筑波大学附属駒場中・高等学校研究報告　第20集　1981年３月

池の生産力測定（第２報）

――エネルギー固定率を測定する試み――

筑波大学附属駒場高等学校

貝沼喜兵、石川秀樹

池の生産力測定（第2報）

——エネルギー固定率を測定する試み——

貝沼　喜兵、石川　秀樹

1. はじめに

生態系の学習では，エネルギーの流れと物質の循環を指導することは極めて重要である。しかしこの単元の指導はややもすると教科書などの資料の説明だけにとどまり，野外に出て，調査実験を主体に指導する試みは一般に少ないようである。

生態系の生産者による太陽放射エネルギー（以下単に太陽エネルギーと略記する）の総生産量（Pn と略記す）の転換効率は，E. P. オダム氏によると，温帯草原では，0.5% としている。日本の中部地方の水田の，白米に転換する効率は，吉良竜夫氏では0.2% であるとしている。生態系の生物群集の現存量の多少を規制しているのは，生産者の太陽エネルギーの転換効率であるから，この数値は，大変重要な意味がある。しかし，生物Ⅱを選択している生徒に，この0.2～0.5%の数値は，重要なことはわかったとしても，高いのか，低いのか判断できないのである。筆者らは測定するための，原理・方法を学び，調査・実験を通してはじめて実感として摑み理解し判断できるようになると考えている。

しかし，太陽エネルギー固定率測定の実験は複雑で，設備や器具も必要であり，何よりもかなり時間がかかり授業に導入するには，いろいろ障害が多いためか，実践の試みは少ないようである。

筆者らは，49年度からウィンクラー法（以下 Win 法と略記す）と，クロロフィル現存量（Chl 法と略記す）を併用しながら定量実験の試みをはじめ，少しずつ改良を重ねながら現在にいたっている。

太陽エネルギーの転換効率の測定実験では，厳密な定量実験よりもむしろ，系を極めて単純化し，実験で得られた測定値をもとに大胆な推計をするという方法でもよいではないか。生徒には実験の原理と方法を理解させ測定させる。測定実験をすすめる上で，どうすれば定量性を高めることができるか。を考えさせる指導をする。どうすれば，より正しい生産量を測定できるかの見通しをもたせ，太陽エネルギー転換効率の数値を正しく評価できる判断力をもてるように指導できると考えている。

49年以来継続してきた指導について55年度の実践例を中心に指導の実態と成果と問題点について発表したい。

2. 生物Ⅱの年間指導計画

次の表1のカリキュラムで指導をすすめている。

表1 生物Ⅱのカリキュラム

学期	単元	項目	内容および実験の演習
1学期	生態系	1. 生物の階層性 2. 生態系の構造 3. 優占種・付随種	(1) 野外調査，枠法で被度と高さを調べ優占種を決定する
		4. 生態系の構造 (1) 池の生産量測定	(2) ウィンクラー法とクロロフィル現存量による太陽エネルギー固定率を調べる野外実験
		(2) 草地の生産力測定	(3) 層別刈取り法による生産構造図の作成と葉半法によるエネルギー固定率の推計
2学期	生命現象と分子	1. 遺伝学の歴史 2. 微生物の遺伝形質 3. 形質転換	○ メンデルの法則から染色体地図まで (1) 枯草菌の遺伝形質（栄養要求性突然変異）の観察 (2) 細菌細胞からＤＮＡの抽出実験 (3) 形質転換の実験 (4) ＤＮＡのペーパークロマトによる塩基分析
3学期		3. バクテリオファージの遺伝 (1) 遺伝的特徴 (2) ファージのライフサイクル (3) 突然変異 (4) シストロン (5) 遺伝子地図の作成	(1) プラークの観察と突然変異 (2) 一段増殖の実験 (3) ファージによる突然変異の誘起実験 (3) シストランス相補性テスト (5) ファージの組みかえ実験による遺伝子地図の作成
		4. 遺伝暗号	

3. 班の構成と実験に対する取り組み

筆者らの学校では，生物Ⅱは高校2年で選択させている。化学Ⅱ，選択せずとの関係は次のようになっている。

生物Ⅱ	37名
化学Ⅱ	114
選択せず	9
計	160名

生物Ⅱ選択者37名を6ヶ班にわけ，班長1名を選出させ，班単位に実験をすすめている。

授業で筆者らが実験のねらい・原理・方法を指導した後一通りの実験を経験したあとは，班長がリーダーシップを発揮し，班員の都合を調整し，昼休みか放課後，あるいは必要に応じて始業前に実験をすすめるように指導した。1週間単位に実験をすすめ，Win法か，Chl 法について，班で3回実験をこなすように求めた。そのため筆者らは放課後は，試薬の準備，実験に関する指導および相談などにあたった。

