

天端被覆ブロック型護岸の波圧特性に関する現地計測

安部 鐘一* ・ 星 秀樹** ・ 天野 英樹***
池谷 毅**** ・ 秋山 真吾*****

泊発電所 3 号機増設工事では、新たに開発した天端被覆ブロック型護岸を採用した。本形式の護岸は、これまでに施工実績がないことから、水理実験により設計を行っており、水理実験の妥当性の検証、護岸の波圧特性の解明を目的とした現地計測を実施した。また、簡便な波圧評価手法である数値波動水路による計算法の新型護岸への適用性について検討した。その結果、計測期間中の来襲波浪は小さく、パラペットには設計波レベルの波圧は作用しなかったが、ケーソン・上部工の波圧分布はほぼ合田式を満足しており、水理実験の妥当性が確認された。また、数値波動水路による計算でも、計測結果とほぼ近い波圧分布が得られた。

1. はじめに

北海道電力 (株) 泊発電所 3 号機増設工事 (図-1) では、背後の重要構造物を防護するための護岸の形式に、新たに開発した天端被覆ブロック型護岸を採用した (秋山ら, 2003)。本形式の護岸は、これまでに施工実績がないことから、採用にあたっては断面 2 次元実験及び多方向不規則波実験による詳細な検証を行い (岩瀬ら, 1999; 秋山ら, 2003)、越波特性及び護岸に作用する波圧特性を評価して設計に反映させてきた。

本研究では、これまでに実施した水理実験の妥当性を検証し、新型護岸の波圧特性を明確にするとともに、新型護岸の設計指針の確立を目的とした現地計測を実施し、入射波浪と護岸の波圧分布特性について検討を行った。さらに、水理実験に代わる簡便な波圧評価手法である数値波動水路により、新型護岸をモデル化し、現地で得られた波浪データを入力条件として数値計算を実施した。そして、現地計測結果との比較により、数値波動水路の新型護岸への適用性について検討を行った。

2. 3 号機護岸設計条件

表-1 に 3 号機護岸の設計波浪、潮位を示す。水理実験に基づく護岸の検討は、表中の設計波を用いて行った。

表-1 3 号機護岸設計条件

換算沖波	$H_0=8.3\text{ m}$, $T_0=13.0\text{ s}$ (50 年確率)
設計波	$H_{\max}=9.4\text{ m}$, $H_{1/3}=6.9\text{ m}$, $T_{1/3}=13.0\text{ s}$
設計波向き	WSW
設計潮位	H.H.W.L. T.P.+1.00 m
	H.W.L. T.P.+0.26 m
	L.W.L. T.P.-0.14 m
護岸設置水深	11.76 m (H.W.L.)
海底勾配	1/100

3. 現地計測方法

(1) 現地計測地点

計測期間は 2002 年 10 月から 2003 年 3 月末までの 5 カ月間とし、新型護岸に入射する波浪及び作用する波圧の計測を実施した。図-2 に現地計測地点を示す。

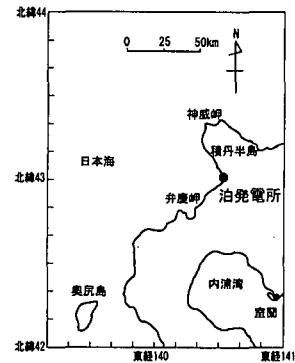


図-1 泊発電所位置図

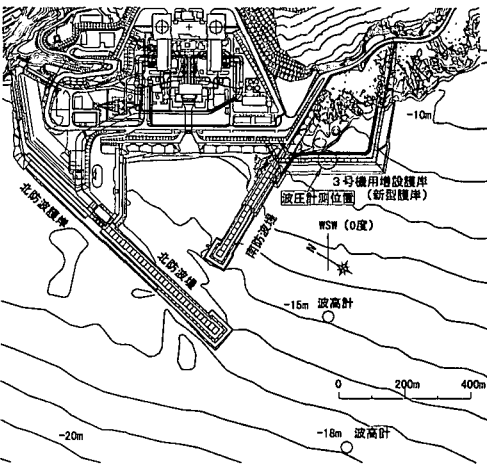


図-2 現地計測地点

* 北海道電力 (株)
** 工修 北海道電力 (株)
*** 北電総合設計 (株)
**** フェロー 工博 鹿島建設 (株) 技術研究所
***** 正会員 工修 鹿島建設 (株) 技術研究所

