九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

水草に覆われた閉鎖性水域の熱対流

中島, 敬太郎 九州大学農学部生物資源環境学科生物資源生産科学コース生産環境情報学研究室

https://hdl.handle.net/2324/1498283

出版情報:Kyushu University, 2001, 学士, 学士 バージョン: 権利関係:

卒業論文

水草に覆われた閉鎖性水域の熱対流

九州大学農学部生物資源環境学科生物資源生産科学コース

生産環境情報学研究室

中島 敬太郎

2002年3月

目次

第1章 序論	1
第2章 鉛直方向温度分布測定実験	
2 ・ 1 実験概要	
2 ・1 ・1 実験目的	2
2 ・1 ・2 実験計画	3
2 ・ 2 実験装置	
2 ・ 2 ・ 1 実験水槽	4
2・2・2 測定機器	5
2 ・ 3 実験方法	6
2 · 4 実験結果と考察	
2・4・1 水温の鉛直分布の時間変化	8
2・4・2 熱量・熱フラックスの時間変化	17
2・4・3 レーリー数	20
第3章 可視化実験	
3・1 実験概要	23
3 ・ 2 実験方法	23
3・3 実験結果と考察	24
第4章 水面付近における水温変化	
4 • 1 実験概要	28
4・2 実験装置	
4 ・ 2 ・ 1 実験水槽	28
4・2・2 計測器項目と計測機	28
4 ・ 3 実験方法	28
4 · 4 実験結果と考察	
4 ・ 4 ・ 1 水面付近においての水温時間変化	
4・4・2 2転換の相互相関関数	32
4・4・3 自己相関関数	34
第5章 結論	37

参考文献 謝辞

38 39

第1章 序論

近年、都市開発において、公園内に人工の流れる小川や池等の生活に密着した水辺ゾー ンが、積極的に設置されている。また、農地開発においては、灌漑水確保のため、クリー クや貯水池の建設が進められている。そのような場で用いられるような水を健全に維持す ることは、必要不可欠である。特に、灌漑水の水質は、農地開発において重要な問題であ る。

貯水池等は、水の出入りが少なく、富栄養化等による水質問題が深刻であり、その改善 が早急の課題となっている。水質悪化は、まず水域の閉鎖性に基づく水塊の滞留時間が長 いこと、つまり表層のDO(溶存酸素)などを多く含む水質の良い水塊が下層へと輸送さ れにくく、底層付近では無酸素状態になり、水質悪化をまねきやすい事に起因する。そこ で、水質の改善・保全策を講じるには、水域の流動特性を知る必要がある。閉鎖性水域に おける水の循環特性として、機械的擾乱によるものと熱的擾乱によるものがあげられる。 つまり、前者は水面への風の作用であり、後者は水面からの放射冷却である。それらに起 因する流動は、水域内の水質変動を支配するため、機械的擾乱が卓越する場合、熱的擾乱 が卓越する場合及び両者が存在する場合の流動を明確にしておかなければならない。本研 究では水温変動が激しく、無風状態において、水質悪化が促進されることに着目し、熱的 擾乱が卓越する場合についての水域内流動を検討する。そして、されに閉鎖水域の水面が 水草に覆われた場合についても検討することを目的とする。

日射や、大気からの熱移動で、水面に熱が与えられると、熱の伝導らにより、水面から 順に層を形成していく。また、外気温の低下等で、水面からの放射冷却が開始されると、 表層水温が低下する。これに基づく密度不安定により対流が生じ、鉛直方向に均一な水温 の層(混合層)が形成される。このように、(水温の成層化 混合層の発達、混合層の発達

水温の成層化)というサイクルで、流動は行われる。

そこで、本研究では、水草で覆われた水域において水面が冷却されることにより生ずる 不均一な温度場に基づく密度流の特性について、水理実験を行い、定量的な解明を試みた。

