アユの成長に及ぼす溶存酸素の影響について

千葉 健 治

(1987 年 10 月 15 日受理)

The Effect of Dissolved Oxygen on the Growth of Young Ayu

Kenji Chiba*

Experiments were carried out to examine the effect of dissolved oxygen on the growth of young ayu (body weight 2.0-8.0 g).

Fish were reared for 8 days in 5 different tanks. Each of these tanks had a volume of 16 litres. These tanks were continuously supplied with freshwater having different dissolved oxygen concentrations. Reduced oxygen concentrations were maintained by bubbling nitrogen gas through the inflowing water. During the experiments water temperature ranged between 24 and 25°C. Fish were fed three times a day with commercially available, crumbled pellet for young ayu.

Fish showed almost even levels of growth rate and feed conversion efficiency in water of 45% or more in percent oxygen saturation, while below 45% these levels decreased with the reduction of oxygen concentration. Growth rates and feed conversion efficiencies at the oxygen concentrations of 27 and 35% in percent oxygen saturation were about 1/2 and 1/2-2/3 of those at the concentration of over 45%, respectively. However, the feeding rate reduced with the decrease in dissolved oxygen within the whole range of oxygen examined.

アユ *Plecoglossus altivelis* は淡水魚のうちでも重要な養殖対象魚であり、通常流水池で飼育される。流水式養殖の場合、養魚池への注水量が飼育可能量や養魚成績などを大きく左右する。流水池中の溶存酸素量は注水の溶存酸素量と流量すなわち酸素の供給量と、飼育されている魚によるその消費量によって大きく影響され様々な値を示す。これが飼育環境要因として重要な役割を果たし養魚成績にかかわるものと考えられる。そこで本研究においては、環境水の溶存酸素がアユの摂餌・成長にどのような影響を与え、更には養魚成績にどのように関連するかを明らかにすることを目的として実験を行った。

実験方法

昭和 49 年 3 月静岡県浜名湖で採捕後、引き続き浜名湖畔にある東京大学水産実験所の水槽で飼育したアユ稚魚 (体重 2.0~8.0 g) を実験に供した。

飼育装置は前報¹⁾のヘダイの飼育に用いたものと同様である。すなわち、エアストーンを入れ十分に通気を行っている貯水槽 (36×52×28 cm) から水を直径 6 cm 高さ 120 cm の塩化ビニール製のパイプに導き、底から窒素ガスを通気する。このパイプに流入する水量と窒素ガ

スの通気量を調節することにより、パイプの底から流出する水の溶存酸素量を種々の濃度に設定することが可能となる。この溶存酸素量の調節された水を密閉された飼育水槽に導き、この中でアユを飼育する。この水槽は塩化ビニール製で、供試魚の行動を観察し易いように上面および 1 側面が透明にしてある。大きさは 20×20×40 cm で蓋と水槽本体との間に 2 mm 厚のゴム板を挟み、ボルト及びナットで締め水密となるようにした。蓋には直径 3 cm の孔を開けてあり、常時はゴム栓をしておき、給餌時にはゴム栓を除いて餌を与えた。同様の装置を 5 組用意し、種々の溶存酸素量の下でアユの飼育を行った。

1 回の実験の飼育期間は 8 日とし、それぞれの水槽に 20 尾の供試魚を収容した。供試魚の全長・体重を測定の後各飼育水槽に収容し、1 日無給餌で所定の溶存酸素量のもとにおき、翌日より 6 日間給餌を行い、更に 1 日絶食させた後取り揚げ全長・体重を測定した。餌はオリエンタル酵母会社製のアユ用クランブル 2 号を用い、1 日 3 回、それぞれ 9 時、13 時及び 17 時に給餌を行った。供試魚が積極的な摂餌行動を示している間のみ餌を与え、摂餌が不活発になった時に給餌を終了した。クラ

* 東京大学農学部附属水産実験所 (Fisheries Laboratory, The University of Tokyo, Maisaka, Shizuoka, 34-102, Japan).

