

5. 北極海のカタストロフ的な変化

島田 浩二^{*1}・鴨志田 隆^{*2}・猪上 淳^{*3}
伊東 素代^{*3}・溝端 浩平^{*4}・堀 雅裕^{*5}

2007年夏、北極海の海水は、これまでの最小値(2005年)を約20%も下回るほど激減した。海水減少は融けることが主因であると考えられがちだが、出来にくいこと、北極海から大西洋に出てゆく量の増加など、海水収支の変化として捉えることが重要である。海水減少に代表される北極海の元に戻らないカタストロフ的な変化はもはや北極海に留まる問題ではない。北半球スケールでの大気、海洋、海水、陸域結合変化として科学的に興味深い研究対象であり、かつ早急に理解を進めるべき複合研究領域研究分野であることを紹介したい。

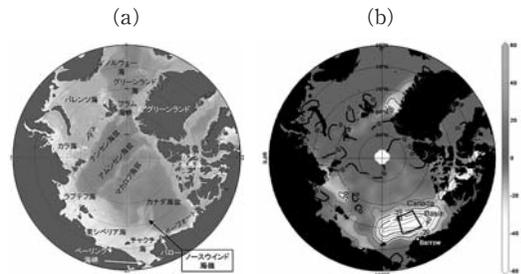
1. はじめに

北極は海に覆われた極であり、一方、南極は大陸上の極である。北極海の海水は、海が凍ってできたものであり、存在する場所であってもその厚さは2-3m程度である。一方、南極大陸の氷床は雪が積み重なって形成されたものでありその厚さは平均で約2000m程度もある。厚さの違いはおおよそ1000倍もあり、質的にまったく異なる水である。氷床には数十万年の歴史が宿っているが、北極海の海水は平均して僅か数年の寿命しかない。南極の氷が「石鹼」であるとするならば、北極海に浮かぶ海水は「シャボン玉」のごとく脆く儚い存在なのである。南極氷床の厚さが数m減少したとしても、質的な変化は起こらない。しかし、北極海水が数m減少すれば、海面が露出し、白から

黒への質的な変化、アルベドの急激な変化が起こる。その儚い海水は近年、加速度的に激減している。海水の産みの親は海であり、また海水は海と大気の狭間に存在するものであるため、海の状態変化がどのように海水変化に作用しているのか理解する必要がある。

2. 太平洋側北極海の温暖化と海水激減

近年の海水減少は空間的に一様ではなく、太平洋側北極海で顕著である(Shimada *et al.* 2006) (第1図 a, b)。そこでは、時間的にも一定の割合で減少しているのではなく、1997-1998年にかけて不連続的に減少している(第2図 a)。同時期に、北極振動指数など大気場には不連続的な変化は見られなかった(第2図 b)。海水減少の不連続的な変化と同期して変化していたものは、表層混合層直下を占める太平洋夏季水層の水温上昇である(第2図 c)。同海域に海流によって供給された熱のうち、どれだけが海水生成遅延に寄与し、どれだけが海洋に蓄えられたのかを知ることが重要である。ノースウインド海嶺付近で通年観測を実施できた機会が1度だけある。1997-1998年のSHEBA



第1図 (a)北極海の地勢図, (b)9月の海水密度偏差 ([1998~2003年]-[1979~1997年]) (Shimada *et al.* 2006).

*1 東京海洋大学/海洋研究開発機構.

koji@kaiyodai.ac.jp

*2 システムインテック.

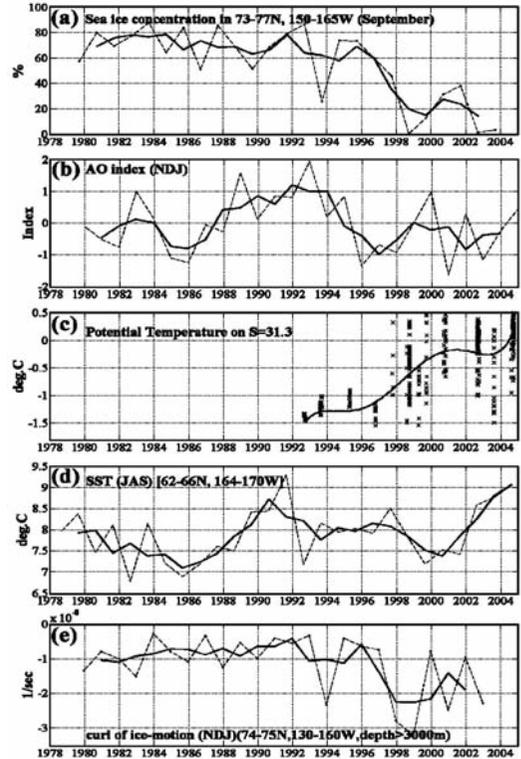
*3 海洋研究開発機構.

