

南方振動の長期的変動特性について

LONG-TERM FLUCTUATION CHARACTERISTICS OF SOUTHERN OSCILLATION

江口 聡一郎¹・河村 明²・神野 健二³

Soichiro Eguchi, Akira Kawamura, Kenji Jinno

¹ 学生員 九州大学大学院工学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎六丁目10-1)

² 正会員 工博 九州大学助教授 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎六丁目10-1)

³ 正会員 工博 九州大学教授 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎六丁目10-1)

Southern Oscillation (SO) is an atmospheric see-saw phenomenon in tropical Pacific sea level pressure between the eastern and western hemispheres associated with the El Niño and La Niña oceanographic features. The oscillation can be characterized by Southern Oscillation Index (SOI) which is derived from values of the monthly mean sea level pressure difference between Tahiti and Darwin, Australia. The impacts of SO on climate are widespread and extend far beyond the tropical Pacific, a phenomenon known as teleconnection.

In this study, long-term fluctuation characteristics of SO are presented as guidance when using SOI for other analyses. The results show SO intensity (i.e., cross-correlation of Tahiti and Darwin pressure deviations) is increasing almost constantly since around 1900. The reasons of increase of SO intensity are also investigated statistically in detail.

Key Words : *Southern Oscillation, long-term fluctuation, Tahiti, Darwin, correlation, SOI, mean sea level pressure*

1. はじめに

南方振動 (Southern Oscillation) は、太平洋赤道域の東部と西部において、気圧の平年からの偏差が一方で高くなればもう一方では低くなるという現象であり、20世紀はじめGilbert Walker卿により発見された¹⁾。この南方振動は、東部太平洋赤道域 (ペルー沖から日付変更線付近) における海面水温変動現象であるエルニーニョ・ラニーニャ現象と密接に関連している^{1), 2)}。現在では、両者は一体の現象であると認識されており、双方の頭文字を用いたENSO(El Niño - Southern Oscillation)という名前で呼ばれ、テレコネクションを通じて世界各地に異常気象をもたらすと考えられている^{1), 2)}。

南方振動の状態は南方振動指数 (Southern Oscillation Index, 以下SOIと記す) により数値化されている (詳しくは文献3) を参照)。アメリカ合衆国の国立海洋大気庁 (NOAA) では、海面水温データと共にSOIを用いることによりENSO現象の判断を行っている¹⁾。SOIと世界各国の水文気象要素との関係については精力的に研究が

行われている (例えば、文献4) ~9)参照)。著者らもこれまでに、SOIと福岡における降水・気温との相関について研究を行っている^{10) ~13)}。

また、地球温暖化とENSO現象の関連性^{14), 15)}や、1976-77年に起こった太平洋規模の気候変動¹⁶⁾によるENSO現象のシフトに関する気候物理的研究^{17), 18)}などは数多く存在している。しかし、著者らの調べた限り、SOIの元となる気圧データやSOIそのものの時系列解析は意外にも発表されていないようである。そこで著者らは、SOIを用いる場合の有用なバックグラウンド情報を提供することを目的として、SOI時系列の自己相関やスペクトル特性およびカオス的特性について発表し³⁾、またタヒチ、ダーウィンにおける月平均海面気圧データの存在状況、その統計的特性、SOIをその大きさによりグループ化した場合の発生頻度特性および持続特性について検討を行ってきた^{19), 20)}。

本論文では、さらに、SOIの基となる南方振動現象の長期的変動特性およびその原因を気候物理的ではなく統計的に解析することを目的としている。具体的には、まずタヒチおよびダーウィン両地点における月平均海面気