(2) 波浪計測

波浪の計測は、護岸前面の水深約 15 m 地点に超音波式波高計を設置し、毎偶数正時を挟む±10 分の 20 分間について 2 Hz でデータサンプリングを行った。陸上部には基地局を設置し、テレメータを用いてデータの送受信を行った。また、水深約 18 m 地点には有線式の超音波式波高計が設置されており、2 Hz でデータサンプリングが行われている。そこで、毎偶数正時を挟む±10 分の 20 分間についてデータを整理し、新設した波高計のデータが欠損する場合には、有線式の波高計データを用いた。

(3) 波圧計測

図-3 に波圧計の設置位置を、写真-1 にパラペット部の波圧計設置状況を示す。波圧の計測は、受圧面の直径が約 10 cm の計測器を、ケーソン 4 台、上部工 1 台、パラペット 3 台の計 8 台設置し、毎正時を挟む±10 分の 20 分間について 50 Hz でデータサンプリングを行った。ただし、計測器は護岸を代表する地点として新型護岸の中央付近(図-2 参照)の一測線に設置した。また、護岸の前面には消波ブロックが設置されることから、波圧計の周囲には写真-2 に示す受圧面を保護するための治具を 4 本取り付けた。

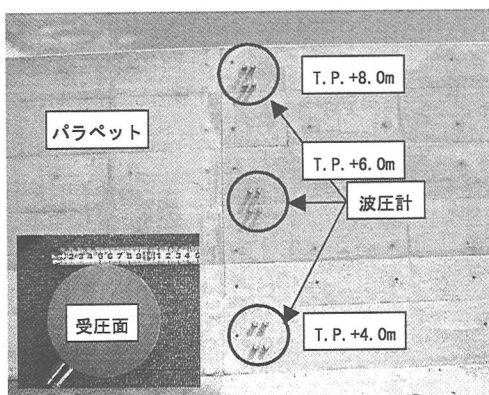


写真-1 波圧計設置状況 (パラペット)

