

外洋における防波堤越波・マウンド透過波に関する現地観測

興野俊也*・貝沼憲男*・青野利夫**

1. ま え が き

大水深の外洋に防波堤を建設する場合, 設計波高を越えるような高波浪時にはある程度越波を許容するような考え方によって, 防波堤の天端高さを低くして設計の合理化をすることが考えられる。防波堤の天端高さを低くすることにより, 比較的小規模の波浪でも越波の影響を受けるため, 港内静穏度の低下が懸念される。また, 越波による伝達波のほかに防波堤マウンドを透過する長周期波が存在し, 防波堤延長が港口部などに比較して長いことから, これらの波が港内の静穏度に与える影響を適切に評価する必要がある。近年, 荷役作業等に対する港内長周期波の影響が指摘され, 港口部から侵入する長周期波の特性について多くの研究がなされ, 現地観測等も頻繁に行われている (例えば, 平石ら, 1996)。しかし, マウンドから透過する長周期波に関しては, 透過率が高くなると予想されるが, ほとんどデータがなく研究も少ないのが現状である。

著者らは前回の報告 (青野ら, 1996) で, 現地での越波による伝達波の特性を検討し, 現地での伝達率の評価を試みた。しかしながら, 観測時期が比較的防波堤建設の初期だったため港湾内に開口部が多く存在し, 伝達率の算定は回折波を解析的に分離した間接的な方法をとらざるを得なかった。またマウンドを透過する長周期波については, 開口部から入射する長周期波との分離が困難であったため, 検討課題として残された。

本研究は, 防波堤によって完全に閉鎖された水域で現地観測を行い, 防波堤を越波あるいはマウンドを透過した伝達波の特性ならびに港内静穏度に与える影響について検討した結果を報告するものである。なお, 越流型モデルを用いた伝達波の計算法については, 著者らの一部によって構築され (阿部ら, 1998), 今回の観測結果と高い整合性を持つ伝達波計算法が提案されている。

2. 現 地 観 測

現地観測は, 茨城県ひたちなか市に建設中の東京電力

(株)常陸那珂火力発電所東護岸前背面の海域で行った。観測時は, 東護岸背面の領域に開口部がなく, 港内は防波堤を越波あるいはマウンドを透過する波浪以外存在しない, いわば現地に平面水槽を設置したような状況にあった。そのため, 越波による伝達波およびマウンドからの透過波の観測が直接的に行えた。また東護岸の設置水深は -18.5 m , マウンド厚さは約 5 m , ケーソン幅は 16.2 m である。観測地点は, 図-1に示すように東護岸前面に1地点 (No.1), 背後の港内側に5地点 (No.2~No.6)とした。各観測地点には, 電磁流速計付き水圧式波高計 (港内側4地点), 超音波式波高計と電磁流速計 (No.1とNo.2)を設置した。入射波観測は, 沖側防波堤の影響を受けない水深 25 m 地点に電磁流速計と超音波式波高計を設置して行った。

観測期間は平成9年3月10日~平成9年3月31日までの20日間について行った。取得されたデータには有義波高 $H_{1/3}=2.0\text{ m}$ 以上のデータが38回あり, 観測期間中の最大波高は低気圧の通過に伴って3月16日12時に発生し, $H_{\max}=4.77\text{ m}$, $H_{1/3}=3.12\text{ m}$, $T_{1/3}=8.3\text{ s}$ の波浪を観測した。相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ に関しては, 最も低いデータで 0.6 程度であり, 今回の観測では低天端時の越波観測データは取得できなかった。また観測期間を通じて波向はほとんどがE方向 (東護岸に対し垂直)であった。波浪観測は, 毎正時の前後10分間づつ20分間行い, サンプル間隔は 0.5 s とした。

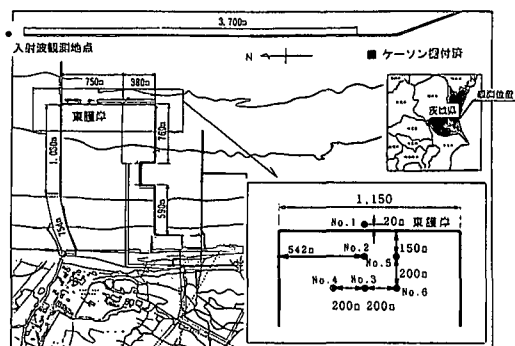


図-1 現地観測の概要

* 正会員 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ
** 正会員 工博 東亜建設工業(株)技術研究所数値解析研究室長

