洗濯機の中のゴミ

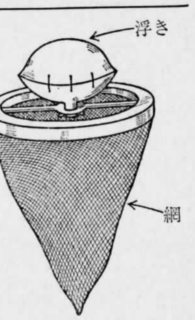

図 1

西山 豊

1. くず取り網

「ねえ，たまには手伝ってちょうだい.」

ごろ寝をしながらテレビを見ている所へ，女房が洗濯物を一抱え持ってきた.

家庭の主婦の仕事は確かに雑用が多い. 炊事，洗濯，掃除に買い物. どれをとってみても，毎日の生活には必要不可欠なのであるが，やっていて当り前で意外と目立たない労働である. 他人事のように言ってはみたものの，変りばえのしない仕事に追われがちな私達サラリーマンの仕事にも，どこか共通点を感じないわけでもない.

ひとつぐらいは協力しようと，私は重い腰を持ちあげて洗濯にとりかかった.

まず洗濯槽に水を張り，そして洗濯物を入れ始めた. ところが. その中に変なものが紛れ込んでいるのを見つけることになった. (図 1)

「おや，これは何だろう.」

洗濯物には見えない. かといって子供のおもちゃなのだろうか. そうでもない. 思案しているところへ女房がやって来た.

「それは，くず取り網よ.」

と教えてくれた. この網を洗濯物と一緒に洗濯槽に浮べておくだけで，糸くずや綿ぼこりがうまく集められると言うのだ. (図 2)

私はその説明を聞くや，そんなことがあるのかと疑いながら，一旦入れた洗濯物をこっそり取り出した. そして，この「くず取り網」だけを水槽に浮かし，電源にスイッチを入れて網の挙動を観察し始めた.

30～40 分もしたであろうか. 女房がやって来た.

「まだ終ってないの. やっぱし男は駄目ね.」

私は「くず取り網」の動きに夢中になってしまい，すっかり洗濯のことを忘れてしまったのだ.

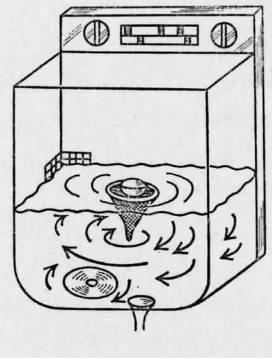

図 2　洗濯槽の中

2. 汚れの動き

それでは，この「くず取り網」がどうして上手にゴミを集めるのか，順を追って説明していこう.

その前に，少し余談になると思うが，洗濯物に付着したあかや汚れが，その繊維から離れる過程を化学的な面から復習しておこう.

洗剤の分子には，親水基と親油基と呼ばれる部分がある. (図 3)　汚れは一般に油性であるから，洗剤の親油基がひっつく. 汚れが繊維から離れる過程を図4に示した.

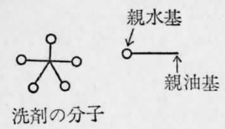

図 3

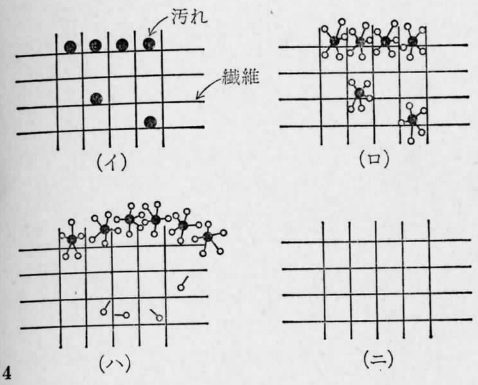

図 4

ところで一旦繊維から離れた，泡で包まれた汚れは，一体どこへ行くのだろうか. 洗濯水の比重と汚れの比重とが問題になってくる. 砂や泥などの重い汚れは底に沈み，糸くずや綿ぼこりなどの軽い汚れは上に浮いてくる. 洗濯機の中は水が回転しているので，重い汚れは遠心力でとばされ周囲におしやられる. 一方軽い汚れは，自由表面の中心部が周辺部より低いために，中心部に移動しはじめる. そして渦にまかれ，水中にもぐり，一旦洗われたはずの洗濯物は再び汚染されることになる. その過程を図5の (イ) から (ニ) に示した. 図の中で黒丸は重い汚れを，白丸は軽い汚れを示している. 白丸で示した軽い汚れの動きに，特に注目されたい. 糸くずや綿ぼこりは，いつまでたっても洗い落されない原因がおわかり頂けると思う. 毛糸のセーターなんかを洗う場合は，他の洗濯物に毛がつかないように注意して洗濯するのは常識になっている.

