3. 研究報告

- 3.1. 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造解明のための調査観測
- 3.1.1.制御震源地震探査等による断層形状の解明

目次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3ヵ年の年次実施計画
 - 1) 平成24年度
 - 2) 平成25年度
 - 3) 平成26年度
- (e) 平成26年度業務目的
- (2) 平成26年度の成果
 - (a) 業務の要約
 - (b) 業務の方法と成果
 - 1) 重力解析による立川断層帯周辺の地下構造の検討
 - 2) 箱根ヶ崎・金子台地区における高精度反射法地震探査
 - 3) 立川断層南部三次元反射法地震探査の高精度処理と解釈
 - 4) 東京都(2004)「平成15年度関東平野地下構造調査」に関わる屈折トモグラフィ 解析
 - 5) 立川市泉地区における東京都(1998)の反射法地震探断面の再検討
 - (c) 結論ならびに今後の課題
 - (d) 引用文献

(1) 業務の内容

(a) **業務題目** 制御震源地震探査等による断層形状の解明

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	佐藤 比呂志
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	石山 達也
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	蔵下 英司

(c) 業務の目的

断層形状把握のために、断層の中央部で制御震源による三次元反射法地震探査・二次元 深部反射法探査を行い、断層帯の形状・構造を解明する。断層帯南部においては、伏在部 を含めて断層の広がりと形状を明らかにするために、稠密重力探査を行う。

(d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成24年度: 立川断層が通過する真如苑プロジェクト用地(旧日産自動車工場跡地) において、断層の三次元形状・三次元的な変位量を明らかにするために、300 m×660 m 領 域で、受振・発震点の間隔が約10 m の高分解能三次元反射法地震探査を行った。

2) 平成25年度: 立川断層帯周辺において重力探査を行い、断層の位置と大局的な地 下構造を明らかにした。断層帯南部において高分解能反射法地震探査を行い、断層の 存否についての検討を行った。

3) 平成26年度: 立川断層中北部において浅層反射法地震探査を実施し、断層の浅部 形状を明らかにした。立川断層南部における三次元探査、既存の反射法地震探査デー タを再検討し、断層周辺の地下構造を明らかにした。重力データから断層帯周辺の密 度構造モデルを作成し、断層の広がりと形状を拘束する資料を提示した。

(e) 平成26年度業務目的

立川断層中北部において反射法地震探査を実施し、断層の形状を明らかにする。断 層帯周辺の密度構造モデルを作成し、断層の広がりと形状を明らかにする。

(2) 平成26年度の成果

(a) 業務の要約

平成25年度に取得した重力値の測定結果と、断層帯周辺の既存の重力データのコンパイ ル結果をもとに、断層周辺の密度構造解析を行い、震源断層の姿勢と広がりについて検討 した。断層による変位地形が明瞭な立川断層北部で浅部での断層形状を明らかにするため に、武蔵村山市の箱根ヶ崎測線と、入間市の金子台において、10m間隔の受発震での高分 解能反射法地震探査を行った。これらの反射法地震探査断面では、断層に伴う花弁状構造 が確認できた。断層帯南部で平成24年度の三次元反射法地震探査の再解析とボーリング層 序との対比を行い、青梅砂礫層基底に顕著な変形がないことを明らかにした。また、東京 都が断層南部で取得した既存反射法地震探査データの再解析を行い、上総層群の撓曲構造 が不整合面に切られ、それより上位には明確な変形の証拠がないことを示した。

(b) 業務の方法と成果

重力解析による立川断層帯周辺の地下構造の検討

a) 既存研究と研究目的

関東平野のような厚い堆積物に覆われた地域では、断層の広がりや傾斜・変位量を明ら かにするために、重力探査が有効である。立川断層帯周辺では、産業技術総合研究所(旧 地質調査所)、国土地理院、防災科学技術研究所、石油資源開発(株)、国際石油開発帝石 (株)などによって重力値が計測されている。平成25年度には、詳細な断層帯周辺の密度 構造を推定するための基礎資料として、新たに133点での観測を行い、既存データととも にブーゲー異常値を求め初歩的な解析を行った(佐藤ほか,2014)。立川断層周辺では、 東京都(2004)や東京大学地震研究所などによって、深部反射法地震探査が実施され(佐 藤ほか,2006)、防災科学技術研究所によってボーリング調査も実施されている(鈴木・ 高橋,1985)。こうした調査によって明らかにされている先新第三系上面深度のデータも 合わせて、得られている重力値を元に、三次元密度構造モデルを作成し、断層の位置・形 状の推定精度を向上させる。

b) 重力異常値と傾向面解析の更新

平成 25 年度解析にて得られたブーゲー異常図ならびに傾向面解析について,当該範囲 (図 1)において追加可能なデータの検討を行い,必要に応じてデータを追加,異常図の 更新を実施した。傾向面解析は平成 25 年度の検討結果と整合することを第一選択肢とし, 昨年度採用したパラメーターが適切でない場合は,パラメーターの最適化を行った。

解析範囲: 立川断層を含む以下の範囲とした。

東経 139°10'~139°35', 緯度 35°35'~35°55' 三次元解析範囲 東経 139°15'~139°30', 緯度 35°40'~35°52'30"



図1 解析対象位置図。内側の枠は、三次元解析範囲。

使用データは、産業技術総合研究所 地質調査総合センター(編)(2013)、ここでは実測値 が公表されていない国土地理院、防災科学技術研究所、石油資源開発(株)、国際石油開発 帝国(株)などによる重力値、Yamamoto et al. (2011)、平成25年度の本プロジェクトで の計測値などである。昨年度は,解析範囲内のみの重力測定データを使用していたが,今 年度は3次元解析を行う上でより広範な傾向を捕えるために,計算範囲は解析対象範囲よ りも周囲10km以上に拡張した。ブーゲー密度の推定に使用した重力測定点位置図を図2 に示す。尚、平成25年度に測定した重力値については表1に、測定点の位置は図3に示 す。



図2 ブーゲー密度の推定に使用した重力測定点位置図。 (外側の四角形内が拡張した計算範囲、内側が解析範囲、黒の実線は立川断層帯のトレース。 断層トレースは、地震調査推進本部地震調査委員会(2003)による)。

測点番号	緯度	経度	地盤標高	絶対重力値	正規重力値	地形補正値	ブーケー異常値
			(m)	(mGal)	(mGal)	(mGal)	(mGal)
1	3549.59	13919.00	139.578	979,812.562	979,804.297	0.753	38.288
2	3553.24	13912.43	265.139	979,792.376	979,809.524	3.797	42.127
3	3551.92	13911.20	228.287	979,793.506	979,807.627	4.257	38.266
4	3548.19	13916.89	182.464	979,797.748	979,802.290	0.664	34.036
5	3547.98	13915.26	198.088	979,792.809	979,802.000	1.425	33.521
6	3547.71	13915.22	229.015	979,784.388	979,801.617	1.450	31.757
7	3548.22	13919.06	168.488	979,799.336	979,802.336	0.439	32.445
8	3548.42	13919.74	161.976	979,797.643	979,802.623	0.403	29.109
9	3548.02	13919.68	166.284	979,795.017	979,802.047	0.420	27.948
10	3548.50	13920.89	149.787	979,792.131	979,802.736	0.358	20.973
11	3548.58	13920.52	154.702	979,794.465	979,802.849	0.377	24.189
12	3547.90	13922.75	118.424	979,785.333	979,801.883	0.318	8.628
13	3548.07	13919.32	167.104	979,797.467	979,802.131	0.417	30.477
14	3548.21	13919.85	162.471	979,795.740	979,802.322	0.395	27.624
15	3546.74	13917.51	175.410	979,793.749	979,800.220	0.613	30.617
16	3546.69	13917.82	172.566	979,793.548	979,800.158	0.519	29.808
17	3547.01	13917.20	181.076	979,794.106	979,800.603	0.565	31.691
18	3548.89	13917.56	154.745	979,807.739	979,803.301	0.710	37.488
19	3545.95	13919.14	156.597	979,793.945	979,799.102	0.424	27.891
20	3545.85	13919.84	149.820	979,793.481	979,798.949	0.390	26.182
21	3545.19	13919.48	142.510	979,796.820	979,798.014	0.419	28.997
22	3545.32	13920.50	141.649	979,792.661	979,798.196	0.367	24.447
23	3545.54	13921.97	127.573	979,787.965	979,798.507	0.337	16.499
24	3545.35	13922.29	127.209	979,785.481	979,798.240	0.318	14.235
25	3545.30	13921.60	129.933	979,789.258	979,798.164	0.331	18.623
26	3545.06	13922.17	123.917	979,786.671	979,797.822	0.316	15.169
27	3544.32	13916.22	175.140	979,784.317	979,796.769	0.685	24.674
28	3544.28	13916.72	168.037	979,787.346	979,796.714	0.626	26.282
29	3544.37	13917.07	162.822	979,789.871	979,796.832	0.683	27.671
30	3544.34	13918.01	136.599	979,795.192	979,796.800	0.594	27.613
31	3544.35	13917.74	139.550	979,794.761	979,796.815	0.610	27.777
32	3544.62	13918.35	154.305	979,792.038	979,797.192	0.593	27.666
33	3544.85	13918.58	160.902	979,790.954	979,797.523	0.920	27.96
34	3544.33	13918.87	139.288	979,793.452	979,796.783	0.566	26.385
35	3544.02	13919.35	119.937	979,796.035	979,796.337	0.503	25.462
36	3543.65	13919.84	110.355	979,796.509	979,795.806	0.448	24.421
37	3543.81	13920.06	125.118	979,793.976	979,796.036	0.416	24.636
38	3543.26	13921.39	118.839	979,787.066	979,795.258	0.345	17.125
39	3543.60	13919.40	116.991	979,794.913	979,795.736	0.493	24.328
40	3548.11	13923.05	114.296	979,785.978	979,802.177	0.308	8.168
41	3549.97	13917.52	140.660	979,815.092	979,804.846	0.965	40.732
42	3536.75	13925.62	129.929	979,733.813	979,785.968	0.275	-24.681
43	3548.28	13923.34	109.975	979,786.678	979,802.431	0.302	7.732
44	3540.46	13919.56	122.934	979,782.524	979,791.256	0.455	17.527
45	3540.59	13919.29	128.123	979,783.572	979,791.446	0.465	19.466
46	3540.93	13919.99	124.521	979,780.468	979,791.932	0.563	15.252
47	3540.04	13920.26	113.546	979,779.170	979,790.661	0.461	12.924
48	3539.94	13920.75	107.136	979,777.164	979,790.514	0.418	9.717
49	3540.18	13921.61	119.846	979,770.859	979,790.860	0.346	5.54
50	3540.42	13922.17	113.774	979,770.355	979,791.193	0.330	3.449

