

気候変動のゆらぎを考慮した海岸保全の適応策への一考察

Adaptive Coastal Preservation Measures with Consideration of Fluctuation of Climate Change

山下隆男¹・駒口友章²・三島豊秋³

Takao YAMASHITA, Tomoaki KOMAGUCHI and Toyoaki MISHIMA

A way of thinking about the adaptive measures to the coastal protection which considered "a fluctuation" of the climate change, was proposed. Definition of "fluctuation" in this paper is a change in climate caused by the volcanic eruption, El Nino Southern Oscillation (ENSO), 11 years of the solar activity together with anthropogenic changing trend and several decadal oscillation of ocean. Considering such "fluctuation", discussions were made how we should design coastal structures, manage shore environment and establish the coastal disaster prevention measures in the near future of several decades.

1. 緒言

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次評価報告書 (AR4) において, 人為起源である地球温暖化を現実的に確認すると同時に, 将来予測に関して気温および海面水位の上昇, 極端現象の増加傾向などが強く懸念されるようになってきた。このため, 近未来の極端現象の予測とそれによる自然災害への影響評価, 炭素循環安定化予測の新たな進展の重要性が増してきている。地球システムモデルにおいては, 雲および炭素のフィードバック効果の重要性および不確実性をどのように解決するか, 依然, 大きな問題として残されている。

このような地球規模での環境変化に対して, 海岸防災, 海岸環境保全の立場から, 適応策を検討する場合, 気候変動のトレンド以上に, そのゆらぎに対してどのように対応するかを検討すべきであろう。ゆらぎと言えば不安定現象, 乱れ成分, 摂動成分として捉えがちで, 不確実性として取り扱うべきであると考えがちであるが, 気候変動のゆらぎは, 果たしてそうであろうか?

アメリカ地球物理学連合のトランザクション, EOSの2007年11月, 第44号88巻にWood・Lean(2007)の寄稿, "Anticipating the Next Decade of Sun - Earth System Variations"があった。これによると, 数十年スパンの地球規模での気候変動のゆらぎは, ほぼ再現できるというものである。すなわち, 太陽放射の全量と, 人為起源である地球温暖化のトレンドと, 十数年に一度程度の間隔

で発生している地球上の火山噴火と, 熱帯太平洋の気象データから求めたエルニーニョ南方振動指標 (MEI) との結合で, 地球の平均気温のゆらぎが再現できるのである。もし, このような予測が可能であれば, ゆらぎを不確実性の少ない変動として扱う事ができる。

一方, MEIには面白い変動特性があり, これが台風や発達した温帯低気圧の発生件数と関係がありそうなのである。北太平洋振動 (NAO) は, 北アメリカ大陸およびヨーロッパの気候の明確な変動特性を示すことは良く知られているが, エルニーニョ南方振動が引き起こす亜熱帯高気圧と極低気圧との強弱変化も, 日本海を通過する爆弾低気圧の発生頻度を支配しているように思われる。すなわち, 気候変動のゆらぎの第一要因であるエルニーニョ南方振動特性を知ることで, これを考慮した, 台風や爆弾低気圧の発生頻度を予測することができるのではないかと考えている。このような気候変動のゆらぎが数十年のスパンで予測できれば, 台風や温帯低気圧による海岸外力の変動を考慮した海岸保全対策の検討が可能になるのではないかと期待される。

本研究では, 気候変動のゆらぎを考慮した海岸保全への対応策に関する考え方を提案する。この場合のゆらぎとしては, 人為的な気候変化のトレンド以外の, エルニーニョ南方振動 (ENSO), 太陽活動の11年変動, 火山の噴火による変化を指す。これを気候変動の中でどのように捉え, 海岸構造物設計, 海岸環境および防災対策にどのように考慮すべきかを整理する。

1 正 会 員 工博 広島大学教授 大学院国際協力研究科
2 正 会 員 工博 (株) 碧浪技術研究所 代表取締役
3 正 会 員 工博 (株) 碧浪技術研究所
広島大学産学連携センター客員研究員

2. 気候変動とその「ゆらぎ」

(1) 気候変動予測における「ゆらぎ」

地球温暖化の将来予測の根幹を担った気候モデルのデータセットはCMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project) として引き継がれ、現在もアップデートが続いている。IPCCの評価報告書等に掲載されている、大循環モデルにより予測された地球の平均気温の変動予測の結果には、気温上昇のトレンドの他、数年から数十年の変動成分、すなわち(モデル毎に異なる)地球規模での気候のゆらぎを見ることができる。

