
報 告

東経 137 度線にみられる低渦位水は亜熱帯モード水なのか？*

林 和彦**

要 旨

気象庁では、「海洋の健康診断表」において、夏季に 137°E で観測される亜熱帯モード水のコア水温の変動を監視し、十年規模の海洋変動の診断を行っている。アルゴフロートのデータを使って、黒潮から黒潮続流域での低渦位水の時空間分布を詳細に調査したところ、137°E にみられる低渦位水には性質の異なる 2 種類のものがあることがわかった。このうち、低温のものは、黒潮続流域で形成されたものが移流したものである。しかし、高温のものは 140°E 以西で春季に形成されたもので、その分布も 140°E 以西に限られ、冬季には減衰してしまうことから、年々以上の周期をもつ大気・海洋相互作用への影響が小さい。このため、十年規模の海洋変動の診断のための指標としては、低温の低渦位水を抽出し、亜熱帯モード水の解析に利用する必要がある。

1. はじめに

各大洋の表層では、その海域に特有の水温や塩分などで特徴づけられる海水がある程度の体積で分布していることがあり、それを表層水塊と呼んでいる。表層水塊は表層混合層の発達・消滅過程を通じて形成され、移流することで形成域よりも広い範囲に分布する。このように、表層水塊は年々の形成時の大気の状態を反映した性質を保持し、年を越して海洋内部を循環するために、長周期の海洋変動の要因となる可能性がある。このため、気候変動のメカニズム解明のために、気候変動に関連した大気・海洋相互作用の海洋のパラメータとして、表層水塊の変動を監視することが重要である。

表層水塊のうち亜熱帯モード水は、亜熱帯循環西岸境界流域に分布する等密度層（低渦位層）からなる水塊を指す。北太平洋に分布する北太平洋亜熱帯モード水 (Masuzawa, 1969) (以下「亜熱帯モード水」と記す) は、黒潮続流のすぐ南の海域で、冬季の強い季節風によって海面が冷却され発達した表層混合層が、春季以降に海面付近の水温が上昇し大気との接触を絶つことで形成される。このとき、冬季季節風が強いほど、コア水温（極小渦位層の水温）が低く、渦位の小さな亜熱帯モード水が形成される。このため、コア水温とモンスーンインデックス（イルクーツクと根室の海面気圧差）との間に逆相関があることが知られている (Suga and Hanawa, 1995b ; Yasuda and Hanawa,

* Should we treat any low-potential-vorticity water observed in the 137°E section as the North Pacific subtropical mode water?

** Kazuhiko Hayashi

Marine Division, Global Environment and Marine Department (地球環境・海洋部海洋気象課)

1999 ; Taneda *et al.*, 2000 ; Hanawa and Kamada, 2001). 一方, コア水温は, 黒潮流量の変動とも相関が高い (Yasuda and Kitamura, 2003) ことが指摘されている. 最近では, 亜熱帯モード水の形成に重要なのは, 冬季の熱フラックスではなく, 形成直前の成層状態の寄与が大きいとの報告もある (Qiu and Chen, 2006). 形成された亜熱帯モード水は, 黒潮続流再循環域を南西方に移流しながら徐々に散逸する (Bingham *et al.*, 1992 ; Suga and Hanawa, 1995a ; Suga *et al.*, 2004).

気象庁では, 「海洋の健康診断表」で気候変動に関連した海洋変動の診断のひとつとして, 海洋気象観測船が夏季に観測した 137°E 線における亜熱帯モード水のコア水温を指標として用いている. これは, 137°E 線の観測が 40 年近くの長期にわたっておこなわれていることと, 137°E 線断面では夏季にその分布域が最大となる (Suga *et al.*, 1989) ことが採用の理由である.

