

不被圧地下水水位変化に伴う水害予測のための 接地抵抗変化を用いた水位推定法の理論

A Theory of Water Level Estimation to Focus on the Change of Earthing Resistance for the Prediction of Flood Occurrence

領木 邦浩
Kunihiro Ryoki

It is occurring that concentrated heavy rain accompanied by global warming. In some places, the precipitation absorbed in the earth becomes the perched water, the level of the unconfined groundwater rises. As a result, flooding is occurring. It is necessary to observe the water level at the borehole in order to sense the rise in the water level of the groundwater level and make it useful for disaster prevention. But it is difficult to observe at multiple points. On the other hand, there are many earthing electrodes of electric facilities in the place where people are active. The value of total earthing resistance depends on the electrical conductivity of the ground. The value of electrical conductivity of the earth greatly changes when groundwater is present. Therefore, it was inspected the theory of the method to estimate a groundwater level in this paper.

Keywords: Groundwater Level, Water Damage Prediction, Ground Electrical Conductivity, Pore Water, Perched Water

1. はじめに

関東平野西部に位置する武蔵野台地は、入間川水系・荒川・多摩川・東京湾で囲まれた面積約 846km² の日本最大の台地である(角田^[1])。武蔵野台地の基盤となる広い扇状地は関東山地に端を発する多摩川によって形成された。これが第四紀に隆起してゆく際に、全地球的な寒冷期と温暖期の繰り返しの伴う海退・海進によって段丘が発達し、これらの上部に逐次関東ロームが堆積した。関東ロームの総層厚は数メートルから十数メートルに及ぶと推定されている。

ローム層は一般に地下水の浸透が良好である。しかし、近年の地球温暖化に伴って突発する局地的な豪雨時には、浸透による排水が追い付かず、浸水等の災害が発生している。武蔵野台地の中央部に位置する小平市では、1991年にJR武蔵野線の新小平駅で土砂交じりの地下水が大量に擁壁の開口部から駅構内に流入した。駅の設備は冠水し、新小平駅をはさむ区間で約2か月間列車の運行が休止した。この時、その東およそ1kmに位置する長期水位観測井で3ヵ月程の間に水位が約6m上昇した(東京都地質調査業協会^[2])。

不被圧地下水はローム層の下位にある武蔵野礫層を帯水層としているが、局所的にはローム層中のローム質粘土層を難透水層とする宙水がいくつか存在すると、角田^[3]は主張する。これらの宙水は、豪雨などにより一時的

に天水起源の水の過剰供給を受けると地下水位を上昇させ、新小平駅で見られたような災害を引き起こすと考えられる。

このような災害を事前に察知するためには、地下水位を多くの地点で観測する必要がある。しかし、現状は広範囲の地域に高々数点の観測井が稼働しているにとどまっている。広範囲に、観測井を多くの地点に配置して地下水位を連続的に直接監視することは、設置費用および保守運営の観点から見て現実的ではない。したがって、観測井での観測に替わる方法の理論を構築し、これを実用化してゆく事が喫緊の課題である。

2. 地層の抵抗率の変化特性

領木^[4]は、第四紀の大阪層群中の海成粘土層が露頭する地点において自然電位の連続観測を行った。浅海性堆積層の海成粘土層には広義の硫化鉄鉱物 FeS_{2-x} (0 ≤ x ≤ 1) が特徴的に含まれており(市原^[5])、露頭として地表で空気に触れると空気中の酸素によって酸化され、酸化還元電池作用により自然電位の異常が見込まれる。ここでの自然電位の変化は気温の変化に遅れて生じ(図1)、概ね3ヵ月の遅延が確認された。硫化鉄鉱物の風化に起因する電池作用によって生じた電流は、地温の変化に伴う地層の抵抗率の変化によって電位の変動をもたらすと解釈され、地表での温度変化が地下深部へ伝わる際の遅延応答

