

実規模波浪を用いた斜面上の波・流速に関する実験的研究

鹿島 遼一*・丸山 康樹*・清水 隆夫*
榊山 勉*・斉藤 昭三**

1. はじめに

岸沖漂砂による地形変化を定量的に予測するためには、漂砂量公式の確立と共に外力条件である流体運動を予測することが必要である。

これまでに数多くの研究者によって、室内実験や現地観測が行なわれ、砕波帯内外の諸現象が明らかにされてきた。また、それらの成果を基礎にして水面変動や内部流速を定量的に評価する手法やモデルが提案されている。しかしながら、これらの計算手法やモデルについて、実規模の波浪条件により検証を行なった例は少ない。

そこで、大型造波水路において実規模波浪を用いて実験を行ない、砕波帯内外にわたって水面変動および流速を測定した。本論文は、これらの測定結果と従来の室内実験の結果とを比較し、実規模波浪条件下における現象の特徴や各モデルの実規模波浪への適用性について述べるものである。

2. 実験方法および実験条件

実験は、長さ 205 m、幅 3.4 m、深さ 6 m の大型造波水路を用いて行なった。水路内に中央粒径 0.47 mm の砂を用いて勾配 3/100 の海浜模型を作製し、電磁流速計 7 台を 図-1 のように設置した。また、16 mm メモーションカメラ 12 台を 5 m または 10 m 間隔に設置し

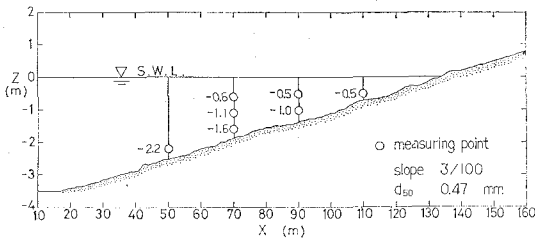


図-1 初期斜面と流速測定点

て、斜面上の水面変動を測定した。さらに、容量式波高計 2 台を用いて、一様水深部における入射波高を測定した。

流速および水面変動のサンプリング周波数は 10 Hz とし、16 mm カメラの撮影速度と同期させ、平均 30 波について測定を行なった。

実験条件を 表-1 に示す。各ケースとも波作用時間は約 30 分間であり、各ケースの実験終了時に測深を行ない水深を求めた。なお、実験中の地形変化は比較的小かった。

3. 波高変化

3.1 砕波前の波高変化

水深の変化に伴う波高の浅水変形は海浜変形や海岸構造物に作用する外力の評価の基本となるものであり、こ

表-1 実験条件

Case	周期 T (s)	一様水深部波高 H_i (m)	換算沖波波高 H_0 (m)	沖波波形勾配 H_0/L_0	砕波波高 H_B (m)	砕波水深 h_B (m)	平均斜面勾配 $\tan \bar{\beta}$	$\bar{\xi}_0$	局所的な斜面勾配 $\tan \beta^{**}$	ξ_0	砕波形式***
V1	3.1	1.27	1.37	0.0914	1.29	2.06	0.03	0.099	0.034	0.11	S/P
V2	5.9	1.36	1.36	0.0250	1.69	2.01		0.19	0.045	0.28	P
V3	9.0	0.96	0.86	0.0068	1.52	1.60		0.37	0.016	0.19	P
V4	3.1	0.73	0.79	0.0527	0.75	1.25		0.13	0.031	0.14	S
V5	5.9	0.68	0.69	0.0127	0.95	1.55		0.27	0.010	0.08	S
V6	9.0	0.54	0.47	0.0037	0.97	1.40		0.49	0.022	0.36	P

* H_i から首藤の理論で求めた値。 **砕波点を中心に 20 m 間の平均勾配。
*** P は plunging, S は spilling, S/P は両者の中間の砕波形式を意味する。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木技術研究所 環境水理部
海岸水理研究室
** (財)電力中央研究所 土木技術研究所 環境水理部
海岸水理研究室

