



首都圏の強震動予測のための浅層地盤構造モデルの構築

Integration of the Shallow Subsurface-Structure Model
for Strong Ground Motion Prediction in the Tokyo Metropolitan Area

三宅弘恵¹, 繁瀬一起¹, 古村孝志¹, 稲垣賢亮², 増田 徹², 翠川三郎³

Hiroe MIYAKE¹, Kazuki KOKETSU¹, Takashi FURUMURA¹,
Yoshiaki INAGAKI², Tetsu MASUDA², and Saburo MIDORIKAWA³

¹ 東京大学地震研究所, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

² 応用地質株式会社, OYO Corporation

³ 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻, Department of Built Environment,
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

SUMMARY: A shallow subsurface-structure model improves the accuracy and applicable frequency-range of broadband ground-motion prediction. We have integrated a 3D velocity model of the shallow subsurface structure beneath the Tokyo metropolitan area by compiling about 78,500 borehole data. The model provides the depth of $V_s = 500$ m/s which is compatible with the upper surface of the Shimosa layer, and the depth of N -value = 50, as well as velocity profiles with at grid points distributed at intervals of 250 m. The average shear-wave velocities of upper 30 m (AVS30) of the models are 70 % of previous estimates in the regions along the old Tone river, i.e. from the Tokyo bay towards eastern Saitama prefecture, where large seismic intensities have been reported.

1 はじめに

強震動予測の高精度化・広帯域化を図るために、震源のモデル化や深部地下構造モデルに加えて、工学的基盤よりも上部の浅層地盤構造モデルを構築することが重要である。一般に広帯域強震動予測には、ハイブリッド法や統計的グリーン関数法が用いられている場合が多く、これらの計算手法は主に工学的基盤上の波形を提供する。工学的基盤以浅の強震動予測結果については、既存観測点の一次元速度構造を用いた計算によって地表の波形を各地点ごとに得るか、あらかじめ工学的基盤面上の最大速度を求めておき、国土数値情報・地形分類・微地形区分等 [1, 2, 3] に基づく AVS30 (深さ 30 mまでの平均 S 波速度) [4, 5, 6] から推定される最大速度に対する増幅率 [7, 8] を用いて、地表最大速度分布が求められている場合が多い。

一方、近年では強震動予測を目的とした浅層地盤構造モデルが大阪盆地や南関東地域などにおいて構築されている [9, 10, 11, 12]。また、浅層地盤における非線形計算が強震動予測に導入される事例も増えている [13, 14]。このように、深部地下構造モデルに加えて浅層地盤構造モデルが構築されることにより、強震動予測の高精度化・広帯域化における地下構造モデル側の準備が整いつつあると考えられる。

大都市大震災軽減化特別プロジェクト I では、首都圏における強震動予測の高度化をめざし、その共通基盤となるべき速度構造の統合モデルの構築を進めてきた。フィリピン海プレートについては、大規模反射法・屈折法地震探査に基づき従来よりも浅い上面深度が推定されており [15]、この深度と既往の海域地震探査を組み込んだ速度構造が構築されている [16]。また、深部地下構造モデルについては、同プロジェクトの探査データを追加した屈折法走

時・重力データの同時インバージョンに加え、深層ボーリング [17]、微動探査 [18] などの物理探査結果をコンパイルした深部地下構造モデルが報告されている [19]。ここで、この深部地下構造モデルは、下総層・上総層・三浦層・基盤の4層から成り、下総層上面はおおむね工学的基盤として扱うことができる。

本研究では、短周期を視野に入れた首都圏の強震動予測の高精度化を目的として、また、これまでに構築されてきた深部地下構造モデルと統合を図るため、約 78,500 本のボーリング情報に基づく浅層地盤構造のモデル化を試みる。モデル化にあたっては、下総層上面に相当する $V_s = 500$ m/s と、 N 値 = 50 の 2 つの等深度面を作成し、これらを基準面として参照しながら 250 m メッシュの浅層地盤構造モデルを構築する。そして、推定された地盤モデルから得られた AVS30 の分布と、論文 [1] による 250 m メッシュの微地形区分から経験的関係 [6] を用いて推定された AVS30 との比較を行い、本地盤モデルの特徴を把握する。