はじめに第2章で、実験により水面冷却による水温分布推移を測定し、その現象の把握 を行い、第3章で、可視化実験により、密度流に密接な関係をもつ熱対流の沈降速度につ いて水草が与える影響の検討を行い、そして第4章で水面に水平方向の温度測定実験を行 い、それで得られた結果から自己相関、相互相関を用いて熱対流に与える水草の影響を定 量的に解析することを目的とする。

1

第2章 鉛直方向温度分布測定実験

- 2 · 1 実験概要
- 2 · 1 · 1 実験目的

密度流とは、重力場における流体運動において、空間的な密度の差異が重要な役割を果たす流れである。本研究では、"空間的な密度の差異"が水面からの熱放出、つまり水面冷却によって発生した密度差に起因する密度流を取り扱う。つまり、「水面冷却により不均一な温度場に発生する密度流の特性」を定量的に解明することである。今回の実験では水面を覆う水草の占有率を変化させて行う。そして、それぞれの場合においての水面冷却による水温分布の変化を測定し、その結果をFig.2-1に示すフローチャートに基づき解析を行う。また、本研究では成層化した状態(水温成層場)について行った。



Fig.2-1 解析手順のフローチャート

2・1・2 実験計画

研究目的を達成するために実施した実験の内容および実験条件をここで述べる。

実験は光の種類を変えて2通り行った。一つは電熱版(本実験ではホットプレート)そして、もう一つは赤外電球である。前者は水面が温められ、そしてその熱伝導で下層も暖まる、つまりあまり澄んでいない貯水池をモデル化したものである。それに対して、後者は澄んだ水の貯水池をモデル化したものである。

なお、本実験では水面を覆う水草の占有率を0%、10%、20%、40%と変化させ て行った。

測定日	水深(cm)	測定間隔 (min)	水草の占 有率 (%)	測定開始時 の水温()	測定開始時 の気温()	測定中の平 均気温()	加熱方法
11月24日	20	1	0%	12.1	14.4	14.4	電熱板
11月27日	20	1	10%	12.8	12.0	12.0	電熱板
11月29日	20	1	20%	13.7	15.7	13.3	電熱板
11月30日	20	1	30%	15.0	15.9	15.0	電熱板
1月15日	20	1	0%	12.0	12.6	13.9	赤外電球
1月11日	20	1	10%	9.9	12.6	11.9	赤外電球
1月10日	20	1	20%	8.2	11.3	11.3	赤外電球
1月9日	20	1	40%	7.8	9.1	8.8	赤外電球

Table2-1 実験条件

2・2 実験装置

2・2・1 実験水槽

実験水槽のスケールは、水面積が 200mm × 400mm、深さが 300mm で、厚さが 5mm の 透明アクリル板製である。また、水槽底面、側面からの放熱を防ぐため、水槽の底面、側 面を厚さ 20mm の発泡スチロールで覆い、熱移動が最小限になるようにする。

実験水槽の形状を Fig.2-2 に示す。





2・2・2 測定機器

水温測定に用いた温度センサーの形状を Fig2-3 にしめす。水面から 5mm の所に 1 点、 そこから 1cm 間隔で 9 点、またそこから 1.5cm の間隔で 7 点設置した。熱電対は厚さ 0.5cm の透明アクリル板に熱電対を適宜通し、固定した。測定機器は水温を測定するサーモダッ ク EF、気温、湿度を測定するおんどとり(TR-72) を使用した。

実験用流体の水温成層場を作るために用いた加熱器は、電熱板と赤外電球である。



Fig.2-3 温度センサーの形状

2·3 実験方法

Fig2-4 に各実験による測定断面図を示す。

実験は屋内で行い、外気の条件は制御していない、実験用流体としては、水道水をその まま用い、加熱器で5時間加熱した後冷却を開始した。

水温測定は、実験ごとに指定した断面および水深に計17点測点を設置し、水温の時間変化を測定機器により全測点同時測定で測定、記録した。水温測定の計測時間、計測間隔は 各実験とも5時間加熱5時間冷却の計10時間を1分間隔で測定した。なお、気温、湿度に 関しては水槽から1m離れたところでの測定を行い、こちらも1分間核で測定した。

