

5. 5 液状化—流動化しやすい場所しにくい場所

ここでは、今回の東京湾岸埋立地での特徴的な被害分布である斑状分布と帯状分布についてこれまでわかってきていることを紹介します。

5. 5. 1 斑状分布の一因(図7の赤色部分)

千葉市美浜区の中磯部公園では東方沖地震時に直線状に噴砂が並び(写真38)このメカニズム解明調査を2000年に行ないました。これに直交する地質断面(図8)から、噴砂は人工地層の砂層と泥層の境界部に位置することがわかりました。砂層と泥層では地震時の揺れ方や地下水の流動のしかたが異なるので、この地層境界部の砂層部分が最も液状化しやすいと考えられ、ちょうどこの部分のオールコアボーリング(コアを連続的に採取し観察する方法で、詳細な地質状況が把握できる)による断面は液状化—流動化によりラミナが消失していました¹¹⁾。太平洋沖地震では、この砂層の多くの部分が液状化—流動化し多量の噴砂・噴水を伴い沈下が生ずる一方、泥層分布域では地表面の変形はほとんどみられていないので液状化していないものと思われます¹²⁾(写真39)。なお、このような砂層と泥層の卓越部にまたがるライフラインのような長い施設を作る際には、地震時の挙動の違いを考慮する必要があります。

このような人工地層の砂層や泥層の分布はどのようにしてできたのでしょうか？

東京湾岸埋立地では、埋立てる場所を堤防で囲み、この沖合いの浚渫船が海底の土砂を海水とともに吸い込み、パイプを通して堤防内に流入させ埋積していきます。この時、土砂には砂とともに泥分も含まれ、地層粒子は粒径が大ききなものほど水中での沈降速度がはやい(ストークスの法則)ことから、流入口付近には砂が、離れたところには泥が沈殿します。航空写真の白く見える部分が流入口のうず高く砂が積もっているところです¹³⁾(写真40)。流入口が埋まらないように移動させるため、人工地層の砂層や泥層の分布は複雑な形態となり、液状化—流動化現象が斑状分布をなすものと考えられます¹²⁾。戸建住宅の隣同士で被害状況が異なるのもこのようなことによるものと思われます。

5. 5. 2 帯状分布(図7のオレンジ色部分)の原因の推定

千葉市美浜区において、既存の地盤調査データと地質環境研究室で行なってきた数本のオールコアボーリングから想定されるこの地区の断面と地震の揺れ・被害との関係を図9に示します。この帯状の液状化—流動化被害分布は大局的には約1.8万年前の氷河期の海面低下によって谷が形成され厚く沖積層が堆積している位置と調和的です。また図7で東京湾に向かいその帯の幅が広がるのは、人工地層が厚くなることにも関係していると考えられます。氷河期に出来た谷に軟らかな沖積層が厚く堆積していると地震動は増幅し被害を増大させる傾向にあるという1923年関東大震災後の農商務省地質調査所の調査結果¹⁴⁾から明らかとなった現象が現れたためと推定しています。