1，3，5班……Win法について3回実験する

2，4，6班……Chl法について3回実験する

1週間後交代し，2週間で各班が，Win 法と Chl 法それぞれについて3回ずつ実験をするようにした。なおデータが不十分な場合は班によっては2～3回実験のやりなおしをさせた。なお筆者らの担当する生物Ⅱは，木曜の5～6時限，金の3時限の週に3時間である。

4. 指導経過

1) 導入

① 生態系の現存量の多少を決めているのは生産者の Pn である。

② 太陽エネルギー転換効率は，オダム氏0.5%（温帯草原）吉良生0.2%（日本中部地方水田で白米への転換効率）とにている。これは転換効率が高いのか，低いのか，実際に校内の池を対象に測定してみようではないか。

③ 池の生産力測定の実験には次のねらいがある。

イ）測定の原理，方法を知り，自ら池の生産力が測定できるようになること。

ロ）複雑な系を単純化して測定し，より正確な測定をするにはどうすればよいか考察すること。

ハ）太陽エネルギー転換効率0.2～0.5%の数値を科学的に検討できる判断力をつけること。

ニ）実験データを求める苦労を理解できること。

図1.

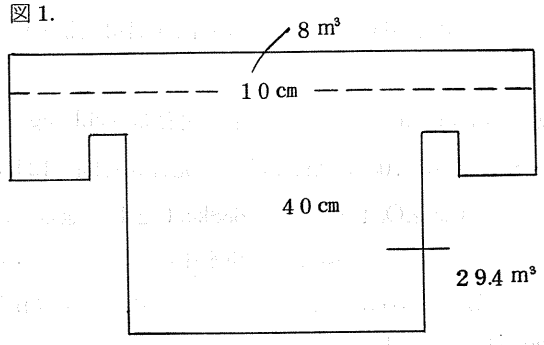
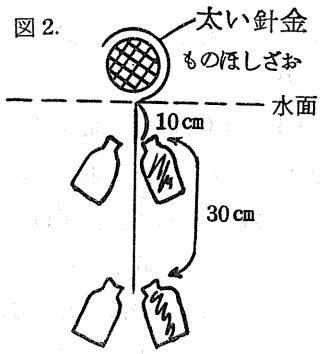


図2.



2) 実験原理と方法

② Win法の原理・方法をプリント（引用文献参照）し，これをテキストにして指導した。

図1に測定対象池の概要を示した。

これに図2のように2セットの酸素ビンを吊り下げる（10cmと40cm）1～2時間後引きあげ固定後，一定時間放置し，0.01 N の $Na_2S_2O_3$ 溶液でヨーソ滴定をする。

滴定値を計数処理し O_2g（Pn）/l/h これを図1のように，10cmは 8 m³，40cmは 29.4m³ であるので，それぞれ8倍と29.4倍し，1日の光合成時間を12時間とし，池全体の $O_2g/m^3/day$ を求める。次のように計数

$$6\,O_2 \rightarrow 6\,CO_2 \rightarrow C_6H_{12}O_6 \rightarrow 688\ kcal$$
$$6\times(32g)\quad 6\times(44g)\quad (180g)$$

処理し，池全体の太陽エネルギー固定量〔kcal/day〕を求める。

なお東京地方の太陽放射エネルギー（中央気象台調べ）は，次の通りである。

晴天　3200kcal/m²/day

曇天　1200　〃

雨天　360　〃

$$\text{太陽エネルギー固定量}=\frac{\text{池全体のエネルギー固定量}}{3200\times 82(\text{m}^2)}\times 100\text{kcal/day}$$

原理・方法を指導した後は，班単位に分れて，採水，酸素ビンへの注入，吊り下げ，固定，滴定，計算などの一連の実習をやらせた。

② Chl 法

Chl 法の原理・方法をプリント（引用文献参照）し，これをテキストにして指導した。

図1の池の 10cm，40cmの2ケ所から採水し，1lをグラスファイバーのろ紙でろ過する。ろ紙を乳鉢で磨砕し，10ml 90% アセトン水で，クロロフィルを抽出する。このアセトン水を分光光度計で，特定の波長の吸光度を測定する。測定値を計数処理し，アセトン 10ml 中，すなわち池水中1lのクロロフィル $\mu g/l$（＝mg/m³）を求める。

