

フレネル潜堤による波向・波高変更効果に関する模型実験

鈴木康正*・上原 功**・富田康大***
望月徳雄****・平石哲也*****

1. はじめに

近年、各地で海岸侵食が進み、早急で効果的な海浜安定工法の確立が望まれている。従来、海浜安定工法としては、汀線方向の砂移動の抑止を目的とした突堤群工法が多用されてきた。しかし、この工法を用いると、形成された海浜は、平面的にくし状の地形になり、人工的な突起が目立つので、天橋立などの景勝地では、景観上の問題が生じている(鈴木ら, 1995)。そこで、波の入射角を大規模な潜堤群によって、汀線と直角方向に変化させ、汀線方向の砂移動を低減し、安定で、かつ突起のない直線上の海浜を形成する工法を提案した。図-1に、本工法のイメージ図を示す。これは汀線と平行方向に三角形形状の潜堤を多数配置し、海岸に入射する波の波向を屈折効果で変化させようとするものである。潜堤群が配置された様子が、細分化した小型レンズを並べて、大きな一枚の凸レンズと同一の屈折現象を生じるフレネルレンズと機能が似ているので、“フレネル潜堤”と名付けた。

潜堤による波高減衰効果と波向変更効果を検討するために、本研究では、2種類の実験とそれらに対する数値計算を行った。1つは、潜堤による波高および波形の変化を調べるもので、水深一定の平面水槽に潜堤模型を1基のみ設置し、それに規則波を作用させ、潜堤周辺の波高・周期分布と波形変化を検討した。もう1つは、現地海岸を模擬した1/30勾配の海浜に複数の潜堤を設置し、現地における潜堤工法の適用性を調べるものである。

2. 単基潜堤周辺の波の変形

(1) 実験装置および実験条件

本実験においては、総延長28mの多方向不規則造波装置を長辺上に有する平面水槽内に、フレネル潜堤の模型を1基設置した。そして、潜堤模型に波を作用させ、波高計によって波高・波形計測を行った。水槽の他の3辺には消波工を設置している。潜堤模型は斜辺長が4.0

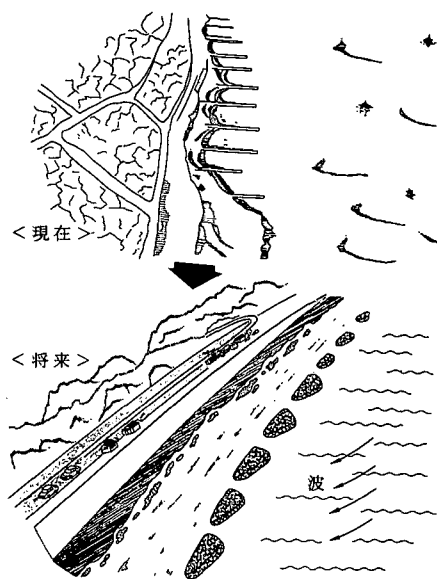


図-1 フレネル潜堤イメージ図

mで、3つの角度が 90° 、 60° 、 30° の直角三角形を底面とする、高さが0.2mの木製の三角柱で、周りを碎石で囲み、1/5の法面を持つものとした。潜堤天端は一様水深である。潜堤模型は、底面の三角形の造波板側の斜辺が、造波板面に平行で、板面より3m離れるように設置した。

図-2に波高計設置位置を示す。波高計測は1CH~8CHについてはすべての実験ケースについて行った。9CH~15CHは、代表ケースについて潜堤周辺での波高分布・波形の変化を調べるため、密に配置して計測した。

模型縮尺は1/50を想定し、水深 h は、現地スケールで12.5mと15.0mの2種類とした。したがって潜堤天端での水深 h_c はそれぞれ2.5mおよび5.0mである。入射波は一方規則波とした。入射位置での波高 H_i は1.0mと2.0m、周期 T_i は6.36s、8.49sのそれぞれ2種類とした。波向 θ_i は 30° 、 45° に変化させた。なお、波向 0° は造波板より直角方向とする。波の計測時間は1分で、潜堤幅は現地換算で200mである。

