

パラペット後退型護岸のうちあげ、越波および波圧の特性

高 田 彰*・藤 川 浩 生**

1. ま え が き

各地の地盤沈下および沿岸部の高度利用に伴い、海岸堤防・護岸に寄せる期待度がますます高くなっている。一方、天端高をできるだけ低く抑えて日常の快適な生活、海を取り戻したいという社会的要請も強くなってきている。このように、防災と利用・景観の矛盾する社会的要請に答えなければならなくなっている。低天端構造の海岸堤防・護岸の技術的開発が望まれる^{1),2)}。そのような観点からアプローチした合田ら(1976)³⁾の研究が注目されるが、その中でも取り上げているようなパラペット後退型護岸(階段あるいは berm 構造)は実施面でも各地で盛んに用いられて来ている。

砕波水深より浅い領域での berm の効果は、波のうちあげ高については、Saville (1958)⁴⁾、Hunt (1959)⁵⁾、Herbich, Sorensen and Willenbrock (1963)⁶⁾ および細井・石田 (1965, 1966)⁷⁾ などによって、越波量については井上ら (1972)⁸⁾、などによってかなり明らかにされている。一方、重複波水深領域に設置されたパラペット後退型護岸の berm の効果は、越波については永井ら (1961)⁹⁾ および合田ら (1975)³⁾、などによって、波圧については永井ら (1961)⁹⁾、などの 2, 3 の実験例があるだけである。いずれの場合も、うちあげ、越波、波圧および越波の落下圧(飛込み圧)が berm によってどのように変化するか、体系的に研究されていないように考えられる¹⁰⁾。そこで、この研究は重複波水深領域のパラペット後退型護岸のうちあげ高、越波量、パラペットに作用する波圧および越波の落下圧(飛込み圧)を実験的に調べ、berm の水理特性を総合的に定量化しようとしたものである。

2. 研究 方 法

図-1 に示すようなパラペット後退型護岸を研究の対象とする¹⁾。この研究では、うちあげ高 R 、一周期の越波量 Q 、パラペットの水平波圧強度 p_w 、越波の落下圧(飛込み圧)強度 p_b とパラペット後退距離 l との関連をおもに検討する。

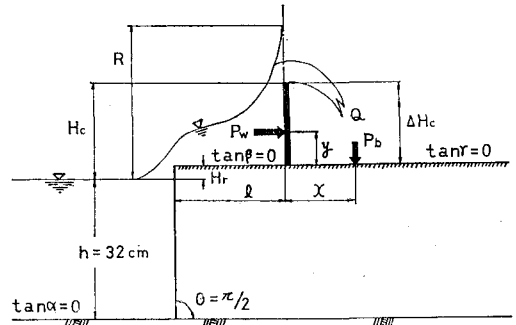


図-1 パラペット後退型護岸

(1) 次元解析

R , Q , p_w および p_b は次元解析よりそれぞれ次のような無次元量に関係すると考えられる¹⁰⁾。

$$\frac{R}{H} = f_1 \left\{ \frac{H_r}{L}, \frac{h}{H} \left(\text{or } \frac{h}{L} \right), \frac{l}{H} \left(\text{or } \frac{l}{L}, \frac{l}{\sqrt{HL}} \right), \frac{H_r}{H}, \alpha, \beta, \gamma, \theta \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left\{ \frac{Q}{H^2} \text{ or } \frac{Q}{HL} \right\} = f_2 \left\{ \frac{H_r}{L}, \frac{h}{H} \left(\text{or } \frac{h}{L} \right), \frac{l}{H} \left(\text{or } \frac{l}{L}, \frac{l}{\sqrt{HL}} \right), \frac{H_r}{H}, \frac{H_0}{H}, \alpha, \beta, \gamma, \theta \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{p_w}{w_0 H} = f_3 \left\{ \frac{H_r}{L}, \frac{h}{H} \left(\text{or } \frac{h}{L} \right), \frac{l}{H} \left(\text{or } \frac{l}{H}, \frac{l}{\sqrt{HL}} \right), \frac{H_r}{H}, \frac{H_0}{H}, \frac{y}{H}, \alpha, \beta, \gamma, \theta \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{p_b}{w_0 H} = f_4 \left\{ \frac{H_r}{L}, \frac{h}{H} \left(\text{or } \frac{h}{L} \right), \frac{l}{H} \left(\text{or } \frac{l}{L}, \frac{l}{\sqrt{HL}} \right), \frac{H_r}{H}, \frac{H_0}{H}, \frac{\Delta H_0}{H}, \frac{x}{H}, \alpha, \beta, \gamma, \theta \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 H_r : berm の高さ、 H_0 : パラペットの天端高、 ΔH_0 : パラペット背後からみた天端高、 w_0 : 海水の単位体積重量、 $\tan \alpha$: 海底勾配、 $\tan \theta$: berm 前面の勾配、 $\tan \beta$: berm の勾配、 $\tan \gamma$: パラペット背後の勾配、 x : パラペットより背後の水平距離、 y : 波圧計の高さ(位置)、 h : 堤脚水深、 H : 入射波高、 L : 入射波長、である。

