

平成24年 9月27日

山梨県環境整備センター 安全管理委員会
委員長 金子 栄広 殿

広島大学大学院工学研究院
機械システム工学専攻 特任教授
工学博士 澤 俊行 印

平成24年4月27日付で依頼のあった山梨県環境整備センターに関する漏水検知システムの異常検知に関する鑑定について以下のように報告致します。

漏水検知システムの異常検知に関する事業団の原因究明調査結果

平成22年10月2日、山梨県環境整備センターの漏水検知システムが異常を検知していることが確認された。調査の結果、写真1に示す部分の上層遮水シート部分にくぼみが発生し、上層遮水シートの上下に配置されていた銅線が接触したためと判断された。漏水検知システムの異常検知に起因する上層遮水シートにくぼみはこの一点のみと確認された。その他部分にもくぼみが発見されたが、異常検知に関わるものではないと、判断されている。

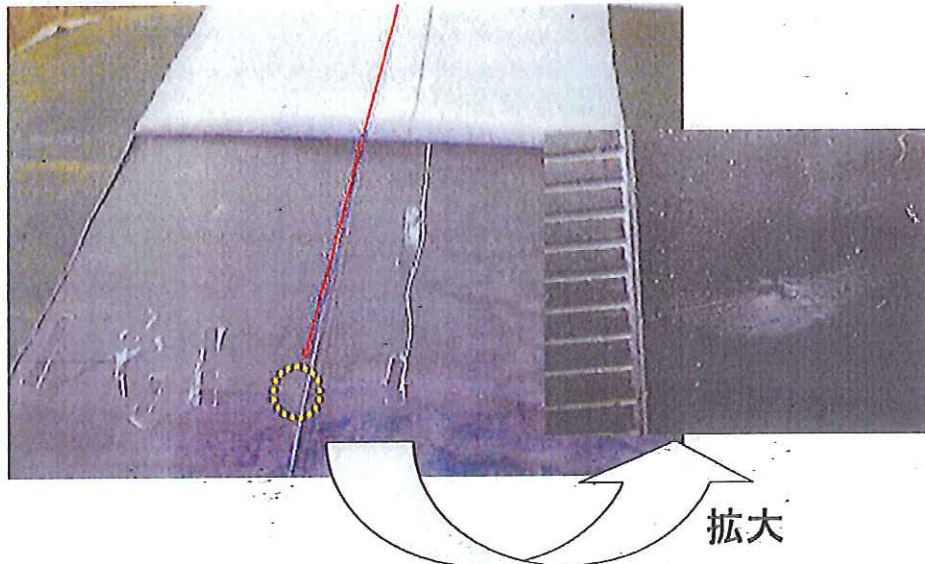


写真1 実際の上層遮水シートくぼみ部

以上の現象に対する依頼鑑定項目は、以下である。

1. 異常信号を発信した上層遮水シート上下の銅線部分に何が発生し、上層遮水シートのくぼみ（穴）が発生したと考えられるか。
2. その他参考事項(坂野助教の意見書について)

鑑定資料

1. 異常検知箇所から切り取った遮水シート（以下、「現物遮水シート」という。）
2. 新品の遮水シート
3. 事業団の原因究明調査結果資料
4. 坂野助教による意見書2種類

上記鑑定事項を明らかにするために以下の手順で実験および計算を行う。

1. 現物シートを目視観察
2. 遮水シートの基本材料試験
3. 遮水シートの耐久劣化試験
4. 遮水シートに対するくぼみ発生実験
5. 現場における遮水シート部分の荷重負荷実験と通電測定
6. 有限要素法による遮水シートの応力解析
7. 総合評価

1. 現物遮水シートを目視観察

写真 1 に示すくぼみが生じた現物遮水シートに対する目視による確認を行った。くぼみは漏水検知システムの銅線の交点部で発生していることが分かる。くぼみ中央部は盛り上がりしており目視ではその貫通穴を明確には確認することはできなかった。くぼみの形状から何らかの力がこの周辺に作用したと考えられる。

現物遮水シートと新品の遮水シートの硬さを指により比較したが、硬化及び軟化を感じることはなかった。すなわち、現物遮水シートのくぼみ周辺は化学的及び時効による硬化及び軟化はないものと考えられる。