以上の実験を、水面を覆う水草の占有率を 0%、10%、20%、30%(白熱電球を用いたときは 40%)と変化させて行った。なお、今回は水草の機能を断熱だけのものと限定して行ってので、水草のかわりに発泡スチロールを用いた。

この実験において、熱移動は水面からのみ起こるようにするために、水槽の底面、側面 は、厚さ 2cm の発泡スチロール板で覆い、水面以外からの熱移動が最小限になるようにし た。









2・4 実験結果と考察

温度センサー、または計測機器による測定温度の誤差については、各実験を行う前に流体を撹拌して水温を一定にしたときに、水銀温度計で測定した水温を標準温度として、その時の計測機器による測定温度との差を用い、補正を行った。

実験結果を考察するにあたり、まず、Fig.2-1の実験目的で述べたフローチャートの手順 に従い補正した測定水温を用いて所定の計算を行った。それらの結果から水面冷却による 密度流に水草が与える影響に関して考察する。

2・4・1 水温の鉛直分布の時間変化

水温成層場を形成する加熱方法が電熱板の時を Fig.2-5、Fig.2-6、Fig.2-7、Fig.2-8 に、 また赤外電球の場合を Fig.2-9、Fig.2-10、Fig2-11、Fig2-12 に示す。グラフは加熱開始、 冷却開始からそれぞれ 1 時間ごとの分布である。この鉛直分布グラフから、水草の被覆率 が大きくなると温度が一様になりにくいことがわかる。これは加熱されたときに形成され た温度境界面が崩れにくいという事である。





Fig.2-5 A-1の水温鉛直分布





Fig.2-6 A-2の水温鉛直分布





Fig.2-7 A-3の水温鉛直分布











Fig.2-9 B-1の水温鉛直分布





Fig.2-10 B-2の水温鉛直分布





Fig.2-11 B-3の水温鉛直分布





Fig.2-12 B-4の水温鉛直分布

2・4・2 熱量・熱フラックスの時間変化

測定断面における単位水面席の水柱がもつ熱量、および熱フラックスを以下に述べる方 法で算出した。

(1)熱量の計算

Fig.2-13 は、ある測定断面における水温鉛直分布の模式図である。水温がT()の水 塊の有する熱量は cT(cal/cm³)であり、(ここに、 は水の密度、cは水の比熱dあり、 ともに近似値に1とする。)これから単位面積の水柱が持つ熱量Qは、次式のようになる。

 $Q = \int_0^h \mathbf{r} c T dz \quad (cal \ /cm^2)$

この熱量Qは Fig.2-13 のような 2 測点間の熱量 Q_1, Q_2, \dots, Q_n の総和と考え、台形公式を用いて数値積分すると、次式のように表せる。

$$Q = \frac{1}{2} \mathbf{r} c \{ T(Z_1) + T(Z_0) \} (Z_1 + Z_0) + \frac{1}{2} \mathbf{r} c \{ T(Z_2) + T(Z_1) \} (Z_2 + Z_1) + \dots + \frac{1}{2} \mathbf{r} c \{ T(Z_n) + T(Z_{n-1}) \} (Z_n + Z_{n-1})$$

これから、電熱板で加熱したときの熱量変化を Fig.2-15 に白熱電球で加熱したときの熱量 変化を Fig.2-16 にグラフとして表した。

(2)熱フラックスの計算

Fig.2-14 はある測定断面において単位面積の水柱が持つ熱量の時間変化である。 $Q_1 = Q_t, Q_2 = Q_{t+\Delta t}$ とすると、単位面積、単位時間当たりの熱フラックスは、

$$F_{H} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Q_2 - Q_1}{\Delta t} (cal / cm^2 s)$$