このようにして求めたクロロフィル 1mg は，1時間当りに2mgの炭素を固定（2mg c/chl mg/h）するものとして池水の同化量を求めることができる。

また，1日に12時間光合成するものとし，10cmと 40cmは当然相対照度が減少するので，相対照度に応じて光合成速度は減少するものとした。相対照度は，ヨードカリ法（引用文献参照）を用いた*1。

池の Pn（CO_2mg）＝光合成速度（2mg c/chl mg/h）×クロロフィル現存量（chl mg）×*1 相対照度（%）$\times\frac{44}{12}$×水量（0～10cm－8 m³，10～70cm－29.4m³）×光合成時間（12 h）

このようにして得られた CO_2〔mg/day〕は，$C_6H_{12}O_6$ 1モル当り 688kcal として池水で，1日の太陽エネルギー固定量として求めることができる。この場合は，池水中のクロロフィルの現存量なので，光合成の潜在的能力を測定しているのだから，天候によってクロロフィル現存量は変化しないとして，1日の太陽放射量は 3200 kcal/m²/day と固定した。

このあと，班単位で，Chl 法の実験を一通り経験させた。

1ケ班6人を3人ずつの2グループに分け，Win 法と Chl 法をそれぞれ分担して実習させた。

*1　表2　ヨードカリ法の結果　（単位：ml）

	0 cm	10 cm	40 cm
明ビン	6.7	4.3	2.2
暗ビン	0.1	0.1	0.1
明－暗	6.6	4.2	2.1
相対照度%	100	63.6	31.8

*1 注）ヨードカリ法で，筆者らが得たデータを用いさせた。

(3) 生徒の活動

6月5日（木）5～6時から放課後にかけて

(1) Win 法と Chl 法による池の生産量の測定をするねらいと，その原理方法の講義をしたのち Win 法，Chl 法の2グループに分れ測定の実習を経験させた。

6月6日（金）

(1) 次の6月12日まで，1，3，5班は，Win 法について，2，4，6 班は Chl 法について3回実験し，そのデータを報告するように指示をし，班長を中心に直ちに実験を開始させた。

6月6日～11日

比較的晴天が続き，生徒の実験は順調に進行した。

6月12日（木）

各班の班長に実験データとその分析を報告させた。

特に予想と反したデータの得られた班では，その原因を具体的にあげさせ，それを生徒全体に聞かせた。

その後で，筆者が Win 法，Chl 法に分け，各班に共通した実験上の諸注意をした。その要点は次の通りであった。

(1) 採水
- 採水ビン・ウィンクラービンは採水前に池の水でゆすぐこと。
- サイフォンのゴムチューブの先端は，ビンの底につけ，試水は十分あふれさせてから（中の試水が1～2回入れ替れる程度）フタをすること。

(2) 固定
- 固定試薬やHClを注入の際ピペットから気泡が出ないようにすること。
- ピペットの先端はビンの底まで入れずにビンの肩口あたりまでにした方が良い。（底まで入れていると，ピペットが汚れ試薬が汚れやすい。）
- 固定試薬ＡＢのピペットは，それぞれ専用とし，絶対混用しないこと。
- フタをしたら，必ず気泡のないことを確認しもし入ってしまった場合には蒸留水を静かに少量加えてフタをしめること。
- 固定試薬注入後は，速かに攪拌に移ること。攪拌は十分に（30回以上）
- 固定後沈殿物を十分に沈ませてから（1時間以上静置）溶解の操作に移ること。
- 静置の際と溶解後のウィンクラービンは太陽光に当てないこと。（I_2が遊離する）

(3) 滴定
- ビュレットは少量のチオ硫酸ソーダを流してから使用すること。
- ビュレット内に残っていたチオ硫酸ソーダは，捨てるかこれから使用するものと混合してから使用すること。
- 沈殿をとかした試水を3角フラスコにあけた後，ウィンクラービン内を少量の蒸留水で洗い，その水を加えること。
- デンプン指示薬のつぎ足しはしないこと。またいつも一定量（5～6滴）滴下すること。
- 滴定終了後，数十秒で青色がもどってくるが，気にせず，最初に終点と判断した