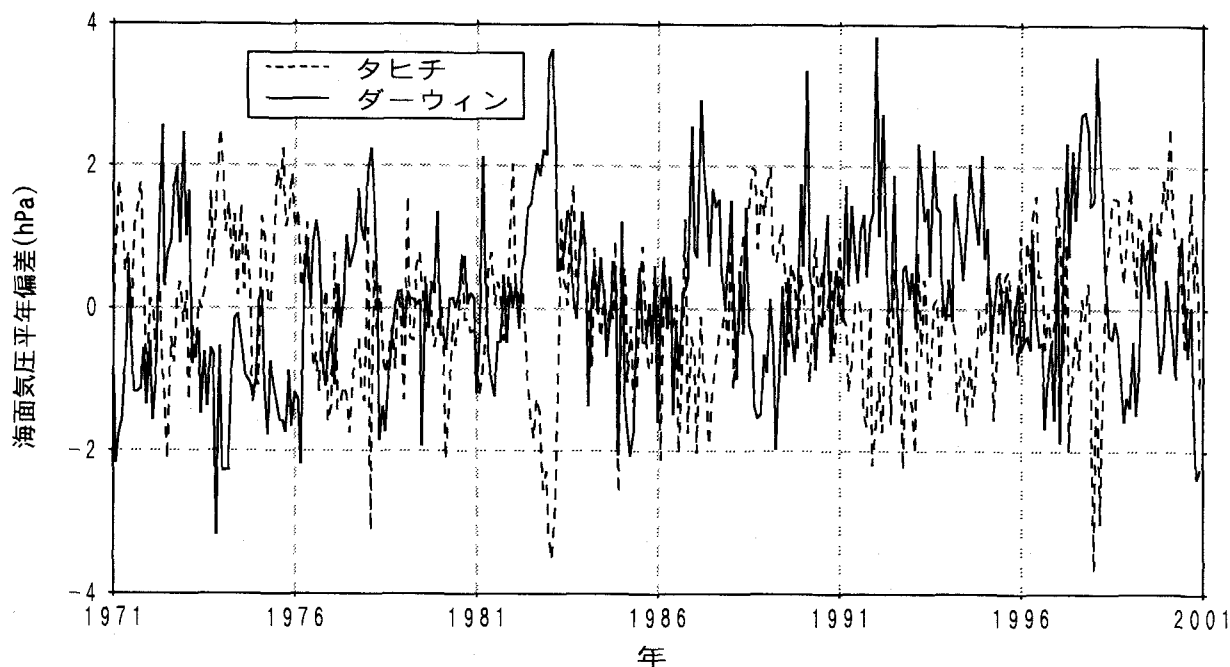


図-1 タヒチおよびダーウィンの月平均海面気圧のその各月毎の平均値からの偏差時系列(1971年1月～2000年12月)。

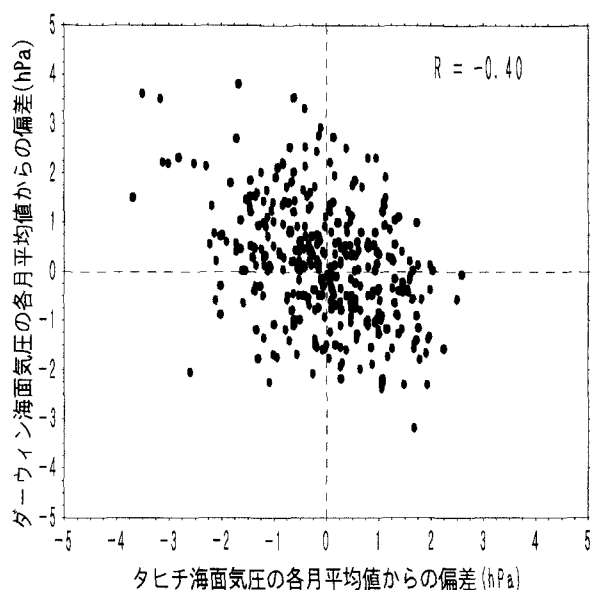


図-2 図-1の散布図。

圧偏差の30年間の相関係数(南方振動強度と呼ぶ)を移動平均的に算定した。その結果、南方振動強度が年々増大する傾向にあることが見出され、特にENSO現象のシフトとして知られている1970年代半ば以降^{16)~18)}、この傾向が顕著になっていることを確認したのでここに報告するものである。そして、この原因を統計的に検討するため、タヒチおよびダーウィンの月平均海面気圧の長期変動特性について詳しく解析を行っている。