となる。



なお、今回は $\Delta t = 30$ を用いて熱フラックスを計算した



Fig.2-15 電熱板で加熱したときの熱量変化



Fig.2-16 白熱電球で加熱したときの熱量変化



Fig2-17. 電熱板で加熱した時の時間に対する熱量変化率



Fig2-18.白熱電球で加熱した時の時間に対する熱量変化率

2 · 4 · 3 レーリー数

レーリー数の定義式は

$$R_a = \frac{ag\Delta Td^3}{ku} = \frac{agF_Hd^4}{rck^2u}$$

である。ここに :体膨張係数、 :上・下面の温度差、d:流体層の厚さ、 :温度伝 導率、 :動粘性係数、q:熱フラックス、 :密度、C_p:比熱とする。本実験の解析で は、後者の式を用いてレーリー数を求める。

レーリー数は、 $R_a > 1700$ で規則的な渦、 $R_a = 5 \times 10^4$ で規則的な流れ、 $R_a = 10^6$ で完全 に乱れた対流を表す。このように、各実験の対流の乱れ方を示すため実験条件の一つとし て考え、Table.2-2 に計算結果を示す。また諸元の値は、以下の通りである。 $a = 2.5 \times 10^{-4} (1/^{\circ} C)$ 、 $g = 980(cm/s^2)$

Table2-2 冷却開始時のレーリー数

Case	レーリー数
A-1	1.96E+12
A-2	1.24E+12
A-3	1.16E+12
A-4	1.29E+12
B-1	1.52E+12
B-2	1.79E+12
B-3	1.79E+12
B-4	1.16E+12

また、実験条件にレーリー数を考慮に入れると、電熱板で加熱した場合、赤外電球で加熱 した場合それぞれ Fig.2-19、Fig.2-20 で表される。これは横軸にレーリー数をとり、縦軸 が蓄熱量、放熱量である。また、Table2-3、Table2-4 に電熱板で加熱した場合、赤外電球 で加熱した場合それぞれの蓄熱量、放熱量を示した。



Fig.2-13 電熱板で加熱した時



Fig.2-14 赤外電球で加熱した時

60.7

40.7

57.4

39.1

59.9

42.8

	A-1	A-2	A-3	A-4		
加熱開始時の熱量	247.3	243.0	280.9	307.5		
冷却開始時の熱量	337.3	303.7	338.2	367.4		
冷却後の熱量	311.9	263.1	299.1	324.6		

90.0

25.4

蓄熱量

放熱量

Table2-3 電熱板で加熱した時

Table2-4 赤外電球で加熱した時

	B-1	B-2	B-3	B-4
加熱開始時の熱量	246.0	203.0	168.1	225.5
冷却時の熱量	329.2	292.1	259.3	307.9
冷却開始後の熱量	302.4	249.1	237.4	283.9
蓄熱量	83.2	89.2	91.2	82.4
放熱量	26.8	43.0	21.9	24.0

今回の水温の鉛直分布測定実験から Fig.2-5、Fig.2-6 より水草の占有率が大きくなるほど温度境界面が崩れにくくなる傾向が現れた。しかし、今回はこのことは定量的には解明できなかった。それはレーリー数のばらつきらもわかるように外気の条件が不均一だった事に 起因する。

また、Fig.2-11、Fig.2-12 から水草の占有率が大きくなると、熱量変化率の絶対値が小さ くなっている。これは閉鎖水域全体において水の循環が悪くなっていると考えられる。つ まり、これにより底層に栄養分が行きとどかなくなるという現象が起こることが考えられ る。

第3章 可視化実験

3・1 実験概要

本実験では、アルミ粉末を用いた可視化方法(アルミ粉末方法)で流れの可視化を行い、 不均一冷却による密度流現象の把握、及び密度流現象と密接に関係する熱対流の形成、発 達およびその特性を、水面を覆う水草の被覆率を変化させて検討する。

水面からの冷却による熱対流の性質は、水面近傍の密度不安定に起因して発生する冷水 塊の性質に依存する。そこでアルミ粉末法を用いた可視化実験から、そのプリュームの発 生特性、特に冷水塊の沈降速度を水草の被覆率の違いによる比較・検討を、ビデオカメラ によって撮影した映像から行う。

