

月惑星に社会を作るための勉強会

宇宙で魚を食すー
宇宙養殖のはなし



東京海洋大学
遠藤雅人

2021年 11月8日, オンライン

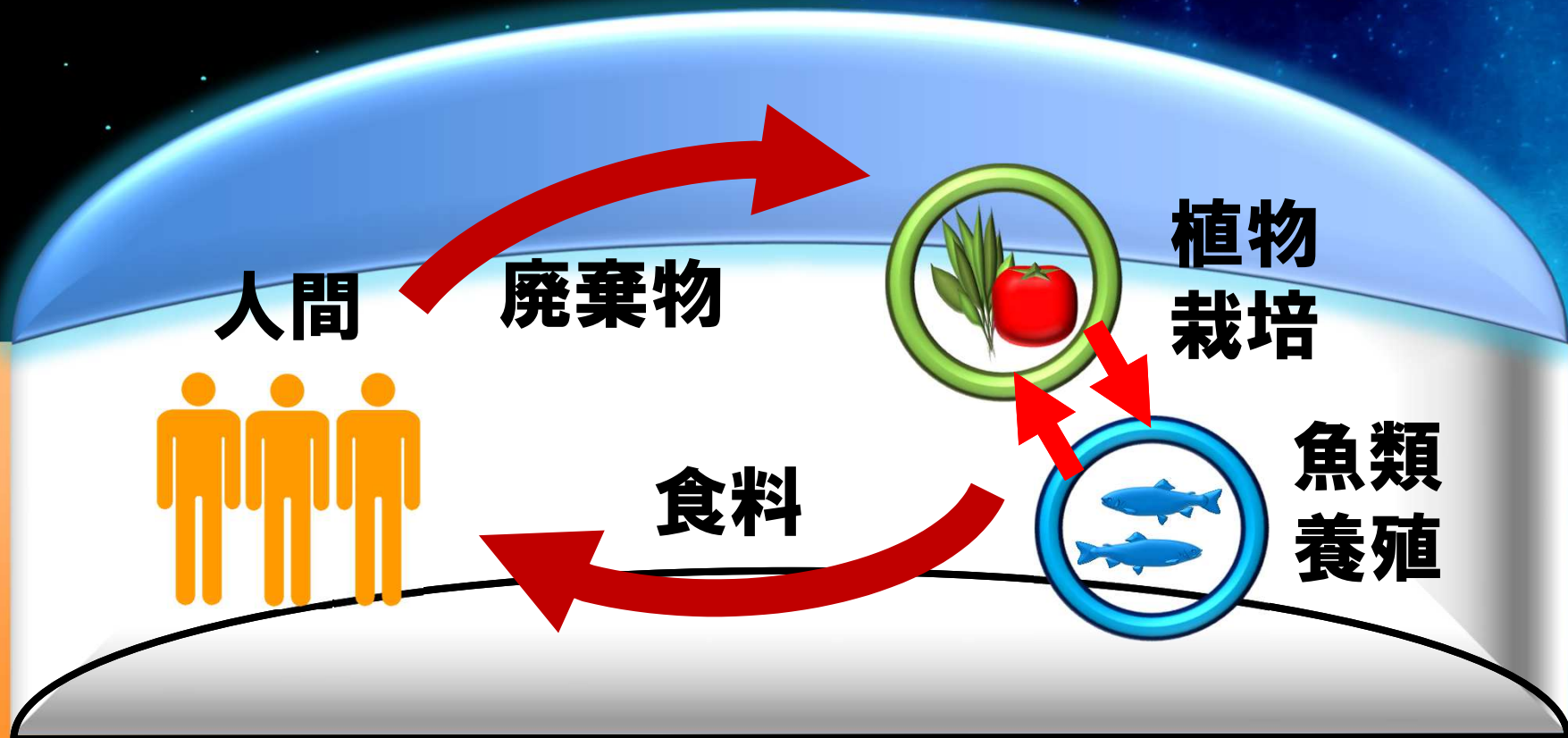
講演内容

1. 背景 (宇宙養殖)
2. 食物連鎖を導入した物質循環型
養殖の開発
3. 異なる重力下における水棲生物の
行動解析
4. まとめ

1. 背景 (宇宙養殖)

背景

宇宙居住施設の食料生産サブシステムへ
魚類養殖を導入する



はじめに

宇宙居住施設における食料生産

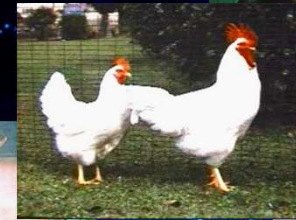
1) 物質循環を考慮した生物生産系の確立

→ 廃棄物利用型食料生産

2) 食の多様性の維持

→ 植物 (穀類、野菜)

→ 動物 (魚類、家畜、
昆虫、培養肉)



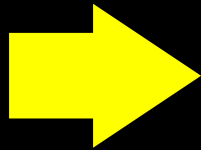
動物性タンパク質の生産

宇宙環境に対応可能な動物種の探索



宇宙環境

- 重力
- 圧力



生物種に要求されること

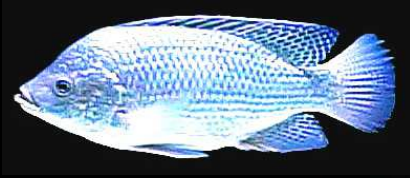
生存 → 摂餌 → 成長 → 成熟 → 繁殖

宇宙開発黎明期から実験に用いられている魚類の適用

宇宙環境下における魚類養殖

1) 物質再生型魚類養殖システムの確立

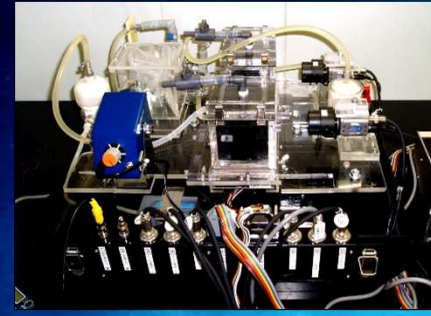
食物連鎖を利用した栄養塩循環およびガス交換機能を持つ養殖システムを開発し、物質フローも把握した。