表1 測定重力データ(1)。

測点番号	緯度	経度	地盤標高	絶対重力値	正規重力値	地形補正値	ブーゲー異常値
			(m)	(mGal)	(mGal)	(mGal)	(mGal)
測点番号	緯度	経度	地盤標高	絶対重力値	正規重力値	地形補正値	ブーケー異常値
			(m)	(mGal)	(mGal)	(mGal)	(mGal)
51	3539.93	13922.04	115.431	979,768.673	979,790.503	0.326	2.792
52	3539.91	13922.57	108.516	979,767.285	979,790.473	0.317	0.036
53	3539.42	13923.06	84.826	979,767.759	979,789.771	0.378	-3.538
54	3539.68	13923.48	78.971	979,768.370	979,790.141	0.338	-4.517
55	3539.85	13925.13	64.397	979,764.404	979,790.388	0.295	-11.759
56	3540.83	13927.38	68.617	979,759.084	979,791.778	0.209	-17.726
57	3541.21	13927.82	67.093	979,759.281	979,792.326	0.203	-18.397
58	3545.66	13923.27	132.080	979,773.805	979,798.683	0.435	3.238
59	3549.12	13917.00	153.269	979,807.366	979,803.625	0.791	36.588
60	3538.19	13923.06	118.917	979,753.524	979,788.011	0.436	-9.07
61	3536.25	13924.47	99.193	979,743.750	979,785.242	0.442	-20.032
62	3544.21	13919.28	116.744	979,797.519	979,796.603	0.483	25.957
63	3544.91	13919.48	137.769	979,796.701	979,797.607	0.426	28.323
64	3545.91	13922.45	137.568	979,780.028	979,799.043	0.412	10.148
65	3550.12	13916.15	152.516	979,812.371	979,805.057	1.148	40.458
66	3545.75	13922.75	147.127	979,775.906	979,798.813	0.713	8.565
67	3536.49	13924.49	106.986	979,742.695	979,785.594	0.425	-19.882
68	3537.54	13928.02	120.406	979,732.924	979,787.082	0.288	-28.591
69	3537.25	13927.87	90.902	979,738.660	979,786.680	0.301	-28.374
70	3540.51	13920.92	137.624	979,771.667	979,791.327	0.464	9.624
71	3540.28	13920.67	124.159	979.775.450	979.790.996	0.473	10.992
72	3535.59	13926.50	80.592	979.738.561	979.784.312	0.318	-28,193
73	3535.72	13927.23	61.216	979.742.396	979.784.489	0.360	-28.428
74	3537.04	13925.74	122.101	979,736.467	979,786.374	0.270	-24.058
75	3538.88	13921.55	95.179	979,770.997	979,789.001	0.392	2.593
76	3538.78	13924.11	116.643	979,751.701	979,788.863	0.473	-12.137
77	3539.03	13924.36	98.399	979,756.065	979,789.218	0.526	-11.738
78	3538.45	13925.56	65.450	979,755.519	979,788.386	0.372	-18.326
79	3538.67	13925.88	60.404	979,756.695	979,788.700	0.345	-18.506
80	3538.20	13924.87	74.690	979,754.877	979,788.026	0.372	-16.728
81	3537.93	13924.36	79.074	979,754.925	979,787.641	0.377	-15.387
82	3537.79	13924.20	82.344	979,754.245	979,787.442	0.362	-15.234
83	3537.03	13925.20	131.905	979,736.128	979,786.356	0.317	-22.315
84	3537.33	13925.57	100.538	979,742.765	979,786.795	0.320	-22.455
85	3536.89	13924.38	135.416	979,738.237	979,786.164	0.322	-19.275
86	3536.29	13925.24	94.806	979,741.730	979,785.307	0.481	-22.926
87	3536.37	13926.66	83.319	979,739.373	979,785.421	0.531	-27.673
88	3535.93	13926.81	67.550	979,741.344	979,784.794	0.505	-28.326
89	3536.45	13929.99	50.043	979,743.271	979,785.527	0.416	-30.78
90	3551.20	13914.94	186.993	979,805.006	979,806.599	2.428	40.129
91	3535.36	13924.98	81.274	979,743.641	979,783.986	0.435	-22.517
92	3535.45	13925.51	66.130	979,745.053	979,784.108	0.426	-24.279
93	3535.45	13923.82	146.334	979,735.591	979,784.109	0.488	-17.491
94	3535.76	13923.87	104.996	979,744.122	979,784.554	0.442	-17.785
95	3536.90	13927.00	112.579	979,733.990	979,786.171	0.257	-28.237
96	3549.92	13915.62	167.750	979,807.313	979,804.775	1.491	39.196
97	3548.45	13917.26	215.693	979,791.513	979,802.663	0.807	34.316
98	3548.76	13918.65	169.645	979,802.906	979,803.117	0.551	35.674
99	3548.47	13917.64	175.559	979,800.654	979,802.694	0.624	35.063
100	3549.38	13917.16	132.947	979,814.881	979,804.003	0.874	39.713

表 2 測定重力データ (2)。

測点番号	緯度	経度	地盤標高	絶対重力値	正規重力値	地形補正値	ブーヶ゙ー異常値
			(m)	(mGal)	(mGal)	(mGal)	(mGal)
測点番号	緯度	経度	地盤標高	絶対重力値	正規重力値	地形補正値	ブーケー異常値
			(m)	(mGal)	(mGal)	(mGal)	(mGal)
101	3548.75	13922.77	128.796	979,785.896	979,803.097	0.312	10.064
102	3548.70	13923.12	124.769	979,785.477	979,803.026	0.313	8.948
103	3549.07	13923.44	118.151	979,787.519	979,803.550	0.300	9.064
104	3549.35	13923.11	121.438	979,788.774	979,803.960	0.311	10.592
105	3538.60	13928.06	111.101	979,739.521	979,788.596	0.366	-25.323
106	3544.59	13925.10	104.214	979,766.525	979,797.153	0.244	-8.421
107	3544.09	13925.09	102.526	979,766.267	979,796.436	0.245	-8.297
108	3538.82	13929.00	56.230	979,751.543	979,788.909	0.391	-24.63
109	3537.95	13928.84	114.215	979,735.264	979,787.680	0.317	-28.078
110	3544.85	13924.51	109.602	979,769.523	979,797.520	0.257	-4.687
111	3547.01	13923.37	157.556	979,770.210	979,800.607	0.479	2.89
112	3552.64	13911.14	242.702	979,794.119	979,808.658	3.856	40.27
113	3552.60	13911.82	385.487	979,766.262	979,808.604	2.451	39.581
114	3552.73	13912.46	452.330	979,753.355	979,808.794	3.291	41.126
115	3552.97	13912.67	255.021	979,793.733	979,809.135	4.307	42.486
116	3552.06	13912.56	235.723	979,795.668	979,807.832	3.408	40.683
117	3546.97	13922.64	172.446	979,770.784	979,800.548	0.546	6.667
118	3551.66	13911.32	223.796	979,793.857	979,807.264	4.175	38
119	3552.37	13911.06	250.000	979,791.153	979,808.277	3.656	38.879
120	3551.86	13912.93	207.276	979,801.859	979,807.539	3.274	41.232
121	3551.52	13913.96	183.138	979,806.856	979,807.064	2.530	40.896
122	3539.71	13922.79	107.892	979,765.302	979,790.182	0.329	-1.789
123	3550.77	13916.21	147.411	979,813.435	979,805.986	1.352	39.817
124	3549.42	13917.58	165.467	979,807.731	979,804.060	0.960	39.215
125	3549.62	13916.42	200.387	979,802.150	979,804.342	1.110	40.555
126	3550.51	13916.15	138.924	979,814.086	979,805.619	1.602	39.415
127	3551.52	13915.73	268.995	979,791.166	979,807.056	1.814	41.672
128	3551.11	13916.32	166.424	979,810.795	979,806.468	1.366	40.568
129	3551.49	13913.54	190.077	979,804.442	979,807.021	2.906	40.381
130	3551.44	13911.55	222.459	979,794.255	979,806.945	3.666	37.776
131	3552.42	13912.20	283.249	979,787.460	979,808.349	3.780	42.007
132	3551.59	13915.29	291.318	979,785.877	979,807.162	1.657	40.578
133	3549.97	13918.27	199.639	979,803.216	979,804.843	1.636	41.632