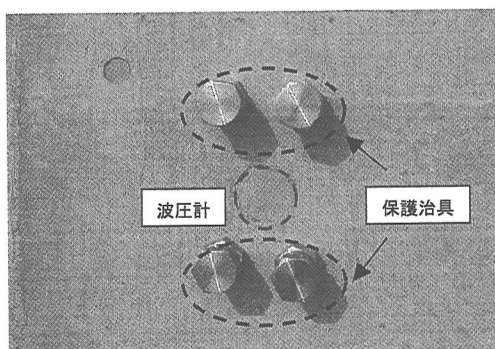


写真-2 波圧計保護状況

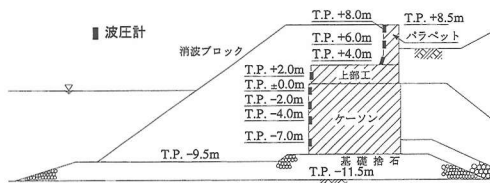


図-3 波圧計設置地点

4. 現地計測結果

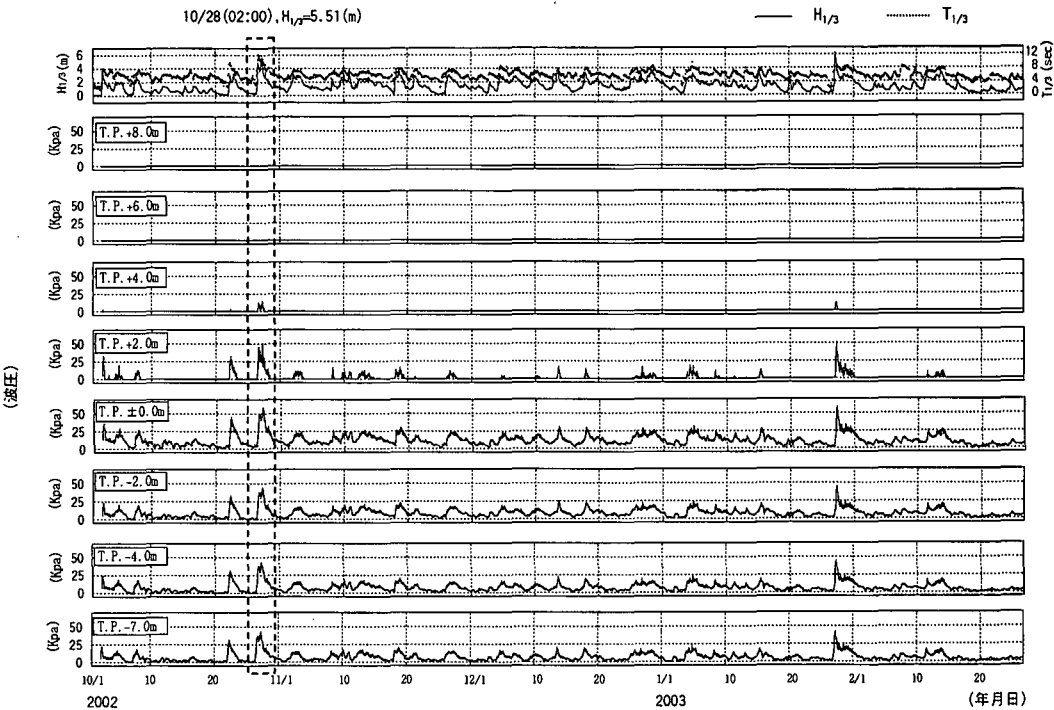
(1) 連続計測結果

図-4 に 5 カ月の計測期間中に得られた水深 15 m 地点の波浪データと、8 台の波圧計データの時系列を示す。波浪データは毎偶数正時の有義波高、有義周期、波圧データは毎正時の最大値である。計測期間中に来襲した最大波高は、沖波に換算すると $H_0=5.6$ m, $T_0=11.9$ s (2002 年 10 月 28 日午前 2 時) であり、50 年確率の護岸の換算沖波 ($H_0=8.3$ m, $T_0=13.0$ s) と比較すると 5 年再現確率程度であった。そのため、パラペット前面の 3 台の波圧計 (T.P.+8.0 m, T.P.+6.0 m, T.P.+4.0 m) には波がほとんど作用していないことがわかる。なお、平均的には 12 月や 1 月の波高が大きくなっているが、最大波高並びに第 3 位の波高は 10 月に記録された。また、計測期間中は西高東低の冬の気圧配置により、80%程度が WSW~WNW 方向の波向きであった。

(2) 波圧最大時の計測結果

計測データのうち、特に護岸に作用する波圧が大きい時間帯について検討を行った。図-5 に波圧が最大となる時刻 (2002 年 10 月 28 日午前 2 時) における護岸の波圧分布を示す。図中には設計波 ($H_{max}=9.4$ m, $T_{1/3}=13.0$ s) に対する波圧分布と、最大波圧が観測された同時刻の波浪条件 ($H_{1/3}=5.5$ m, $T_{1/3}=11.9$ s) を用いた合田式による波圧分布も併せて示す。ただし、計測結果から波圧分布を算定する際には、その時の波向き W を考慮した。

これまでの水理実験の結果、ケーソン・上部工前面の波圧強度は消波ブロックを考慮した合田式で、パラペット前面の波圧強度は海水の密度を ρ 、最大波高を H_{max} とすると、 $p=1.0\rho gH_{max}$ 程度で評価できることがわかっており(岩瀬ら; 1999)、護岸の設計に反映させてきた。ケーソン・上部工については、衝撃波圧が生じる静水面付近では、計測結果が消波ブロック、波向きの影響を考慮した合田式(高橋ら; 1990)をわずかに上回っているが、それ以外の全ての地点では設計値及び合田式を下回っており、水理実験の妥当性が確認された。一方、計測期間中は護岸に入射する波高、周期ともに設計波に比べて小さかったため、パラペットについては設計で考慮しているレベルの波圧強度 ($p=1.0\rho gH_{max}$) は見られなかった。



図—4 波浪・波圧時系列 (計測結果)