2) 魚類の適正判断

→ 宇宙環境下で養殖が可能か否か

地上とは異なる重力環境下における食用魚ティラピアの遊泳行動観察を行った。



食用魚ティラピア *Oreochromis niloticus* について

1) 原産地

- ・ ナイル川流域、
西および中央アフリカ



2) 飼育が水産生物の中でも比較的容易

- ・ 低酸素や水質汚濁に耐性がある
- ・ 雑食性で成長も速い

3) 熱帯および亜熱帯地方で盛んに養殖されている

- ・ 生息水温 15~33°C

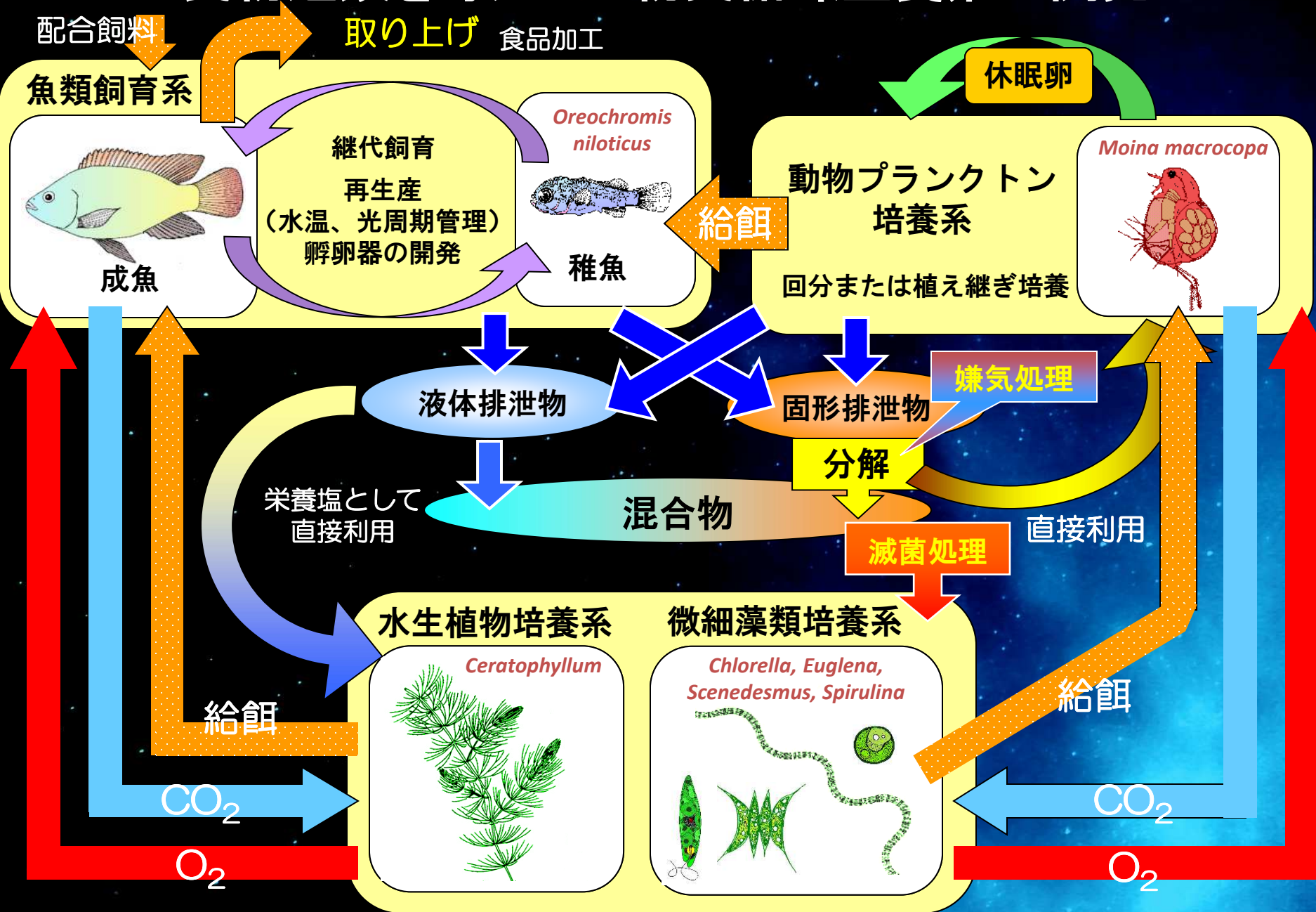
4) 美味である

- ・ 世界各国で食されている



2. 食物連鎖を導入した 物質循環型養殖の開発

食物連鎖を導入した物質循環型養殖の開発



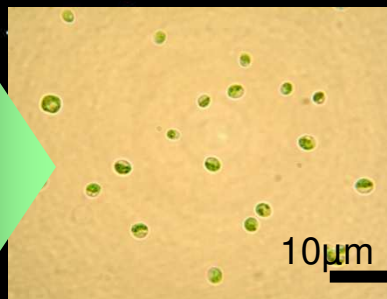
養魚廃棄物を用いた魚類種苗生産システムの確立

養魚排水+
堆積物分解液



ティラピア
*Oreochromis
niloticus*

微細藻類



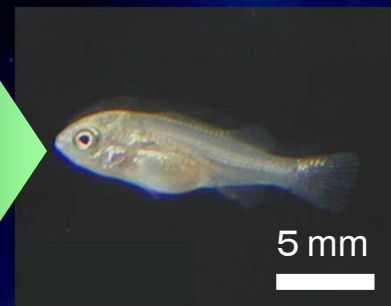
クロレラ
*Chlorella
vulgaris*

動物プランクトン



タマミジンコ
*Moina
macrocopa*

魚類仔稚魚

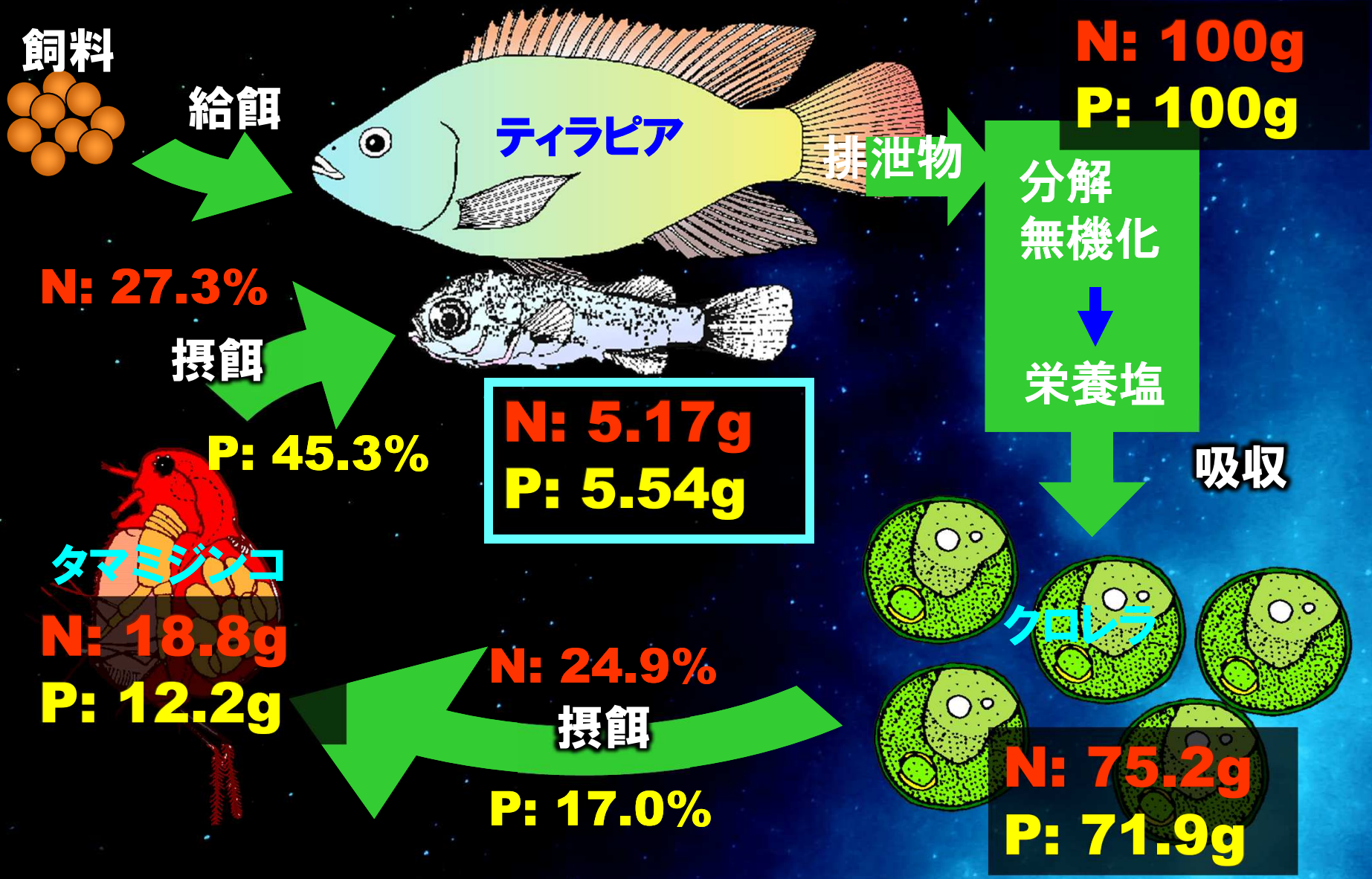


ティラピア
*Oreochromis
niloticus*

人工的な多段階食物連鎖によるバイオマス変換

養魚廃棄物から魚を生産することができる

閉鎖生態系循環式養殖システムにおける窒素およびリンの収支(1サイクル)