2. 南方振動強度の長期的変動

(1) 用いた気圧データ

南方振動という現象は、南太平洋のタヒチ島パペーテ(西経149.6度、南緯17.5度)とオーストラリア北部のダーウィン(東経130.9度、南緯12.4度)両地点の気圧データにより表現される。両地点の月平均海面気圧データは、1935年以前については欠測の存在等により若干信頼性が劣る^{19)~21)}。しかし、これらはRopelewski *et al.*²¹⁾やAllan *et al.*²²⁾によって精度よく補完されており、現在では1866年からの連続データとして利用でき^{19)~22)}、解析に用いる上でも問題はないと考える。本論文は、南方振動の長期的変動特性を把握することに主眼を置いているため、信頼性が若干低いという理由で解析期間を1935年以降に限定することなく、1866年1月から2000年12月までの1620カ月(135年間)の連続した月平均海面気圧データを対象として以下の解析を行っている。よって、解析結果についてもそのことに留意されたい。

(2) 南方振動強度

図-1は、タヒチおよびダーウィン両地点における月平均海面気圧の値を、その各月毎(1月～12月)の平均値から差し引いた偏差時系列を最近30年間(1971年1月から2000年12月)分について示している¹⁹⁾²⁰⁾。この図より、一方の地点の気圧が平均より高くなると、他方の地点では平均より低くなる傾向がはっきりと認められる。この現象は、Gilbert Walker卿により発見され南方振動と

