

物理探査の連続計測による斜面地盤の工学的評価手法に関する研究

楠見晴重、中村 真

関西大学環境都市工学部都市システム工学科

概要：近年、老朽化した法面の健全性評価において、種々の物理探査手法が注目されている。しかしながら、単独の物理探査手法によって得られる物理量では地山状態を解釈するのに限界があり、複数の物理探査手法を用いて総合的に解釈することが望まれる。そこで本研究では、同一斜面において複数の物理探査を用いて連続的に計測し、計測された個々の物理量もしくはこれらを組合せた複合評価手法を用いて、それらの時系列解析による健全性評価手法を構築することを目的とする。

1. はじめに

1970年代まで、我が国で多く施工された吹付けコンクリートによる法面保護工は、施工後30年以上経過し、吹付けコンクリートの老朽化やコンクリート背面の空洞、あるいは地山の風化による法面の崩壊などの問題が顕在化している。現状では、老朽化した法面に対しては、道路巡回または道路防災点検で防災カルテなどを作成し、詳細調査の必要性があると判断された場合には、適宜ボーリング調査や物理探査などを実施して対策工の検討を実施するという流れで法面の管理を行っている。しかしながら、ボーリング調査は足場を必要とし費用も高額となり、法面の全体像を捉えるには複数の調査が必要となる。また物理探査で得られる物理量と対策工の設計に必要な背面地盤の性状の定量的な関係は、十分解明されているとは言えない。

そこで著者らは、和歌山県の国道42号線の吹付け斜面において、複数の物理探査を実施しそれらの適用性と課題を検討してきた²⁾。現地実証試験の結果、今後の法面維持管理において、多くの

地盤情報を物理探査によって得られることがわかったが、長期モニタリングへの適用性の検証が必要であるとの課題を得た。

そこで本研究では、京都府福知山市の国道9号線の主として老朽化した吹付け法面の斜面内部の地盤状況を種々の物理探査法を用いて連続的に計測し、計測された物理量もしくは変換解析等によって得られた複数の地盤物性値を用いて斜面内部におけるそれらの時系列解析を行い、斜面の性能特性について検討するとともに、斜面の健全性評価手法を構築することを目的としている。

2. 老朽化吹付け法面の現状

老朽化吹付け法面の一例を写真-1に示す。法面では建設直後から地下水の出入りの繰り返し等、様々な要因によって地盤の強度が低下し、健全性を損なっていくことが考えられる。これらの劣化過程は、目に見えない法面内部で進行するため、強度低下が相当量進行し地表部に変状として現れるまで確認できないのが現状である。



はらみ出しによるモルタルの亀裂

モルタルの剥離

土砂化による崩壊

写真-1 老朽化吹付け法面の現状

道路防災総点検等では、表面に現れる現象（亀裂や湧水など）を目視で確認し、簡易的な計測により進行状況を確認するもので、法面内部の状況把握までには至っていない。これら目に見えない劣化状況を、物理探査により可視化することで、正確、客観的に把握することができれば、それに応じた対策工を実施し、未然に災害発生を防止するとともに、人的・経済的損失を最小限に抑え、かつ既設道路の延命にもつながることが期待される。

3. 調査地点の地質概要

本研究対象箇所は、京都府福知山市の国道9号線の南側に隣接した切土法面であり、長さ200数十m、高さ約50mの比較的規模の大きな法面である。法面の中西部に小規模な凹地地形が存在し、これを境に、東に規模の大きな吹付け法面、西側に規模の小さな無支保法面が分布する。法面形状から、写真-2に示す吹付け法面のA地区および写真-3に示す無支保法面のB地区に区分する。

当地点の地質は、中生代三畳紀～ジュラ紀の丹波層群であり、調査地周辺では砂岩あるいは砂岩頁岩互層が分布し、走向は東西方向で30～50°の傾斜角度を示す。一方、局所的ではあるものの、砂岩・砂岩頁岩互層中に緑色岩（玄武岩質溶岩主体）が確認されている。

4. 現地調査結果

図-1に各種物理探査結果の一例を示す。調査は、平成20年7月から平成22年8月までで夏冬を主に5回実施し、吹付けコンクリート法面を中心に背面地山の劣化状況や地下水位等の含水状態の変化を可視化することを試みた。