表3 測定重力データ(3)。



図3 重力測定点位置図。 立川断層のトレースは地震調査推進本部地震調査委員会(2003)による。

i) プーゲー補正の仮定密度の推定

上記データを使用して,仮定密度の再計算を実施した。g-H 相関法による推定の結果, 仮定密度は 2.49 g/cm³とした。Rikitake の方法(Rikitake et al., 1965)による地形補正 密度(pT)と最小自乗法で求めたブーゲー補正の仮定密度(pB)の関係を図 4 に,また g-H 相関図を図 5 に示す。昨年度の 2.53 g/cm³ から 2.49 g/cm³となったのは,再計算し た範囲の平野部の面積が増加したため,若干小さくなったと考えられる。しかしその差異 は 0.04 g/cm³と僅かであり,大局的には同等な値と判断される。



図4 地形補正密度(pr)と最小自乗法で求めたブーゲー補正の仮定密度(pB)の関係。



図5g-H相関図(仮定密度2.49g/cm³)。

ii) ブーゲー異常図の作成

上記の重力測定値データを使用して,解析範囲のブーゲー異常を再計算した。算出に当たっては,産業技術総合研究所 地質調査総合センター(編)(2013) 日本重力 DVD版に収録 されている「利用プログラム」を使用し,解析範囲を含む範囲で,仮定密度(2.49g/cm³)の ブーゲー異常の200 mグリッドデータを作成した(図6)。

iii) 傾向面解析

先新第三系基盤の構造の抽出を目的に、長波長のトレンドのみを取り除くこととした。 対象地域で北西-南東方向の傾向が強く見られる。基盤構造の把握という目的からは長波長 のノイズと考えられるこうした広域の傾向を除去するため、各測定点の座標とブーゲー異 常値を用い、最小自乗法により傾向面を求めた。大局的な北西-南東方向のみの一次傾向面 ではなく、対象地域南西部の山地での基盤の上昇を表していると考えられる二次傾向面を 採用した(図7)。



図 6 ブーゲー異常図 (仮定密度 2.49g/cm³)。



図7長波長ブーゲー異常図:二次傾向面 (仮定密度 2.49g/cm³)。



図 8 残差重力異常図 (仮定密度 2.49g/cm³)。

iv) 残差重力の算出

ブーゲー異常から、二次傾向面長波長ブーゲー異常を差異引いて、残差重力異常データ を算出した(図8)。

c) 二次元重力密度解析

地域内を横切る反射法,屈折法データの解析結果を参照して,初期密度モデルを作成し た。初期密度モデルと残差重力異常プロフィルから二次元重力フォワード・モデリングを 実施し,密度構造断面を作成した。参照した構造探査測線は、立川断層(地震調査推進本 部地震調査委員会,2003)の北部を横断する文部科学省の「大都市大震災軽減化特別プロ ジェクト」北関東測線(佐藤ほか,2006)と、同断層の南部を横断する東京都(2004)の 地下構造調査測線である。

i)モデル断面の設定

「大都市圏地殻構造調査 北関東測線」と平行に、また立川断層(地震調査推進本部地震 調査委員会,2003)のトレースと直交するように、間隔5kmでA1~A7の7つの断面線を設 定した(図9)。

ii) 断面密度の設定

「府中地殻活動観測井」(鈴木・高橋,1985)の速度検層と密度検層の結果と、「大都市 圏地殻構造調査 北関東測線」に沿った屈折法によるP波速度構造モデルを基に,Ludwig et al.(1970)の式で速度・密度変換を実施し、解析対象地域について4層の密度構造を設定し た(表4)。

表4. 設定したモデル断面の密度

層名	対応地層	密度	(g/cm ³)
L1	沖積層	1.81	
L2	上総層群相当層	1.99	
L3	三浦層群相当層	2.26	
L4	基盤	2.60	



図9モデル断面線位置図。

青実線:二次元モデル断面線。A1~7:断面番号。

黒の実線は立川断層帯のトレース。断層トレースは、地震調査推進本部地震調査委員会(2003) による。紫実線は東京都(2004)の反射法地震探査測線。黄色丸で示した区間は、図21 に示す反射法地震探査断面の範囲。

iii) 密度構造断面の作成

2次元フォワードモデリングでは、Talwani et al.(1959)およびTalwani and Heirtzler (1964)の方法により、Won and Bevis (1987)のアルゴリズムを利用して計算した。各断面 線の密度構造モデルと同モデルによる残差の計算値と観測値を、図10~14に示す。画面の 上段が観測値と計算値のフィッティングを示しており、赤線が観測値と計算値の乖離を示 す。また、下段がモデルを示す。断面密度はL1~L4の4層を設定したが、沖積層に相当す るL1層は層厚が薄いため、フォワードモデリングにおいてはほとんど影響が無かったので L2~L4の3層とすることとした。図10~図14の赤矢印は、断層の投影位置を示す。



赤矢印: 立川断層(地震調査推進本部地震調査委員会, 2003)の北西延長。



図 11 密度構造断面図 (A3 線)。 赤矢印: 立川断層(地震調査推進本部地震調査委員会, 2003)。



図 12 密度構造断面図 (A4 線)。 赤矢印: 立川断層(地震調査推進本部地震調査委員会, 2003)。



図 13 密度構造断面図 (A5 線)。 赤矢印: 立川断層(地震調査推進本部地震調査委員会, 2003)。



図 14 密度構造断面図 (A6 線)。 赤矢印: 立川断層(地震調査推進本部地震調査委員会, 2003)。

A2 測線では断層と重力構造との対応は見られないが、A3 から A5 については、断層は 東側に基盤(L4層、密度 2.6 g/cm³)上面が低下し始める位置に相当する。とくに A4 で は基盤上面の高度変化の急変帯と断層の位置が重なる。

d) 三次元重力密度解析

c)で作成した二次元密度モデルを参照して,三次元密度構造初期モデルを作成し,イン バージョン解析によって三次元密度モデルを得る。

i)密度構造初期モデルの作成

7つの各断面での各密度境界の(X,Y,Z)値を元に,層ごとの密度境界面の三次元初期モ デルを作成した。平面への展開方法は,Minimum Curvature法およびKriging法を試行し た。大局的にはほぼ同等の結果となったが,Minimum Curvature法の結果が不自然な変 化が少ないと判断して,今回はMinimum Curvature法による展開結果を採用した。三次 元初期モデルのL3,L4層上面の密度境界深度分布図を,図15に示す。この初期モデルを 用いた,三次元フォワード計算により得られた計算残差重力異常と,残差重力異常の差を 図16に示す。断面線に沿った方向で,-12~12 mGalの系統的誤差が広がっている。A3線, A4線沿いが正の誤差が大きく,A1線,A7線にかけて負の誤差に遷移している。

ii) 密度構造インバージョンモデルの作成

三次元インバージョンでは、各層の密度を固定して、インバージョンにより境界面深度 を1層ずつ変化させた。インバージョンは、深度変化量の大きいL4層上面からL3層上面方 向に向けて実施した。三次元インバージョンにより得られた各密度境界深度分布図を、図 17、図18に示す。また、インバージョンによって得られた計算残差重力異常と、残差重力 異常の差を、図19に示す。

三次元インバージョンにはParker (1972)のアルゴリズムを利用した波数領域における 理論計算を用いた。この計算では密度境界面の深部分布に対して二次元FFTを行うため, モデル辺縁部の打ち切りによる誤差を避けるため,モデルの周辺を辺長の凡そ50%拡張し, モデルが周期関数的につながるようにデータを補外する前処理を施している。

e) 結果

三次元インバージョンの結果は、計算残差重力異常と残差重力異常の差が、外挿部分も 含めて±12.0 mGal程度から±0.4 mGal程度と大幅に減少しており、誤差も局所的に点在す る程度となった。このため、インバージョンは安定的に収束したものと考えられる。各層 の計算において、深度の変化に対しては制限を設けずに実施した。L3層上面については初 期モデルでの設定深度からの変化は概して少なかった。