ンブルは一定量を容器に置いておき、1日3回の給餌を終えた後再度これを秤量して給餌量を算出した。アユはこのような小型の密閉水槽中でも比較的活発に摂餌する。水槽の底に落ちた餌も多少は摂るが、すべてを摂り尽すことはなく毎回多少の残餌の出るのを避けることは出来なかった。したがって、給餌量は摂餌量と等しくはない。しかし、摂餌率の算出にあたっては給餌量を摂餌量と見なした。注水量は水槽ごとに多少の差はあるがいずれも毎分2.0~2.5lの範囲内にあった。溶存酸素量については、各水槽の注水部、排水部及び水槽中央で測定したところ、いずれの水槽でも排水部及び中央部の溶存酸素量には殆ど差がなく、注水部では飽和度で2%程度高い値を示した。そこで排水部の酸素量をその水槽の溶存酸素量とすることとした。溶存酸素量は毎日午前9時給餌直前に各水槽の排水部で測定し、飼育期間中の平均値をもってその水槽の溶存酸素量とした。

同様の実験を11回繰り返した。

結 果

実験実施時期、実験期間中の水温変動範囲及び平均値をTable 1に示した。使用した淡水は東京大学水産実験所構内の深さ300mの井戸から揚水されたもので、この井水は周年24.8°C程度のほぼ一定の水温を示す。このため実験中の各水槽の水温は実験実施時期にかかわらず24.0~25.0°Cの範囲内にあった。

11回繰り返された実験の結果についてはTable 2に示した。各水槽への供試魚の収容は20尾を原則としたが、実験によっては途中死亡魚のでる場合があった。この際には飼育期間中供試魚の体重順位は変わらないものと仮定し、実験開始時、終了時および死亡魚の体重から死亡魚に相当する個体を開始時の供試魚から除いて平均体重等の計算をおこなった。また、日間摂餌率及び餌料

効率の算出にあたっては全給餌量を給餌日数及び開始時と終了時の総魚体重の平均値で除し、これに100を乗じて求めた。また、日々各供試魚は均等に摂餌したものと死亡魚による摂餌量を補正した。

溶存酸素と増重率、給餌率及び餌料効率との関係を見ると、実験毎ではおおそ溶存酸素量の増加と共に増重率、摂餌率及び餌料効率がそれぞれ増大する傾向を認めることができる。しかしながら、それぞれの値は同様の酸素量にもかかわらず大きく変動する。このような変動は初期体重や実験実施時期の違いなどにもよるものと思われる。そこで増重率、給餌率及び餌料効率と溶存酸素量との関係をより明らかにするため、各実験毎に溶存酸素量が飽和度65%以上の水槽の増重率、給餌率及び餌料効率のそれぞれを相対値100として、他の水槽での増重率、給餌率及び餌料効率を相対値として表した。この際、飽和度65%以上の水槽が複数の場合にはその平均値を相対値100とした。それらの相対値と酸素飽和度との関係をFig. 1~3に示した。更に各実験を平均溶存酸素量によって20%以上30%未満、30%以上40%未満、……のように10%毎に区分し、それぞれの区分内の各相対値の平均値並びにその95%信頼限界を算出し、これをそれぞれの区分内の各実験の平均溶存酸素量の平均値に対してプロットしてFig. 1~3に併せて示した。このような相対値で示してもなお同様の酸素飽和度に対しそれぞれの相対値は比較的大きな変動を示す。しかしながら、いずれの項目でも、酸素量の増大と共に低酸素域では急激に増加、中程度以上の酸素域ではほぼ一様の値を示すか、もしくは緩やかに増加する傾向を認めることができる。なお一層この傾向を明確に把握するために、各10%酸素飽和度区分の相対値の平均値について、それぞれ隣合う3平均値の移動平均を求め、これらを通る滑らかな曲線を描きそれぞれの図中に示した。

この曲線を考慮すれば、Fig. 1及び3に示した増重率並びに餌料効率は、飽和度45%以下では酸素量の低下と共にそれぞれ急激な低下を示し、45%以上ではいずれも55%に最高値がありそれ以上ではやや低下する傾向が認められる。それぞれの平均値の信頼限界をあわせて考慮すれば、酸素飽和度27%及び35%では増重率、餌料効率共に有意な低下を示したと考えることができるが、45%以上ではそれぞれの平均値の差は有意であるとは考えられず、むしろ酸素量の増減とは関わりなくほぼ一様な値を示すと考えるのが妥当であろう。すなわち、増重率では酸素飽和度45%以上では酸素量とは無関係にほぼ一様の値を示すが、飽和度27%及び35%では相対値はそれぞれ40、55を示し、酸素飽和度45%以上の場合の1/2程度の増重しか示さなかったことになる。また、餌料効率については酸素飽和度45%以上で