2. 遮水シートの基本材料試験

2.1 遮水シートの応力-ひずみの関係について

2.1.1 荷重と伸びの関係測定試験を行う目的

有限要素法に基づくくぼみ周辺の応力・変計計算を行うためには、材料（ここでは新品の遮水シート）の基本的特性である応力とひずみの関係が必要となる。ここではまず、荷重と伸びの関係を測定することが第一の目的である。また、第二の目的として、現在遮水シート製造メーカから提示されている遮水シートの引張り材料特性の妥当性をチェックするためにも、この応力-ひずみの関係を測定しておく。

測定試験は日本工業規格 JIS K 2651(加硫ゴム及び熱可塑性ゴム - 引張り試験方法)に基づき測定試験を行う。遮水シートは、荷重が作用する方向により応力-ひずみ線図が変化することが考えられる(異方性)。したがって、縦(0°)、横(90°)、斜め(45°)の3方向の引張り試験を行う。写真 2 は実際の試験片をくりぬいた遮水シートを示す。



写真 2 遮水シートより切り取られた試験片

2.1.2 実際に測定試験に用いる遮水シート形状について(測定試験片について)

測定試験を行う試験片形状は日本工業規格 JIS K 6251 に示されるダンベル型 3 号試験片に準じる。図 1 は試験に用いた遮水シート(試験片)の寸法を示す(ダンベル型 3 号に準ずる)。ここで日本工業規格 JIS に記載される試験片の厚みは 2mm が基準であるが、本試験片は実際に使用される遮水シートの厚さが 1.5mm であるため 1.5mm とする。

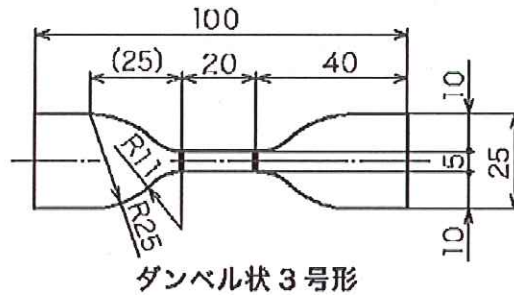


図 1 試験片の各種寸法

2.1.3 測定方法について

インストロン型材料試験機(島津製作所製・最大荷重: 250kN)を用いて測定試験を行う。写真 3 は実際に使用した材料試験機を示す。写真 4 は実際の測定中の画像(一例)を示す。試験片のつかみ部を治具によりはさみ、上側の治具を上昇させることにより遮水シートが引張られる。この時の引張り荷重と伸び量を測定し、応力とひずみの関係を作成する。引張



写真 3 測定に使用した材料試験機

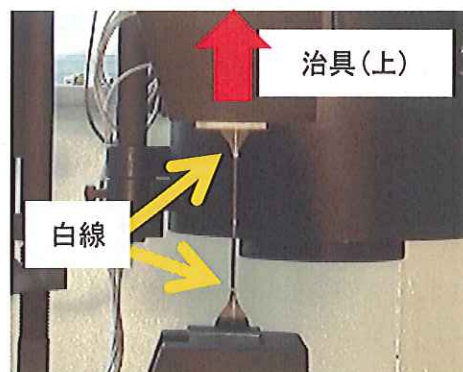


写真 4 実際の測定の一例

り荷重は、ロードセル（荷重計）（荷重を機械的かつ電氣的に測定できる）を用いて測定する。伸び量は高性能ビデオカメラを用いて、試験中の 2 本の白線間の距離を撮影し、画像処理によって測定する。この 2 本の白線の距離は 20mm とする（写真 4 中）。なお応力は試験片に作用する引張り荷重を試験片の初めの断面積で除した値を、ひずみは単位長さ当たりの伸びを示す。

引張り速度は日本工業規格 JIS に規定される 500mm/min(ひずみ速度 2.4/sec)、50mm/min(ひずみ速度 0.24/sec)及び 5mm/min(ひずみ速度 0.024/sec)とする。現在メーカーが提示する遮水シートの引張り特性は、引張り速度が 50mm/min である。

