

日本周辺における対流有効位置エネルギーの 1948～2024 年の長期変化傾向に関する研究

広島工業大学大学院 工学系研究科 環境学専攻 ME24008 竹内 凧人 指導教員 内藤 望 教授
キーワード: 大気不安定度, JRA-3Q, CAPE, 長期変化傾向

1. 研究背景・目的

近年の地球温暖化の進行に伴い、短時間強雨や集中豪雨の頻発化が懸念されている。大雨の発生には、水蒸気の供給増大に加え、対流しやすいかどうかを決める大気不安定度／不安定度が重要な役割を果たしている。大気不安定度指標の多くは特定の等圧面データのみからの算出である点に難があるため、本研究では、鉛直方向に連続して評価できる対流有効位置エネルギー (Convective Available Potential Energy) を採用して、その長期変化傾向を調べる。先行研究として CAPE の長期変化傾向を調べた例¹⁾はあるが、解析期間が 1958～2001 年の 44 年間であり、本研究では最新かつさらに長期間のデータをもとに日本周辺を詳しく解析することを目的とする。

2. 研究方法

2.1 使用データ

気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) データセットを用いて、1948～2024 年の 77 年間の JST3 時、9 時、15 時、21 時を解析する。JRA-3Q は全球のデータセットであるが、本研究では日本周辺 (北緯 23.75°～45°、東経 122.5°～153.75°) を解析対象範囲とし、緯度経度とも解像度 1.25° の地表面解析値における気圧、気温、相対湿度と 1000～100hPa の 27 層の等圧面解析値における等圧面高度、気温、相対湿度、そして海面境界条件の海面水温のデータを使用した。

JRA-3Q は、過去の客観解析データを統一的手法に基づいて再解析したデータセットである。客観解析データとは、利用可能な気象観測データから大気に対する各種の方程式系を満たすように格子状の気象データを新たに構築したもので、再解析とは過去のデータ品質と現在のデータ品質を均質にするため、過去の様々なデータを収集して高品質なものに再処理したものである。

2.2 対流有効位置エネルギー (CAPE)

図 1 中に、実際の大気の気温鉛直分布を示す状態曲線と、地上の空気塊を強制的に上昇させた場合の気温変化を示す線の 2 本の線が描かれている。後者は、露点に達する持ち上げ凝結高度に達するまでは乾燥断熱減率に従い、それ以上の高度では湿潤断熱減率に従って、気温低下していく。この時、上昇空気塊ははじめ状態曲線より低温、すなわち周囲の空気より高密度のために下方へ戻そうとする復元力が働く。この復元力に逆らって上昇させるための外力がなければ上昇流は存在できない。ところが、自由対流高度において周囲の気温と逆転し、それより上では周囲の空気より上昇空気塊の方が高温低密度となって、外力がなくても浮力が生じて上昇が続くことになる。そして再び気温が逆転する雲頂高度までは上昇流が継続する。自由対流高度まで達した空気塊が雲頂高度まで上昇する対流現象を促すエネルギーは図 1 中の赤斜線部分の面積に対応し、これが CAPE である。

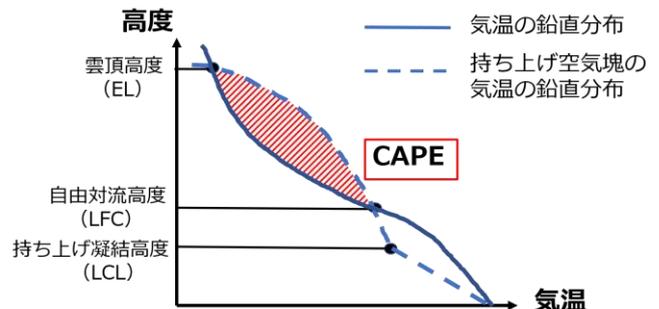


図 1. CAPE の概念図。

本研究では、Python 上での気象系の計算ライブラリである Metpy を利用して CAPE を式 1 で算出した。

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}} dz \quad (1)$$

g : 重力加速度 ($m\ s^{-2}$) , EL : 雲頂高度 (m) , LFC : 自由対流高度 (m) ,
 T_{vp} : 持ち上げた空気塊の仮気温 (K) , T_{ve} : 周囲の仮気温 (K) , z : 高度 (m)