「海洋の健康診断表」では, 137°E 線における亜熱帯モード水のコア水温は 1980 年代後半及び 1990 年代後半に上昇したと診断している. 1980 年代後半のコア水温の上昇は, 冬季季節風が弱まったためと考えられ, 一方, 1990 年代後半のコア水温の上昇は, 黒潮による熱輸送の増加が寄与したと考えられている. 海洋の健康診断表では, 137°E 線における亜熱帯モード水を, 表層の低渦位水として決め, そのコア水温を渦位極小の層の平均水温として求めている. 1970 年代後半に約 16°C であったコア水温は, 1990 年代後半には約 19°C まで上昇しており, 1990 年代後半の高温の低渦位水は亜熱帯モード水として分類できるかどうか再検討する必要が生じた.

本報告では, フロートのデータによって, 近年の北西太平洋域の低渦位水の時空間分布を詳細に記述し, その形成・移流過程を考察する. そして「海洋の健康診断表」の指標としての亜熱帯モード水のコア水温の適性を議論する.

2. 使用データ及び解析方法

渦位 (ポテンシャル渦度) は次のように定義される保存量で, 表層水塊判別の属性として広く用いられている :

$$\frac{f}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (1)$$

ここで, f は惑星渦度 (コリオリパラメータ), ρ は密度, z は深度である. 密度 ρ が水温 T のみの関数で近似できる場合,

$$\alpha \equiv \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (2)$$

と定義すれば, 渦位は次のように水温勾配によって近似できる :

$$\frac{f}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \approx \alpha \frac{f}{\rho} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

亜熱帯モード水は, 渦位 $2.0 \times 10^{-10} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 以下 (Suga *et al.*, 1989) の領域と定義されるが, 水温・塩分ともに一様な水塊であることから, 渦位の定義として近似式 (3) を使うことができる. 今稿では, フロートデータから低渦位水を特定するのに, 水温のみのデータを使用し, この式 (3) を用いた (ただし $\alpha = -0.15$ とした (Knauss, 1997)). これは, フロートの所属機関によっては, 塩分の較正がなされていないものがあり, 初期のフロートデータを中心に塩分の精度が低いものが見られるためである.

使用したフロートデータは, 2007 年 7 月までの黒潮から黒潮続流域にかけての全観測データである. 表層混合層及び永年躍層以深の低渦位水を除くために, 深度 10m の水温より 1.0°C 以上低温かつ水温 14.0°C 以上の層を渦位計算の対象とした. この基準を満たす水温層について, それぞれ鉛直方向に上下 50m の層のデータから, 式 (3) より渦位を算出した. 観測点ごとの渦位の最小値が $2.0 \times 10^{-10} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 以下であった場合を低渦位水とし, 渦位最小値をその低渦位水の渦位, 渦位最小値をとった層の水温をコア水温とした.

一方, 「海洋の健康診断表」での診断に用いる際には, 観測船による 137°E 定線の水温・塩分データから, 渦位 $2.0 \times 10^{-10} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 以下の層を亜熱帯モード水とし, 渦位が極小をとる層の水温をコア水温

としている。算出の対象となる層は、表層混合層と永年躍層以深を除外するために、ポテンシャル密度 24.8 ~ 25.8 の範囲に設定してある。これは水温では 14.2° ~ 19.3°C に相当する。計算手法の詳細については、曾我ほか(2005)を参照されたい。