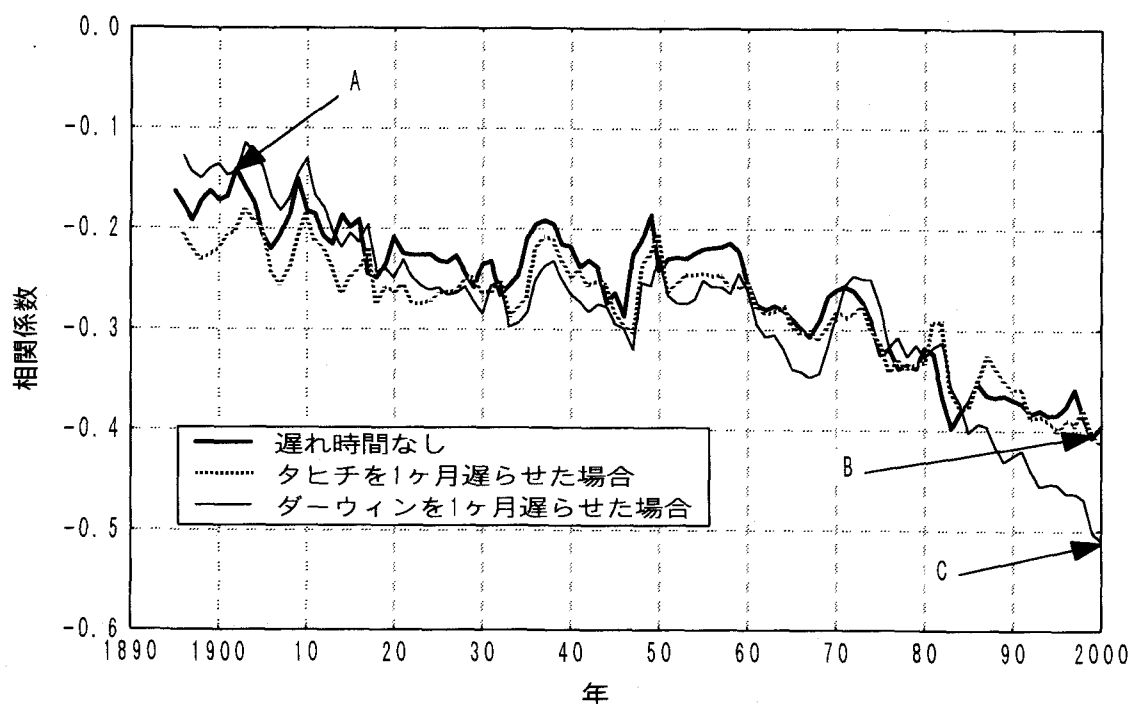


図-3 南方振動強度の長期的変動。

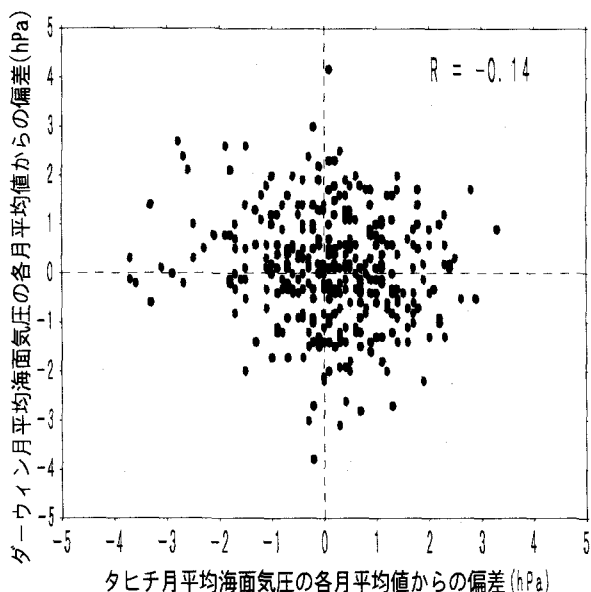


図-4 図-3の点Aにおける散布図。

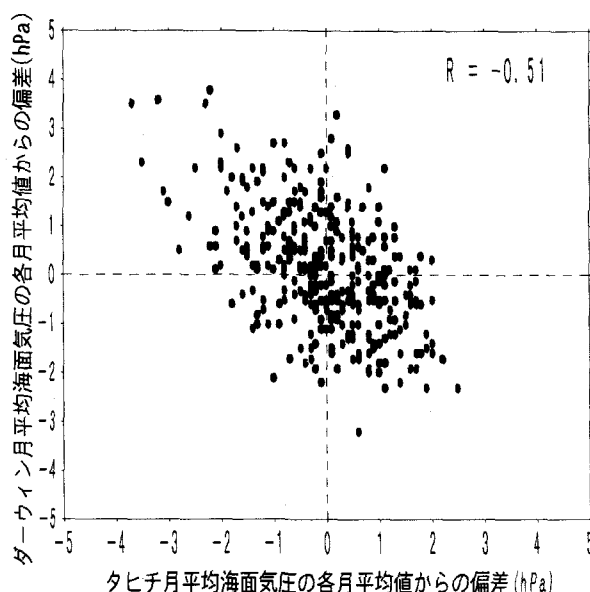


図-5 図-3の点Cにおける散布図。

名付けられた有名な現象である¹⁾。図-2は図-1の偏差時系列の散布図を示している。この場合の相関係数は-0.40であり、南方振動の相関係数（南方振動強度）そのものはそれ程高くないことが分かる¹⁹⁾²⁰⁾。しかし、「相関係数は0である」という帰無仮説のもとで統計的仮説検定を実行すると、0.01%以下という有意水準でその帰無仮説は棄却される。つまり、この相関係数は極めて有意であると言える。

(3) 南方振動強度の長期的変動

図-3の太線は、1895年から2000年までの各年(106年)に対し、その年の過去30年間の南方振動強度を算定し図示したものである。30年間を適用する理由は、WMO（世界気象機関）では、30カ年の平均値を平年値と定義していることを考慮したためである²¹⁾。図中例えば、1900年の値は1871年から1900年の30年間の南方振動強度を示している。なお、全ての相関係数は、最低でも有意水準1%で有意である。また図-3において、細線はダーウィンのデータを1カ月遅らせた場合の南方振動の