3. 解析方法

水面変動データは、超音波式および水圧式波高計から得られるデータを用いて算定した。水面変動は基本的に超音波式波高計からの出力を用いているが、高波浪時の水面は、砕波によって大量の気泡が発生し、超音波式波高計では欠測が多くなる。そのため、超音波式波高計で観測された水面変動から得られる波の数が、100波以下の場合、水圧式波高計から得られる水圧波形を水面波形に換算して用いた。水圧波形から水面波形への変換には水圧波の方向分散を考慮した橋本ら（1992）と同様の方法によって行い、超音波式波高計で得られた水面波形と比較して変換波形の妥当性を確認した。有義波諸元はゼロダウンクロス法により統計処理を行って算定した。

また、現地の入射波浪特性を把握するため、拡張最大エントロピー原理法（EMEP法；橋本ら，1993）による方向スペクトル解析を行い、波浪特性を検討した。

長周期波成分の分離は、周波数スペクトル計算結果をもとに周期20秒以上の波を長周期波成分として考え、FFT法により各成分波を計算し、必要な成分波のみを逆FFT法で時系列に変換して行った。

4. 越波伝達波の特性

(1) 伝達率

今回の観測では、港内側の波浪は越波あるいはマウンドを透過する波浪以外存在しない状況であり、現地での精度の高い伝達率が観測されたと考えられる。風波に関しては現地観測風速をもとに、風速10 m/sとして推算を実施し、風向が東であることを考慮すると、フェッチが400 mと短く、推算される周期は1秒程度となるため無視した。図-2は入射波高に対する各地点の波高伝達率と相対天端高（ $h_c/H_{1/3}$ ）の関係、図-3は入射波周期に対する各地点の周期伝達率 $[=T_{1/3}(\text{各地点})/T_{1/3}(\text{入射波})]$ と相対天端高（ $h_c/H_{1/3}$ ）を示したもので図中には合田の式と前回の観測結果を併せて示した。波高伝達率に関しては、今回の観測値が相対天端高（ $h_c/H_{1/3}$ ）が0.6から1.3の範囲にあったこともあり、波高伝達率は1%から10%程度であった。前回観測値との比較では、 $0.6 < h_c/H_{1/3} < 0.8$ の範囲で、今回の観測結果が若干低めになっている。これは、前回の観測時に比較して沖側防波堤の延長が延びたため、東護岸以外の地点からの越波量が低減したこと、入射波周期が短くなったこと、および方向分散性の影響と考えられる。