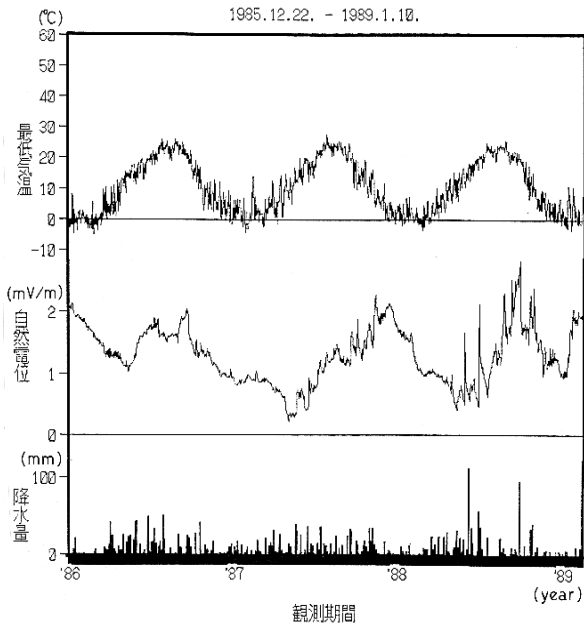


図1 自然電位と最低気温・降水量の関係 (領木^[4])

によって自然電位の気温に対する位相の遅れを示すと考えられた。

領木^[4]が示したように、地層の抵抗率は一定ではなく、地温などによって時間的に変化する。大きく寄与する要因は地層の空隙中の水の飽和度であり(菅野^[6])、降水によって一時的に変化することがある。また、準定常的には地表付近の未固結堆積層において地下水位の変化として捉えられる。

大地の抵抗率分布は、地下水資源の探査において有力な手段であり、農業分野などでは多用されている。特に、海外の水資源が乏しい地域への技術協力では、比較的装置が簡便で測定のための技能習得や運用が容易である電気探査法の紹介・伝習が技術移転の有力な項目となっている。

3. 水平二層構造での地表における接地抵抗

地下水位の変化は、大地の抵抗率分布の変化として捉えることができる。図 2(a)に示すように、大地が半無限媒質であれば、地表の 1 点から流入する電流 I によって電流流入点 O から距離 r の地表で観測される電位 V は、電位の基準点を無限遠にとると、

$$V = \frac{\rho l}{2\pi r} \quad (1)$$

となる。また、図 2(b)のように点 O を中心とする完全導体の半球状電極が埋設されている場合も、その電極表面の電位 V は(1)式と同じになる。

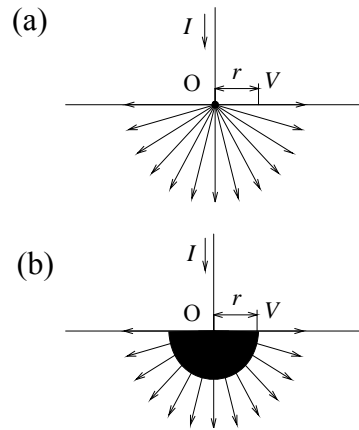


図 2 半無限媒質に流入する電流 I によって流入点 O から距離 r の地表に生じる電位 V (a)点電流電極の場合、(b)半径 r の完全導体電極の場合。完全導体の抵抗率は $\rho_0 = 0$ 。

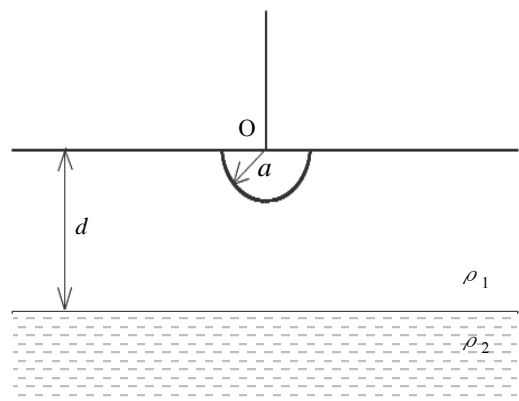


図 3 二層構造上の接地極 a : 接地極の等価半径, d : 第 1 層の層厚, ρ_1, ρ_2 : 第 1 層, 第 2 層の抵抗率。

図 2(b)の場合、電極表面の電位 V は電極表面から流出する全電流 I に比例する。ここでの比例定数 R は半球状電極の接地抵抗にほかならない。すなわち、

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2)$$

である。

今、大地を均一な堆積層と考え、その中で自由地下水面が上下に変動することを考える。このとき、大地は図 3 のような水平二層モデルで表現できる。堆積層の空隙が

自由地下水によって満たされたならば、その部分は抵抗率が低下した下位層(第2層)とみなせる。

一方、現実の接地電極の形状は多様であるが、接地抵抗を同じくする半径 a の半球状導体電極でこれを表現することを考える。大地が抵抗率 ρ_1 の半無限媒質であれば、その接地抵抗 R_1 は次式で与えられる。