解析された基盤としてのL4層上面密度境界深度を、「平成15年度 関東平野(東京都) 地下構造調査」(東京都,2004)と比較した。平成15年度の反射法地震探査のL4層上面密 度境界深度断面図を図20に示す。測線の位置は図9に示した。測線の始点付近の深度は、 約1,000 m程度となっており立川断層で約3,500 m程度まで下降した後,緩やかに3,000 m 程度まで上昇する結果となっている。この測線での反射法深度断面図にL4層上面密度境界 をオーバーレイ(オレンジ色)したものを図21に示す。反射面から推定されている基盤面 (赤線)と調和的な傾向を示すが,立川断層の西側については,反射法の推定基盤面深度 が500 m程度に対して,重力解析からは1,000 m程度と500 mの乖離がある。また,立川断 層を隔てて東側への基盤の低下は、重力解析からは反射法断面図からの推定(東京都,2004) ほどには急傾斜とはなっていない。

21



図 15 密度境界面深度分布図 初期モデル。 上:L3層(密度 2.26 g/cm³)上面、下:L4層(密度 2.6 g/cm³)上面。



図 16 3次元フォワードモデル誤差分布図。



図 17 密度境界面深度分布図。 (L3 層:密度 2.26 g/cm³ 上面 インバージョン結果)。



図 18 密度境界面深度分布図 (L4 層:密度 2.6 g/cm³ 上面 インバージョン結果)。



図19 3次元インバージョン結果誤差分布図。



図 20 東京都(2004)「平成 15 年度関東平野地下構造調査」測線での L4 層上面密度境界面深度断面図。



図 21 東京都(2004)「平成 15 年度関東平野地下構造調査」深度変換断面 (L4 層上面密度境界のオーバーレイ)。測線の位置は図 9 に表示。



図22 先新第三系基盤上面深度モデルと断層との関係。

白線: 立川断層北部(活断層区間)トレース形状は、本報告2.2.1参照、黒線: N 名栗 断層、T: 立川断層(地震調査推進本部地震調査委員会, 2003)南部。記載上の目印とな る地点 A: 瑞穂町箱根ヶ崎北西部、B: 武蔵村山市三ツ木、C: 立川市泉町。

新第三系基盤上面の深度モデルと断層トレースを比較すると、立川断層北端部の金子台 周辺では、断層は西側に深くなる先新第三系基盤の境界部に位置している(図22)。この 傾斜部は東南方向に延長し、瑞穂断層(遠藤ほか,1989)もしくは立川断層北西セグメン ト南東端(鈴木ほか,2008)に近い形状を示す。箱根ヶ崎周辺では西側低下の基盤の境界 部に位置するが、南東部では東側に低下する基盤の斜面上に位置する。立川市泉町(図22 の地点C)より、南方では東西方向に基盤深度が低下した領域が伸び、北北西・南南東方向 に伸びる基盤の高まりは消失する。とくにC地点以南については密度構造との相関は認められない。

f) 広域重力異常図での検討

文部科学省の「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化特別プロジェクト」におい て新たな重力観測をもとに関東平野中央部のブーゲー異常の検討を行った(佐藤ほか, 2015)。この重力異常図は、新たな観測データを含むものであるので、この図に基づいて 立川断層トレースと重力異常について検討する。重力異常図(図23、24)は、本プロジェ クトと前述の「都市の脆弱性プロジェクト」において取得した重力値と、既存の重力値(地 質調査総合センター(編)、2013)を使用して、作成したものである。仮定密度(2.28 g/cm³)、 グリッドサイズ200 mのブーゲー異常に、上方接続高度7 kmの上方接続フィルタを適用し た。また、上方接続残差重力異常に残存する長波長成分をカットして、さらに上方の浅部 構造を抽出するために、カットオフ波数 3.2×10⁻⁵ cycle/m)、波長31.3 kmでのバンドパス フィルタリングによる残差重力異常を算出した。さらに、残差重力異常に対して、鉛直1 次微分、水平1次微分(例えば駒澤, 1998)を実施し、ブーゲー異常図を作成した(図23、 24)。基盤と堆積層が段差をなしている場合、水平一次微分では段差の部分で最大の値を とるのに比べ、鉛直一次微分では変曲点すなわち微分値がゼロの付近で段差構造が推定さ れる。

図23の鉛直一次微分では、立川断層は地点A(瑞穂町箱根ヶ崎北西部:図23)より北西 では、正の一次微分領域の西側に、A-C(図23)では正の領域の東側に異常値とほぼ平行 に伸びる。前述の密度構造から求めた基盤深度図からも明らかなように、C地点(立川市 泉町)以南では、重力異常との相関は認められない。また、地点B(武蔵村山市三ツ木) -C区間では等微分値をとる領域の走向が北西から北北西に変化する。この傾向は、前節で 述べた基盤上面の深度分布とよい一致を示し、断層線はA-C区間では西側の基盤上面が凸 型の領域の東端部に近い領域に位置しており、ブーゲー異常値の急変帯の中心部ではない。 これに対しA以北では、急変帯に位置している。図24の水平一次微分では、ブーゲー異常 値の変化の急な領域は暖色で示され、変化の少ない領域は寒色で示されている。Bを中心 として領域で北西方向に変化率の大きな領域がのび、断層は変化率の大きな領域のほぼ西 端に位置している。水平微分から見ると、重力異常と整合的に構造が追跡されるのは、C 地点よりもやや北西の地点である。また、Aよりも北西の区間については、南端部を除い ては、重力異常とよく対応する。以上の特徴を取りまとめると、地表トレースでステップ 状の配置を示す断層北西部では、密度構造の上からも重力的な高まりを横断する形状とな る。北西部では基盤の高まりの西の急変帯に断層が形成され、南東部では大局的には北西 方向に伸びる基盤の肩の部分に断層が位置し、基盤は東側に低下する。南部で走向が北北 西·南南東方向に変化するとともに、重力との対応はC地点(立川市泉町)以南では不明瞭 となる。



図 23 上方接続残差重力異常の鉛直1次微分分布図(仮定密度 2.28g/cm³)。A,B,C:地点 番号(本文参照)、立川断層のトレースは、中田・今泉(2002)による。赤実線:立川断 層のトレース、紫実線:立川断層の伏在トレース。黒太実線:周辺の活断層(中田・今泉 (2002)による)、黒細実線:反射法地震探査測線。



図 24 上方接続残差重力異常の水平1次微分分布図(仮定密度 2.28g/cm³)。 凡例は図 23と同様。

2) 箱根ヶ崎・金子台地区における高精度反射法地震探査

立川断層の地下構造については、おもに立川市・武蔵村山市の市街地で実施された反射 法地震探査の結果に基づき検討されている(東京都,1998,東京都,2004;山口ほか,1998)。 一方、立川断層北部について浅層反射法地震探査はこれまで実施されておらず、その地下 構造については不明のままである。また、石山ほか(2014)や本報告で、箱根ヶ崎・金子 台地区において、立川断層北部が左横ずれ断層であることが示された。そこで、本調査は、 西多摩郡瑞穂町の市街地を通る約1.8 kmの測線(箱根ヶ崎測線)と、青梅市及び埼玉県入 間市の市街地と茶畑が広がるエリアの約3.6 km(金子台測線)の2測線で実施した(図25)。



図 25 立川断層のトレースと反射法地震探査測線。マゼンダ実線:石山ほか(2015)、立川 断層のトレースは、中田・今泉(2002)による。赤実線:立川断層のトレース、紫実線:立 川断層の伏在トレース、青緑色実線:立川断層推定トレース。

箱根ヶ崎測線は、西多摩郡瑞穂町の市街地を南南西・北北東に横断する約1.8kmの区間で あり、測線南端を新青梅街道と都道166号線の交差点として都道166号線沿いに北進し、箱 根ヶ崎駅前、狭山神社横を通過する。本調査測線では独立型受振システム(GSR)を10 m間 隔で設置し、固定展開でデータ取得を行った(図26)。金子台測線は、東京都青梅市と埼 玉県入間市の市街地及び茶畑にまたがる、ほぼ東西の測線であり、西端を東京都青梅市大 門2丁目交差点として都道63号線沿いに東進する。この道路沿いには民家や店舗が建ち並 び、車両の通行も非常に多い。同市今井馬場崎交差点から東側は一部では建物も点在する が、茶畑が広がる。本調査測線では独立型受振システムGSR及びMS2000を10m間隔で設 置し、固定展開でデータ取得を行った(図27)。上記2測線のデータ取得仕様を表5に示す。



図 26 箱根ヶ崎測線の位置図。断層線は中田・今泉編(2002)による。



図 27 金子台測線の位置図。断層線は中田・今泉編(2002)による。

No. 44	体担,体制的	人マム連続			
測線	11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本 11日本				
調査項目	浅層高分解能反射法				
受振測線区間	瑞穂町	青梅市/入間市			
発震仕様					
震源	En	viro Vib			
台数	27	ら(標準)			
バイブレータアレイ長		B•B			
発震仕様	Half-int	eger VP(標準)			
標準発震点間隔	10m(標準)	10m(一部5m)			
スイプ周波数	8	-80Hz			
スイ・プ長		12秒			
標準スイ・プ回数		5回			
発震点数	146点	337点			
受振仕様					
受振点間隔		10m			
受振点数	186ch	363ch			
測線長	約1.8km	約3.6km			
受振器	SM-	24(10Hz)			
受振パターン	3個組	、バンチング			
展開パターン	古	定展開			
記録システム					
使用探鉱機	GSR(独立型受振システム)	GSR / MS2000 (独立型受振システム)			
プリアンプゲイン	30dB	30dB / 31dB			
サンプリング間隔	1	2msec			
相互相関	CAS				
相互相関後記録長					

