

第 3 世代波浪推算モデル WAVEWATCH III の適用性の検証

新谷哲也*・梅山元彦**・小野田祐一***

第 3 世代波浪推算モデル WAM の性能拡張版である WAVEWATCH III の再現性検証を目的としてテスト計算及び実海域を想定した波浪追算を行った。まず、テスト計算として単純矩形水域における計算を行い、その結果を第 1 世代波浪推算モデルである Wilson 法の結果と比較した。次に、精度検証のために 2004 年 10 月に本州に上陸した台風 23 号を対象として波浪追算を行い、得られた結果と現地観測結果とを比較した。その結果、WAVEWATCH III は、単純矩形水域における有義波高・周期の発達過程が Wilson 法で得られた結果と良好な一致を示し、実際の台風を用いた波浪追算では、現地観測の結果をほぼ合理的に再現できることがわかった。

1. 緒 言

2004 年は、過去の平均台風上陸数 2.6 個を大幅に上回る観測史上最多の計 10 個の台風が日本に上陸し、全国各地に甚大な被害をもたらした。地球規模の気象変動が注目されている現在、高潮及び高波被害予測手法の高精度化への期待は非常に高まってきており、数値的手法によって波のエネルギー平衡方程式等の基礎方程式を解く第 3 世代波浪推算モデルが開発され、改良されている。この数値モデルの初期のものとしては WAMDI group (1988) によって開発された WAM があり、その後、極浅海域への拡張版として SWAN がデルフト工科大学で、グローバルウェーブモデルの性能拡張版である WAVEWATCH III (以下、WW3) が米国海洋大気局 (NOAA) と国際環境予報庁 (NCEP) の協力で開発された。これまで、国内では SWAN を用いた検証的研究 (例えば、間瀬ら (2001)、小林ら (2003)) は数多く行われ、様々な条件下での適用が検討されてきているが、WW3 を用いた研究はほとんどない。Padilla-Hernandez ら (2004) は、北大西洋の Maine 湾における波浪追算において WAM と SWAN や WW3 と SWAN の組み合わせ (nesting) による計算結果よりも、WW3 だけによるものの方が現地観測結果を最も良く再現できると報告しており、WW3 の碎波帯外での波浪予測に対する有用性を明らかにした。今後、日本への上陸頻度が増すかもしれない台風に対応した波浪推算やその追算を行う上で、世界的に広く用いられているグローバルウェーブモデルの特徴及び日本周辺海域への適用性を把握しておくことは非常に重要であるとともに、海岸構造物の設計には欠かせない沖波の推算のために有用な手法となるものと考えられる。

そこで、本研究では、まず単純な一様水深の矩形水域での WW3 の再現性を検証するために第 1 世代の波浪推算モデルである Wilson 法と同一条件で波高及び周期の比較を行った。そして、昨年日本に上陸した台風のなかで最大となった台風 23 号 (TOKAGE) を対象として波浪追算を行い、日本各地で得られた現地波浪データと比較することで WW3 の実海域における再現性を確かめた。

2. WW3 の基礎理論と台風の風域モデル

WAVEWATCH は、WAM の性能拡張版として Tolman によって開発が続けられている第 3 世代波浪推算モデルである。WAVEWATCH I (1989, 1991)、WAVEWATCH II (1992) へと改良され、現在の最新版は WW3 version 2.22 である。本研究では、この最新版を用いて推算・追算を行った。また、WW3 に用いられている物理モデルの詳細、離散化手法等については、ユーザーマニュアル (Tolman, 2002) 及びその参考文献を参照されたい。

(1) 基礎理論

WW3 は、SWAN と同様に周波数、方向、空間座標の 4 独立変数の関数である波作用量 (Wave action density) N の平衡方程式を解くことによって、2 次元平面上の波浪の時間変化を計算する。デカルト座標系では、波作用量の平衡方程式は以下になる。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial k} kN + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma} \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{x} = c_g + U \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 k は波数、 θ は波向き、 S は生成項、 σ は相対角周波数、 c_g は群速度ベクトル、 U は水深・時間平均流速、