現地での越波による伝達率は、例えば数値モデルを作成しない場合は合田の式を用い、さらに港内での伝達率を一様にすれば、十分安全側で設計できると思われる。

周期伝達率に関しては、ばらつきはあるものの前回の

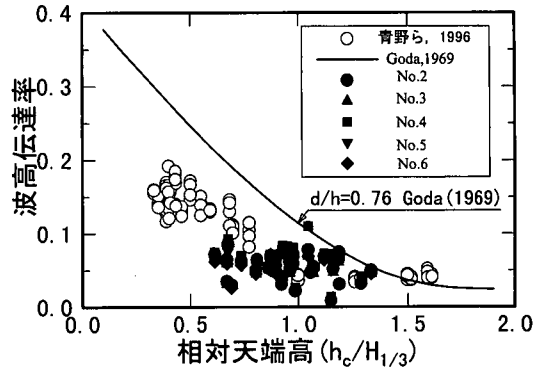


図-2 波高伝達率と相対天端の関係

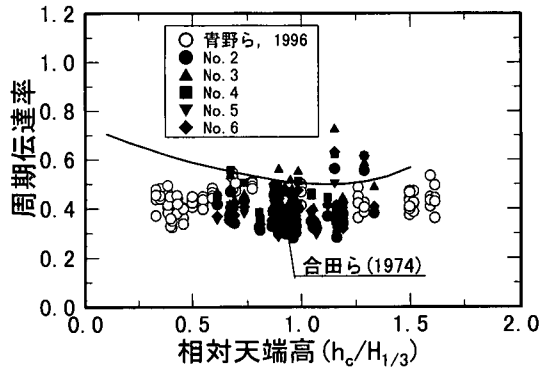


図-3 周期伝達率と相対天端の関係

観測値とほぼ同様に入射波周期の3割から6割に減少する傾向が得られた。今回の観測結果は直接観測したものであり、前回の観測で用いた平石（1994）の分離法の妥当性が確認されたことになる。この入射波周期に対する伝達周期の減少は、港内での越波伝達波の分裂現象を示しており、2次元断面実験結果と同様に越波伝達波の周期の減少が現地でも発生していることを示している。

(2) 方向分布特性

図-4は、1997年3月16日8時に観測された(a)入射波、(b)堤前波（No.1地点）、(c)港内側のNo.3地点の方向スペクトルを示したもので、入射波の諸元は $H_{\max}=4.3\text{ m}$ 、 $H_{1/3}=2.9\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=7.9\text{ s}$ である。図-4から、沖合から進行してきた波浪が入射波地点では単一ピーク分布形状を示し、護岸前面では反射波が発生し、越波した港内ではエネルギーを減衰しながら進行し、伝達波や反射波等多くの成分波が発生する状況が見られる。また、港内では越波による伝達波が多く周波数成分に分裂すること、反射や他地点での越波等によって種々の方向から波が進行していると考えられる。さらに、堤前から港内側にかけて低周波側にピーク値が存在し、マウンドを透過する長周期波成分が認められる。

図-5は、3月16日8時における波高伝達率と周期伝

達率を平面的に示したもので、図の上部が東護岸に対応し、各数字は伝達率を%表示したものである。数字の間隔は、波高計の間隔を意味する。波高伝達率に関しては、

平面的な違いはほとんどなく、ほぼ一様に分布している。周期に関しては、伝達波が進行するにしたがって長くなる傾向を示している。

5. 長周期波によるマウンド透過

マウンドを透過する波浪に関しては、倉田ら (1980)、Losada et. al (1993) による理論解析が行われている。しかし、長周期波のマウンド透過に関しては、波群拘束波と自由波の問題、マウンド内部での抵抗特性等、複雑な特性を検討する必要がある。ここでは、入射波の特性およびマウンド透過特性を検討した。

(1) 入射波の特性

入射波に含まれる長周期波成分には、波群拘束波以外に沖合での気象擾乱等で発生した自由波が含まれている。特に、太平洋などの外洋に面した港湾では自由波の比率がかなり高くなると考えられる。ここでは、入射波に含まれる波群拘束波を計算し、有義波諸元との関係を検討した。

2次の非線形干渉によって発生・発達する長周期波を、木村 (1985) の理論によって計算する。理論計算式は多方向不規則波浪場を仮定しているが、今回の観測では S_{max} が 15 以上のケースがほとんどであることから、1方向不規則波として計算を行った。図-6 は、入射波観測地点における計算結果の一例で、上から観測波浪 η 、観測長周期波 η_l 、計算から得られた理論拘束波 $\eta_{l(cal)}$ である。観測時刻は図-4 と同じである。波群に伴う長周期波のセットダウン部分で一致する部分もあるが、長周期波が全て拘束波とはなっていない。

理論拘束波と観測長周期波のエネルギー比と入射波の有義波諸元との関係を見てみる。図-7 は、入射波観測地点での理論値と観測値の長周期波成分の rms 値 η_{rms} (cal.) と η_{rms} (obs.) の比と $H_{1/3}$ との関係を示したもので、波高が高くなるに従って拘束波の比率が線形的に大きくなっているのがわかる。今回の観測では、観測波に含まれる拘束波の比率は最大で 8 割程度になっている。図中