その結果、現状ではあまり時間が経過しておらず、背面地山の劣化状況まで捉えきることはできていないが、地下水位等の含水状態の差異については評価することは可能であるとの見通しを得た。

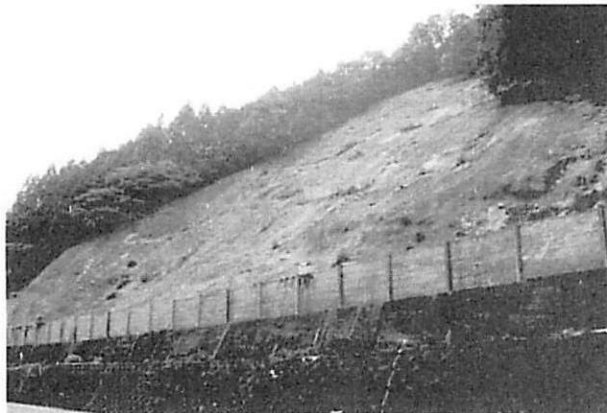


写真-2 A地区現地写真

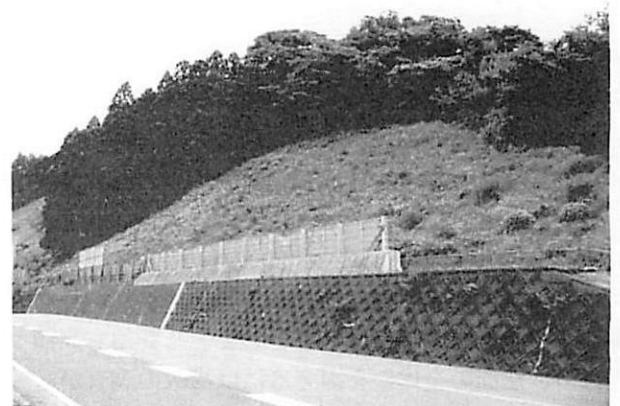


写真-3 B地区現地写真

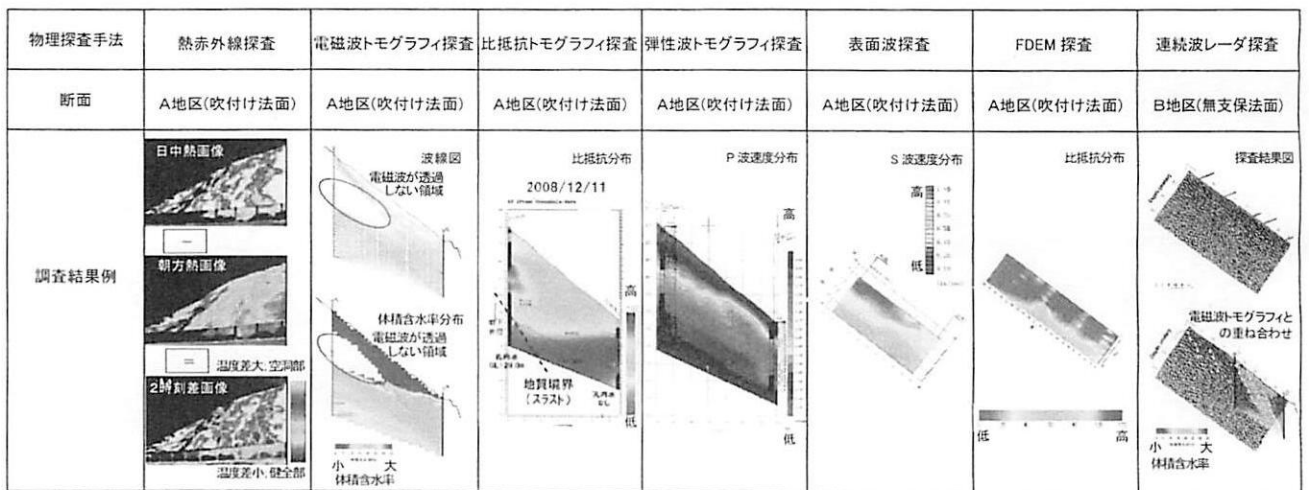


図-1 各種物理探査結果の一例

5. 複合解析による地質構造評価の試み

著者らは、弾性波 P 波速度と比抵抗から、地盤物性値である間隙率と飽和度に変換して地盤評価する手法³⁾を提案しているが、2 種の物理量でも十分とは言えず、さらに異なる物理量で複合評価できることが望ましい。そこで本研究では、情報処理工学の分野で幅広く用いられている自己組織化マップ (Self-Organizing Maps : SOM)^{4), 5)}に着目し、複数の物理探査データのクラスター分類評価を試み、その適用性を検討した。