本試験は、1つの条件に対して 3 回以上行い、それらの結果の中から代表値を選び用いている。

メーカー値と比較検討のための数値は以下のように計算する。

- 引張り強さ(切断する直前の強さ)
(引張り強さ[MPa])=(最大の引張り荷重[N])/(試験片の断面積[mm²];試験片の厚さ×幅)
- 切断時の伸び
(切断時の伸び[%])={(切断時の標線間の距離[mm])-(初めの標線間の距離[mm])}/(初めの標線間の距離[mm])×100
- 引張り応力(応力:力を断面積で割った値であり、圧力と同一の単位)
(引張り応力[MPa])=(引張り荷重[N])/(試験片の断面積[mm²])

2.1.4 測定結果について

図 2 は遮水シートの異方性を検討するため、縦(0°)、横(90°)及び斜め(45°)と異なった方向に切り抜いた遮水シート試験片の応力・ひずみ線図を示す。縦軸は引張り応力を示し、横軸はひずみを示す。この結果より遮水シートの異方性は小さいと言える。

図 3 は遮水シートの引張り速度を 5mm/min、50mm/min 及び 500mm/min と変化させた時の遮水シート試験片の応力・ひずみ線図を示す。縦軸及び横軸は図 2 と同様である。この結果より、引張り速度が 5mm/min 及び 50mm/min の場合、ほぼ応力・ひずみ線図が等しいことが分かる。したがって、5mm/min 及び 50mm/min はほぼ同等の特性であると言える。また 5mm/min 及び 50mm/min と比較して 500mm/min の場合、遮水シートの応力・ひずみ線図は伸び量が大きい。遮水シートは、引張り速度が速いほど伸びやすいことが分かった。遮水シートの強度については引張り速度の違いによる影響は小さい。

表 1 は現在提示されている遮水シートの特性値と今回の測定で得られた特性値の比較を示す。引張り強さについては厚さが 1.5mm と統一されているため最大引張り荷重を、引張る前の 2 本の白線間の距離で除した値とする。引張り強さについて、複数回繰返し試験を行い、それらにばらつきがあることを確認した。伸び率についてもばらつきがあるものの、引張り速度が速くなるほど伸び率が大きくなることが分かっており、提示された特性

値と測定された特性値は妥当であると考える。

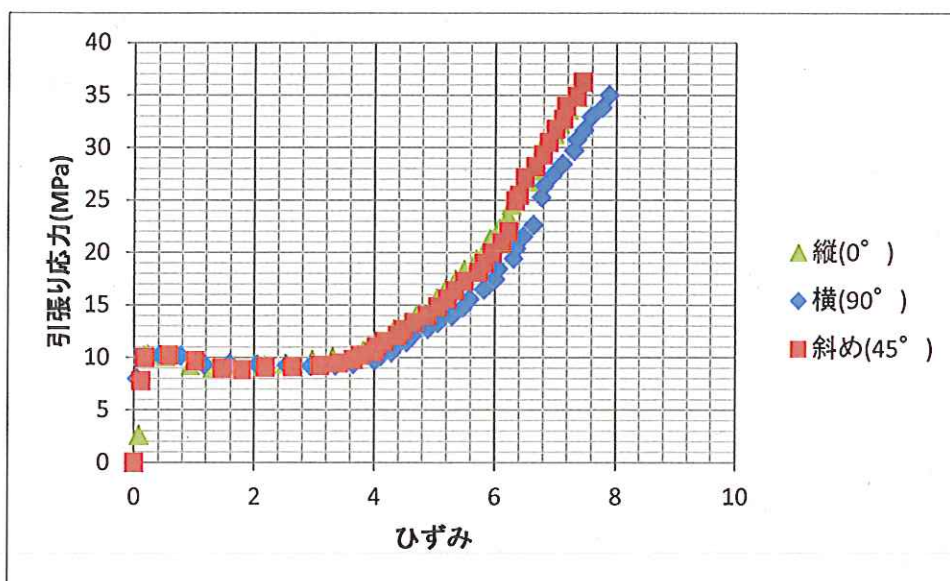


図2 測定結果の一例
(遮水シートの応力-ひずみ線図:引張り方向の影響)

