

軟岩を基礎とする京極発電所上部調整池堤体基盤

Design and execution of foundation rock of upper reservoir in Kyogoku Project

北海道電力(株) 京極水力発電所建設所 正員 安部 鐘一 (Shoichi Abe)
 北海道電力(株) 京極水力発電所建設所 正員 田中 則和 (Norikazu Tanaka)
 北海道電力(株) 京極水力発電所建設所 ○正員 泉 信人 (Nobuhito Izumi)
 北電総合設計(株) 正員 津田 裕介 (Yusuke Tsuda)

1. はじめに

北海道電力(株)は、北海道虻田郡京極町において道内初の純揚水発電所として京極発電所を建設中であり、平成19年12月現在の工事進捗率は約34%となっている。京極発電所の上部調整池は、一辺約440mの隅角部を持つ正方形の平面形状で、標高約900mの緩やかに傾斜する台地を最大約70m掘り込み、3辺を盛立部(最大堤体高さ22.6m)、1辺を切土部とするプールタイプである。堤体は、調整池掘削によって採取する安山岩を用いて盛立を行い、遮水性は調整池内全面に鋪設するアスファルト表面遮水壁によって確保することとしている。上部調整池の平面図を図-1に、断面図を図-2に、堤体の標準断面図を図-3に示す。

上部調整池堤体の特徴として、基礎地盤を電研式岩盤分類におけるD級岩盤に設定していることが挙げられ、国内でも事例が少ない。D級岩盤は、風化、変質作用により軟質化した岩盤であり、設計、施工、品質管理には様々な配慮を必要とした。

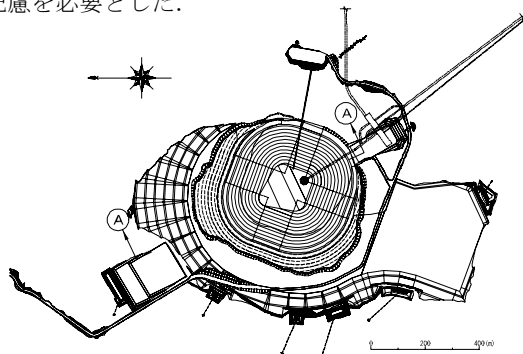


図-1 上部調整池平面図

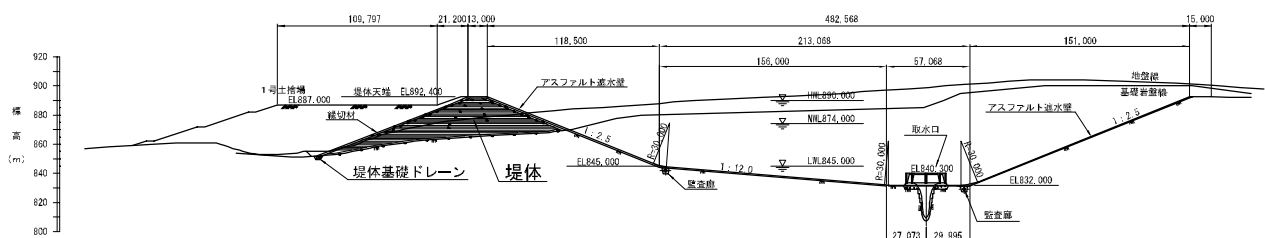


図-2 上部調整池標準断面図 (A-A)

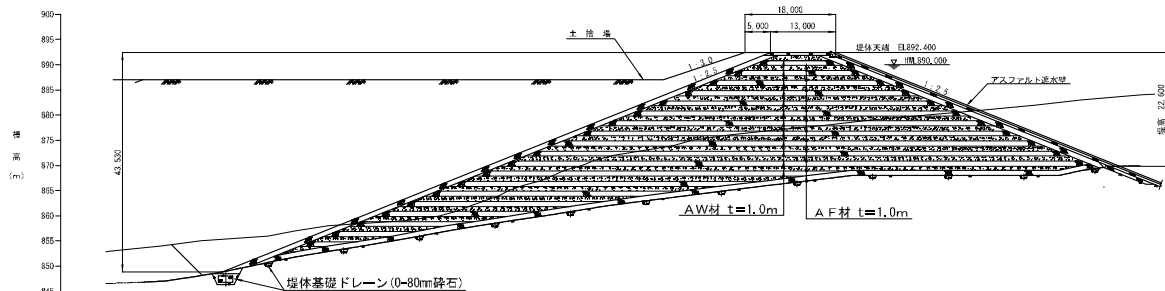


図-3 堤体標準断面図

堤体基礎地盤は、平成17年7月から平成19年8月にかけて全面積約13.4万 m^2 を6回に分けて監督官庁の検査を受検し順次盛立を開始した。盛立量は平成19年12月現在で約109万 m^3 (全体盛立量約154万 m^3)であり、盛立は一部を除き平成20年に終了する予定である。

