

石狩川流域における泥炭土の地盤沈下量から推定した地下水位変化量

The groundwater level change estimated from peat subsidence in the Ishikari river basin

北海道大学大学院工学院 環境フィールド工学専攻 ○学生員 和智光貴 (Koki Wachi)
 北海道大学大学院工学研究院 環境フィールド工学部門 正員 山田朋人 (Tomohito J. Yamada)
 一般財団法人 北海道河川財団 フェロワー 鈴木英一 (Eiichi Suzuki)

1. はじめに

石狩川において治水事業が開始してから平成 22 年で 100 年を迎えた。石狩川流域では、明治 31 年 9 月 6 日～8 日に札幌で 157mm の総降雨量を記録する豪雨により未曾有の大洪水が発生し、開拓が進んでいた石狩川流域は大規模な損害を受けた。この被害を契機に、石狩川流域の治水計画のための調査が実施されることになり、同年北海道治水調査会が設置され、明治 43 年から本格的な治水事業が開始された。

石狩川の改修は河川蛇行部を直線化し、流れを円滑にする捷水路工事が主体となって進められた。これは、洪水を短時間で排水することを第一の目的としていた。現在の石狩川は捷水路事業によって元の河道より約 58km(約 28%)短くなり、蛇行部分は大幅に減少した。

第二の目的は、地下水位を下げ、湿地を農地や住宅地に利用可能にすることであった。「捷水路」¹⁾によると、石狩川流域の湿地、泥炭地を農地や住宅地に改良するため、第 1 期植拓計画において地下水位を 90cm 下げたことを土地改良の目的としていた^{1),2)}。大正 7 年から石狩川支流を含め、約 50 ケ所以上の地区で捷水路工事が進められた。

その効果により、石狩川流域の人口は 100 年間で約 250 万人増加し、東京以北において最大の人口を抱える地域が誕生した。また、上記の通り 2010 年は石狩川治水 100 年の記念の年であることから、地下水位の変遷についても同様に注目された。しかし、同流域では過去の水位データの不足により、現在と明治 31 年頃の地下水位変化量を明らかにするためには直接経年変化を調査するのは困難である。したがって、本研究では、地盤高、地質等の限られた情報から地下水位変化量を算出し、明治 39 年末期の目標はどれだけ達成されたのか評価することを目的とする。2 章では石狩川流域における含水比・間隙比や泥炭層厚など泥炭の工学的性質、3 章では泥炭層における地盤沈下量と地下水位低下量の推定法の説明・考察を行い、4 章では 3 章の推定法の検証、まとめを 5 章に記す。

2. 石狩川流域における泥炭の工学的性質

石狩泥炭地を含め、北海道には天塩川下流域のサロベツ泥炭地、釧路川下流域の釧路泥炭地など、日本有数の泥炭地が広範囲に分布している。その中でも石狩川流域の氾濫原においては、泥炭地生成の後期のものである高位泥炭地が石狩川とその支流に囲まれた平野部に分布し

表-1：初期含水比，初期間隙比(大正 7 年，大正 8 年)の内訳

| | 間隙比 | 地点数 | % |
|------------|-----------|-----|-------|
| ~1000 | ~15.8 | 27 | 42.9 |
| 1000~2000 | 15.8~29.5 | 19 | 30.2 |
| 2000~3000 | 29.5~43.2 | 5 | 7.9 |
| 3000~4000 | 43.2~56.9 | 1 | 1.6 |
| 4000~5000 | 56.9~70.6 | 4 | 6.3 |
| 5000~6000 | 70.6~84.3 | 1 | 1.6 |
| 6000~7000 | 84.3~98.0 | 2 | 3.2 |
| 7000~8000 | 98.0~112 | 1 | 1.6 |
| 8000~9000 | 112~125 | 0 | 0.0 |
| 9000~10000 | 125~139 | 0 | 0.0 |
| 10000~ | 139~ | 3 | 4.8 |
| 計 | | 63 | 100.0 |