$$R_1 = \rho_1 / 2\pi a \tag{3}$$

ここで、 a を任意形状の電極の接地抵抗の「等価半径」と呼ぶことにする。

次に、図3のような水平二層構造において、鏡像法(萩原^[7])を用いて原点 O から流入する電流 I によって距離 a の地点に形成される電位 V_a を考える。鏡像法は、静電場の問題を考える場合に用いられる一つの手法である。今、真空中に誘電率 ϵ の半無限媒質を考え、その表面から距離 d だけ隔てた位置に点電荷 q を置くと、誘電体の表面に誘導電荷が生じる。このとき、これらの電荷分布が作る電場と同一となるように、真空中に q から距離 $2d$ だけ隔てて電荷 q' を置くことを考え、電場の問題を解くことができる。 q' は鏡に映る像になぞらえることができ、このような解法は鏡像法と呼ばれている。

半無限媒質に代えて、第一層の厚さを d とする平行二層の誘電体とし、その表面に電荷を置くときも、二つの層の境界面を鏡面とする鏡像を考えることができる。この鏡像は真空と接する第一層の表面を「鏡」として新たな鏡像を作る。この過程が無限に繰り返され、「合わせ鏡」のような像が生じてゆくこととなる。

ところで、誘電率 ϵ の誘電体中の電場を E とすると、そ

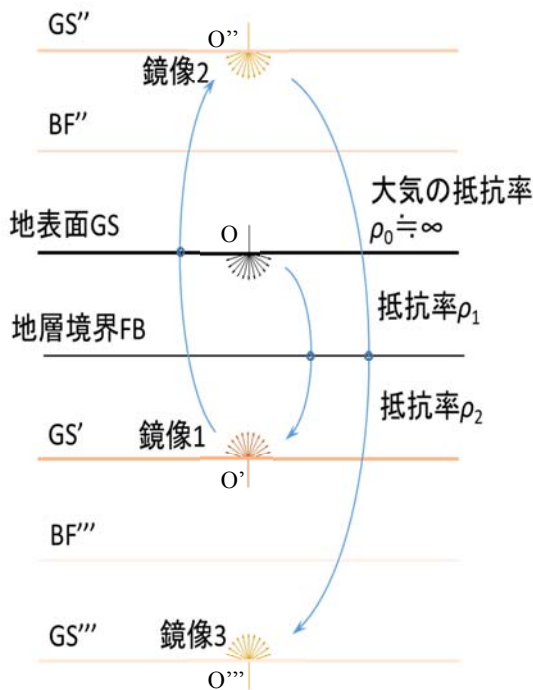


図4 鏡像法の概念図

の電束密度 D は、 $D = \epsilon E$ である。一方、導電率 σ の導体中に流れる電流密度 j が作る電場 E は、 $j = \sigma E$ で与えられる。いずれの場合も電位 V は、 $E = -\text{grad}V$ によって求められる。そこで、両者の式の相似性から、導体中で電流が作る電位は、これを誘電体中で電荷が作る電位に置き換えて、問題を解くことができる。

図4に示されるように、地表面 GS に置いた電流源 O は、地層境界 FB によって写し出され、下方に鏡像面 GS' を作り、この面上に見掛け上の電流源として鏡像1を形成する。次に、 GS は FB と GS' を写して、 GS の上方に地層境界の像 BF'' と鏡像面の像 GS'' を作る。このとき、見掛け上の電流源として GS'' 上に鏡像2が形成される。この過程が無限に続き、これらの総和として水平二層内の電流密度の分布が求められる。電流源を半球導体電極としても同様である。その結果、第1層の厚さを d とすると、 V_a は次のようになる。

$$V_a = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Q^k}{\sqrt{1 + 4k^2 \left(\frac{d}{a}\right)^2}} \right) \tag{4}$$