表 5	箱根ヶ崎測線・	金子台測線のデー	・タ	'取得仕様-	·覧

両測線で取得された発震記録例を図 28 および図 29 に、バックグラウンドノイズの空間時

間変化を図 30 および図 31 に示す。この図から、箱根ヶ崎測線は比較的交通量も多く、測線全体にわたってノイズレベルが大きいことが分かる。また時間帯によるノイズレベルの 変化が小さいことも確認できる。一方金子台測線に関しても、箱根ヶ崎測線に比ベノイズ レベルは小さいが、時間帯による変化は大きい。また、測線東側では茶畑が広がるエリア となり、西側の市街地に比べ若干ノイズレベルが低い傾向になる。箱根ヶ崎測線で取得さ れた記録は市街地での発震・受振のため、ノイズレベルが比較的高いが、発震点により、 測線の全域で初動の到達が確認できる。また、ほぼ全ての発震記録において表面波の混入 が確認できる。初動の見かけ速度約 1800 m/sec である。金子台測線では、測線の西側で は測線沿線に民家や店舗が建ち並んでいたため、発震に制限があり、ほぼ全てで Low-Force での発震となった。一方、東側では茶畑がひろがる丘陵地となるため、発震に制限なく作 業が行えた。測線西側での発震記録は、市街地ではノイズレベルが高く、初動の到達が数 百 m 程度しか確認できないが、比較的ノイズレベルの低い測線東側では一部の発震におい てオフセット1 km 以上確認することができる。測線東側の発震記録では、ほぼ全ての発 震記録で測線東端まで初動を確認することができるが、ノイズレベルが高い西側では最大 で 1.8 km 程度しか初動を確認することができない。



図 28 箱根ヶ崎測線の発震記録。

左) VP38.5 (エンビロ2台、出力50%)、(右) VP136.5 (エンビロ2台、出力50%)。



図 29 金子台測線の発震記録。(上) VP127.5 (エンビロ2台、出力30%)、 (下) VP293.5 (エンビロ2台、出力70%)。



図 30 箱根ヶ崎測線のバックグラウンドノイズの空間時間変化。



図 31 金子台測線のバックグラウンドノイズの空間時間変化。

図32にデータ解析のフローを、表5にデータ解析に使用したパラメーターを示す。両測 線についてのデータ解析は、一般的な共通反射点重合法により、表6に示したパラメーターを用い て実施した。解析は、(株)地球科学総合研究所のSuper Xを用いて行った。

フォーマット変換及びデータ編集:フィールドデータに記録された原記録(GSR Original Format)について、SuperX(JGI InternalFormat)フォーマットへ変換を行った。その際、 全て発震記録毎にノイズエディットを伴う垂直重合を行い、バイブレータのリファレンス 波形との相互相関処理を行った。

トレースヘッダーへの測線情報の入力: SuperX トレースヘッダーに関して、発震点,受振 点及び各CMP のインデックス,座標,標高値,オフセット距離,基準面標高値等の測線情 報を入力した。データ解析における基準標高面は平均海水面に設定した。

屈折波初動解析:改良型タイムターム法による屈折初動解析を行い、受振点及び発震点タ イムターム値と表層基底層速度を算出した。箱根ヶ崎測線および金子台測線について、図 33および図34にそれぞれに示す。表層速度として受振点側及び発震点側共に500m/sec を 採用した。

最小位相変換:バイブレータ発震記録について、零位相であるバイブレータ震源のスウィ ープ波形について、最小位相変換処理を適用した。

ノイズ抑制処理のテスト: 富士見台測線で取得されたデータでは、調査測線全域において 見かけ速度の遅い表面波が確認された。これらの除去を目的に、各種のノイズ抑制処理の テストを行った。この結果、重合記録において 往復走時1.0sec 付近に見られるイベント に関してはノイズ抑制処理による効果が確認できるが、一部では虚像と思われる傾斜した イベントも抽出されたため、本解析作業ではノイズ抑制処理は適用していない。

振幅補償: Instantaneous AGC(自動振幅補正) [ウィンドー長......50msec] **デコンボリューション**: 表5に示すデコンボリューションを適用した。

共通反射点編集: 浮動基準面に対する静補正: 浮動基準面に対する静補正を実施した。 重合速度解析: 速度重合法による速度解析を実施した。尚、残差静補正後に再解析がなさ れている。

NMO 補正: 速度解析によって求められた重合速度・時間の関数を時間・空間方向に内挿し、 その速度テーブルに従ってNMO 補正を適用した。同時に、下記のストレッチミュートを 実施した。

重合前振幅調整:トレース間の振幅バランスを調整するため、自動振幅調整による振幅補償 を行った。

残差静補正:表5に示すパラメーターを適用した。

ミュート:NMO 補正に伴う波形の伸長及び'Far'オフセット側に残留する屈折波初動部分 を抑制する目的で、ミュート処理を全CMP アンサンブルについて設計して、適用した。 共通反射点重合:NMO 補正及び残差静補正適用後の共通反射点アンサンブルに関して水 平重合処理を実施した。

周波数-空間領域予測フィルター:周波数-空間領域において複素型予測フィルターを設計, 適用して、ランダムノイズを抑制し相対的にS/N を向上させるF-X 予測フィルター処理を 実施した。 **重合後時間マイグレーション**:時間断面上の反射点位置を実際の位置に移動させ、回折波 を回折点に復元することを目的として、重合後、差分マイグレーションを適用した。 **帯域通過フィルター**:反射波の有効周波数帯域が周波数成分解析によって決定され、零位 相帯域通過フィルターを採用した。

基準面補正:浮動基準面から基準面への、時間補正が適用された。

深度変換:重合速度プロファイルから、時間及び空間方向に平滑化した平均速度分布を用いて、'Vertical Stretch'法による深度変換を実施した。

以上の処理を逐次経ることによって、図35・図37のCMP重合処理断面図を作成した。また、マイ グレーション処理後に深度変換を実施した結果を、図36・図38に示した。



図 32 反射法解析の処理フロー。

表6 箱根ヶ崎測線・金子台測線のデータ解析パラメーター一覧

	箱根ヶ崎測線	金子台測線
フォーマット変換及びデータ編集		
解析対象の発震点範囲	VP.1-VP.186	VP.3-VP.363
NT PLAT BK -> JEBER WHELES		
有効発震点数	高分解能反射法発震点 146点	高分解能反射法举震点 337点
117977474271194		
トレースヘッダーへの測線情報の入力		
CMPBIE	5.0~	5.0m
CMD 約開	1 - 270	1710
UMIT 毗伊	1-370	1-719
重合測線からの長十数変信体	年117日4年1	制(四冊)
重日例様からの取入計在価同	前は無し	前夜無し
田が切動性が		エのパートは開
出げ初期読み取り位相	上のビーク位置	上のビーク位置
出げ波インハーション実施オノセット範囲	40 - 150m	30 - 120m
衣檀奉広述度を来める际の空间ノロック女	500m	500m
振唱補償 ()(())()()()()()()()()()()()()()()()()		
幾何减衰補償 	-	•
AGC適用ゲート長	50msec	50msec
デコンボリューション		
バイブレータスウィープ波形位相処理	最小位相変換	最小位相変換
アルゴリズム	時間領域トレース単位デコンボリューション	時間領域トレース単位デコンボリューション
前提とするウェーブレット位相	最小位相	最小位相
予測距離	2msec	2msec
零オフセット位置におけるゲート開始時刻	0msec	0msec
ゲート長	1600msec(Non-TV)	1600msec(Non-TV)
オペレータ長	160msec	160msec
プリホワイトニングファクター	0.5%	0.5%
浮動基準面に関する静補正		
補正內容	短波長表層補正及び標高補正	短波長表層補正及び標高補正
浮動基準面の定義	長波長標高変化	長波長標高変化
速度解析		
解析内容	重合速度	重合速度
解析点間隔	100m	100m
解析速度数	50(1300-2900m/sec)	50(1300-2900m/sec)
残差静補正		
アルゴリズム	Linear Traveltime Inversion	Linear Traveltime Inversion
時間シフトの最大許容値	2msec	2msec
時間ウィンドー	40 - 500msec	20 - 600msec
CMP重合		
NMOストレッチファクター	1.8	18
重合前振幅調整	AGC 100msec	AGC 100msec
	Space Variant	Space Veriant
bu-z var	togm cooling	tagm appling
レーヘハノンヘ	tsgm scaling	tsgm scaling
周波数・空间領域ア側ノイルター		* (D)(D)
空間オペレーダ長	5CMPs	5 CMPs
空間リイントー長	35CMPs	35 CMPs
時間ワインドー長	500msec	500msec
オーバーフップ長	250msec	250msec
帯域通過フィルター		
オペレータ長	400msec	400msec
周波数通過帯域	0 - 10 msec : 22/25 - 70/80 Hz	0 - 10 msec : 15/20 - 70/80 Hz
	10 - 50 msec : 20/25 - 70/80 Hz	10 - 50 msec : 15/18 - 70/80 Hz
	50 - 150 msec : 20/22 - 70/80 Hz	50 - 150 msec : 12/18 - 70/80 Hz
	150 - 450 msec : 18/22 - 70/80 Hz	150 - 450 msec : 12/15 - 70/80 Hz
	450 - 3000 msec : 15/20 - 60/70 Hz	450 - 3000 msec : 12/15 - 60/70 Hz
時間マイグレーション		
アルゴリズム	時間・空間領域差分法マイグレーション	時間・空間領域差分法マイグレーション
下方接続ステップ幅	2msec	2msec
最大アパチャー範囲	-	
反射面最大傾斜角度	45度	45度
油産エジル	■ 重合連座フケー11/パ・05%	重今連座フケー11ング・05%
KELK LITY	里口/空(スハノ ジイン・3070	里口座区ハノ リイフ・3070