れまでに多くの研究が行なわれてきた。ここでは、実規模波浪の波高変化と有限振幅性を考慮した浅水変形理論との比較検討を行なう。

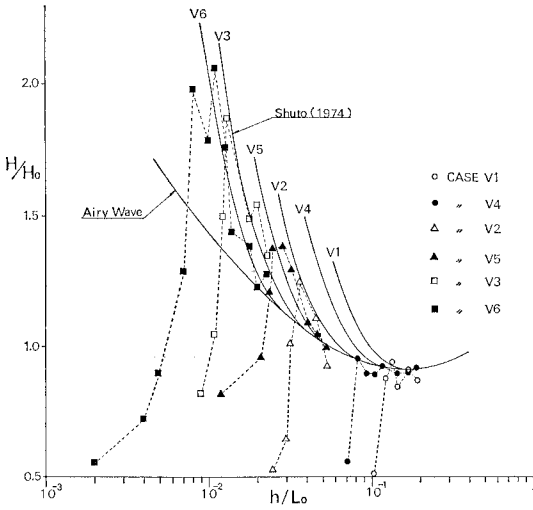


図-2 首藤の理論による浅水係数と実測値との比較

図-2は表-1に示した各ケースの斜面上の波高変化を示したものである。図中には、有限振幅性を考慮した首藤(1974)¹⁾の理論より計算した浅水変形を示してある。また、図-3はエネルギーフラックス法により数値的に求めた浅水変形の結果を含めて比較したものである。エネルギーフラックスは磯部・堀川(1981)²⁾と同様に求め、沖波波高は一樣水深部の波高と周期よりエネルギーフラックス法より求めたもので、表-1の沖波波高の値とは若干異なる。図-3(a), (b)は砕波形式がそれぞれ、spilling, plungingである。spilling 砕波の場合の浅水変形はエネルギーフラックス法の結果と良い一致を示すことが磯部(1981)³⁾により指摘されている。しかし、今回の実験結果では、砕波形式による有意な差は見られなかった。

他の実験結果を含めて比較すると、エネルギーフラックス法による結果は首藤の理論値よりも波高変化の立ち上がりが早く、砕波点付近で波高が著しく大きくなる傾向がある。しかし、実測値との比較から首藤の理論、エネルギーフラックス法ともに砕波前の波高変化をほぼ再現できることが確認された。

3.2 砕波波高・砕波形式

実規模波浪の砕波波高あるいは砕波点をどのように決定するかが次の問題となる。砕波波高には波形勾配の影響が顕著で、図-4は各ケースの H_B/H_0 と H_0/L_0 の関係を合田(1970)⁴⁾にならって整理した結果である。各ケースの斜面勾配はほぼ 3/100であり、周期の短いケース V1と V4を除くと、合田の 1/30の実験値と良く一致する。沖波から岸方向への波高変化を計算し、この砕波指標で決まる H_B に達した点を求めれば砕波水深も決定する。