* 正会員 修(工) 首都大学助手都市環境学部
** 正会員 Ph.D. 首都大学教授都市環境学部
*** 非会員 (株) エスピーック

d は平均水深, s と m はそれぞれ波向き及びそれに直行する座標, そして k は波数ベクトルである. また, 生成項 S は, 次式に示すように4つの独立した項からなる.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, S_{in} は風と波の干渉項, S_{nl} は波と波の非線形干渉項, S_{ds} は散逸項, そして S_{bot} は波と海底の干渉項 (摩擦) である. WW3では, これらの項に対して様々なモデルが準備されており, その中から一つを選択して計算を行うことができる. 本計算では, S_{in} と S_{ds} に対しては, Tolman and Chalikov (1996) の生成項パッケージを用い, S_{nl} には Discrete interaction approximation (DIA), S_{bot} には JONSWAP 底面摩擦公式を用いた.

(2) WW3の適用範囲と特徴

WW3は, SWANと異なり3波共鳴と水深で規定される碎波の効果が考慮されていない. それゆえ, 最小グリッドスケールとして1~10 km程度, そして碎波帯の外側を適用範囲としている. 移流項の離散化に関して, WAMモデルでは1次精度風上差分, SWANでは2次オーダーの風上差分が用いられている. 一方, WW3では, 3次精度であり, 単調性が補償されている ULTIMATE-QUICKEST スキーム (Leonard, 1991) が用いられている. WW3では, 1次精度風上差分と ULTIMATE-QUICKEST スキームが選択できるようになっており, 本研究ではこれらのスキーム選択による結果の差異についても検討を行う.

(3) 台風の風域計算

台風モデルとしては, Myers のモデルを用いた. Myers のモデルによる気圧分布は以下の式で与えられる.

$$p(r) = P_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで, r は台風中心からの距離, $p(r)$ は r 地点における気圧, P_c は台風の中心気圧, Δp は台風の中心の気圧低下量, r_0 は台風中心から傾度風速が最大となる地点までの距離である. 台風内の風速 U は, 以下の式を用いて各計算グリッド上の風速を求めた. また, 台風の移動に伴う風域場の内挿には線形補完を選択した.

$$U = \sqrt{U_1(r)^2 + U_2(r)^2 - 2U_1(r)U_2(r) \cos(\pi - \alpha - \theta)} \dots\dots\dots (7)$$

式(7)において, $U_1(r)$ と $U_2(r)$ は次式で与えられる.

$$U_1(r) = C_1 \left(\sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} e^{-\frac{r_0}{r}} - \frac{rf}{2}} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$U_2(r) = C_2 \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V \dots\dots\dots (9)$$

ここで, α は風向が等圧線となす角度, θ は台風中心から対象とする地点へ方向と台風の進行と直角方向のなす角, C_1 と C_2 は定数 ($C_1 = C_2 = 0.7$), f はコリオリの係

数, ρ_a は空気密度, V は台風の移動速度である.

3. テスト計算

(1) 計算条件

WW3の計算結果の検証を行うために図-1に示すような単純矩形領域におけるテスト計算を行った. この矩形領域の規模・分割条件及び使用した台風 (台風23号規模を想定) の条件を表-1に示す. Wilson法では, 式(7)で時々刻々得られる風速を対象地点において3時間平均した値を入力とし, 3時間毎に有義波高・周期を求めた.

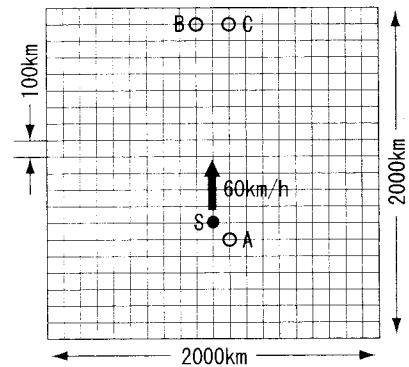


図-1 テスト計算領域

表-1 テスト計算条件

計算領域	2000 km × 2000 km
格子間隔	100 km
格子数	21 × 21
時間間隔	15分
水深	深海 (一様)
方向分割数	24
周波数分割数	25
中心気圧	940 hPa
進行速度	真北へ60 km/h

