テーマＡ　温度と流れの環境計測

[概説と予習]

１．風速・温度計測の原理について（参）工学計測Ｉ

（１）　熱電対

異なる材料の２本の金属線を接続して１つの回路（熱電対）を作り、ふたつの接点に温度差を与えると、回路に電圧が発生する（ゼーベック効果）。基準となる接点の温度がわかっていれば（例えば、氷水に入れて０度に保つ）、回路の起電力を測定することにより、もう一つの接点の温度を知ることが出来る（図１）。

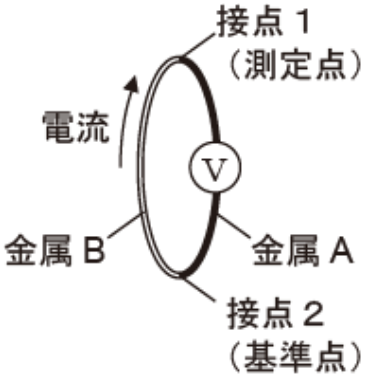


図１　熱電対原理
接点１と２が異なる温度の時に接点間に起電力が生じる

（２）　放射温度計

あらゆる物体は絶対温度の４乗に比例した放射による熱フラックスを射出している。ステファン・ボルツマンの法則（Stefan-Boltzmann law）によれば、絶対温度T (K)の黒体が単位表面積あたりから射出する熱フラックス（W m^{-2}）は、以下のように定義できる。

$$\text{黒体の放射による熱フラックス} = \varepsilon\sigma T^4 \qquad (1)$$

σはステファンボルツマン定数で 5.67x10^{-8} (W m^{-2} K^{-4})である。εは射出率（無次元）と呼ばれ、物体が完全な黒体であれば１となる。物体からの放射量を直接計測することにより、式（１）を用いて物体表面温度を算定することができる。

（３）超音波風速温度計

図２のように一対のセンサー（間隔L）のそれぞれから、お互いに超音波を発信・受信し、その到達時間をt_1、t_2を計測するものとする。風速ベクトルのうち、センサー軸と平行な成分uを音波速度cに順風・逆風の風速効果を考慮すると、伝達速度・距離・到達時間の関係より、以下が導かれる。

$$c + u = L / t_1 \qquad (2)$$

$$c - u = L / t_2 \qquad (3)$$

これより、cとuはそれぞれ、L、t_1、t_2を用いて以下のように表せる。

$$u = \boxed{\text{①}} \qquad (4)$$

$$c = \boxed{\quad ② \quad} \qquad (5)$$

音波の速度は、センサー間の空気の絶対温度T (K)と関係することが知られているので、気温を計測することが出来る。

$$c^2 = 403T \qquad (6)$$

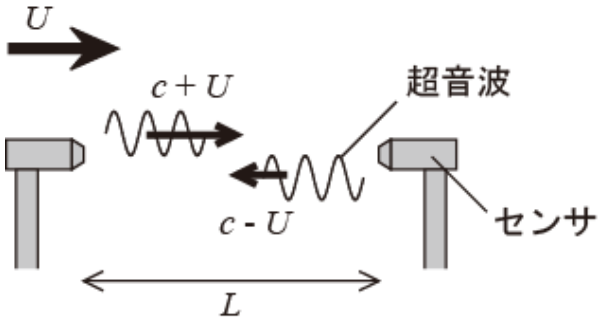


図２　超音波風速計原理
センサ間で既知の周波数の超音波を送受信し、センサ間距離 L と位相差から風速 U と音速 c を計算

２．拡散と移流による熱フラックス（参）物理数学・流体力学

熱フラックスとは、単位面積・単位時間当たりに通過する熱量のことである。地表面から上空への鉛直方向(z)の熱フラックスについて考えてみよう

（１）熱フラックスの３形態
拡散と移流と放射、である（**図３**）。放射による熱フラックスは放射温度計の原理で述べた。

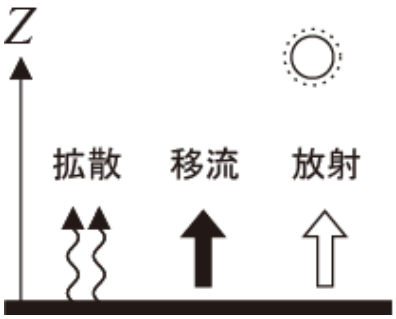


図３　熱フラックス３形態

（２）拡散（分子運動による熱フラックス）
拡散は分子運動の作用により鉛直方向の気温勾配を解消するように生じる熱フラックスである。空気の体積熱容量を考慮しない運動学的な拡散熱フラックスは以下のようになる。