ただし、 $Q = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ である。

以上から、半径 a の半球導体電極の接地抵抗 R_a は、

$$R_a = \frac{V_a}{I} = \frac{\rho_1}{2\pi a} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Q^k}{\sqrt{1 + 4k^2 \left(\frac{d}{a}\right)^2}} \right) \tag{5}$$

となることが導かれる。(5)式に基づいて、図5に、 ρ_2/ρ_1 をパラメータとして、電極の等価半径 a で基準化した第1層の厚さ d/a に対する、抵抗率 ρ_1 の半無限媒質を想定し

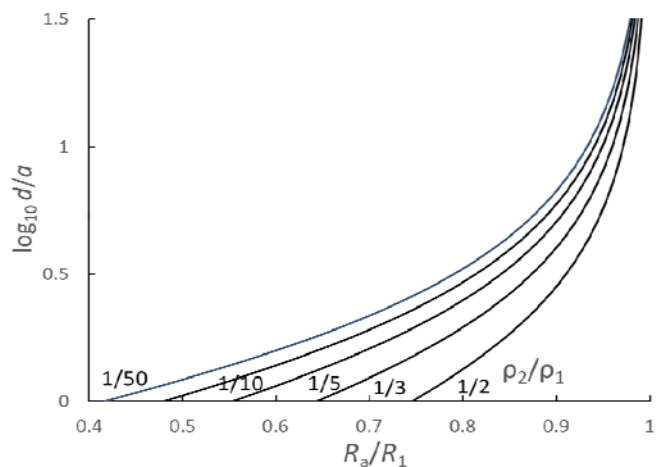


図5 二層構造上の接地電極の接地抵抗理論曲線 図3の条件で計算。 R_a : 接地抵抗値, R_1 : 単層の場合の接地抵抗値。

標尺 m	層厚 m	深度 m	柱状 図	土質 区分	色 調	標準貫入試験			
						開始 深度 m	打撃 回数	貫入 量 cm	
1	0.50	0.50		礫土	暗褐	2.15	5	30	
2									
3									
4									
5	5.20	5.70							
6				砂礫	暗褐	6.15	50	28	
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16	10.10	15.80		粘土質細砂	暗褐	16.15	50	30	
17									
18									
19									
20	4.43	20.23							
21									

図 6 武蔵野台地中央部のボーリング柱状図例 ボーリング番号 30440058, 1984 年 1 月調査, 北緯 35°44'19" 東経 139°27'42", 孔口標高 T.P.+81.50 m, 孔内水位 GL.-8.20 m. ただし, T.P.: TokyoPail (東京湾平均水位)は日本全土の標高の基準とされる海水面の高さである. また, GL: Ground Level は一般にある地点の標高値を示す略語で, ここではボーリングの坑口標高値である. なお, ボーリングの位置は図 7 に示されている. (東京都土木技術支援・人材育成センター^[10]).



図 7 電気探査測線の位置 ○: 検証用ボーリング孔削井予定地, ●: 既存調査ボーリング 30440058 (図 7)の位置, 太線: Wenner 法垂直電気探査測線. (国土地理院^[9]に加筆)

た時の接地抵抗 R_1 (式(3))で基準化した二層構造での接地抵抗 R_a/R_1 の理論曲線を示す. ρ_1 は地表での測定で容易に求められ, a は見積もり可能である. また, 第 1 層と同じ地層の空隙が水で飽和したものを電気電導度分布の第 2 層と考えているので, 例えば, 物理探査学会^[8]などの成果に基づいて ρ_2 を推定する, もしくは, 地質サンプルを得て実験的に水で飽和した地層の抵抗率の測定値を確定すれば, d を決定することができる.