(2) 「ゆらぎ」の予測

Wood・Lean (2007) は、Christyら (2007) により補正されたNOAAの人工衛星に搭載されているMSU (Microwave Sounding Unit) の過去25年間の温度データに対して、下部対流圏における地球の平均気温の変動、すなわち平均気温のゆらぎが、以下の4つの指標により80%の精度で説明できることを示した。図-1に彼らと同様の解析を行った結果を示す。

- (i) 全太陽光入射の11年変動 (TSIデータ: NOAA NGDC HP, 図中のデータは6ヵ月移動平均値)
- (ii) 地球温暖化の温度上昇の線形トレンド
- (iii) ENSOによる気象変動 (MEIデータ: NOAA ESRL HP)
- (iv) 火山噴火のエアロゾルによる遮蔽効果 (AODデータ: NASA GISS HP)

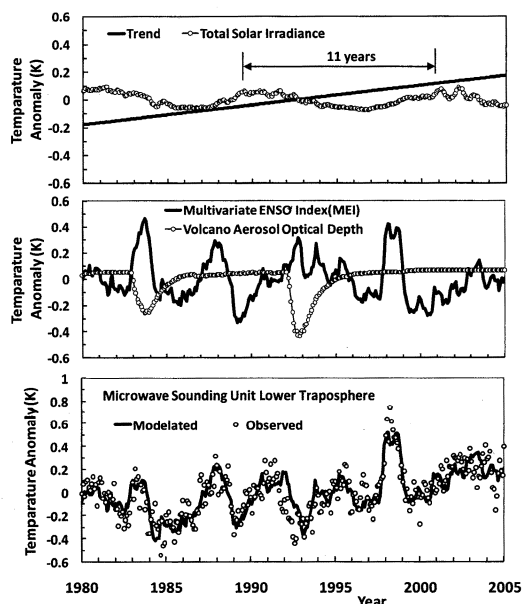


図-1 下部対流圏の平均気温の変動に対する推定値と観測データの比較 (TSIデータ: NOAA NGDC HP, MEIデータ: NOAA ESRL HP, AODデータ: NASA GISS HP, MSUデータ: NSSTC HP)

Woodsらによる解析は、Douglass・Clader (2002)のMEIの代わりに海面水温 (SST) を用いた重回帰分析による方法に従ったものである。Woodsらの寄稿ではその詳細情報が少ないため、図に示す結果はその方法に従い公表されている対応する観測データを解析しなおしたものである。その過程で、MEIには6ヶ月の、また火山噴火の遮蔽効果にはMEIに対してさらに3ヶ月、すなわち9ヶ月のタイムラグがあることがわかっている。そのタイムラグを考慮すると、図-1に示すように下部対流圏における平均気温の変動は(i)~(iv)の4つの指標により説明できる。この結果は、気象変動のゆらぎは、線形トレンドを除いた全太陽光入射の11年変動、ENSO現象による気象変動および火山噴火による遮蔽効果の3つのゆらぎにより、ほぼ説明できることを示唆している。

南方振動とともに良く知られているゆらぎに、図-2に示す北大西洋振動NAO (North Atlantic Oscillation) がある。このとき、図中の上段左図はNAO指標が正值のときの、また右図は負値のときの気圧配置を表している。極低気圧および亜熱帯高気圧の発達度合いによりゲールと呼ばれる温帯低気圧の発達程度および経路が異なる。これにより北海の高潮・高波の発生回数と規模が決まる。

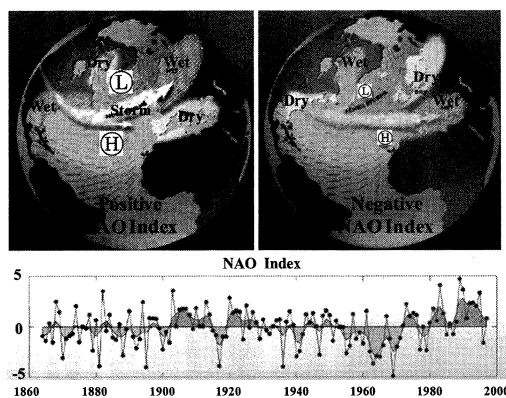


図-2 北大西洋振動の概念図とNAO指標の変化 (North Atlantic Oscillation (NAO) HPより)