(2) 実験方法

図-1 において、 $h=32$ cm, $\alpha=\beta=\gamma=0$, $\theta=\pi/2$, H_0

* 正会員 工博 中部工業大学教授 工学部土木工学科

** 工修 株式会社熊谷組

表-1 実験条件

Run	No. 1	No. 2
T (sec)	1.0	1.2
L (cm)	139.5	180.9
H (cm)	9.8	7.5
H/L	0.071	0.041
h/L	0.229	0.177
h/H	3.25	4.28
H_c/H	0.793	1.04
H_r (cm)	0, ± 2 , ± 4	
H_e (cm)	7.8	
l (cm)	0~100	

$=7.8$ cm を一定にして, 2 種類の波 ($T=1.0$ sec で $H=9.8$ cm, $T=1.2$ sec で $H=7.5$ cm) を作用させて, 式(1)~(4) の R/H , Q/H^2 , p_w/w_0H および p_b/w_0H と l/H (or l/L , $l/\sqrt{HL}$) との関係を明らかにする。なお実験条件は表-1 に示される。

実験波は第 6~10 波の 5 波を対象とする。 p_w の測定はパラペットの $y=2$ cm の位置に直径 40 mm の圧力変換器を用いる。 p_b はパラペット背後に圧力変換器を上向きに取り付け, 極大値を生じる場所をさがし, その x 点における落下圧を p_b の測定値とする。

3. 実験結果とその考察

(1) うちあげに及ぼす berm 幅の影響

式(1) の R/H と l/L との関係が, H_r/H をパラメータにして 図-2 に示される。なお $H_r/H=\pm 0.535$ (マイナスは静水面下の berm), ± 0.268 , ± 0 である。図-2 より R/H に極大値を生じる l_R/L が存在し, H_r/H が大きいほど R/H の値は小さく, また $(R/H)_{\max}$ を生じる l_R/L の値も小さくなる傾向にあることがわかる。しかし, 鉛直壁 ($l=0$) に比べて $l/L \leq 0.5$ の範囲では, R/H の減少効果はほとんど期待できないことがわかる。