3 · 2 実験方法

実験は温度分布測定実験と同じように屋内で、外気の条件を制御しない状態で行い、水 槽および実験用流体も同じである。また、実験は、すべて日没後、暗くなってから行った。

可視化方法には、一般的にアルミ粉末法とアニリンブルーを用いる色素法があるが、今 回はアルミ粉末法を採用した。

アルミ粉末法とは、まず初めに微細なアルミ粉末を水中に均等に拡散、浮遊させる。し かし、この場合アルミ粉末は基本的に水面に浮いてしまうため、ビーカー内でアルコール を加え、少量の水とよくかき混ぜた後、水槽内に入れる必要がある。

次に、側面から幅約 1cm のスリット光を当てると、水中のアルミ粉末に光が反射する。 この反射して見えるアルミ粉末の動きで、水の流れが観察できる。なお、明瞭にその動き を観測できるように、水槽の底面、側面と断熱材(発泡スチロール)との間に黒色のビニ ールを張り付けた。

なお、今回の可視化方法で可視化した密度流現象を市販のビデオカメラにより撮影した。 そして、冷却開始から 20 分間撮影した。この 20 分というのは水面付近でプリュームが顕 著に見られるからである。

23

水草の占有 実験開始時 実験開始時 測定時間 実験日 Case 率 (%) の気温()の水温() (分) 2002.2.7 20分 1 0% 10.1 20.1 2 2002.2.7 10% 9.6 19.6 20分 2002.2.7 19.9 20分 3 20% 19.9 4 2002.2.7 40% 19.1 19.1 20分

Table.3-1 実験条件

3・3 実験結果と考察

水面を覆う水草の被覆率を変化させて、密度流と密接に関係する熱対流の形成・発達お よびその特性について可視化実験の結果をもとに検討する。

冷却開始後しばらく流体は静止(熱の移動は熱伝導のみ)しており、対流による熱移動は ない。冷却が進み密度安定度が不安定になると冷水塊が形成され。それが降下するにともな い周囲の流体との間に働く剪断応力により冷水塊はその形を確立していく。このことから、 冷水塊の発生間隔、発生周期は水面近傍の低温流体層の安定性から決まるものと考えられる。 今、考えている場の連続の式・運動方程式・熱量方程式は以下のように表すことができる。

 $di\mathbf{u}\vec{u} = 0$ $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot gradp\vec{u} = -\frac{1}{\mathbf{r}}grap - \vec{k}aTg + \mathbf{u}\Delta\vec{u}$ $\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot gradT = \mathbf{k}\Delta T$

ここに、u:流速ベクトル(u, u, m)、r:密度、a:体膨張係数、T:温度、p:圧力、u:

動粘性係数、 k: 温度伝導率、k: 鉛直方向単位ベクトルである。

鉛直方向の代表スケールをh、定圧比熱をc、単位面積当たりの熱フラックスを F_H とすると、

$$F_{H} = \frac{\mathbf{r}c\mathbf{k}\Delta T}{h^{2}}$$

となり、レーリー数を用いて上式を無次元化する。 $x = x^*h, t = t^*(h^2/\mathbf{k}), u = u^*(\mathbf{k}/h), T = T^*F_H/\mathbf{r}c\mathbf{k}, p = p^*p$ とおき、これらを上の3式に 代入し、*を省略して表示すると、以下のようになる。

境界条件は

$$z = 0 \quad \overline{c} \ \mathbf{m} = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial z} = 0$$
$$z = 1 \quad \overline{c} \ \mathbf{m} = 0, \quad \frac{\partial^2 \mathbf{m}}{\partial z^2} = 0$$

chandrasekhar による安定解析の結果では、不安定になる限界のレーリー数は、 R_{ac} B1100、 水平スケール L とhの関係は、h = 2.68L/2p である。 R_a の定義式より、

$$h = \left[\frac{R_{ac} \mathbf{r} c \mathbf{k}^2 \mathbf{u}}{\mathbf{a} g F_H}\right]^{\frac{1}{4}}$$