(2) Wilson法との比較

図-2は, 図-1のグリッド上S地点に中心を持つ台風が停止している場合 (stationary) と台風がS地点から真北に時速60 kmで移動する場合 (moving) のA地点における有義波高の発達・減衰過程を示したものである. 実線と破線がWW3による結果を表し, 白丸と黒丸がWilson法による結果を示している. 台風が停止している場合には, 両手法の結果ともに計算開始15時間後まで有義波高は徐々に増加して, その後は有義波高がほぼ一定となる傾向 (定常状態) を示しており, 両手法に良好な一致が見受けられる. 一方, 台風が一定速度で移動す

る場合では、両結果とも6時間後付近で有義波高の最大値を記録し、その後風域の移動に伴って有義波高が徐々に減少する。しかしながら、このケースではWW3よりもWilson法の方が有義波高の減少が大きく現れた。Wilson法では3時間毎に風域を平均して計算しているため、風域が定常状態の場合の方が一致が良好であることは納得できる。

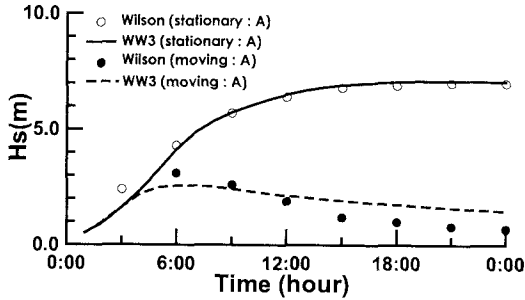


図-2 台風が停止・移動した場合の比較

次に、台風が徐々に接近してくる地点における両手法の結果を考察する。計測地点として図-1に示すような可航半円内 (B点) と危険半円内 (C点) の2カ所を選んだ。図-3は、B、C点における有義波高の時間変化を示している。WW3の結果では、可航半径及び危険半円内ともに計算開始8時間後までほぼ同様に有義波高が増加している。その後、危険半円内における有義波高が可航半円内における有義波高よりも1.5倍程度にまでなっている。また、危険半円内での有義波高が最大値を示す時間は、可航半円内で最大値を示す時間よりも3時間ほど早く訪れていることがわかる。これらWW3の結果とWilson法の結果と比較すると、危険半円内における有義波高の変化は、Wilson法の方が増加速度が緩やかであり、最大値もWW3の示す最大値よりも2m程度小さいという結果が得られた。Wilson法の結果は、先にも述べたように風域の変化を単純化させて計算しているため、風域の時間変化が顕著な時間帯において差が生じたものと考えられる。この点を考慮すれば両者は良い一致を示しているといえる。図-4は同一の計算における有義周期の変化を示している。WW3の結果では、有義周期は、危険半円内の変化は可航半円内よりも若干周期が長くなるものの、両半円内でほぼ同様な変化を示していることがわかる。Wilson法の結果は、両半円内での有義周期の違いを多少示すもののWW3の結果とほぼ同様な変化傾向を示していることがわかる。これらの結果から、単純矩形水域におけるWW3の特徴及び幅広く用いられている第1世代モデルは良好な整合性を持つことが確認できた。

4. 台風23号の波浪追算

次に、WW3の日本付近の実海域への適用性の検証を行うために、昨年度日本に甚大な被害を及ぼした台風23号 (TOKAGE) の波浪追算を行う。図-5は、2004年10月に上陸した台風23号の経路図を示している。図中の丸印は、3時間毎の台風中心位置を示しており、気圧が低いほど大きな丸となるように描いている。台風23号は10月13日にマリアナ諸島近海で発生し、宮古島の南東で超大型で強い台風となった。10月20日12時に高知県土佐清水市に上陸して本州中部地方内陸を横断し、その後、関東地方

