

# 地中レーダの海岸平野研究への応用

村上 文敏<sup>1)</sup>・田村 亨<sup>1)</sup>・七山 太<sup>1)</sup>・齋藤 文紀<sup>1)</sup>・渡辺 和明<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

九十九里浜平野や仙台平野をはじめとする外洋に面した海岸平野は、波浪の堆積作用が卓越し、過去約6千年間において海岸線の前進と共に形成されてきました。これらの海岸平野に共通するのは、海岸侵食による海浜の消失と近い将来予想される海水準上昇に伴って起こるであろうさまざまな問題です。その他に津波や高潮等に対する防護対策も必要です。このような場所では、海岸保全のために離岸堤の設置による堆積物の移動の阻止、養浜による海浜の復元等いろいろな手当がなされているものの根本的な解決策となっていないのが現状です。平成12年に施行された改正海岸法では、それまでの津波・高潮等に対する防護のための海岸保全実施から、防護・環境・利用の調和のとれた総合的な海岸管理制度の創設へと見直しが行われました。

このような総合的な海岸管理のためには、海岸の現況把握に加えて過去どのような変遷を経て現在の海岸になったかを高時間分解能で、なおかつ3次元的に知ることが必要です。九十九里浜平野や仙台平野などでは、ボーリングによって得られた柱状コア試料の堆積相解析、放射性炭素年代を使用した年代測定から過去6千年間の変遷が明らかにされてきました(例えば田村・増田, 2004)。それにより九十九里浜平野では、年平均約1.5mの速度で海岸が前進したことが分かっています。しかし柱状コア試料から得られる結果は点情報なので、過去の海岸がどのような地形であったのかまではわかっていません。それぞれのボーリング地点を結んで地下の連続的断面を得ることができれば過去の海岸がいつ頃どのような地形をしていたのか、またどのように前進していったのかを知ることができます。地下の連続断面を得

る方法としていろいろな物理探査手法がありますが、柱状コア試料の解析結果と対比させるためには、深度方向へ少なくとも数十cmの分解能が必要です。我々はこのような条件を満たす手法として地中レーダに着目し、2004年に装置を導入しました。

これまでに、いろいろなタイプの海岸平野において地中レーダ調査を行い、その調査手法、データ処理・解析手法の開発と柱状コア試料解析結果を統合した総合解析手法の確立を目指してきました。ここでは海岸平野調査における地中レーダ調査手法の概要と得られた結果の一部を紹介します。

## 2. 装置の概要

地中レーダは地下構造を連続断面としてイメージングする装置であり、その英語名であるGround Penetrating Radarの頭文字をとってGPRと略称されます。GPRでは、通常15MHz~1GHzの短波(HF)~極超短波(UHF)の周波数帯の電波が使用されます。GPRは電波の地中における透過と反射の性質を用いた装置であり、現在では土木・地質・考古学・雪氷学等多く分野で利用されています。

GPRは送信アンテナと受信アンテナがあり、送信アンテナからは地表面から地下方向へ電波が発射されます。電波は地層中を伝わり、互いに電気的特性の異なる物質が接する地層境界で反射・屈折が生じ、反射波の一部が地表面の受信アンテナで受信されます。電波が発射されてから受信されるまでの往復時間と地層の電波に対する速度から反射境界までの深度が分かります。また、反射境界をつくる2つの地層の電気的物性の違いの大きさと、反射境界の形状によって反射波の振幅と形状が異なります。電気的物性の中でGPRにとって最も重要なのは比誘電率で