$$F_{diff} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \qquad (7)$$

F_{diff} (m s^{-1} K)：運動学的熱フラックスで、鉛直上向きを正とする

κ 熱拡散係数(m^2 s^{-1})：分子運動による熱拡散係数

上式の両辺に空気の体積熱容量 $c_p\rho$ を掛けると熱力学的熱フラックス H_{diff} (W m^{-2})となる。

$$c_p\rho F_{diff} = -c_p\rho\kappa\frac{\partial T}{\partial z} \qquad (8)$$

$$H_{diff} = -(c_p\rho\kappa)\frac{\partial T}{\partial z} = -K\frac{\partial T}{\partial z} \qquad (9)$$

ここで $K = c_p\rho\kappa$ は熱拡散係数とは区別して熱伝導率(W m^{-1} K^{-1}) と呼ばれる。

（３） 移流（風による熱フラックス）

鉛直方向の風速を w とすれば、鉛直方向の移流による熱フラックス（m s^{-1} K）は、以下のようになる。

$$F_{adv} = wT \qquad (10)$$

ここで、水平方向に十分広く、一様で平坦なところでは、ある程度長い時間平均（例えば１０分～３０分）としての w がゼロと見なせることが多い（連続式を踏まえて考慮せよ）。その場合、移流によって鉛直方向には全く熱が運ばれないことになってしまう。実際には、時間平均的な w がゼロであっても、乱流によって流れは大きく乱れており、瞬間・瞬間の鉛直速度は０とは限らない。この乱流による熱の鉛直輸送を以下に考えてみよう。鉛直風速 w 、水平風速 U 、温度 T を、ある時間内での平均値（平均項）とそれからの差（乱流項）に分離してみよう（**図４**）。

$$w = \overline{w} + w' \qquad (11)$$

$$u = \overline{u} + u' \qquad (12)$$

$$T = \overline{T} + T' \qquad (13)$$

ここで u は水平風速とし、 $\overline{}$ は時間平均（平均項）、 ' は時間平均からの変動値（乱流項）とする。式（１１）（１３）を（１０）に代入してさらに時間平均を取ると、

$$\overline{F_{adv}} = \overline{wT} = \overline{(\overline{w}+w')(\overline{T}+T')} = \overline{w}\,\overline{T} + \overline{w'T'} + \overline{w'}\,\overline{T} + \overline{w}\,\overline{T'} \qquad (14)$$

ここで統計的な関係として、 $\overline{w'\overline{T}} = \overline{w'}\,\overline{T}$ 、 $\overline{\overline{w}T'} = \overline{w}\,\overline{T'}$ を用いた（検証せよ）。上式の右辺３項と４項は乱流項の時間平均値（ $\overline{w'}$ および $\overline{T'}$ ）を含んでいる。乱流項を時間平均すればその定義から０にならなければならないので、いずれも０となる。また、第１項は平均値の積であるが、 $\overline{w}$ が０と仮定すれば、結局、乱流項同士の積の時間平均だけが残って以下のようになる

$$\overline{F_{adv}} = \overline{w'T'} \qquad (15)$$

これも体積熱容量を掛ければ熱力学的熱フラックス $\overline{H_{adv}}$ (w m^{-2})となる

$$\overline{H_{adv}} = c_p\rho\overline{w'T'} \qquad (16)$$

乱流項同士の積の時間平均はゼロとは限らない。これを乱流輸送と呼ぶ。乱流を大気中に存在する渦に置き換えると理解しやすい。**図５**を見てみよう。時間平均値としての水平風速（ $\overline{u}$ ）は地表面の摩擦の

ため上空ほど大きく、逆に時間平均値としての気温（$\overline{T}$）は太陽放射によって暖められた地面の影響で、地表面に近いほど高いと仮定してみよう。ここに渦による乱流が存在するとする。この渦の存在が、時間平均値からのずれ、すなわち乱流項を生み出す。