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部
** 正会員 若築建設(株) 土木本部
*** 運輸省第四港湾建設局
**** 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋環境部
***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部

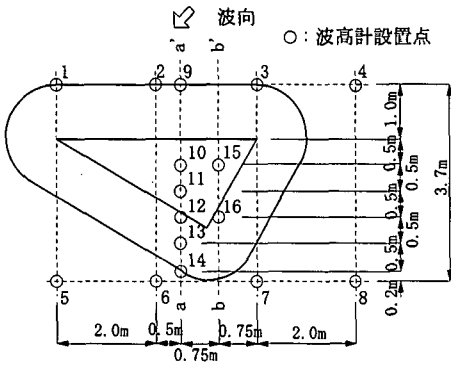


図-2 波高計の設置位置

(2) 数値計算手法

本研究では非線形性と分散性を含むブシネスク方程式を適用した。基礎方程式は、ブシネスク方程式の基本形に、摩擦項を付加したモデルを用い、また計算領域の波が計算領域外に自由に出ていく境界条件、すなわち開境界条件を実現する方法として、エネルギー吸収帯 (Cruz ら, 1993) を用いた。そのためのエネルギー減衰項 (εp , εq) も運動量方程式に付加した。水位 η と x 方向線流量 p , y 方向線流量 q を未知変数とすると、連続の式および水平二方向の運動量方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \varepsilon p + \frac{f}{D^2} p \sqrt{p^2 + q^2} \\ = \frac{1}{3} h^2 \left(\frac{\partial^3 p}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 q}{\partial x \partial y \partial t} \right) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \varepsilon q + \frac{f}{D^2} q \sqrt{p^2 + q^2} \\ = \frac{1}{3} h^2 \left(\frac{\partial^3 q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 p}{\partial x \partial y \partial t} \right) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 h は静水深、 D は全水深 ($=h+\eta$)、 f は底面摩擦係数である。今回の計算では $f=0.02$ を与えた。 ε はエネルギー吸収帯の吸収係数である。今回の計算では、 ε の分布は Cruz らが推奨した双曲線型とした。

数値計算は、水位と線流量の格子点を半分ずつずらした差分格子を用い、ADI法 (Alternating Direction Implicit Method) により数値積分した。基礎方程式の差分化の手法は Madsen・Sørensen (1992) にならった。入射境界は境界線入射法 (石井ら, 1993) により、計算領域から入射境界に向かう波が反射せずに透過するように

した。

図-3 に計算領域を示す。長方形領域外周の4辺すべてにエネルギー吸収帯を配置し、そのうちの一边から波を入射させた。入射波が斜め波であるので、潜堤周辺で一樣な波浪場になるように潜堤は計算領域の中央からずらして配置した。

(3) 実験と数値計算の結果

図-4 に波高 $H_i=2.0$ m のケースについての潜堤前面および背後の波高分布および周期分布を示す。図の縦軸は入射波で無次元化した波高および周期である。波高分布をみると、短周期のケースで波高の変化が大きいことが分かる。これは、潜堤の規模に対して相対的に波長が小さいので、潜堤での反射あるいは潜堤上での砕波変形の影響を大きく受けているためであると考えられる。周期分布をみると、短周期で、水深の深いケース以外では潜堤背後で周期が小さくなっているのが分かる。これは、潜堤上で波が分裂を起こし、それが背後に伝播しているためである。周期が長く水深の深いケースでは6CHの無次元周期が0.5に近い値を示している。これは、砕波が