3. 低渦位水の時空間分布

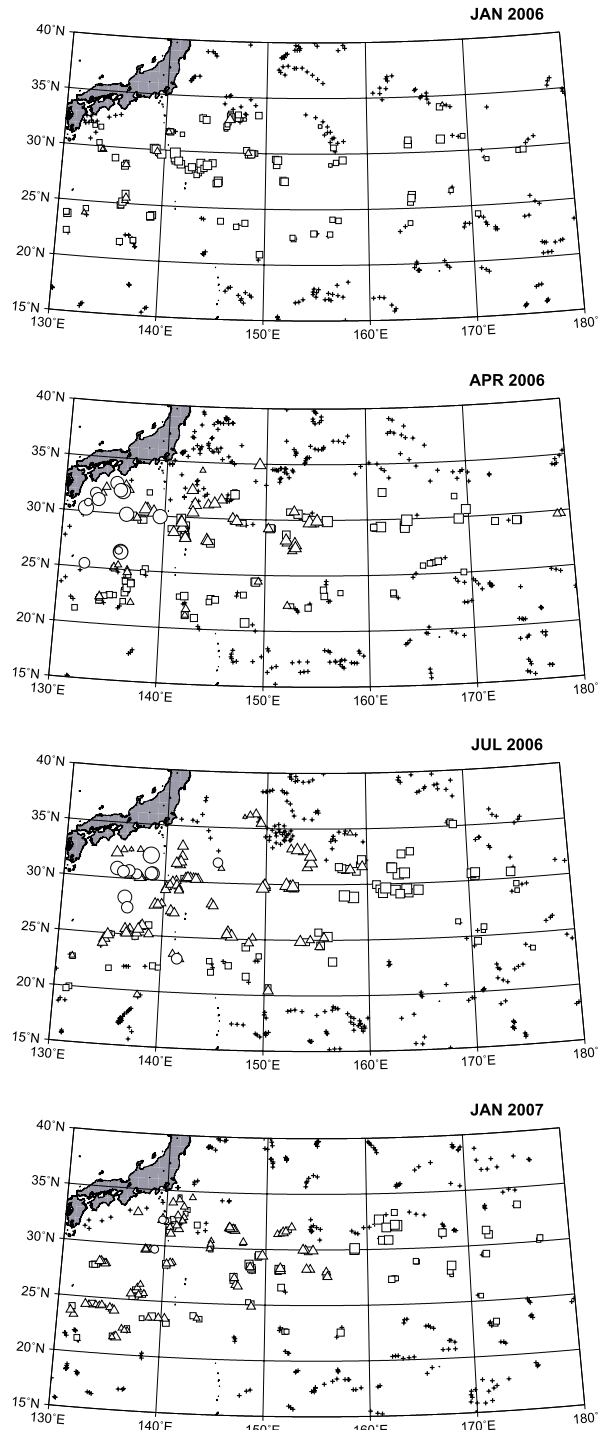
亜熱帯モード水は、黒潮続流南側の再循環域で冬季の深い鉛直混合の後、春季に表面が暖水でふたをされて形成される。形成された亜熱帯モード水は、夏季から秋季にかけて再循環域を南西に移流することでその分布を広げるとされている (Bingham *et al.*, 1992 ; Suga and Hanawa, 1995a)。近年、アルゴフロートによる観測が充実してきたことによって、低渦位水の詳細な時空間分布の解析が可能となっている。本節では、アルゴデータによって観測された黒潮及び黒潮続流における低渦位水属性の詳細な時空間分布を記述し、その変動の特性を抽出する。

3.1 低渦位水の分布事例

低渦位水の分布事例として、第1図に2006年1月、同年4月、同年7月及び2007年1月における黒潮及び黒潮続流域でのアルゴデータによる低渦位水の分布を示す。

第1図に示したどの月をみても、低渦位水の分布範囲に大きな変化はみられなかった。すなわち、北西太平洋の黒潮及び黒潮続流南側の再循環域である 20° ~ 35°N の緯度帯に分布していた。しかし、低渦位水のコア水温及び渦位は、次のような時間変化をしていた。

2006年1月には、この海域に分布する低渦位水のコア水温はほぼ 17.5°C 以下であった。これが同年4月になると、25°N 以北で渦位が小さくなり、コア水温も 155°E 以西で 17.5°C 以上、140°E 以西では 18.5°C 以上に昇温した。同年7月には、17.5° ~ 18.5°C のコア水温をもつ低渦位水 (図中△で示す) の分布域が、南は 25°N 付近まで西は 135°E 付近まで広がっていた。そして、翌2007年1月には、140°E 以西にあった 18.5°C 以上の高いコア水温をもつ低渦位水 (図中○で示す) はみられなくなり、それを含め 155°E 以西の