渦運動によって高度 z_1 の空気が z_0 まで持ち上げられる（つまり、渦運動により正の鉛直風速変動 $w'>0$ がもたらされた）とする。地表面に近いほど水平風速が遅いため、高度 z_1 から z_0 に持ち上げられた空気は周囲の平均風速より遅く、負の水平風速変動（$u'<0$）をもたらす。逆に渦運動が下降流をもたらす場合（$w'<0$）、高度 z_0 における平均風速よりも速い空気が高度 z_2 から降りてくるため、これは正の水平風速変動（$u'>0$）をもたらす。つまりこの場合、u' と w' の間には負の相関があり、これらの積の時間平均（$\overline{u'w'}$）をとってもゼロとはならないことが分かるであろう（同様に温度のケースについても考えてみよ）。

図６は、実際の計測例を示している。乱流によって、一見無秩序に風速や気温が変動しているように見えるが、冷たくて遅い空気が渦に乗って下から運ばれてくると、鉛直風速変動はプラス（上昇流だから）、水平風速変動はマイナス（遅い空気が上がってくるから）、気温変動はプラス（温かい空気が上がってくるから）となり、強い相関をもつことが見て取れる。

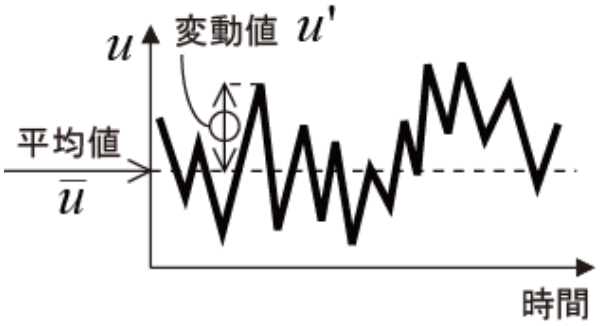


図４　平均値と変動値の概念図

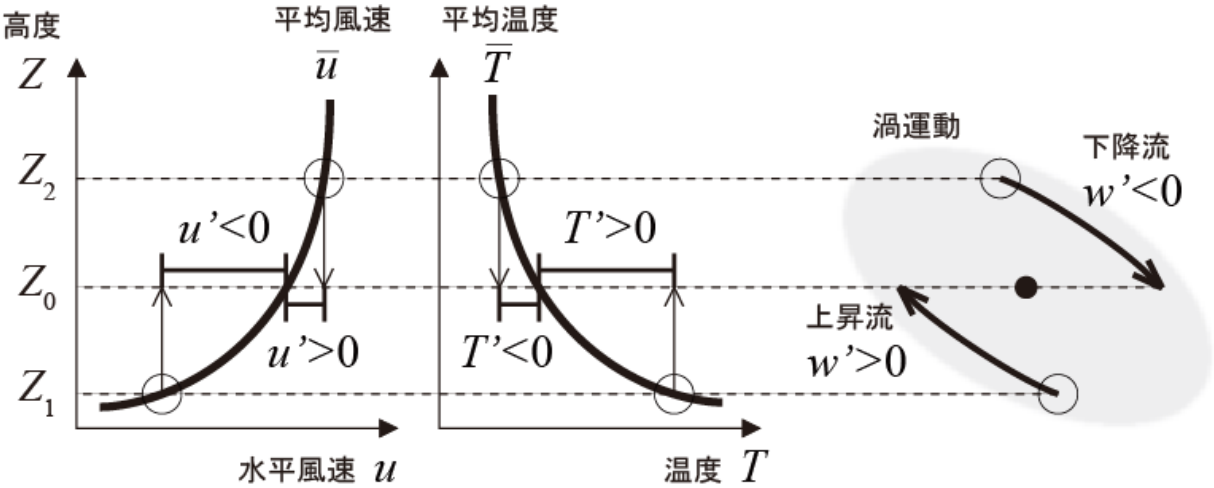


図５　渦運動に伴う水平風速と温度の鉛直輸送

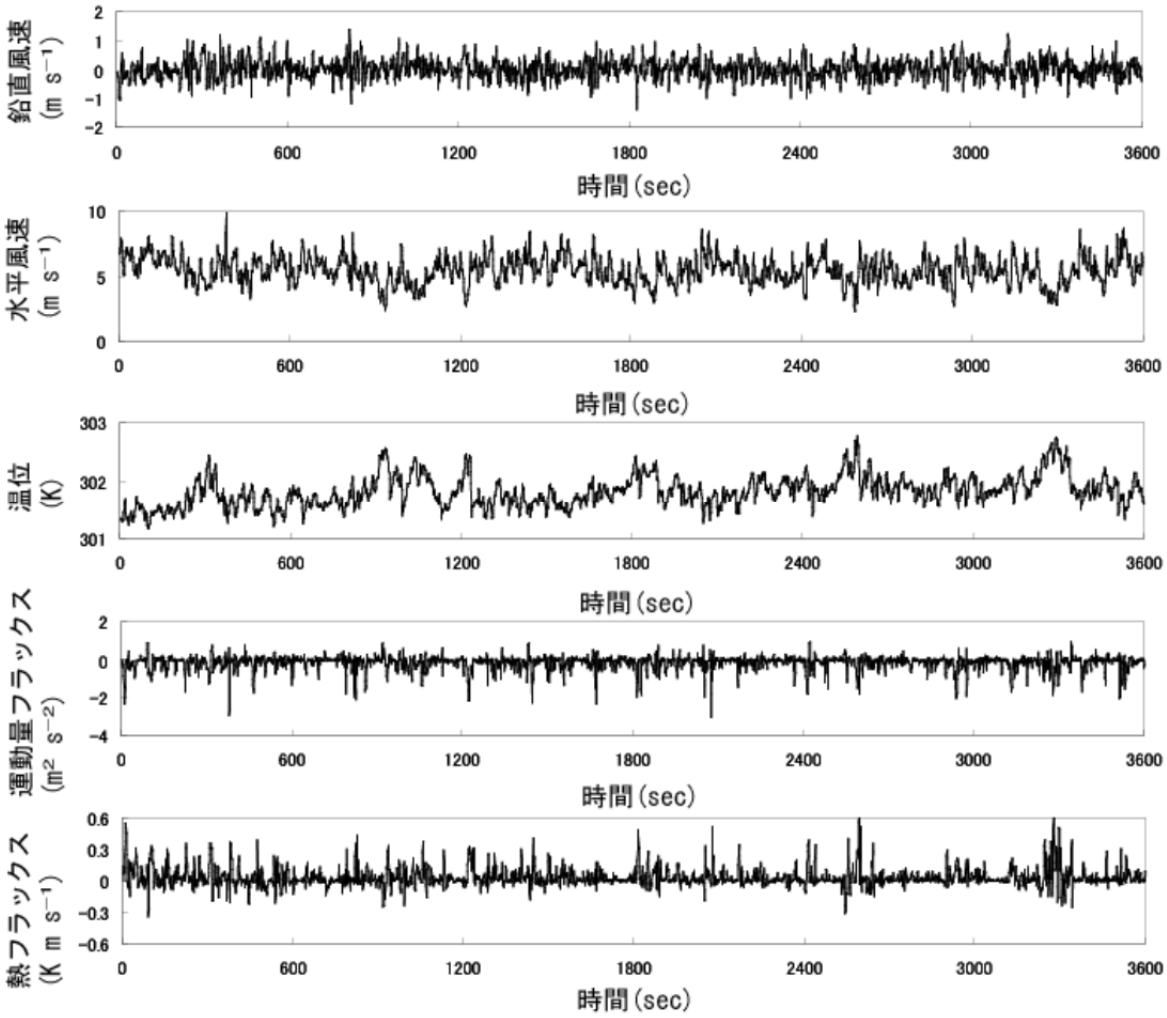


図６　各種物理量の時間変動分布図

[前試問]

１，表面温度を１５（℃）とした場合、黒体放射量はいくらになるか計算しなさい。

２，予習の ① ② を埋めなさい

３，２０℃における空気と水の、熱拡散係数と熱伝導率を調べてきなさい。
　　３０℃の地面の上に２０℃で一様の静止した空気あるいは水がある。同じ時間内で比較すると、水と空気でどちらが地面から上空まで遠く３０℃の温度の影響が及ぶか？理由と共に示せ。また、同じ時間内で、同じ高さで比較すると、どちらがより多くの熱力学的フラックスが生じるか？