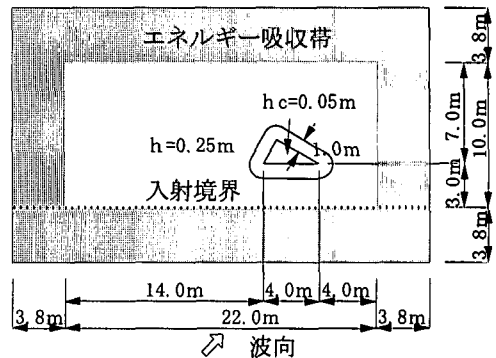


図-3 計算領域図

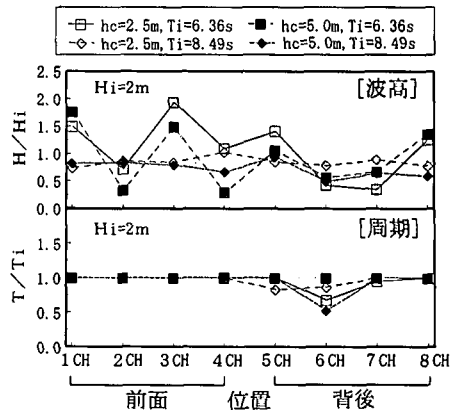


図-4 潜堤前面および背後の波高・周期分布

起こらずに、波が2つに分裂しているためと思われる。波高が $H_i=1.0$ m のケースについては波高分布は $H_i=2.0$ m の場合と同様の傾向であった。周期分布についてもほぼ同様の傾向であったが、短周期で水深の深いケースについては無次元周期が1に近い値であった。これは波高が小さいために分裂は起きても波形の谷が静水深より下がらないので、ゼロアップクロス法では一波として解析されなかったためと思われる。

図-5は波高計を密に配置して実験したケースの実験および数値計算の波高変化を、図-4の測線 a-a'、b-b'に沿って示したものである。実験条件は、水深 $h=12.5$ m (天端水深 $h_c=2.5$ m)、入射波は波向 $\theta_i=45^\circ$ 、周期 $T_i=8.49$ s、波高 $H_i=1.0$ m である。数値計算における空間格子間隔 Δs は 2.5 m、時間積分間隔 Δt は 0.170 s とした。なお、実験時の目視観測で砕波は起きていなかったため、砕波計算は行わなかった。また、線形計算との比較のため、非定常緩勾配不規則波動方程式 (窪ら, 1992) による計算結果も合わせて示した。縦軸は波高、横軸は入射側の潜堤法面の基部より 25 m 沖側のラインを 0 としたときの測点の距離である。a-a'断面の波高分布をみると、潜堤上の 11 CH と 12 CH の間で、線形計算では屈折による波の集中のために非常に波高が高くなっているのに対し、ブシネスク方程式による計算結果はあまり高い値を示さず、実験値に近いことがわかる。これは、線形計算では表現できない波の分裂等の非線形現象により波の集中が緩和されているためであると考えられる。測線 b-b'上でも、実験値とブシネスク方程式による計算値はほぼ一致し、計算モデルの妥当性が明らかになった。

図-6に各測点における時系列波形の実験および計算結果を示す。結果の比較は、図-2の測線 a-a'上の点について入射側から順にとった 4 測点と、潜堤天端上の 15 CH について示した。図の横軸は時間を入射波周期で除した無次元時間である。図の実験波形より、潜堤上で波

の分裂が起きていることがわかる。また、ブシネスク方程式による計算波形も波の分裂が表現できており、潜堤上での波形 (11 CH, 15 CH) は、ピークの出現時刻はずれているものの、実験値と比較的によく一致しているのがわかる。波形のピーク出現時刻は入射側からの距離が離れるにつれて実験値からのずれが大きくなっており、潜堤背後の 13 CH では実験値と計算値の波形の一致はあまりよくない。線形計算は波の分裂が計算できず、沖側の 9 CH を除いて、全測点で実験値と一致しない。