数値をとること。

6月13日（金）

実験を交代し，6月13日から6月19日まで3回ずつ実験をし，そのデータを報告するよう指示した。

1，2，5班…… Chl法

2，4，6班……Win法

6月19日（木）

各班からデータとその分析を報告させ，2ケ班について実験のやり直しを指示した。それは，いずれもWin法で，原因は班員のまとまりのなさと，実験のすすめ方が粗雑なためであった。

6月20日（金）

①発表学習の予告とそのすすめ方

6月26—27日にかけて「池の生産力測定」に関する発表学習を実施する。そのすすめ方と発表学習のテーマを発表し，レポート作成の要領を指導した。

②発表学習のテーマ

①太陽エネルギー測定実験のねらいは何か。

②各班のデータとその分析（班長）

③ Win法で各層（10cm・40cm）のPn（O_2mg/l/h）がわかって池の太陽エネルギー固定率をどのように求めることができるか。

④ Win法で実験誤差を生ずる要因は何か。

⑤池の実際の太陽エネルギー転換効率を知るには他に何を調査すればよいか。

⑥ Chl法で池の各水層のchlmg/m^3がわかっている場合，どうすれば太陽エネルギー転換効率を測定できるか。

⑦ Chl法で誤差の入り込む要因は何か。

⑧他に何を測定したら推計でない池の実際の太陽エネルギー転換効率を測定できるか。

⑨ Win法とChl法の誤差をどのように評価したらよいか。

9項目の発表テーマのうち，②は，班長に発表してもらい，他はだれが割りあてられても発表できるよう，班長を中心として班内で十分討論しておくように指示した。またデータは，各班とも枠を作った報告用紙にデータを記入させ，これをプリントして全員に配布できるようにした。

③6月26～27日発表学習

発表学習の司会は班長が2人ずつ交代でやらせた。1人は司会し，1人は要点を黒板にメモする役目である。発表者については，質問に答えさせた。質問がない場合は，必要に応じて筆者らが質問し，発表が安易になるのを防いだ。

それぞれのテーマについて1班～6班まで発表させ，終ると次のテーマにうつるようにした。主要なテーマで班によって見解のわかれるものについては，時間をとって討論を深めさせた。

発表学習の結果については，考察でのべる。

7月4日（金）　レポート提出締切。レポートの内容は次の通り。

1. 実験テーマ　　池の生産量……太陽エネルギーの転換効率を測定する……。
2. 実験のねらい（各自の理解したねらい）
3. 実験原理と方法。
4. 実験結果
5. 結果の分析　　発表学習の討議を参考にして書くように指示した。(イ) Win 法と Chl 法で誤差の入り込む要因とその排除法。(ロ)単純化した系でどのようにしたらより正確に池の生産量を測定できるか。(ハ) Win 法と Chl 法の転換効率の差をどのように評価したらよいか。
6. 課　　題

次の3つの課題を与えて検討させ，結果をレポートさせ，太陽エネルギー転換効率についての理解を深めさせようとした。

(1)太陽エネルギー転換効率の低い根拠

築地書館E．P．オダム編「生態系の構造と機能」の中のF．B．ゴーリーの論文「生態系におけるエネルギーの流れ」P86～88をプリントして配布した。内容は4つの理由をあげている。

①1モルの CO_2 を固定するのに10モルの光量子が必要でありその中には 520kcal のエネルギーを要する。1モルの CO_2 の中には 105 kcal のエネルギーしか固定されない。量子効率は20%（$\frac{105}{520} \times 100$）である。

②光飽和現象

③地表に存在できるクロロフィルや葉には限界があり LAI（Leaf. Area. Index）は 4～5

④クロロフィルの吸収できる波長は 430 mμ と 670 mμ のところに鋭いピークがある。

(2)太陽エネルギー転換効率と遷移について

築地書館オダム生態学を生徒全員に買わせ，テキストとして利用している。

この中のP109～127を読み，遷移とは何か，遷移モデルおよび Pn＜R（呼吸）・Pn≧R Pn＝Rから遷移についてまとめさせた。

(3)河出書房新社吉良竜夫著「生態学から見た自然」

“地球に定員はあるか”の論文を読ませ感想をのべさせた。内容は，中部地方の水田は，太際放射エネルギーの0.2％を白米に転換できる。この割合で地球全表面が白米を生産すると単純に仮定して地球上に何人住めるか。住宅地，学校公園，野菜畑，果樹園，乳牛，豚肉のための耕地などを考慮すると地球の定員はもうすぐ満員になると主張し，対策を早急に立てる必要性があることをといたユニークな論文で，0.2％の転換効率が生徒には実感をもってせまってくる。