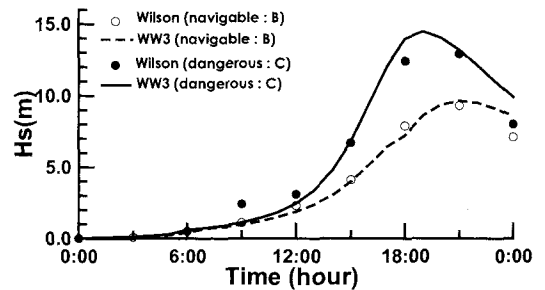


図-3 危険半円と可航半円における有義波高 (Hs) の変化

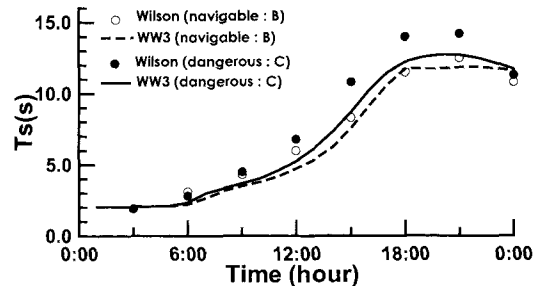


図-4 危険半円と可航半円における有義周期 (Ts) の変化

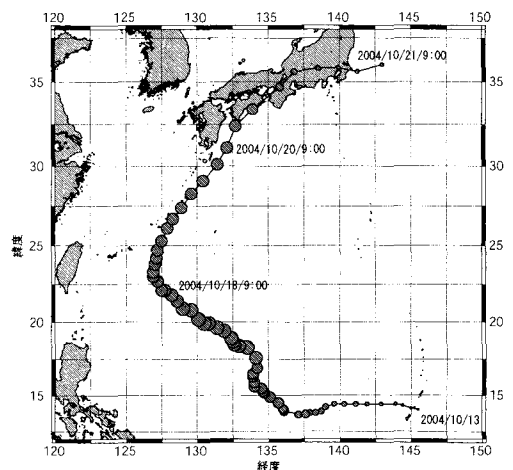


図-5 台風23号 (TOKAGE) の経路図

の東の太平洋へ抜けて温帯低気圧となった。台風23号の計算領域は $2400\text{ km} \times 3200\text{ km}$ でグリッドサイズは 25 km とし、風域の計算は台風発達時から行った。計算期間は、2004年10月13日00:00から10月21日09:00までで、計算時間間隔は15分とし1時間毎に結果を出力させた。

図-6は、19日00:00～21日09:00の期間における長崎県福江島での有義波高の比較を示したものである。白丸がブイによる観測結果を示しており、実線がWW3による計算結果を示している。福江島は台風の進路から少しはずれているために、全体的に有義波高は小さい。観測と計算結果共に20日12:00付近で有義波高がピークを示している。ピーク以前は、計算値が観測地の2倍程度過大評価されてしまっている。しかしながら、ピークでの値及びその後の波高減少は傾向が類似していることがわかる。次に、台風中心の経路上にある高知県室津にお