*4 東京海洋大学.

*5 宇宙航空研究開発機構.

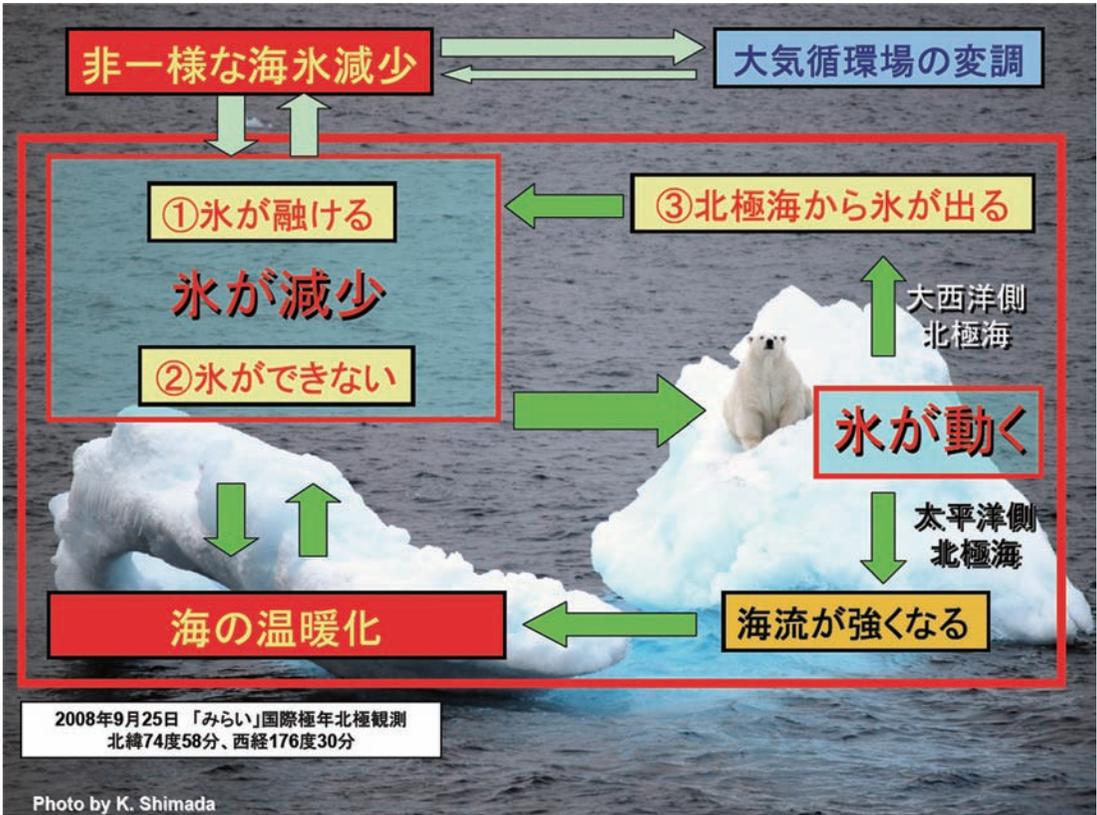
© 2010 日本気象学会

(Surface Heat Budget of the Arctic Ocean : 北極海表面熱収支) プロジェクトであり、本観測に参加したのが、日本の北極研究が多年氷域での観測に本格的に乗り出したきっかけであった。1997年にベーリング海峡を通過した太平洋夏季水は、翌年1998年1～2月にノースウインド海嶺に達したことが係留系観測により分かった。1998年2月に海水とともに漂流していたSHEBA観測ステーションがノースウインド海嶺に到達し、海洋構造の詳細を捉えることができた。直後の夏に、同海域での海洋構造を観測した結果、冬季から夏季にかけての期間に約140MJ/m²の熱が失われていたことが分かった。この熱量は50cm弱の海水生成を抑制する熱量に相当する。第2図cの実線で示す水温上昇は夏季における上昇分を表していると言え、暖められた海洋の記憶は即座には消えないことが分かる。平均で僅か1°Cの昇温であるが、海水の比熱を考慮すれば、海洋に残留した熱量は直上の大気が10°C以上上昇するのと等価である。それでは、何故、このような海洋表層の温度上昇が起こったのであろうか？ 北極海に流入する太平洋夏季水の水温自体が上昇したからであると考えがちであるが、海水激減が起こった1990年代後半、太平洋夏季水が北極海に流入するベーリング海峡付近では低温化トレンドにあったのである(第2図d)。上流の水温は低下しているのに、下流の北極海内部での水温は上昇している。一見、不思議に思えるが、下流の水温上昇を決めるのは単に上流の水温上昇だけではない。鍵は、北極海内部に送り込まれる流量が増加したことにある。表層循環の流量を決めるのは、海面応力の強さである。北極海洋は風により直接的に駆動されるのではなく、海水運動を介して駆動される。それでは、海水運動の急激な変化は、水温上昇、海水面積の急激な変化と同期して起こっていたのであろうか？ 答えはYESで、約2倍の海水運動強化が急に起こっていたのである(第2図e)。海水を駆動しているのは風である。風が約2倍強くなっていたのであろうか？ 答えはNOで、約2倍の海水運動の強化をもたらすほどの風の変化は起こっていなかったのである。それでは、何故、約2倍も海水運動が強くなったのであろうか？ 太平洋夏季水がアラスカ・パロー沖の北極海盆南端に到達するのは10～11月である。その温暖な水がノースウインド海嶺、そして海盆域に運ばれる時期は到達直後の11月から1月にかけての初冬である。1996年以前の初冬には、北米大陸沿岸北極海では、沿岸まで海水が張り詰めている状態