飼料

給餌

ティラピア

排泄物

N: 100g

P: 100g

分解
無機化

栄養塩

吸収

クロレラ

N: 75.2g

P: 71.9g

N: 27.3%

摂餌

P: 45.3%

N: 5.17g

P: 5.54g

タマジンコ

N: 18.8g

P: 12.2g

N: 24.9%

摂餌

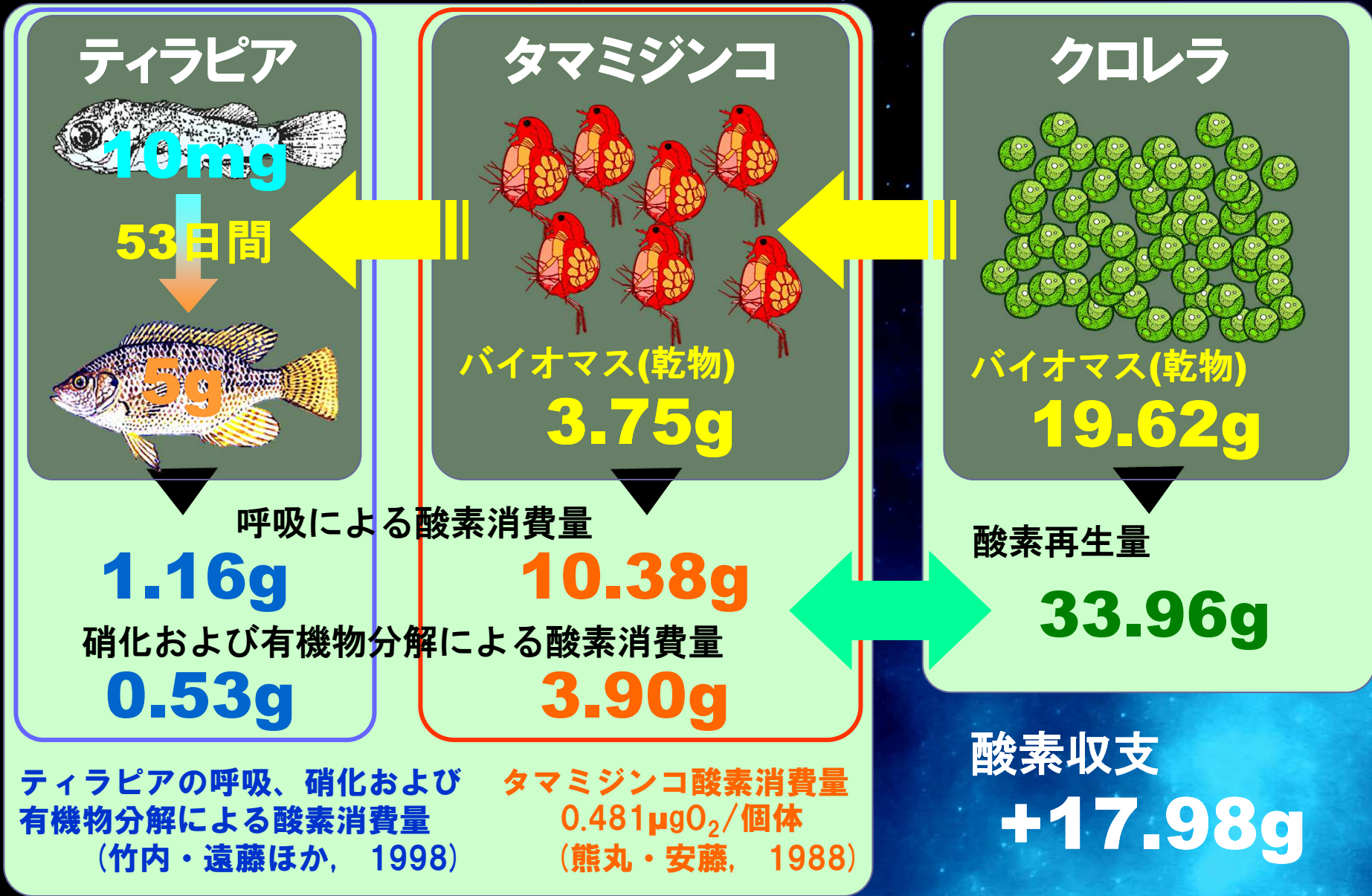
P: 17.0%

ティラピアークロレラ間のガス交換実験



再生循環型魚類飼育実験装置

閉鎖生態系循環式養殖システムにおける バイオマス生産および酸素消費・再生量の試算

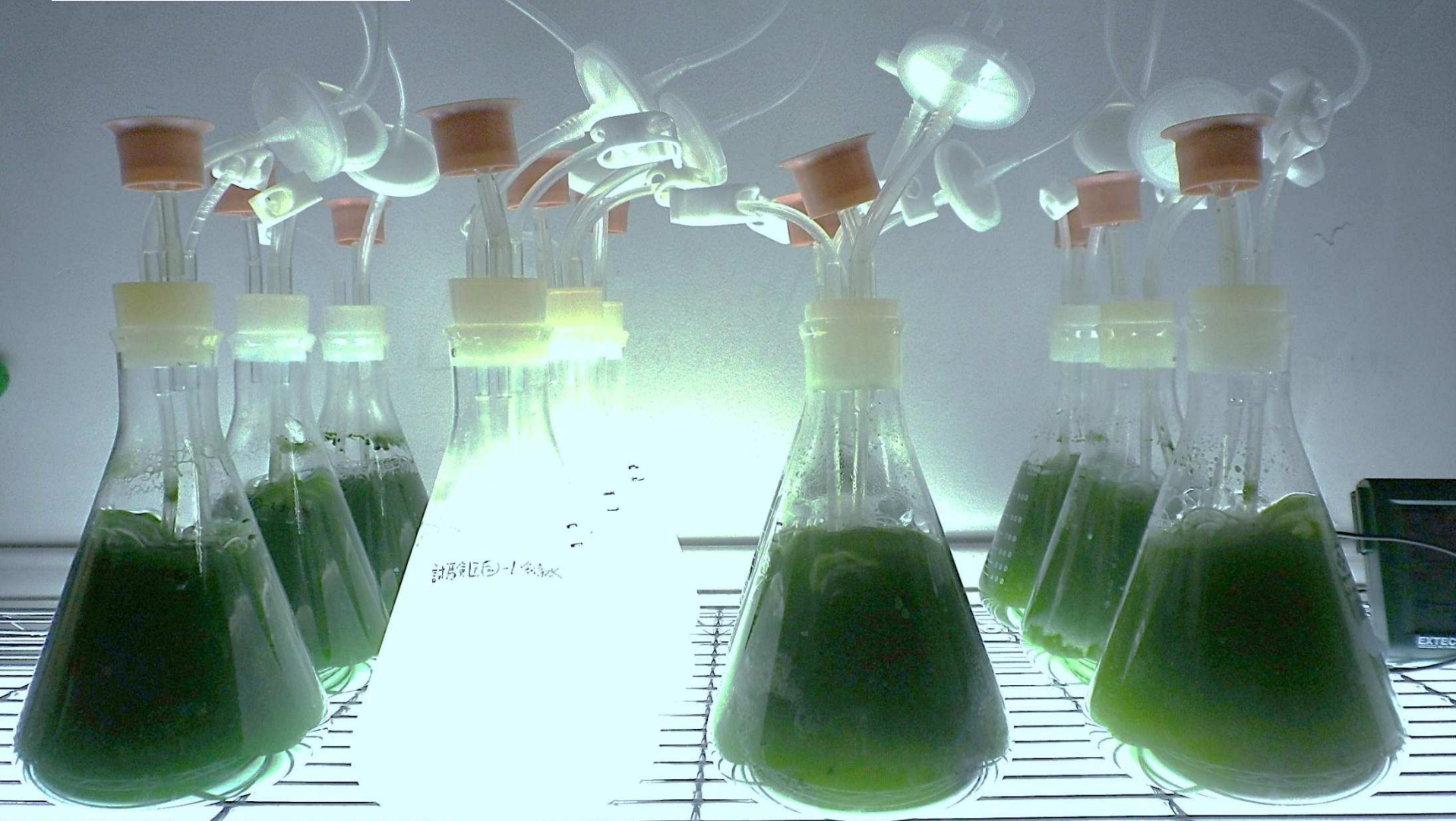


スピルリナ-ティラピア間の物質循環による養殖システム



最も簡便な物質循環型養殖システム

培養 8 日目



SOT培地

排水のみ

排水+固形物

排水+固形物
+NaNO₃

アクアポニックス

Aquaculture

Hydroponics

魚類飼育槽

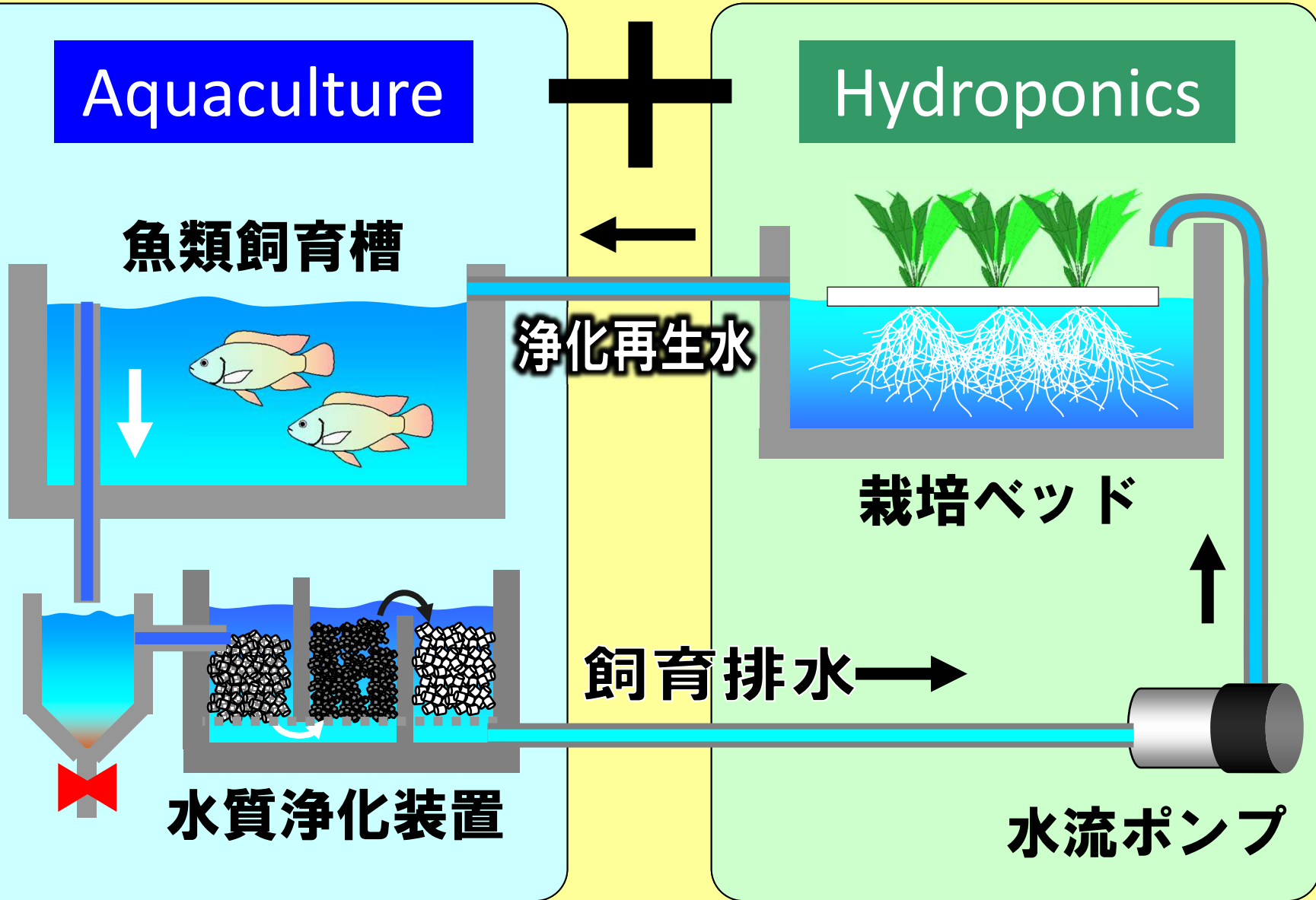
浄化再生水

栽培ベッド

飼育排水

水質浄化装置

水流ポンプ



アクアポニックスによる食料供給

ティラピア循環式養殖

動物性
蛋白質：
35g/日



刺身で提供