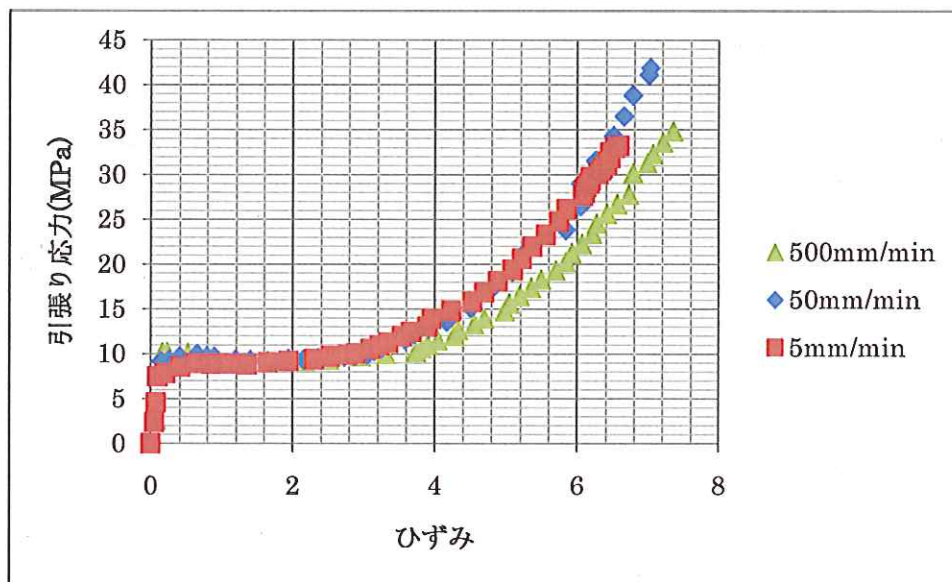


図3 測定結果の一例
(遮水シートの応力-ひずみ線図:引張る速度の影響)

表 1 測定結果との比較

項目	メーカーにより 提示された 特性値 (50mm/min)	測定された 特性値 (5mm/min)	測定された 特性値 (50mm/min)	測定された 特性値 (500mm/min)
引張り強さ[N/cm] (厚さ 1.5mm で統一)	480	489	628	544
伸び率[%]	700	658	702	766

3. 遮水シートの耐久劣化試験

3.1 劣化させた遮水シートの応力-ひずみの関係について

3.1.1 引張り試験を行う目的

応力-ひずみの関係は材料の基本的特性であり、この応力-ひずみの関係を比較することで劣化が遮水シートの強度に及ぼす影響を概ね推定することができる。

3.1.2 劣化方法について

① 熱による劣化

乾燥炉を用いて 80℃の温度雰囲気状態に 240 時間(10 日間)暴露 (曝す) する。写真 5 は使用した乾燥炉を示す。この乾燥炉は、温度変化をコントローラにより正確に制御することができ、80℃までの昇温、常温までの降温は緩やかに 1 分間に 1℃ずつの変化となるように設定する。

② 化学反応による劣化

化学反応による劣化には大きく分けて酸による影響、アルカリ(塩基)による影響がある。そこで酸には硫酸(0.05%濃度)、アルカリは水酸化ナトリウム飽和水溶液、また、実際に遮水シートがさらされる溶液は浸出水であるため、この浸出水も曝露溶液として用いる。したがって、これら 3 種類の溶液に対して劣化の影響を検討する。

遮水シートはこれらの 3 種類の溶液に曝露され、乾燥炉(写真 5)を用いて 60℃の温度雰囲気状態に 240 時間(10 日間)さらす。



写真 5 試験に用いた乾燥炉

3.1.3 試験方法について

試験方法は遮水シートの基本材料試験の場合と同様である。しかし、試験片の引張り速度は50mm/minのみとする。

3.1.4 測定結果について

図4は遮水シートを各種劣化させた後、引張り試験により得られた応力-ひずみの関係を示す。縦軸は引張り応力を示し、横軸はひずみを示す。黒い実線は新品の遮水シートの結果を示す。熱劣化後に測定した応力-ひずみ線図は新品の遮水シートの応力-変位線図とかなりよく一致していることから、熱劣化が遮水シートの基本特性に及ぼす影響は限りなく小さいと言える。また酸劣化及び浸出水劣化については、それぞれの応力-ひずみ線図の曲線はかなりよく一致している。したがって、酸劣化及び浸出水劣化の影響が遮水シートの基本特性に及ぼす影響は同等といえる。一方、アルカリにより劣化した遮水シート試験片は、軟化する傾向があることが分かる。しかし、各種劣化により変化する応力-ひずみ線図の変化量は、遮水シートの材料特性を大きく変化させるほど大きいとは言えない。