5. 実験指導の検討

(1) Wim 法の結果

1. 実験結果と班長の率直な感想を付記した。重複するので1班，やり直しを命ぜられた3班の2種類のデータ，5班のデータを示した。なお比較のために筆者のデータを提示した。

表3　1班の Win 法による太陽エネルギー固定量　　1班

水深		O_2 (mg/l/h)	CO_2 (mg/l/h)	$C_6H_{12}O_6$ (g/m³/h)	Kcal/m³/h
10 cm	Pm	1. 0.64	0.88	0.68	2.60
		2. 1.12	1.54	10.5	4.02
		3. 0.58	1.00	0.52	2.61
	対—暗 R	1. 0.93	1.28	0.87	3.35
		2. 1.27	1.75	1.19	4.55
		3. 0.15	0.20	0.14	0.52
	明—暗 Pg	1. 1.57	2.16	1.47	5.63
		2. 2.40	3.30	2.24	8.59
		3. 3.10	4.20	2.86	10.94
40 cm	Pm	1. 2.15	2.96	2.02	5.25
		2. 1.67	2.30	1.57	6.00
		3. 0.27	0.38	0.26	0.98
	R	1. −0.16	−0.22	−0.15	−0.57
		2. −0.11	−0.15	−0.10	−0.28
		3. 0.46	0.63	0.43	1.63
	Pg	1. 1.99	2.74	1.88	7.09
		2. 1.57	2.15	1.47	5.61
		3. 1.55	2.13	1.46	5.56

表4　1　班　の　固　定　率

		0〜10cm 層	10〜底　層	池　全　体	単位面積あたりの生産量	太陽エネルギー固定率	備　考	
							日にち	天候
(生産量) K.	1回目	Kcal 245.0	Kcal 1573.95	Kcal 1818.95	Kcal/㎡ 22.18	% 0.72	6	晴
	2回目	385.92	1793.40	2179.32	26.58	0.86	7	晴
	3回目	250.56	293.80	544.36	6.64	0.55	9	曇

君の話：1回目と2回目は指示薬をいれる時空気を多量にいれてしまったため大失敗だった。また滴定の未熟さもかなりひびいた。3回目は慎重にやったので一応成功して大変めでたい。

表5　班の太陽エネルギー固定量　　3班

水深		O_2 (mg/l/h)	CO_2 (mg/l/h)	$C_6H_{12}O_6$ (g/m³/h)	Kcal/m³/h
10 cm	Rm	1. 3.51	4.83	3.29	12.58
		2. —	—	—	—
		3. 0.67	0.92	0.63	2.41
	R	1. −0.56	−0.77	−0.53	−2.03
		2. —	—	—	—
		3. −0.27	−0.37	−0.25	−0.96
	Pg	1. 3.17	4.36	2.97	11.35
		2. 1.85	2.54	1.73	6.61
		3. 0.4	0.55	0.38	1.44
40 cm	Pm	1. −0.41	−0.56	−0.39	−1.49
		2. 0.42	0.58	0.40	1.53
		3. −0.05	−0.69	−0.047	0.18
	R	1. 0.33	0.45	0.31	1.18
		2. 0.9	1.24	0.85	3.24
		3. −0.19	−0.26	−0.18	−0.69
	Pg	1. −0.086	−0.12	−0.082	−0.031
		2. 1.32	1.82	4.74	4.74
		3. −0.24	−0.33	−0.23	−0.88

表6　3班のエネルギー固定率

		0～10cm 層	10～底 層	池 全 体	単位面積あたりの生産量	太陽エネルギー固定率	備考 日にち	備考 天候
(生産量) Kcal	1回目	Kcal 1207.68	Kcal −525.70	Kcal 681.98	Kcal/㎡ 8.31	% 0.27	6	晴
	2回目	—	539.80	—	—	—	11	薄曇
	3回目	231.36	63.50	294.86	3.60	1.00	11	曇