観測値	観測地点		波向き	備考
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)		
実線	...	...	WSW ($\beta=0^\circ$)	設計波圧
点線	5.51	11.9	W ($\beta=30^\circ$)	合田式 (計測波浪)

部工前面の波圧の算定に合田式を用いたが、図中には合田式より算定した各位置、周期、波向き、波高に対する波圧も併せて表示した。ただし、周期7秒の波とは、6秒から7秒の間の有義周期を持つ波と定義した。また、波向きについては、16方位に分けて整理した。

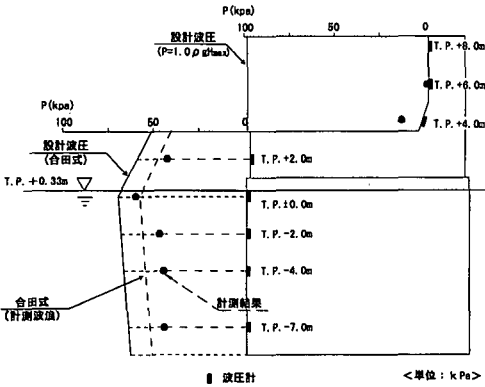
これらの結果を見ると、周期が短い場合には合田式をわずかに超える計測結果も見られるが、波圧分布は合田式をほぼ満足していることがわかる。特に、周期が長く波高の大きいケースについては、合田式とよく一致しており、波向きの影響により波圧が変化する傾向も見られる。その要因としては、周期が長く波高が大きい場合には作用する波圧が大きいのに対し、周期が短く波高が小さい場合には作用する波圧も小さく、計測される波圧の値に比べ温度変化に伴う計測器のドリフトの影響などが顕著になることが考えられる。

5. 数値波動水路による波圧の算定

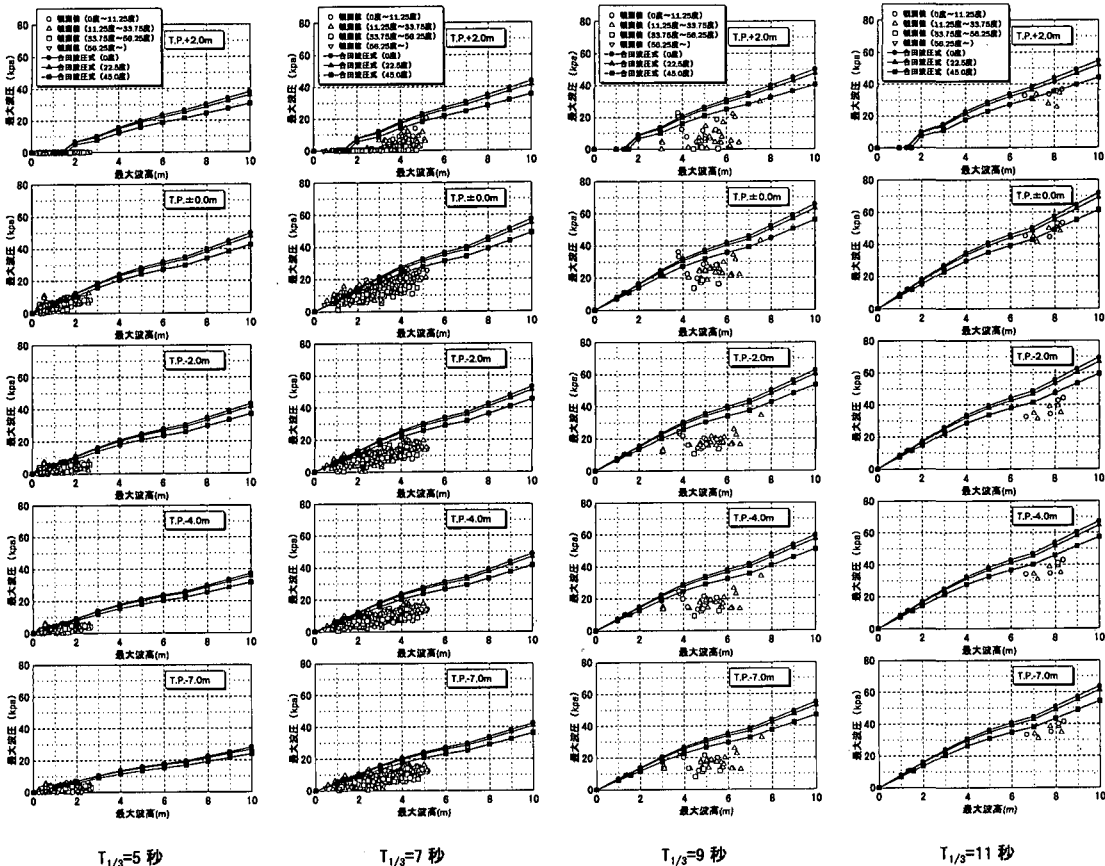
近年、水理現象の評価に数値解析が用いられるようになってきた。中でも、造波水路における水理模型実験を模擬できる、VOF法を用いた数値波動水路が開発され(磯部ら, 1999)、実験に代わる有力な波力評価手法として適用されている(例えば、蔣ら, 1999; 有川ら, 2001)。本研究でも、新型護岸の波圧算定にVOF法を用いた数値波動水路を適用し、計測結果との比較を行った。