本報は、堤体基礎地盤をD級岩盤に設定した設計時の考え方、施工、品質管理を行った結果について報告するものである。

2. 堤体の設計概要

堤体の諸元は、堤高22.6m(最大)、堤頂長1,135.9m、堤体積153.9万 m^3 、上下流法面勾配1:2.5であり、上流側にアスファルト表面遮水壁を設け、下流側に調整池掘削で発生した土砂を腹付けした1号土捨場を配置する。

堤体材料には、調整池掘削により発生する安山岩のうち新鮮部の硬岩(AF材)と風化部の軟岩(AW材)を使用する。これらの材料は、盛立後におけるAW材中の残留間隙水圧の早期消散を図ることを目的にAF材とAW材を1mで互層に盛立てる構造とした。堤体材料の物性値は、調査立坑($\phi=3\text{m}$)から採取した材料を用いて大型締め固め試験と大型三軸圧縮試験等を実施し、表-1に示す値とした。

表-1 堤体材料の物性値

材 料	湿潤密度 (t/m^3)	乾燥密度 (t/m^3)	粘着力 (tf/m^2)	内部摩擦角 ($^\circ$)
AF材	1.9	1.8	0	40
AW材	1.8	1.4	1.0	37

3. 上部調整池付近の地質

上部調整池付近には、新第三系中新統の火成岩が主に分布する。上部調整池の基盤となる地層は笹の沢層（安山岩質火砕岩）であり、その上位に溪谷川層（流紋岩質火砕岩）および東本倶登層（安山岩、同質火砕岩）が分布する。

これらの地層は、堤体材料として使用する東本倶登層の安山岩の新鮮部を除いて、風化および熱水変質作用により全体的に軟質化しており、堤体基礎地盤位置には、笹の沢層および東本倶登層の風化部が主に分布する。

4. 堤体基礎地盤の設計

堤体基礎地盤の位置は、堤体の安定性、堤体材料必要量と材料賦存量のバランス、土工量の減少による工事費削減などを総合的に判断した結果、D級岩盤に設定することとした。

しかし、D級岩盤は電研式岩盤分類における最下位に位置付けられ、 C_L 級に満たない岩盤全般を指すことから、堤体基礎地盤の物性値設定などの設計を行うに当たっては、D級岩盤を D_H 級、 D_L 級に細分化する独自の基準を導入した。細分化に当たっては、電研式岩盤分類基準の考え方を踏襲し、肉眼での岩組織観察可否、指圧による変形有無など施工、品質管理時にも使用可能な明確なものとした。D級岩盤の細分化基準を表-2に示す。

表-2 D級岩盤細分化基準

岩級区分	岩 盤 分 類 基 準
D_H	風化、変質が弱い、褐色を帯びるが新鮮部の色調を残す。ルーペ、肉眼で岩組織の認識が可能。指圧により容易に変形しない。軟質だが、 D_L 級に比較して硬く割れ目が存在する部分あり。基本的に無水掘削だが、送水区間も存在する。
D_L	風化、変質が強い、黄褐色～茶褐色で新鮮部の色調を残さない。ルーペ、肉眼で岩組織の認識が不可能。指圧により容易に変形。軟質で割れ目が存在しない。ほとんど例外無く無水により掘削し、送水掘削ではコアの採取不可能。

表-2の基準で評価した D_H 級岩盤は、ボーリング調査時に実施した標準貫入試験結果との対応を検討すると、 $N=20$ 以上に相当することが確認された。したがって、堤体基礎地盤の物性値の設定においては $N=20$ を目安とした。