写真38 中磯部公園内の東方沖地震時に直線状に並んだ噴砂。



写真39 太平洋沖地震では人工地層の砂層分布の全域が液状化—流動化し沈下した。

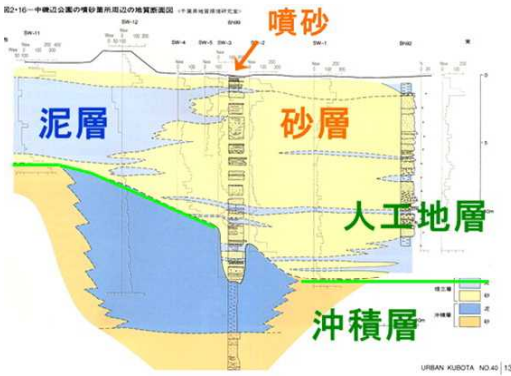


図8 噴砂の列に直行方向の地質断面図
黄緑の線が人工地層と自然地層の境界となる人自不整合。



写真40 1971年に稲毛の沖合を埋立てているところ。

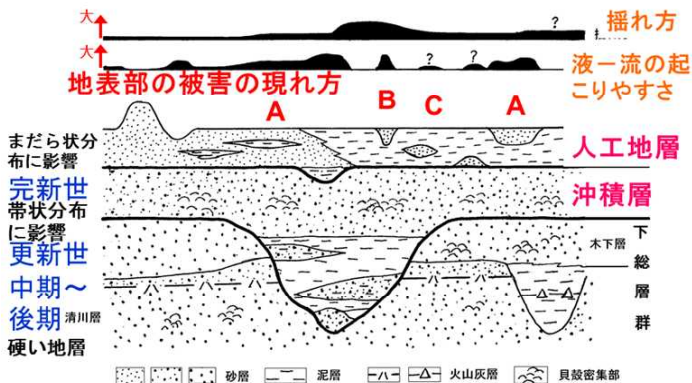


図9 東京湾岸埋立地の想定される地層構成・地震動増幅・液状化—流動化の起こりやすさ

6. 房総半島における液状化－流動化現象のまとめ

これまでの調査結果をまとめると、以下ようになります。

- ①人工地層は液状化－流動化しやすい地層なので、人自不整合(人工地層と自然地層との境界面)の認定が重要となります¹⁸⁾。
- ②人工地層中では、砂層を中心に著しい液状化－流動化現象が発生します。また、粘着力の少ない粗粒シルト層も液状化－流動化が発生します¹⁹⁾。
- ③人工地層の厚いところほど、液状化－流動化は起こりやすく、その現象は著しくなる傾向があります¹²⁾。
- ④東京湾岸埋立地は、東京湾の海底の泥混じりの浚渫土砂で埋め立てられているため、泥層卓越部と砂層卓越部が複雑に入り組んでおり、砂層部分が液状化－流動化しやすいものの、粘着性の泥層部分は液状化しないことから、斑状に液状化－流動化部分が発生しやすい傾向にあります¹²⁾。
- ⑤人工地層中では、泥層卓越部と砂層卓越部が側方に隣接する場合、地震時の挙動が異なりその境界付近では歪が蓄積しやすいことから、その砂層部分が最も液状化－流動化が起こりやすい傾向にあります¹¹⁾。
- ⑥人工地層分布域の中では、その下位の沖積層の厚さが厚いところほど地震動が増幅しやすいことから、液状化－流動化が起こりやすい傾向にあります¹²⁾。
- ⑦埋立地では、護岸の周囲は地下水流動が遮られること、地層と護岸が地震時の挙動が異なることなどから液状化－流動化が起こりやすい傾向にあります¹³⁾。また、これにより護岸周辺が海側へ移動しやすい傾向にあります¹⁵⁾。さらに、護岸が倒壊すると広い範囲で地滑りが起こり被害が拡大します^{20)・21)}。
- ⑧著しい液状化－流動化が起こると、地波が発生し表層構造物に大きな被害を与えます。また、地中では流動化により地中のライン構造物に大きな被害を与えます²²⁾。
- ⑨地下水が浅いところほど、液状化－流動化は起こりやすく、その程度は著しくなる傾向があります¹²⁾。
- ⑩一度液状化－流動化が起きたところでは、流動化により地層が擾乱され、ゆる詰まりとなっている場合が多く、再度液状化－流動化が起こりやすい傾向にあります¹³⁾。
- ⑪沖積平野では旧河道に沿って、液状化－流動化が発生しやすい傾向にあります。また、砂鉄採取のための掘り返し部分や、下水道の敷設などのために掘り返した部分で液状化－流動化が起こる傾向にあります。
- ⑫海岸部では海岸砂丘の内陸側斜面の湧水発生部付近で液状化－流動化が起こる傾向にあります²³⁾。
- ⑬液状化に引き続く流動化現象・地波現象による被害の軽減に向けては、地中でのこれら現象と地震動に関する観測、液状化によるS波の減衰効果²⁴⁾の観測、地層断面

の観察によるメカニズム解明、沖積層・人工地層の地質構造と地震動増幅の透水層構造の把握などが必要となります。

7. 液状化の防ぎ方

液状化がおこるには以下の3条件が重なって初めておこります^{20)・21)}。

- ①ゆる詰まりの粘土分が少ない砂層である。
- ②地下水位が浅い。
- ③比較的大きな地震の揺れがある。

では液状化を防ぐにはどうすればよいでしょう？この3条件のうちの1つの条件を克服すれば良いわけです。この時、③の地震動については人間の力をはるかに及ばない現象で、コントロールは当分不可能です。