第2図 (a) 9月の海水氷濃度(第1図のBOX海域: 73-77°N, 150-165°W), (b)北極振動指数(11～1月), (c)S=31.3上のポテンシャル水温(73-77°N, 150-165°W), (d)ベーリング海北東海域(62-66°N, 164-170°W)のSST, (e)海水運動のcurl(74-75°N, 130-160°W). (a), (b), (d), (e)の実線は3年移動平均値, 破線は年々値, (c)の実線は5次の多項式近似曲線(Shimada *et al.* 2006).

が通常であった。沿岸まで海水が張り詰めていれば、海水は沿岸からの摩擦力を受けるため、風が強く吹いたとしても容易に動くことは出来ない。内部応力に耐え切れず、氷盤に亀裂が入り、ずれながら少しずつ動いていたのである。しかし、1997年暮れには、ポーフォート高気圧の発達する初冬になっても沿岸付近まで氷が張り詰めた。そのため、海水は沿岸からの摩擦を受けにくくなり、海水は比較的自由に動けるようになり、効率よく海洋に運動量伝達が為されたのである。ほんの僅かな沿岸付近での海水減少が海盆スケールの海水運動強化に作用したことが肝要である。序々に縮小していた海水減少がある臨界点を越え、一



第3図 海水減少の正のフィードバック。

種のカタストロフィーが起こったと言えるのかもしれない。水の三相が混在する北極海ならではの不連続的な変化であろう。

一旦、大きく海水が沖まで後退してしまえば、初冬には沿岸まで海水で覆われる時期が遅れるため、翌年も、海水が沿岸からの摩擦を受けにくい状態に陥る。つまり、元に戻ることが難しく、持続的に表層海洋の温暖化が進行し、海水減少に歯止めが掛からないという、正のフィードバック・ループに入ってしまったことが示唆される(第3図)。

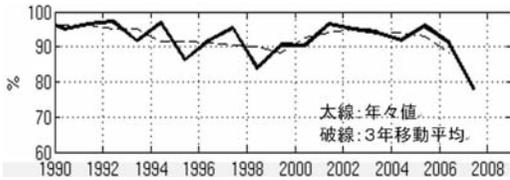
3. 2007年夏季の海水激減

1990年代後半に、正のフィードバック・ループに入ったのであるならば、その後、太平洋側北極海は持続的に温まってきたのであろうか? カナダ海盆をカバーする持続的観測網が構築された2002年以降について、太平洋夏季水が北向きに輸送されるカナダ海盆西部海域での貯熱量(8~9月)の変化を第4図に示