Table 1. Period of the experiments and water temperature

Test No.	Test period	Water temperature (°C)	
		Mean	Range
1	'74 May 13-20	24.32	24.5-24.2
2	'74 May 21-28	24.43	24.5-24.4
3	'74 May 29-Jun. 5	24.43	24.5-24.4
4	'74 Jun. 6-13	24.48	24.7-24.2
5	'74 Jun. 14-21	24.57	24.8-24.4
6	'74 Jun. 21-28	24.66	24.7-24.6
7	'74 Jun. 29-Jul 6	24.72	24.9-24.6
8	'74 Jul. 7-14	24.72	25.0-24.5
9	'74 Jul. 15-22	24.88	25.0-24.6
10	'74 Jul. 23-30	24.85	25.0-24.7
11	'74 Jul. 31-7	24.25	24.8-24.0

Table 2. Result of experiment

Test No.	Tank No.	DO (%) Mean	DO (%) Range	No. of Fish	Start	Body Weight (g) SD	End	SD	Growth Rate (%)	Feeding Rate (%)	Feed Con. Efficiency (%)
1	1	37.4	43.7-31.2	20	2.28	0.52	2.42	0.58	6.14	4.04	30.43
	2	38.7	46.5-34.9	20	2.34	0.71	2.46	0.73	5.13	3.98	25.81
	3	55.3	63.9-50.2	20	2.18	0.57	2.38	0.53	9.17	4.64	39.68
	4	65.5	65.6-70.1	20	2.26	0.57	2.48	0.64	9.73	4.43	44.00
	5	73.9	85.2-67.2	20	2.27	0.53	2.42	0.60	6.61	4.20	33.70
2	1	32.3	34.9-29.5	20	2.42	0.58	2.52	0.56	4.13	4.13	16.66
	2	34.4	36.6-32.4	20	2.46	0.73	2.59	0.82	5.28	3.77	23.42
	3	45.0	46.6-41.2	20	2.38	0.53	2.54	0.60	6.72	4.74	26.44
	4	65.1	72.4-57.7	20	2.48	0.64	2.60	0.66	4.84	4.34	19.38
	5	74.1	81.6-62.2	20	2.42	0.60	2.59	0.71	7.02	5.23	22.37
3	1	35.3	38.8-31.4	20	2.52	0.66	2.59	0.67	2.78	3.54	13.08
	2	43.8	68.8-31.2	20	2.57	0.58	2.72	0.66	5.84	3.85	25.27
	3	53.1	67.9-45.5	20	2.48	0.66	2.63	0.75	6.05	3.79	25.42
	4	73.2	77.9-69.6	20	2.67	0.85	2.83	0.98	5.99	4.53	22.07
	5	87.9	93.4-81.9	20	2.59	0.61	2.72	0.67	5.02	5.12	15.72
4	1	30.9	34.2-28.1	10	2.73	0.82	2.75	0.85	0.73	7.39	0.73
	2	33.4	43.0-21.9	18	2.83	0.06	2.93	0.65	3.53	5.60	11.11
	3	47.8	54.8-35.3	19	2.56	0.71	2.80	0.85	9.38	5.95	26.26
	4	63.4	69.9-51.9	19	2.72	0.89	2.91	1.02	6.99	6.29	17.95
	5	73.9	85.2-59.6	18	2.74	0.69	2.97	0.77	8.39	7.61	18.22
5	1	32.5	43.0-24.6	20	3.10	0.86	2.93	0.85	-5.48	2.55	-36.84
	2	35.9	41.4-24.6	20	2.77	0.65	2.89	0.76	4.33	3.59	20.17
	3	48.4	53.4-37.8	20	3.01	0.86	3.27	0.95	8.64	4.72	24.47
	4	73.7	82.4-68.1	20	3.36	0.92	3.69	1.14	9.82	5.63	29.07
	5	78.6	82.9-68.9	20	3.19	0.77	3.37	0.80	5.64	5.67	16.13
6	1	27.5	23.6-17.2	19	2.90	0.87	2.98	0.84	2.76	4.68	12.40
	2	27.0	29.6-24.8	20	2.89	0.76	2.95	0.79	2.08	4.92	9.15
	3	35.8	40.2-29.4	18	3.34	0.99	3.48	1.11	4.19	6.31	12.63
	4	54.0	56.3-50.1	20	3.69	1.14	3.90	1.32	5.69	6.45	17.65
	5	65.0	67.8-61.6	20	3.37	0.80	3.57	0.93	5.93	7.88	15.47
7	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	28.8	34.8-25.9	19	3.52	0.97	3.54	0.96	0.57	3.99	1.88
	3	39.4	54.1-43.4	16	3.48	1.13	3.72	1.21	6.90	5.34	21.91
	4	65.9	69.8-63.9	16	3.43	1.07	3.71	1.74	8.16	5.23	26.74