①については、サンドコンパクションなどと呼ばれている地層に強い力を加えて締め固める方法、セメントミルクなどを注入し粒子同士を接着させる方法があります。ただし、この場合地下水の流動障害を起こしやすいので、何らかの地下水流動を確保する必要があります。さもないと、地下水流動の上流側の水位が上がり液状化しやすくなります。また、対策部分と無対策部分では地層の物性が変化するため、地震時の挙動に違いが発生し、境界部に歪が集中し液状化—流動化が起こりやすくなることが考えられます。

②については、地下水位をコントロールする方法があります。これには、地下水位をあらかじめ下げた方法(動的ドレーン工法)と、地震時に地下水位が上昇する時に地表面まで達しないようにバイパスを作って排水させるドレーン工法とがあります。ただしこの方法は、地下水流動が遅い粗粒シルト層などには不向きです。

対策には万能な方法はありませんので、対象地の地質構造や地下水流動の状況、液状化—流動化が起こりやすい部分などを明らかにし、各種対策方法の特徴を考慮し場合によっては組み合わせることも視野に入れて計画的に進めるのが重要と考えられます。

これまでのところ、著しい液状化—流動化現象が明らかになっているのは、主に人自不整合よりも上位の人工地層です。また、江戸時代や室町時代の旧河道内の地層も液状化—流動化していることが過去の地震で明らかとなっています^{14)・15)}。

工事を行う場合は、対象地域の災害の歴史も考慮し、地質を詳細に調べ対策方法を立案するのがよいでしょう。

また、流動化を防ぐ工法等も開発されておりますが、流動化は液状化に伴う現象なので、液状化を防ぐことがまず重要と考えられます。

8. 今後の復旧・復興と大地の継続的利用に向けて

東日本大震災では、日本列島といった大きなオーダーから町・字といった小さなオーダーまで、地質環境の違いによって被害の現れ方が大きく異なりました。このような視点から災害に強い持続的な社会を営むにあたって以下のようなことが必要と考えられます。

- ①揺れと地質構造の把握: 日本列島の骨格を形づくる地質構造である、火山列や糸魚川－静岡構造線などの地質構造線を境に、地震の揺れ方に大きな違いがみられました。また、町内会や字といった狭い範囲でも、地下を構成する地層や地下水位といった地質環境の違いにより、液状化－流動化や沈下などの被害の現れ方に差がみられました。今後は、特に地層境界に力点をおいた詳細な地質構造を明らかにする必要があります。それには、既存のボーリングデータの収集・整理とデータの質を担保するためオールコアボーリング・各種地層物性の把握が必要となります。
- ②構造物と地質構造: 上記のように地層境界部を境に揺れ方が異なってくることが考えられますので、異なる地質や地質構造線などにまたがる構造物をなるべく作らないようにするか、作る際には揺れの違いを考慮する必要があります。
- ③大地の持続的利用の観点からみた災害の知識の必要性: 大地の持続的利用には、津波や地震、液状化、斜面崩壊といった地質災害の知識とともに、地下資源(地下水・温泉等)などの幅広い自然現象を総合的に扱う地質科学の知識が必要です。このような知識があり、対象地域の地層分布が把握できていれば、災害に強い土地利用を行うことが可能となり、災害時には災害状況の予測がある程度つくため、迅速な状況把握と対策、避難場所の安全性の確保や自立性の確保が可能となります。
- ④災害教育: 教育の分野で、地震時に災害が生じる人工地層・沖積層・新生代層といった地層や地下水に関すること、地盤の沈下・斜面崩壊・地質汚染などの予防・修復や大地の持続的な利用を取り扱う必要があります。
- ⑤地下水の重要性: 上水道が寸断した地域の自治会の中には、日常的に利用している井戸により上水を確保したところもありました。防災井戸は設置するだけでなく、維持管理のため日常的な利用と地下水位・地下水質の定期的なモニターが重要です。

参考 液状化—流動化の基本メカニズムの解明例等

東方沖地震後に当センターで行って来た液状化—流動化現象のメカニズム解明例などを紹介します。

1. 液状化—流動化の概念を確立した香取市石納でのトレンチ調査

明治時代まで利根川の河道であり、その後三日月湖となり、戦後間もなくサンドポンプ工法で埋立てた香取市石納の一带では、東方沖地震時に多数の噴砂がみられました。その中でも直径2mもの噴砂孔を持つものがありそこを掘削し地層を観察するトレンチ調査を行いました。その断面図が図10です。この断面をみてまず驚いたことは、地層