変形特性を把握するため、堤体基礎地盤に出現する岩種を対象として、平板載荷試験を実施した結果と実施位置における標準貫入試験結果の関係を図-4に示す。

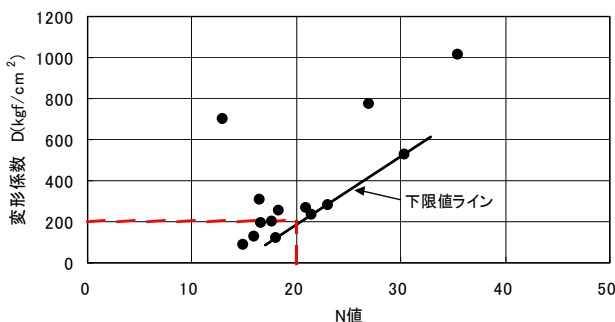


図-4 変形係数とN値の関係

図-4より、 D_H 級に相当する $N=20$ 以上では少なくとも変形係数 $D=200\text{kgf/cm}^2$ を有していると判断される。

また、強度特性を把握するため、堤体基礎地盤に出現する岩種を対象として、三軸圧縮試験を実施した結果と実施位置における標準貫入試験結果の関係を図-5および図-6に示す。

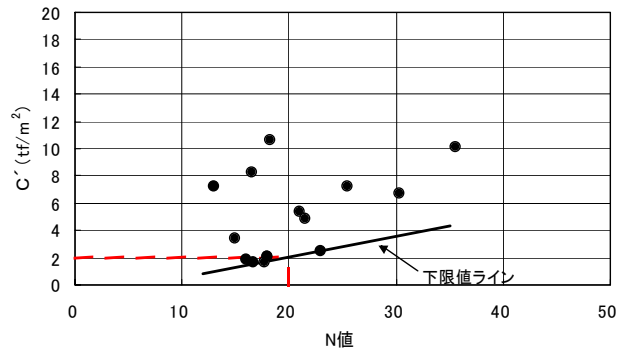


図-5 粘着力 c' とN値の関係

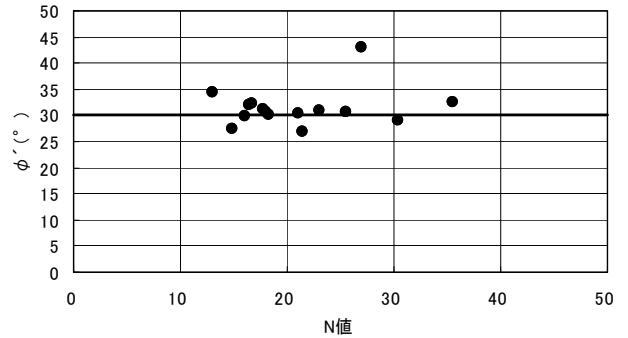


図-6 内部摩擦角 ϕ' とN値の関係

図-5より、 D_H 級に相当する $N=20$ 以上では少なくとも粘着力 $c'=2.0\text{tf/m}^2$ を有していると判断される。

また、図-6より、 $N=20$ 付近では内部摩擦角 $\phi'=30^\circ$ 以上の値が大多数であるが、一部 $\phi'=30^\circ$ 未満の値も存在する。 D_H 級に相当する $N=20$ 以上の試験結果を用いた、堤体基礎地盤に作用すると想定される垂直応力 40tf/m^2 以下の範囲における垂直応力とせん断強度の関係を図-7に示す。

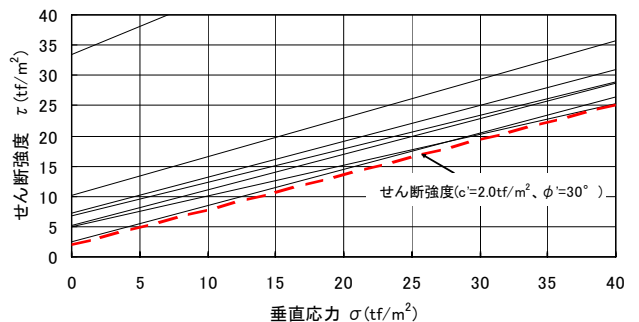


図-7 垂直応力とせん断強度の関係

図-7より、堤体基礎地盤に作用すると想定される垂直応力の範囲においては、 $c'=2.0\text{tf/m}^2$ 、 $\phi'=30^\circ$ と設定した場合のせん断強度を上回るものと判断される。