	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	1	25.9	28.8-22.5	18	3.59	0.53	3.96	0.65	10.31	5.85	28.63
	2	31.7	55.8-25.3	20	3.85	0.68	4.23	0.76	9.87	5.31	31.43
	3	31.9	36.7-28.4	20	3.76	0.68	4.26	0.83	13.30	6.18	35.84
	4	58.3	62.3-54.8	19	3.81	0.79	4.54	1.02	19.16	6.85	46.80
	5	65.0	67.4-59.4	20	3.91	0.75	4.54	1.04	16.11	8.72	30.81
9	1	26.6	29.2-23.9	18	4.19	0.74	4.29	0.77	2.39	6.63	9.60
	2	35.0	43.0-29.2	20	4.23	0.76	4.61	0.89	8.98	7.02	25.59
	3	37.3	41.5-29.2	20	4.49	0.89	5.01	1.08	11.58	7.54	31.07
	4	70.9	76.5-58.2	20	4.80	1.03	5.43	1.28	13.13	7.92	33.68
	5	66.7	70.3-64.8	13	4.60	1.03	5.64	0.93	22.61	7.74	35.25
10	1	27.3	29.3-24.9	15	4.57	1.02	4.84	1.11	5.91	7.31	13.29
	2	31.7	38.6-29.2	16	4.89	0.62	5.11	0.84	4.50	7.29	10.53
	3	36.8	43.3-33.1	12	5.41	0.91	5.66	1.11	4.62	10.09	8.89
	4	74.0	79.2-69.8	16	5.28	1.15	5.69	1.19	7.77	8.69	15.23
	5	65.0	67.2-58.0	15	5.36	1.39	5.94	1.68	11.91	10.74	16.80
11	1	27.1	31.7-24.8	11	5.30	0.90	5.61	1.10	5.85	7.15	13.60
	2	30.9	33.2-29.5	13	5.32	0.79	5.73	0.80	7.71	6.20	21.01
	3	38.9	41.2-34.8	10	6.07	1.19	6.60	1.29	8.73	7.50	19.41
	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	72.7	77.3-67.8	11	6.75	1.12	7.46	1.49	10.52	8.76	20.26

Growth rate was calculated from the initial and final mean body weight. Feeding rate was calculated as follows: Average amount of feed consumed for one day was divided by average value of initial and final total body weight and multiplied by 100. Feed conversion efficiency calculated as the percentage of total weight gain to amount of given feed.

Fig. 1. Relationship between the relative rate of growth and the level of dissolved oxygen in percent saturation.

An open circle with vertical lines shows an average value and its 95% confidence intervals. The curve was obtained by the moving average method running three average values in turn.

Fig. 2. Relationship between the relative rate of feeding and the level of dissolved oxygen in percent saturation.

An open circle with vertical lines shows an average value and its 95% confidence intervals. The curve was obtained by the moving average method running three average values in turn.

Fig. 3. Relationship between the relative efficiency of feed conversion and the level of dissolved oxygen in percent saturation.

An open circle with vertical lines shows an average value and its 95% confidence intervals. The curve was obtained by the moving average method running three average values in turn.

Fig. 4. Relationship between the respiratory rate and the level of dissolved oxygen in percent saturation.