(3) 合田式との比較

図-6は、今回の計測で得られた2時間毎の最大波圧のデータを、同時刻の入射波の有義周期、波向き及び計測位置別に分類し、有義周期5秒、7秒、9秒、11秒の波について、横軸を護岸位置での最大波高としてプロットしたものである。新型護岸の設計では、ケーソン・上



図—5 波圧断面分布 (2002年10月28日午前2時)



図—6 計測結果と合式式の比較

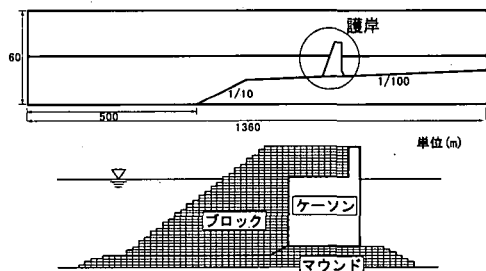
(1) 計算条件

図—7 に計算のモデルを、表—2 に計算条件を示す。護岸位置での海底勾配を 1/100、設置水深を 11.5 m とし、捨石マウンド、ケーソン・上部工・パラペット及び消波ブロックをモデル化した。ただし、水理実験と同様に、碎波の影響が小さい水深から 1/10 勾配の斜面を設け、計算領域を小さくした。捨石や消波ブロックの空隙率、慣性力係数及び抗力係数については、榊山・香山 (1997)、榊山・鈴木 (1998) を参考に設定した。また、入射波条件には波圧最大を記録した 2002 年 10 月 28 日午前 2 時のデータを用いた。

(2) 計算結果

造波は規則波とし、護岸地点に波が 10 波程度到達するまで計算を行った。

図—8 にケーソン前面 (T.P. - 7.0 m, T.P. ± 0.0 m) での波圧の計算結果を示す。本解析領域は碎波帯内であり、空気の巻き込みが多い T.P. + 2.0 m や T.P. ± 0.0 m では、スパイクノイズと見られる極端に値が大きくなる現象が見られる。そこで、計測結果と比較することにより、ノイズ処理について検討した。図—9 は計算結果に移動



図—7 計算モデル

表—2 計算条件一覧

項目	諸元
計算領域	1360 m × 60 m
計算格子	$\Delta x = 1.0$ m, $\Delta z = 0.5$ m
波高, 周期	5.6 m, 11.9 s (沖波)
護岸設置水深	11.83 m (潮位: 0.33 m)
空隙率	0.43 (捨石), 0.50 (ブロック)
抗力係数	1.00 (捨石), 1.00 (ブロック)
慣性力係数	1.20 (捨石), 1.20 (ブロック)

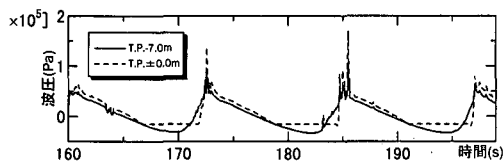


図-8 波圧時系列 (計算結果)