であるから、安定性が崩れる時点と冷水塊が発生する時点との間に差があるとしても、ほぼ

$$L \propto \left[\frac{R_{ac} \mathbf{r} c \mathbf{k}^2 \mathbf{u}}{\mathbf{a} g F_H}\right]^{\frac{1}{4}}$$

が成立する。さらに、不安定に達するまでの間は熱は伝導型で輸送されるとすれば、不安 定に達するまでの時間 T_v は $h = \sqrt{\mathbf{k}T_v}$ で与えられるから、

$$T_{v} = \left[\frac{R_{ac} \mathbf{r} c^{2} \mathbf{u}}{\mathbf{a} g F_{H}}\right]^{\frac{1}{2}}$$

で表せる。

また冷水塊の平均的な下降速度は熱フラックスできまり、

$$W_V = 12.5 \left[\frac{a F_H}{rc} \right]^{\frac{1}{3}}$$

で与えられる。

次に、各実験のビデオ映像から観測した冷水塊の沈降速度を Fig.3-1 に示す。その測定方 法については水深 2 ~ 4 c mの範囲を下降した速度を測定した。それぞれ 3 つの沈降速度 を測定し、その平均の値を採用した。このグラフから被覆率が大きいほど、沈降速度が大 きくなる傾向が現れる。また水温が低い方が密度の値が大きいので、沈降速度が大きいと いうことはより発達した冷水塊だということができる。



第4章 水面付近における水温変化

4·1 実験概要

温度一様場の水面を冷却すると、水面のごく近傍においての密度不安定によって形成される冷水塊の降下にともなって小さな対流セルが数多く発生し、時間の経過とともに大きな対流セルに発達することが第3章の可視化実験で示された。そこで、ここでは水面付近での温度測定実験を行い、冷水塊の特性、すなわち冷水塊の発生周期、発生の個数、そしてその寿命に対する水草の与える影響を、水理実験を行って定量的に解明することを目的とする。



Fig4-1 冷水塊の降下に伴う対流セルの発達

4·2 実験装置

4・2・1 実験水槽

この実験に用いる水槽は第2章の実験と同様で、Fig2-2である。

4・2・2 計測項目と計測機器

4·3 実験方法

実験は室内で行い、外気の条件は制御していない。実験用流体は水道水を用い、今回は それを測定開始時の気温よりも 10 高くなるようにし、温度一様場を作った。そして、水 面から 5 ミリの所に熱電対を 1 センチ間隔で配置し、冷却開始から 20 分間 2 秒間隔で測定 を行った。なお、今回の実験では水温変化を電圧にして測定し、水面を覆う水草の被覆率 を 0%、10%、20%、40%と変化させて行った。なお、実験条件を Table4-1 に示す。

Case	実験日	水草の被覆 率 (%)	実験開始時 の気温()	実験開始時 の水温()	測定間隔 時間 (秒)	実験時間 (分)
1	2002.2.6	0	12.0	21.5	2	20
2	2002.2.6	10	12.4	23.0	2	20
3	2002.2.6	20	12.5	23.0	2	20
4	2002.2.6	40	12.4	23.0	2	20

Table.4-1 実験条件



Fig4-2 実験装置

4・4 実験結果と考察

4・4・1 水面付近においての水温時間変化

Fig4-3 で水面付近での水温変化をグラフにして表した。ここでの振幅は微少ながら水温 の変化が起こっている。つまり、冷水塊が沈降しているということがいえる。このグラフ より水草の占有率が大きいほど、冷水塊が沈降する周期が短く頻繁に起こっているといえ る。また Table4-3 に 17 点全てでの沈降数を定量的に表した。ここでは 20%の時が最大と なるが、水草の占有率 40%の時は 5 点が水草で覆われて、そこではほとんど冷水塊の沈降 が起こっていない。つまり、閉鎖水域において水草の占有率が大きくなるほど頻繁に冷水 塊が沈降する。



Fig4-3 水面付近の水温変化 (順に0%、10%、20%、40%)