An open circle with vertical lines shows an average value and its 95% confidence intervals. The curve was obtained by the moving average method running three average values in turn.

は相対値は 100~130 の範囲にあるが飽和度 27% 及び 35% では相対値はそれぞれ 55 及び 75 を示し、飽和度 45% 以上の場合に比べ 1/2~2/3 程度の効率であった。

一方、Fig. 2 の摂餌率についてみると、溶存酸素の低下と共に相対摂餌率は緩やかに低下し、増重率、餌料効率のように中程度の酸素量で最高値を示すことはなかった。給餌時の観察でも酸素飽和度 23.2~23.5% では殆ど摂餌行動を示さず、25~30% ではやや不活発な摂餌行動が認められ、40% 以上では積極的な摂餌活動が観察された。他の項目で低い値を示した酸素飽和度 27% 及び 35% ではそれぞれ相対値 72, 80 を示し、その低下は他の項目程著しくはなかった。このように Fig. 2 に示した相対摂餌率と酸素飽和度の関係は必ずしも低酸素飽和度で著しく低い相対摂餌率とはなっていない。これは、摂餌行動が認められなくとも或る程度の給餌をするため、摂餌率は実際にはもっと低く、ここではやや過大に見ているものと考えてよからう。

更に、餌料効率の場合、その変動は他の項目に比べて大きい。これは主として給餌量と摂餌量とが一致せず残餌を生じ、しかもこの残餌量が各水槽で様でなく、この給餌量を基に餌料効率を算出したためと考えられる。また他の項目と異なり低酸素域のみならず高酸素域でも効率の低下が認められる。低酸素域での低い餌料効率は摂餌率の場合と同様の理由によると考えられ、また高酸素域では摂餌行動が活発であるため、過度に給餌をしてしまう傾向があり、これにより他水槽より残餌量が多くなったことも理由の一つとして考えられる。従って、低酸素域及び高酸素域のいずれも餌料効率を過度に低く見積もっている可能性がある。

また、飼育実験とは別に、本飼育装置に同様のサイズの魚を収容し、種々の酸素飽和度の下でその呼吸頻度の観察を行った。呼吸頻度の測定には同一の個体について 10 回の呼吸運動に要する時間を 8~10 回測定し、この平均値より 1 分間あたりの呼吸頻度を算出し、酸素飽和度との関係を Fig. 4 に示した。またこの結果についても酸素飽和度 10% 毎に区分し、区分毎の平均値及び 95% 信頼限界を示した。また相対増重率と同様に隣合う 3 平均値の移動平均を求め、これらを通る曲線を描き、併せて Fig. 4 に示した。

この図に見られるように、呼吸頻度には大きな変動はあるものの、全体的には酸素飽和度の低下と共に呼吸頻度の増加が認められ、特に酸素飽和度 60~50% 程度からはその急激な増加が認められる。

考 察

基本的には同様の装置及び方法を用いて飼育を行ったコイ、²⁾ largemouth blackbass、³⁾ ギンザケ、⁴⁾ northern

pike⁶⁾ 及びウナギ、^{8,7)} また海産魚ではヘダイ¹⁾ について、その摂餌および成長等に及ぼす溶存酸素の影響についての報告がある。やや低い値を示した northern pike の例を除けばいずれの魚種でも酸素量大略 4~5 ppm、または 40~55% 以下で急激な摂餌率と成長率の低下がおきると報告されている。

本研究のアユの場合も上記の魚種とほぼ同様の結果が得られた。すなわち、酸素飽和度 45% 程度を限度として、これ以上では増重率はほぼ一様であるが、これ以下では酸素量の低下と共に増重率の急激な低下および摂餌率の低下が認められた。Doudoroff¹⁰⁾ and Shumway、⁸⁾ Davis、⁹⁾ EIFAC¹⁰⁾ 等により溶存酸素の魚類に及ぼす生理学的、生化学的、また行動に対する影響についての広範な総述がなされている。しかし低酸素がどのような作用機序で魚類の食欲、成長等の低下を惹き起こすのかについての解明を試みた報告に乏しい。Swift¹¹⁾ は brown trout について呼吸系による環境水よりの酸素の取り込みの能力が増重率を制約するのであると述べている。