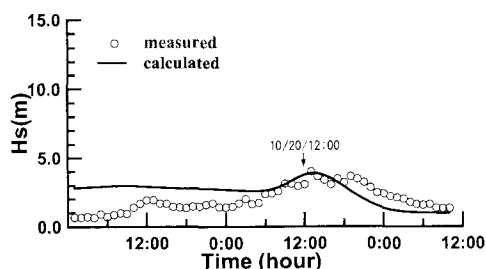


図-6 長崎県福江島における有義波高(Hs)の比較

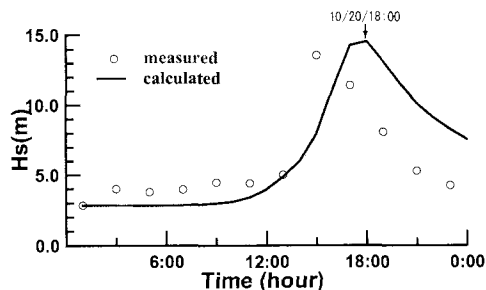


図-7 高知県室津における有義波高(Hs)の比較

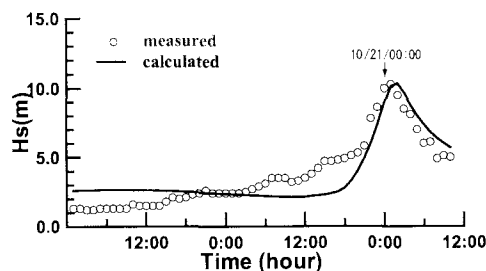


図-8 静岡県石廊崎における有義波高(Hs)の比較

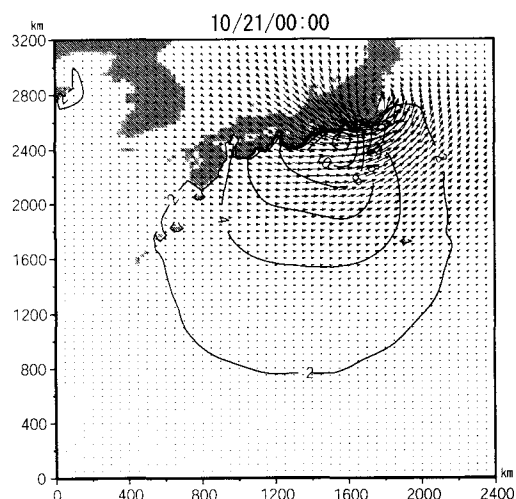
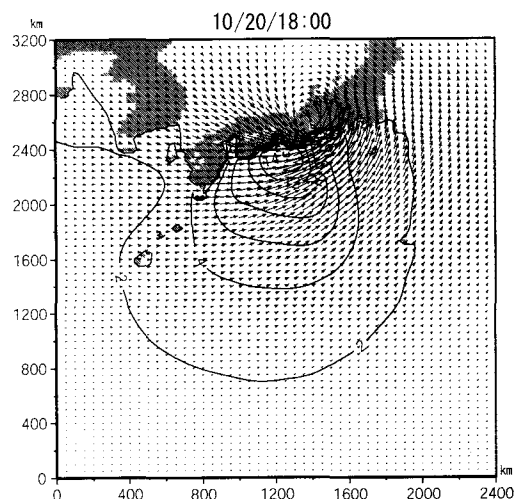
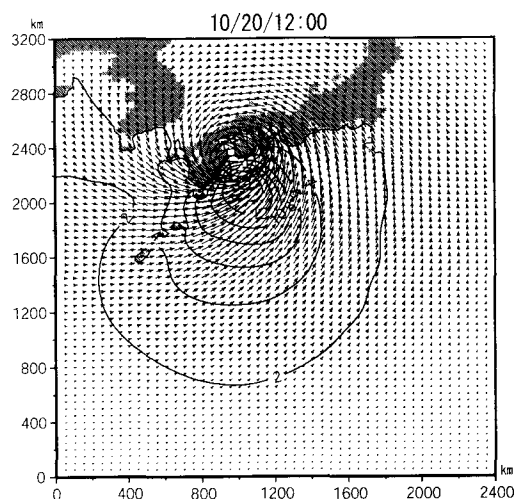


図-9 本州縦断時の風域と有義波高の空間分布

ける比較結果を図-7に示す(20日00:00~21日00:00)。この地点では、計算値と観測値で有義波高の変化傾向及び値は良好に一致しているが、有義波高がピークが3時間ほどずれてしまっている。台風の危険半円に位置する石廊崎の結果を図-8に示す(19日00:00~21日09:00)。台風接近初期の有義波高変化は、観測地が徐々に増大しているのに対し、WW3の結果はほぼ一定値を示している。これは、本計算が台風以外の風を考慮していないことが原因であると考えられる。一方、台風による風が卓越する有義波高のピーク前後では、位相及び絶対値共に良好な一致を示している。

図-9は、本州縦断時(上記の3計測点における有義波高がほぼ最大値を示した位相)における風域と波高の空間分布を示したものである。図中には、風向・風速がベクトルで示され、有義波高分布が2m間隔の等高線で示されている。有義波高は、台風の進行方向と地形の影響を強く受けながら変化していることが図から確認することができる。