	水草0%	水草10%	水草20%	<u>水草40%</u>
Point17	34	18	45	45
Point16	33	16	36	46
Point15	14	25	43	36
Point14	22	29	44	28
Point13	23	27	46	25
Point12	13	21	41	20
Point11	13	25	34	22
Point10	13	31	42	25
Point9	9	17	23	22
Point8	11	15	22	18
Point7	13	17	29	13
Point6	16	20	25	10
Point5	16	27	26	11
Point4	19	20	26	10
Point3	17	18	25	9
Point2	22	18	12	3
Point1	17	18	9	1

Table4-3 各ポイントでの冷水塊の沈降数

この結果より水面を覆う水草の占有率が大きくなるほど、冷水塊が沈降する数が多くなる。また、冷水塊が発生する周期も短い。

4・4・2 2 点間の相互相関関数

二つの不規則変動、 $x(t) \ge y(t)$ との間の相関性を調べるために、相互相関関数 $C_{xy}(t)$ および相互相関係数 $R_{xy}(t)$ を定義する

$$C_{xy}(\mathbf{t}) = \overline{x(t)y(t+\mathbf{t})}$$
$$R_{xy}(\mathbf{t}) = \overline{x(t)y(t+\mathbf{t})} / \sqrt{x^2} \sqrt{y^2}$$
$$= C_{xy}(\mathbf{t}) / \sqrt{C_x(0)C_y(0)}$$

 $x \ge y$ の相互相関 C_{xy} および $y \ge x$ の相互相関 C_{yx} は

$$C_{xy}(\boldsymbol{t}) = C_{xy}(-\boldsymbol{t})$$

の関係にある。なぜならば

$$C_{xy}\left(-\boldsymbol{t}\right) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) y(t-\boldsymbol{t}) dt$$

において、変数変換r = t - tを行えば

$$C_{xy}(-t) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2-t}^{T/2-t} y(\mathbf{r}) x(\mathbf{r}+t) d\mathbf{r}$$

変動の定常性から(-T/2-t,T/2-t)の間の積分は(-T/2,T/2)の間の積分と等しいから

$$C_{xy}(-t) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(\mathbf{r}) x(\mathbf{r}+t) d\mathbf{r} = C_{yx}(t)$$



Fig4-3 相互相関関数

また相互相関関数 $C_{xy}(t)$ は一般にt = 0に関しての対称性はなく、t = 0で最大になると は限らない。このことは x がある線形系への入力であり、 y がそれに対応する出力である 場合、入力に対する出力最大時までの遅れがあることを考えれば、必然である。しかし、 $t = \pm \infty$ では

$$C_{xy}(\pm\infty)=0$$

である。

4・4・3 自己相関関数

(1) 自己総関数の定義と意味

一般的に x と y との相互の関連の度合いを定量的に調べるには、x-y面上に多くのサン プルから得られる (x,y)で定まる点を打てばよい。x と y が時間の関数ならば x-y面上の 連続した曲線となる。もし、x と y とに関連があれば、一つの直線ないしは(曲線)のま わりに点は分布するし、逆に関連がなければ原点のまわりに一様に分布するであろう。

二つの変量の相関度は

$$r_{x} = E\left[\frac{y}{x}\right] = \frac{E[xy]}{E[x^{2}]}; r_{y} = E\left[\frac{x}{y}\right] = \frac{E[xy]}{E[y^{2}]}$$

*x*と*y*とを同じように扱うためには

$$r = \frac{E[xy]}{\sqrt{E[x^2]E[y^2]}}$$

あるいは

$$C = E[xy]$$

を測ればよい。ここに、Eはアンサンブル平均(母集団平均)を意味する。もし、 $x \ge y$ が 無相関ならば

$$r = 0$$

であり、 $x \ge y \ge x a$ 倍の違いで完全に一致($x \equiv ay$) すれば明らかに

$$r = 1$$
 ($\pm t = 1, a < 0$)

