

海流予測情報とその利用

1. 気象・海象と船舶運航

気象や海象の情報が、船舶の運航にとって重要であることは言うまでもない。外洋においては安全運行の必要性から、風や波浪、流氷や氷山の情報がまず最優先になるであろう。現在、海上風の情報については、全世界に展開する気象観測網と流体力学など大気物理学の物理法則に基づいた数値天気予報モデルの予測結果が各種予報天気図などに図示されて使われている。波浪については、数値天気予報モデルの出力する海上風を外力として駆動する数値波浪予報モデルの予測結果から出力される波高や波向きなどの予報図が使われることが多いと思われる。また、流氷や氷山については、人工衛星や航空機による観測をもとにした警報が航行する船舶に逐次伝えられている。

その他の海象情報として海流がある。海流情報は、やや優先度は落ちるであろうが、やはり船舶の航行にとって重要な情報である。黒潮などの大海流は、流軸上では4ノットを超える強い流れを有しており、船舶の航行に大きな影響を与える。最近になって、計算機や観測網の発展により、海上風と同様に海流も数値海流予測モデルを用いて詳細に予測することが可能になった(図1の表示例参照)。ここでは、そもそもの海流の成り立ちを述べ、その予測手法について紹介するとともに、海流予測情報の船舶航行支援への利用可能性などについて述べたい。

2. 海流の成り立ち

海流は、海水があたかも大河川のように一定の幅をもって一定の向きに流れる現象であり、一日のうちで向きが変わる潮流などとは区別される。ごく浅海域では海流が潮流や河川流などと併存している場合もある。海流の成因は種々ありうるが、表層海流の大部分の成因は大規模な海上風系によるものである(風成循環)。1947年、ノルウェーの海洋学者スヴェルドラップは、海上風(風応力 (τ_x, τ_y))と海流(南北成分 v)の関係を表現する式を導いた。

$$\frac{\partial f}{\partial y} Dv = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right)$$

ここでは南北が y 方向、東西が x 方向となる矩形の海を考え、海水の密度を ρ_0 、海底水深を D とする。 f (コリオリパラメータ)は地球自転によって生ずる地面が回転する速度を示し、地球が球面であるために北半球では北に向かえば向かうほどその値は大きくなる

$$\left(\frac{\partial f}{\partial y} > 0\right)。$$

スヴェルドラップの関係式は、回転する球面上に存在する海の上に大規模な風系が存在するときに海流が駆動されることを極めて簡明に表現する、風成循環理論の最初の出発点である。風成循環の理論は、スヴェルドラップの関係式に様々な項を加えることで発展してきたと言ってもよい。スヴェルドラップの関係式は、北太平洋では南下する弱い海流と風の効果が釣り合っていることを示すもので（スヴェルドラップ平衡）、厳密には北太平洋の東側でのみ成り立っている。北太平洋の西側、すなわち日本の東岸では上の式は成り立たず、海流の効果と風の効果が強め合って強い流れ（西岸境界流）が生じ、海底や陸地との摩擦や生じた強い流れ自身の混合効果によって強い流れが消散する状態となる（海流の西岸強化）。北太平洋西岸の黒潮や親潮、北大西洋西岸の湾流などはこうした西岸境界流の代表であり、世界有数の大海流である（図2の模式図参照）。

西岸境界流の流量（ Dv ）は基本的にはスヴェルドラップの関係式で決まり、例えば北太平洋の風系が強まれば黒潮も強くなるという傾向がある。したがって、気候変動によって北太平洋の風系に従来とは違う変化が生じれば黒潮にも変化が生ずる。黒潮の非常に面白いところは日本の南岸で大蛇行することであるが、黒潮大蛇行の生じやすさは大規模な風系の強さに依存することがわかっている。黒潮大蛇行は北太平洋全体で見ればごく局所的な現象であるが、北太平洋全体の気候変動と無関係ではない。実際、過去100年以上の黒潮大蛇行の歴史を振り返ると、北太平洋全体の風系の大規模な変動に合わせて大蛇行が生じやすい時期と生じにくい時期が約20年周期で入れかわりになっているようである。また、黒潮は熱帯から膨大な熱を北方に向けて運び、そこで熱の大気中への放出を促す働きを担っているので、黒潮自体の変化がこうした熱のやりとりを通じて逆に北太平洋の気候変化を引き起こす可能性がある。現在、これらの事柄は大気海洋物理学の最新課題のひとつになっており、最前線で研究が続けられている。