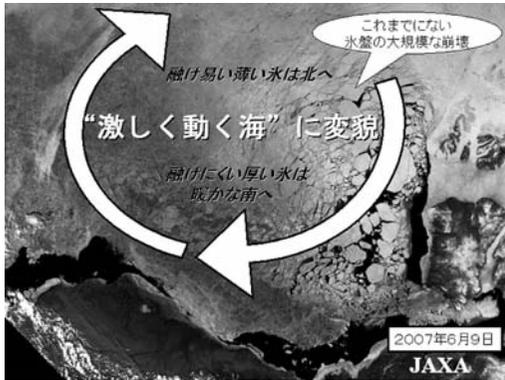


第4図 カナダ海盆西部(74-76°N, 150-160°W)の貯熱量変化(8~9月データ)。

す。貯熱量は、表層混合層(0-20m)と太平洋夏季水層(20-100m)に分けて描いている。太平洋夏季水層(20-100m)の貯熱量は急激に増大しており、2002年から2006年までの4年間の増分は約140MJ/m²にも達している。どれだけの熱が海面に供給されていたのかを定量的に確かめるべき直接観測データはないが、1990年代後半以降の海流による(移流による)持続的な海洋温暖化の影響が無視できないことは間違いない。だとすれば、冬季の結氷と夏季の融解の不均衡

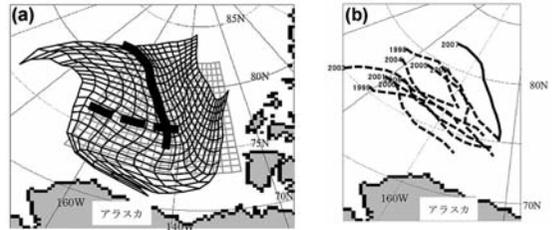


第5図 カナダ海盆東部（カナダ多島海近傍：75-80°N，2000-3000m）の海水密接度変化（6月）。

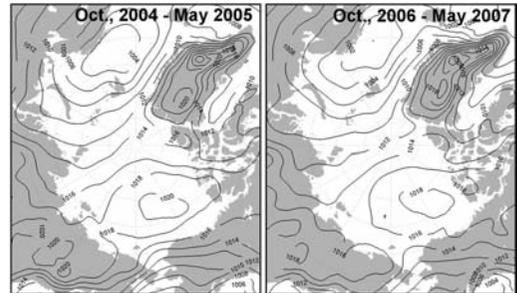


第6図 カナダ海盆東部海域（カナダ多島海近傍）での氷盤の崩壊と、海水運動の強化 (MODIS [MODerate resolution Imaging Spectroradiometer] 画像)。

が起きているはずである。この不均衡は持続的な海水厚の減少をもたらすはずである。海水厚の時空間変化は直接的に観測されていないが、年間を通じて見た場合、海水厚が減少しているのであれば、海水の平均年齢は減少するはずである。つまり、多年氷の割合が減少しているはずであり、その割合の減少が海水厚減少の代替指標となる。北極海海水が大西洋に放出される海域では、多年氷の減少は放出量と関係しているが、海水が再循環する海域では、放出メカニズムによってではなく、成長と融解のアンバランスが効いているはずである。海水再循環域であるカナダ海盆での多年氷の割合の発展を調べると、温暖な太平洋水が流入してくる循環系の南西端からカナダ多島海に向かって時計回りに減じている。2007年には、多年氷割合の小さな領域（≒厚さを減じた氷）が、カナダ多島海沿岸付近にまで達していた。十分に厚い水であれば、沿岸に衝突しても、崩壊することはない。しかし、薄くなった氷は、その物性強度も低下するため、ポロポロ



第7図 (a) 海水運動による海水の変形 (2006年10月1日 (灰色格子) から2007年6月1日までの変形 (黒色格子))。 (b) 前年10月1日に76.5°N線 (aの破線) にあった海水の翌年6月1日での移動位置。表示年は6月1日の年に対応。