4. 接地抵抗連続観測による水位変動予測

萩原^[7]によると, 武蔵野段丘地表部に分布するローム層の抵抗率は 10~500 Ω m であり, 空隙中の含水量に大きく依存する. したがって, ローム層では, 比較的乾燥した表層部と自由地下水面より下部との抵抗率の比が 10 倍程度であると期待できる. ローム層の層厚と地下水位の一例として, 武蔵野台地中央部の小平市小川西町にある職業能力開発総合大学校北東端におけるボーリング柱状図(東京都土木技術支援・人材育成センター^[10])を図 6 に示す. ボーリングの坑口の標高を GL: Ground Level とすると, ボーリング掘削時の孔内水位は GL. -8.20 m である. もし, ローム層内にまで地下水位が上昇すれば, 図 5 に示されるとおり, 見掛の接地抵抗 R_a の低下が有意に見込まれ, これによって自由地下水面の変動が予測可能となる. そこで, ここで述べた方法の当否を検証するために, 図 7 に赤丸で示される位置に観測用のボーリング孔を掘削し, 坑井内の地下水位と地下水の温度・抵抗率および降水量, 気温, 気圧等の気象条件を連続的に測定すると共に電気設備保安用接地と同等の接地電極を埋設してその接地抵抗を同様に連続観測して, これらの測定値を比較検討する予定である. なお, 随時, Wenner 法などによる表層部における電気伝導度の測定を実施することを計画している.

図 7 に示されたボーリング孔の近傍で電気探査を実施した結果を図 8 に示す. 今回の測定は横河電機製 3244 形大地比抵抗測定器を用い, Wenner^[11]が考案した方法(Wenner 法)に即して行った. Wenner 法は, 大地の抵抗率を測定する一つで, その解説は多くの成書(例えば, 菅野^[6]や高橋^[12]など)に詳しく示されている. この方法は, 現在, 標準的な測定法として地質調査において広く用いられている.

Wenner 法では, 地表面に等間隔 a を隔てて

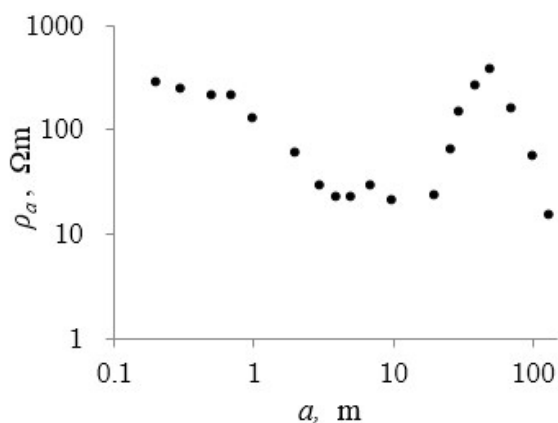


図8 Wenner 法垂直電気探査の結果 a : 電極間隔, ρ_a : 見掛抵抗率, 測線は図7に示されている. 測定は2018年9月4日に筆者所属校の職業訓練指導員研修(2018年度技能・技術実践研修 No.3113)の一環として実施された.

直線状に4極の電極を配置し, 外側の2電極間に電流 I を流し, これによって内側の2電極に生じる電位差 V を測定する. そして, これらの比を用いて内側2電極近傍の大地の抵抗率 ρ_a を求める. ρ_a は次のように定義される.

$$\rho_a = \frac{2\pi aV}{I} \quad (6)$$

ここで ρ_a は, 大地の内部構造や個々の抵抗率分布を均一化して表現した抵抗率であり, 見掛抵抗率と呼ばれている. 電極間隔 a を小さいものから順次大きくして行ってそれぞれで ρ_a を測定すると, 大地を水平二層または水平多層構造と考えた場合, 浅部から深部に至る垂直方向の抵抗率分布が推定できる. この探査手法は垂直電気探査と称される.

図8では, 電極間隔 a が10m以上で水平成層構造の仮定が成立しない急激な見掛抵抗率曲線の上昇と減少が目を見られる. この上昇部分は, 測線が校舎や中層住宅に囲まれた公道沿いであるため, これらの建築物の基礎が地層に比べて良導体となっていることに起因する擾乱であると考えられる. この部分の影響が反映されにくくなる a のより大きい部分では見掛抵抗率が再び小さくなり, $a=130\text{ m}$ では見掛抵抗率は $14.7\ \Omega\text{m}$ となった. $a \leq 20\text{ m}$ の測定値を用いて標準曲線による一次元解析を行ったところ, 上位より第1層の層厚 0.29 m , 抵抗率 $290\ \Omega\text{m}$, 第2層の層厚 0.90 m , 抵抗率 $130\ \Omega\text{m}$, 第3層の抵抗率 $22\ \Omega\text{m}$ を得た. これより, 第1層は人工的な影響を受けた表土, 第2層は黒ボク土, 第3層がローム層に対応すると考えられる. 前述した建築物の影響を受けているため, 電気探査によるこの測線での地下水位の確認は出来な

った.