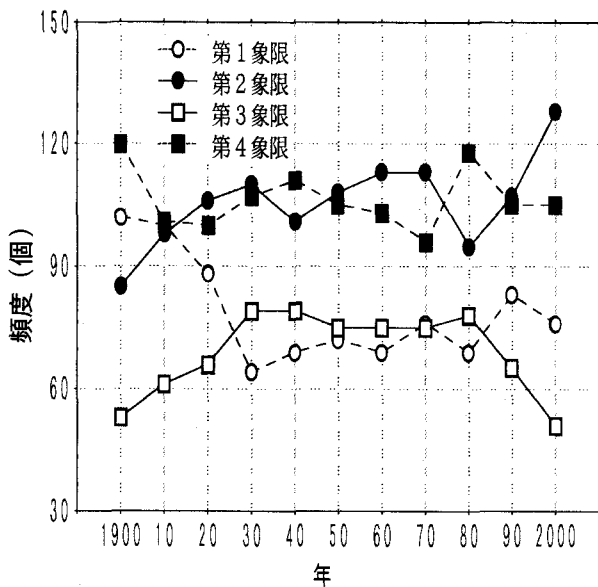


図-6 タヒチおよびダーウィンの月平均海面気圧からの偏差値の散布図における、各象限の個数のプロット。

相関係数を示しており、破線は逆に、タヒチのデータを1カ月遅らせた場合の相関係数を示している。

図-3より、いずれの場合も、相関係数は年の進行と共に一貫して大きくなる傾向にあることが分かる。特に、ENSO現象のシフトとして知られる1970年代半ば以降その傾向は顕著となっている。すなわち、近年南方振動強度は増大する傾向が見出される。また同図より、1920年代半ばまではタヒチを1カ月遅らせた場合が相関は最も大きい、それ以降はダーウィンを1カ月遅らせた場合の方が相関が最も大きくなっていることが分かる。

ここで図-4は、遅れ時間を考慮しない場合について、最小の相関係数となった1873年から1902年までのデータを用いた場合(図-3の点A)の散布図を示している。また、相関係数が最大の点Bの散布図は図-2とほとんど同じである。図-5は、図-3の中で最も相関が大きい場合(図-3の点C)の散布図を示している。相関係数が0.14である図-4の散布図を図-2と比較すると、図-4は全体にばらついていることが分かる。また、図-5の散布図を図-2と比較すると、図-5は図-2よりもさらに狭い領域に点が集まっており、相関係数も0.51と高くなっている。

3. タヒチ及びダーウィン海面気圧の変動特性

(1) 月平均海面気圧データの長期変動特性

図-3の南方振動強度が大きくなる傾向を統計的に調べるために、遅れ時間を考慮しない相関係数時系列(太線)に対する散布図について検討する。すなわち、タヒ

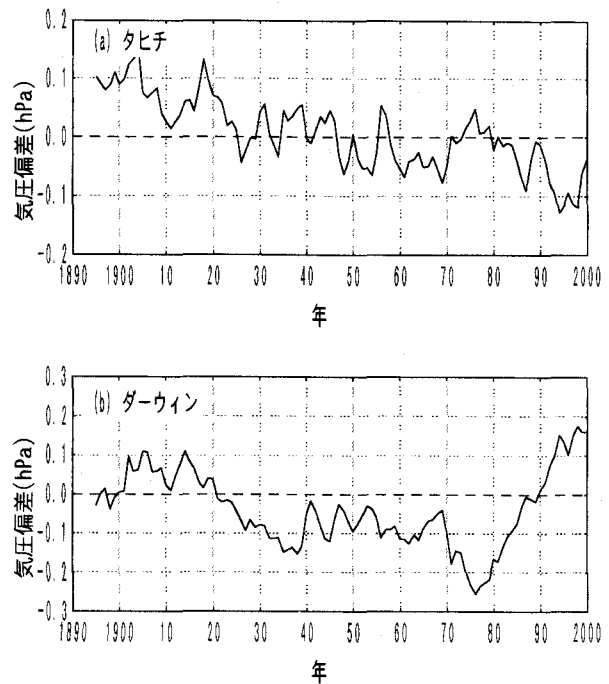


図-7 30年移動平均した月平均海面気圧の偏差時系列((a)タヒチ, (b)ダーウィン)。

チおよびダーウィンの月平均海面気圧の各月平均値からの偏差が、第1象限から第4象限の各領域にどのような分布をし、またそれが時間と共にどう変化しているのかを調べた。図-6に各象限の個数(過去30年間の360個)を10年おきに算定したものを示す。この図より、南方振動は負の相関を有していることから、全体的に第2,4象限の個数が多いことが分かる。各期間の総数360個の内訳は、平均すると第1,3象限に約150個、第2,4象限に約210個が分布している。

次に、図-3の南方振動の強度が増大している傾向を図-6から分析すると、1930年以前は第1象限の個数(図-6の白丸)が減少し、その分第2,3象限の個数(黒丸、白四角)が増加している。その後1970年頃までは各象限の個数に大幅な変動が見られないが、これは図-3の南方振動強度が急激には増加していないことに対応していると考えられる。そして、図-3における近年の顕著な南方振動強度の増大は、図-6における第3象限の個数が減少し、その分が第2象限に移行したためであると考えられる。つまり近年は、図-2のような散布図の縦軸に当たるダーウィン月平均海面気圧の各月平均値からの偏差が上昇していることが主な原因であると考えられる。