ていた。この泥炭地分布は昭和 60 年には、明治 29 年の記録に比べて約 85%程度縮小した¹⁾。

以下、本研究で重要なパラメータとなる含水比・間隙比、泥炭層厚について詳細を記す。

(1)含水比・間隙比

北海道農業試験場土性調査報告³⁾によると、大正 7 年、大正 8 年に石狩川流域において泥炭地の土壌調査が行われた。調査結果の土壌中の水の質量 m_w と土粒子の質量 m_s から含水比 $w(\%)$ を求めた。含水比は次の式で定義される。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

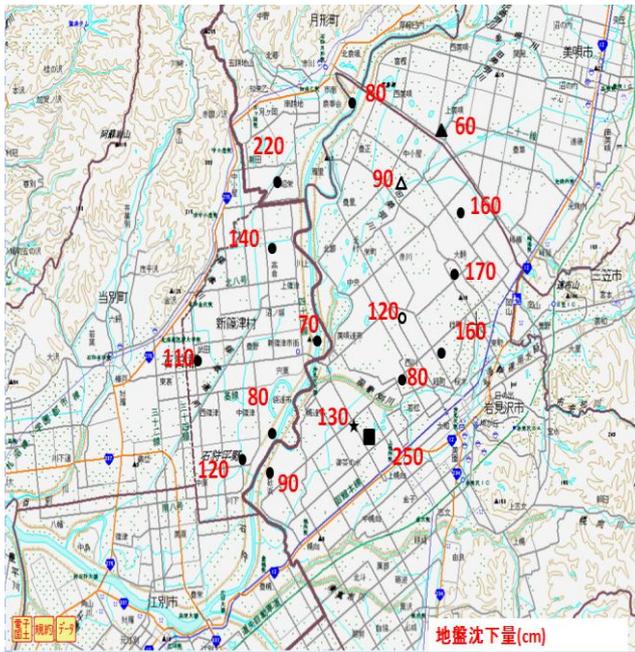
石狩川流域の現在の新篠津村と美唄市における 63 地点の当時の土質調査結果から含水比を推定したところ、泥炭が極めて高含水であるといえども、中には 10000% を超える異常値と思われるような値を取るものもあり、取りうる値に大きなばらつきが存在することがわかる(表-1)。

泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル⁴⁾によれば、泥炭は通常の土と比較して著しく含水量が多いため、含水比 (w_n) と間隙比 (e_n) の相関が高く、次の関係式で表すことができる。

$$w_n < 250\% \quad e_n = 0.0222w_n \quad (2)$$

$$w_n \geq 250\% \quad e_n = 0.0137w_n + 2.13 \quad (3)$$

大正 7 年、大正 8 年の地質データからは直接間隙比を



図一：石狩郡新篠津村・岩見沢市北村付近での地盤沈下量の変遷(大正5年(1916年)～平成8年(1996年))

推定することが不可能であったため、間隙比については式(1)、(2)を用い推定を行った。

(2)泥炭層厚

石狩川流域では大正5年から水準測量が行われている。三角点測量の結果から地盤沈下量を測定し、現在の泥炭層厚との差を推定した(図-1)。なお、対象地域は石狩郡新篠津村(北緯 43° 22' 54"東経 141° 64' 92")、岩見沢市北村(北緯 43° 15' 44"東経 141° 41' 47")、美唄市光珠内町(北緯 43° 18' 03"東経 141° 48' 04")付近とし、計 17 箇所の三角点を調査した。期間は 大正 5 年(1916年)～平成 8 年(1996年) の 81 年間である。また、対象地域は、南北約 13.0km、東西約 17.0km の範囲である。

この地域は、かつては幌達布原野、美唄原野という湿地が広範囲に広がっていたが、現在は主に田畑に利用されている。また、石狩川の蛇行が激しかった地域でもあり、昭和 56 年 8 月の大洪水では河川の氾濫による被害を受けた地域でもある。

参考文献^{5),6)}の地盤データより、現在の泥炭層厚を 300cm～500cm とし、三角点測量から求めた地盤沈下量を逆算すると、初期(大正 5 年)の泥炭層厚は 360cm～750cm と推定される。

以上のように、高含水比という泥炭の有する特異性から、本研究では Terzaghi の圧密理論ではなく能登が提案している泥炭の沈下予測式^{7),8)}を使用し、地盤沈下量と地下水位低下量の関連を調査した。推定法を第 3 章以降に記す。