可食部割合：31.3%
蛋白質含量：19.8%
収穫：564.8g/日
必要水量：1,779L
必要餌量：469.2g/日

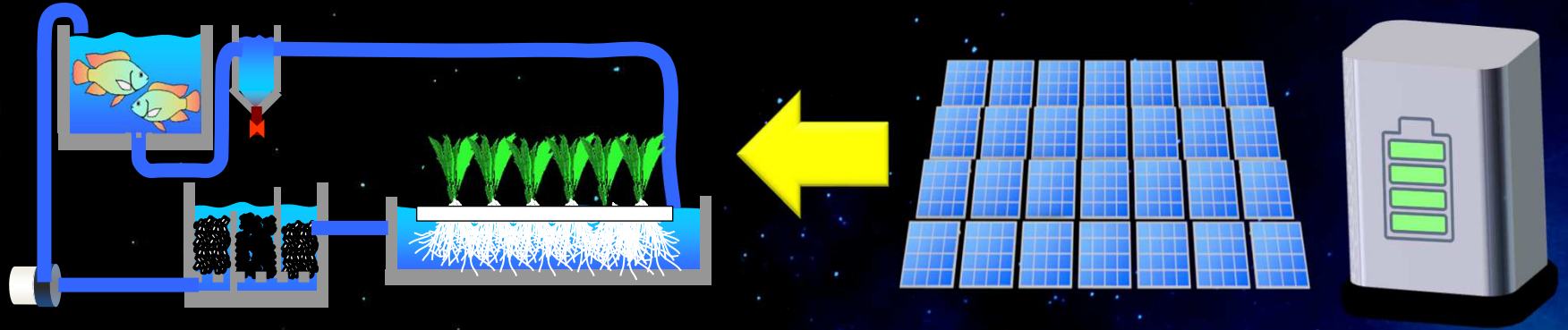
サラダナ水耕栽培



栽培面積：8.23m²
栽培密度：38株/m²
栽培期間：35日
1株重量：160g
平均収穫量：1.43kg/日

野菜摂取量：350g以上/日

太陽光発電システム導入による施設の運用



1人当たりのアクアポニックスの運転に必要なエネルギー量

平均: 558W (調温を除く)

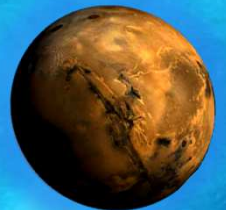
バックアップ蓄電池: **15kWh/1日**

地球での太陽光パネル必要面積:

平均出力: 最大電力の1/5として **24.1m²**

月・火星の場合:

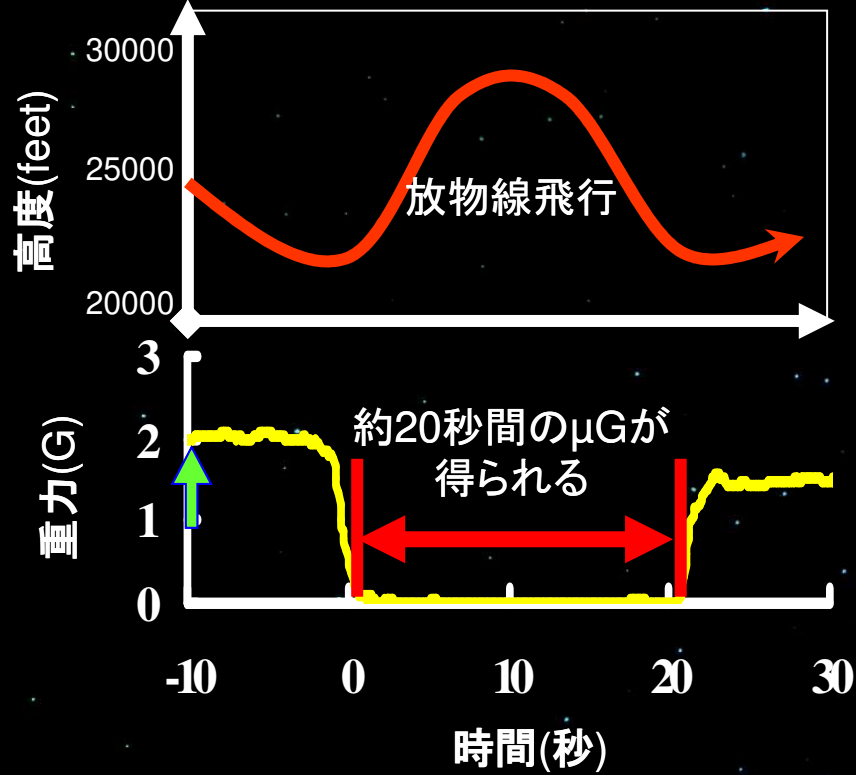
月や火星では温度など環境が比較的安定する場所に設置する必要がある。また、火星の日射は地球の1/2.31となるので面積の拡大や集光技術などの検討が必要である。



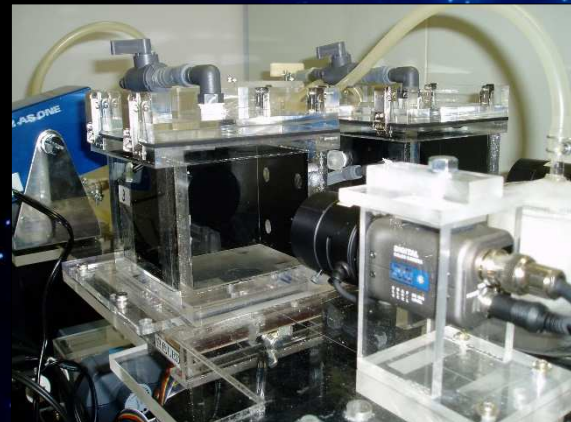
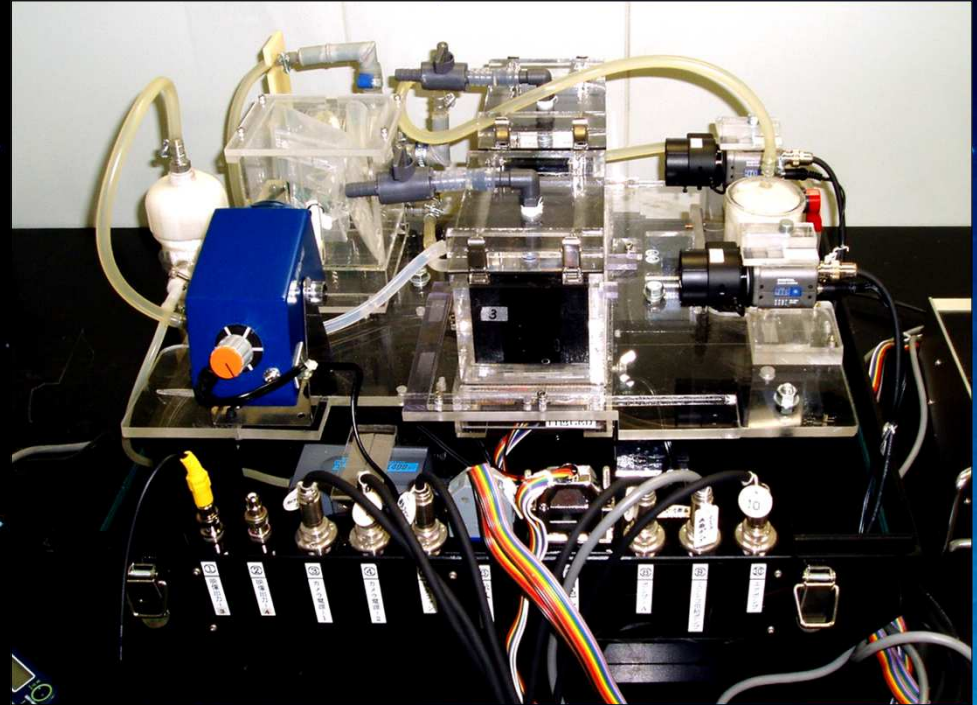
3. 異なる重力下における 水棲生物の行動解析