ここで「仮温度」とは、空気中に含まれる水蒸気量の差異が空気密度や気体定数に及ぼす影響を考慮して、同圧同密度の乾燥空気が持つ仮想的な温度を意味し、式 2 で計算できる。この仮温度の導入により水蒸気の及ぼす効果をより正確に反映できる。

$$T_v = T(1 + 0.61 w) \quad (2)$$

T_v : 仮温度 (K) , w : 混合比 ($kg\ kg^{-1}$) , T : 気温 (K)

2.3 Mann-Kendall 検定と Sen's slope 推定

Mann-Kendall 検定とは、時系列データに増加または減少傾向が統計的に有意に存在するかを調べる検定法の一つで、データの値の大小関係のみを用いるので、正規分布に従わない場合も検定できる特性を持つ。降水や降雪、気温の長期トレンド解析等で使われており、有用性が認められている²⁾。計算手順は、時系列データに対して前後のデータの大小関係を全ての 2 項組み合わせで調べ、増/減のどちらが多いかを判定する。

Mann-Kendall 検定が増減傾向の有無の有意性を検定するのに対して、Sen's slope は変化傾向の大きさを推定する手法で、セットで用いられることが多い。一般的なトレンド解析では最小二乗法による線形近似を用いるが、少数の極端な値に左右されやすい。CAPE は分散が大きいので、極端値の影響を受けにくい Sen's slope 推定を用いてトレンド解析を行った。具体的には、時系列データの全ての 2 項組み合わせについて、時間変化に対する傾きを算出し、その中央値を求める手法である。

3. 結果と考察

3.1 CAPE 計算の検証

本研究における CAPE 計算の検証として、竜巻や突風の発生時に気象庁が公開している最寄りの高層気象観測データ³⁾から選定した 10 事例に対し、気象庁による CAPE 値と比較した。その結果、十分に良好な対応を示した。

3.2 CAPE の長期トレンド解析

図 2 に Sen's slope 推定、図 3 に最小二乗法の線形近似によるトレンド分布を示す。どちらの図も、沖縄近海から日本の南方太平洋沖合海域において CAPE 値が減少する安定化傾向、日本列島に沿った太平洋側および日本海側の沿岸海域においては CAPE 値が増大する不安定化傾向が示されたが、日本列島の陸域では変化傾向が不明瞭であった。また、Sen's slope 推定よりも最小二乗法の線形近似でトレンド推定した方が日本の沿岸海域の不安定化傾向が強くなった。

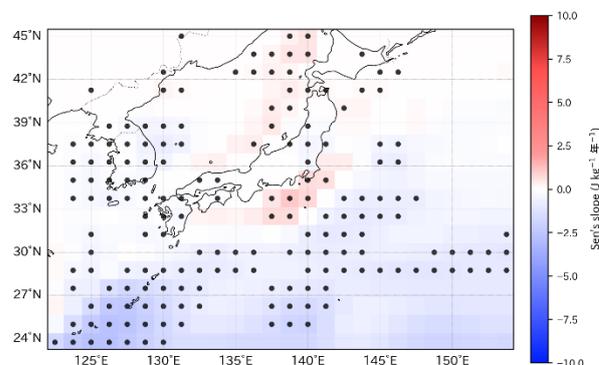


図 2. Sen's slope 推定による 77 年間の CAPE のトレンド分布 ($J\ kg^{-1}\ 年^{-1}$).
 (●: Mann-Kendall 検定 p 値 < 0.05 , 以下同じ)