1) 産総研 地質情報研究部門  
2) 産総研 地質調査情報センター

キーワード: 地中レーダ, 海岸平野, 調査手法, 弓ヶ浜半島, 三保半島

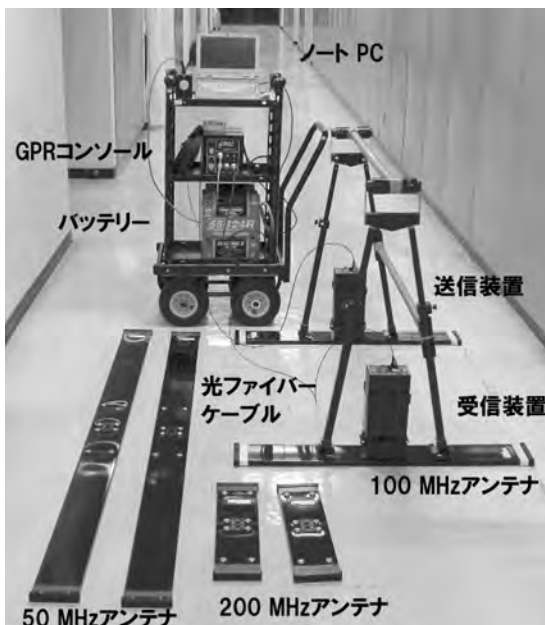
第1表 代表的な堆積物, 岩石と空気・水の電気物性値 (Davis and Annan, 1989).

物質	比誘電率	導電率 (mS/M)	速度 (m/ns)	減衰率 (dB/m)
空気	1	0	0.3	0
清水	80	0.5	0.033	0.1
海水	80	30000	0.01	1000
乾燥砂	3-5	0.01	0.15	0.01
浸潤砂	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
石灰岩	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
シルト	5-30	1-100	0.07	1-100
粘土	4-40	2-1000	0.06	1-300
花崗岩	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
頁岩	5-15	1-100	0.09	1-100
乾燥塩	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
氷	3-4	0.01	0.16	0.01

す。第1表は水および代表的な堆積物あるいは岩石の比誘電率, 導電率, 速度, 電波の減衰率を示します。減衰率が大きいほどその物質内における電波のエネルギー減衰が大きくなるために探査深度は小さくなってしまいます。

GPRが堆積学的調査に本格的に使用されだしたのは1980年代後半～1990年代初期の頃です。Davis and Annan (1989)は, GPRの原理, 手法, データ解釈等の概要を述べ, 地質学的調査へのいくつかの例を示しながらGPRの能力と応用範囲の広さを示しました。Jol and Smith (1991)とSmith and Jol (1992)は, 湖岸に発達するデルタの地下構造調査にGPRを使用し, 実際に有用であることを示しました。Leatherman (1987)は, GPRをバリア島の調査に使用しその能力の高さを示しました。GPRが海岸平野の調査に本格的に使用されるようになったのは1990年以降からです。

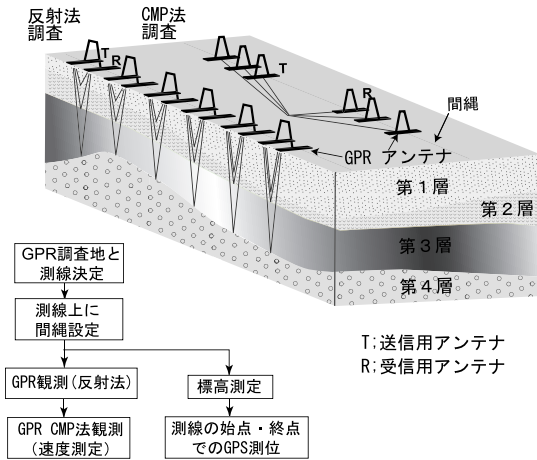
我々が使用しているGPR装置は, カナダのSensors & Software社製のPulse EKKO 100という装置です(第1図)。この装置は, アンシールドタイプのバイスタティックアンテナを使用しています。アンテナがシールドされていないので外部からの雑音を拾いやすい弱点がありますが, アンテナ重量が軽いために持ち運びやすく起伏の連続するような足場の良くない場所でも



第1図 pulse EKKO 100地中レーダ装置。

アンテナは, バイスタティックなアンシールドタイプであり, 周波数50MHz, 100MHz, 200MHzの3種類を目的に応じて使い分ける。送信装置, 受信装置は100MHzアンテナ上に設置されており, これらの装置とコンソールは外部ノイズの影響を避けるために光ファイバーケーブルにより接続されている。送受信アンテナは, ハンドルとスペースバーにより一定間隔に保たれる。その間隔は100 MHzアンテナは1m, 200MHzアンテナは0.5m, 50MHzアンテナは2mである。