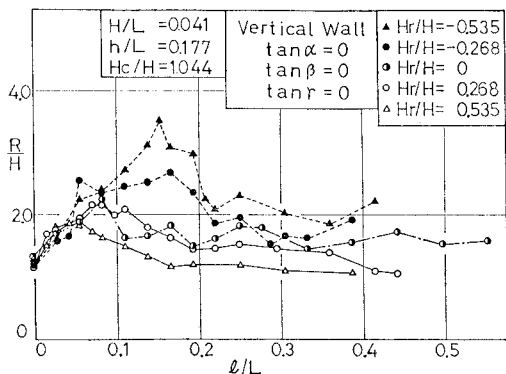


図-2 R/H と l/L との関係
— H_r/H の影響—

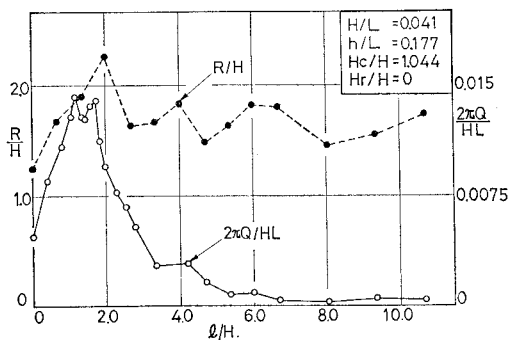


図-3 R/H および $2\pi Q/HL$ と l/H との関係

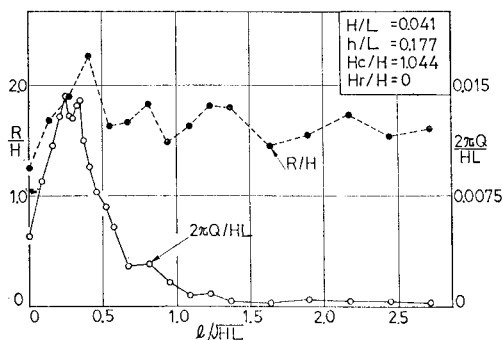


図-4 R/H および $2\pi Q/HL$ と $l/\sqrt{HL}$ との関係

図-3 は横軸に l/H をとった $H_r=\pm 0$ の場合であり, $l/H \approx 2$ に極大値のあること, $l/H < 11$ ではうちあげの減少効果が期待できないことがわかる。

図-4 は横軸に $l/\sqrt{HL}$ をとった $H_r=\pm 0$ の場合であり, $l/\sqrt{HL} \approx 0.4$ に極大値があり, $l/\sqrt{HL} < 2.7$ ではうちあげの減少効果が期待できなく, 逆効果になる場合がある。図-1~3 のように, 横軸に l/L , l/H および $l/\sqrt{HL}$ のいずれをとって整理するのが優れているかは今後の課題となろう。

なお, これまで発表された砕波以浅領域の berm の研究¹⁰⁾ は大部分, berm のうちあげ減少効果を全面的に認める立場での研究結果であり, 著者のような階段状の berm の実験結果とかなり異なっていることを指摘したい。

(2) 越波量に及ぼす berm 幅の影響

図-5 は $H_r/H=\pm 0.535$, ± 0.268 , ± 0 をパラメータにして $2\pi Q/HL$ と l/L との関係を, また, 図-3 および 4 では, $H_r=\pm 0$ について横軸に l/H および $l/\sqrt{HL}$ をとって図示したものである。これらより, R の場合と同様, Q に極大値を生じる l_q が存在し, H_r が大きいほど $Q_{\max}$ が小さく, その発生する l_q の値も小さくなる傾向にあることがわかる。

なお, 越波量については十分な berm 幅 (近似的に $l/L > 1/5$, $l/H > 3$, $l/\sqrt{HL} > 0.7$) があれば越波の減少効果

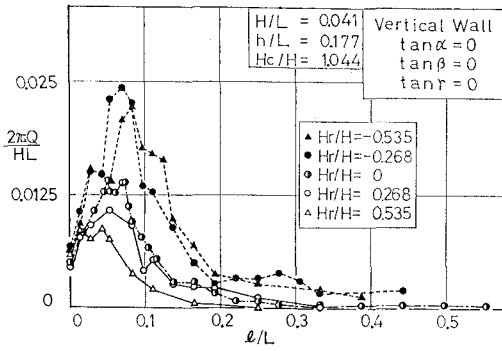


図-5 $2\pi Q/HL$ と l/L との関係
— H_r/H の影響—

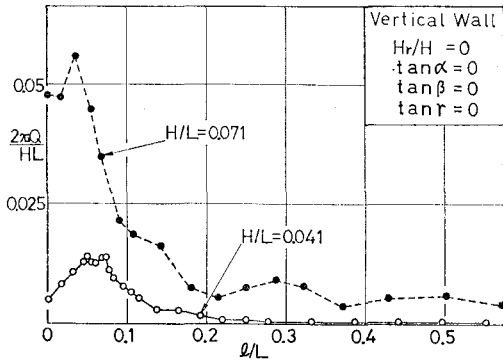


図-6 $2\pi Q/HL$ と l/L との関係
— H/L の影響—

が著しく、bermの有効性が認められる。Paape (1960)¹⁴⁾ および井上ら (1972)⁹⁾ も berm の前面の斜面で砕波する場合に、berm が十分な幅があれば、効果的であることを実験的に明らかにしている。

図-6 は $H/L=0.041$ と 0.071 の場合を比較したものである。これより、 H/L の小さい方が $Q_{\max}$ を生じる l_Q がやや大きくなることわかる。

