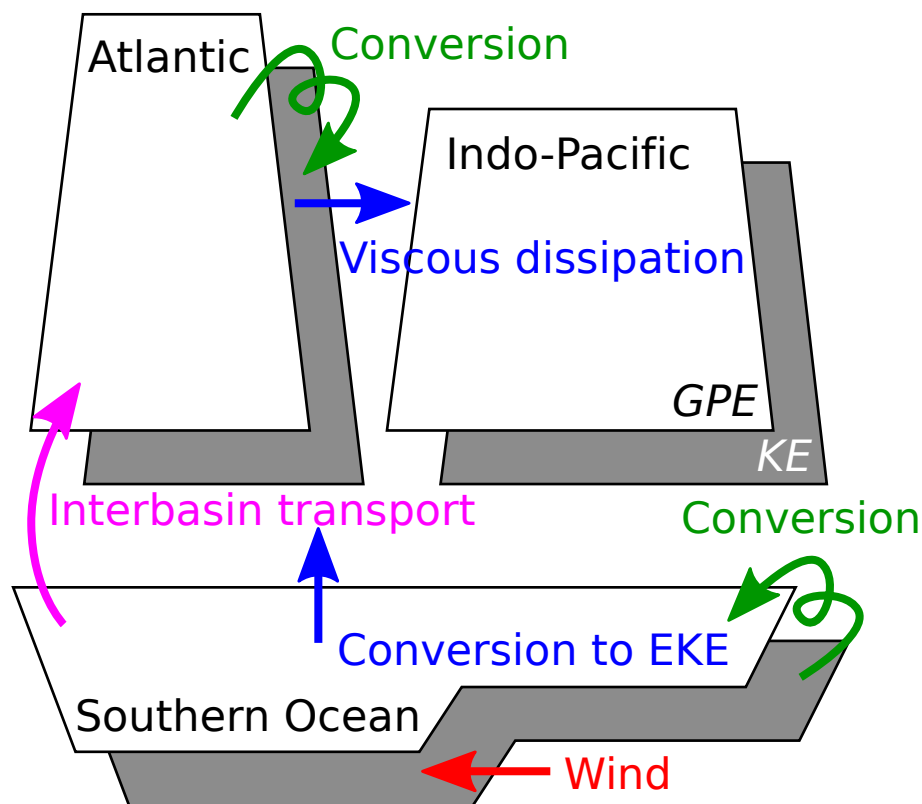


図 2: Upper cell の駆動メカニズム。白と黒のボックスはそれぞれ GPE, KE を示す。

おいて約 14GW の GPE がこの効果によって消失される。この値の相対的な大きさを調べるために、低解像モデルにおける大西洋・インド-太平洋深層での鉛直混合による GPE 獲得ならびに KE へのエネルギー変換率を調べた。その大きさはそれぞれ約 75, 9GW であり、キャベリングによる GPE 消失はこれらと比較しても小さいものではない。これらの結果から推察される lower cell 駆動メカニズムの模式図を図 3 に示す。まず大西洋・インド-太平洋深層にて鉛直混合により GPE が獲得される。その一部は海盆内で KE へと変換され lower cell 駆動に用いられる。GPE 密度は深さに比例するため、lower cell は大西洋・インド-太平洋から南大洋への GPE 輸送を伴う。南大洋に輸送された GPE はそこでキャベリングによって消費される。もし南大洋でのキャベリングによる GPE 消失が無ければ、その分の GPE が KE へのエネルギー変換に用いられる可能性がある。つまり南大洋でのキャベリングが lower cell を弱化すると示唆される。

熱塩循環は GPE から KE へのエネルギー変換によって駆動される循環であり、このエネルギー変換が熱塩循環の駆動そのものである。本研究では熱塩循環を構成する upper cell, lower cell の駆動メカニズムをエネルギー収支解析から議論した。両者ともに GPE の獲得・消失、海盆間輸送とエネルギー変換によって統一的に議論できることが示された。

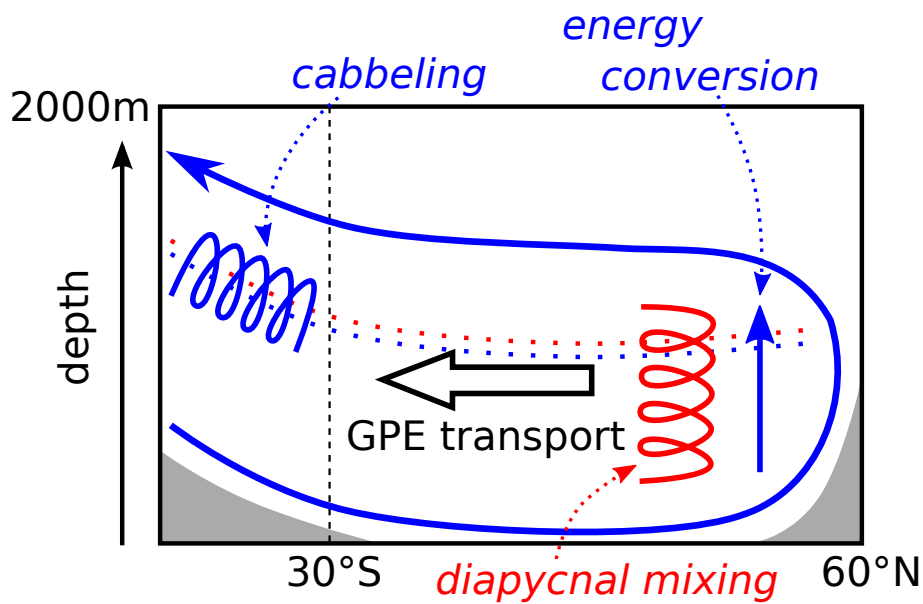


図 3: Lower cell の駆動メカニズム。