一方、砕波形式は波高・流速変化、即ち地形変化に影

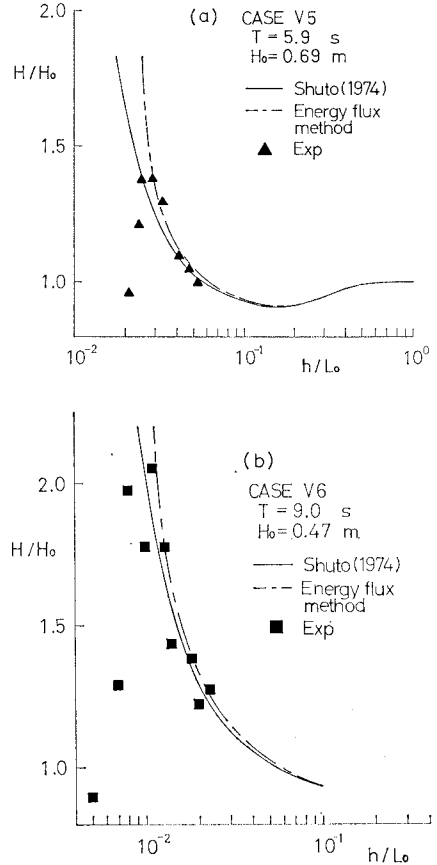


図-3 エネルギーフラックス法による浅水変形計算結果と実測値との比較

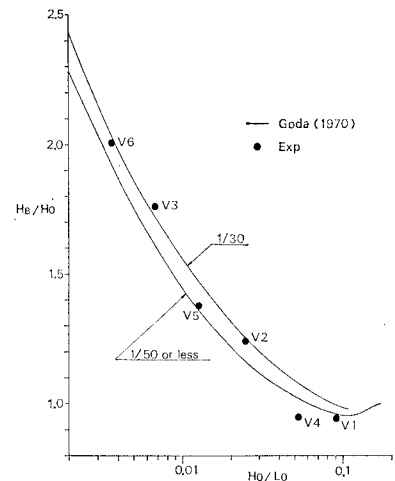


図-4 砕波条件式の検討

響を与える。砕波形式を分類する指標の1つとして、surf similarity parameter ξ_0 が用いられている。Battjes(1974)⁵⁾は Galvin(1968)⁶⁾のコンクリート斜面を用いた実験結果を再整理して、plunging と spilling 砕波の境界

を $\xi_0=0.5$ で分類した. 表-1 に示したように, 各ケースに平均勾配 ($\tan \beta=3/100$) を用いて計算した ξ_0 と碎波形式との相関はあまり明瞭でない. しかし, 碎波点近くの局所的な斜面勾配を用いれば分類が可能と思われ, 図-5 に各ケースの $\tan \beta$ と $(H_0/L_0)^{1/2}$ の関係を示し

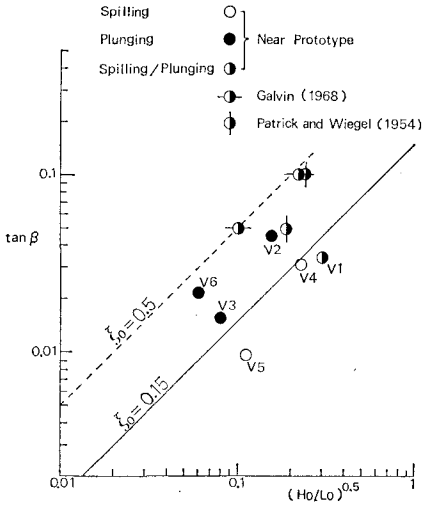


図-5 碎波形式の分類

た. なお, 図には Galvin と同論文中に引用されている Patric and Wiegel (1954) の plunging/spilling の限界値もプロットした. 今回の実験では, plunging と spilling の限界はほぼ次式と推定された.

$$\xi_0=0.15 \dots\dots\dots (1)$$

図-6 は $\tan \beta=3/100$ として, $\xi_0=0.15, 0.5$ に対応する沖波波高 H_0 を比較した結果である. 両者の H_0 にはかなりの相違がみられ, Battjes の限界値を実規模波

浪に適用するには問題があると思われる. なお, 最近の論文から plunging/spilling の限界値を推定すると, $\xi_0=0.23^{7)}, 0.23^{8)}, 0.21^{9)}$ となり, 小スケールの実験に対しても, Battjes の限界値の適用性は悪いように思われる. なお, ξ_0 以外のパラメータによる碎波形式の分類については文献 10) を参照されたい.

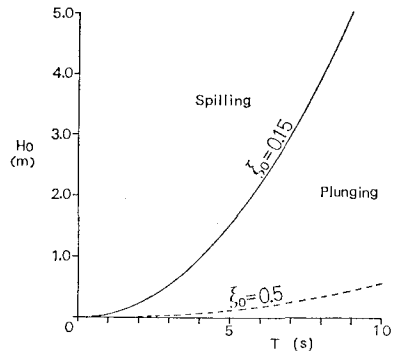


図-6 $\xi_0=0.15$ および 0.5 に対応する H_0 の比較 ($\tan \beta=0.03$)

3.3 碎波後の波高変化

碎波後の波高変化を計算する方法の1つに水口ら (1978)¹¹⁾によるモデルがある. このモデルは平均水位を考慮していなかったが, その後改良され, 波高と平均水位を連立して解けるようになった¹²⁾. しかし, 改良後も平均水位を過大評価するために, Mizuguchi (1980)¹³⁾は碎波後のエネルギーを次式で評価した.

$$E = \frac{1}{6} \rho g a^2 \dots\dots\dots (2)$$

このモデルを本実験に適用した結果を図-7に示す. 計算における波高および平均水位の初期値は実測値を用いた. X' は碎波点から岸向きにとった距離を示す. 実線がエネルギーを (2) 式で与えた場合, 破線はエネルギーを $E=(1/2)\rho g a^2$ で評価した場合の計算結果で, 実測値は実線の値に近い.