図-7は、タヒチおよびダーウィンの月平均海面気圧の各月平均値からの偏差値を30年移動平均したものである。図-7(a)より、タヒチについては、1910年以前は約0.1(hPa)程度あった偏差が、1930年頃までに0(hPa)に減少し、その後1980年頃までは0(hPa)を中心に上下している。

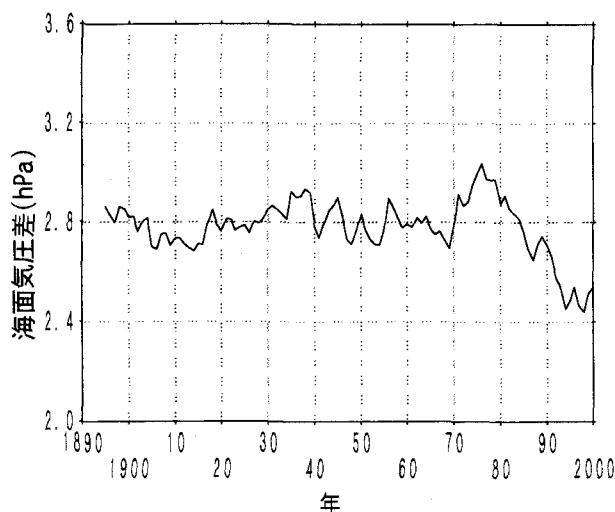


図-8 30年移動平均した月平均海面気圧差時系列。

そして近年は、 $-0.1(\text{hPa})$ 付近まで減少しており、全体的にタヒチの月平均海面気圧が年々減少傾向にあることが分かる。

次に図-7(b)より、ダーウィンは1910年頃まで気圧がやや上昇しているものの、その後1940年頃まで減少し、70年以降70年代半ばまでさらに減少している。そして気圧偏差が70年半ばで最小の $-0.25(\text{hPa})$ となった後一転して上昇を続け、現在では $0.2(\text{hPa})$ 付近にまで達している。すなわち、近年ダーウィンの月平均海面気圧が著しく上昇していることが分かる。以上より、図-3の70年代半ばからの南方振動強度の増大は、タヒチの気圧の減少とダーウィンのそのの上昇に起因していると言えよう。

(2) タヒチとダーウィンの気圧差の長期変動特性

通常タヒチの月平均海面気圧はダーウィンのそれよりも高い状態にある^{19) 20)}ので、図-7に示されるように、タヒチの月平均海面気圧が下降し、ダーウィンのそれが近年上昇する傾向にあるという結果から、タヒチとダーウィンの月平均海面気圧差そのものが以前と比較して小さくなってきていると考えられる。図-8は、タヒチとダーウィンの月平均海面気圧差を30年移動平均したものを示している。この図より、1970年代半ば以前は平均約 $2.8(\text{hPa})$ あった気圧差が、その後約 $2.4(\text{hPa})$ にまで減少していることがはっきり見て取れる。

(3) SOIの長期変動特性

図-8の結果より、近年エルニーニョ現象(SOIが負の状態)が起こり易くなっていると推測できるので、SOIの変動特性について調べてみよう。

タヒチとダーウィンの月平均海面気圧の差とSOIとの関連を分かり易くするため、SOIの算定式を示す。Troupの方法^{3) 24) 25)}による、ある年 y 、ある月 $m(m=1\sim 12)$ における $SOI(y, m)$ の値は次式で算定される。