(3) ENSOと台風、温帯低気圧との関係

MEI (Multivariate ENSO Index) は、ENSO (El Nino-Southern Oscillation) を表す指標としてWolter・Timlin (1993, 1998) により提唱された指標であり、熱帯太平洋でのエルニーニョ・ラニーニャのようなゆらぎを表わす。さらに、太平洋での10年規模でのゆらぎを示す指標としてPDO (Pacific Decadal Oscillation Index)があり、前節でも示した様に、これらは地球規模での気候のゆらぎを表わす指標である (NOAA ESRL HP)。

図-3に、わが国への台風の上陸数、上陸時最低気圧の

上位14台風の発生年を■で示す(上図), その下にWolterらが1950~2008年の6成分の観測データに対して主成分分析を行ったときのMEIの経時変化と, さらに太陽黒点数の変動データ, 最下図にPDOの1950年以降の変動を示す. MEIの図中の○で囲った数字は, 日本海北部を発達しながら移動する温帯低気圧により発生した(顕著な)寄り廻り波の発生事例で, 表-1に波浪災害等が示されて

いる. なお, MEIは, 海面気圧 (SLP), 風速成分, 海面水温 (SST), 海面気温 (SAT) および総雲量 (TC) の6成分に対して, 基準データからの変動値を主成分分析することにより導かれた指標で, 正值のときにエルニーニョ現象で, 負値であるときにラニーニャ現象であることを表している. PDO指標は正の時にエルニーニョ (warm phase), 負の時にラニーニャ (cold phase)を示す.

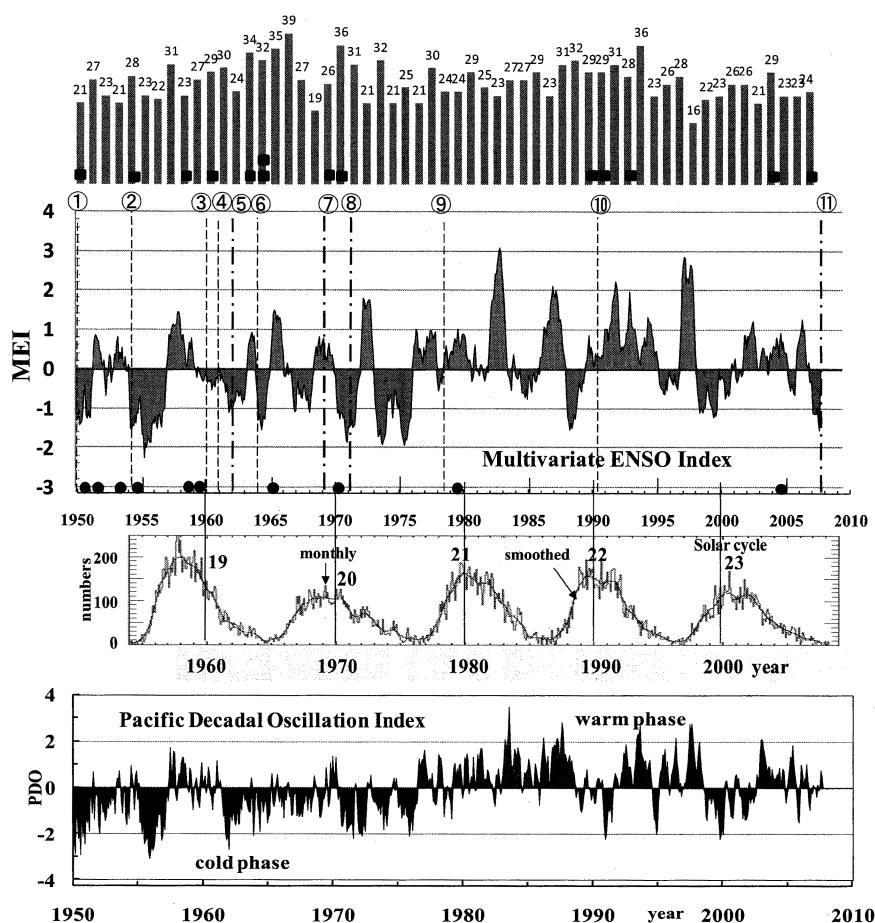


図-3 MEIおよびPDOの経時変化と上陸台風数(上図), 太陽黒点数の変化

図-3には, ●で災害を発生させた顕著台風, 枕崎, ジェーン, ルース, 13号台風, 洞爺丸, 狩野川, 伊勢湾台風, 6523, 7010, 7919, 7920等を示している. この図から明確に言えることは, 以下のである.