これらの試験結果を総合的に判断し、堤体基礎地盤の設計値は表-3に示す値に設定した。

表-3 堤体基礎地盤設計値

設計値		試験名	仕様
変形係数 D	$200\text{kgf/cm}^2 (19,620\text{kN/m}^2)$	平板載荷試験	$\phi 600\text{mm}$
粘着力 c'	$2.0\text{tf/m}^2 (19.62\text{kN/m}^2)$	三軸圧縮試験	CU-bar (有効応力)
内部摩擦角 ϕ'	30°		

堤体基礎地盤も含めた堤体の安定性については、建設省河川管理施設等構造令等の各種設計基準^{1)~5)}に準拠し、

震度法・修正震度法による検討を実施し、十分な安全率を有することを確認した。さらに、2次元静的 FEM 解析、2次元動的 FEM 解析（等価線形法）により、常時・地震時の挙動を推定し、十分な安定性を有することを確認し、堤体基礎地盤を D_H 級岩盤に設定することの妥当性確認している。

5. 堤体基礎地盤設定

堤体基礎地盤である D_H 級岩盤は、スレーキングを起しやすいことが事前の地質調査で明らかになっており、長期的な曝露により劣化の恐れがある。また、面積が 13.4 万 m^2 と広大であることから、堤体基礎地盤位置の設定のために、全域において平板載荷試験、三軸圧縮試験を実施し、物性値を確認することは効率的ではない。これらのことを考慮し、堤体基礎地盤位置の設定に当たっては、設計時の考え方と同様に N 値と設計値の相関関係を利用して、標準貫入試験結果を用いる方針とした。

堤体基礎地盤位置の設定の流れは図-8 に示すとおりである。調査・設計時に実施したボーリング調査（約 100m 格子）時の N 値を基に、基本設計基礎面（想定基礎面）を設定し、想定基礎面+3m 程度の標高まで一次掘削を行った後、一次掘削面上から追加ボーリング調査（40m 格子）を行い、 $N=20$ となる標高を平面的に補完し、詳細設計基礎面（確定基礎面）を設定した。

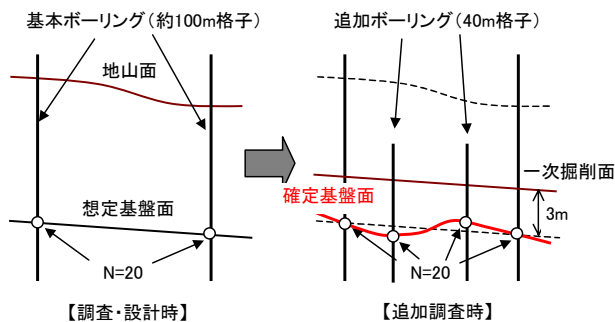


図-8 基礎地盤設定の流れ

なお、一次掘削面を想定基礎面+3m 程度の標高に設定したのは、別途実施した試験結果等を検討した以下の内容によるものである。

Liao-Whitman は、標準砂等を用いて実測した上載圧と N 値の関係から、有効上載圧 $1kgf/cm^2$ における補正 N 値を求めており、以下の式を示している⁶⁾。

$$N_1 = C_N * N \quad \dots \textcircled{1}$$

$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma_v}} \text{ or } \sqrt{\frac{98}{\sigma_v'}}$$

N : 補正 N 値 (有効上載圧 $1kgf/cm^2$ 又は $98kPa$ に相当)

N_1 : 実測 N 値 C_N : 補正係数

σ_v : 有効上載圧 (kgf/cm^2) σ_v' : 有効上載圧 (kPa)

①式で示される上載圧と N 値の関係および上部調整池における試験結果を図-9 に示す。①式は、上載圧が低減するほど、あるいは基の N 値が大きいものほど、 N 値の低減率が大きくなることを示しており、上部調整池における試験結果とも整合的である。また、試験結果によれば、上載圧約 $0.5kgf/cm^2$ に相当する土被り 3m 程度までは上載圧減少に伴う N 値の低減が小さいことがわかる。