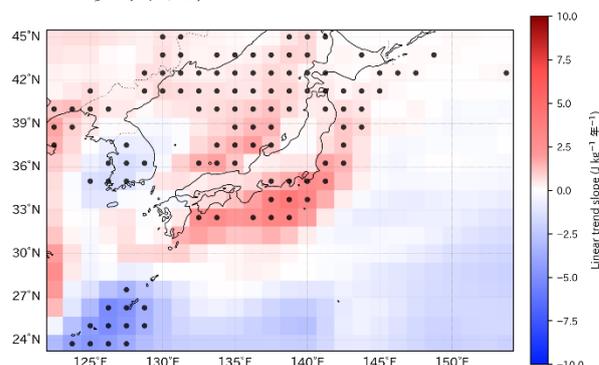


図 3. 最小二乗法の線形近似による 77 年間の CAPE のトレンド分布 ($J\ kg^{-1}\ 年^{-1}$).

3.3 トレンド推定手法の比較

CAPE の長期トレンドの検出に、Sen's slope 推定と最小二乗法の線形近似の 2 種類のトレンド解析のどちらが適しているかを調べるため、CAPE 時系列で比較を行った。比較のための地点は、図 2, 3 で安定化傾向が見られた太平洋南方海域、不安定化傾向が見られた太平洋沿岸海域と日本海沿岸海域、そして傾向が不明瞭だった本州の 4 つの地域を代表する、JRA-3Q データセット格子から 4 地点を選定した。夏季の時系列例を図 4 に示す。最小二乗法と Sen's slope 推定による 2 つの傾きはかなり近い値であったが、最小二乗法による線形近似の方がやや高くなる傾向が見られた。これは CAPE の分散が大きく、外れ値の影響をより受けたためと考えられる。よって本研究では、Sen's slope 推定の方が CAPE の長期トレンド推定に適していると判断し採用した。

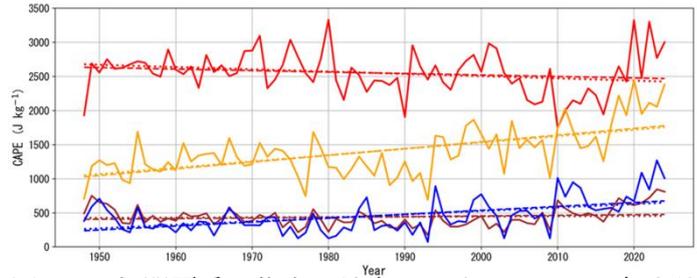


図 4. 77 年間夏季の代表 4 地点における CAPE の時系列。赤: 太平洋南方海域, 黄: 太平洋沿岸海域, 青: 日本海沿岸海域, 茶: 本州, 破線: 最小二乗法, 点線: Sen's slope 推定による回帰直線。

3.4 気温高度減率と海面水温の変化

CAPE の長期トレンドに影響を与える主要因として、対流圏内における気温高度減率の変化や海面水温の変化などが考えられる。そこで、77 年間における対流圏上層 (300 hPa) と下層 (850 hPa) の気温差 ($T_{800} - T_{300}$), および JST15 時における海面水温の長期トレンド解析を行った。その結果を、それぞれ図 5 と図 6 に示す。図 2 で安定化傾向が見られた太平洋南方海域では、図 5 において気温差が低下、つまり気温高度減率が低下する傾向を示した。この地域では対流圏下層より上層の方が温暖化が強いことを意味するが、これは熱帯において温暖化で水蒸気が増えて潜熱放出が活発化することによる影響としてよく知られる特性に合致する。また、図 2 で不安定化傾向が見られた日本の沿岸海域では、図 6 において帯状に強く海面水温の上昇が見られた。そのため、この海域で盛んに蒸発した水蒸気が大気を不安定化させている結果と考えられる。