航空機実験の概要

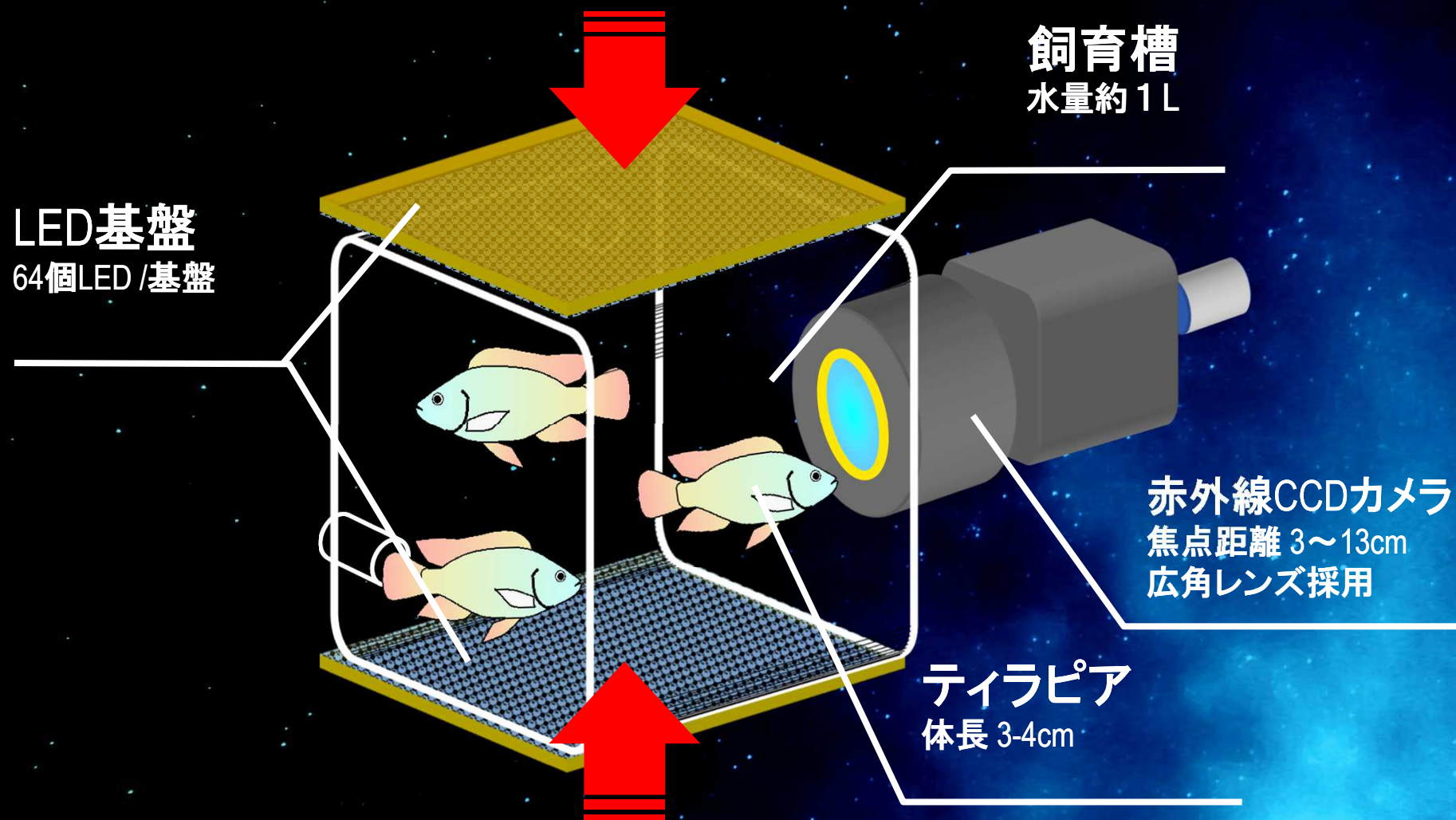
微小重力の創出



装置の内部と搭載写真

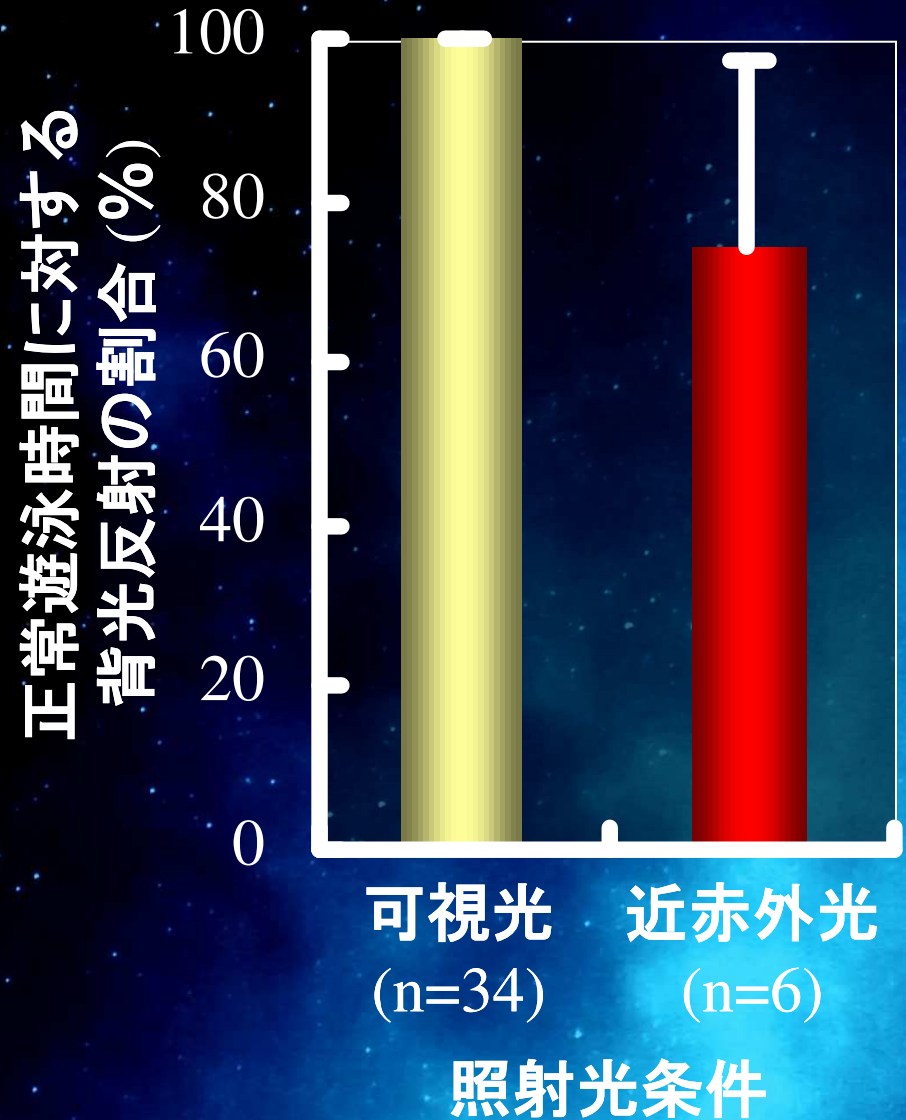
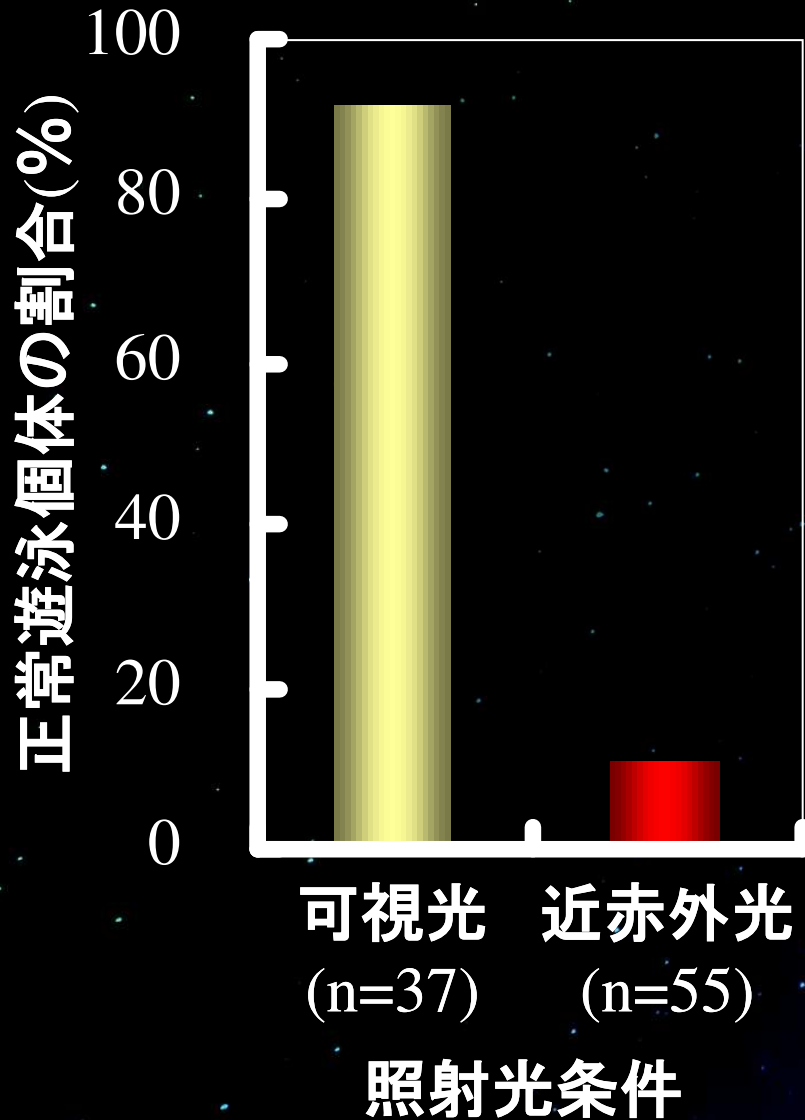