- (i) MEIには, 2年~5年周期のエルニーニョ・ラニーニャの繰り返し (ENSO) がある.
- (ii) 1950~1980年はラニーニャ卓越期, その後はエルニーニョ卓越期である. これはPDOのwarm phaseとcold phaseの振動と一致していることから卓越期があることは明確である. このような長期の振動は, 図-2に示した北大西洋の振動指標のNAOにも見ら

れ, NAOが負の時期(温帯低気圧の発達弱い期間)はラニーニャ卓越期, 正の時(ゲールが発達する時期)はエルニーニョ卓越期になっている.

- (iii) 図-3のMEI指標の変化の図(縦線)と上陸台風数(■: 上位14台風)に示した様に, ラニーニャ卓越期(PDOのcold phase)には, 我が国では強い台風や発達した温帯性低気圧による災害(表-1)が多発している.
- (iv) 図-3のMEI指標の図に縦線で示した様に, エルニーニョとラニーニャの変換時に, 顕著な寄り廻り波が発生している.

- (v) 太陽活動が非常に活発であった1958年をピークとするSolar Cycle 19の時期, 特にピーク後には, ラニーニャ卓越期と重なって, 寄り廻り波による災害, 大型台風が頻発していることは注目に値する.
- (vi) 大型上陸台風発生期と, 顕著な寄り廻り波の発生期 (1950~1980年の間) とは一致しており, 両者は同一の気候のゆらぎに支配されているように思える.

表-1 寄り廻り波災害の発生状況

	発生年月日	被災地	被災状況	出典
	1926年12月19日			(a)
	1927年12月24日			(a)
	1929年1月2日			(b)
	1935年11月12日			(a)
	1949年2月16日			(b)
①	1951年11月27~28日			(a)
②	1955年10月8~9日			
③	1961年1月26~27日			
④	1962年1月22~23日			
⑤	1963年1月7~8日	富山湾沿岸一帯	半壊, 浸水	(c)
⑥	1965年12月13日			
⑦	1970年2月1~2日	朝日, 入善, 黒部, 滑川	半壊, 浸水	
⑧	1972年12月1~2日	朝日, 入善, 氷見	全壊	
⑨	1979年3月31日	滑川		
⑩	1991年2月16日	滑川	浸水	
⑪	2008年2月24日	朝日, 入善, 黒部入善	損壊, 浸水	

出典: (a) 富山地方気象台昭和38年異常気象報告1号

(b) 北出正清: 中央気象台海洋報告, 2巻4号, 1952年

(c) 富山県地域防災計画資料

以上のことから判断して, もし約30年程度 (22年または33年かも知れない?) のエルニーニョ卓越期とラニーニャ卓越期の周期があると仮定すれば, 2008年以降の位相は, ラニーニャ卓越期に移行することになり, Solar Cycle 24の太陽活動が活発であれば, 台風災害や爆弾低気圧による災害が頻発する可能性がある. 特に, 太陽活動のGrand cycle 55年周期 (Yoshimura, 1979) を考えれば, 1958年をピークとするCycle 19から2013年をピークとするCycle 24は要注意であると考えられる. ピークから少しの遅れを持って気候変動が活発になる傾向があることを考慮すれば, 2014年以降の数年間は危険な時期と言える. さらに, 予想通り, この時期がラニーニャ卓越期となれば, 大型台風の上陸や爆弾低気圧の頻発に対して十分な警戒が必要であると言える. このような警戒すべき気候のゆらぎが予想された場合の適用策をどのように立てるべきかについて, 次節で検討する.

3. 「ゆらぎ」を考慮した海岸保全の適用策に向けて

(1) 寄り廻り波災害への適用策を例として

ラニーニャ卓越期には, 大型上陸台風や寄り廻り波のような異常波浪を発生させる温帯低気圧の来襲頻度が高く, 高潮・高波災害が発生しやすい可能性があることを示した. また, 多くの寄り廻り波による被災は, エルニーニョからラニーニャ現象もしくはラニーニャからエルニーニョ現象への遷移期間辺りで発生している. このような遷移期の異常気象まで考慮した気候のゆらぎに対する適

応策を検討することは容易ではなさそうであるが, 近未来気候予測シミュレーションでこれがどの程度可能になるのかは興味深い.