以上で述べたように海流の基本的な駆動力は風であるが、現実の海流はそれ以外にも様々な要素によって影響を受けている。房総沖の黒潮の流れの鉛直構造を図3に示す。表層黒潮の流軸上に100センチメートル/秒を越える流速がみられる一方で、流軸の岸側と沖側に反流がみられる。さらに、黒潮の全体構造は5000mの深海に及び、10センチメートル/秒を越える反流が深海でもみられる。このことは、海流構造の成り立ちには表層だけでなく深海にまで及ぶ海水の密度構造や、深海の海底地形などが大きく影響していることを示唆している。その他、風の影響が直接及ぶ表層数十メートル以浅では波浪などの影響もあって海流は複雑なふるまいをみせる（乱流）。また、海流の周りには、反流による渦（再循環）が存在し、また海流の蛇行がちぎれるなどして生じた直径数百kmの暖水塊、冷水塊（中規模渦）が浮遊しており、これによる海流変動も無視できない。

3. 海流を予測する

海流の変動は、海流の物理法則と実際の海洋観測データを組み合わせることによって力学的かつ数値的に予測することが可能である。スヴェルドラップの最初の理論以来60年を経た今日、スヴェルドラップの関係式に対して時間変化、さらに水温や塩分の変化による密度変化や地形の効果、現実的な風を加えるなどして精緻化した海流の物理法則（海洋大循環モデル）がスーパーコンピュータ上のプログラムとして動き、数値海流予測ができるようになった。海流の物理法則を数値的な予測に用いる際には、最初の状態に含まれる微小な誤差が時間とともに増大して予測に与える影響（バタフライ効果）が避けられないので、予測の効果は時間とともに失われてしまう（予測可能性の限界）。したがって、一定期間毎に現実の観測データによる補正（データ同化）を施しながら、予測を更新していく必要がある。

こうしたやり方は数値天気予報とまったく同じものである。現象としては、黒潮などの海流は偏西風などの大規模な風系に、海流の蛇行や中規模渦は高気圧や低気圧の変動におおむね対応している。こうした大気現象の空間的な広がりには数千 km に達するのに対し、海洋現象は数百 km の広がりを持つにすぎない。数値海流予測においては、海域を細かな格子に分割し、各格子点の値を計算していくのであるが、海流や渦の構造を解像するためには、格子間隔を数値天気予報の場合（100km 程度）に比べて 10km 以下に細かくしなければならない。一方で大気現象の時間変化は一週間でひと区切りがつくのに対し、海洋現象は数ヶ月で変動傾向が変化することが多い（黒潮大蛇行に至っては 5 年近く続くこともある）。数値海流予測の場合は、数値天気予報の場合（6 時間毎）に比べて長い間隔（数日毎）でデータ同化を行い状態の補正を行うことが多い。

海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センターにおいて、日本沿海予測実験（JCOPE）グループは 2001 年 12 月から数値海流予測の実現を目指した予測実験を行ってきた。実験の成果として、北太平洋の高解像度数値海流予測システム JCOPE を開発し、2004 年夏の黒潮大蛇行の予測に成功するなどの成果を挙げた。JCOPE の数値海流予測にとってもっとも重要な観測データは人工衛星による海面の凹凸（海面高度）である（図 4）。海面高度の変動は、海流の流路変化や中規模渦変動に伴う海面下の密度の変動によく対応し、衛星海面水温のように雲によって見えなくなることもないので非常に有用な観測データである。基本的に、海流の流路や渦の位置は海面高度データによって決まり、それらの詳しい内部構造は海洋大循環モデルによって決まると言ってもよい。海洋大循環モデルの水平格子間隔は最小で 1/12 度(10km 以下)としており、黒潮や渦の表現 JCOPE では、人工衛星による海面高度・海面水温データと、船舶や無人の海洋フロートによる海面下の水温・塩分観測データを 1 週間毎に海洋大循環モデル中に同化して、予測を毎週更新している。