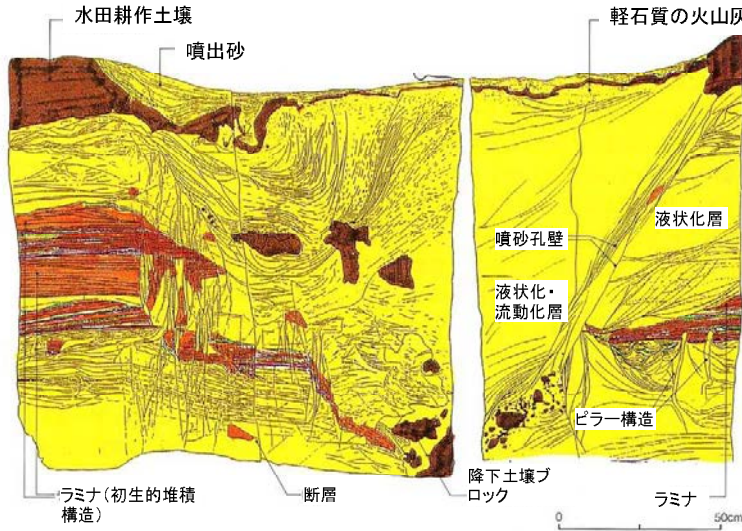


図10 トレンチ断面の記載例

濃いオレンジ色：非液状化部分。
オレンジ色：液状化しラミナがぼやけた部分。
黄色：液状化—流動化しラミナが消失した部分。

(地質環境研究室、2003 アーバンクボタ No.40(株式会社クボタ発行)より)

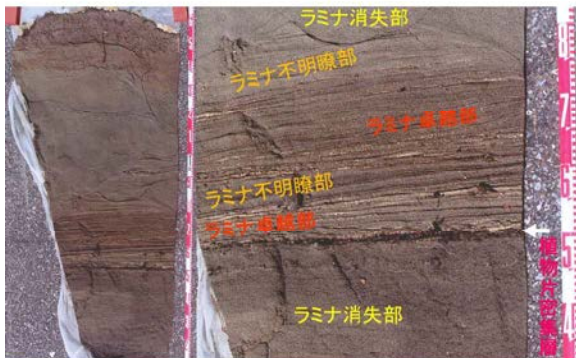


写真41 地層断面

ラミナ(横方向に延びる筋模様)が残っている部分、消えかかっているところ、完全に消えているところがみられる。

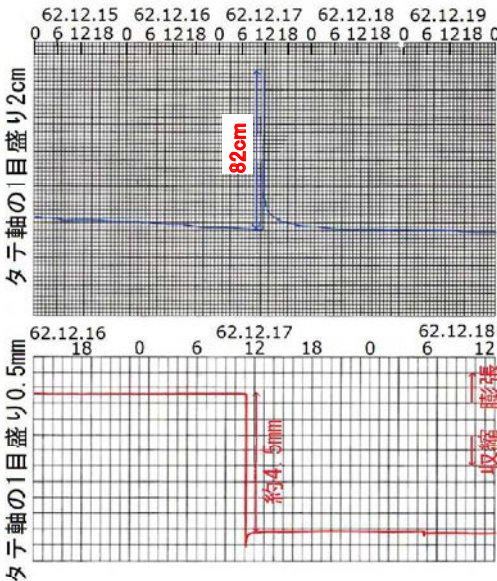
全体が液状化—流動化しているわけではなく、地層堆積時に形成されるラミナが残っている部分(濃いオレンジ色の着色部)と、液状化—流動化によりかき乱されラミナが消えている部分(黄色の着色部)、ラミナがぼやける程度に乱れている部分(オレンジ色の着色部)が混在していたことです。それまでの常識ですと、地層全体が液状化—流動化し乱されており、ラミナはみられないに違いないといったことでし

た。また、調査に当たっては特殊な樹脂を吹き付け、実際の地層を剥ぎ取り、室内でその断面を詳しく観察しました。その剥ぎ取り断面の一部(写真41)をみると、ラミナである縞模様がはっきりみえる部分、ラミナがぼやけてみえる部分、ラミナが消失し見えない部分があることがみてとれます^{13)・25)}。このような断面をいくつか観察し、液状化—流動化の過程をまとめた結果がP.4図2となりました。