2 $V_s = 500$ m/s と N 値 = 50 の等深度面の作成

用いた浅層ボーリング情報は、Fig. 1 に示される総数 78,503 本 (掘削深度が 30 m 以上のものは 20,841 本) であり、そのうち PS 検層がなされているものは、防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net, 横浜市高密度強震計ネットワークをはじめとする 539 本 (掘削深度が 30 m 以上のものは 306 本) である (Fig. 2)。

ボーリング情報を活用した浅層地盤構造モデルを作成する場合、分布の偏ったボーリング情報を、ボーリング情報が不足する地点へ面向に展開する必要がある。本研究では、ボーリング情報を展開するための手がかりとして、下総層上面に相当する $V_s = 500$ m/s と、 N 値 = 50 の 2 つの

等深度面を作成し、これらを基準面として参照しながら首都圏の浅層地盤構造モデルを構築する。

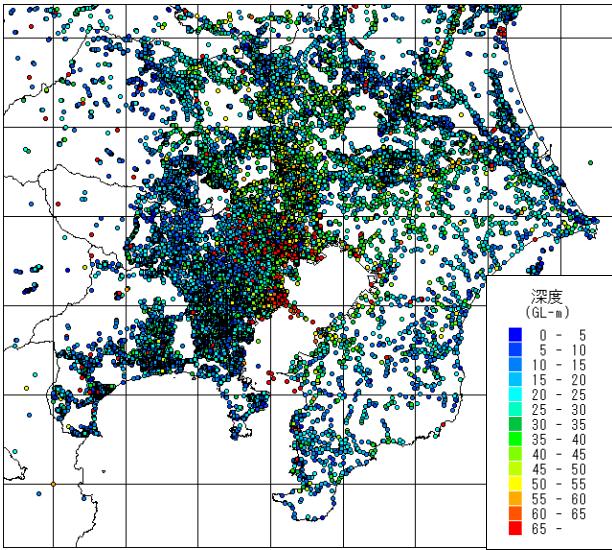


Fig. 1. Location and depth of the compiled boring data.

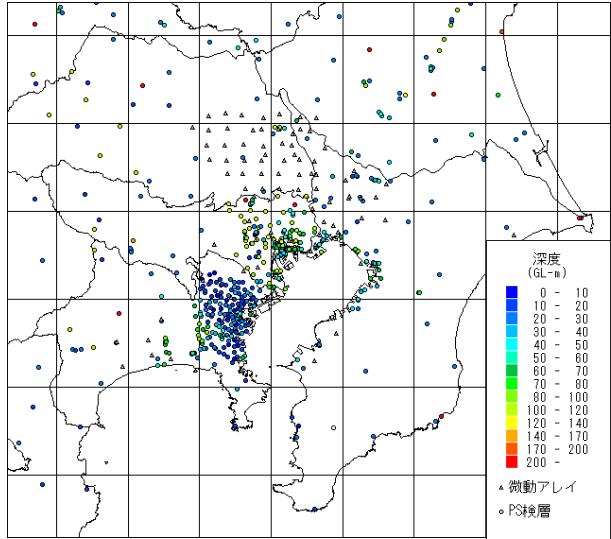


Fig. 2. Location and depth of the boring data with velocity measurement, and location of microtremor survey providing the S -wave velocity profile.