JCOPE 予測システムの結果は、海流予測情報としての利用可能性を調べるために様々な共同研究において検証されている。独立行政法人水産総合研究センターと JCOPE グループは、平成 16 年度から JCOPE システムの漁海況予報への適用可能性を検討する共同研究を

行っている。その一例として、図5に水産総合研究センターの観測船蒼鷹丸によって御前崎沖で2004年8月末～9月初めに観測された流速の鉛直分布と海流予測情報の比較を示す。観測時期はちょうど黒潮大蛇行が発生していた時期に相当し、流軸が南に移動していることや、流速の鉛直分布形状が再現されていることがわかる。もともとJCOPEは黒潮流路の予測のために検証を重ねて開発されてきたため、総じて黒潮流域における精度は良い。JCOPEは北太平洋全体を予測範囲としているため、現在はその他の海域についても検証が進められている。

4. 海流予測情報の利用

海流予測情報を船舶航行の支援に用いる例として、黒潮など大海流の流軸を詳細に把握し船舶航行の際の追い流れとして活用するということがまず考えられる。例えば、図6の台湾沖の黒潮の海流予測情報の表示例を見ると、幅100km程度の黒潮の中の流軸構造が表現されていることから、海流予測情報を詳細な流軸の情報として使用できそうである。船を流軸に乗せることにより従来に比べて追い流れをもっと確保することができれば、運航時間の節減効果、ないしはエンジン出力を落とすことによる燃費節減効果を得ることが期待できる。また、従来の最適航路選定ソフトウェア等を詳細な海流データを考慮できるように改変し、海流予測情報をその参照データとして用いれば、より効果的な最適航路選定が可能になるかもしれない。

海流予測情報は表面の海流だけではなく、海面下数千m（JCOPEの場合は最大6500m）までの海流や水温、塩分の情報を含んでいる。海面下の海流は資源開発等のための海底掘削作業に役立つ情報になるだろうし、水温や塩分の分布は水産業にも活用できるだろう。こうした海流予測情報の包括的な産業利用を促進するために、筆者を含む海洋研究開発機構の研究者等は、海流予測情報提供のための事業体（「海流予測情報利用有限責任事業組合」）を設立した。この事業体は海洋研究開発機構が研究開発した知的財産を普及し活用する意義を有するため、海洋研究開発機構のベンチャー支援第一号として認定を受けている。海流予測情報の高精度化とその利用は表裏一体、車の両輪のようなものであり、このような試みがうまく行けば海洋学の発展にも大きく貢献することだろう。今後は海流予測情報の精度をさらに高めていくとともに、事業体の活動を通じて海流予測情報の利用方法を様々な面から開拓していきたいと考えている。