なお, 図8のような4層構造が示唆される探査結果には, 3層標準曲線(高嶋・他^[13], 1995)を援用した王・他^[14] (1998)の方法が有効であると示唆されるので, 今後, 解析精度を向上させるためにこれらの方法を検討してゆく必要がある.

4. おわりに

本稿では, 地下水位の変動が接地抵抗値の観測によって検出できる可能性が理論的に示された. 今後は, この仮説を検証するために図7に示される位置に掘削予定のボーリング孔を用いて地下水位と大地抵抗率および接地抵抗値の変化の関係を明らかにしてゆく予定である.

謝辞

本研究を行うに際し, 筆者所属校の関係教職員のご理解とご協力を賜った. 同校で実施された2018年度技能・技術実践研修 No. 3113を受講された先生方には, 測定実習で得られた計測値を使用させて頂いた. また, 本研究はJSPS科研費 JP18K03793の助成を受け実施されるもの一部である. 記して深く謝意を表します.

参考文献

- [1] 角田清美:「武蔵野台地の河川と水環境」, *駒澤地理*, No. 51, pp. 35-57, (2015).
- [2] 東京都地質調査業協会:「JR 武蔵野線新小平駅の浮き上がり, 地下構造物と地下水位」, *技術ノート*, 30, pp. 21, (2000).
- [3] 角田清美:「武蔵野台地中央部の段丘地形と不圧地下水」, *駒澤地理*, No. 53, pp. 35-53, (2017).
- [4] 領木邦浩:「自然電位の年周変化 身近な地球物理学現象の教材化をめざして」, *大阪と科学教育*, No.4, pp. 25-32 (1990).
- [5] 市原優子:「大阪層群の泥質堆積物中の有機物と硫黄」, 大阪層群, 市川実, pp. 273-282, 創元社, 大阪(1993).
- [6] 菅野強:「電気探査比抵抗法の基礎事項」, 建設・防災技術者のための物理探査, 佐々宏一・芦田讓・菅野強, pp. 128-147, 森北出版, 東京 (1993).
- [7] 萩原尊禮:「比抵抗法」, *物理探査法*, pp. 143-172, (1951).
- [8] 物理探査学会:「岩石・土壌および物質の導電率と比抵抗」, *新編物理探査用語辞典*, pp.260, (2005)./
- [9] 国土地理院: 地理院地図, 2018年10月15日閲覧, <https://maps.gsi.go.jp/>
- [10] 東京都土木技術支援・人材育成センター:「ボーリング柱状図 ボーリング番号 30440058」, 東京の地盤(GIS版), (2014), 2018年10月15日閲覧, <http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyouthou/geo-web/fileDL.ashx?dl=show&cd=Xxn3GNU5MEVvtLREiQI%2FeA%3D%3D>
- [11] Wenner, F.: A method for measuring Earth Resistivity, *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 12, pp. 469-478, (1915).

-
- [12] 高橋健彦:「大地パラメータ」, 図解接地抵抗入門, pp. 53-68, オーム社, 東京 (1986).
- [13] 高嶋武・王漢東・作田忠裕・佐藤寿徳:「Wenner の四電極法で得られた ρ - a 曲線の解析に用いる新しい標準曲線の提案」, 電気学会論文誌 B, Vol. 115, pp.1412-1418, (1995).
- [14] 王漢東・高嶋武・作田忠裕・坪田良正:「Wenner の四電極法で得られた四層大地 ρ - a 曲線の解析」, 電気学会論文誌 B, Vol. 118, pp.140-147, (1998).

(原稿受付 2018/12/17, 受理 2019/4/1)

*領木邦浩, 博士(理学)

職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 Email: k-ryoki@uitech.ac.jp

Kunihiro Ryoki, Sc. D.

Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-003.