実験に使用した光源および遊泳行動の撮影



ビデオ映像として遊泳行動を記録し、後に行動解析を行った。

微小重力($10^{-3}G$)下におけるティラピアの 正常遊泳行動と背光反射の割合



近赤外光感知能力の調査

微小重力および近赤外光照射下の遊泳行動に系統差が示唆された

正常および異常遊泳個体の子孫を生産し、近赤外光感知能力を調査した

G8 ♀ (34%) ——— R11 ♂

G8-R11(1) ♂ (100%)

G8 strain

Experimental fish



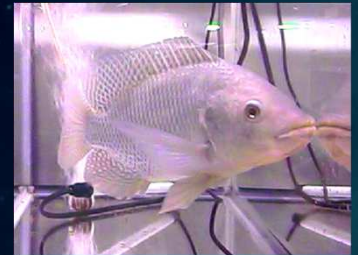
正常遊泳魚の子孫

J1 ♀ (16%) ——— J6 ♂

J1-J6(6) ♂ (2%)

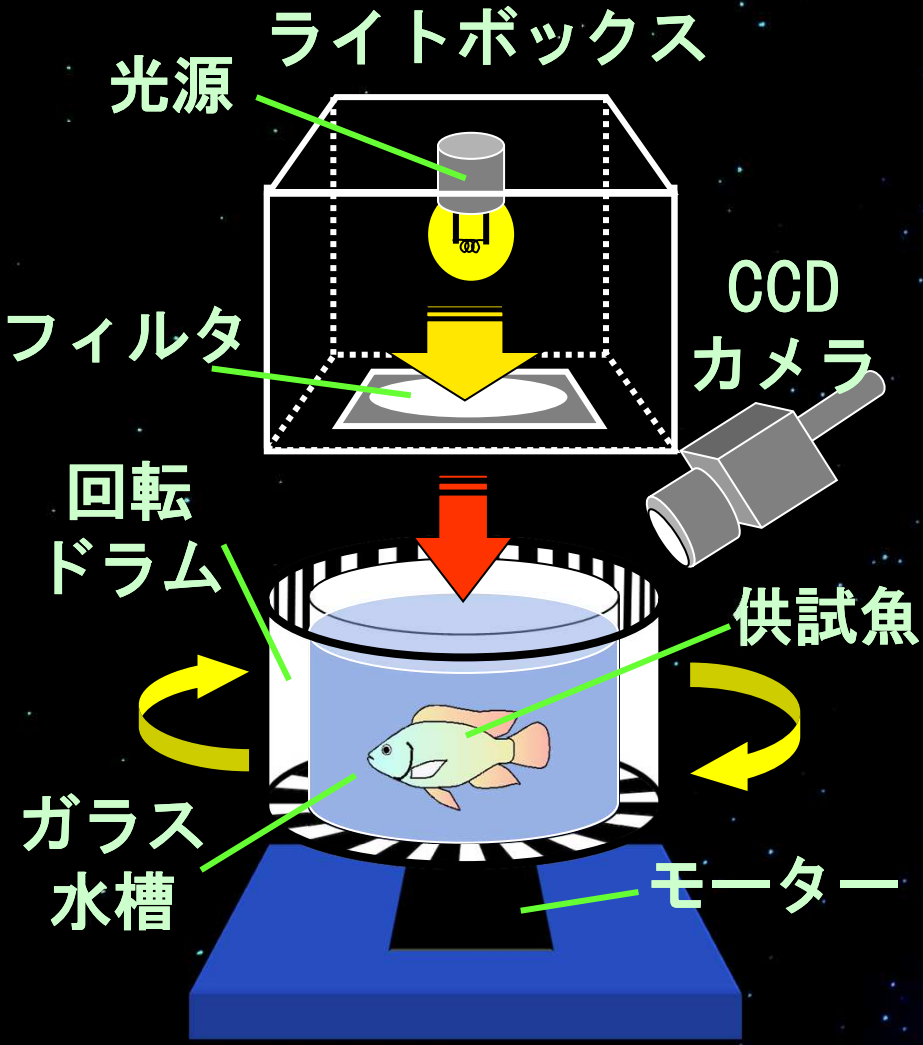
J1 strain

Experimental fish

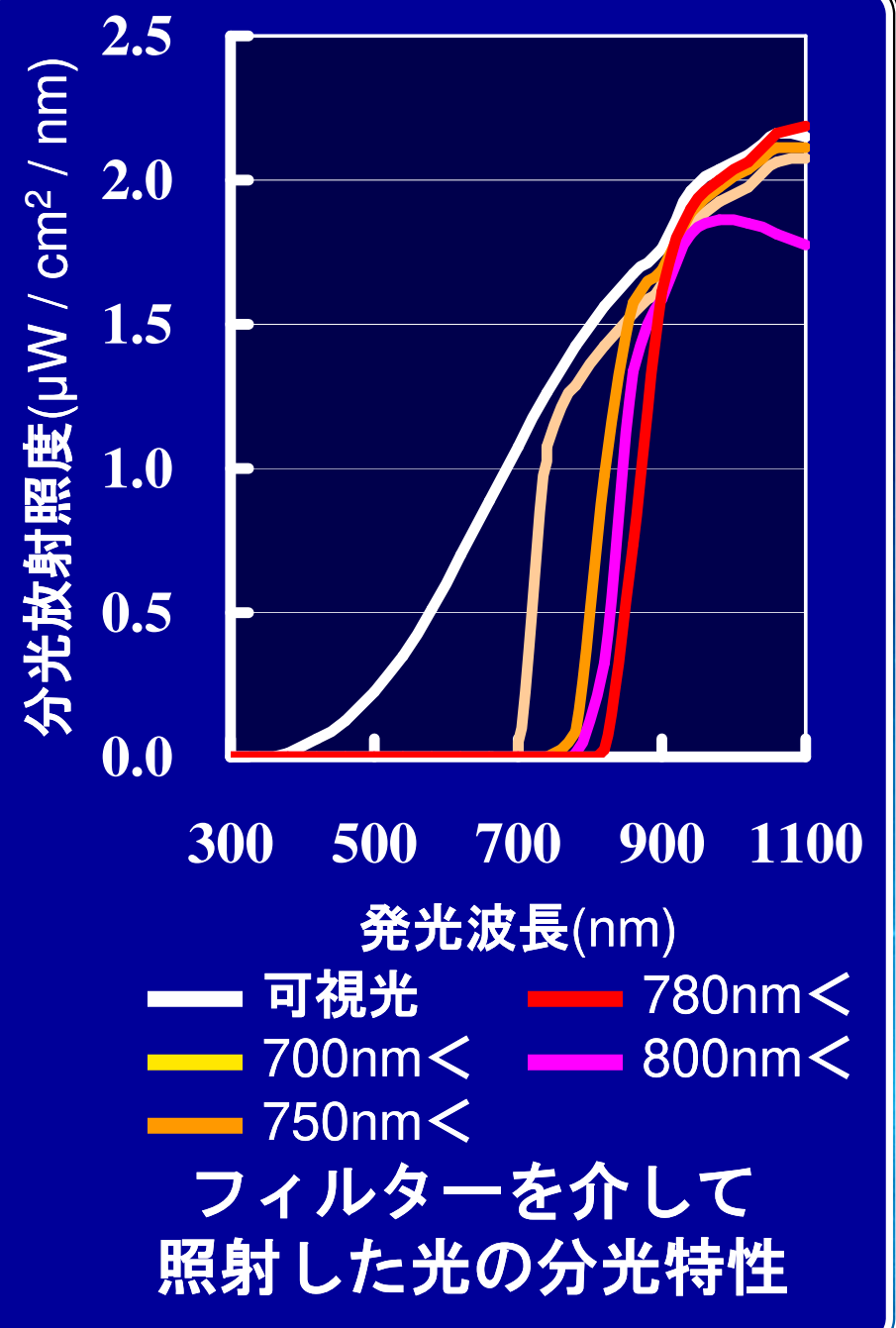


異常遊泳魚の子孫

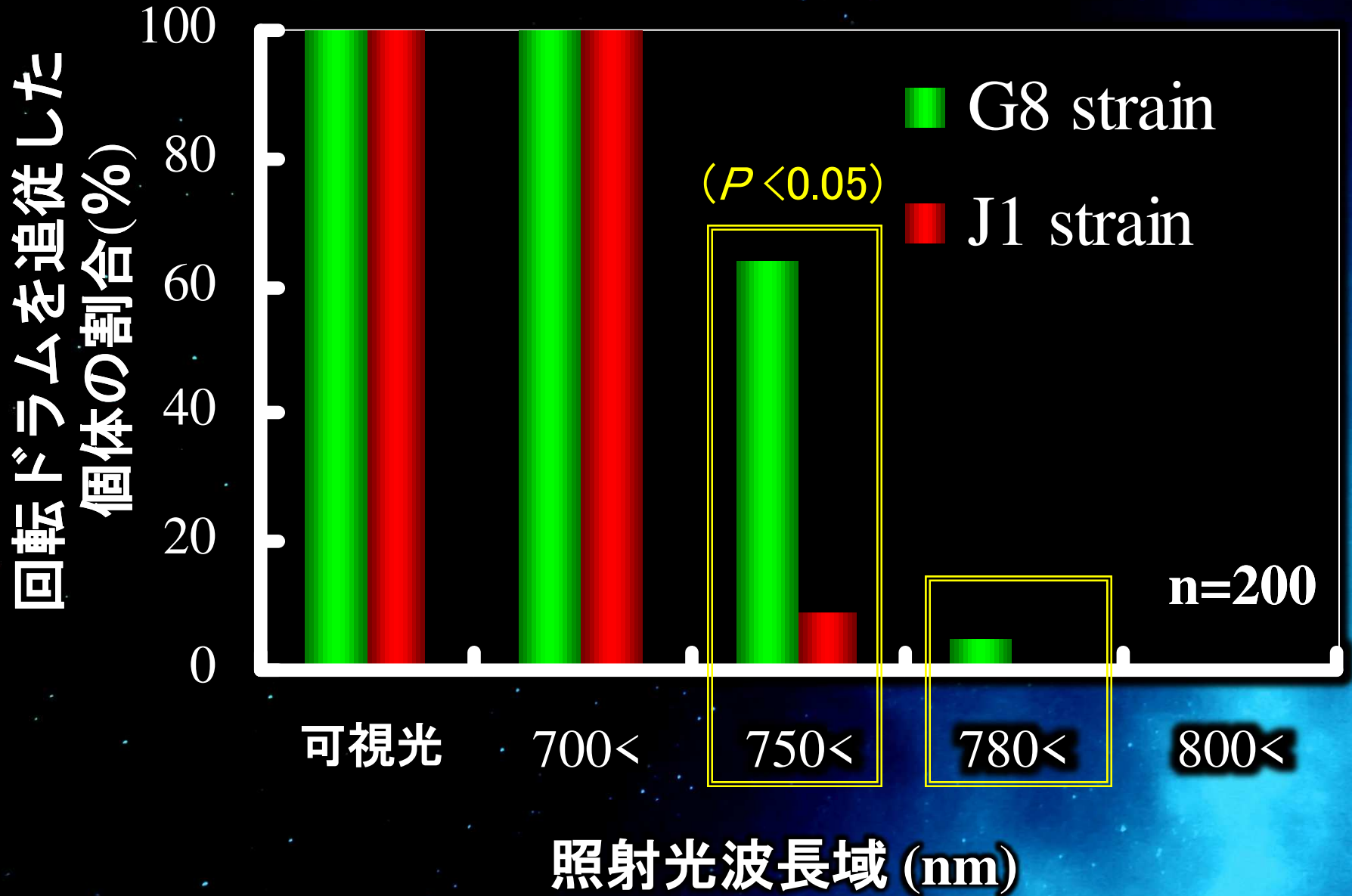
近赤外光感知能力の調査



回転ドラム追従実験装置

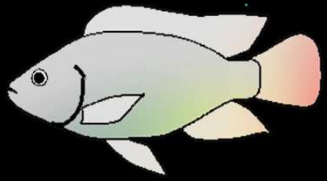


近赤外光領域を含む可視光長波長領域の光感知

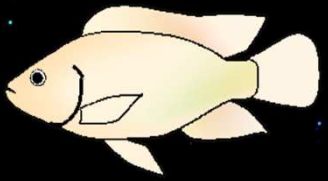


供試魚: ティラピア *Oreochromis niloticus*

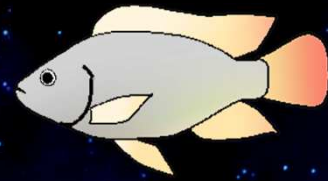
2006年の航空機実験に用いたティラピアの家系図



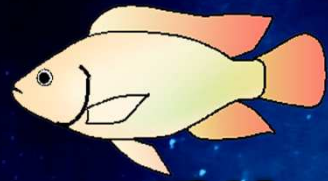
G8 系統
(雌)



J1 系統
(雌)



G8 系統
(雄)



J1 系統
(雄)