2. 液状化対策としてのドレーン工法

香取市石納でのトレンチ調査で、液状化—流動化していない部分の基底には黒い薄い層が挟まれているという共通点があることが観察されました。黒い層は植物片の集合した厚さ1～2cmの層で、水が通りやすい大きな隙間を持った地層でした。すなわち、地震が起こり地下水位が上昇する際、このような地層があれば、この隙間を通して水圧が高まりにくくなることが考えられます¹²⁾。米国のSeedらは液状化を防ぐ方法として、高まる地下水を井戸を作り地上へ逃がししまうドレーン工法というものをすでに考案しており、この黒い地層が、この工法の妥当性を実証してくれたものといえます。この調査結果に基づき、当センター地質環境研究室・東京大学土木工学科・千葉県内民間企業との共同研究でヘチマドレーン工法(特許公開平06-065913、平07-018653、平

07-18965)を開発しました。



3. 液状化—流動化現象を観測した地盤沈下観測井

東方沖地震では、大網白里市にある千葉県環境生活部水質保全課で観測している九十九里-2地盤沈下観測井において、地震時に実際に地下水位が82cmも上昇し、同時に液状化—流動化現象に伴う地層の収縮も観測されました。この観測井の脇の水田内では噴砂がみられており、地震時に液状化—流動化現象が発生した場所において、地表面を超える地下水位の上昇だけでなく地層収縮も観測された例は他になく、貴重なデータといえます。なお、観測していた地層は深度10.8m～16.3mの沖積層の砂層です。

図11 東方沖地震時の九十九里-2地盤沈下観測井での地下水位と地層収縮の記録(地質環境研究室、2003 アーバンクボタNo.40(株式会社クボタ発行)より)

4. 埋立地護岸沿いに発生した液状化—流動化現象について

図12は、東方沖地震の際に千葉県美浜区の幕張の浜において帯状にみられた液状化—流動化現象の分布状況と、そのトレンチ調査の結果の地質断面図です。調査の結果、埋立地を作る際の護岸が砂の中に埋まっており、護岸の内側約50mの幅で噴砂を中心とした液状化—流動化現象がみられました。コンクリート護岸の下には基礎の鋼矢板が打たれており、護岸の内側では地表に降った雨が浸み込むものの、護岸の外への地下水流動が遅くなり、地下水位が高い状態となっており、液状化が起こりやすい状況になっていました¹³⁾。よって、護岸の一部に孔をあけて地下水を流動させれば、地下水位が広域的に低下するので液状化しにくくなるのですが、東京湾岸埋立地では厚い泥層が挟まれており、不等沈下をおこす可能性が高く、現状ではこのようなことは行えません。このように地下水位を変えることなく液状化を予防するには、地震時に上昇した地層中の水圧を消散させ、液状化を防ぐドレーン工法が今のところ最適と考えられます。また、液状化—流動化現象は、護岸の周囲の砂層にのみみられることから、構造物と周囲の地層の地震時の挙動が異なっていたことも推定されます。ドレーン工法は、地震時の挙動が変わるような地層物性の変化はないことから、このような場所でもこの工法の有効性が考えられます¹⁵⁾。

なお、有害物質を取り扱う工場内では、有害物質の地下深部への漏えいが起こらないように、泥層などの難透水層によって区分される透水層ごとに調査や対策を施す必要があります。すなわち、難透水層に孔をあけ上下の透水層の地下水が混合することが起こらない工夫が必要となります¹⁵⁾。