以上のことから、ブシネスク方程式を用いて、潜堤背後における波高および波形を推定できることがわかった。

3. 複数の潜堤による波の変形

(1) 実験装置および実験条件

本実験においては、総延長 15 m の多方向不規則波造波装置を有する平面水槽内に、海浜斜面を再現するために 1/30 勾配の斜面模型を設置し、斜面上にフレネル潜堤模型を設置した。そして潜堤模型に波を作用させて波高計測および波向変化を調べるための写真撮影を行った。図-7に造波装置、波高計、模型などの実験装置の配置を示す。斜面模型は、幅 12.6 m × 奥行き 5.4 m × 高さ 0.26 ~ 0.44 m で、造波装置から 2.0 m 離れた位置に固定した。フレネル潜堤の形状寸法は、幅 2.0 m × 奥行き 1.0 m × 高さ 0.05 ~ 0.02 m の三角形形状で、天端水深は一定で

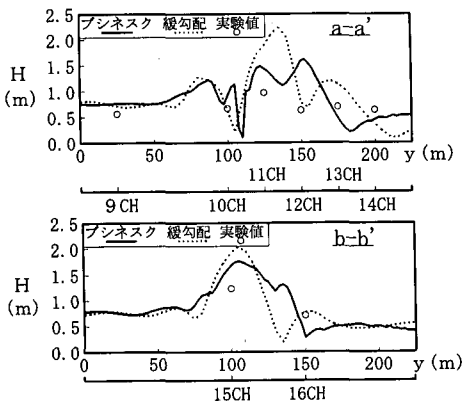


図-5 潜堤周辺における波高分布

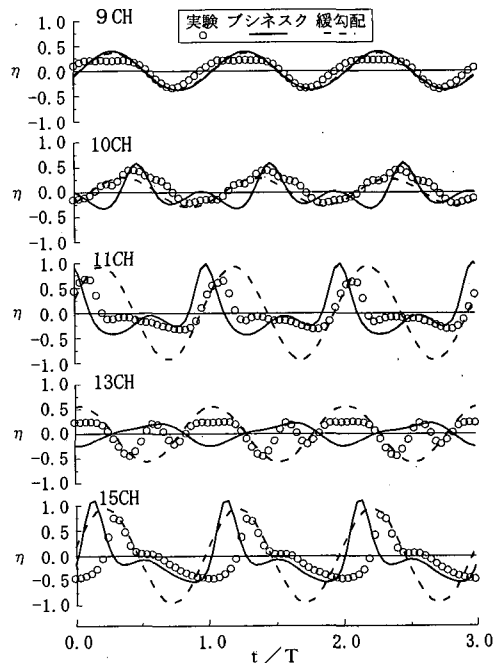


図-6 潜堤周辺の時系列波形

ある。これを斜面模型先端から3.0 m 離して4基設置した。潜堤模型は、木材で枠組みを作り斜面に固定した後、0~30 mm 程度の径の碎石で中詰めを行い天端を均した。波高計は、入射波の解析用に波高計アレイ（波高計4台）を造波機前面から1.56 m 離して設置した。また、潜堤前面および背後にそれぞれ4本ずつ設置した。写真撮影は、フレネル潜堤の真上および斜め上方から波峰線が確認できるように造波中に数回行った。

模型縮尺は1/100を想定し、水深 h は、現地スケールで造波機前面において44 mと45 mの2種類とした。潜堤天端での水深 h_c はそれぞれ2 m, 3 mである。入射波は一方方向不規則波および多方向不規則波とした。沖波の有義波高 $H_{1/3}$ は2 mとし、有義波周期 $T_{1/3}$ は8 s, 9 s, 10 sの3種類、主波向 θ_i は汀線に直角方向すなわち造波機面の法線方向に対し、時計回りに30°傾いたものとした。多方向不規則波の方向集中度 S_{max} は造波機前面で25を目標とした。実験での波の計測時間は3分30秒とした。

(2) 数値計算手法

構造物背後の波向の推定手法として、エネルギー平衡方程式を用いた場合には、方向スペクトルのピークの値はうまく表現できないが、ピークの出現する方向はほぼ精度よく表現できることが示されている(池野ら, 1994)。ここでは、フレネル潜堤による波向変更効果を予測する手法として、エネルギー平衡方程式による波浪変形計算