図-2 に、本検討で用いる B 地区において 2008 年夏に計測された物理探査の結果を示す。P 波速度は深度が深くなるにしたがって地盤を伝播する速度が速くなる傾向を示す結果となった。比抵抗分布においては、地表部および B-4 孔の深度 4m 以下の低比抵抗域で、地下水位下の飽和状態が推測できる。S 波速度においては、深度 6m 程度までの 400m/sec 以下の部分は崩積土または強風化の部分と推定される。電磁波速度は、伝播する電磁波速度が速ければ低含水率、遅ければ高含水率という関係性を有している。つまり、法肩部の地表付近およびボーリング孔内側面付近で高い含水状態を示していることが分かる。これらの結果のうち変換解析では P 波速度と比抵抗の 2 種類のデータを、SOM 解析では 4 種類すべてのデータを用いて検討を実施した。

5.1 変換解析による地質評価

弾性波 P 波速度と比抵抗は、それぞれ飽和度と間隙率との関係を有することから、飽和度と間隙率をパラメータとして弾性波 P 波速度と比抵抗を関係付けることができる。弾性波 P 波速度については式(1)に示す Wyllie⁶⁾の式が、比抵抗については式(2)に示す Archie⁷⁾の式が一般に知られている。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{1-\phi}{V_m} + \frac{\phi \cdot Sr}{V_f} + \frac{\phi \cdot (1-Sr)}{V_a} \quad (1)$$

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot Sr^{-n} \quad (2)$$

ここに、 V_p は岩盤の弾性波速度、 V_m は岩石実質部の弾性波速度、 V_f は間隙水の弾性波速度、 V_a は間隙空気弾性波速度、 ϕ は間隙率、 Sr は飽和度、 ρ は岩盤実質部の比抵抗値、 a, m, n は地質の違いによる係数である。

Archie らの式については、既往の研究⁸⁾によれば、この式は砂層ではよく適合するが、岩盤でありよく適合しないとされているので、本システムでは式(3)の並列回路モデル⁹⁾を採用するものとした。

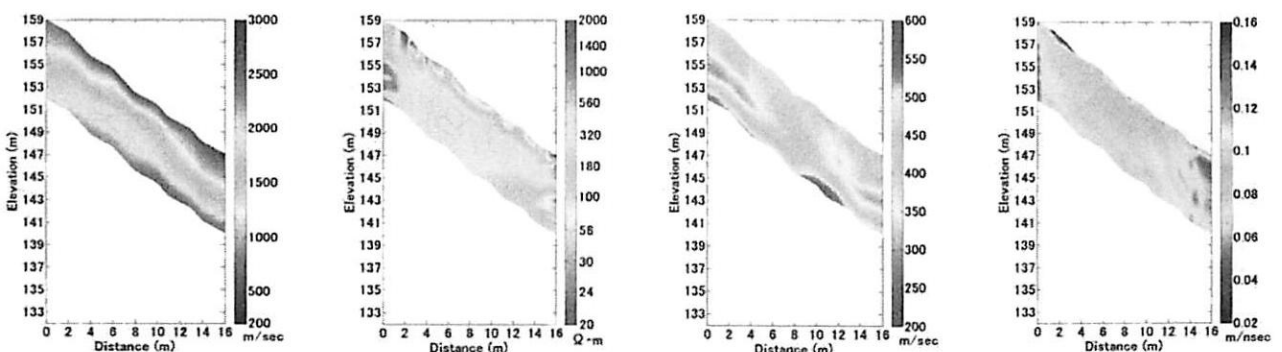
$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F \cdot \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} \quad (3)$$