図33 改良型タイムターム法により推定された箱根ヶ崎測線沿いの表層構造図。



図34 改良型タイムターム法により推定された金子台測線沿いの表層構造図。



図35 箱根ヶ崎測線の重合後時間断面図。



図 36 箱根ヶ崎測線の重合後マイグレーション深度変換断面。







図38 金子台測線の重合後マイグレーション深度変換断面。

箱根ヶ崎測線は、狭山神社南で実施されたピット調査で新期の堆積物を切断する断層が 確認された箇所の直ぐ南側を横断する。解析の結果得られた深度断面では、露出した断層 の直下に、高角で北に傾斜する反射面の不連続が連なり、断層面と推定される(図39。ま た、その北側にはこの断層面と斜交する断層面が認められる。断面を見る限り、中央部は 構造的高所を形成している。一方、CDP130-160付近は狭山ヶ池の凹地(3.2.1章を参照) にあたるが、上総層群に対比される反射面で表される構造は、この地形的な凹地に対応し て構造的な低所を形成していることが分かる。



図 39 箱根ヶ崎測線の解釈深度断面。赤矢印は地表における変位地形の位置を 示す。黄色線は上総層群の上面に対比される。

一方、金子台測線では、断面中央部で段丘面上に見られる地溝状凹地(3.2.1章を参照) を限る崖地形の直下には、高角な反射面の不連続が連なり、断層面と推定される(図40)。 さらに、この地溝状凹地を含む広い範囲で、上総層群を切断する複数の正断層が分布し、 全体として断面中央部が構造的低所を形成していることが分かる。これは、従来考えられ てきた東傾斜の逆断層によって形成されると期待される、断面北東側が構造的高所をなす ような褶曲構造とは様相を異にする。断面中央部、段丘面を変位させる崖地形に沿っては 河谷の左横ずれが認められることから、反射断面で見られる構造は横ずれ断層に沿って発 達する花弁状構造であると考えられる。



図 40 金子台測線の解釈深度断面。赤矢印は地表における変位地形の位置を示す。

3) 立川断層南部三次元反射法地震探査(榎 3D 2012)の高精度処理と解釈

H24年度に東京都立川市と武蔵村山市に跨る真如苑プロジェクト管理地(旧日産村山工 場跡地)内の、立川断層が通過すると推定される 300 m×660 m 領域においてバイブロサ イスを震源とする浅層三次元反射法探査(榎 3D 2012)を実施した。同調査地点では、鈴 木(2013; 2014;本報告 3.2.2 を参照)によってボーリング調査が実施され、青梅砂礫層 基底面の高度分布が議論され、その3次元的な構造が活構造の有無を判断する上で重要な 鍵となる。そこで、浅層三次元反射法探査で取得したデータを用いて、特に地下数+mの 極浅層地下構造の解明に特化した解析を行った。また、三次元データ取得区間の北部で取 得したS波浅層反射法地震探査の解析を行った。なお、データ取得についてはH24年度 報告書で述べたので、ここでは省略する。解析には(株)地球科学総合研究所のSuperXを 用いた。本再解析において見直した部分について以下の各項目を記す。これ以外の項目に ついては既往解析(佐藤ほか、2014)と同様である。

i) 三次元反射法地震探査(榎 3D 2012)の高精度処理と解釈

屈折波初動解析 改良型タイムターム法による屈折波初動解析を行い、受振点および発震点 タイムターム値と表層基底層速度を算出した。この改良型タイムターム法解析のパラメー ターとして、初動読み取り位相には正のピーク位置、表層基底速度を求める際の速度ブロ ックサイズには 500 m、屈折波インバージョンに用いるオフセット距離には 50-180 m を 適用した。パラメーターテストとして速度ブロックサイズを 10、30、50、100、200、500 m とした場合の受振点タイムターム値を計算した。その結果、速度ブロックサイズが小さ い場合は基底層速度で断層に相当する低速度分布の傾向が見られるが、タイムターム値の 領域端での偽像が強く、また細かな計算上のアノマリが多数現れるため、安定的にタイム ターム値が得られる 500 m の速度ブロックサイズを採用した(図 41)。



図 41 タイムタームインバージョンの結果得られたタイムターム値(速度ブロックサ イズ 500m)。

浮動基準面に対する静補正 浮動基準面に対する静補正を実施した。基準面補正速度には屈 折波初動解析結果の基底層速度の CDP 内平均値を用いた。また標高補正速度には基準面 補正速度と同じ値を用いた。表層補正値は、屈折波初動解析によるタイムターム値から以 下の方法で再計算を行った。なお、表層速度は 400 m/s と仮定して計算した。本再解析は 表層近傍の極浅層部であり、このような構造に対し絶対値の大きい表層補正値を適用する ことを回避するため、屈折波初動解析で求められた表層補正値の長波長成分を抽出し、差 分を算出することで短波長成分のみの補正を行った。

図 42(a)に屈折波初動解析により得られた受振点タイムターム値の分布を示す。横軸を 東西方向ライン上の距離、縦軸を南北方向ライン上の距離で表示した。タイムターム値の グリッドデータに対し、空間フィルターを適用して抽出した長波長成分を図 42(b)に示す。 空間フィルターには GMT の GRDFFT を使用し、フィルタリング波長パラメーターとし てはローパスフィルタ(100 m/50 m)を用いた。また図 42(c)に元のタイムターム値と長波 長成分の差分を示す。得られた差分を受振点に対する短波長成分として、表層補正量を計 算した。同様に、発震点タイムタームに対して空間フィルターを適用した結果を図 43(a) ~(c)に示す。また図 44(a)~(c)には東西方向ラインでの元のタイムターム値と長波長成分 の比較を示した。

浮動基準面は CDP 平均標高とし、浮動基準面に対する標高補正および上述の表層補正 の和を静補正量として発震点および受振点の全データに適用した。



図 42 タイムターム値の長波長成分および差分の抽出(受振点)。



図 43 タイムターム値の長波長成分および差分の抽出(発震点)。



図 44 タイムターム値の長波長成分と元の値の比較(東西ライン 15, 25, 35)。

重合速度解析 定速度重合法による速度解析を実施した。解析点間隔はインライン方向、クロスライン方向共に 100 m で実施した。本処理では静補正の修正に伴い、既往処理結果を 元に浅部および深部の読み直しを実施した。

以上を含む反射法処理より得られた重合時間データから東西方向・南北方向で切り出し た重合時間断面において、本処理と既往処理を比較した図を図 45 に示す。同様にマイグ レーションおよび深度変換を実施したデータから切り出した、マイグレーション深度断面 による比較図を図 46 に示した。浅層部(表層基底層以深の浅層部)に特化した解析を検 討した結果、表層基底付近のごく浅部の反射面については、多くの個所で既往結果より強 くなっている。ただし、深部の反射面に関しては、既往結果よりやや弱くなるところが見 られる。



図 45 再処理結果と既往処理結果の比較(重合時間断面、東西ライン 30)。



図 46 再処理結果と既往処理結果の比較(深度断面、東西ライン 30)。

以上の処理の結果得られた3次元反射法地震探査データと、同地点で掘削されたボーリ ングデータ(3.2.2章を参照)を対比し、青梅砂礫層(寿円、1964;寿円・奥村、1970) 基底面(上総層群との不整合面;3.2.2章を参照)を面的に追跡した。掘削されたボーリン グのうち、TC-13-1コアおよびTC-14-ENコアは3次元探査測線上に位置しており、これ らのコアで認められる青梅砂礫層基底面と seismic cubeの反射面の対比を試みた。上記2 本のボーリングと反射断面を比較すると、青梅砂礫層基底面は反射強度の最小に一致して おり、これは3次元的に追跡され、なおかつ両コアと反射断面の対比が矛盾無く説明でき る。なお、TC-12-1コアは3次元探査測線の端部に位置しており、fold 数が低く正確な対 比が困難なため、今回は使用しなかった。TC-13-1 コアおよび TC-14-EN コアで認められ る青梅砂礫層基底面と seismic cube の反射面を面的に対比した結果を図 47 に、東西断面 (Inline 17, 30, 50) を図 48-50 にそれぞれ示す。