首都圏の深部地下構造は、主に下総層・上総層・三浦層・基盤の4層から成るとされている。下総層の S 波速度は、論文 [18] の微動探査によると $400\sim600$ m/s、また、屈折法走時・重力データによる構造インバージョン結果に対する R/V スペクトルピークのチューニング [19] によると 500 m/s と推定されている。なお、R/V スペクトルとは、記録の動径成分と鉛直成分のスペクトル比を意味する。上記より、深部地下構造モデルと統合可能な浅層地盤構造モデルを構築する観点から、下総層上面に相当する $V_s = 500$ m/s の等深度面が基準面として必要であると考えられる。

ここではまず1つ目の基準面として、この下総層上面に相当する $V_s = 500$ m/s の等深度面 (Fig. 3) を、既往の PS 検層および微動アレイ結果 [18, 20, 21 など] (Fig. 2) を基に作成した。東京湾岸や千葉県北西部から埼玉県東部に至る地域において、 $V_s = 500$ m/s の等深度面が深くなる傾向

がみられる。千葉県北西部から埼玉県東部に至る地域は、下総層下面の深度も大きいことが知られており [18]、深部地下構造と浅層地盤構造との接続を考えるうえで重要な地域であると考えられる。

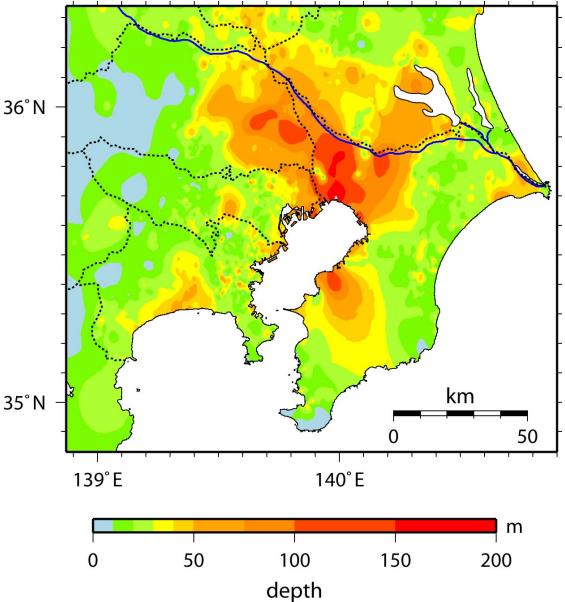


Fig. 3. Depth of $V_s = 500$ m/s which is compatible with the upper surface of the Shimosa layer.

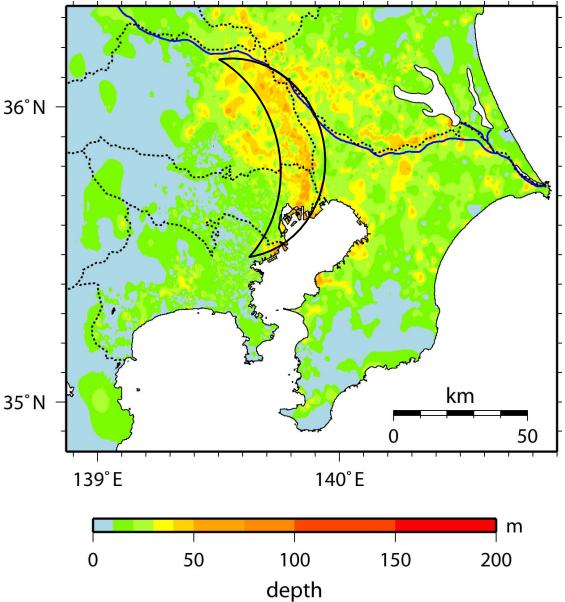


Fig. 4. Depth of N -value = 50. The crescent indicates the deepest zone.

しかしながら、 $V_s = 500$ m/s の等深度面に使用されたボーリング情報の数を考えると、この深度を面的に拘束することはなかなか難しい。一方、 N 値 = 50 の等深度面は、その情報がほとんどの浅層ボーリング結果に含まれるので、浅層地盤構造モデルを構築する上で、安定した基準面として活用可能であると考えられる。

上記の考えに基づき、2つ目の基準面として、 N 値 = 50 の等深度面 (Fig. 4) を作成した。作成にあたっては、 N 値 = 50 の等深度面が $V_s = 500$ m/s の等深度面よりも深くな

らないような拘束条件を課している。川崎から湾岸沿いに東京へ、そして東京湾から旧利根川沿いに埼玉県東部へ向かう三日月形の領域が、 N 値 = 50 の等深度面が深い領域として浮かび上がり、その深さは 50 m 以上となった。