波高が大きく, plunging 碎波であるケース V2 と V3 では, 実測波高の減衰は碎波後の短い区間で大きく, その後は比較的緩やかな減衰となっている. これに対して, モデルの計算結果は, 波高水深比をほぼ一定にして減衰しており, 実測値の減衰傾向を十分に表わしていない.

水口のモデルは碎波後のエネルギー減衰を渦粘性によるエネルギー逸散で与え, 波高の2乗に比例すると

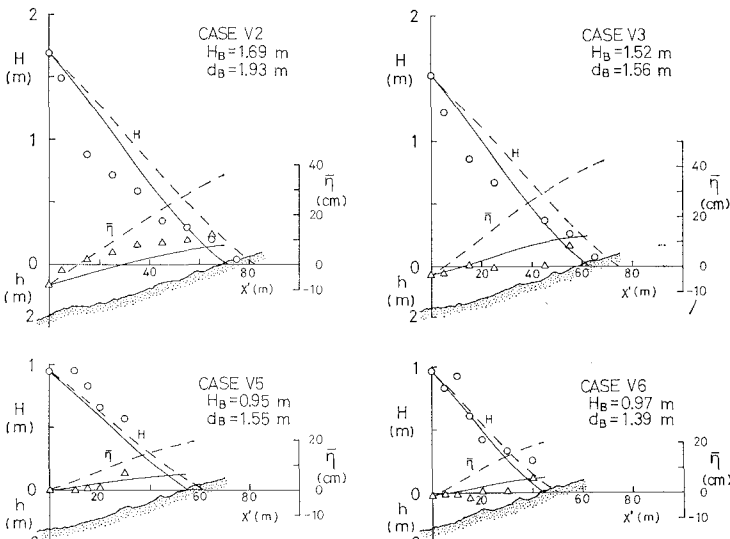


図-7 碎波後の波高変化と平均水位の計算値と実測値との比較

仮定しているが、エネルギー損失を段波によるエネルギー損失で近似した Battjes・Janssen (1978)¹³⁾ のように、波高の3乗に比例すると仮定すれば、波高減衰の形状が実測結果により近づく可能性がある。

4. 流速変化

測定された流速を波動成分と平均流速に分離して検討する。

4.1 波動成分

波動成分に関しては、流速波形と振幅が問題となる。そこでまず、実測の波高を用いてストークス波第5次近似解とクノイド波第3次近似解をアーセル数にしたがって適宜使い分け²⁾、流速波形を計算し、実測値と比較した。図-8は $X=50\text{m}$, $Z=-2.2\text{m}$ の点における結果である。周期の短いケース V1, V4 では両者は良く一致しているが、周期が長くなるに従い、実測波形はひずんでくる。これに対して、理論波形は谷付近で平坦な形状

になり、両者にずれが生じてくる。

ケース V3 と V6 の $X=50\text{m}$ における波浪条件は、Yamada・Shiotani (1968)¹⁴⁾ による保存波の領域に当てはまるが、斜面の影響が表われ、保存波である有限振幅波理論の適用が悪くなる。このように前傾化する流速波形を表現するためには、磯部・堀川 (1981)²⁾ のように非対称性や前傾度を表示するパラメータを導入する必要がある。

次に、波動流速の全振幅について検討した。図-9 (a) は実測波高から有限振幅波理論によって求めた流速全振幅 $\hat{U}_f$ と実測値 $\hat{U}$ とを比較した結果である。有限振幅波理論では図-8 に示したように、周期が大きくなると流速絶対値は峰部で実測値よりも大きくなり、谷部では逆に小さくなる。流速全振幅は若干小さく見積る傾向があるものの、実測値と良く一致している。これに対して、図-9 (b) は実測波高を用いて微小振幅波理論により求めた全振幅 $\hat{U}_s$ と実測値とを比較した結果で、