ここに、 F は地層比抵抗係数($a \cdot \phi^{-m} Sr^n$)、 ρ_c は粘土等による間隙中の伝導性粒子の比抵抗、 ρ_0 は岩石実質部の比抵抗である。

式(1)および式(3)は、間隙率 ϕ と飽和度 Sr を変換して、図-3 に示すような、ひとつの岩盤要素 (小要素に分割したセル) について、それぞれ次の連立した方程式として表される。

また、変換解析に用いるパラメーターは、検討地点におけるボーリングコアまたは同地点から採取された岩塊を用いて室内試験を行い評価することができる。本研究において室内試験によって得られたパラメータを表-1 に示す。

したがって、地山の比抵抗と弾性波 P 波速度、そして変換パラメータが既知であれば、式(4)と式(5)から未知の間隙率と飽和度を求めることができる。



(a) P波速度分布

(b) 比抵抗分布

(c) S波速度分布

(d) 電磁波速度分布

図-2 B地区において2008年夏に計測された物理探査の結果

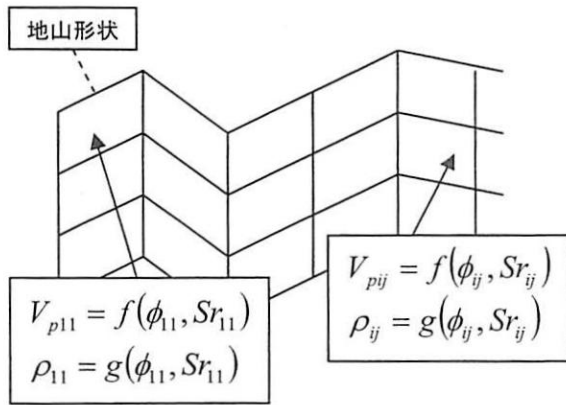


図-3 変換解析における岩盤要素のイメージ

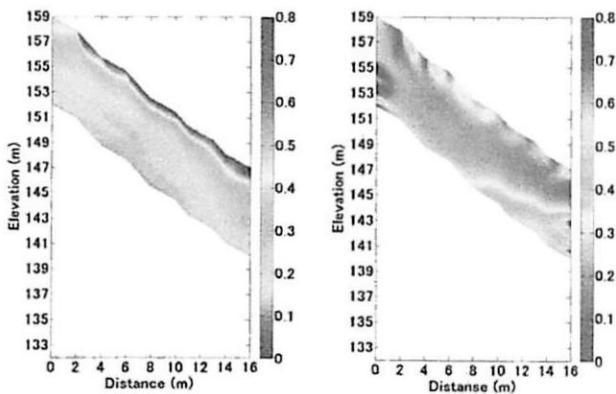
表-1 変換解析に用いたパラメーター

岩種		緑色岩	砂岩頁岩互層	砂岩
変換パラメーター	a	0.43	0.08	0.10
	m	1.04	1.32	1.61
	n	1.64	1.72	2.53
P波速度	V_m (m/sec)	6400	5700	4000
	V_f (m/sec)	1500	1500	1500
	V_a (m/sec)	330	330	330
比抵抗	ρ_w (Ωm)	50	50	50
	ρ_c (Ωm)	1600	1150	1600

$$V_p = f(\phi, Sr) \quad (4)$$

$$\rho = g(\phi, Sr) \quad (5)$$

変換解析によって得られた間隙率および飽和度の結果を図-4に示す。間隙率分布からは表層付近の風化の状態が、飽和度分布からは EL.145m 以深の含水状態が高いことから地下水の存在が容易に予見できるようになった。