N 値 = 50 に相当する S 波速度の把握は、強震動予測を行なう上で重要である。ここでは、 N 値と PS 検層結果が得られているボーリング情報を用いて、 N 値 = 50 の深度とその地点における S 波速度の関係を検討した (Fig. 5)。しかしながら、その値は深さに依らず平均 400 m/s 程度となっているが、ばらつきが大きい結果となっており今後の検討が必要である。

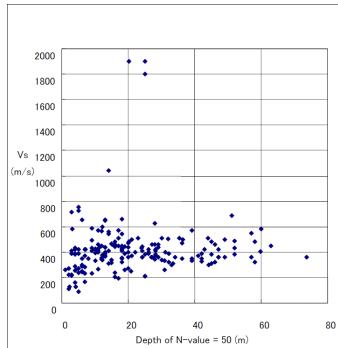


Fig. 5. Relationship between depth of N -value = 50 and S -wave velocity (V_s).

3 250 m メッシュ浅層地盤構造モデルの作成

前章で作成した 2 つの基準面を参考に、250 m メッシュ毎のボーリング柱状データを作成し、浅層地盤構造モデルを構築した。ボーリングがある 21,231 メッシュについてはメッシュを代表する柱状データを採用し、ボーリングがない 281,378 メッシュは、論文 [1] に示される同じ微地形内でもっとも近い柱状データを参照しながら統合・補間している。その際、地盤モデルの層厚を N 値 = 50 の等深度面に整合するように調整した。

物性値の設定には、PS 検層結果および粘性土・砂質土・礫質土ごとに提案されている N 値と S 波速度の換算式 [22] を用いた。この N 値と S 波速度の換算式の使用に際し、論文 [23] で用いられている換算式を本研究で使用したデータに適用してもほぼ同じ結果が得られることを確認している。密度については論文 [22] による完新世相当の値を用いた。

4 浅層地盤構造モデルの AVS30

推定された 250 m メッシュの浅層地盤構造モデルから得られた AVS30 (深さ 30 m までの平均 S 波速度) の分布 (Fig. 6) は、論文 [1] による 250 m メッシュの微地形区分から経験的関係式 [6] により推定された AVS30 とおむね調和的であった。ただし、両者の比 (Fig. 7) をとると、ボーリング情報が豊富な前述の三日月型の地域のうち、東京湾から旧利根川沿いに埼玉県東部へ北上する地域において、浅層地盤構造モデルから得られた AVS30 は、微地形区分から経験的関係式により推定された AVS30 に対して 7 割ほどの値となった。これらの地域は、微地形区分における自然堤防、三角州、後背湿地に対応している。すなわち、この地盤モデルを用いて強震動計算を行った場合、地震動がより大きく推定されることが示唆される。この地

域は安政江戸地震、明治東京地震、関東地震といった過去の被害地震のみならず、2005 年の千葉県北西部等の近年首都圏直下で起きる地震によっても、震度が大きくなる傾向がみられており、地盤条件の評価の重要性が指摘されている [24, 25, 26]。

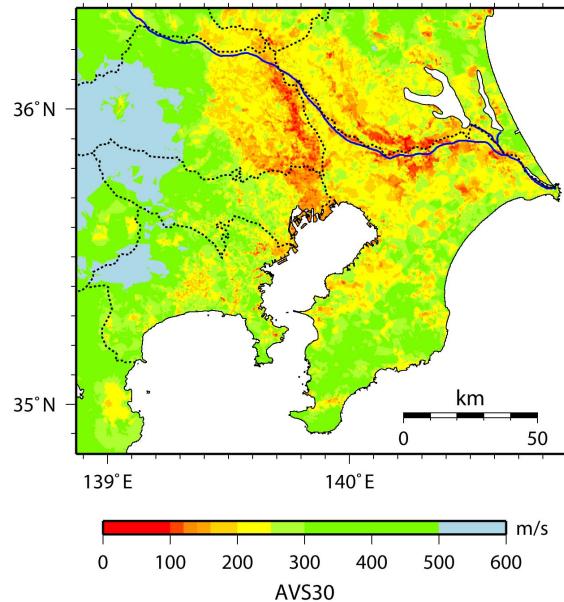


Fig. 6. Average shear-wave velocity of upper 30 m (AVS30) provided by the shallow subsurface-structure model based on the borehole data.