図 47 ボーリング層序と3次元反射法地震探査の結果得られた seismic cube を対 比して得られた青梅砂礫層基底面の高度分布。赤線は中田・今泉編(2002)によ る立川断層の地表位置。



図 48 ボーリング層 序と3次元反射法地震 探査の断面スライス の対比の結果(Inline 17;位置は図 47 に示 す)。オレンジ色の線 が青梅砂礫層基底面 との対比線。赤矢印は 中田・今泉編(2002) による立川断層の地 表位置。青矢印はボー リング TC-EN14-01 の位置。断面の縦横比 は 1:1。



図 49 ボーリング層 序と3次元反射法地震 探査の断面スライス の対比の結果(Inline 30;位置は図 47 に示 す)。オレンジ色の線 が青梅砂礫層基底面 との対比線。赤矢印は 中田・今泉編(2002) による立川断層の地 表位置。青矢印はボー リング TC-13-1 の位 置を示す。断面の縦横 比は 1:1。



これらの図を見ると、青梅砂礫層基底面の高度差は、Inline 17 で5 m、同 30 で6 m、 同 50 で約 10 m となり、3 次元探査の北半分では鈴木(2013; 2014)の報告した高度差よ りも小さくなっている。また、青梅砂礫層基底面は、上総層群の撓曲構造を不整合に覆い、 全体として東から西に向かって高度を減ずることがわかる。ただし、立川断層の地表位置 (中田・今泉編、2002)で急に高度を減ずるのではなく、緩やかに西に傾き下がっており、 崖地形基部の東側に急勾配の区間は認められず、上総層群の撓曲構造の成長を示唆する構 造は青梅砂礫層基底面には見受けられない。また、上記の青梅砂礫層基底面の高度差は、 山崎(1978)で Tc2 面の上下落差量として推定された本調査地周辺の立川断層の上下変位 量(約5 m)とほぼ等しい。鈴木(2014)によれば、本調査地で掘削されたボーリングコ アで推定した青梅砂礫層の堆積年代は24万年前より古い。このことは、同一地点におい て明らかに異なる形成年代の変位基準の間に明確な変位の累積性が認められないことを示 す。このように、3 次元反射法地震探査とボーリング層序との対比および地形との比較検 討からは、上総層群の撓曲変形が青梅砂礫層基底面の形成以降に成長した明確な痕跡およ び変位の累積性は認められず、「立川断層」は、ここで活断層としての明確な根拠を失う ことになる。



TC-14-EN01コア(2-b 首都大)

ii)二次元S波浅層反射法地震探查

立川断層南部三次元反射法地震探査(榎 3D 2012)では、三次元データ取得範囲の北部 で、三成分地震計を展開し、受振点間隔 5 m、発震点間隔 5 m の S 波反射法地震探査を実 施した(佐藤ほか, 2013)。使用した震源は大型の S 波バイブロサイスである。解析は通 常の共通反射点重合法により、(株)地球科学総合研究所の SuperX を用いて行った。得ら れた深度変換断面を図 51 に示す。地表下約 30 m に下位の西に傾斜する単斜構造を不整合 に覆う反射面が認められる。三次元探査の結果と同様、上総層群の撓曲変形が青梅礫層基 底面の形成以降に成長した痕跡および変位の累積性は認めらない。

4) 東京都(2004)「平成15年度関東平野地下構造調査」に関わる屈折トモグラフィ解析

東京都は地震調査推進本部による地下構造調査の中で、平成15年に福生市拝島から立 川市武蔵砂川、和光市に至る22kmの区間において反射法・屈折法地震探査を実施した(東 京都,2004)。この探査の反射法地震探査断面の解釈から、立川断層を隔てて新第三系の 基盤が1kmを越える東側低下の鉛直隔離を示し、傾斜はほぼ80度の東傾斜と推定された。 一方、重力異常からは、立川断層南部では指摘されている断層トレースの位置は、基盤高 度が大きく食い違う構造は示さず、むしろその東側で基盤の低下が始まっている。こうし た地下構造の反射法地震探査断面の解釈と推定された密度構造との関係を明らかにするた めに、取得された東京都(2004)のショット記録を用いて、屈折トモグラフィ解析を行い、 P波速度構造の検討を行った。本再解析においては既往調査のうち特に立川断層帯近傍と なる測線西側約12kmの区間における発震データを使用した。

図 51 榎 3D 2012における二次元S波浅層反射法地震探査深度変換断面。
赤矢印:TC-14-EN01コア(鈴木, 2014)の位置。
水色実線:青梅砂礫層と上総層群の不整合面。

トモグラフィックインバージョンにおける理論走時のフォワードモデリングには、 Linear Traveltime Interpolation 法(LTI 法, Asakawa and Kawanaka, 1993)を用いた。波線の計算では対象の領域を格子に分割し、各格子を通る波線を求める。LTI 法においては 各格子をさらに細かく分割し、隣接する同様に細かく分割された格子上の各分割点を結ぶ 波線の走時を計算した後、得られた走時の組を用いて走時が最小になるよう波線を補間す る。格子のサイズ・分割点にかかわらず走時が最小になる波線経路を計算することにより、 他の走時計算法と比較して正確さと安定性に利点を持つ。

既往調査における初動読み取り走時を用いて、トモグラフィックインバージョンを実施 し、P 波速度構造を求めた。使用した発震点は屈折法発震 VP1、2、3 および反射法 126 点、受振点は 1107 点のうち計算領域内にあるものである。計算領域は発震点・受振点を 含む 2 次元断面において、水平方向には発震点 VP1 から発震点 VP3 までの 12100 m、鉛 直方向には標高 200 m から深さ 6000 m までの 6200 m とした。メッシュサイズは水平方 向・鉛直方向共に 200 m とした。また速度の修正における更新対象格子の範囲は、波線か ら 800m までの距離とした。

初期速度構造モデルは、水平多層構造を仮定し、一次元速度構造を変化させ、100 ケースの速度構造を構築し、各々についてトモグラフィックインバージョンを行った。初期速度構造モデルの生成条件としては、一定速度勾配の速度の範囲として地表面で 500~2500 m/s、深度 4000 m で 2000~6000 m/s をランダムに選択した。ランダム化した初期モデルを図 52 に示す。

構築した異なる初期構造モデルに対して、それぞれ反復回数 10 回とした。反復回数の 設定においては、観測走時と計算走時の残差に十分な収束が得られる値を選択した。

100 ケースの初期速度構造モデルから得られた結果の平均をとって、トモグラフィック インバージョンによる最終的な速度分布とした。P 波トモグラフィックインバージョンに よる最終的な速度分布及び各トモグラフィックインバージョン結果から計算される標準偏 差分布・平均波線密度を図 53 に示す。速度分布・標準偏差分布においては、下図の波線 密度が1より大きな値を持つ格子の結果のみ有効であるとみなし、その他の格子は NAN 値を以ってマスクすることにより表示している。

一般に、波線追跡法による速度構造は得られる解の一つを示しているが、それら解の誤 差分布については表示できない。ランダム化した初期モデルによる屈折トモグラフィ法で は、平均的な速度構造の妥当性を定量的に示すことができる(図 53)。反射法地震探査断 面では、測線中央部の深度 3 kmの波長の長い反射波が先新第三系上面と解釈されている が、その P 波速度は 4.5~5 km/s であり、反射面の形状と調和的である(図 54)。この高 速度領域は西に向かって次第に上昇し、図 20 および 21 に示した重力による密度構造と調 和的である。東京都(2004)では、測線東部の深さ 3 kmの振幅の大きい反射面群と、西 部の深さ 1 から 0.5 kmの反射面群を対比し、反射面群が欠如している領域に大きな基盤 の隔離を想定した。しかしながら屈折トモグラフィから求めた速度構造との重ね合わせ断 面では、反射断面からの解釈より、より基盤上面はなだらかに変化している可能性が高く、 また高度差も少ない。ただし、東京都(2004)が指摘しているような地表の立川断層のや

55



や西側に東側隆起の逆断層が存在する可能性を否定するものではない。

図 52 ランダム化した初期モデル表示結果



図 53 屈折トモグラフィ解析結果(上図:平均速度、中図:標準偏差、下図:波線密度)。 縦横比は 1:1。



図 54 屈折トモグラフィ速度分布を既往深度断面(東京都, 2004)に重ねた図。断面の縦 横比は、2:1。

5) 立川市泉地区における東京都(1998)の反射法地震探断面の再検討

東京都は、活断層調査の一環として、平成9年度に立川市泉町で反射法地震探査を実施 した。この断面では上総層群中に西傾斜の撓曲が認められ、この構造には極浅層部まで参 加している(図 55,東京都,1998)。これはこの測線の北方に位置する榎 3D 2012 反射法 地震探査(本報告 2(b)3)での結果と異なる。