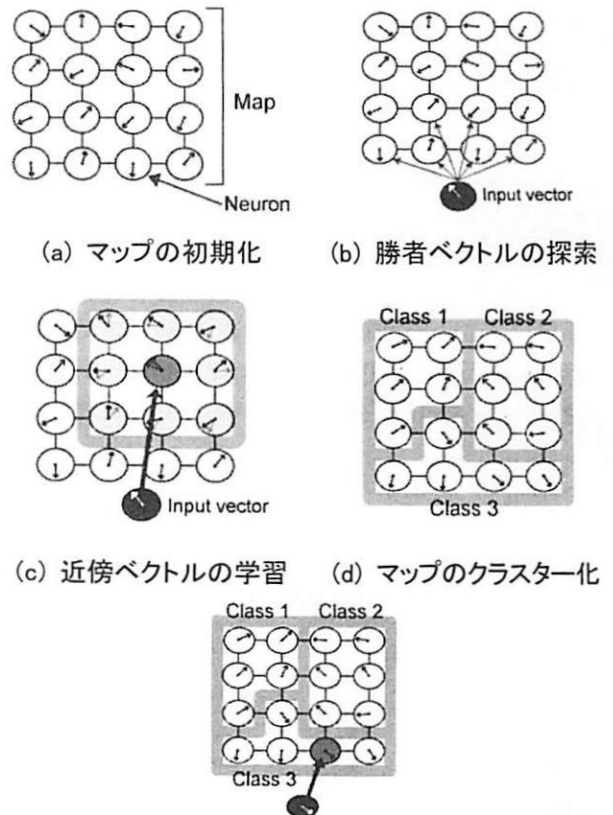
(a) 間隙率分布 (b) 飽和度分布

図-4 変換解析による結果

5.2 自己組織化マップ(SOM)の概要

SOM は、ヘルシンキ大学のコホネンによって1979年に発表された教師なしニューラルネットワークの一種である。SOMの大きな特徴は、物理量の異なる高次元データ間の非線形な統計学的関係を、簡単な幾何学的関係に変換することができることである。具体的には、類似した特徴を持つデータは近くに、異なった特徴を持つデータは遠くに配置されたマップを作成し、高次元のデータを二次元平面に写像することができる。作成したマップ上の初期クラスター候補群に対してクラスター分類を行い、各クラスターの特徴を定性的に読み取ることで複合的な評価を行う。図-5にSOMの計算過程を示す。また本研究では、客観的にクラスター分類を行うために、k-means法⁸⁾を用いた。

SOMによって作成された各物理探査データのマップおよびk-means法によって分類されたクラスター分布を図-6に、各クラスターが有する物理量の相対的な大きさを「●」の数で表した相関表を表-2に、クラスター分類とボーリング結果との比較を図-7に示す。

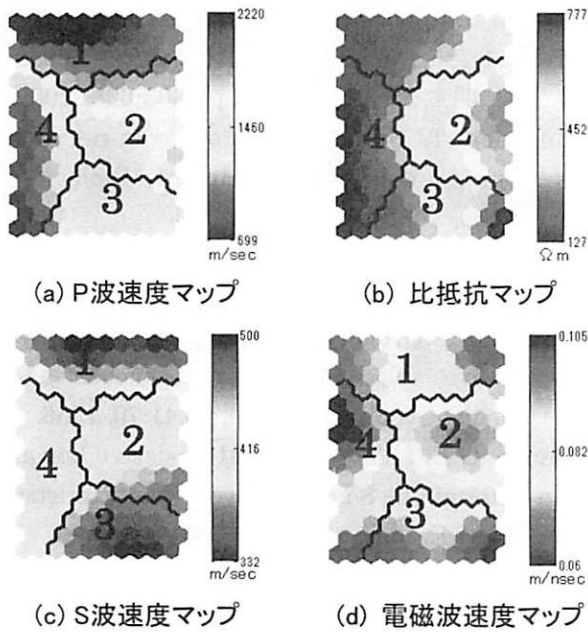


(a) マップの初期化 (b) 勝者ベクトルの探索

(c) 近傍ベクトルの学習 (d) マップのクラスター化

(e) 入力ベクトルのクラスター化

図-5 SOMの計算過程



(e) k-means法によるクラスター分布

図-6 各物理探査データのマップとクラスター分布図

表-2 各クラスターが有する物理量の相対的な大きさ

Cluster	P波速度	比抵抗	S波速度	電磁波速度
1	●●●	●	●●●	●●
2	●●	●●	●●	●●●
3	●●	●●●	●	●
4	●	●	●●	●●●

表-2 および図-7 から、クラスター4 は、岩級区分が D~CL 級、RQD が 0% で、特に P 波速度が低く、さらに変換解析結果から間隙率が特に高いことが分かり、風化の影響が強い領域であると考えられる。クラスター3 とクラスター2 は共に岩級区分が CL~CM 級、RQD が 0~46% に属し、間隙率分布も同程度であるが、クラスター3 は特に S 波速度および電磁波速度が低く、飽和度が 0.16~0.25 と全体的に低いことから、亀裂が多く透水性の高い領域であると考えられる。クラスター2 は、特に電磁波速度および比抵抗が高く、さらに飽和度が 0.06~0.80 と局所的に高い箇所も