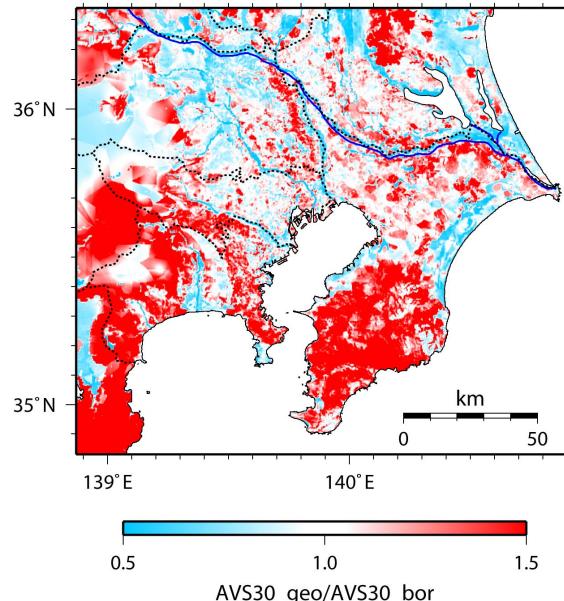


Fig. 7. Ratio of AVS30 estimated by the Japan Engineering Geomorphologic Classification Map to the shallow subsurface-structure model based on the borehole data.

また、山地、火山地、丘陵、砂礫質台地において、微地形区分から経験的関係式により推定された AVS30 よりも、浅層地盤構造モデルの AVS30 が小さくなる傾向がみられた。原因として、これらの領域における風化層の存在がボーリング情報に反映されている可能性が考えられる。

5まとめ

強震動予測の高精度化・広帯域化を目的として、ボーリング情報を活用した首都圏の浅層地盤構造モデルの構築を試みた。ボーリング情報を面的に展開するための指標として下総層上面に相当する $V_s = 500 \text{ m/s}$ 、および N 値 = 50 の等深度面を作成し、これらの基準面を参考にボーリング情報を 250 m メッシュ間隔で統合・補間し、浅層地盤構造モデルを構築した。この地盤モデルにおける AVS30 は、微地形区分から経験的関係式により推定された AVS30 と概ね調和的であったが、過去の地震の高震度域において 7 割程度の値となった。

首都圏はボーリング情報が豊富にあり、浅層地盤構造モデル構築のテストサイトとして適していると考えられる。AVS30 や増幅特性の観点から、ボーリング情報に基づく浅層地盤構造モデルと微地形区分との関係を明確にするとともに、地震記録を用いて浅層地盤構造モデルの精度向上に努め、広帯域強震動シミュレーションへの導入に耐えうるモデルに育てることが今後の課題である。