2008年2月に北陸地方沿岸に来襲した高波により, 富山県~新潟県沿岸では, 越波, 海岸構造物の破壊等甚大な被害を被った. これは, 寄り廻り波と呼ばれる長周期の高波浪が高潮と重なったためである. 北陸沿岸で高波災害が引き起こされた要因は, 高潮を伴う異常波浪の来襲が直接的な原因であるが, 海岸防護の方法にも問題があると考えられる.

日本海における海岸構造物や海浜への卓越外力は冬季季節風による波浪と見なされている. 設計波の波向き, 周期, 波高が地域毎に設定され, これを基に万全な海岸防護対策が立てられているが, 寄り廻り波のように, 波向き, 周期が想定値より異なった波浪が来襲した場合には, 想像以上の災害が発生している. このようなタイプの異常波浪は, 頻発期とそうでない時期に周期性があるので, 安全な時期には防護策が片手落ちになることがある. 日本海の緩傾斜護岸はその典型的な例で, 波形勾配の急な冬季風浪に対しては, 護岸としての機能を果たすが, 長周期波浪に対しては危険なこともある. もし, 高潮とともに寄り廻り波が来襲するような場合には, 緩傾斜護岸単一の防護策は危険である. このことを示すため, 長周期の波浪が来襲したときの越波量に及ぼす護岸法面勾配の影響について, 数値シミュレーションを行った. シミュレーションモデルには (財) 沿岸開発技術研究センターで開発されたCADMAS-SURF Ver.4.0を用いた. 対象とする地形は海底勾配1:10の一樣傾斜海浜であり, 水深20mからは一定水深にしている. 対象とする護岸は法先水深0mおよび天端高3mであり, 護岸前面の法面勾配は1:5, 1:3, 1:1, および直立の4ケースとする. また入射波浪の条件は, 波高5および6m, 周期12sの規則波である. 図-4に越波シミュレーション結果の一例として, 法面勾配1:5の緩傾斜護岸および直立護岸の結果を示す. 緩傾斜護岸の場合には, 護岸前面の斜面上で碎波した波浪はそのまま緩傾斜護岸の法面を遡上して越波する. 一方, 直立護岸の場合には, 護岸の前面で高く打ち上がるが越波量自体は少なくなっている. 図-5は, 護岸の法面勾配と越波量の関係を示したものである. 越波量は法面勾配が緩やかになるほど大きくなり, 勾配1:5の緩傾斜護岸では4倍以上の越波量になる.

日本海側の海岸においても, 2008年2月の異常海象 (高潮+寄り廻り波) の発生を想定すれば, 緩傾斜護岸だけで防御することは危険であり, 海岸侵食制御, 海浜整備, 消波構造物との併用による適切な対策が必要である. このことは誰もが認識していることではあるが, 1980年からのラニーニャ卓越期 (北西太平洋の気候変動

が緩やかな期間)に、このような異常海象の発生頻度が低下していたために見逃されていたと思われる。次の位相に入ってから注意が必要である。

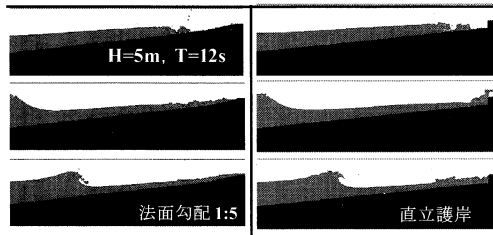


図-4 越波のシミュレーション結果の一例

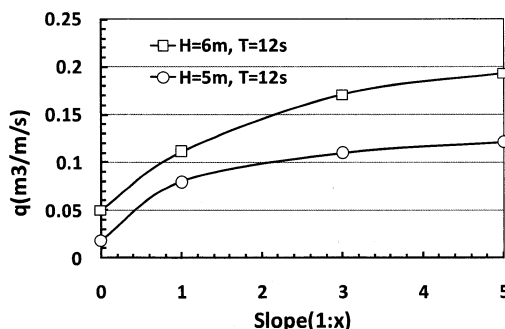


図-5 法面勾配と越波量の関係

(2) 高潮・高波に対する適応策のあり方

前節の気候のゆらぎから予想されるように、特に2013年以降は、発達した温帯低気圧、大型上陸台風が頻発することを想定し、高潮危険地域に対する対策の重要性は当然のことながら、日本海、瀬戸内海における高潮・高波への適用策を、海浜整備、河川防災と連携して、重点的に実施することが肝要である。単一の対策は効果を発揮しただけでなく、危険性を増大させることもある。