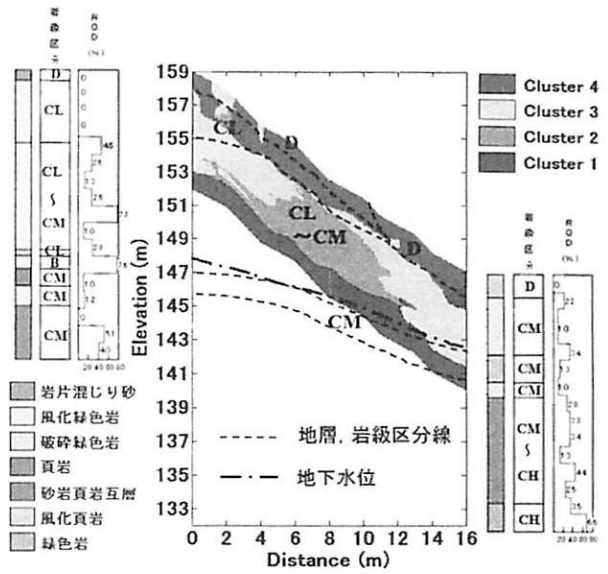


図-7 クラスター分類とボーリング結果との比較

あるが、平均値が 0.24 と全体的に低いことから、透水性が比較的高い領域であると考えられる。クラスター1 は、岩級区分が概ね CM 級、RQD が 13~46%、特に電磁波速度および比抵抗が低い。また、間隙率が低く、比較的硬質な岩盤であると推測できるが、同じクラスター1 でも飽和度が 0.70~0.80 と全体的に高い領域においては、地下水による含水状態の高い領域である。一方、地下水より上位に位置している飽和度が 0.04~0.40 と比較的低い領域では、水みちの存在が推測できる。

以上より、SOM と k-means 法を組み合わせたクラスター分類結果と、変換解析による地盤物性値を検討することで、詳細なクラスター評価が可能となり、さらにボーリングによる地質情報とも概合的であることから、本研究で提案する手法の有効性が認められた。

6. まとめ

本研究では、老朽化法面の評価手法として、種々の物理探査法を用いて夏季と冬季を主に連続的に計測を行い、各物理探査において斜面内部の地盤状況を評価する方法が有効であることを確認した。

今後も引続き、時系列解析における法面の変状把握の可能性の検討を行うとともに、各手法単独もしくは組み合わせて健全度を判定する手法の構築に向けて検討を進めている。

謝辞

本報告は、新都市社会技術融合創造研究会における物理探査の連続計測による斜面地盤の工学的評価手法に関する研究の成果の一部である。現地調査に際しては、近畿地方整備局福知山河川国道事務所ならびに委員各位のご協力を賜りました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 物理探査学会・斜面等健全性検討研究委員会編；老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き，鹿島出版会，pp.25-29，2006.
- 2) 山本剛・満下淳二・楠見晴重・小山倫史・松岡俊文・大西有三；道路法面管理と物理探査，最新の物理探査適用事例集，物理探査学会創立 60 周年記念実行委員会，pp.87-96，2008.
- 3) 楠見晴重・山本剛・中村真；比抵抗・弾性波併用探査による老朽化法面の工学的評価法，第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.603-608，2009.
- 4) Kohonen, T.: Simultaneous order in nervous nets from a functional standpoint, *Biological Cybernetics*, Vol.50, pp35-41, 1982.
- 5) Kohonen, T.: *Self-Organization and Associative Memory*, Heidelberg: Springer, 1984.
- 6) Wyllie, M.R.Gregoty, A.R. and Gardner, L.W.: Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21(1), pp.41-70, 1956.
- 7) Archie, G.E. : The Electrical Resistive Log as Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Trans.A.I.M.E.* Vol.146, pp.54-62. 1976.
- 8) 宮本定明；クラスター分析入門 ファジィクラスタリングの理論と応用，森北出版，1999.