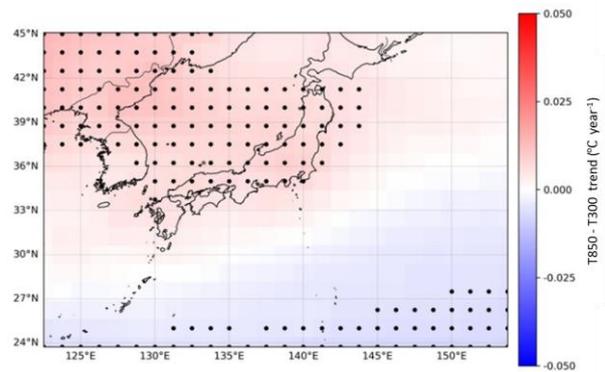


図 5. 850 hPa と 300 hPa 間の気温差における 77 年間の長期変化トレンド ($^{\circ}\text{C year}^{-1}$) 分布。

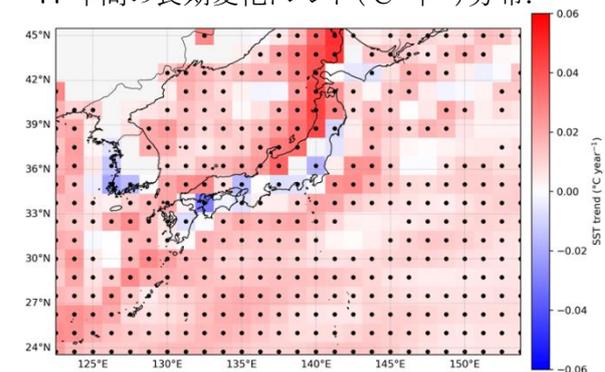


図 6. JST15 時の海面水温における 77 年間の長期変化トレンド ($^{\circ}\text{C year}^{-1}$) 分布。

3.5 各季節における CAPE の長期トレンド解析

3 ヶ月ごとの四季に分けたトレンド解析を行った。そのうち夏季と冬季の結果を図 7 に示す。太平洋南方海域における安定化傾向は四季を通じて見られ、日本の沿岸海域における不安定化傾向は夏季に顕著で、秋季や春季にも弱いながらも認められるが、冬季にはほぼ有意ではなくなる。つまり暖候期に顕著な地域特性のようである。

3.6 解析期間を分割した場合の CAPE のトレンド解析

対象期間 77 年間中のトレンド変化を検討するため、対象期間を二分割(1948~1986 年/1986~2024 年)および三分割(1948~1973 年/1974~1999 年/2000~2024 年)した解析を行った。二分割の場合の例を図 8 に示す。日本列島周辺において前半の期間は安定化傾向を示しているが、後半の期間では不安定化傾向と全く様相が異なっている。三分割した場合でも同様に、後期ほど日本列島周辺の不安定化傾向が強まる様子が明瞭に示された。地球温暖化に伴う気温上昇が 1980 年代以後に顕著となっているという時期区分にも整合し、温暖化の進行で日本近海からの水蒸気供給が活発化している影響ではないかと考えられる。

4. まとめ

日本周辺の 1948~2024 年 77 年間にわたる CAPE の長期変化傾向は、太平洋南方海域において CAPE 値が減少する安定化傾向がみられた一方、日本の沿岸海域においては CAPE 値が増大する不安定化傾向が検出された。このうち、安定化傾向を示した太平洋南方海域では対流圏内の気温高度減率の低下傾向、不安定化傾向を示した日本の沿岸海域では海面水温の他海域よりも強い昇温傾向が、それぞれ確認できた。つまり、低緯度の南方太平洋上では対流圏上層の強い温暖化の影響によって大気が安定化する一方、日本周辺では海面からの水蒸気供給が活発化することにより大気不安定化が進行している。特に、対象期間の初期から後期になるほど日本列島周辺の不安定化傾向が強まっており、近年の地球温暖化の顕在化に伴う影響と考えられる。今後も温暖化の進行に伴って、日本周辺の大気がさらに不安定化し、豪雨災害が激甚化しかねないことが危惧される。