(3) パラペットの水平波圧に及ぼす berm 幅の影響

図-7 は H_r/H をパラメーター ($-0.268, \pm 0, 0.268$)

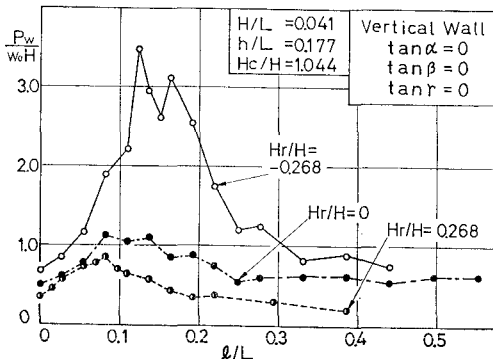


図-7 p_w/w_0H と l/L との関係
— H_r/H の影響—

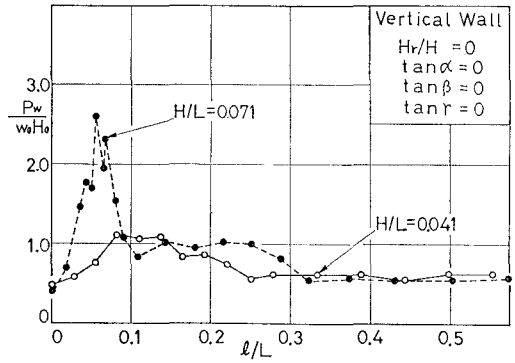


図-8 p_w/w_0H と l/L との関係
— H/L の影響—

として、 p_w/w_0H と l/L の関係を表わしたものである。これより、 p_w の極大値を生じる l_w が存在すること、また、 H_r が大きいほど $(p_w)_{\max}$ が小さく、その発生位置 l_w も小さくなることわかる。しかし、 p_w の減少効果は鉛直壁に比較して $l/L < 0.5$ では期待できないことがわかる。このことはうちあげの場合 (図-2) と同様な傾向であり、永井ら (1961)⁹⁾ もすでに $1/20$ の模型実験で berm の逆効果を波圧の面より指摘している。

図-8 は 2 種類の H/L (0.041 と 0.071) による p_w と l との関係を表わしたものであるが、図-6 の Q の傾向に近似していることがわかる。

(4) 越波の落下圧(飛込圧)に及ぼす berm 幅の影響

図-9 は横軸に l/L を、図-10 は横軸に $l/\sqrt{HL}$ をとり、 p_b/w_0H との関係を表わしたものである。図-11 は 2 種類の H/L (0.041 と 0.071) について調べたものである。これらより、 $(p_b)_{\max}$ を生じる l_b が存在すること、 p_w と比較して $H_0/H=1.04$ の場合に p_b の方が大きい圧力を生じることがわかる。また、 H/L の小さい方が $(p_b)_{\max}$ の l_b が大きいこと、 p_b と l との関係が Q と l との関係 (図-5) に近似していることがわかる。

落下圧強度 p_b を理論的に考えれば、越波水脈・水塊の落下速度 V_b に関係し、 $p_b = \zeta w_0 (V_b)^2 / 2g$ (ζ : 抵抗係