第1図 上から2006年1月、同年4月、同年7月及び2007年1月におけるフロートデータによる低渦位水の分布

低渦位 ($2.0 \times 10^{10} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 以下) を観測したアルゴフロートの位置を○△□印で示す。○△□印はそれぞれ 18.5°C 以上、17.5° ~ 18.5°C、17.5°C 以下のコア水温をもつものを示す。○△□印が大きいほど渦位が小さい。低渦位が認められなかった観測点は小さな+印で示す。

低渦位水の渦位は大きくなっていった。

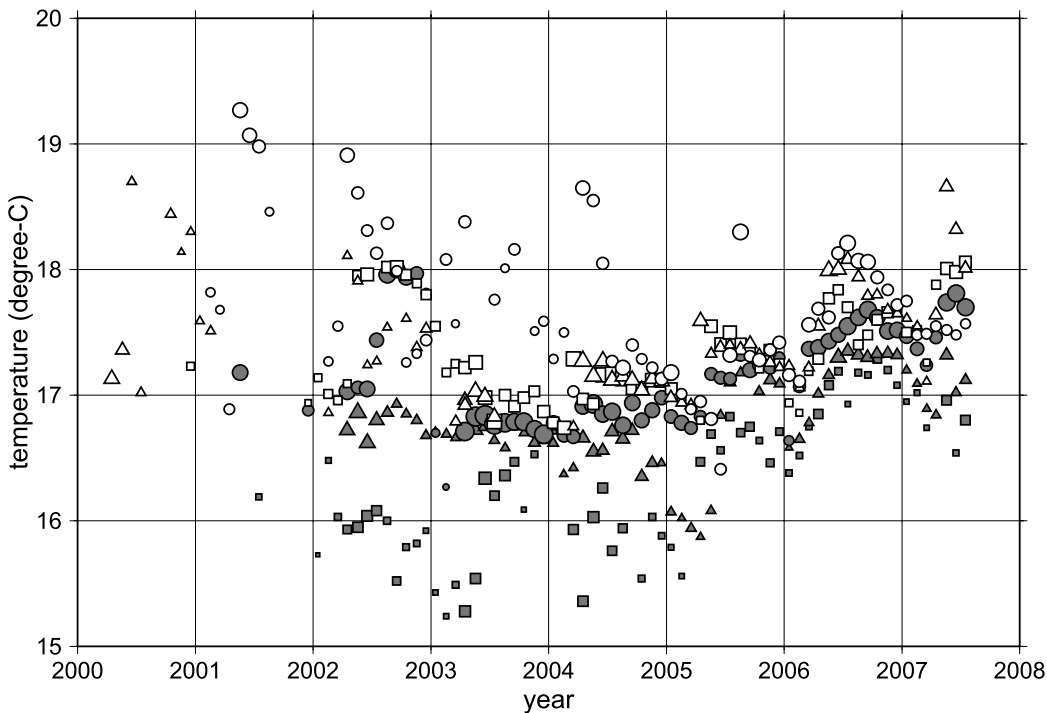
渦位が低下し、コア水温に変化があれば、低渦位水が新たに形成されたと考えられる。2006年の事例では、冬季混合の結果形成された低渦位水が4月までに25°N以北に出現したと考えられる。黒潮続流域よりも上流の黒潮域で冬季混合層の水温は高いために、それが低渦位水のコア水温に反映され、西方ほどコア水温が高い低渦位水が分布すると考えられる。17.5°～18.5°Cのコア水温をもつ低渦位水が、7月に分布域を南方及び西方に広げているが、これは黒潮及び黒潮続流の再循環の南側にある南西向きに流れに従って移流したものと考えられる。一般的に形成された低渦位水は時間の経過につれて、鉛直方向の拡散によって衰退し渦位が上昇する。また、海面に近いほど鉛直拡散が大きいことが予想されることから、渦位は上層ほど減衰しやすく、その結果減衰しにくい下層に渦位極小がシフトし、コア水温も低下すると考えられる。2006年7月から2007年1月にかけても、全域で渦位が上昇し、低渦位水の減衰が生

じていた。特に140°E以西の30°N付近では、渦位の上昇とともに、著しいコア水温の低下がみられ、それ以後に分布する低渦位水との属性の差はみとめられなくなっていた。