また、本劣化試験によって得られた結果は、遮水シートがまさに破断する間際(弾力を失った領域)に生じる違いである。ひずみが小さい場合(遮水シートに弾力がある領域)では各種劣化の影響はほとんどないとも言える。

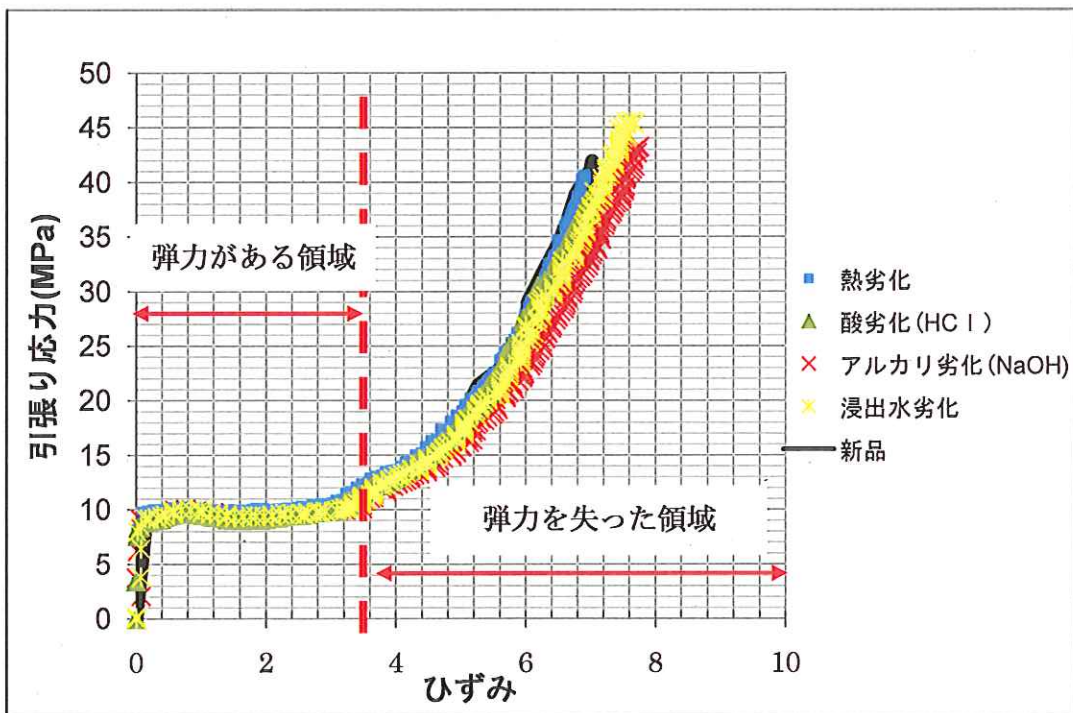


図4 測定結果の一例
(各種劣化が遮水シートの応力-ひずみ線図に及ぼす影響)

3.2 遮水シートの硬さ試験について

3.2.1 硬さ測定の目的

遮水シートは浸出水の漏洩を防ぐために地中に埋設されているため、浸出水または熱のような要因により、組織が変化している可能性が考えられる。したがって、新品の遮水シート、熱や各種溶液により劣化させた遮水シート、及び現物遮水シートの表面の硬さを測定することで、遮水シートの表面組織の変化の有無を検討する。

3.2.2 デュロメータについて

写真6はゴムの硬さ測定で使用するデュロメータ(A型)の一例を示す。デュロメータ硬さは、規定した条件下で試験片に既定の押針を押し込んだときの押針の押し込み深さから得られる値である。

(注意：ゴムの硬さを測定する方法はデュロメータ以外にもいくつかあるが、それらの結果とデュロメータによる結果を結びつけることはできない。)

デュロメータの値は、ゴムの弾性率、粘弾性、試験片の厚さ、押針の形状、押し込む力、押し込む速さ、読み取るまでの時間などの影響を受ける。すなわち、測定する人間による誤差がある。

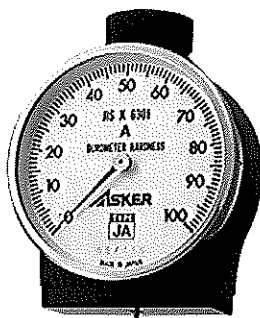


写真6 デュロメータの一例(A型)