3. 地盤沈下量と地下水位低下量の関係

3.1 地下水位低下量の推定法

泥炭性軟弱地盤対策マニュアル⁴⁾では泥炭性軟弱地盤においては二次圧密の影響が大きいこと、圧密過程で

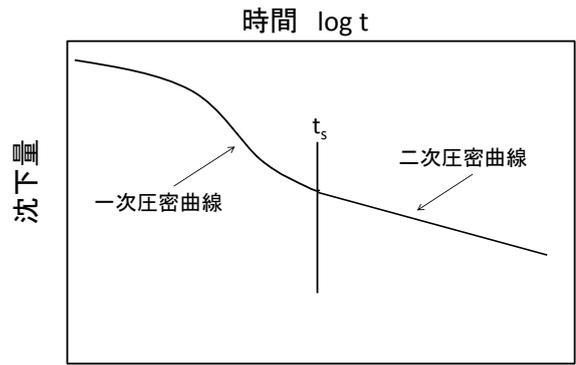


図-2：地盤沈下の概念図

透水係数が変化すること、植物繊維そのものの圧密変形が無視できないほど大きいこと等といった泥炭性軟弱地盤のこれらの特異な性質により、含水比>200%の泥炭層であれば、Terzaghi の圧密理論ではなく能登が提案している泥炭の沈下予測式を採用している。一般に石狩泥炭の含水比は 115%～1150%、また、初期含水比も 240%以上と推定出来たため、本研究では能登の提案式から地盤沈下量を推定する。予測式は初期含水比 w_0 と初期層厚 H_0 のみから沈下挙動を予測するという極めて簡便かつ実用的な手法であり、北海道においては先述の設計マニュアルにも採用されている。

先行研究^{7),8)}において、能登は時間 t_s を境に一次圧密と二次圧密に分けて、沈下量を求めている。 t_s における体積変化に関する定数 $C_p (=0.0044H_0^{1.25})$ 及び沈下の速度に関する係数 $\delta (=0.62)$ を現場実測データから算定した後、 t_s を算定している。

$$t_s = (9C_p)^{\frac{1}{\delta}} \tag{4}$$

最終的に t_s は以下のように初期層厚で表せられる。

$$t_s = 0.0055H_0^2 \tag{5}$$

本研究は長期間に渡る地盤沈下量と地下水位低下量を対象としているため、以下 t_s 以降、すなわち二次圧密領域について記載する。

t_s のときのひずみ量を ϵ_f 、時間(log t) - 沈下曲線(S)(図-2)における log t に比例する傾き(二次圧密係数)を C_S とすると二次圧密領域のひずみ ϵ_t は次式で表される。

$$\epsilon_t = \epsilon_f + C_S \log\left(\frac{t}{t_s}\right) \tag{6}$$

現場実測データから、 ϵ_f 、 C_S は、

$$\epsilon_f = \frac{1}{1 + \frac{700}{w_0 \times p}} \tag{7}$$

$$C_S = 0.0033 + 0.000043w_0 \tag{8}$$

となる。ここで、 p は盛土による純増荷重である。

ひずみ量に初期層厚 H_0 をかけて沈下量 S_1 が得られるので、最終沈下量は、

$$S_1 = \epsilon_t \times H_0 \tag{9}$$

となる。

それぞれの記号の単位は、 $w_0(\%)$ 、 $p(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、 $t(\text{日})$ 、 $H_0(\text{cm})$ 、 $S_1(\text{cm})$ である。

本研究では載荷重のない自然状態の地表面の地盤沈下

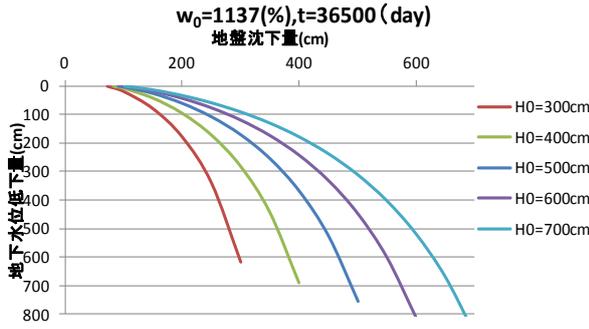


図 - 3:初期泥炭層厚の感度分析
(圧密年数:100年, 初期含水比 1137%(平均値),初期泥炭層厚を 300cm~700cm の 100cm 間隔で分析)