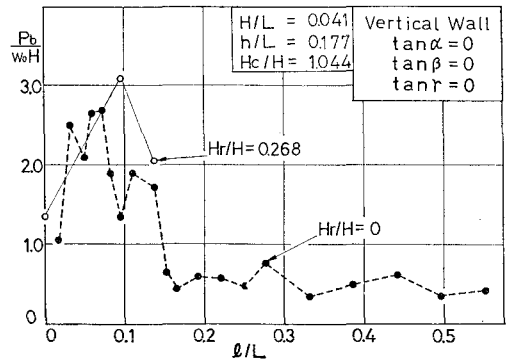


図-9 p_b/w_0H と l/L との関係
— H_r/H の影響—

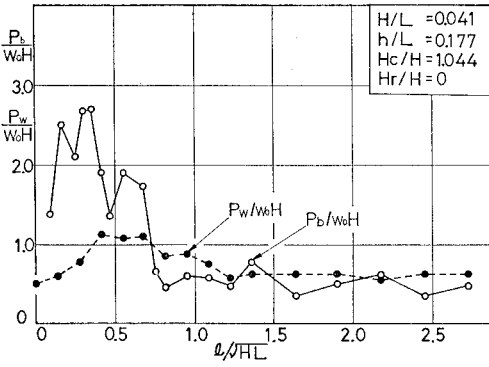


図-10 p_b/w_0H および p_w/w_0H と $l/\sqrt{HL}$ との関係

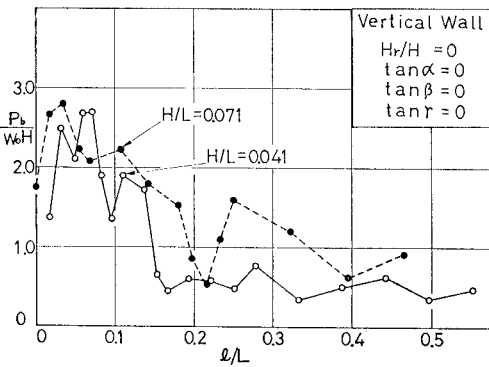


図-11 p_b/w_0H と l/L との関係
— H/L の影響—

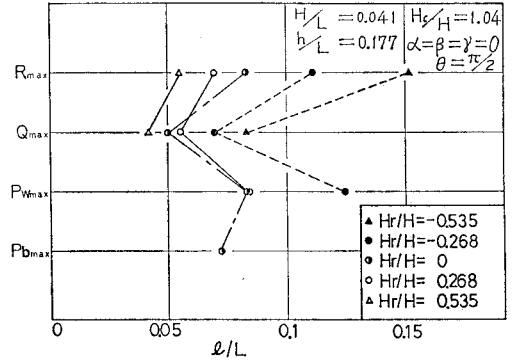


図-12 R_{max} , Q_{max} , $(p_w)_{max}$ および $(p_b)_{max}$ を生じる berm 幅 $-H_r/H$ の影響—

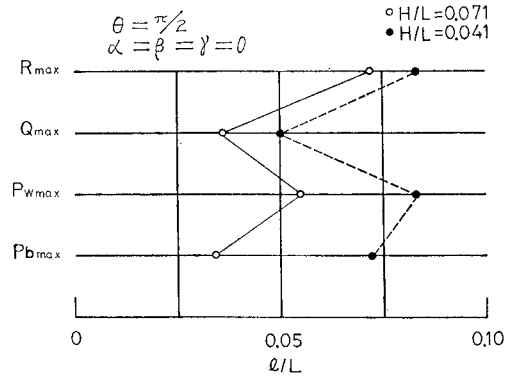


図-13 R_{max} , Q_{max} , $(p_w)_{max}$ および $(p_b)_{max}$ を生じる berm 幅 $-H/L$ の影響—

数) となり, その V_b は R と $V_b = c\sqrt{2g(R-H_r)}$ (c : 越波エネルギーの損失係数) の関係にあるので, 近似的に次の式で表わされる¹²⁾.

$$p_b = \zeta w_0 c^2 (R - H_0) = k w_0 (R - H_0) \dots\dots\dots (5)$$

また, 落下圧の合力 F_b は越波の運動量のほとんどが圧力に変わると考えると近似的に次式で表わされる.

$$F_b = \xi \frac{w_0}{g} \left\{ \frac{Q}{(T/2)} \right\} V_b \dots\dots\dots (6)$$

(ξ : 係数, g : 重力加速度)

式(5)および(6)の係数 $k = \zeta c^2$ および ξ については, 今後の課題としたい.

(5) うちあげ, 越波, 波圧および越波の落下圧の相関性

図-12は R , Q , p_w および p_b の極大値を生じる l を H_r/H をパラメーターにして表わしている. これより, R と p_w , Q と p_b とがよい対応をしている. また, H_r が大きいほど, R , Q , p_w および p_b の極大値を生じる l の値が小さくなることがわかる.

図-13は2種類の H/L (0.041と0.071)の場合について極大値を生じる berm 幅を調べたものであるが, いずれの場合も R と p_w , Q と p_b の対応がみられるが,

H/L の小さい方が極大値の berm 幅がやや広いことがわかる.