2006/07/03

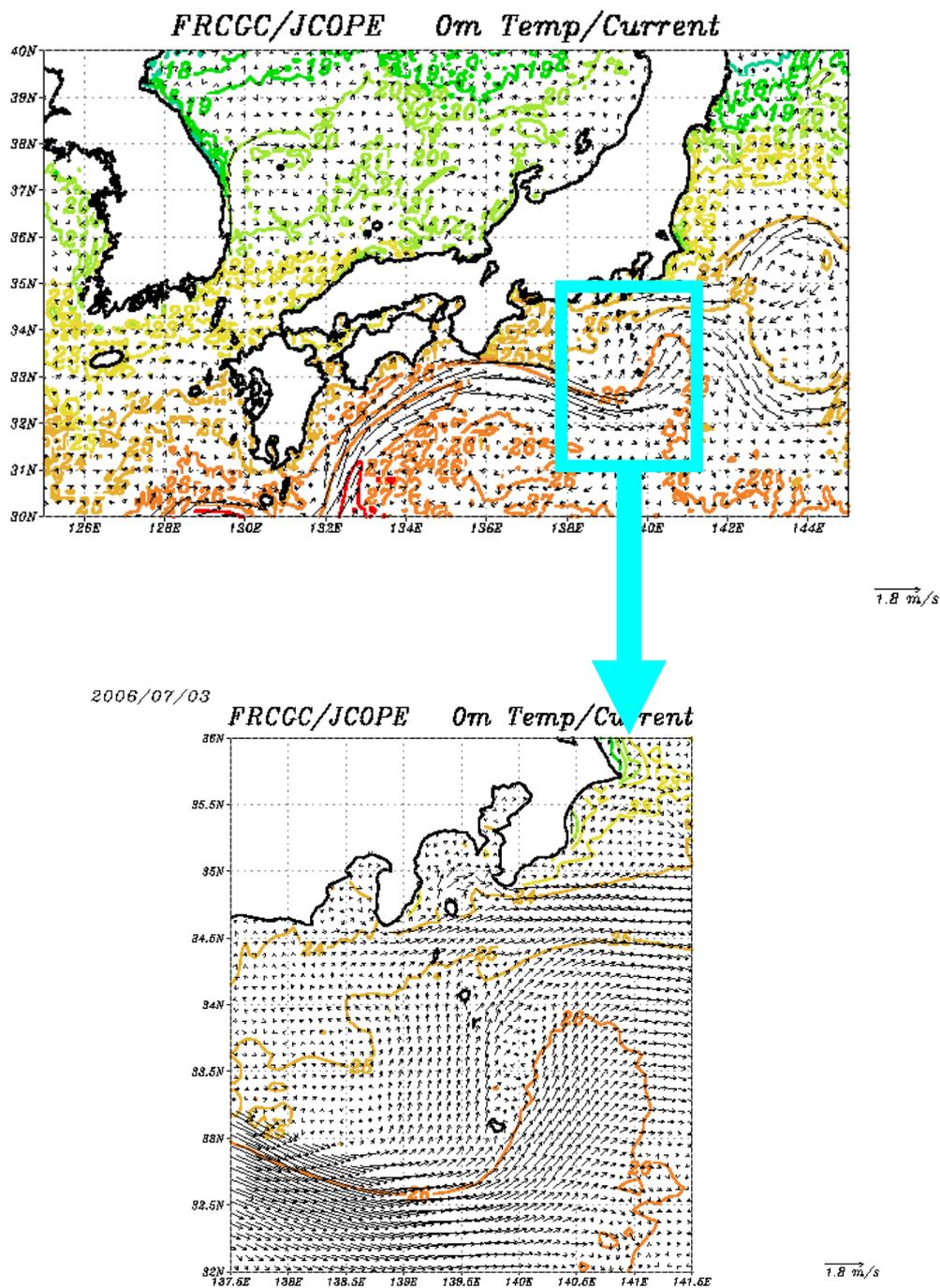


図 1: JCOPE 海流予測システム (海洋研究開発機構) により作成された海流予測情報 (表面の海流と水温) の例。

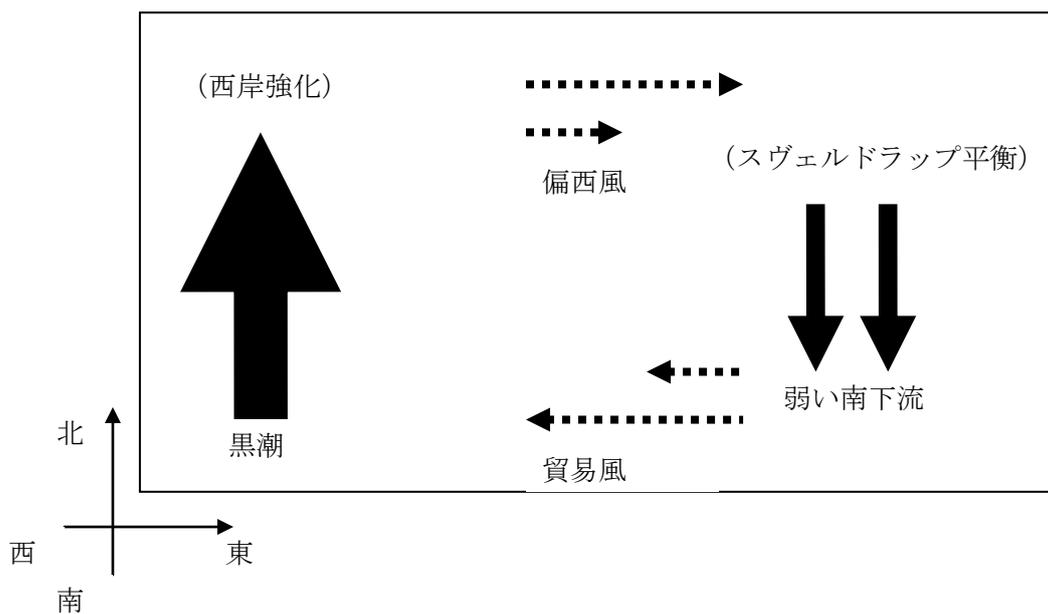


図 2: 北太平洋亜熱帯の表層海洋循環

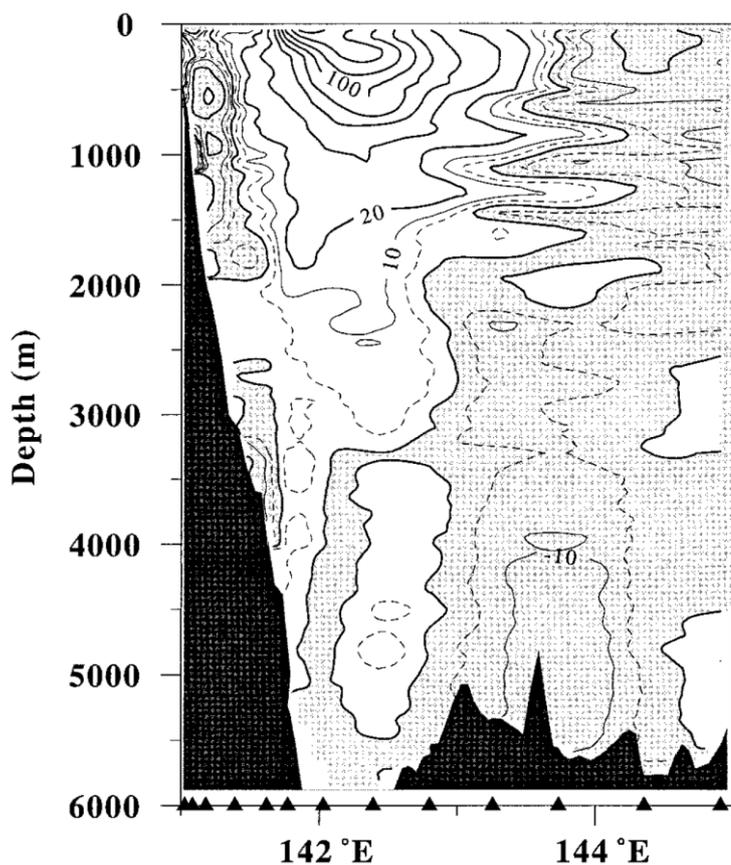


図3: 1993年11月に観測された、房総沖を北上する黒潮の鉛直分布。単位はセンチメートル毎秒。白地部分は東向き成分，影付部分は西向き成分を示す。(Firing, E., 1998: Lowered ADCP development and use in WOCE. *International WOCE Newsletter.*, 30, 10–14. より)