調査ができる利点があります。送信・受信アンテナにはそれぞれバッテリーを内蔵するモジュールが装着されています。コンソールからのトリガ信号を受けると, 送信アンテナ上のモジュールはアンテナにパルス電力を供給し電波が送信されます。地中を伝搬した電波は電気物性の異なる地層境界で反射し, その反射信号は受信アンテナによって受信されます。反射信号は, 受信アンテナ上のモジュール内でデジタル信号に変換されコンソールに送られます。アンテナ上のモジュールとコンソールの信号の送受信には, 光ファイバーケーブルが使用されています。光信号を使用することにより, アンテナ-コンソール間の外部からの電氣的雑音の影響をなくすことができます。観測条件はすべてノートPCのGPR用アプリケーションソフト上で設定され, 反射信号は最終的にノートPCによりロ



第2図 地中レーダによる調査概念図。

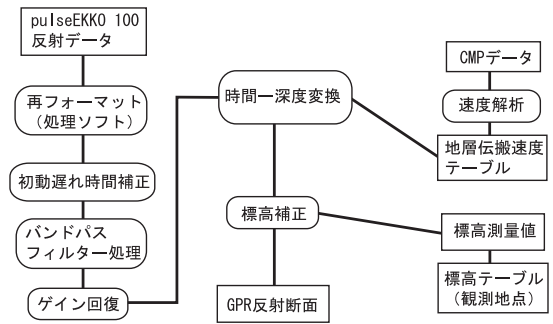
GPR反射法観測では、間縄上を一定間隔(100 MHzアンテナの場合0.25m)で送受信アンテナを移動しながら地層境界からの反射波を受信する。CMP法観測では、間縄上を送受信アンテナを一定間隔で互いに逆方向へ移動しながら地層境界からの反射波を受信し、後処理により送受信アンテナ間の走時曲線から地層の速度を求める。

ギングされます。

### 3. 調査方法とデータ処理

第2図は調査の概略と手順を示します。最初にGPR調査地点とそこでの測線を決め、次に測線上に間縄(あるいは巻き尺)を伸ばします。GPR反射法観測では、使用するアンテナの周波数によってGPR測点間隔を変えます。例えば100MHzアンテナ使用時には、通常0.25m毎にGPR反射データを取得します。得られるGPR反射データは時間断面なので、地層の速度情報を用いて深度データに変換します。そのために測線上の代表的な地点でCMP(Common Mid Point)法観測を行います。CMP法はワイドアングル法と呼ばれることもあります。GPR観測と平行して測量を行います。GPR測線位置決定はスタティックGPS測位で行い、標高測量はオートレベルあるいはトータルステーションを使用します。標高値は深度断面に変換されたGPR断面を標高補正するために使用します。

第3図はGPRデータの処理フローを示します。我々はGPR処理ソフトとしてUSAのGeopallel Science社のSeismic Processing Workshopあるいはドイツの



第3図 地中レーダによって得られたデータの処理フロー。

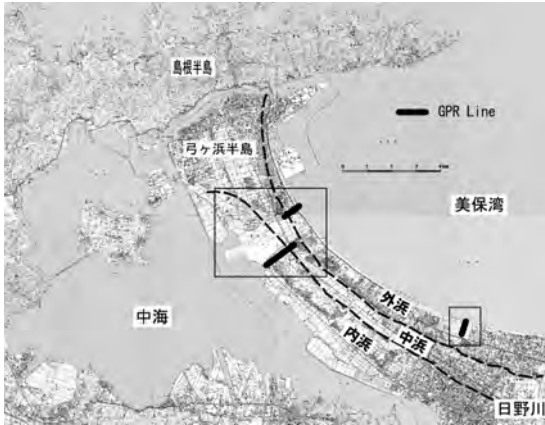
Sandmire社のReflexwを使用しています。最初にGPRデータのフォーマット変換により処理ソフトのデータ形式に変換します。バンドパスフィルター処理によりGPR反射信号から低周波成分および高周波成分を除去します。通常、より深い地層からの反射信号は減衰し微弱なので、ゲイン調整により増幅します。この段階では、GPR反射断面は時間断面ですので各地層間の速度を求めて深度断面に変換する必要があります。そのために、CMP法によって得られたGPRデータから速度解析を行い各地層境界間の平均速度表を作成し、時間断面から深度断面に変換します。深度変換されたGPR断面をスタティック補正(標高補正)することにより地表面の起伏を与えることができます。このような処理を行うことにより解釈のためのGPR断面を得ることができます。