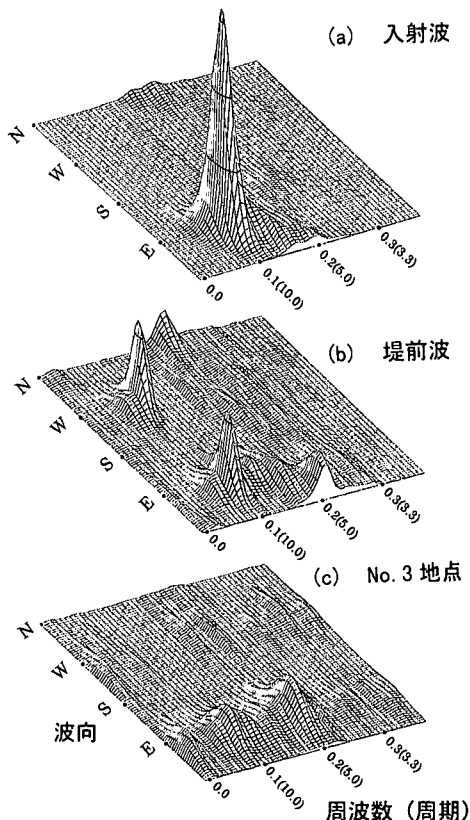


図-4 方向スペクトル解析結果 (3月16日8時)

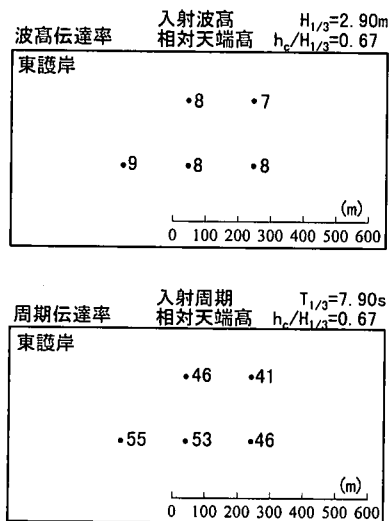


図-5 伝達率の空間分布

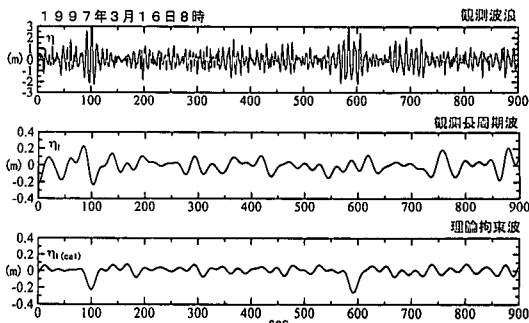


図-6 観測結果と理論拘束波の時系列

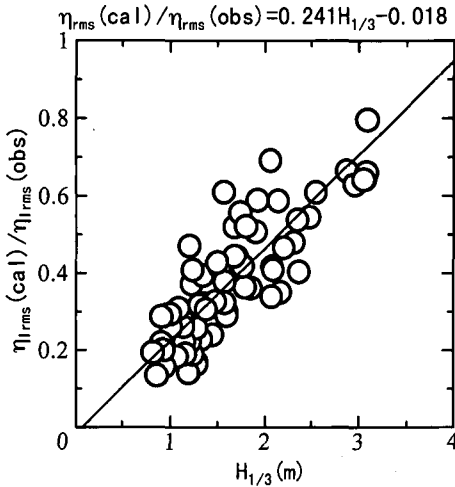


図-7 $\eta_{rms}(cal)/\eta_{rms}(obs)$ と $H_{1/3}$ の関係

の実線は、最小二乗法によって得た関係で、

$$\frac{\eta_{rms}(cal)}{\eta_{rms}} = 0.241H_{1/3} - 0.018 \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。この関係は、地域によって変化すると思われるが観測地点である常陸那珂地点では有効であり、入射波のスペクトルがわかれば長周期波の推定（拘束波、自由波のエネルギーの推定）が可能となる。また、図-7 から $H_{1/3}=1\text{ m}$ 程度の常時波浪では比率が0.2程度となり理論拘束波を用いても、長周期波の推定にはほとんど役に立たないことがわかる。