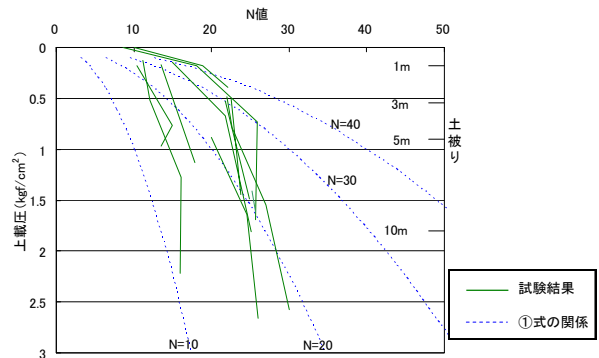


図-9 上載圧と N 値の関係

6. 堤体基礎地盤掘削

確定基礎面を設定した後、一次掘削面（確定基礎面+3m 程度）から確定基礎面まで掘削する必要がある。しかし、堤体基礎地盤が D_H 級岩盤であり、スレーキングを起しやすいことから、広範囲において確定基礎面までの掘削を行い、詳細な地質観察を行う一般的な流れでは、盛立までの間、暴露状態におかれる期間が長くなることによる劣化が懸念された。

そこで、掘削は確定基礎面+0.5~1m までの掘削、確定基礎面までの掘削の 2 段階に分けて行うこととした。確定基礎面上の厚さ 0.5~1m の未掘削層はカバーロックという位置付けであり、確定基礎面を直接的な降雨等から保護し、劣化を防ぐものである。

また、監督官庁による検査は、基礎地盤掘削の進捗に応じて設定した受検範囲に分布する地質、面積等を考慮し、確定基礎面を直接観察できる検査窓（1m×1m）を設けることで実施した。堤体基礎地盤に出現する笹の沢層安山岩質火砕岩（Ss-apy）および東本俱登層安山岩（Hp-an1）の D_H 級岩盤の事例を写真-1、写真-2 に示す。



写真-1 Ss-apy (D_H 級)



写真-2 Hp-an1 (D_H 級)

監督官庁による検査後、確定基礎面までの掘削（カバーロック掘削）に当たっては、図-10 に示すように、1 日・1 方の堤体材料盛立施工能力が約 2,000 m^3 （一層目；AF 層 1m 盛立）であることを勘案し、1 区画約 2,000 m^2 の施工区画を設けた。施工は、カバーロック掘削、基礎地盤品質確認、堤体基礎ドレーン施工、一層目の堤体材料盛立のサイクルで先に定めた施工区画ごとに行った。

カバーロック掘削は、GPS を搭載したブルドーザにより掘削土砂を積込機械（3.3 m^3 級バックホウ）近辺に集土し、ブルドーザの排土板によりキャタピラーの轍を整形して仕上げた。基礎地盤の出来形管理基準は標高差 $\pm 10cm$ と定めているが情報化（IT）施工管理システムの導入⁷⁾により、夜間でも十分基準を満足する精度での施工が可能であったため、本サイクルの施工は、通常 1.5 日程度で行うことが可能となった。

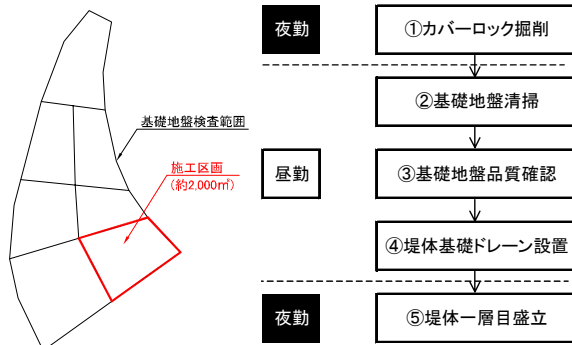


図-10 カバーロック掘削から盛立のまで流れ

これにより、堤体基礎地盤を曝露するのは、基礎地盤品質確認時および堤体基礎ドレーン設置時だけとなり、懸念されていた直接的な降雨等による堤体基礎地盤の劣化を防止しながら施工することができた。

7. 基礎地盤品質確認結果

図-10 に示した工程のうち、③基礎地盤品質確認の内容について以下に記載する。

基礎地盤品質確認は、確定基盤面を直接目視等により確認する最終的な品質管理と位置付けられ、重要な工程である。また、曝露時間を最小限にするため、確認後は堤体基礎ドレーンの設置、堤体材料の盛立を速やかに行うことから、効率的に品質確認を行う必要があった。これらの状況を考慮し、施工区画ごとに表-4 の内容について、目視観察等で確認し、確認記録を整理した。