４，実験で用いるアルミニウム、木材（松）、発泡スチロール（ポリスチレン）、コンクリート、アクリルの熱拡散係数と熱伝導率を調べてきなさい。

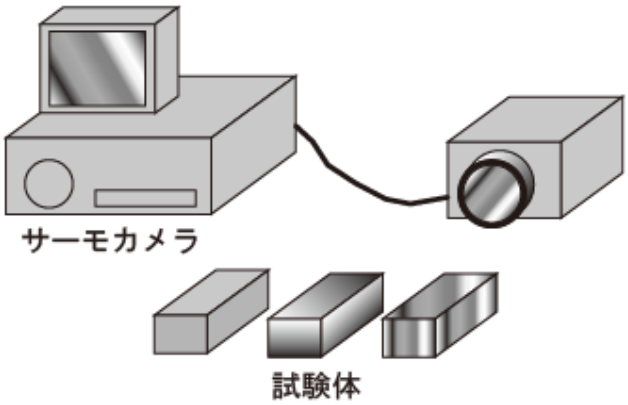
５，地表面と上空１ｍの場所で１０℃の気温差がある。この時、鉛直方向の熱拡散フラックス H_{diff}（W m^{-2}）を計算しなさい。

６，1 (m s^{-1})の鉛直風速変動 0.1(K)の気温変動によって生じる熱力学的熱フラックス $\overline{H_{adv}}$ (w m^{-2})を計算しなさい。

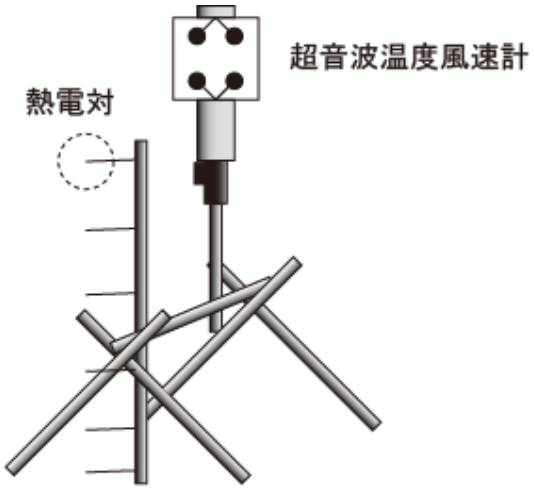
[実験]

１，室内でアルミニウム、木材（松）、発泡スチロール（ポリスチレン）、コンクリート、アクリルの表面温度をサーモグラフィーで計測しなさい。その際、塗装面（黒ラッカー）とそれ以外の面を両方撮影しなさい。また、熱電対を使って各試験体の表面温度と、室温を計測しなさい。各試験体に触り、体感温度の違いを確認しなさい。手の表面温度を熱電対温度計及びサーモグラフィーで測定しなさい。
　　【！注意！】試験体を触った時刻、サーモカメラで撮影した時刻を記録する。

２，屋外にて超音波風速計で乱流を計測しなさい。測定高度は地面より 1.5 m とする。熱電対を用いて６高度の気温を計測しなさい。測定高度はＴＡの指示に従うこととする。熱電対温度計を用いて地面の温度を測定しなさい。



実験１



実験２

[後試前]

１，実験１における試験体の表面温度測定結果（サーモカメラ及び熱電対）をまとめて比較考察しなさい。

２，実験１における試験体の触診結果をまとめて比較考察しなさい。

３，実験２における超音波風速温度計の測定結果から 10 分間のデータを用いて、図６を参考にして、時系列グラフに表しなさい。その際、10 分間の平均風向を U 成分、それと直行する水平、鉛直方向の風速成分をそれぞれ V 成分、W 成分となるように座標変換を行うこととする（参考資料）。