### 4. 調査結果の例

GPRを2004年9月に導入して以来さまざまな場所で調査を行ってきました。これまでの調査結果の中から、本稿では弓ヶ浜半島と三保半島の波浪卓越型海岸平野におけるGPR調査結果の一部について紹介します。

#### (1) 弓ヶ浜半島

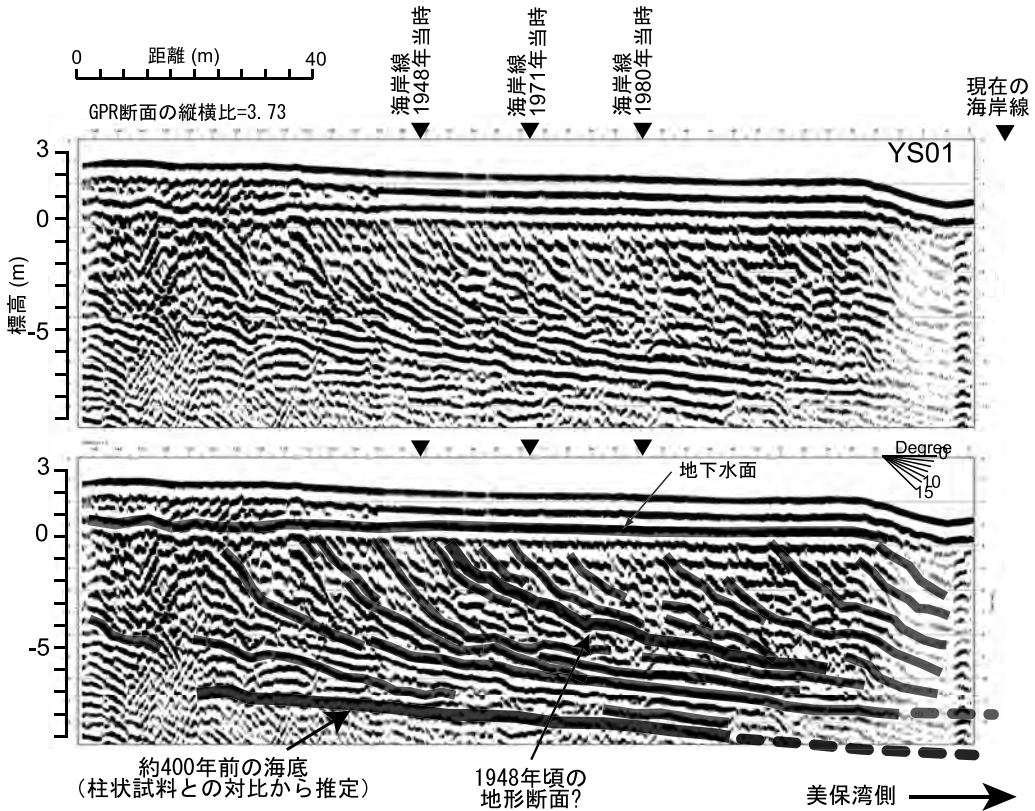
鳥取県西部に位置する弓ヶ浜半島は、長さ約17km、幅約4kmの砂州です。弓ヶ浜半島の地形は、半島に分布する浜堤と堤間低地の配列や砂丘の分布等の地形的特徴から、中海から美保湾に向かって内浜、中浜、外浜の3帯に区分されています(貞方, 1991)。これまで弓ヶ浜半島の地形発達は、主として



第4図 弓ヶ浜半島における地中レーダ測線位置。地形図は国土地理院発行の2万5千分の1地形図を使用した。調査は、米子空港付近において半島を横断する方向で行った。第5図に示すGPR断面の測線は、美保湾側の海浜に位置する。

地形とボーリングコアによる層序や表層堆積物の分析から論じられていますが(例えば, 貞方, 1991), その地下構造を連続断面としてとらえた例はありません。我々は、弓ヶ浜半島の地形発達を地下構造の連続断面から解析することを目的として、GPR調査を2005年6月に行いました。調査は弓ヶ浜半島を横断する方向に3カ所で行い、その総測線長は約2.2kmです(第4図)。