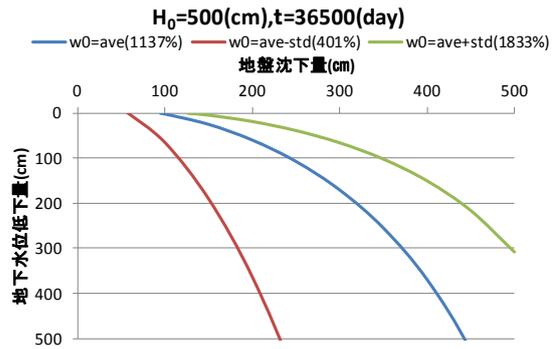


図 - 4:初期含水比の感度分析
(初期泥炭層厚:500cm, 圧密年数 100年, 含水比を平均値, 平均値+標準偏差, 平均値-標準偏差で分析)

量と地下水位低下量を推定している。排水などによる地下水位の低下により、地下水位面上部の泥炭層では地盤内の有効応力が増大する。これを地下水面下の泥炭層に対する荷重と見なす。

すなわち、有効応力増加分を $\Delta\sigma_v'$ とすると、 $p=\Delta\sigma_v'$ である。初期の地盤状態で地盤高と地下水位を等しく、土層が全て泥炭層だと見なすと $\Delta\sigma_v'$ は、

$$p = \Delta\sigma_v' = (\gamma_t - \gamma') \times Z \quad (10)$$

と表せられる。なお、 γ_t は地下水位低下後の湿潤単位体積重量(kgf/cm²)、 γ' は地下水位低下前の有効単位体積重量(kgf/cm²)、 Z は地下水位低下量(cm)であり、水の単位体積重量 γ_w (kgf/cm²)、土粒子比重 G_s 、飽和度 S_r (%)、間隙比 e 、初期間隙比 e_0 を用いると、

$$\gamma_t = \frac{G_s + S_r \times e}{1 + e} \times \gamma_w \quad (11)$$

$$\gamma' = \frac{G_s - 1.0}{1 + e_0} \times \gamma_w \quad (12)$$

である。

ここで、(7)式に(10)式を代入し、(9)式を地下水位低下量 Z についてまとめると、

$$Z = \frac{1}{\gamma_t - \gamma'} \times \left\{ \frac{700\alpha}{w(1-\alpha)} \right\}^{\frac{5}{4}} \quad (13)$$

$$\text{ここで、} \alpha = \frac{1}{0.9} \left\{ \frac{S_1}{H_0} - C_s \log \left(\frac{t}{t_s} \right) \right\} \quad (14)$$

となる。

一般に地下水位の減少後、地盤の圧密沈下が生ずるが、(13)式を用いることにより初期の地盤高と地下水位が等しいとき、圧密による地盤沈下量から地下水位低下量を逆推定することが可能となる。

さらに、地盤沈下量が圧密と分解によって生じると仮定する。宮地ら⁹⁾によると、美唄泥炭地(北緯 43° 19', 東経 141° 48')の高位泥炭層において、泥炭の圧密と分解による地盤沈下への寄与率はそれぞれ 64.0%, 36.0% という報告がなされている。これから、全沈下量を S とすると、(14)式は、

$$\alpha = \frac{1}{0.9} \left\{ \frac{0.64 \times S}{H_0} - C_s \log \left(\frac{t}{t_s} \right) \right\} \quad (15)$$

とすることができる。

3.2 本研究の推定法を用いた感度分析

前節の推定法から、(1)初期泥炭層厚を変化させた場合、(2)初期含水比を変化させた場合の 2 パターンで感度分析を行った。対象地域は石狩川支流である幾春別川下流部に存在していた幌達布原野(北緯 43° 11' 50", 東経 141° 40' 14")とする。この地域では湿地や泥炭地が広範囲に分布しているため、初期地盤高と初期地下水位が等しいと仮定した。また、使用する初期地盤高データ(初期泥炭層厚 300cm~700cm, 初期含水比(平均:1137%, 標準偏差 736%)は第 2 章によるものである。その他の地盤データは文献値^{4),5),6)}を参考にした。