$$SOI(y, m) = \{P_T(y, m) - P_D(y, m) - M_{30}(m)\} / S_{30}(m) \quad (1)$$

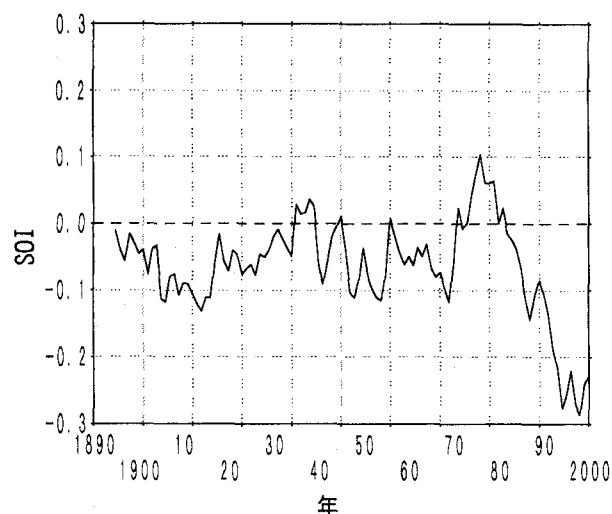


図-9 SOIの30年移動平均時系列。

ここに、 $P_T(y, m)$, $P_D(y, m)$: それぞれタヒチ及びダーウィンにおける月平均海面気圧(hPa), $M_{30}(m)$, $S_{30}(m)$: それぞれ基準期間30年間(1951年から1980年)における、ある月 m に対するタヒチとダーウィンの月平均海面気圧差の平均値(hPa)および標準偏差(hPa)である。式(1)からも分かるように、SOIとはタヒチとダーウィンの月平均海面気圧の差を平均0、分散1に基準化したものとして表される。

図-9にSOIの30年移動平均時系列を示す。この図より、SOIは全体的に負の側に振れており、その値は1970年代半ばまではおよそ -0.1 から 0 付近の間で変動している。70年代半ばに一旦正の側に振れた後、それ以降は減少を続け、近年は -0.3 付近にまで達しているが分かる。すなわち近年は、SOIの値が負の方向に大きく振れており、以前に比べエルニーニョ傾向にある。しかも、エルニーニョ現象そのものが大規模になってきていることが示唆される。事実、1982年～1983年および1997年～1998年にかけて、20世紀最大規模のエルニーニョ現象が起こっている。

4. むすび

本論文では、南方振動の長期変動特性およびその変動原因を現象面から統計的に明らかにすることに主眼を置いて検討を行った。以下に得られた主な結果を示す。

南方振動現象は、その強度が一貫して増大する傾向にあるという長期的変動特性を有していることを確認した。特に、ENSO現象のシフトとして知られている1970年代半ば以降その傾向が顕著である。また、1920年代半ばまでは、タヒチを1カ月遅らせた場合が最も相関が大きかったが、それ以降はダーウィンを1カ月遅らせた場合が相関が最も大きくなっている。現在、ダーウィンを1カ月遅らせた場合の相関は -0.5 を越えている。

次に、タヒチおよびダーウィンの月平均海面気圧の各月平均値からの偏差の分布状況、および30年移動平均時系列より長期変動を調べた結果、南方振動強度増大の原因は、全体的にはタヒチの月平均海面気圧の下降に依っているが、近年の増加に関しては、ダーウィンの月平均海面気圧の上昇による影響が大であると言える。

さらに、タヒチとダーウィンの月平均海面気圧差の減少およびSOIの値が低下傾向にあることを確認した。すなわち、近年はエルニーニョ現象の頻度と程度が共に大きくなる傾向にあると推測される。

本論文で得られた成果の物理的説明については、1976-77年に起こった太平洋規模の気候変動¹⁰⁾や、エルニーニョ・ラニーニャ現象により、太平洋上の熱帯低気圧の発生位置が移動し、それに伴う周囲の高気圧・低気圧分布がシフトすることに起因すると考えられる¹¹⁾が、詳しいことは現時点では不明であり、今後の研究課題であると考ええる。