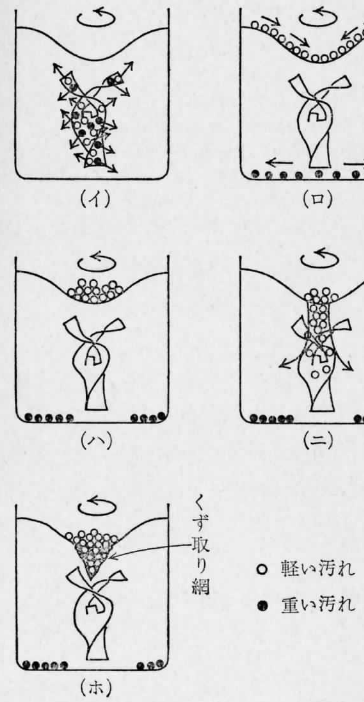

図 5

そこで考え出されたのが，「くず取り網」である. この考案は主婦の笹沼さんによるもので，水流を巧みに利用したものだ. 構造は至極簡単で，網と，水面に浮かせるための浮きとからなっている. 洗濯槽の周辺に取りつけられた従来のゴミ取り器に比べて，その収集能力において格段の開きがある. この「くず取り網」は汚れを集めようと必死に動きまわっているのではない. 図5の (ハ) から (ニ) に至る過程を正しく理解していれば，(ホ) の意味が明らかになる.

ゴミの動く経路に常に位置し，何の労なくつかまえるこの網に思わず拍手を送りたくなった.

3. 渦運動

「くず取り網」が汚れをつかまえるのに有効であるには，水の自由表面が平坦であってはならない. 中心部が周辺部に比べて低く，落差があってはじめてゴミが真中に集まってくるのである.

それではどうして中心部が低くなるのであろうか.

それにはこの稿の本題である渦運動について論じなければならない. 渦を大別すれば，強制渦と自然渦になる. 洗濯槽の中では，中心部が強制渦，周辺部が自然渦の組み合せ渦になっている. (図 6)

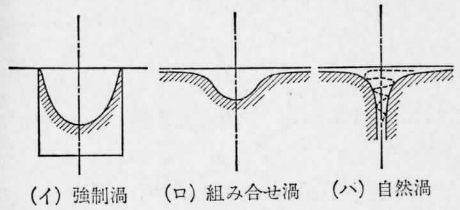

図 6　渦の分類

強制渦とは，器の中の水をかき回し，あたかも固体が回転しているかの如く水の分子の速度が，その中心からの半径に比例して増加している渦をいう. 自然渦とは，水を満した器の底に穴を開け，そこから水が流出する場合に発生する渦をいう. 地球の自転の影響により，北半球では反時計回りに，南半球では時計回りに回転しようとする.

少し専門的になると思うが，数式を使って次の問題を解いてみよう.

(問)　中心部から半径 a 以内にある水を角速度 ω で回転させた時，その流速と自由表面の水位を求めよ.

答を先に言うと図7のようになる. (イ) に流速，(ロ) に水位の分布を示した. 流速 v も水位 z も，ともに同一円周上では同じ値をとるために，半径 r だけによって決まる函数である.