3.2 低渦位水のコア水温及び渦位の変動

前項でみた低渦位水の属性の時系列変化をみるために、第2図に2000年以降の月ごとの低渦位水コア水温の変動を示す。前項でみたように、低渦位水のコア水温は東方ほど低く西方ほど高い分布をしているので、第2図では経度帯ごとに月にデータが3つ以上あればその中央値をとり図示している。さらに平均的な年内変動をみるために、どの経度帯にもほぼ連続してデータが存在する2002年8月から2007年7月までの5年間について、月ごとに中央値をとったものを第3図に示す。

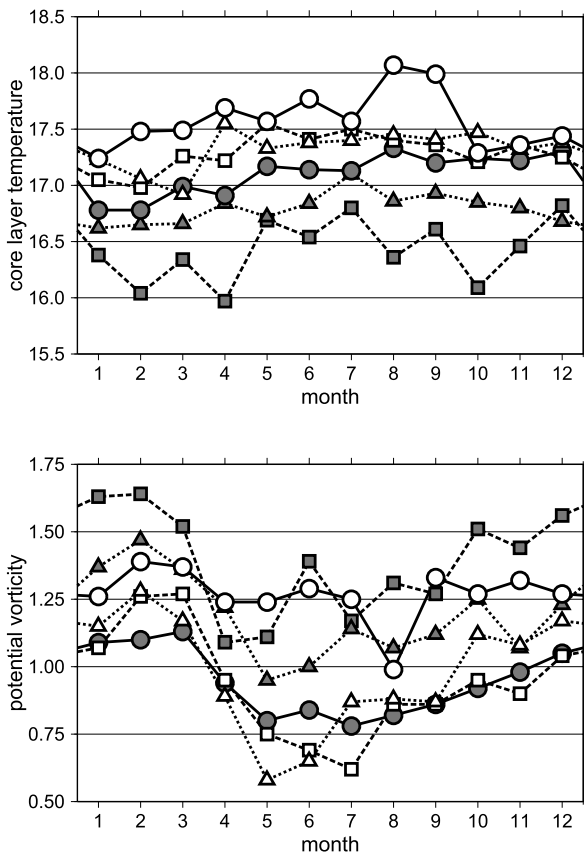
第3図をみると、低渦位水のコア水温の絶対値は、平均的にも東方ほど低く西方ほど高く、経度10°あたり約0.3°C変化していることがわかる。140°～170°Eでは、コア水温の年内変動幅



第2図 低渦位水コア水温の時系列変化

アルゴフロートデータによる低渦位水のコア水温（単位°C）の月ごとの変化。経度で区切った領域ごとに各月3以上の観測がある場合の中央値を示す。○△□印の大きさは渦位の小ささに相当する。○△□印の示す領域は次のとおり：○ 135°～140°E, △ 140°～145°E, □ 145°～150°E, ● 150°～160°E, ▲ 160°～170°E, ■ 170°～180°E。

(年較差) が約 0.5°C と小さいのに、それ以外の 170°E 以東及び 140°E 以西では約 0.8°C とやや年内の変動が大きい。また、140°E 以東では、冬季に低下したコア水温が春季に上昇し、秋季まで維持されるのに対し、140°E 以西では春季に上昇し夏季にさらに上昇し最高となった後に秋季には低下する。一方、コア水温と異なり、渦位は 140° ~ 160°E で年間を通じてその東西より低くなっている。年内変動をみると、どの経度帯でも 4 ~ 9 月に渦位が低く、それ以外の期間に高い。渦位が最小となるのは、140° ~ 160°E 帯の 5 ~ 7 月である。



第 3 図 低渦位水のコア水温及び渦位の年内変動
 フロートデータによる低渦位水のコア水温 (上図, 単位 °C) 及び渦位 (下図, 単位 $10^{-10} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) について、2002 年 8 月から 2007 年 7 月までの当該月ごとの中央値を示す (第 2 図で示した値の 5 か年の中央値)。

○△□印の示す領域も第 2 図と同じく次のとおり：
 ○ 135° ~ 140°E, △ 140° ~ 145°E, □ 145° ~ 150°E,
 ● 150° ~ 160°E, ▲ 160° ~ 170°E, ■ 170° ~ 180°E.