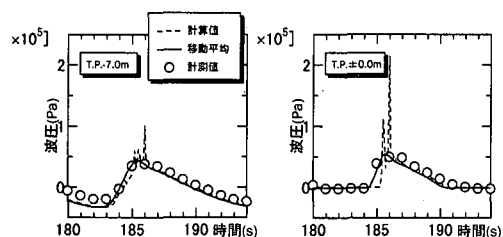


図-9 スパイクノイズ処理

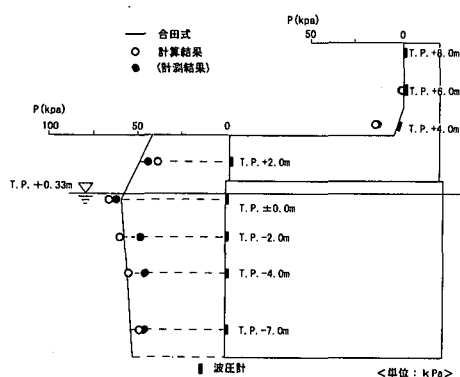


図-10 波圧断面分布の比較

平均を施し、計測結果と比較したものである。移動平均の検討は、碎波の影響が小さい T.P. -7.0 m のデータで行ったが、その結果を用いると T.P. ±0.0 m のデータについても良く一致している。そこで、パラペットも含め全ての地点の計算結果を同じ条件で整理した。

図-10 は造波が安定している 4～6 波目について、作用する波圧の最大値を平均し、計測結果、合田式と比較したものである。ただし、計算結果は現地に合わせて波向きの補正をした。この結果より、静水面付近では計測と同様に合田式をわずかに超える値も見られるが、ケーソン・上部工だけでなく、パラペット前面についても計算結果は計測結果に近い分布を示しており、数値波動水路が新型護岸の波圧分布を十分表していることがわかる。

6. 主要な結論

本研究では、新たに開発した新型護岸の波圧特性を現地計測により検証するとともに、新型護岸の波圧評価への数値波動水路の適用性について検討した。本研究により明らかになった点は次の通りである。

① 計測期間中に来襲した最大波高は沖波で $H_0=5.6$ m, $T_0=11.95$ 秒であり、護岸の設計波条件 ($H_0=8.3$ m, $T_0=13.0$ 秒) に比べると 5 年再現確率程度であった。

② ケーソン・上部工前面の波圧分布は、合田式をほぼ満足しており、水理実験の妥当性が確認された。周期が長く波高が大きいほどデータのばらつきは小さく、波向きの影響による波圧の低減も含め合田式とよく一致している。今回の計測期間中は、来襲した波浪が設計波に比べて小さかったことから、パラペットにはほとんど波が作用しておらず、設計で考慮している波圧強度 ($p=1.0\rho gH_{max}$) に相当する値は見られなかった。

③ 新型護岸の波圧分布を、数値波動水路により十分再現することができた。計算結果に移動平均を施すことで、ケーソン・上部工だけでなくパラペット前面についても計測結果に近い分布特性を示している。静水面付近では合田式をわずかに超える値も見られるが、今回の解析領域が碎波帯内であり、スパイクノイズの影響が考えられることから、その処理が今後の課題である。

参考文献

- 秋山真吾・池谷 毅・木下 勲・安部鎮一・井島雅広・天野英樹 (2003): 新型護岸の開発と施工, 海洋開発論文集, 第 19 巻 pp. 231-236.
- 有川太郎・磯部雅彦・高橋重雄 (2001): VOF 法を用いた衝撃碎波圧の算定と適用性, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 831-835.
- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・柳山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔣 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF 法基本プログラミングの作成—, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 321-326.
- 岩瀬浩二・池谷 毅・安部鎮一・白川部秀基・天野英樹 (1999): 天端被覆ブロック護岸の設計法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 891-895.
- 柳山 勉・香山真裕 (1997): 碎波をとまう消波護岸への越波の数値計算, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 741-745.
- 柳山 勉・鈴木一広 (1998): 数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸い出し評価, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 566-570.
- 蔣 勤・高橋重雄・磯部雅彦 (1999): 防波堤の波力算定への数値波動水路の適用性について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 41-452.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1990): 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロックの荷重, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 1 号, pp. 54-75.