第8図 左：2004年10月～2005年5月の平均海面気圧。右：2006年10月～2007年5月の平均海面気圧。

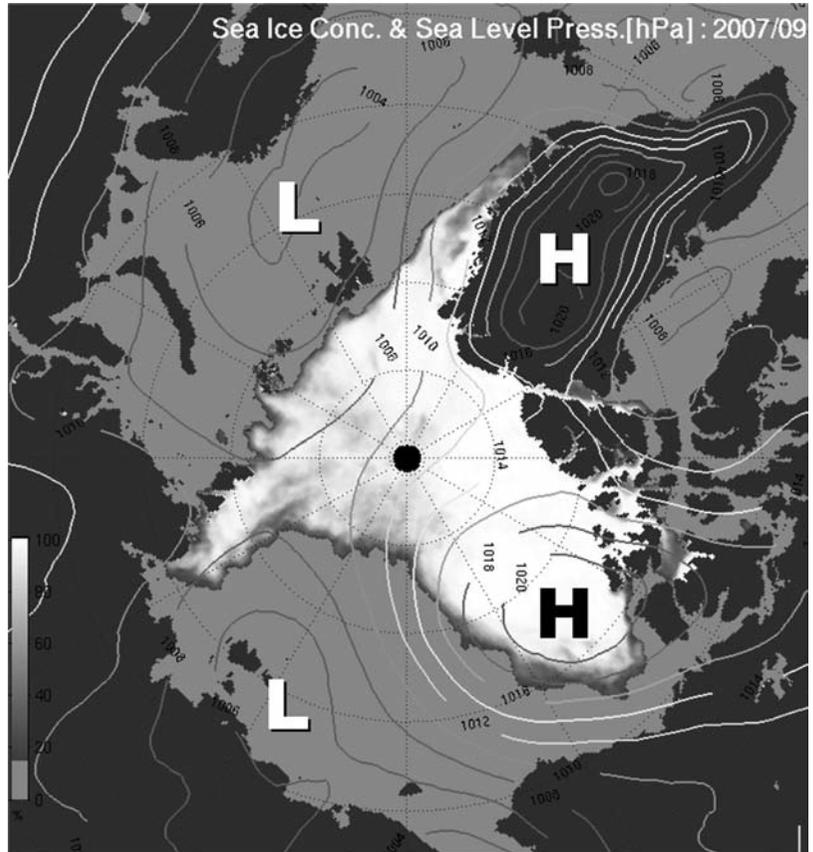
に崩壊しやすくなる。2007年のカナダ多島海沿岸域では、このような海水の物性的変化に起因する変化が起これたのであろうか？ 第5図にカナダ多島海近く (75-80°N) の海水密接度 (6月) の時系列を示す。2006年までは、95%程度の割合が氷で覆われていた海域であったが、2007年には80%を切るレベルにまで一気に低下した。6月9日のMODIS画像では、ポロポロに崩壊した氷盤の様子が捉えられていた (第6図)。頑強な海水に覆われていたカナダ多島海近傍の氷の崩壊により、海盆スケールでの海水運動に対する境界条件がさらに非粘着境界条件的になり、海水・海洋ともに運動が増大したのであろう。

そこで、前年、2006年10月1日から2007年6月1日までの期間の海水変形 (運動) を調べると、1997年秋以降で、最大であり、2005年と比べても2倍近くの回転運動が起こったのである (第7図)。2005年と2007年を比べると、海水を駆動する大気場には、顕著な差

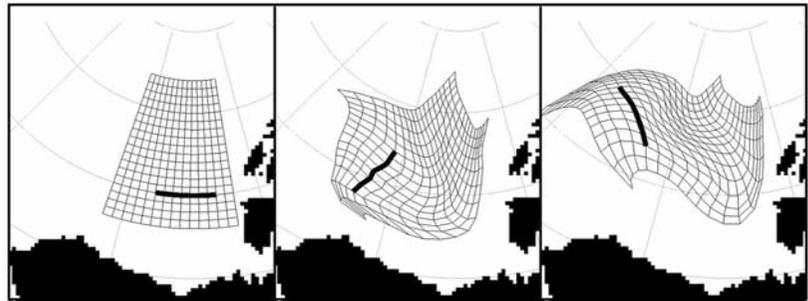
異は認められない(第8図)。従って、1990年代後半に起こった海水運動の強化のメカニズムと同様に沿岸付近の海水状態(境界条件)の変化により激変が起こったと考えるのが妥当である。