Sの話：もう一回やり直し。そちらの方は成功したんだけど。こちらは大失敗！くもりのち晴の時の太陽エネルギーを $\frac{1200+3200}{2}$ ように安易に算出してしまった。またもっと基本的な問題として実験が非常に雑だったと思う。

表7　3班太陽エネルギーやり直し班のデータ　　3班

水深		O_2 (mg/l/h)	CO_2 (mg/l/h)	$C_6H_{12}O_6$ (g/m³/h)	Kcal/m³/h
10 cm	Pm	4. 0.42	0.58	0.39	1.51
		5. 0.73	1.00	0.68	2.60
	R	4. 0.55	0.75	0.51	1.96
		5. 0.38	0.52	0.35	1.34
	Pg	4. 0.97	1.33	0.91	3.47
		5. 1.15	1.58	1.08	4.13
40 cm	Pm	4. 0.087	0.12	0.081	0.30
		5. 0.41	0.56	0.38	1.45
	R	4. 0.17	0.23	0.16	0.60
		5. 0.14	0.19	0.13	0.50
	Pg	4. 0.25	0.35	0.24	0.91
		5. 0.55	0.76	0.54	2.06

表8　3班の1日の池の純生産量と固定率

		0～10cm 層	10～底 層	池 全 体	単位面積あたりの生産量	太陽エネルギー固定率	備考 日にち	備考 天候
(生産量) Kcal	1回目	Kcal 144.58	Kcal 106.19	Kcal 250.77	Kcal/cm 3.06	% 0.39	21	曇雨
	2回目	249.61	511.56	761.17	9.28	0.77*	24	薄曇
	3回目							

1回目の太陽エネルギーは，天候によって$\frac{1200+360}{2}=780$ とした

* 2回目の太陽エネルギーは1200としたが，うすぐもりだから$\frac{3000+1200}{2}=2100$でやると0.44に固定率がなる

表9　5班の太陽エネルギー固定量　　5班

水深		O_2 (mg/l/h)	CO_2 (mg/l/h)	$C_6H_{12}O_6$ (g/m³/h)	Kcal/m³/h
10 cm	Pm	1. 0.511	0.703	0.479	1.831
		2. 0.836	1.150	0.784	2.997
		3. 0.467	0.642	0.438	1.674
	R	1. 0.388	0.534	0.364	1.391
		2. 0.194	0.267	0.182	0.696
		3. 0.333	0.461	0.314	1.200
	Rg	1. 0.899	1.236	0.843	3.222
		2. 1.030	1.416	0.966	3.692
		3. 9.822	1.103	0.752	2.874
40 cm	Rm	1. −0.053	−0.073	−0.050	−0.191
		2. 0.186	0.256	0.174	0.655
		3. 0.191	0.263	0.179	0.684
	R	1. 0.550	0.756	0.516	1.972
		2. 0.672	0.924	0.630	2.408
		3. 0.413	0.568	0.387	1.479
	Pg	1. 0.497	0.683	0.466	1.781
		2. 0.858	1.180	0.804	3.073
		3. 0.604	0.831	0.566	2.163

表10　5班の1年の池の生産量

		0～10㎝層	10～底層	池全体	単位面積あたりの生産量	太陽エネルギー固定率	備考	
							日にち	天候
(生産量) Kcal		Kcal	Kcal	Kcal	Kcal/㎡	%		
	1回目	175.8	− 67.4	108.4	1.320	0.110	6/10	曇
	2回目	287.7	234.6	522.3	6.370	0.531	6/10	曇
	3回目	160.7	241.3	402.0	4.902	0.409	6/10	曇

Yの話：日にちが少なく同じ日に2回やったのは失敗だった。それ以外はこれといって失敗はなかったと思う。特に，我々の班の場合滴定者を人にしぼったので色別の技術も上がり正確になったのではないか。

表11 筆者の実験データ　　筆者の結果

水深		O_2 (mg/l/h)	CO_2 (mg/l/h)	$C_6H_{12}O_6$ (g/m³/h)	Kcal/m³/h
10 cm	Pm	1. 0.32	0.44	0.30	1.15
		2. 1.04	1.33	0.98	3.75
		3. 0.71	0.98	0.07	2.56
	R	1. 0.29	0.40	0.27	1.03
		2. 0.14	0.19	0.13	0.50
		3. 0.38	0.52	0.35	1.34
	Pg	1. 0.61	0.84	0.57	2.18
		2. 1.18	1.62	1.10	4.20
		3. 1.09	1.50	1.02	3.90
40 cm	Pm	1. 0.08	0.11	0.08	0.29
		2. 1.04	1.43	0.99	3.75
		3. 0.71	0.98	0.07	2.56
	Pm	1. 0.12	0.17	0.12	0.46
		2. 0.07	0.10	0.07	0.27
		3. 0.23	0.32	0.22	0.84
	Pg	1. 0.20	0.28	0.19	0.73
		2. 0.54	0.74	0.50	1.91
		3. 0.51	0.70	0.48	1.83