引用文献, 引用 URL

- 1) Riemann-Campe, K., K. Fraedrich, F. Lunkeit: Global climatology of Convective Available Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis. Atmospheric Research, 93, 534-545. (2009)
- 2) 徐宗学, 竹内邦良, 石平博: 日本の平均気温・降水量時系列におけるジャンプ及びトレンドに関する研究. 水工学論文集, 46, 121-126. (2002)
- 3) 気象庁: 竜巻等の突風の顕著な事例(過去の主な事例).

https://www.data.jma.go.jp/stats/data/bosai/tornado/special/special_history.html (2026 年 2 月 18 日確認)

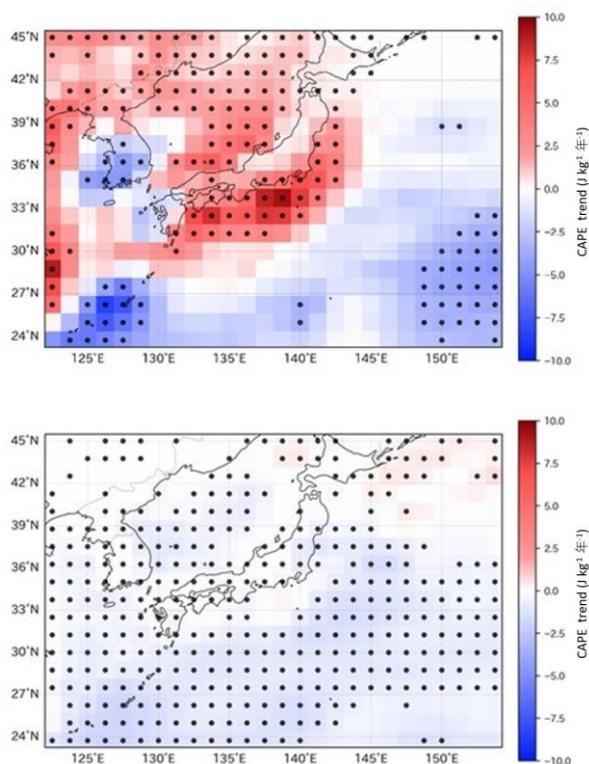


図 7. 77 年間季節別の CAPE の長期変化トレンド ($J kg^{-1} 年^{-1}$) 分布。
上: 夏季(6~8 月), 下: 冬季(12~2 月)

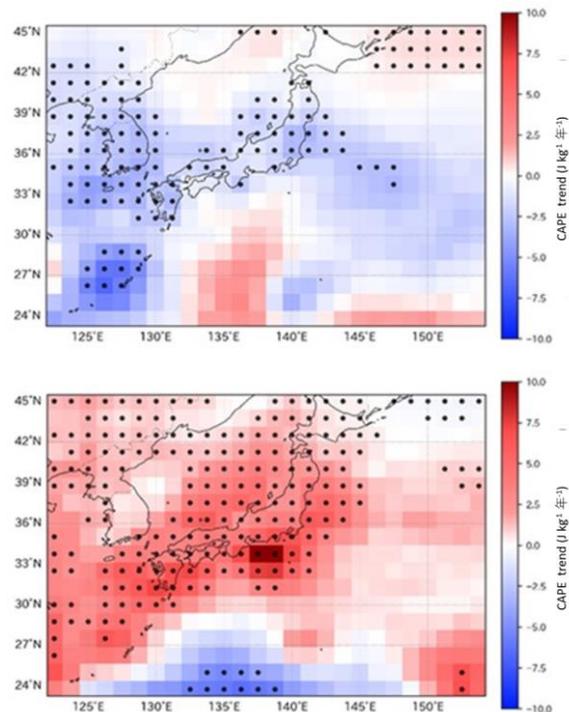


図 8. 解析期間を二分割した場合の CAPE の長期変化トレンド ($J kg^{-1} 年^{-1}$) 分布。
上: 1948~1986 年, 下: 1986~2024 年