入射した長周期波は、護岸で反射および透過される。図-8は、入射波観測地点と堤前（No.1地点）での長周期波の有義波高 H_c を比較したもので、堤前での波高は、沖防波堤と東護岸との間に多重反射系が形成されるため最大で3倍程度増幅されている。

(2) マウンド透過による長周期波の伝達

マウンド内部での流水抵抗は、波動の場合、周期と波高の増大に対応して低下する。図-9は、No.2地点での

長周期波の有義波高伝達率と入射波の長周期波有義波周期 T_c との関係を示したものである。マウンド透過による波高伝達率の定義は、越波伝達率と同様入射長周期波波高と港内側の長周期波波高の比で定義されている。図-9より、No.2地点での波高伝達率は最大で0.5程度となり今回得られた越波による最大波高伝達率（0.1）の5倍程度に達する。ばらつきが大きいため、波高による違いは顕著ではないが、周期の増大に伴って伝達率は減衰する傾向にあり最大で0.2程度となる。このような傾向は、通常の波動には見られないものである。また、振動流の実験（Van Gent, 1995）によると、周期がある程度大きくなると、マウンド内での抵抗特性は変化しなくなるが、図-9の結果はこれとは異なったものとなっている。これらの原因を明らかにするため、長周期波の特徴である拘束波成分との関連を検討した。

図-7で示したように、拘束波と自由波との比が入射有義波高と比例関係にあることから、入射有義波高と波高伝達率を比較する。図-10は、長周期波成分の有義波高の伝達率と入射波波高 $H_{1/3}$ （長周期波成分を除去してある）とを比較したもので、港内側の各観測地点における波高 H_c から得られる伝達率を全て示してある。ここで特徴的なことは、入射波高の低下と共に波高伝達率が高くなることで、1 m程度の常時波浪のもとで伝達率は最大となる傾向を示し、No.2以外の観測地点では伝達率が最大で0.8に達している。

入射する長周期波で拘束波の占める比率は、図-7から入射波高に比例して大きくなる。言い換えれば、波高が高くなるに従って自由波の比率が低下することとなる。このことは、マウンドを透過する長周期波成分を、自由波のみと考えれば図-10の関係は説明される。ただし、防波堤で長周期波が反射する場合、部分反射では拘束波の一部が自由波となることが理論的に指摘されている（箕田・水口, 1997）。今回の観測でも堤前で自由波が発生する可能性があり、また今回の観測では沖防波堤に

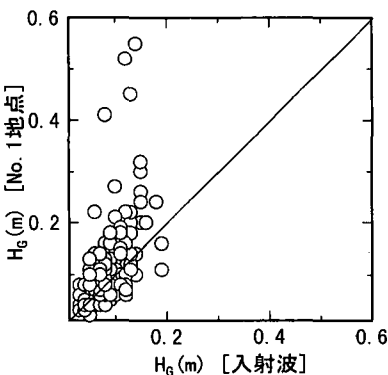


図-8 入射波観測地点と堤前での長周期波の比較

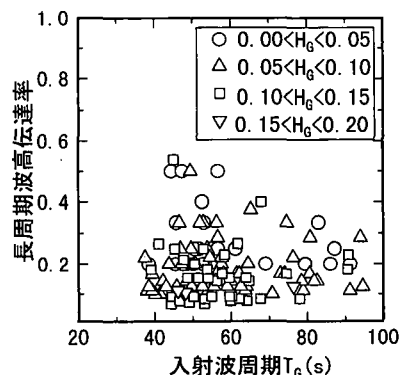
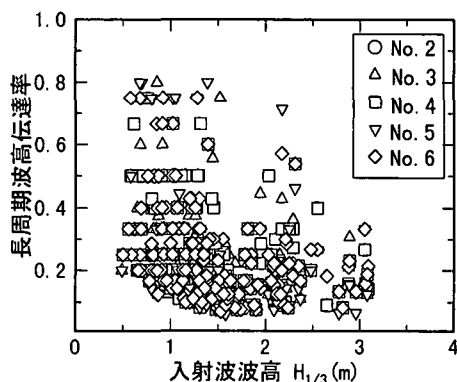
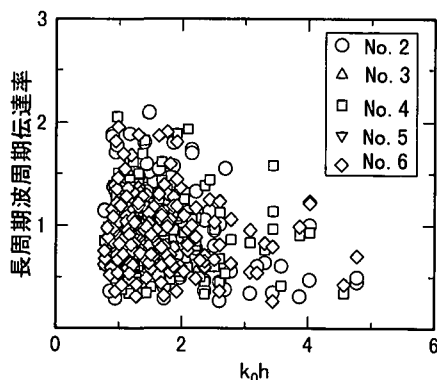