有限振幅波理論とは逆に全体的に大きく見積る傾向がある。流速波形に関しては、両理論とも実測波形を十分に表現していないが、流速全振幅に関しては、両理論により実測に近い値を推定することができる。

砕波帯内における流速場は非常に複雑であり、研究の発展が望まれる分野である。ここでは、静水汀線から砕波点までの相対距離 X'/X_B に対する相対流速全振幅 $\hat{U}/\sqrt{g(h+\bar{\eta})}$ の変化を図-10 に示した。データ数が十分でないために明確なことは言えないが、 $\hat{U}/\sqrt{g(h+\bar{\eta})}$ の値は砕波形式による差は認められず、ほぼ0.4程度となる。

4.2 平均流速

流速データから6波平均により平均流速を求めた。図-1 に示した流速測定点においては6ケースとも平均流速は沖向であった。測定点が少なく、平均流速の最大値が発生する位置と測定点は必ずしも一致するわけではないが、ケース V1, V2 では平均流速が0.35~0.40 m/s に達した。また、常に砕波帯外に位置した $X=50\text{m}$ 地点の値は0.06 m/s 以下であった。

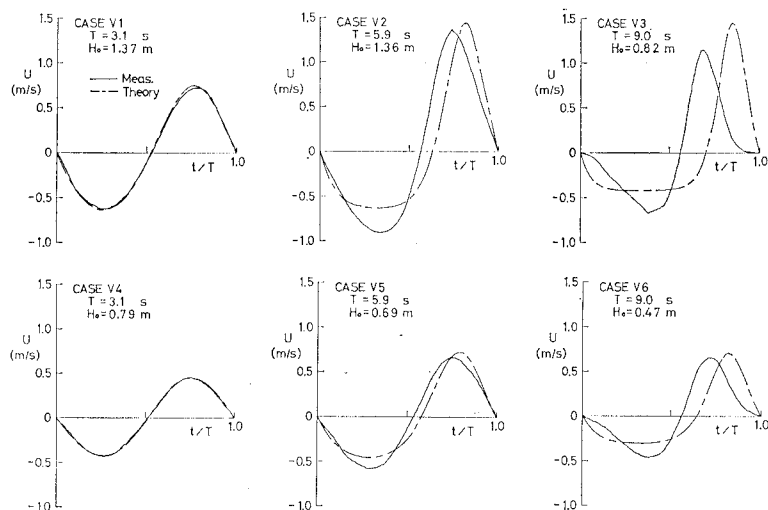


図-8 流速波形の理論値と実測値との比較 ($X=50\text{m}$, $Z=-2.2\text{m}$)

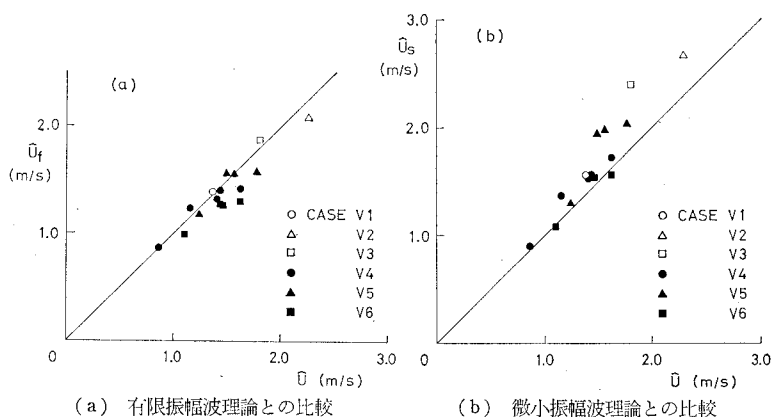
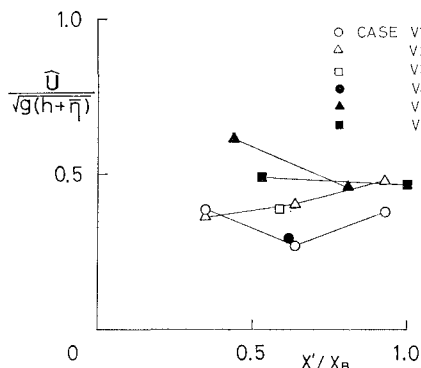
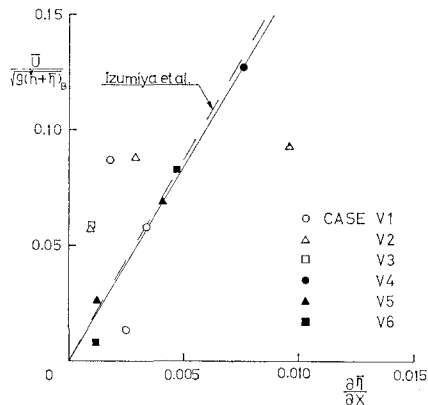