表12 筆者の実験による1日の固定量

		0～10cm 層	10～底 層	池 全 体	単位面積あたりの生産量	太陽エネルギー固定率	備考 日にち	備考 天候
(生産量) Kcal	1回目	Kcal 110.70	Kcal 102.50	Kcal 213.20	Kcal/㎡ 2.60	% 0.22	6/2	曇
	2回目	359.98	592.86	952.84	11.62	0.39	6/3	晴
	3回目	246.00	257.48	503.48	6.14	0.31	6/11	曇

(2) Win 法の結果の検討

生徒の実験結果は，1回目は予想した値とはほど遠いデータである。実験に馴れるためのもので止むを得ない。2回目は実験の概要を理解して，どうすれば誤差を少なくするか考えて，実験をすすめさせた。3回目は，精度の高いデータを得るように努力させた。3班は，3回ともデータに信頼がおけないのでやり直しをさせたが，4～5回のデータはほぼ満足のいくデータである。

(3) chl 法とその検討

表13　1 班 の Chl 法 の 結 果　　1班

		CO_2（g）	$C_6H_{12}O_6$（g）	Kcal/day/m²
0〜10cm層	1回目	11.1	7.6	28.9
	2回目	3.1	2.1	8.1
	3回目	2.2	1.5	5.7
10〜底層	1回目	21	14.8	54.7
	2回目	38.4	25.7	100.
	3回目	2.16	14.9	5.64

表14　1班の池全体の純生産量と固定率（1日の）

		単位面積あたりの生産量	入射する太陽エネルギー	太陽エネルギー固定率(%)	メモ		備考
					日にち	天候	
生産量	1回目	26.9	3200	0.84（%）	6／7	はれ	
	2回目	43.9	3200	1.37（%）	6／7	〃	
	3回目	31	3200	0.96（%）	6／12	〃	

表15　2 班 の Chl 法 の 結 果　　2班

		CO_2（g）	$C_6H_{12}O_6$（g）	Kcal/day/m²
0〜10cm層	1回目	5.52	3.76	14.37
	2回目	14.58	9.94	37.99
	3回目	10.01	6.82	26.07
10〜底層	1回目	7.08	4.83	18.46
	2回目	13.97	9.52	36.39
	3回目	24.71	16.85	94.45

表16　2班池全体の純生産量と固定率（1日の）

		単位面積あたりの生産量	入射する太陽エネルギー	太陽エネルギー固定率(%)	メモ		備考
					日にち	天候	
生産量		kcal/㎡	kcal/㎡				
	1回目	0.40	1200	0.034	6／10	くもり	
	2回目	0.91	1200	0.076	6／11	くもり	
	3回目	1.47	3000	0.049	6／7	はれ	

表17　5 班 の chl 法 の 結 果　　5班

		CO_2（g）	$C_6H_{12}O_6$（g）	Kcal/day/m²
0〜10cm層	1回目	0.528	0.360	1.376
	2回目	1.709	1.165	4.453
	3回目	8.666	5.909	22.586
10〜底層	1回目	2.533	1.727	6.601
	2回目	7.983	5.443	20.804
	3回目	12.773	8.709	33.288

表18　5班の池全体の純生産量と固定率（1日の）

		単位面積あたりの生産量	入射する太陽エネルギー	太陽エネルギー固定率(%)	メモ		備考
					日にち	天候	
生産量		kcal/㎡	kcal/㎡				
	1回目	0.097	3200	0.003	6／12	くもり	
	2回目	0.308	3200	0.010	6／14	くもり	
	3回目	0.681	3200	0.021	6／18	くもり	

クロロフィル法は，転換率の幅が大きく，（最高0.96〜最低0.21%，ただし3回目のものだけの比較）一般にWin法より低い。これは，ろ3過の際にクロロフィルを十分溶解し切れていないこと，また分光光度計の取扱いの未熟さによるところなどが大きい。