図-9 長周期波高伝達率と周期 T_c の関係（No.2地点）



図一10 長周期波高伝達率と入射波高の関係

図一11 長周期波周期伝達率と $k_0 h$ の関係

よる自由波の発生等も考えられることから、堤前では入射波に含まれる自由波(図一7)よりも多くの自由波がマウンドを透過すると考えられる。長周期波の伝達率の理論解析は、このような長周期波の成分を考慮して行う必要がある。

図一11は、長周期波の有義波周期伝達率と波動成分の $k_0 h$ (k_0 : 沖波に対する波数, h : 入射波観測地点の水深) の関係を示したもので、周期に関してもばらつきは大きい。 $k_0 h$ の増加(具体的には周期 $T_{1/3}$ の減少)に伴い伝達率が低下し、1以下の数値を示すようになる。従って、長周期波周期伝達率に関しても拘束波の影響が存在する。

これらのことから、マウンドを透過する長周期波に関しては、かなり複雑なメカニズムが存在し、入射長周期波の拘束波と自由波の分離、堤前で拘束波の挙動等を検討する必要があると思われる。

今回の観測から、長周期波の伝達に関しては入射波高1 m程度の常時波浪時に最もマウンドを透過しやすいと

り、港内静穏度を検討する上で無視できないことが明らかとなった。また、このマウンド透過に関しては開口部を有する通常の港湾では、開口部からの侵入波と重畳するためほとんど評価できないと思われる。

6. まとめ

防波堤によって完全に閉鎖された領域で現地観測を実施し、越波による伝達波とマウンドを透過する長周期波について、その特性を検討した。

防波堤から港内に侵入する波浪は、高波浪時には越波による伝達波、常時波浪時には長周期波が存在する。特に、長周期波によるマウンド透過は、 $H_{1/3}=1$ m程度の時、伝達率が最大で8割程度になり、無視できないと思われる。

参考文献

- 阿部光信・貝沼憲男・興野俊也・定森良夫 (1998): 現地観測に基づく越流型モデルを用いた伝達波計算法の検証, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 686-690.
- 青野利夫・貝沼憲男・興野俊也・金澤 剛 (1996): 低天端ケーソン堤の越波による伝達波について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 731-735.
- 木村 晃 (1985): 非線形長周期波の2次元スペクトル, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 154-158.
- 倉田克彦・巻幡敏秋・桑原正博・川野成仁 (1980): 混成堤捨石マウンドからの透過現象に関する考察, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 401-405.
- 合田良史・竹田英明 (1966): 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 87-92.
- 合田良史・鈴木康正・岸良安治 (1974): 不規則波実験とその特性について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 237-242.
- 橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・久高将信 (1992): 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算方法について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 171-175.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃・久高将信・小野修平 (1993): 方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法の拡張, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 136-140.
- 平石哲也 (1994): 多方向不規則波を用いた港内波高分布に関する模型実験手法の検討, 港研資料, No. 788, pp. 1-32.
- 平石哲也・田所篤博・藤崎秀司 (1996): 港湾で観測された長周期波の特性, 港研報告, Vol. 35, No. 3, pp. 3-36.
- 箕田博章・水口 俊 (1997): 波群の反射と長周期波, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 201-205.
- Goda, Y. (1969): Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 8, No. 3, pp. 3-18.
- Losada, I. J., R. A. Dalrymple, and M. A. Losada (1993): Water waves on crown breakwater, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean eng., Vol. 119, No. 4, pp. 367-380.
- van Gent M. R. A. (1995): Porous flow through rubble-mound material, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean eng., Vol. 121, No. 3, pp. 176-181.