この問題を解く順序として，まず流速について求めてみる. その後に水位を求める. なぜなら，流速がわかれ

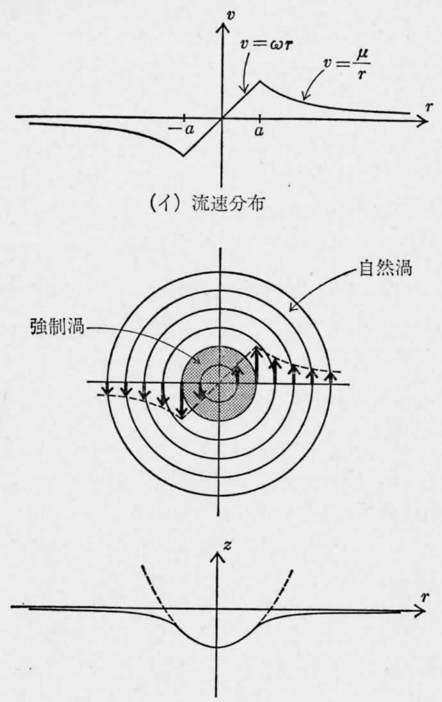

図 7　自由表面の流速と水位

ば水位が決まるからである．

では，流速を求めてみよう．

$|r|\leq a$ においては，渦は強制渦であるから，流速は半径 r に比例し，

$$v=\omega r \quad (\omega \text{ は角速度}) \tag{1}$$

となる．一方 $|r|>a$ においては，渦は自然渦となり，流速は，

$$v=\frac{\mu}{r} \quad (\mu \text{ は定数}) \tag{2}$$

となる．ところで (1) 式は直観的にわかっても，(2) 式は若干の説明を要する．

流体の密度を ρ，流速を v，重力加速度を g，水位を z，圧力を P とすれば，同一流線については，

$$\frac{1}{2}\rho v^2+\rho gz+P=\text{一定} \tag{3}$$

の関係がある．これはベルヌーイの方程式とよばれ，運動エネルギーと位置エネルギーの和は一定であることを示している．(3) 式において，同一円周上では位置エネルギーは一定であるから，左辺の第二項を省いて，総圧を H とすれば，

$$\frac{1}{2}\rho v^2+P=H \tag{4}$$

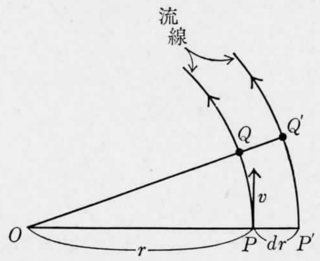

図 8

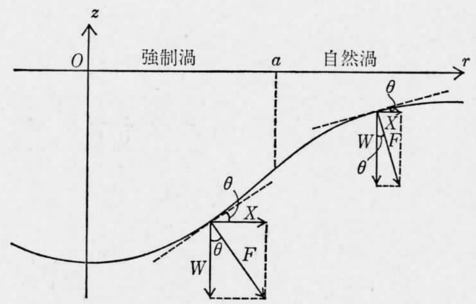

図 9　自由表面は合力 F と直交する

となる．

v, P, H をともに半径 r だけの函数とし，総圧 H の法線方向 r についての微分を考える．(4) 式を r で微分する．

$$\frac{dH}{dr}=\rho v\frac{dv}{dr}+\frac{dP}{dr} \tag{5}$$

今，図8のようにとなりあわせる流線 $PQ, P'Q'$ を考えた時，$PP'Q'Q$ の部分が受ける遠心力は，法線方向の圧力の変化に等しいから，

$$\rho\frac{v^2}{r}=\frac{dP}{dr} \tag{6}$$

となり，(6) 式を (5) 式に代入すれば，

$$\frac{dH}{dr}=\rho v\left(\frac{dv}{dr}+\frac{v}{r}\right) \tag{7}$$

となる．自然渦は，すべての流線について総圧 H が一定であるから，(7) 式において

$$\frac{dv}{dr}+\frac{v}{r}=0 \tag{8}$$

が成り立たねばならない．(8) 式を解いた結果が (2) 式となる．

(1) 式，(2) 式を図7（イ）に示した．$|r|=a$ においては v は連続であるから，$\mu=\omega a^2$ である．

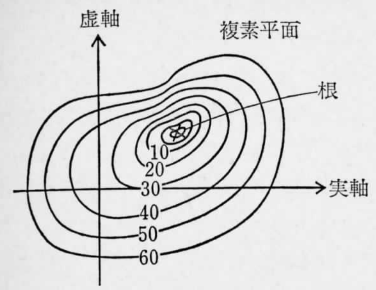

図 10　$|f(z)|$ の等高線図

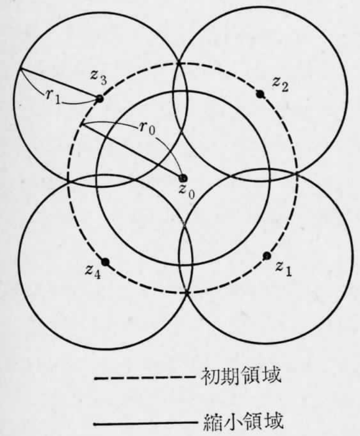

図 11　区間縮小法

さて，この流速分布図から見て，速度の絶対値が一番大きいのは半径 r が a の円周上になる．洗濯槽の中では，洗濯物の量や位置によって a の値は刻々変化する．しかし，一番流れが速いのは周辺でも中心でもなく，その中間である．