3.3 低渦位水の形成及び移流過程

これまでみてきたコア水温及び渦位の時空間分布の変動から、黒潮及び黒潮続流域の低渦位水の形成及び移流過程を推測する。

黒潮及び黒潮続流域で、最も渦位が低い低渦位水は、5 ~ 7 月に 140° ~ 160°E に分布している。この低渦位水の渦位は 8 月以降徐々に上昇し、翌年の 2 ~ 3 月に最大となる。またコア水温も、渦位が最小となる 5 月に上昇したものが、12 月まで維持され、翌年の 1 ~ 2 月に最低値となる。このことから、140° ~ 160°E の海域では 5 月ごろに低渦位水が形成され、翌年の 2 月ごろに減衰するものと考えられる。渦位の減衰する冬季にも、黒潮及び黒潮続流域では渦位は最も低く、亜熱帯モード水のメインの分布範囲と判断できる。

160°E 以東では、140° ~ 160°E での低渦位水と同様の年内変動をしているが、コア水温は低く、形成時の渦位も大きい。

140°E 以西では、渦位は 4 月から翌年 1 月にかけて低く、2 ~ 3 月に高いが、変動幅は小さく絶対値も高い。このため、この海域では 140° ~ 160°E にみられるような渦位の小さな低渦位水は形成されていないように見える。しかし、コア水温の絶対値が、春季と夏季とにはそれ以東の海域よりも高いことから、それ以東より高温のコア水温をもつ低渦位水がこの海域で形成されていると考えられる。第 1 図で示す分布事例からも、4 月及び 7 月に 140°E 以西かつ 27°N 以北にのみ出現する 18.5°C 以上のコア水温をもつ低渦位水が認められる。また第 2 図をみても 2001 年から 2004 年の夏季を中心に、月平均としても高温で低渦位の低渦位水が存在することがわかる。140°E 以西の低渦位水のコア水温は、10 月に大きく低下し冬季までそれ以東とほぼ同値となる。このことから、春季から夏季にみられた高温の低渦位水は、秋季には減衰し、それ以東に形成されたものと区別できないようになると思われる。

4. 議論：137°E 線における低渦位水の変動

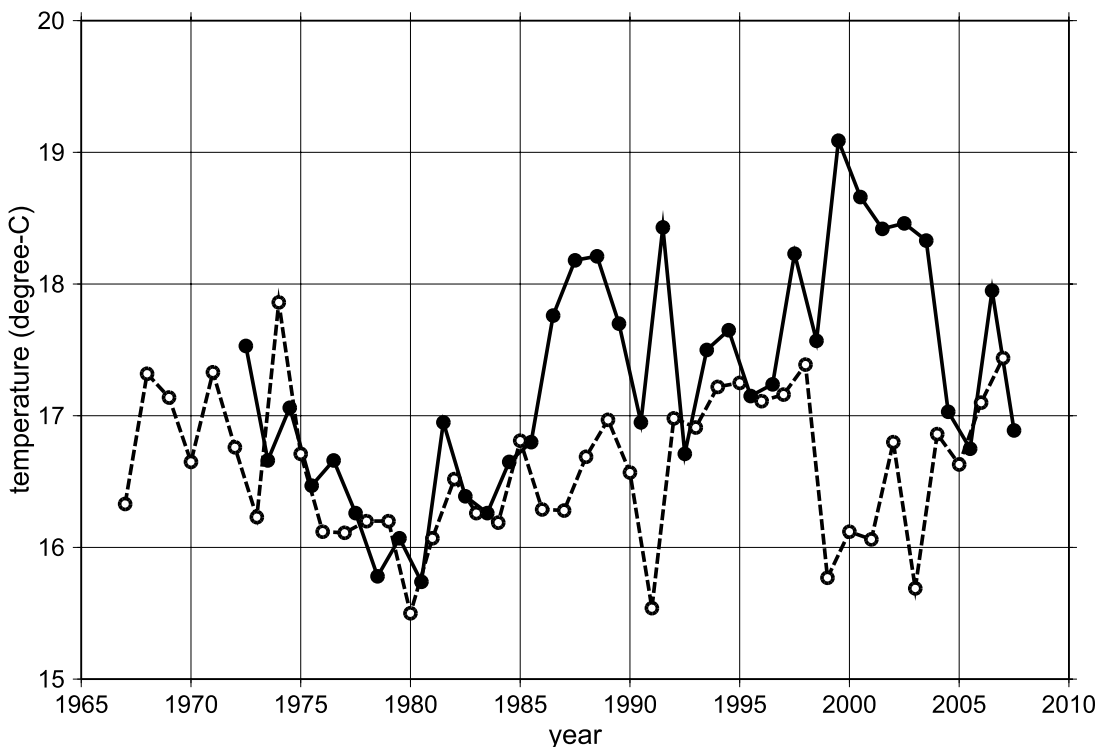
前節でみたように、黒潮再循環域にあたる 140°E 以西では、それ以東とくらべると明らかに高温の低渦位水が現れることがある。この低渦位