(1)初期泥炭層厚を変化させた場合

沈下年数:100年, 初期含水比 1137%(平均値)とし、初期泥炭層厚を 300cm~700cm の 100cm 間隔で変化させて感度分析を行った。横軸に地盤沈下量、縦軸に地下水位低下量を取りその対応した結果が図 - 3 になる。

例えば、初期泥炭層厚が 500cm の場合、地盤沈下量が 300cm であれば、その地下水位低下量は 171cm となる。初期泥炭層厚の違いにより、地下水位低下量の変動も大きくなりそれだけ初期泥炭層厚を正確に把握することが重要であると言える。

(2)初期含水比を変化させた場合

初期泥炭層厚を 500cm, 圧密期間を 100年とし、初期含水比を平均値, 平均値+標準偏差, 平均値-標準偏差の 3 パターンで感度分析を行った。

これによると、初期含水比の違いにより、地下水位低下量と地盤沈下量の関係は大きく変化することがわかる。この原因としては、沈下予測式(13)、初期間隙比を算出する際に用いる式(2)、式(3)、さらに、有効応力の増加分を算出する式(12)にも初期含水比を使用するので初期含水比が沈下予測式に与える影響が大きいと推測できる。

以上の(1)、(2)の感度分析から、地下水位低下量と地盤沈下量の関係を求める際に初期泥炭層厚と初期含水比をどれだけ正確に用いることが重要であるか、また、地盤沈下量が大きい地点ほどそれらの違いが与える影響が大きいと言える。

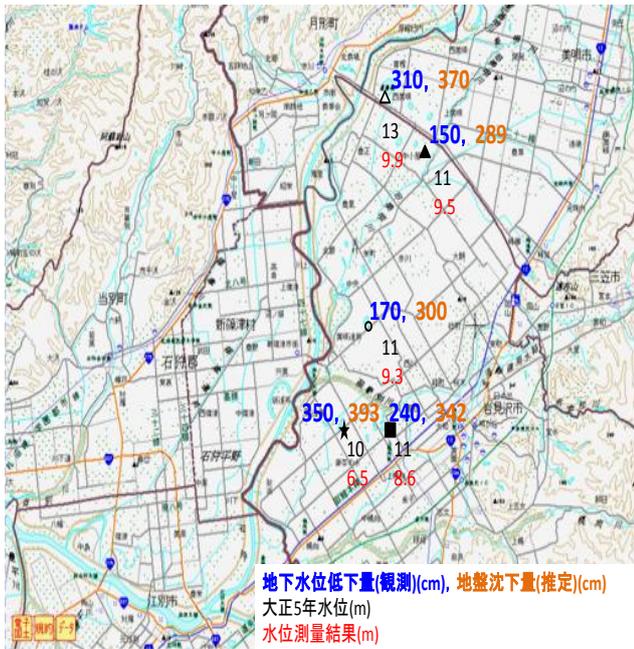


図 - 5 : 沼地での測量結果

(図中の青字が地下水位低下量(観測), 橙字が地盤沈下量(推定), 黒字が大正 5 年水位, 赤字が測量結果を表す)

4. 本研究の推定法の検証

石狩川流域ではかつては泥炭層が広く分布しており、新篠津村・北村付近も同様に、泥炭地、湿地帯であった。そのため、過去の地盤高と地下水位が等しいと仮定することができる。沼地も広域にあるため、大正 5 年の沼地水位と現在の水位を比較し、地下水位低下量を算出した。著者らは 2011 年 7 月、GPS 測量によって岩見沢市北村、美唄市西美唄町に存在する宮島沼(図 - 5 中の△)、三角沼(図 - 5 中の▲)、中ノ沼(図 - 5 中の○)、長沼(図 - 5 中の★)、鮎沼(図 - 5 中の■)の 5 ヲ所の沼地の縁の地盤高を計測し、それを沼地水位とした。現在では沼地は縮小しており、特にこの地域で最大の沼地である宮島沼(北緯 43°20'、東経 141°43')では、1947 年に 33.6ha であった開放水面が 2007 年には 25.1ha と約 25%縮小したことが確認されている¹⁰⁾。測量による結果と大正 5 年の水位との差から地下水位低下量を算出した。なお、測量機器の精度は±1.0cm 程度である。この地下水位低下量結果から本章では地盤沈下量を推定し、3 章の推定法の検証を行う。