第5図は現在の海浜の前浜-後浜域で得られたGPR断面です。弓ヶ浜半島東部の皆生温泉付近では海岸侵食が進んでいますが、本断面位置付近では約60年間に海岸線が約90m前進したことが知られています(原口ほか, 2004)。この地点ではジオスライサー調査が行われており、その解析結果(原口ほか, 2004)とGPR断面との対比を行った結果、断面中の-6~-8mに認められる海側へ緩く傾斜する反射は約400



第5図 美保湾側海浜のGPR処理断面とその解釈断面。地表から1m地下に地下水面からの強い反射が認められ、その下に海側傾斜の反射がいくつも認められる。その傾斜角は深度方向へ緩くなる。地表面から-9~-10m付近に海側に緩く傾斜する反射が認められる。



第6図 第7図に示すGPR断面の測線位置とL字型突堤。写真の左側が砂丘側、右側が駿河湾側である。

年前の海底面に対応すると考えられます。1948年当時の海岸線は現在の海岸線から約90m内陸部に位置し、その後付加された堆積物の構造がGPRによってとらえられています。海側に1/10程度の勾配で傾く反射面が見られますが、それは海岸の前進に伴って形成されたものと考えられます。今のところ測線が1本だけであり各反射の走向・傾斜は不明ですが、さらにGPR測線を増やせば地下構造を3次的にイメージングすることも可能です。

## (2) 三保半島

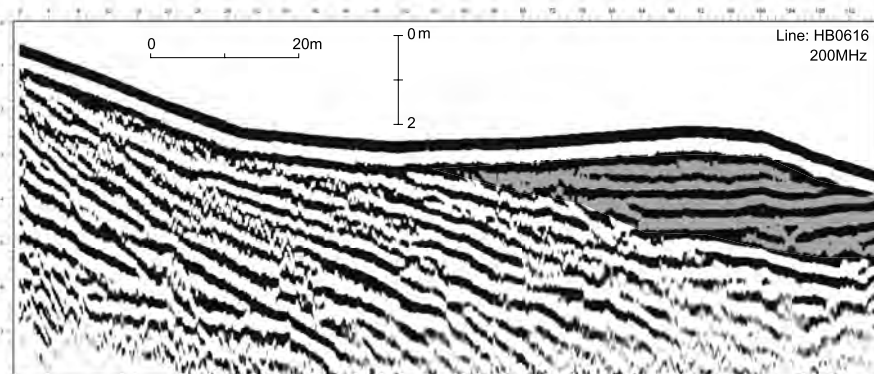
静岡県静岡市に位置する三保半島は複合砂嘴であり、地質学的観点(例えば依田ほか, 2000)と土木工学的知見(例えば宇多・山本, 1991)から砂嘴の形成過程が検討されています。三保半島におけるGPR調

査の目的は、これまで明らかにされてきた侵食・堆積現象に基づく汀線の変動結果にGPR地下構造断面の解析結果を加えて砂嘴の形成過程をより立体的にとらえようとするためです。

調査は2005年12月と2006年12月の2回行いました。2005年12月の調査結果は、吉河ほか(2006)に述べられています。2006年12月の調査では、主に羽衣の松付近の海浜で調査を行いました。この場所では1998～2000年の間に羽衣の松の北側にL字型突堤が建設されて以来、汀線の顕著な海側前進が見られます(秋山ほか, 2003)。L字型突堤の南側で200MHzアンテナを使用してGPR調査を行い(第6図)、第7図はその処理断面を示します。GPR断面の中程より海側に水平構造を持つ堆積層が認められますが、これはL字型突堤の建設以降に付加した堆積物に相当します。ここでも測線数を増やすことにより3次的な構造を把握できる見込みで、この付加堆積物の堆積量を見積もることができ、さらに堆積過程を明らかにすることが可能となります。

## 5. おわりに

2004年9月に地中レーダ装置を導入し、これまで約3年間試行錯誤を繰り返しながら調査手法とデータ処理・解析技術の開発を行ってきました。これまでの技術的蓄積により、現在では調査場所の選定、現地調査、データ処理・解析の効率が格段に向上し、かつ高品質の反射データを得ることができるまでになり