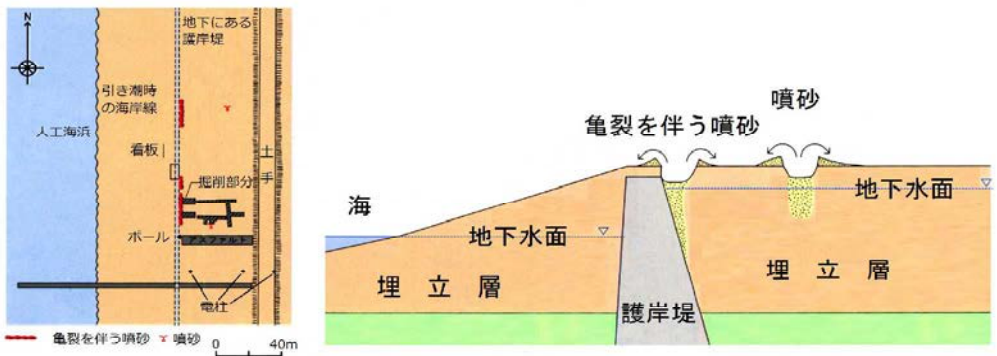


図12 東方沖地震時の幕張の浜における液状化—流動化現象の分布(左)と被害部分での地質断面(右)(千葉県地質環境研究室、2003 アーバンポタNo.40(株式会社クボタ発行)より)

参考文献

- 1) 山下 昇,1970,島弧と海洋,東海大学出版会,p.179-191.
- 2) 矢部長克,1918,現代の科学,6巻,147-150.
- 3) 中川光弘ほか,1986,岩鉱,81巻,471-478.
- 4) 角田史雄ほか,1985,埼玉大学教養部紀要,自然科学,21巻,263-278.
- 5) 楠田隆ほか,2001,第11回環境地質学シンポジウム講演論文集,425-428.
- 6) 竹之内 耕,2001,第11回環境地質学シンポジウム講演論文集,453-456.
- 7) Lowe,D.R.,1975,Sedimentology,vol.22,157-201.
- 8) Mogami,T. and Kubo,K.,1953, Proc. 3rd International Conference on Soil Mech. and Found. Eng., vol.1, 152-155.
- 9) Seed,H.B. and Lee,K.L., 1966, proc. ASCE, vol.91, SM6, 105-134.
- 10) Lowe,D.R.,1975,Sedimentology,vol.22,157-201.
- 11) 風岡 修ほか2000,第10回環境地質学シンポジウム論文集,33-38.
- 12) 風岡 修,2011,一シンポジウム「人工改変地と東日本大震災」資料集,地質汚染－医療地質－社会地質学会,1-21.
- 13) 風岡 修,2003,利根川下流低地,東京湾岸埋立地,アーバンクボタ,No.40,P.5-13.
- 14) 農商務省地質調査所,1929,東京及横濱地質調査報告書,復興局建築部,144p.
- 15) 楡井 久,2003,アーバンクボタ,No.40,P.5-13.
- 16) 新潟大学理学部地質鉱物学教室・深田地質研究所,1964,新潟地震地盤災害図.
- 17) 石綿ほか,1998,科学研究費補助金(基礎研究(A)(1))研究成果報告書 課題番号07309016, 18-29.
- 18) IUGS-GEM,2011,<http://manmade.iugs-gem.org/>
- 19) 大草重康・安間 莊, 1980英, Engineering Geology,16,195-224.
- 20) Kawakami,F. and Asada,A,1966, Soil and Foundation,vol.6,No.1,14-30.
- 21) 藤田至則,1983,新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報,Vol.5,53-62.
- 22) 楡井 久ほか,1986,地質学論集,27,109-114.
- 23) 風岡 修ほか,2007,第17回環境地質学シンポジウム論文集,地質汚染－医療地質－社会地質学会,29-34.
- 24) 楡井 久ほか,1995,都市耐震センター研究報告,京都大学防災研究所, 9号,25-52.
- 25) 風岡 修ほか,1994,日本地質学会第101年総会・討論会 講演要旨,125-126.
- 26) 風岡 修ほか,2004,第14回環境地質学シンポジウム論文集,395-400.
- 27) Seed H.B. and J.R.Booker, 1976,Report No.EERC 76-10,Earthquake Engineering Research Center,University of California,Berkeley.

液状化－流動化現象について
2011年東北地方太平洋沖地震での被害状況と
分かってきたメカニズム

平成25年3月

作成担当:千葉県環境研究センター
地質環境研究室 風岡 修
編 集 : 企画情報室 岡崎 淳

発 行 : 千葉県環境研究センター
市原市岩崎西1-8-8

本書の内容については下記までお問い合わせ下さい。

千葉県環境研究センター地質環境研究室 風岡 修
住所: 〒261-0005 千葉市美浜区稲毛海岸3-5-1
電話: 043-243-0261 FAX: 043-243-0263