図 - 5 中の青字が地下水位低下量、橙字はこの結果から推定した地盤沈下量、黒字が大正 5 年水位、赤字が測量結果を表す。観測の結果より、地下水位低下量は 150cm~350cm と推定できた。この結果を用いて地盤沈下量の推定を行うと、初期泥炭層 500cm、初期含水比 1137%、圧密期間 100 年として、(9)式から地盤沈下量を求めるとその結果は 289cm~393cm となった。

図 - 1 の新篠津村・岩見沢市北村付近の三角点での地盤沈下量と図 - 5 の水位低下から算出した地盤沈下量の結果を比較する。図 - 1 中の地盤沈下量は同地域最大でも 250 cm である。推定結果からは、最少で約 290 cm、最大で約 390 cm と誤差量が大きい。この要因として三角点

と現地観測を行った地点の距離のほか、地下水位低下量の推定値に与える初期含水比の影響は極めて大きいことが挙げられよう。また、泥炭の分解作用をより詳細に調査する必要もある。例えば、分解作用に大きな影響を及ぼす地盤鉛直方向の炭素量分布や地温の影響等である。これらを考慮した泥炭の分解による沈下量を推定することが必要となる。さらに、対象地域の水田では農耕に不向きな泥炭土の農地開拓のために過去 2~3 回で約 30cm の客土がなされたという報告もなされたという報告もあり¹¹⁾、客土などの盛土による効果も考えられる。

5. まとめ

石狩川の改修から 100 年を迎え、かつては広範囲に広がっていた湿地や泥炭地が現在では、治水事業により日本を代表する大穀倉地帯となり、札幌市のような大都市も形成された。

本研究では、治水事業の当初の目標であった、地下水位を 90cm 下げるとい目標をどの程度達成できたかを評価するために、過去 100 年間で地下水位がどれだけ低下したかを圧密と分解による地盤沈下量から調査した。

地盤沈下量、地下水位低下量共に、推定を行う際には初期泥炭層厚と含水比を正確に把握することが重要であることがわかった。特に、地盤沈下量が大きい場所ではより詳細なデータを知る必要がある。今後はより正確に地下水位低下量を推定するために、微生物の分解等の生物学的要因や人為的要因をさらに詳細に考察し、積雪による圧密や融雪による影響も考慮し、現実的な議論を進めていく予定である。

謝辞

本研究は文部科学省気候変動適応研究推進プログラム(Recca)の成果の一部である。本研究を行うにあたり貴重なアドバイスを下さった、北海道開発局札幌開発建設部と元北海道開発局局長の山口甲先生に感謝の意をここに記す。

参考文献

- 1)山口甲, 品川守, 関博之: 捷水路,1996
- 2)北海道開発局 札幌開発建設部: 石狩川治水 100 年,2010
- 3)北海道農業試験場: 北海道農業試験場土性調査報告 第四編 石狩国泥炭地土性調査報告,1954
- 4)土木研究所 寒地土木研究所: 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル,2011
- 5)佐藤厚子,西川純一,山澤文雄: 泥炭盛土材料への利用,2001
- 6)地下水要覧編集委員会: 地下水要覧,1988
- 7)能登繁幸: 泥炭地盤工学,1991
- 8)能登繁幸: 「修正された泥炭地盤の沈下予測式」の簡略化, 1991
- 9)宮地直道, 神山和則, 大塚紘雄, 粕淵辰昭: 美唄泥炭地における地盤沈下,1995
- 10)美唄市: 宮島沼保全活用計画(第 2 期計画),2012
- 11)株式会社クボタ: 北海道の特徴的土壌, 1985