法を用いた。本研究において用いた計算法は、水位変動量を考慮した計算法(鈴木ら, 1994b)である。

(3) 実験および数値計算の結果と潜堤形状の改良

図-8に、天端水深 $h_c=3$ m, 有義波周期 $T_{1/3}=9$ sのケースについて、潜堤前面および背後の波高分布を示す。図の縦軸は入射波高で除した無次元波高である。図を見ると、潜堤背後で波高が小さくなっているのがわかる。特に、入射波が回り込みやすい両端の9CH, 12CHに比較して10CHと11CHの波高が小さくなっており、潜堤の効果が現れていることがわかる。実験時の目視観測では潜堤上で碎波が起きており、波高が小さくなっている原因は碎波による減衰であると考えられる。また、図から一方方向波と多方向波では、潜堤による波高減衰効果には大きな差が見られないことがわかる。

潜堤背後の主波向について、実験と比較するため、数値計算において潜堤背後の計算格子に1~10の番号を付け、この格子において主波向を計算した。潜堤の無い場合についても合わせて計算した。図-9は潜堤背後の格

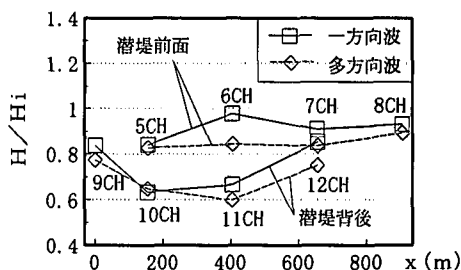


図-8 潜堤前面および背後の波高分布

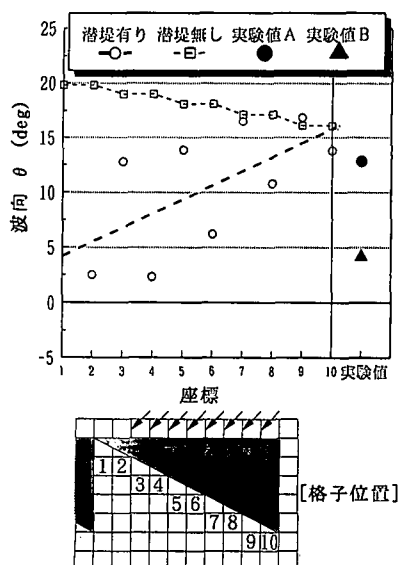


図-9 潜堤背後の波向

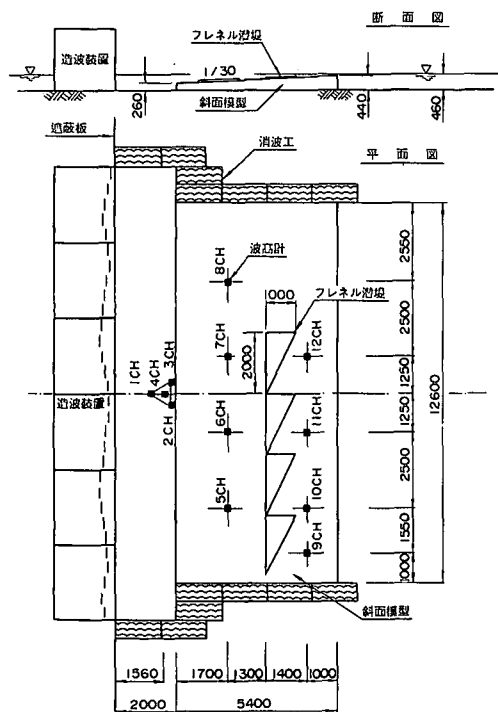


図-7 実験装置の概要

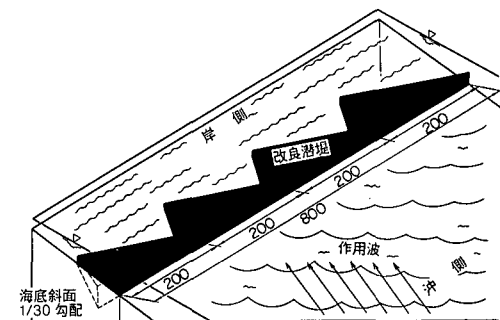
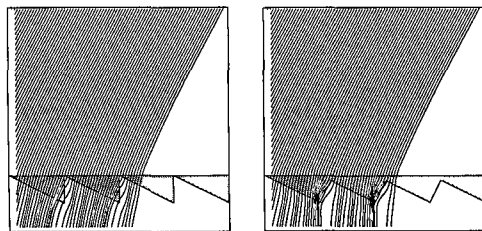