図-9 流速波動成分の全振幅の理論値との比較



図—10 砕波帯内における相対流速全振幅の変化

砕波帯内における平均流速は地形変化に直接影響すると考えられ、近年注目されるようになってきた^{7),8)}。泉宮・堀川 (1981)⁹⁾ は平均水位の勾配と平均流速の相関が強いことを指摘している。そこで、実規模波浪による実験結果に対しても同様の検討を行なった。図—11 は平均水位勾配と $\sqrt{g(h+\bar{\eta})}$ で無次元化した平均流速の関係を示したものである。ただし、平均流速は断面平均値であり、測点が1点の場合にはその値で代表させた。結果は泉宮・堀川の結果と非常に近い傾向を示しており、平均水位勾配が平均流速に重要な役割を果していると思われる。



図—11 平均流速と平均水位勾配との相関

5. おわりに

大型造波水路において、実規模波浪を用いて実験を行ない、種々の理論と比較検討しその適用性や問題点について述べた。

今後、これらの問題点をさらに検討していくとともに、

地形変化が生じている状態での波および流速の変化についても解析を行ない、2次元地形変化を予測する上で必要となる外力評価について研究を進めて行く計画である。

謝辞: 16 mm カメラによる波高の測定に関しては、東京都立大学堀田新太郎助手の多大なる協力を得た。また、砕波後の波高計算に関しては、東京大学渡辺晃助教授、中央大学水口優助教授から貴重な助言をいただいた。また、横浜国立大学磯部雅彦講師にはエネルギーフラックス法を始めとする数値計算に関して、多くの御教示を得るとともに同大学の泉宮尊司助手にも討議に参加していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 首藤伸夫: 非線型長波の変形——水路幅、水深の変化する場合——, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 57~63, 1974.
- 2) 磯部雅彦・堀川清司: 砕波帯付近における流速場の浅水変化に関する研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 57~63, 1974.
- 3) 磯部雅彦: 保存波および浅水変形に関する研究, 東京大学学位論文, 200 p., 1981.
- 4) 合田良実: 砕波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180号, pp. 39~49, 1970.
- 5) Battjes, J. A.: Surf similarity, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 466~480, 1974.
- 6) Galvin, C. J. Jr.: Breaker type classification on three laboratory beaches, J.G.R., Vol. 173, No. 12, pp. 3651~3659, 1968.
- 7) 渡辺 晃・磯部雅彦・野沢是幸・堀川清司: 斜面上で砕波する波の底面流速に関する実験的研究, 第27回工学講演会論文集, pp. 40~44, 1980.
- 8) 灘岡和夫・近藤隆道・田中則夫: LDAを用いた砕波帯内の流速上に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 24~28, 1981.
- 9) 泉宮尊司・堀川清司: 砕波帯における定常流に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 34~38, 1981.
- 10) 鹿島遼一・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉・齊藤昭三: 実規模波浪を用いた斜面上の波・流速に関する実験的研究, 電力中央研究所報告 (印刷中).
- 11) 水口 優・辻岡和男・堀川清司: 砕波後の波高変化についての一考察, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 155~159, 1978.
- 12) Mizuguchi, M.: An heuristic model of wave height distribution in surf zone, Proc. 17th Conf. Coastal Eng., pp. 278~289, 1980.
- 13) Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Conf. Coastal Eng., pr. 569~587, 1978.
- 14) Yamada, H. and T. Shiotani: On the highest water waves of permanent type, Bull. Disaster Prevention Res. Inst. Kyoto Univ., Vol. 18, Part 2, No. 135, 1968.