第7図 三保半島の海浜のGPR処理断面。

使用したアンテナ周波数は、200MHzである。断面中灰色で塗りつぶされたほぼ水平な構造を持つ堆積層は、羽衣の松の北側に建設されたL字型突堤の建設後の付加堆積物によるものと考えられる。

ました。一方で、さまざまな問題点と課題が明らかになってきました。最後に、これまでに明らかになった問題点・課題と将来の展望を述べます。

現在の海浜において汀線に近い前浜～後浜の一部は、常時あるいは暴浪時に波に洗われる場所です。電波は、このような場所では塩水の影響によりほとんど地表面付近で減衰するためにGPRによる地下構造断面は得られません。現在の海浜はそのダイナミックな形成過程がいろいろな方法で明らかにされている場所であることから、その地下構造断面と海岸平野内陸部の過去に形成された海浜の構造比較は重要です。現在の海浜において塩水の影響を強く受けている部分の地下構造断面を得るために、GPRと同程度の分解能を持つ新たな物理探査手法の開発が望まれます。

我々が使用している地中レーダ装置は、アンテナ重量が軽いために起伏が連続するような場所でも調査が可能です。一方、アンテナがシールドされていないために、外部ノイズの多い市街地では調査が制限されることがたびたび起こります。市街地におけるGPR測線は、ほとんどが舗装された平坦な道路です。このような場所ではシールドされたアンテナを使用し、なおかつ間縄の不要なエンコーダ付きのGPR装置の方が適しています。

GPR調査は少ない費用と人数で比較的手軽に行うことができます。しかし、得られた地下構造断面は、あくまでも地層内あるいは地層間の電気物性を反映したものにすぎません。地質学的解釈のためには地層から得られたサンプルの堆積学的分析結果などと対比しなければなりません。海岸平野では地層を直に観察したりサンプルを採取できるような露頭はほとんどなく、地層からサンプルを得るためにはボーリングが必要です。ボーリングはGPR調査に比べて多大

な費用がかかります。また、既存のボーリングデータを使用するにも、それがどの程度有効なのかはさまざまです。このようなGPR調査とボーリングデータから得られる地質学的情報との密度の差をどのように埋め、地質学的解釈に結びつけるかが今後の課題です。

#### 引用文献

- 秋山幸秀・M.P.B.セーナカシリ・根元謙次・弘松峰男(2003): Airborne-Scanning LiDARによる海岸線浸食調査, 第25回技術発表会論文集, 日本測量調査技術協会, 100-117.
- Davis, J. L. and Annan, A. P. (1989): Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prospect.* 37, 531-551.
- 原口 強・米田明徳・五十嵐厚夫・井上卓彦・井内美郎(2004): 地層解析による皆生海岸の侵食・堆積過程. 海岸工学論文集, 土木学会, 51, 561-565.
- Jol, H. M. and Smith, D. G. (1991): Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. *Can. J. Earth Sci.*, 28, 1939-1947.
- Leatherman, S. P. (1987): Coastal geomorphological applications of ground-penetrating radar. *J. Coastal Res.*, 3, 397-399.
- 貞方 昇(1991): 弓が浜半島「外浜」浜堤群の形成における鉄穴流しの影響. *地理学評論*, 64A, 759-778.
- Smith, D. G. and Jol, H. M. (1992): Ground-penetrating radar investigation of a Lake Bonneville delta, Provo level, Brigham City, Utah. *Geology*, 20, 1083-1086.
- 田村 亨・増田富士雄(2004): 多数の年代値を入れた波浪卓越型堆積シーケンスの研究. *地学雑誌*, 113, 1-17.
- 宇多高明・山本幸次(1991): 複合砂嘴の形成機構に関する実験的研究. *地形*, 12, 357-365.
- 依田美行・黒石 修・根元謙次(2000): 堆積シーケンスからみた三保半島及び半島沖大陸棚の形成. *海洋調査技術*, 12, 31-47.
- 吉河秀郎・村上文敏・根元謙次(2006): 地中探査レーダーによる三保半島の地形発達過程. 海岸工学論文集, 土木学会, 53, 636-640.

MURAKAMI Fumitoshi, TAMURA Toru, NANAYAMA Futoshi, SAITO Yoshiki and WATANABE Kazuaki (2008): Application to the coastal plain research of Ground Penetrating Radar.

<受付: 2007年11月30日>