海水回転運動の著しい増大に伴い、高気圧性海水循環の西側では、前年秋以降に形成された一年氷は、北緯80度を越えて極点方向に運ばれた。一年氷が北に向かって広がってゆく途中の海域は、暖かい太平洋夏季水が最初に海盆域に流入するノースウインド海嶺が位置する海域に一致しており、一年氷は冬季の間に十分成長できず薄く脆い状態で夏を迎えたものと思われる。そのことが、一年氷の早期消滅に拍車をかけた要因の1つであろう。

東半球と西半球との間の陸域雪氷の非対称性に加え、チャクチ海及び東シベリア海沖の著しい海水消滅は、北半球高緯度の広域に及ぶ表面状態の非対称性を加速した。太平洋側北極海では、南風の場になり、海水は極点方向に押しやられると同時に融解が促進された。一方、大西洋側北極海では、一年を通じて、バレンツ海・グリーンランドを極とするダイポール構造が現れるため、北極海の海水はグリーンランド海に放出される場になっている(Watanabe *et al.* 2006; Inoue and Kikuchi 2007)。太平洋側北極海に出現したダイポール・パターンが何故形成されるのかという本質的な問題が残っている。



第9図 2007年9月の月平均海水密度分布と海面気圧。



第10図 左：変形前の状態(10月1日)、中：2006年10月～2007年5月(8ヶ月間)の海水変形。右：2007年10月～2007年12月(3ヶ月間)の海水変形。

2007年の海水後退期から初冬にかけての気圧場は、地球表面状態と呼応したものになっており(例えば、第9図)、東西半球での非対称表面状態が太平洋側から大西洋側へ向かう偏差風をもたらす2つのダイポール

構造と関係しているように見える。今、北極圏及び北半球高緯度域では海洋、海水が動的に変化するに留まらず、大気、海洋、海水、陸域の変化すべてが海水を減少させ、それに伴う気候変化を加速させているのであろう。そのメカニズムを知るために、今こそ、分野を横断した複合領域研究の推進が求められる。熱帯域で花開いた大気海洋結合システムとは異なったものであろうが、北極域には未知なる結合システムが宿っている。その理解は、科学的興味に加えて、将来の気候変化予測の不確定性を減じる上で、不可欠なものになるであろう。

4. 最後に

(2008年夏季に向けてのプレ・コンディション)

海水・海洋ともに動的な北極海に変貌すること、空間的に非対称な海水減少の進行することが、さらなる海水激減をもたらすことが分かってきた。さて、2007年海水激減により北極海は更に動的なものになっているのだろうか？ 2008年の海水減少を決める、冬季のプレ・コンディションはどうなっているのだろうか？ 2007年は12月に入っても、北極海アラスカ沿岸、チャクチ海は結氷していなかった。海水は、これまでよりもさらに、沿岸からの摩擦を受けにくい状態にあった。そして、2007年10月～12月までの僅か3ヶ月間

で、2006年10月～2007年5月までの8ヶ月間の海水変形を遥かに超越した変形が起こっていることが分かった(第10図)。また、2007年夏季のベーリング海峡からの海洋熱フラックスは過去最大を記録している。その温暖な水は既にカナダ海盆域に到達しているはずである。海洋側では、持続的に海水が減少すべき条件が整っている。陸域、大気場との結合システムがどのように発展してゆくのか、国際極年の最終年度2008年は目が離せない年になるであろう。

参 考 文 献

- Inoue, J. and T. Kikuchi, 2007: Outflow of summertime Arctic sea ice observed by ice drifting buoys and its linkage with ice reduction and atmospheric circulation patterns. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 881-887.
- Shimada, K., T. Kamoshida, M. Itoh, S. Nishino, E. Carmack, F. McLaughlin, S. Zimmermann and A. Proshutinsky, 2006: Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08605, doi: 10.1029/2005GL025624.
- Watanabe, E., J. Wang, A. Sumi and H. Hasumi, 2006: Arctic dipole anomaly and its contribution to sea ice export from the Arctic Ocean in the 20th century. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23703, doi: 10.1029/2006GL028112.