となる。

一方、*x*(*t*)が周期*T*の周期変動であるとすれば、

$$x(t) = x(t \pm nT)$$
 (*n* = 0,1,2,···)

つまり、周期の整数倍だけ時間をずらすと元の波形と重なってしまう。不規則変動x(t)が 周期性の強いものならば、周期の整数倍だけ時間軸をずらすと元の波形とかなり似ている。 したがって、ある時間tだけずらした波形が元の波形とどれだけ似ているかを調べ変動中の 周期成分を判別するには、上の場合と同じくx = x(t)とy = x(t+t)の相関を求めればよい。

時間に関する不規則変量をx(t)とするとき、t時間隔たった二つの、変動の積の平均値

$$C(t, \mathbf{t}) = E[x(t)x(t + \mathbf{t})]$$

で定義される統計的関数を自己相関関数と呼ぶ。

また、C(t)をt=0の値C(0)で割って正規化したものを、自己相関係数と呼ぶ。

$$R(\mathbf{t}) = C(\mathbf{t})/C(0) = \overline{x(t)x(t+\mathbf{t})}/\overline{x^2(t)}$$

R(0) = 1

この自己相関係数により対流セルの寿命を求めた。



これを自己相関係数C(t,t)に直し、それとx=0, y=0で囲まれる面積が対流セルの寿命で ある。ここで真ん中の2点をとって、それを定量的に表すと以下の表の様になった。

Table.4-4

	水草0%	水草10%	水草20%	水草40%
Point 17	72.8	67.8	14.4	16.8
Point 16	66.2	23.8	10.1	48.8

これより水草の被覆率が大きくなるほど、対流セルの寿命が短くなるということがいえ る。また、4・4・1、4・4・2をふまえた上では水面を覆う水草の占有率が大きくな るほど、対流セルは小さいまま沈降していく。つまり対流セルの寿命も短い。それに対し て、水草の被覆率が小さいほど、小さな対流セルが集まり大きな対流セルに発達する。そ して、長い寿命を持つということがいえる。

第5章 結論

本研究では閉鎖水域において、水草が熱対流に与える影響を定量的に求めることを目的とした。

本研究において、得られた結果を以下に述べる。

まず水草がある閉鎖水域では鉛直方向の温度分布が一様化されるのに、水草がない場合 に比べてより長い時間を必要とすることがわかった。これは水草の水面被覆率が大きくな るにつれて、混合層発達速度の低下として現れる。

つぎに水面を覆う水草の被覆率が小さいほど、より発達した冷水塊が発生することがい える。この冷水塊の沈降は水面付近の酸素や栄養分を閉鎖性水域の底層に輸送するのに重 要な役割を果たすが、水草の被覆率が大きくなるとその輸送能力が低下し、底層が貧酸素 化となり、水環境問題に大きく影響することがわかった。

最後に、水草の被覆率が大きくなると、スケールの小さく冷水塊が頻繁に沈降する。また、対流セルの発達が遅い。それに対して、被覆率が小さいと、スケールのおおきな冷水 塊が形成され沈降する。これにともない対流セルの規模も大きく、対流セルの寿命も長い。

以上のことから、停滞性の強い水域では、水草の存在がその水域での水の循環におおい に影響を与える。このことは、今後水環境の保全ならびに改善において、考慮されねばな らない1つであるという事がいえる。

参考文献

- 1) 永石 利文:段落ちのある閉鎖性水域の水面冷却による密度流(1996)
- 2) 武津 勝規:水面冷却による深・浅水域間の密度流
- 3) 日野 幹雄:スペクトル解析(朝倉書店)
- 4) 椿 東一郎 荒木 正夫:水理学演習(森北出版株式会社)

謝辞

本卒論分を作成するにあたり、直接御指導、御協力を賜りました生産環境情報講座の森 健教授をはじめ、井上 英二助教授、原口 智和助手の先生方、同研究室の皆様に多大な る御迷惑をおかけしたことを御詫びするとともに、御指導、御協力に深く感謝し、厚く御 礼申し上げます。