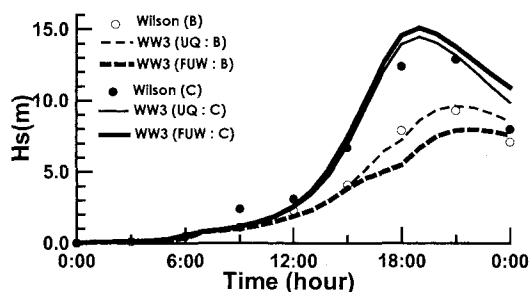


図-10 UQスキームとFUWスキームの比較(単純矩形水域)

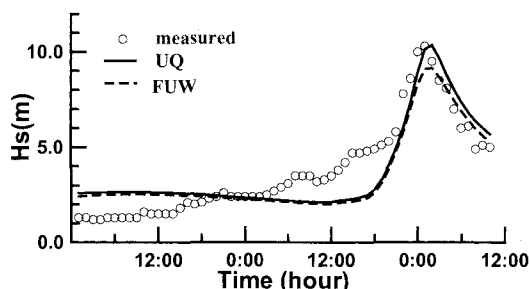


図-11 UQスキームとFUWスキームの比較(有義波高: 石廊崎)

5. 移流項差分スキームの精度検証

WW3に取り入れられている ULTIMATE-QUICK-EST (以下, UQ) スキームの精度を検証するために、前節までに行った単純矩形水域と台風23号の計算を1次精度の風上差分 (以下, FUW) を用いて再計算し、比較を行った。図-10は、単純矩形水域における両スキーム

の比較を行ったものである。図中にはFUWスキームの結果を太線で加えている。FUWスキームの結果は、UQスキームの結果に比べて有義波高が可航半円で小さく、危険半円で大きくなる結果が得られた。また、Wilson法の結果との対応関係はUQスキームの方が良好である。図-11は両計算スキームによって得られた台風23号の波浪推算結果を石廊崎の地点における有義波高と比較したものである。有義波高がピークを迎える以前はFUWスキームによる結果(破線)が若干低いものの両者はほぼ同じ値を示している。これに対して、有義波高のピーク付近では、FUWスキームはUQスキームに対して約1.5mほど小さい値を示しており、観測結果の再現性が良好ではない。この違いは数値拡散に起因しており、精度の良いUQスキームの優位性が明らかとなった。

6. 結論

本研究では、WAVEWATCH IIIの特性及び日本周辺海域への適用性を検証するためにテスト計算と実際の台風を用いた波浪推算を行った。その結果、WW3は単純矩形水域における推算結果において第1世代波浪推算モデルのWilson法と良好な一致を示すことが確認できた。また、台風23号の気圧・風域データを用いた推算では、沿岸の3ヶ所における有義波高の現地観測結果を合理的に再現できることがわかった。また、WW3に用いられている高精度差分スキームによって現地観測結果の再現性が向上していることも確認できた。

参考文献

- 小林智尚・座波慎一郎・安田孝志(2003): 波浪推算モデル SWAN による伊勢湾台風時波浪の再現, 海工論文集, 第50巻, pp. 181-185.
- 間瀬肇・平尾博樹・國富將嗣・高山知司(2001): SWANを用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検証, 海工論文集, 第48巻, pp. 236-240.
- Leonard, B. P. (1991): The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection, Comput. Methods Appl. Mech. Engng., Vol.88, pp. 17-74.
- Padilla-Hernandez, R., W. Perrie, B. Toulany, P. C. Smith, W. Zhang and S. Jimenez-Hernandez (2004): An intercomparison of modern operational wave models, 8th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Hawaii, November 14-19.
- Tolman, H. L. (2002): User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 222, 133p.
- Tolman, H. L. and D. Chalikov (1996): Source terms in a third-generation wind-wave model, J. Phys. Oceanogr., Vol.26, pp. 2497-2518.
- WAMDI group (1988): The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., Vol.18, pp. 1775-1810.