SSH anomaly (m) 12MAY2002

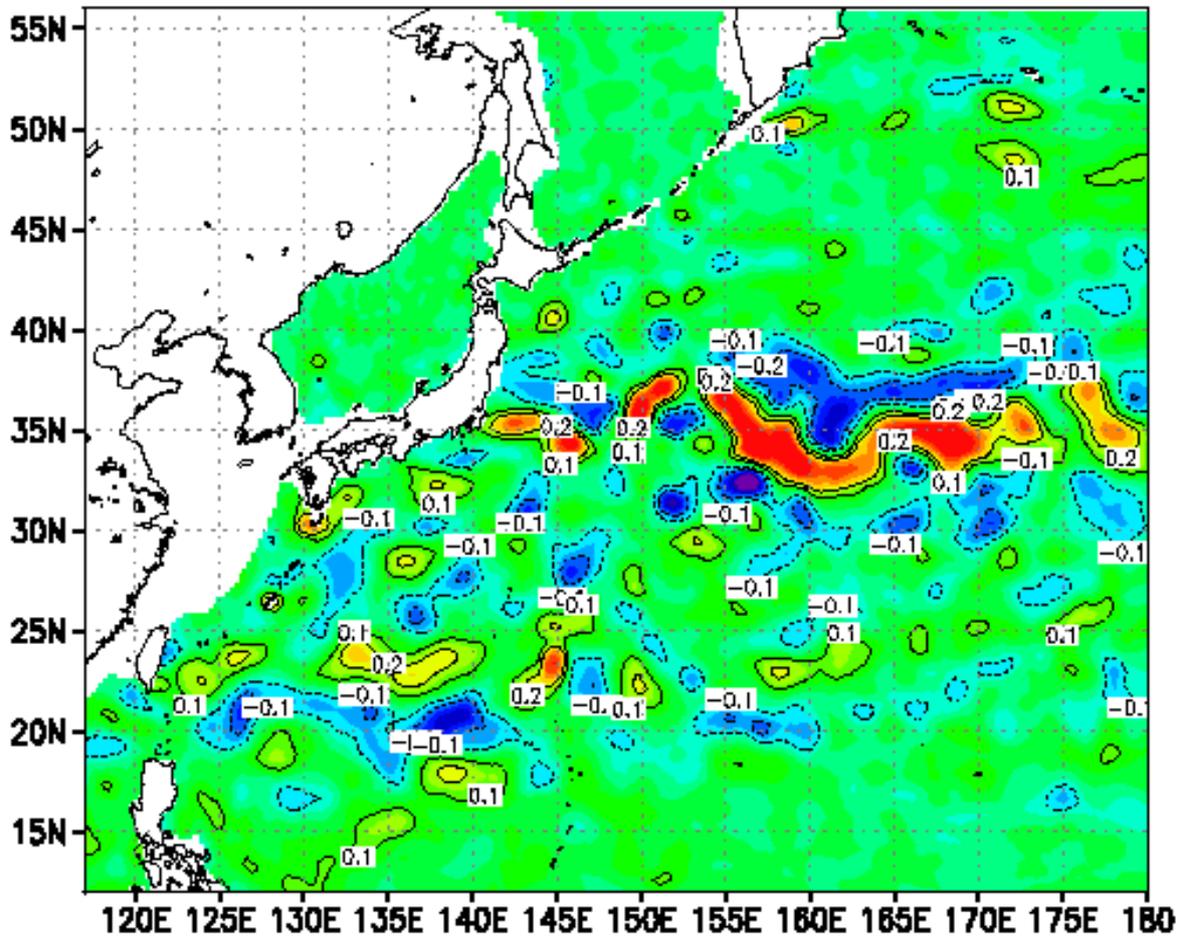


図 4: 人工衛星によって観測された海面の凹凸。単位はメートル。黒潮流路の蛇行や、その周辺の中規模渦の分布を表している。

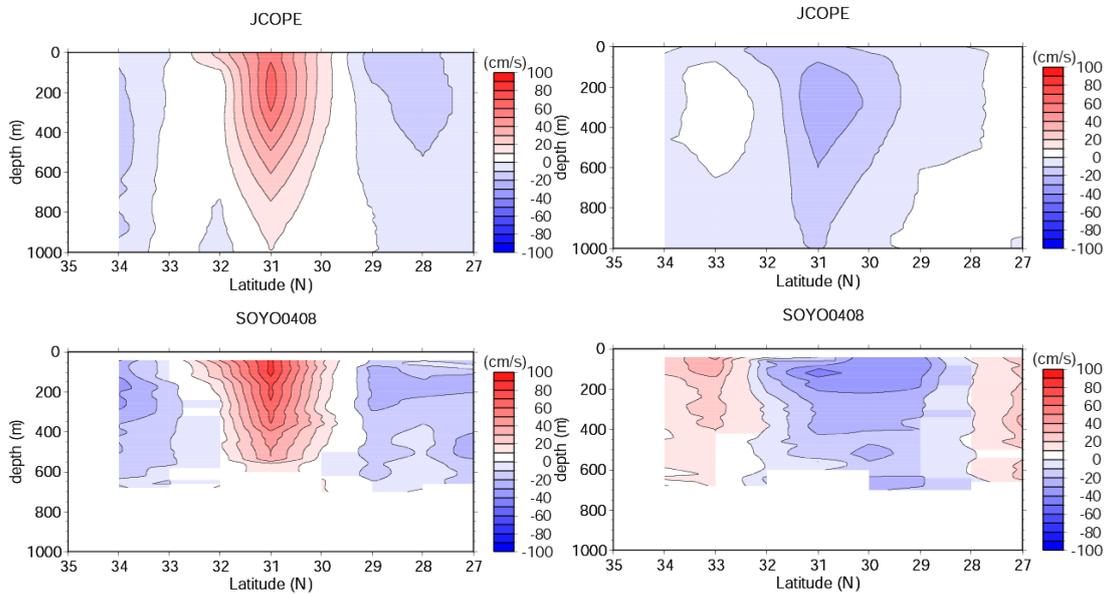


図 5: 2004 年 8 月末の御前崎沖(東経 138 度に沿った測線)の流速 (左は東西方向, 右は南北方向) 鉛直分布の比較。上は JCOPE 海流予測情報(2004/8/31-2004/09/01 の二日平均)。