Itazawa¹²⁾ はニジマス、コイおよびウナギについて、魚類が動脈血中の正常な酸素量を保持することができなくなる環境水の溶存酸素量と増重率の低下をおこす溶存酸素量とはおおむね一致することから、動脈血中の酸素含量の低下が組織に供給される酸素量の不足を招来するのであるとした。Nakanishi and Itazawa¹³⁾ はコイについて、溶存酸素の低下は呼吸頻度の増加と心拍数の低下を伴うことをみており、これは動脈血中の酸素量を正常に保つための生理的反応であるとしている。また、Itazawa and Nakanishi¹⁴⁾ は同様にコイについて、環境水の溶存酸素量の低下に伴い呼吸頻度の増大が観察され、この呼吸頻度の増大をおこす環境水の溶存酸素量は健全な成育が可能な溶存酸素量よりやや高いことを認めている。本研究のアユの場合も増重率の低下の起こる 45% 程度よりやや高い 60% 程度で呼吸頻度の増加が起きている。従ってアユでも同様の生理的反応が起きていたものと想像される。

また、Itazawa and Takeda、¹⁴⁾ Takeda and Itazawa¹⁵⁾ はコイについて窒素ガスの通気により溶存酸素を低下させた場合と魚の呼吸により溶存酸素を低下させた場合では、動脈血中の酸素量を正常に保てなくなる環境水中の溶存酸素限界値には大きな差異があったことを報告しており、二酸化炭素の影響の大きいことを指摘している。本研究の場合も窒素ガスを用いて溶存酸素の低下をはかったが、各水槽の排水部に於ける pH 値はその酸素量によらず殆ど差異がなく、従って水槽間に二酸化炭素の濃度に特別な差はなく、またその濃度も高くはなかったと考えられる。養魚池中でおきる溶存酸素の低下は主として呼吸によるものであるから、同時に二酸化炭

素濃度の増大が認められる筈である。しかしながら、本研究で得た増重率の低下が起きる溶存酸素量 45% は、一例ではあるが千葉ら¹⁰⁾によりアユ養魚池で給餌に伴い酸素の低下がおき摂餌不良が観察された際の酸素量とほぼ一致する。養魚上重要と考えられる二酸化炭素の影響については今後更に検討する必要がある。

以上の結果から、アユ養殖に際してその正常な摂餌・成長を期待するためには、飼育水の溶存酸素量は飽和度 45% 以上に保たれるべきであると考えられる。

文 献

- 1) K. Chiba: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **49**, 601-610 (1983).
- 2) 千葉健治: 淡水研報, **15**, 35-47 (1970).
- 3) N. E. Stewart, D. L. Shumway, and P. Doudoroff: *J. Fish. Bd. Canada*, **24**, 475-494 (1967).
- 4) R. B. Herrman, C. H. Warren, and P. Doudoroff: *Trans. Am. Fish. Soc.*, **91**, 155-167 (1964).
- 5) I. R. Adelman and L. L. Smith: *P. F. C.* **32**, 93-96 (1970).
- 6) 山形陽一, 大中澄美子, 原田増造, 丹羽 誠: 日本誌, **49**, 1335-1339 (1983).
- 7) S. Rowchai, K. Chiba, and R. Hirano: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **52**, 597-607 (1986).
- 8) P. Doudoroff and D. L. Shumway: *FAO Fish. Tech. Paper No. 86*, pp. 275.
- 9) J. C. Davis: *J. Fish. Bd. Canada*, **32**, 2295-2332 (1975).
- 10) EIFAC: *EIFAC Tech. Paper No. 19*, pp. 8 (1973).
- 11) D. R. Swift: *J. Exp. Biol.*, **38**, 596-604 (1961).
- 12) Y. Itazawa: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **37**, 273-276 (1971).
- 13) T. Nakanishi and Y. Itazawa: *Report Fish. Res. Lab., Kyushu Univ.*, **2**, 41-52 (1974).
- 14) Y. Itazawa and T. Takeda: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **45**, 323-327 (1979).
- 15) T. Takeda and Y. Itazawa: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **45**, 329-333 (1979).
- 16) 千葉健治, 反町 稔, 若林久嗣, 江草周三: 養魚用水利用合理化に関する研究, 1975, pp. 29-35.