次に自由表面の水位を求めてみよう．

表面上の水の分子が受ける力は重力 W と，その点での遠心力 X だけである．そして，この二つの合力 F は，図9のように自由表面と直交していなければならない．

自由表面の接線の傾きは $\frac{dz}{dr}$，合力 F の傾きは，

$$\frac{W}{X}=\frac{(-\rho g)}{\rho\frac{v^2}{r}}=-\frac{gr}{v^2} \tag{9}$$

であるから，各々の傾きをかけあわせて，

$$\frac{dz}{dr}\times\left(-\frac{gr}{v^2}\right)=-1 \tag{10}$$

ゆえに

$$\frac{dz}{dr}=\frac{v^2}{gr} \tag{11}$$

この (11) 式に (1) 式，(2) 式の v を代入して r について積分すれば水位 z が容易に求まる．

$|r|\leq a$ においては，強制渦の流速 (1) 式を代入して，

$$\frac{dz}{dr}=\frac{(\omega r)^2}{gr}=\frac{\omega^2}{g}r \qquad (12)$$

これを解いて

$$z=\frac{\omega^2}{2g}r^2+C_1 \qquad (C_1\text{ は定数}) \qquad (13)$$

を得る．

$|r|>a$ においては，自然渦の流速 (2) 式を代入して，

$$\frac{dz}{dr}=\frac{\left(\frac{\mu}{r}\right)^2}{gr}=\frac{\left(\frac{\omega a^2}{r}\right)^2}{gr}=\frac{\omega^2a^4}{g}\cdot\frac{1}{r^3} \qquad (14)$$

これを解いて

$$z=-\frac{\omega^2a^4}{2g}\cdot\frac{1}{r^2}+C_2 \qquad (C_2\text{ は定数}) \qquad (15)$$

を得る．

ここで，積分定数 C_1, C_2 は次のようにして求められる．まず (15) 式において，r を無限大にしたとき，z は0に近づくから

$$C_2=0 \qquad (16)$$

となる．$r=a$ において (13) 式と (15) 式は連続であるから，

$$\frac{\omega^2}{2g}a^2+C_1=-\frac{\omega^2a^4}{2g}\cdot\frac{1}{a^2}$$

ゆえに

$$C_1=-\frac{\omega^2a^2}{g} \qquad (17)$$

となる．

(13) 式，(15) 式を図7(ロ) に示した．

4. 複素根を求める

z を複素数としたとき，複素方程式

$$f(z)=0 \qquad (18)$$

の根が解析的に求められるのは，きわめて限られている．代数方程式に限ってみても，一般解があるのは実係数の4次方程式までである．ところが現実の問題は，複素係数で，5次以上，しかも三角函数が入ってきたりして，とても解析的に求まりそうもない．

近年，コンピュータの発達により，方程式の解を数値的に求める方法が定着しつつある．数値解はいわば近似解であり，エレガントな解析解に比べれば非常に泥くさいが，それでも結構役に立っている．有効桁が7桁もあれば，それで現実問題としては十分なのである．

私は以前，複素方程式の数値解を求めるプログラムを作ったことがある．この方程式は非線形方程式とよばれ，解析解がなかなか見つからないものである．

プログラムの概略を示せば次の通りである．複素方程式 (18) の複素根は，複素平面上のどこかにある．複素平面上をむやみに探してみてもはじまらない．そこで複素函数 $f(z)$ の絶対値をとってみる．絶対値は常に，

$$|f(z)|\geq 0 \qquad (19)$$

であり，この不等式の等号が成りたつのは z が (18) 式を満たすときだけである．

今，絶対値の等高線図をかいてみると，図10のように必ず根が中心にくるであろう．このことを念頭におきながら，次の区間縮小法という数値モデルを考える．

図11のように，根が z_0 を中心に半径 r_0 の領域内にあるものと仮定する．この領域を初期領域とよび，破線で示した．次に，この領域を，半径が少し小さい五つの領域で覆うこととする．この領域を縮小領域とよび，実線で示した．五つの領域の中心は，初期領域の中心 z_0 と，初期領域の円周上にある z_1 から z_4 までの点である．

z_0 から z_4 までの五つの点での函数の絶対値 $|f(z)|$ を比較し，一番小さい値を示した点を，次の新しい中心とする．たとえば，z_3 での函数の絶対値 $|f(z_3)|$ が一番小さかったとしよう．そうすれば z_3 が新しい中心となる．この段階では，中心 z_3，半径 r_1 の領域が初期領域になるのである．