図-10 改良型潜堤



(a) フレネル潜堤

(b) 改良型潜堤

図-11 波向線の比較

子1～10における主波向の計算値を示したものである。実験値の波向は、写真解析で判断した波峰線の傾斜角から一波毎の波向を判断し、それらを平均して、平均値(実験値A)として示した。また、これらの実験波の波向の中で最も直方向に近い角度を実験値Bとして示した。図は入射波向 30° の場合の潜堤背後の波向について示している。実験値Aと実験値Bの間に計算値が収まっており、計算値と実験値がほぼ一致していることがわかる。波向は場所的に変化するものの、潜堤のない場合と比較して、波向は 0° すなわち直方向に近くなり、潜堤の効果があることがわかる。したがって、本計算モデルにより潜堤背後の波向が推定できる。

図-11(a)に天端が水平なフレネル潜堤の波向計算結果を示す。この図に示すように潜堤背後で波向は直角に近くなっているものの、三角形と三角形の間の空間では、屈折が生じないことや、天端上の曲がり方が穏やかなため、汀線位置でも波向が汀線と直角になっていない。そこで、数値計算によって潜堤の効果を高める形状を検討した。図-10は潜堤形状を部分的に改良したもので、潜堤天端に勾配を設け、潜堤上でも大きく屈折させようとするものである。図-11は従来型のフレネル潜堤と改良型潜堤について、入射波向 30° の場合の一方波の波向線を比較したものである。天端上水深が一定のフレネル潜堤では、大きな屈折効果が見られないが、天端水深を変更し、潜堤上で変化した改良型の潜堤では、汀線で波向がほぼ直角となり、大きな屈折効果を得られる。

4. あとがき

フレネル潜堤による波高・波向変更効果について実験

および数値計算を行い、1) 潜堤上の波の変形はブシネスク方程式を用いた数値計算で求めることができる。2) 海浜に設置された複数基の潜堤群による波向変更効果は、エネルギー平衡方程式を用いた数値計算で推定することができる。3) 潜堤の天端に傾斜を設け、屈折効果を高めた改良型潜堤が、より適していることが判明した。

参考文献

- 池野正明・鹿島遼一・鶴飼亮行・清水琢三・秋葉 徹・窪 康浩 (1994): 多方向不規則波浪場計算法の人工島背後海域の適合性比較, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 121-125.
- 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 31-35.
- Cruz, E.・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 46-50.
- 窪 康浩・小竹康夫・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1992): 非定常緩勾配不規則波動方程式を用いた波浪場・海浜流場・海浜地形変化の予測モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 201-205.
- 佐藤慎司・Michael Kabiling (1993): Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.
- 鈴木康正・加藤一正・平石哲也・望月徳雄・松森孝弘 (1994a): フレネル潜堤の構成と適用性, 日本沿岸学会研究検討会講演概要集, No. 7, pp. 52-53.
- 鈴木康正・森川高德・辻 安治・永末英之・平石哲也 (1994b): 環境保全型防波堤周辺の波浪変形計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 991-995.
- 鈴木康正・平石哲也・富樫宏次・高羽泰久・南 将人・岩垣雄一 (1995): 潜堤を用いた海岸安定工法に関する現地観測と模型実験, 海岸工学論文集, 第42巻, (印刷中)
- Madsen, P. E. and O. R. Sørensen (1992): A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 2, A slowly-varying bathymetry. Coastal Eng., Vol. 18, pp. 183-204.