既往の解析において、静補正は標高補正量及び表層補正量の和として各発震点、受振点に ついて与えられていた。このとき、表層補正は屈折波初動解析により求められたタイムターム値が使 われており、探査目的としている極浅層部の構造抽出に対し、絶対値の大きい表層補正値が適用 されると、探査目的としている表層直下の構造そのものが補正されてしまう恐れがある。このような状 況を回避するために、今回の解析では屈折初動解析で求められた表層補正値の長周期成分を抽 出し、タイムターム値からの差分を算出することで短波長成分のみの補正を行った。新たに計算さ れた表層補正値を適用した解析結果を図 56 に示す。



図 55 東京都(1998)による泉地区の反射法地震探査断面に基づく地質構造の解釈。 (関連図面を抽出して表示)。

新しい静補正を施した断面(図 56 では、地表下 30-50 m 付近に反射面があり(図 56 の赤矢印)、この反射面は下位の構造を不整合で覆っている。これは、榎 3D 2012 反射法 地震探査から求めた、青梅砂礫層と下位の上総層群の関係に類似する。つまり、榎 3 D の 場合は、青梅砂礫層基底面は上総層群の撓曲構造を不整合に覆っていて、そこには上総層 群の撓曲構造の成長を示唆する構造は見受けられなかった。また、表層構造(図 55 の上) においても、上総層群の構造から見て隆起側に相当する部分で逆に低速度層が厚く分布し ており、青梅砂礫層堆積時以降の隆起運動の継続とは非調和である。



図 56 極浅層部に焦点を当てた静補正を施した東京都(1998)の T97-2 測線反射法地震探 査深度変換断面。赤矢印は、極浅層部の反射面。

(c) 結論ならびに今後の課題

立川断層帯周辺の重力値のコンパイルと平成24年度の計測値を行い、断層周辺の三次元 密度構造を推定した。立川断層北端部では断層は伏在する基盤の隆起部の西縁に位置する。 瑞穂町箱根ヶ崎から武蔵村市山三ツ木を経て、立川市泉町付近までは、ほぼ北西・南東方向 に伸びる基盤の高まりの東部に位置し、概ね断層の東側では基盤が東側に低下する。三ツ 木より泉町付近までは基盤の高まりの走向は、北北西から南南東方向となる。これより南 方では密度構造と、断層トレースとの相関は認められない。

立川断層北部、金子台と箱根ヶ崎で浅層反射法地震探査を実施し、変動地形と良好な対応を示す花弁状の構造を示し、高角度の断層面が推定される。平成24年度に実施した榎三

次元反射法地震探査の表層部に特化した高分解能解析を行い、青梅砂礫層と上総層群の不 整合面は、上総層群中の西傾斜の単斜を不整合に覆い、変形を示さないことが明らかにな った。同様の関係は、浅層S波反射法地震探査でも確認できた。立川市泉町で実施された 東京都(2004)の反射法地震探査についても、極浅層部に特化した解析を行い、上総層群 の不整合面が上総層群と同様の変形を示さないことが明らかになった。武蔵村山市三ツ木 から立川市泉町の立川断層のトレースに沿っては、反射法地震探査からは上総層群中に西 側低下の単斜が形成されていることが明らかにされているが、上総層群を覆う地層との不 整合面には変形の証拠は得られなかった。東京都(2004)で報告されている福生市拝島か ら立川市砂川に至る区間において屈折トモグラフィ法による解析を行い、重力解析とほぼ 同様の基盤構造が明らかになった。すなわち、立川断層を隔てた基盤の断層隔離は従来の 報告よりも小さい。

本プロジェクトの当初計画では、断層の深部形状も反射法地震探査によって明らかにす る予定であったが、断層の存否や第四紀後期における活動性を明らかにするため断層浅層 部の探査に集中させる結果となった。このため、断層の深部形状についての新たな資料を 追加できず、今後の課題として残された。

(d) 引用文献

Asakawa E. and Kawanaka T.: Seismic ray tracing using linear travel time

interpolation. Geophys. Pros., 41, 99-111, 1993.

- 地質調査総合センター(編):日本重力データベース DVD版, 数値地質図 P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013.
- 遠藤 毅・川島真一・川合将文・中村正明・石井 求:北多摩地区の地盤および水文地質.平成 元年 東京都土木技術研究所年報,231-250,1989.
- 石山達也・佐藤比呂志・廣内大助・小林 健太・中山俊雄: 断層帯の詳細位置・形状等および断
 - 層活動履歴・平均変位速度の解明, 立川断層帯における重点的な調査・観測 平成25年度 成果報告書, 53-74, 2014.

地震調査研究推進本部地震調査委員会:立川断層帯の長期評価について,1-17,2003. 寿円晋吾: 武蔵野台地の各段丘礫の大きさについて(演旨),地理学評論,37,272,1964. 寿円晋吾・奥村 清:武蔵野・多摩・相模野地域に発達する洪積世礫層と段丘地形(演旨),

地理学評論, 43, 104-106, 1970.

- 駒澤正夫,重力探査. データ解析技術. 物理探査ハンドブック手法編,物理探査学会, 455-468, 1998.
- Ludwig, W.J., J.E.Nafe and C.J. Drake: Seismic refraction, in The Sea, A. E. Maxwell (ed), Vol. 4, Wiley-Interscience, New York, 53-84, 1970.
- 中田 高・今泉俊文編:活断層デジタルマップ,東京大学出版会,DVD-ROM 2枚,2002.
- Parker, R. L.: The rapid calculation of potential anomalies: Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, **42**, 315-334, 1972.
- Rikitake, T., H. Tajima, S. Izutuya, Y. Hagiwara, K. Kawada and Y. Sasai, Gravimetric and geomagnetic studies of Onikobe area, Bull. Earthq. Res. Inst., 43, 241-267, 1965.

佐藤比呂志・平田 直・岩崎貴哉・纐纈一起・伊藤 潔・伊藤谷生・笠原敬司・加藤直子:大 深度弾性波探査 3.1.2.北関東地殻構造探査(北関東測線2006,大宮・野田測線),大都市 大震災軽減化特別プロジェクト 1 地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査 研究」(平成17年度)成果報告書, 18-97, 2006.

佐藤比呂志・石山達也・蔵下英司:制御震源地震探査等による断層形状の解明, 立川断層 帯における重点的な調査観測平成 24 年度報告書, 6-41, 2013.

- 佐藤比呂志・石山達也・蔵下英司:制御震源地震探査等による断層形状の解明, 立川断層 帯における重点的な調査観測平成 25 年度報告書, 6-41, 2014.
- 佐藤比呂志・岩崎貴哉・石山達也・蔵下英司・橋間昭徳:構造探査とモデリングに基づくプ レート構造・変形過程と地震発生過程の解明,都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の 軽減化プロジェクト ①首都直下地震の地震ハザード・リスク予測のための調査・研究 平成 26年度 成果報告書(印刷中), 2015.
- 鈴木毅彦: 断層帯の詳細位置・形状等および断層活動履歴・平均変位速度の解明, 立川断 層帯における重点的な調査観測平成 24 年度報告書, 3-15, 2013.
- 鈴木毅彦: 断層帯の詳細位置・形状等および断層活動履歴・平均変位速度の解明, 立川断 層帯における重点的な調査観測平成 25 年度報告書, 75-94, 2014.
- 鈴木毅彦・村田昌則・大石雅之・山崎晴雄・中山俊雄・川島眞一・川合将文: テフラ編年 による立川断層活動史の復元. 第四紀研究, 47, 103-119, 2008.
- 鈴木宏芳・高橋 博:府中地殻活動観測井の作井と坑井地質,国立防災科学技術センター 研究速報,64,1-81,1985.
- Talwani, M., Worzel, J. L., and Landisman, M.: Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. J. Geophys. Res., 64, 49-59, 1959.
- Talwani, M., and Heirtzler, J. R. : Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional bodies of arbitrary shape, in Parks, G. A., Ed.: Computers in the mineral industries, Part 1: Stanford Univ. Publ., Geological Sciences, 9, 464-480, 1964.
- 東京都: 関東平野(東京都)地下構造調査(北多摩地区弾性波探査)に関する調査成果報告書, http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Tokyo8Afrm.htm, 2004.
- 東京都: 立川断層に関する調査(反射法弾性波探査),

http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/Tokyo2Bfrm.htm, 1998.

Yamamoto, A., R. Shichi, T. Kudo: Gravity database of Japan (CD-ROM), Earth Watch Safety Net Research Center, Chubu University, Special publication, No. 1, 2011.

- 山口和雄・加野直巳・横倉隆伸・木口 努・田中明子・佐藤比呂志: 反射法による立川断 層の地下構造. 活断層研究, 17, 54-64, 1998.
- 山崎晴雄: 立川断層とその第四紀後期の運動, 第四紀研究, 16(4), 231-246, 1978.
- Won, I. J., and Bevis, M.: Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines: Geophysics, **52**, 232-238, 1987.