４，実験２における水平風速変動量、鉛直風速変動量、気温変動量の相関をグラフにプロットして考察

しなさい。

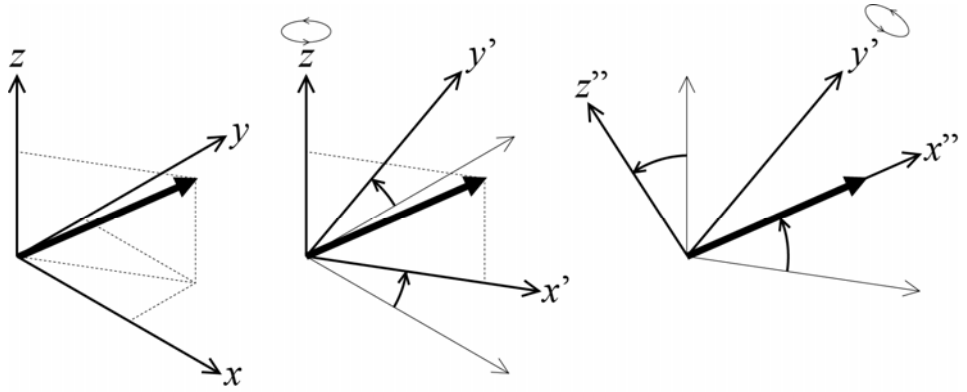
5，実験２における熱電対の測定結果を時系列グラフに表しなさい.

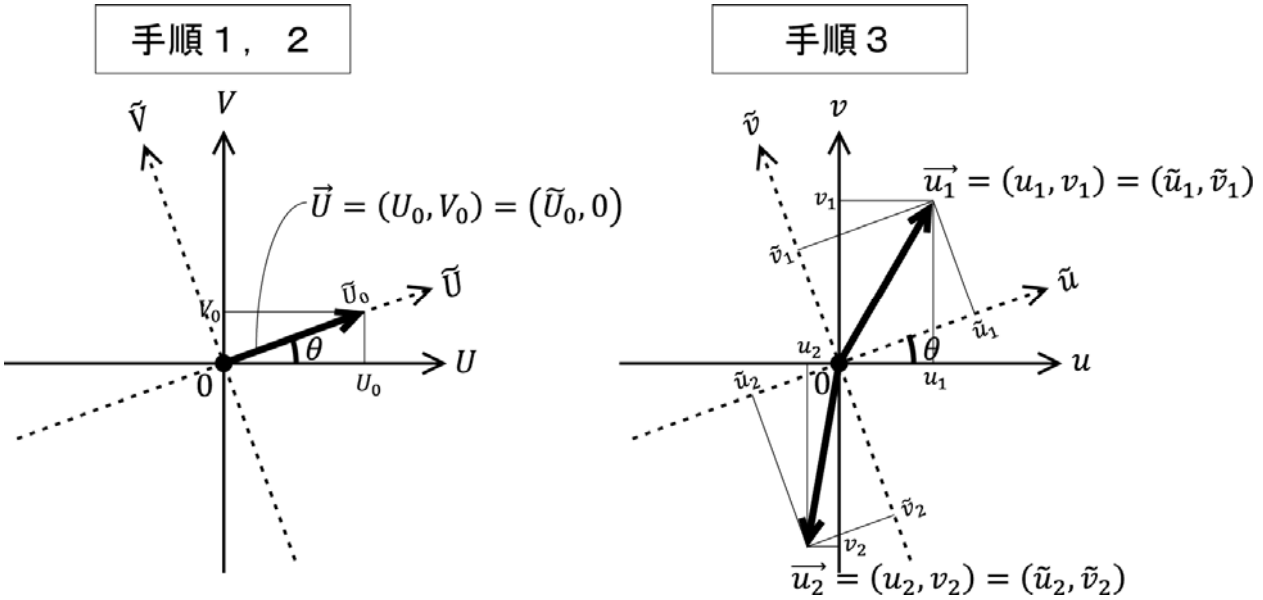
6，実験２における熱電対の測定結果より、時間平均温度の鉛直分布をプロットして結果を考察しなさい。

7，乱流が不利になる場合と有利になる事例を調べて列挙しなさい。

参考資料：　座標変換

計測した 3 次元風速の座標系（x,y,z）を主流風向（時間平均風向）とその直交方向に変換（回転）する．



(1) 観測座標系　　(2) 水平断面で座標変換　　(3) 鉛直断面で座標変換

手順１：$u(t)$, $v(t)$ の時間平均値 U_0, V_0 を求める．（本実験では 10 分平均）
手順２：U 方向 $(U_0, 0)$ に対する主流風向 $\vec{U} = (U_0, V_0)$ の角度θを求める．
手順３：座標をθだけ回転し，その座標軸に対する瞬間風速 $\tilde{u}(t)$, $\tilde{v}(t)$ を求める．
　　（$\tilde{v}(t)$の時間平均値がゼロになっているか確認する）．
手順４：$\tilde{u}(t)$, $w(t)$ についても同様の操作を行う．