4. 結 論

この研究では, 重複波水深における階段状の berm について, その berm 幅のうちあげ, 越波, 波圧および越波の飛込み圧との関係を実験的に調べたものであるが, この他に波の特性, 堤脚水深, 海底勾配, berm 形状, 天端高および風などの影響を検討しなければならない.

この研究で明らかになったおもな事項は次の通りである.

(1) パラペットの後退距離に応じて, うちあげ, 越波, 波圧および越波の落下圧(飛込み圧)は単調に減少しない.

(2) berm 幅が $l/L < 1/2$, $l/H < 11$ および $l/\sqrt{HL} < 2.7$ の範囲ではうちあげ高, パラペットの水平波圧の減少効果が鉛直壁に比較してほとんど期待できないか逆効果の場合がある.

(3) berm 幅が $l/L \geq 1/5$, $l/H \geq 4$ および $l/\sqrt{HL} \geq 0.9$ では越波量およびその飛込み圧は l が大きいほど減少効果が著しいが, $l/L = 0 \sim 0.15$, $l/H = 0 \sim 3$, $l/\sqrt{HL}$

$=0\sim0.7$ の範囲に極大値を生じるような特異点が存在する。

(4) berm の高さ H_r が大きいほど消波効果が著しく、 R , Q , p_w および p_b に極大値を生じるバーム幅は一般に小さくなる。

(5) うちあげ高とパラペットに作用する波圧との相関性、そして越波量とその落下圧(飛込み圧)との相関性とがそれぞれ認められる。また、 $R_{\max}$ と $(p_w)_{\max}$ を生じる berm 幅 l_R および l_w は $Q_{\max}$ と $(p_b)_{\max}$ を生じる berm 幅 l_Q および l_b よりやや大きい。

(6) H/L の小さい方が R , Q , p_w および p_b の極大値を生じる berm 幅が広い。

(7) パラペットの後退位置を $l/L=0\sim0.2$, $l/H=0\sim3$, および $l/\sqrt{HL}=0\sim0.7$ の範囲に設置することは避けるべきである。

謝辞: この研究の実験は昭和 51 年度(原, 神谷), 52 年度(佐藤(滋), 佐藤(隆), 古川, 三ツ口)の卒業研究の学生諸君によるものであり, ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高田 彰・藤川浩生: パラペット後退型護岸の越波と波圧の特性, 土木学会第 32 回年講集 II, pp. 89~90, 1977.
- 2) 三井 宏・寺尾 健・井上雅夫・佐伯 浩: 海岸堤防, 防波護岸の見直し—シンポジウム集録, 土木学会誌, Annual '78, Vol. 63-増, pp. 72~80,

1978.

- 3) 合田良実・岸良安治: 不規則波による低天端護岸の越波特性実験, 港湾技研報告, 第14巻, 第4号, 44 p., 1975.
- 4) Saville, T. Jr.: Wave run-up on shore structures, Trans. ASCE, Vol. 123, pp. 139~150, 1958.
- 5) Hunt, I. A.: Design of seawalls and breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, pp. 123~152, 1959.
- 6) Herbich, J. B., R. M. Sorensen and J. H. Willenbrock: Effect of berm on wave run-up on composite beaches, Proc. ASCE, Vol. 89, No. WW2, pp. 55~72, 1963.
- 7) 細井正延・石田 昭: 汀線より陸側にある堤防への波のうちあげ, I, II, (第1報), 第12回海講集, pp. 168~175, 1965. (第2報) 土木学会第21回年講集, pp. 76-1~76-2, 1966.
- 8) 井上雅夫・菊岡 敏: 越波量におよぼす堤防前面地形の影響, 第19回海講集, pp. 283~288, 1972.
- 9) 永井莊七郎・久保弘一・玉井佐一・上田伸三: 防波堤および海岸堤防前面におかれた消波ブロックの効果について, 第8回海講集, pp. 78~58, 1961.
- 10) Technical Advisory Committee on protection against inundation in the Netherland: Wave run-up and Overtopping, pp. 1~176, 1972.
- 11) Paape, A.: Experimental data on the overtopping of seawall by waves, Proc. of 7th Conference on Coastal Engineering, pp. 674~681, 1960.
- 12) たとえば, 渡辺弥作: 海岸工学, コロナ社刊, 363p., 1973.