3.2.3 測定について

デュロメータ硬さは、ゴムの硬さにより使用するデュロメータの型式が異なる。図5は試験材質の差異と使用するデュロメータの型式の違いの概略を示す。

これらの選択は、次のように行う。

- D型デュロメータで硬さが20未満の値を示す場合は、A型を用いる。
- A型デュロメータで硬さが20未満の値を示す場合は、E型を用いる。
- A型デュロメータで硬さが90を超える値を示す場合は、D型を用いる。



図5 試験材料とデュロメータの型式の簡易的な関係

これらの規定から予め行った予備試験の結果より、本測定ではD型のデュロメータを用いる。

3.2.4 試験片について

D型では、試験片の厚さを6mm以上とする必要があり、6mm以上に満たない場合は積み重ねて測定してもよいとされている。したがって、本遮水シートの厚さは約1.5mmのため5枚以上積み重ね規定範囲とする(注意：一般的に積み重ねたときの結果と積み重ねていないときの結果(6mm以上)では測定結果は異なる。)。写真7は実際に測定に用いた遮水シート試験片を示す。



写真7 測定試験片

3.2.5 測定方法について

硬さ測定試験については JIS K 6253-3 (加硫ゴム及び熱可塑性ゴム・硬さの求め方・第 3 部：デュロメータ硬さ)に基づき測定する。平坦で硬い面に試験片を置き、デュロメータの加圧板が試験片の表面に平行に維持され、かつ、押針がゴムの表面に対して直角になるようにデュロメータを保持し、衝撃を与えないように、加圧板を試験片に接触させる。規格に指定されるように試験片の端から 12mm 以上離れた位置で測定を行い、測定点数は試験片では 10 点行い 6mm 以上離れた位置で行う。測定時間は 15 秒とし、本測定は雰囲気温度を室温とする。

3.2.6 測定結果について

厚みを 6mm 以上とするため積み重ね枚数を 6 枚とし測定する。表 2 から表 8 は D 型デュロメータを用いて測定した結果を示す。デュロメータによる測定では単位はなく、相対的な値となる。新品の遮水シートの平均硬さは 45.76 である。劣化させた遮水シートの平均硬さは、熱劣化 45.05、酸劣化 45.45、浸出水劣化 44.35 そしてアルカリ劣化 43.8 である。これらの結果から、劣化させた遮水シートは新品の遮水シートと比較しやや軟化していることが分かる。特にアルカリ劣化させた遮水シートが最も軟化していることが分かる。

現物遮水シートの平均硬さは 38.04 である。新品の遮水シートの値(45.76)及び各種劣化させた遮水シートの値より明らかに小さいことが分かる。ここで別ロットの新品遮水シートについても硬さ試験を行った。ロットが異なる新品の遮水シートの平均硬さは 39.55 である。したがって、本遮水シートはロットによるばらつきがやや大きいことが分かった。ロット違いの新品遮水シートの結果と比較しても切り取られた現物遮水シートの平均硬さはやや小さい。しかし、材料特性を大きく変化させるほどの変化があるとは言い難く、硬度には特に問題があるとは言えない。

表2 D型デリユロメータによる測定結果
(新品)

D型 6枚	
46	44.5
44.5	45.2
47.5	46.5
46	47.2
44	46.2
平均値	45.76

表3 D型デリユロメータによる測定結果
(熱劣化)

D型 6枚	
43	47
45	48
45	43.5
46	44.5
44.5	44
平均値	45.05

表4 D型デリユロメータによる測定結果
(酸劣化)

D型 6枚	
46	44
47	45
45	46
45	45.5
46	45
平均値	45.45

表5 D型デリユロメータによる測定結果
(浸出水劣化)

D型 6枚	
45.5	45.5
44	43
45.5	44
44.5	43.5
44	44
平均値	44.35

表6 D型デリユロメータによる測定結果
(アルカリ劣化)

D型 6枚	
43	44
44	44
43	43
44	44.5
43.5	45
平均値	43.8

表7 D型デリユロメータによる測定結果
(新品ロット違い)

D型 6枚	
39	41
38	40
38.5	40
39.5	39
41	39.5
平均値	39.55

表8 D型デリユロメータによる測定結果
(現物)

D型 6枚	
38.2	39
38	37
38	37.5
37.5	38.5
38.5	38.2
平均値	38.04