(4)実験をすすめる上での判断力がついた点。

①考察が具体的で鋭い。

Win 法で誤差の入りこむ要因について生徒が考察で取り上げたのは各様であり，筆者らが指摘した点は当然ながらそれ以外につぎのような要因をあげていた。

a　暗ビンに光が入ったのでは

b　土が O_2 ビンに入りこみアルカリ性における変動をきたしたのでは

c　植物プランクトンの偏在

d　測定回数の少なさ，測定地点の少なさ

e　動物プラクトンの呼吸

f　1日の池の生産量を求めるのに 10cm Pn（kcal）×8 と 40cm Pn（kcal）×29.4 とをそれぞれ12倍するだけでいいのか

g　10 cm Pn が 0〜10 cm の水量における Pn の代表となりうるのか
　40 cm Pn が 10〜70 cm の水量における Pn の代表となりうるのか

h　太陽エネルギーのあやふやさ

これらの誤差の入りこむ要因で重要と思われるのは，f，g，hなどであろうか

（chl 法の考察については省略）

② 何を測定したら池の生産力の実態が求められるか

生徒は実験中，絶えず池に出かける，池を実際にじっくり観察すればスイレンが繁茂し，コンクリートの壁には付着藻類がついている。これらを観察しているか否かを見れば科学的判断力を働かせているか否かがわかる。

また，実験原理として提示されているもの定数がはたして正確か否か批判的見ているかどうかは重要である。

ⓐ Win 法だけでは正しくない，スイレン，付着藻類の生産量を求める必要がある。

ⓑ 1日を12時間としたのは問題，2時間に1回くらいの頻度で測定せよ。

ⓒ 測定点が少なすぎる。10 cm，40 cm，70 cm が最低必要，また池の数か所で吊すこと。

ⓓ 太陽放射の一意的なきめ方。(晴天，曇天，雨天しかとっていない。現場で測定してない) はおかしい。実測すべきだ。

(3) Win 法と Chl 法のデータの差をどう評価したらよいか。

これについて大半の生徒は Win 法は溶存酸素量測定によって池水中のエネルギー固定を実測しているのに対して chl 法は，実際に測定していない定数，例えば 2mgC/chl，mg/h を用いて生産量を推計しているので一致しなくてもよいと考察している。

③ 太陽エネルギー転換効率について正しく評価できるようになったか。

次の諸点からこの面では指導効果が高いと考えている。

a 太陽エネルギーの転換効率の測定の原理と方法が実験を経験することで生徒に十分理解されたこと。

b 主として Win 法では 0.2～0.5 %は実験で確められたこと。

c "地球に定員はあるか"の論文の感想で生徒は，固定率を実感していることが推定できる。2～3の感想文の一部を引用してみよう。

……池の生産力測定によって，エネルギー固定率の0.5%という数字に実感がわいたのは事実である。この実感が役立った最初の例だ……。

また，この論文の中でのかなり中軸をしめる原則として，『作物の太陽エネルギー転換効率は0.1～0.2%であり，はなはだ低いがいたしかたない』

『人間をふくめたすべての動物が直接間接に植物のはたらき，せんじつめると，植物による太陽エネルギーの利用効率に依存している』

があげられている。

(この原則は，まさに「太陽エネルギー利用効率が生態系の規模を規定する」ことに適合していて，感動的であった……)

……エネルギー固定率を計算した後なので，この文章の後半にでてきた，イネのエネルギー固定率の低さに対しても大した驚きはなかった。……

……「地球の定員」と乗物かなにかのように書いてあるのもユーモラスだ。しかし，内容は鋭く特に植物のエネルギー転換効率については考えさせられた。……

これらの生徒の感想文を読んでいると0.2〜0.5%の数字のもつ意義をじっくりと受けとめていることがよく理解できる。

総合して生態系における“エネルギーの流れ”を具体的に生徒に理解させるのに，この実験，特に Win 法が重要な役割を果したと判断している。

6. 参考文献

(1) 朝倉書店：生態学実習書

(2) 共立出版生態学講座：水界植物群落の物質生産Ⅱ—植物プランクトン

(3) 恒星社厚生閣：プランクトン実験法　小久保清治

(4) 築地書館，オダム生態系

(5) 築地書館：生態系の構造と機能

(6) 河出書房新社：生態学からみた自然：吉良竜夫