参考文献

- 1) 気候影響・利用研究会編：エルニーニョと地球環境，成山堂書店，1999。
- 2) 桜井邦雄：エルニーニョ現象の予測に向けて，日本に影響を及ぼす熱帯の気象，日本気象学会関西支部，pp.38-57,1998。
- 3) Kawamura, A., McKerchar, A.I., Spigel, R.H. and Jinno, K. : Chaotic characteristics of the Southern Oscillation Index time series, *Journal of Hydrology*, No.204, pp.168-181, 1998。
- 4) Ropelewski, C.F. and Halpert, M.S. : Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation, *Monthly Weather Review*, Vol.115, pp.1606-1626, 1987。
- 5) Halpert, M.S. and Ropelewski, C.F. : Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation, *Journal of Climate*, Vol.5, pp.577-593, 1992。
- 6) Moss, M.E., Pearson, C.P. and McKerchar, A.I. : The Southern Oscillation index as a predictor of the probability of low streamflows in New Zealand. *Water Resources Research*, Vol.30, No.10, pp.2717-2723, 1994。
- 7) Uvo, C.B., Repelli C.A., Zebiak S.E. and Kushnir, Y. : The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation, *Journal of Climate*, Vol.11, pp.551-562, 1998。
- 8) McKerchar, A.I., Pearson, C.P. and Fitzharris, B.B. : Dependency of summer lake inflows and precipitation on spring SOI, *Journal of Hydrology*, Vol.205, pp.66-80, 1998。
- 9) 吉野文雄：エル・ニーニョ現象と四国の月降水量の関係について，平成11年度土木学会四国支部研究発表会講演概要集，pp.90-91,1999。
- 10) Kawamura, A., Eguchi, S. and Jinno, K. : Cross-Correlation Between Southern Oscillation Index and Precipitation in Fukuoka,

Japan, *Supplement to EOS, Transactions, American Geophysical Union*, Vol.81, No.22, p.WP57, 2000。

- 11) 江口聡一郎，河村明，神野健二：南方振動指数(SOI)と福岡市月気温との相関について，水文・水資源学会2000年研究発表会要旨集，pp.120-121, 2000。
- 12) Kawamura, A., Eguchi, S. and Jinno, K. : Cross-Correlation Between Southern Oscillation Index and Precipitation / Temperature in Fukuoka, Japan, *Proc. of Fresh Perspectives Symposium 2000*, Christchurch, New Zealand, 2000。
- 13) 河村 明，江口聡一郎，神野健二：南方振動と福岡市月降水量の相関関係について，土木学会論文集，No.691/II-57, pp.153-158, 2001。
- 14) Trenberth, K.E. and Hoar, T.J. : The 1990-1995 El Niño Southern Oscillation event: Longest on record, *Geophysical Research Letters*, No.23, pp.57-60, 1996。
- 15) Harrison, D.E. and Larkin, N.K. : Darwin sea level pressure, 1876-1996: Evidence for climate change?, *Geophysical Research Letters*, No.24, pp.1779-1782, 1997。
- 16) Zhang, Y., Wallace, J.M. and Battisti, D.S. : ENSO-like interdecadal variability : 1900-93, *Journal of Climate*, No.10, pp.1004-1020, 1997。
- 17) Chao, Y., Ghil, M. and McWilliams, J.C. : Pacific interdecadal variability in this century's sea surface temperatures, *Geophysical Research Letters*, No.27, pp.2261-2264, 2000。
- 18) Wang, B. and An, S.I. : Why the properties of El Niño changed during the late 1970s, *Geophysical Research Letters*, No.28, pp.3709-3712, 2001。
- 19) 河村 明，江口聡一郎，神野健二：南方振動指数(SOI)およびその気圧データの統計的特性について，水工学論文集，第45巻，pp.169-174, 2001。
- 20) Kawamura, A., Eguchi, S., Jinno, K. and McKerchar, A.I. : Statistical characteristics of Southern oscillation Index and it's barometric pressure data, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 2001 (submitted)。
- 21) Ropelewski, C.F. and Jones, P.D. : An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation index, *Monthly Weather Review*, No.115, pp.2161-2165, 1987。
- 22) Allan, R.J., Nicholls, N., Jones, P.D. and Butterworth, I.J. : A further extension of the Tahiti-Darwin SOI, early ENSO events and Darwin pressure, *Journal of Climate*, No.4, pp.743-749, 1991。
- 23) 河村 明，上田年比古，神野健二：降水時系列の長期的パターン変動の解析，土木学会論文集，第363号/II-4, pp.155-164, 1985。
- 24) Troup, A.J. : The "southern oscillation". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.91, No.390, pp. 490-506, 1965。
- 25) McBride, J.L. and Nicholls, N. : Seasonal relationships between Australian rainfall and the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, No.111, pp.1998-2004, 1983。

(2001. 10. 1 受付)