表-4 基礎地盤品質確認内容

項 目	内 容
岩 級	カバーロック撤去範囲全体がD _H 級岩盤であることを目視・指触等により判定する。(目視判定基準は表-2に従う)
弱 層	D _H 級に満たない弱層部の有無を確認する。弱層部が存在する場合は、さらに掘削し再度目視による判定を行うことを基本とする。
断 層	断層の有無を確認する。断層部が存在する場合は、破碎帯の規模を特定し、その規模に応じた対処を行う。
岩 塊	基盤面に存在する岩塊の有無を確認する。存在する場合は、岩塊の高さを測定し、50cmを超える場合は、破碎処理を行う。
湧 水	湧水の有無を確認する。存在する場合は、湧水箇所を特定のうえ、適切な位置に堤体基礎ドレーンを設置する。

基礎地盤品質確認の結果、基礎地盤全域(約 13.4 万 m²)の大部分において確定基盤面における岩級がD_H级以上であると判定され、40m 格子で実施した標準貫入試験結果による確定基盤面の設定精度が十分なものであることが検証された。



写真-3 カバーロック掘削後の状況

断層については、部分的に存在を確認したものの、破碎帯の規模は小さく、破碎によって粘土化した弱層幅は数十 cm の規模であることから、堤体の安定性には影響しないと判断し、特段の処置は実施していない。また、部分的に存在した湧水発生箇所には追加の堤体基礎ドレーンを設置し、岩塊部は 50cm 以下まで破碎し、堤体一層目の品質に影響を与えないよう配慮した。

弱層については、小規模なものについては、追加掘削を行ったうえで再度目視判定を行い、不陸を碎石で置換する方法を採用した。また、幅が十数 m の比較的規模の大きいものについては、現地発生材を用いたセメント改良土で置換し、改良体が堤体基礎地盤の設計値 ($c'=2.0\text{tf/m}^2$, $\phi=30^\circ$) と同等以上であることを確認した。

コンクリート重力式ダムなど、比較的硬質な岩盤を基礎地盤とする場合、基礎地盤に存在する弱層や断層は、その規模に応じてコンクリートにより改良、処理することが一般的である。しかし、当地点においては、堤体基礎地盤がD_H級岩盤であることから、コンクリートによる改良・処理を実施すると、周辺の岩盤より硬い材料となり、周辺の沈下と調和せず、不同沈下の要因となることが懸念される。今回採用したセメント改良土置換による施工は、上記事項を踏まえたうえで、堤体一層目盛立に当たってのトラフィカビリティをD_H級岩盤上と同様なレベルに向上させるとともに、盛立時、盛立後の局所的な不同沈下の抑制が期待されるものである。

8. まとめ

以下に本報告の要約を列挙する。

- 上部調整池の堤体基礎地盤 (D_H 級岩盤) の変形特性および強度特性は N 値との相関が得られ、N=20 以上に相当すると判断されることから、N 値を基準として設計値を設定した。
- 堤体基礎地盤の詳細設計面 (確定基盤面) は、設計時と同様に N 値を基準にすることにより、効率的に設定することが可能となった。
- 確定基盤面までの掘削においては、1 日の施工能力に応じた区画を設定し、掘削、品質管理、堤体材料盛立のサイクルを構築することにより、長期曝露による基礎地盤の劣化を防止しながらの施工が可能となった。
- 40m 格子で実施した標準貫入試験による N 値を基準に設定した確定基盤面は、掘削後の目視判定により、ほぼ全域が想定した D_H 級岩盤であることが確認され、設定精度は十分であることが検証された。

【参考文献】

- 建設省；河川管理施設等構造令，1993.5
- 日本河川協会；建設省河川砂防基準 (案)，1997.12
- 通商産業省；発電水力設備に関する技術基準，1997.3
- 日本大ダム会議；ダム設計基準，1978.8
- 国土開発技術研究センター；フィルダムの耐震設計指針 (案)；1991.6
- (社) 地盤工学会；地盤調査の方法と解説，2004.6
- 菅野義人, 太田一広, 高野準, 江藤隆志；大規模アスファルトフェーシングダム工事への情報化施工 (IT 施工) の適用 (その 2)，土木学会北海道支部論文報告集, 第 59 号, VI-3, p.862～865, 2003.2.