謝辞

若松加寿江氏と松岡昌志には、首都圏における地形・地盤分類 250m メッシュマップの情報を御提供いただきました。防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net, 横浜市高密度強震計ネットワークにおける地盤調査結果、および自治体による微動探査結果を使用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- [1] 若松加寿江, 松岡昌志 : 大都市圏を対象とした地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築, 第 27 回地震工学研究発表会講演論文集, CD-ROM, 2003.
- [2] 久保智宏, 久田嘉章, 柴山明寛, 大井昌弘, 石田瑞穂, 藤原広行, 中山圭子 : 全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化、および、面的な早期地震動推定への適用、地震, Vol. 56, No. 1, pp. 21-37, 2003.
- [3] 若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美 : 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築、土木学会論文集, No. 759/I-67, pp. 213-232, 2004.
- [4] 翠川三郎, 松岡昌志 : 國土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価、物理探査, Vol.48, No.6, pp. 519-529, 1995.
- [5] 藤本一雄, 翠川三郎 : 日本全国を対象とした國土数値情報を基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定、日本地震工学会論文集, Vol. 3, No. 3, pp. 13-27, 2003.
- [6] 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎 : 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定、土木学会論文集, No. 794/I-72, pp. 239-251, 2005.
- [7] Midorikawa, S., M. Matsuoka, and K. Sakugawa: Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, Proceeding of 9th Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol. 3, pp. 85-90, 1994.
- [8] 藤本一雄, 翠川三郎 : 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係、日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.
- [9] 趙伯明, 長郁夫, 香川敬生 : 大阪平野浅部地盤の 3 次元スプラインモデル、地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会予稿集, S046-P017, 2004.
- [10] 先名重樹, 宇佐美光宣, 岩崎悦夫, 藤原広行 : 強震動評価のための浅部地盤モデルの作成と検討、日本地震学会講演予稿集 2004 年秋季大会, A064, 2004.
- [11] 吉田邦一, 山本浩司, 関口春子 : 大阪堆積盆地の表層速度構造モデルの作成、日本地震学会講演予稿集 2004 年秋季大会, P142, 2004.
- [12] 大井昌弘, 遠山信彦, 先名重樹, 藤原広行 : 南関東地域の表層地盤モデルの作成、日本地震学会講演予稿集 2005 年秋季大会, B060, 2005.
- [13] 中央防災会議 : 東海地震に関する専門調査会 (第 8 回) 説明資料, 2001.
- [14] 関口春子 : 阪神地域の地震動予測－浅層地盤の地震動応答の計算、活断層・古地震研究報告, No. 4, pp. 177-191, 2004.
- [15] Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, S. Harder: Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, Vol. 309, pp. 462-464, 2005.
- [16] 馬場俊孝, 伊藤亜妃, 金田義行, 早川俊彦, 古村孝志 : 制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル、日本地球惑星科学連合 2006 年大会, S111-006, 2006.
- [17] 鈴木宏芳 : 江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造、防災科学技術研究所研究報告, Vol. 56, pp. 77-123, 1996.
- [18] 山中浩明, 山田伸之 : 微動アレイ観測による関東平野の 3 次元 S 波速度構造モデルの構築、物理探査, Vol. 55, pp. 53-65, 2002.
- [19] 田中康久, 三宅弘恵, 總嶺一起, 古村孝志, 早川俊彦, 馬場俊孝, 鈴木晴彦, 増田徹 : 首都圏下の速度構造の大特統合モデル(2) : 海溝型地震のためのモデル拡張とチューニング、日本地球惑星科学連合 2006 年大会, S116-P014, 2006.
- [20] 神野達夫, 工藤一嘉, 高橋正義, 笹谷努, 凌甦群, 岡田廣 : 微動アレイ観測による足柄平野の地下構造探査、第 3 回都市直下地震災害総合シンポジウム, pp. 135-138, 1998.
- [21] 松岡達郎, 白石秀孝 : 関東平野の深部地下構造の精査を目的とした微動探査法の適用性—埼玉県南部地域の三次元 S 波速度構造の推定、物理探査, Vol. 55, pp. 127-143, 2002.
- [22] 中央防災会議 : 東海地震に関する専門調査会 (第 10 回) 関連図表 2, 2001.
- [23] 産総研活断層研究センター : 大阪湾周辺地域の地震動地図－地震動予測研究成果報告暫定版, 2005.
- [24] 諸井孝文, 武村雅之 : 関東地震 (1923 年 9 月 1 日) による木造住家被害データの整理と震度分布の推定、日本地震工学会論文集, Vol. 2, No.3, pp. 35-71, 2002.
- [25] Furumura, T. and L. Chen: Parallel simulation of strong ground motions during recent and historical damaging earthquakes in Tokyo, Japan, Parallel Computing, Vol. 31, pp. 149-165, 2005.
- [26] 總嶺一起, 三宅弘恵, 横山博文, 中村操 : 2005 年千葉県北西部の地震 : 震源メカニズムと強震動、日本地球惑星科学連合 2006 年大会, S204-P007, 2006.