水は、春季に形成され夏季まで維持されるが、秋季から冬季には減衰してしまう。減衰時のコア水温は、それ以东に分布するものと変わらないレベルに低下する。一方、低温の低渦位水は、140°E 以东で春季に形成されたものが、水温の絶対値や水温勾配を大きくしながら再循環域内を南西方に移流し、夏季を中心に 140°E 以西に出現したものである。またこの低温の低渦位水は、翌年に新しい亜熱帯モード水が移流してくるまで、継続して分布する。

高温の低渦位水は 140°E 以西に分布が限られることから、移流して他海域の海洋変動に影響しない。また、遅くとも秋季には減衰することから、翌年に形成される低渦位水の性質への影響が小さいと考えられる。他方、低温の低渦位水は徐々に減衰しながら他海域に移流することから、翌年に形成される低渦位水の性質に影響する。このことから十年規模変動に関する海洋変動の指標として

は、低温の低渦位水のコア水温を亜熱帯モード水のそれとして扱うべきと考える。

現在、「海洋の健康診断表」では夏季の 137°E 線の観測結果から、低渦位水のコア水温の平均値を亜熱帯モード水のコア水温としている。しかし、夏季には高温の低渦位水が現れることがあるため、亜熱帯モード水のコア水温を不適切に高くしている可能性がある。高温の低渦位水は春季から夏季にかけてのみ現れることから、冬季の観測結果からは低温の低渦位水が抽出できるのではないだろうか。137°E 線の低渦位水のコア水温を、夏季と冬季との観測結果で比較したのが、第 4 図である。これをみると、1986～1991 年及び 1999～2003 年に夏季と冬季とのコア水温に 1°C 以上の差が生じていた。この期間は、夏季のコア水温が上昇した期間（すなわち「海洋の健康診断表」で亜熱帯モード水のコア水温が上昇したと診断された期間）であり、局所的に形成された高温の低



第 4 図 137°E 線における低渦位水のコア水温の時系列

観測船の観測による 137°E 線における低渦位水のコア水温（単位 °C）。渦位 $2.0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 以下を全観測点のコア水温の中央値を示す。●は夏季，○は冬季の観測を示す。渦位 $2.0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 以下の観測点がなかった 2001 年冬季及び夏季には、基準を渦位 $2.1 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 以下とした。

渦位水が出現していたものと推測される(1999年～2003年の事例は、林ほか(2004)に報告がある)。これ以外の期間は、夏季と冬季とでコア水温の差は小さく、低温の低渦位水のみが存在していた期間と考えられる。