(3) 漂砂制御への適応策のあり方

2008年の寄り廻り波災害の反省から、漂砂制御は高潮・高波対策と連携して実施されるべきである。特に、碎波帯外での広域漂砂にも配慮した海浜保全がなされるべきである。波浪外力絶対の視点から早く脱却して、広域海浜流、広域漂砂、高潮、陸棚セイシュを考慮した海浜の総合的な保全対策が重要である。気候のゆらぎによる災害外力の変動特性から予想される、今後30年間の海岸外力の増加を考慮した重点的な適応策が必要である。

4. 結 語

本論文で強調したい点を要約すると以下のようなものである。指数関数的に変化する気候変動のトレンド以上に、海岸防災や保全を考える場合にはゆらぎに着目する必要がある。

このゆらぎは、周期特性を持つMEIの南方振動、太陽活動と火山噴火および気候変動のトレンドでは記述できる。特に、南方振動と太陽活動は寄与率も高く、ある程度の予測も可能である。このような観点から、過去の(1950年以降)の変動データを見てみると、数年周期の変動以外にも、約30年周期の変動があり、これが我が国に来襲する台風、発達した温帯低気圧の発生頻度にも関係しているようである。解析的な検討は今後行う必要があるが、気候のゆらぎの定性的な検討の結果から、1950年以前～1980年の期間と1980年～現在までの期間に、台風、発達低気圧の来襲特性に明確な相違があることがわかる。さらに、これは北大西洋地域の気候とは逆の傾向にある。MEIとNAO指標の逆転がこれを物語っている。これらのことから、今後30年程度の期間に、1950年以前～1980年の台風、発達低気圧の再来が懸念される。これは海岸防災にとって大きな警鐘となる。災害外力が弱かったと推定される1980年以降の対応で海岸保全を考えては危険である。気候変動のトレンドを基盤とした海岸保全の議論に加え、30年程度のゆらぎを考慮した適用策の検討が必要である。

本研究では、台風上陸数に関しては気象庁のHP、太陽活動のデータには、はまぎんこども宇宙科学館/(財)横浜青少年育成協会のHPを活用させていただいた。関係者に対して謝意を表明する。なお、本研究は、科学研究費基盤研究(B)(No.183101128, およびNo.18404003)の研究成果の一部である。

参 考 文 献

- Christy, J.R., W.B. Norris, R.W. Spencer, and J.J. Hnilo (2007): Tropospheric temperature change since 1979 from tropical radiosonde and satellite measurements, J. Geophys. Res. 112, D06102.
- Douglas, D.H. and B.D. Clader (2002): Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance, Geophys. Res. Letters, Vol.29, No.16, pp.33-1 - 44-4.
- NASS Goddard Institute for Space Studies (GISS) HP: <http://data.giss.nasa.gov/modelforce/stratatr/>.
- NOAA Earth System Research Laboratory (ESRL) HP: <http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/>.
- NOAA National Geophysical Data Center (NGDC) HP: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/getdata.html>.
- North Atlantic Oscillation (NAO) HP: <http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/>.
- National Space Science & Technology Center (NSSTC): <http://vortex.nsstc.uah.edu/>.
- Yoshimura, H. (1979): Solar-cycle period-amplitude relation as evidence of hysteresis of the solar-cycle nonlinear magnetic oscillation and the long-term (55 year) cyclic modulation, Astrophys. J., Vol.227, Issue 3, pp.1047-1058.
- Woods, T.N. and J. Lean (2007): Anticipating the Next Decade of Sun-Earth System Variations, EOS, Vol.88, No.44.
- Wolter, K. and M.S. Timlin (1993): Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index, In Proceeding of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, Oklahoma, pp.52-57.
- Wolter, K. and M.S. Timlin (1998): Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/1998 rank?, Weather, Vol.53, No.9, pp.315-324.