下は, 水産総合研究センター観測船蒼鷹丸の船底に取り付けた音響ドップラー流速計による観測 (2004/8/31~2004/9/4)。海流予測情報では黒潮が大蛇行し流軸が南下している様子が再現されている。

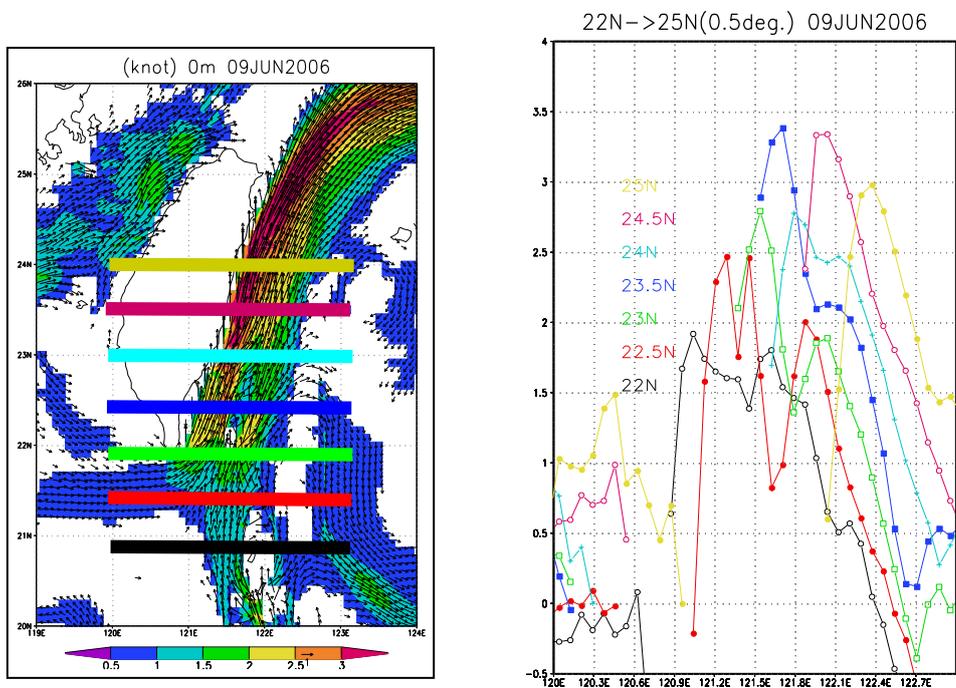


図 6: 左: 台湾沖の JCOPE 海流予測情報の表示例 (海表面)。右: 左図の横線上的の海流の大きさ (単位はノット) を図示したもの。北に向かうにつれて黒潮流軸が東にずれていく様子がわかる。