5. まとめ

近年のアルゴフロートデータから、黒潮域及び黒潮続流域に現れる低渦位水の時空間変動を解析した結果、140°E以西には性質や振る舞いの異なる2種類の低渦位水が存在することがわかった。ひとつは春季に140°E以東で形成されたものが夏季以降に再循環域南側を移流したものであり、もうひとつは高温で140°E以西で春季に形成され、遅くとも秋季に減衰するものであった。

黒潮続流で形成された亜熱帯モード水は、翌年に形成される亜熱帯モード水の性質にも影響するという十年規模変動を駆動するメカニズムを有している(Hanawa and Kamada, 2001)ことから、「海洋の健康診断表」では十年規模変動に関する海洋変動の指標として亜熱帯モード水のコア水温の診断を行っている。今回の解析の結果、十年規模変動に関する海洋変動の指標にかなう亜熱帯モード水は、137°Eで観測される2種類の低渦位水のうち低温の性質をもつものと考えられる。これまで「海洋の健康診断表」で診断する亜熱帯モード水は、137°E定線で観測された低渦位水すべてを考慮していることから、低温の低渦位水を抽出し診断に利用することで、十年規模変動に関する海洋変動の指標の精度が改善されると考えられる。

137°Eにみられる低温の低渦位水を抽出するために、高温の低渦位水が減衰してしまう冬季の観測結果を用いることを提案する。これまでコア水温が上昇したと診断された期間は、冬季の観測結果を用いるとコア水温の上昇がみられず、適切に低温の低渦位水が抽出されているようである。

さらに最近10年及び今後の変動指標としては、140°E以東の他定線、フロートのデータを考慮することで、形成域である黒潮続流域の減衰の程度の弱い亜熱帯モード水の性質を指標とすることも検討する必要がある。

参考文献

- Bingham, F.M., T. Suga and K. Hanawa (1992) : Comparison of upper ocean thermal conditions in the western North Pacific between two pentads : 1938-42 and 1978-82. *J. Oceanogr.*, **48**, 405-425.
- Hanawa, K. and J. Kamada (2001) : Variability of core layer temperature (CLT) of the North Pacific subtropical mode water. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2229-2232.
- 林和彦・曾我太三・高槻靖・石川孝一(2004) : 北太平洋亜熱帯モード水の近年の昇温・低塩傾向, 2004年度日本海洋学会春季大会, ポスター番号 P09.
- Knauss, J.A. (1997) : *Introduction to Physical Oceanography*. Prentice-Hall, New Jersey, 309pp.
- Masuzawa, J. (1969) : Subtropical mode water. *Deep-Sea Res.*, **16**, 463-472.
- Qiu, B. and S. Chen (2006) : Decadal variability in the formation of the North Pacific subtropical mode water : oceanic versus atmospheric control. *J. Phys. Oceanogr.*, **36**, 1365-1380.
- 曾我太三・高槻靖・林和彦(2005) : 東経137度線における1990年代後半以降の北亜熱帯モード水の変動. *測候時報*, **72** 特別号, S131-128.
- Suga, T. and K. Hanawa (1995a) : The subtropical mode water circulation in the North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 958-970.
- Suga, T. and K. Hanawa (1995b) : Interannual variations of North Pacific subtropical mode water in the 137° E section. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 1012-1017.
- Suga, T., K. Hanawa and Y. Toba (1989) : Subtropical mode water in the 137° E section. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 1605-1618.
- Suga, T., K. Motoki, Y. Aoki, and A. M. MacDonald (2004) : The North Pacific climatology of winter mixed layer and mode waters. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 3-22.
- Taneda, T., T. Suga and K. Hanawa (2000) : Subtropical mode water variation in the southwestern part of the North Pacific. *J. Geophys. Res.*, **105**, 19591-19598.
- Yasuda, T. and K. Hanawa (1999) : Composite analysis of North Pacific subtropical mode water properties with respect to the strength of the wintertime East Asian monsoon. *J. Oceanogr.*, **55**, 531-541.
- Yasuda, T. and Y. Kitamura (2003) : Long-term variability of North Pacific subtropical mode water in response to spin-up of the subtropical gyre. *J. Oceanogr.*, **59**, 279-290.