この操作を次々に繰り返していけば，根を含んでいる領域は徐々に縮まっていき，遂には根だけしか入らないというのである．ただし，根をとりにがすこともある．

この手法で特徴的なのは，複素函数 $f(z)$ の絶対値をとるということである．どこに根があるのか解らないので，探索の方向づけを与えたのである．

この手法は，今まで論じてきた洗濯機のゴミをうまく取る「くず取り網」とどこか似ている．複素根を求めることとゴミをつかまえることは，まるっきり違った行為に見えるが，不思議と対応している．複素平面と自由表面．複素根とゴミ．収束領域と「くず取り網」．函数の絶対値をとることと，洗濯機の中の水を回転させること．根を探索する方向として函数の絶対値の大小を比較したことと，ゴミをつかまえるのに自由表面の落差が利用されていること．これらはことごとく似ている．

5. 重油回収のための空論

久しぶりに会った友達に，「くず取り網」のことを話した．彼はこの道具を初めて知るらしく，「なるほど」と感心するばかりであった．そして，彼の突拍子もない提起を皮切りにとんだ議論をすることになった．

「それはなかなかいいアイデアだ．そのアイデアを，海に拡がった重油を回収するのに使えないかなあ．」

「どのようにして．」

「油と水は比重が違うだろう．油は水より軽いから，海面に浮いている．ちょうど洗濯機の中のゴミと同じだ．だから，海水を洗濯機のときと同じように回転するんだよ．そうすれば重油は拡がらずに一箇所に集まってくるというんだ．」

「回転させたら遠心力で，かえって油が散らばるような気もするんだが．」

「そんなことはない．油は海面の落差を利用して真中に集まってくるさ．」

「真中に集めて，どうして回収するんだよ．」

「回収船が，その渦の中に入っていくんだ．」

「渦にまかれる危険をおかしてか．命がけだなあ．」

「回収船はやめて，パイプでも設置しておくか．」

「ところで，海水を回転させるエネルギーはどこからもってくるのかい．」

「潮流のエネルギーを使うんだよ．月の引力で，一日に二回，潮の満ち引きがあるのを知っているだろう．あの自然のエネルギーを使うんだよ．」

「エネルギーは得られるとしても，それが渦運動をおこすとは言えないだろう．」

「水路をもうけて，潮の流れを強制的に変えて渦運動を起させるとかさ．」

「この議論も，だんだんあやしくなってきたなあ．」

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

1974年12月，瀬戸内海の水島コンビナートから流出した大量の重油は，漁業の宝庫といわれる瀬戸内海の東部海域一帯に拡がった．その汚染と漁業被害は，71年11月，新潟沖でおきたジュリアナ号事故をはるかに上回り，日本最大の海洋汚染事故となった．この事故のあとも他のコンビナートで，何回となく重油の流出事故がおこり，住民の生活をおびやかしているのは衆知のとおりである．

流出した重油は，コールタール状になって海面に漂ったため，紙やむしろで吸いとったり，ひしゃくで汲み上げるという原始的な回収法しか効き目がなかった．拡散した重油の大部分は揮発成分が蒸発して重くなり，約一週間後から徐々に海底に沈み始めた．

重油はヘドロとなり，魚類のえさとなるプランクトン，海草などを全滅させてしまう恐れもあり，深刻な問題となっている．

コンビナートでの貯蔵原油は，消防法，港湾法などの規定によって，

① 石油タンクをどんな圧力にも耐えるよう設計する．
② タンクから油が漏れても全量をためられるよう周囲を防油堤で取り囲む．
③ 防油堤が破れても海洋に拡散しないようオイルフェンスの用意をしておく．

という三重の安全チェックをする建前になっている．

建前はともかく，重油が流出してしまってからではどうしようもない．全国の臨海コンビナートには容量一万キロリットル以上の大型タンクが約2000基もあるという．重油流出の背景には，十分な安全性を抜きに，次々と大型タンクを設置していった政府の石油備蓄政策に根本原因があるというのも事実だが．

私達国民は，流出した重油が自然の浄化作用で元どおりになるのを待つなど，気の遠くなるようなことを望んではいない．重油を早く回収する特効薬はないものだろうか．洗濯機の「くず取り網」のアイデアは適用できないのだろうか．

（にしやま ゆたか／日本アイ・ビー・エム）