G8 系統



G8 × J1



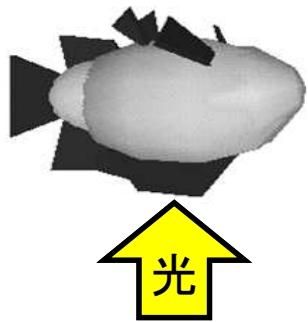
J1 × G8



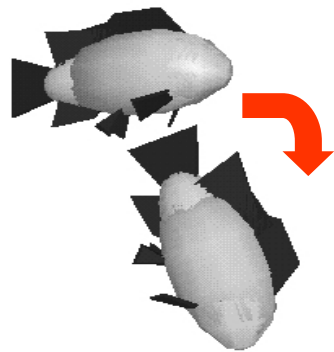
J1 系統

2系統から生産された4個体群を使用

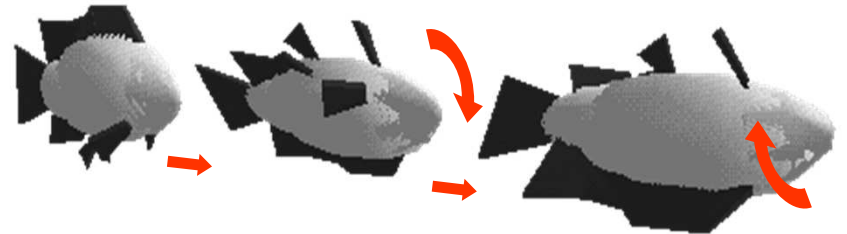
微小重力下における遊泳行動



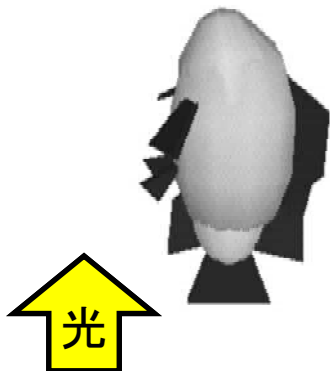
正常遊泳
背光反射



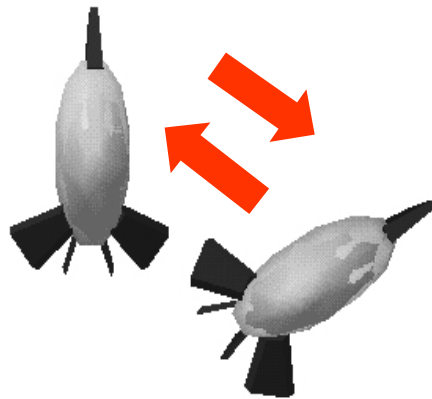
頭部下降



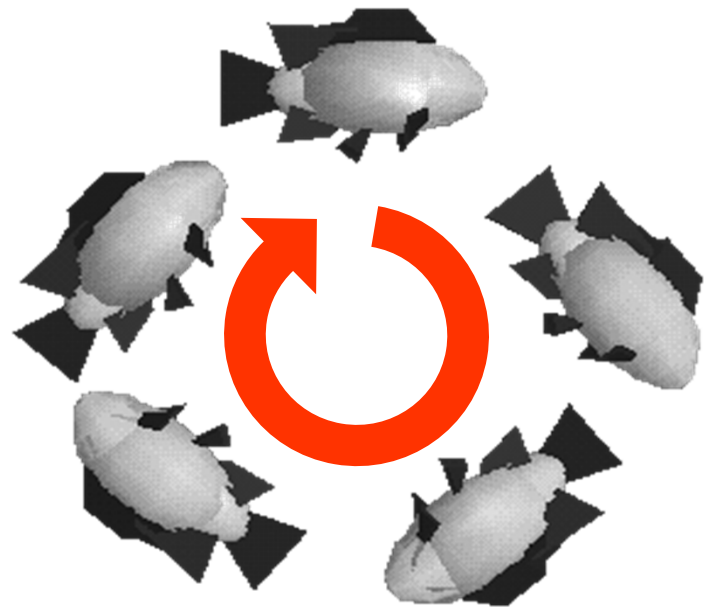
左右回転



正常遊泳
背光反射以外



左右傾斜

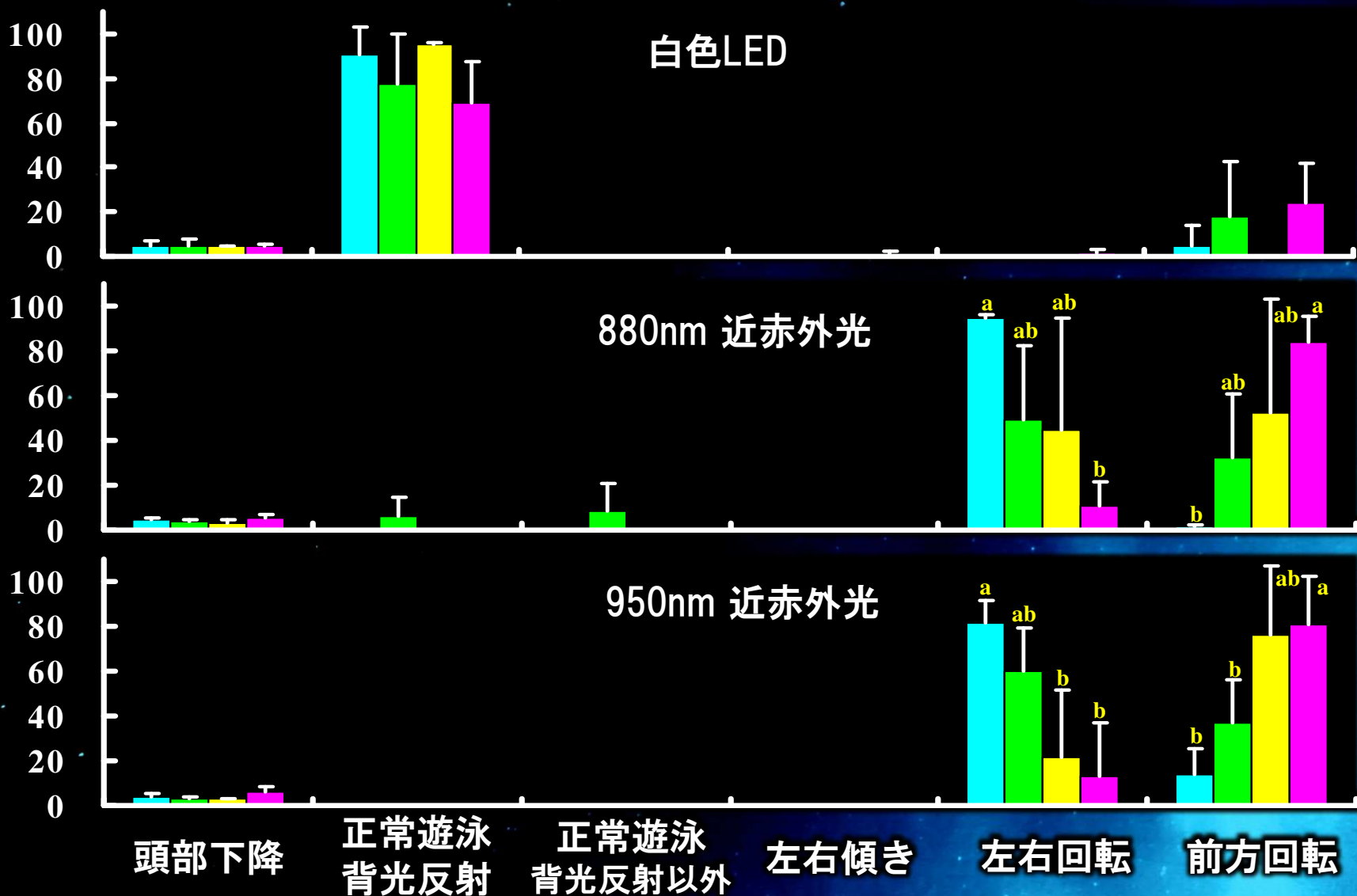


前方回転

微小重力下における各光照射時の系統別行動パターン

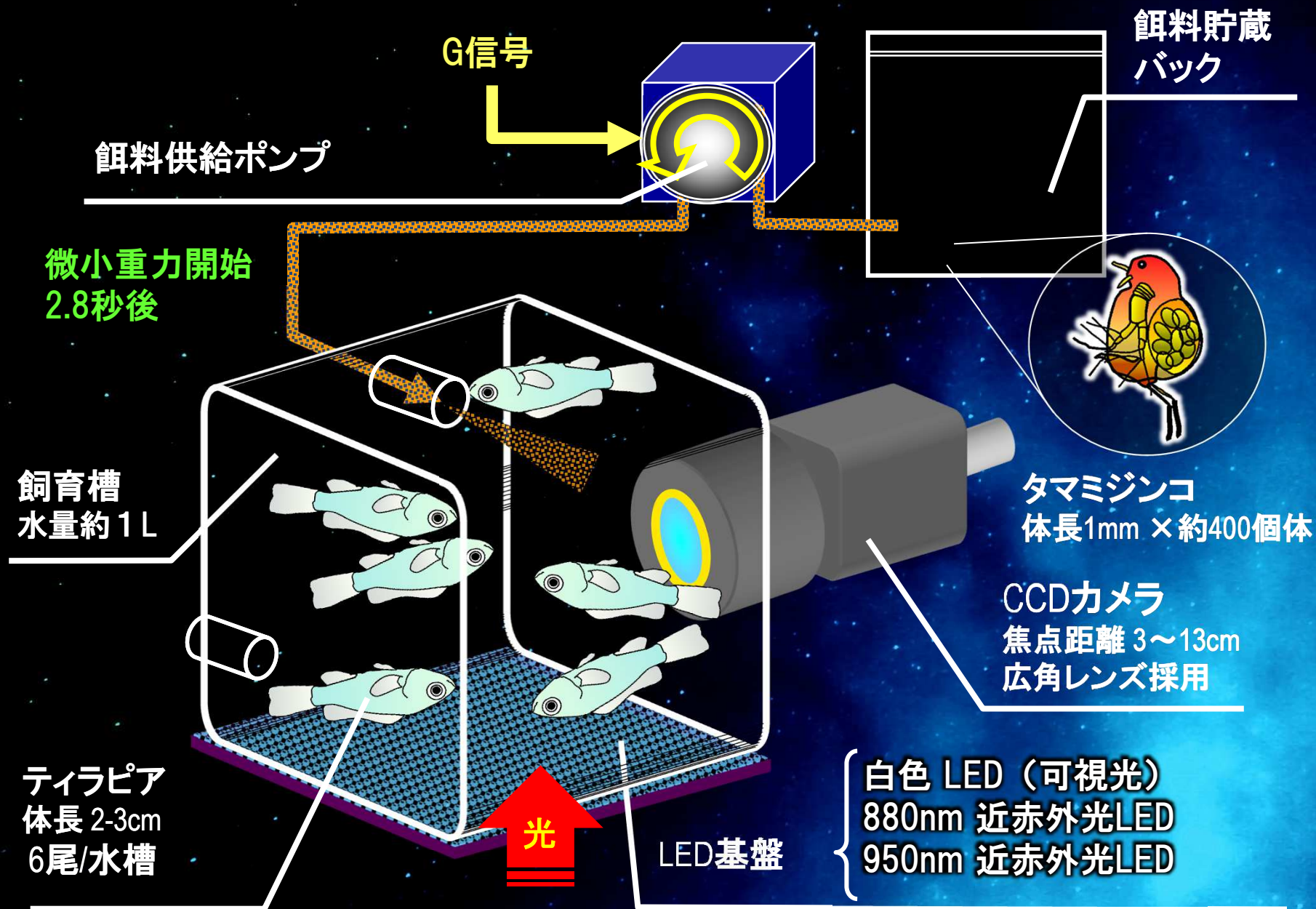
■ G8 系統 ■ G8 × J1 ■ J1 × G8 ■ J1 系統

微小重力暴露時間に対する各遊泳行動パターンの割合 (%)



※ 異なるアルファベットは個体群間の有意差を示す(Tukeyの多重比較検定, $p < 0.05$)

微小重力下におけるティラピアの遊泳と摂餌行動に関する研究



供給されたタマミジンコに対する摂餌された数の割合 (%)

条件		水槽 A								水槽 B							
重力	光種	摂餌した割合(%)							供給 個体数	摂餌した割合(%)							供給 個体数
		H-1	H-5	M-1	L-1	L-2	L-3	合計		H-2	H-3	H-4	H-6	H-7	M-2	合計	
μG	可視光	5	27	6	15	10	13	76	52	14	6	19	21	27	14	100	22
	近赤外光 (880nm)	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	29
	近赤外光 (950nm)	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	24
1G (地上)	可視光	11	43	5	11	12	18	100	40	6	25	10	8	40	11	100	38
	近赤外光 (880nm)	6	0	0	0	0	0	6	36	4	0	0	3	7	0	14	30
	近赤外光 (950nm)	0	0	0	0	0	0	0	33	0	4	0	0	5	0	9	24

μG、可視光下における摂餌時の遊泳行動パターン

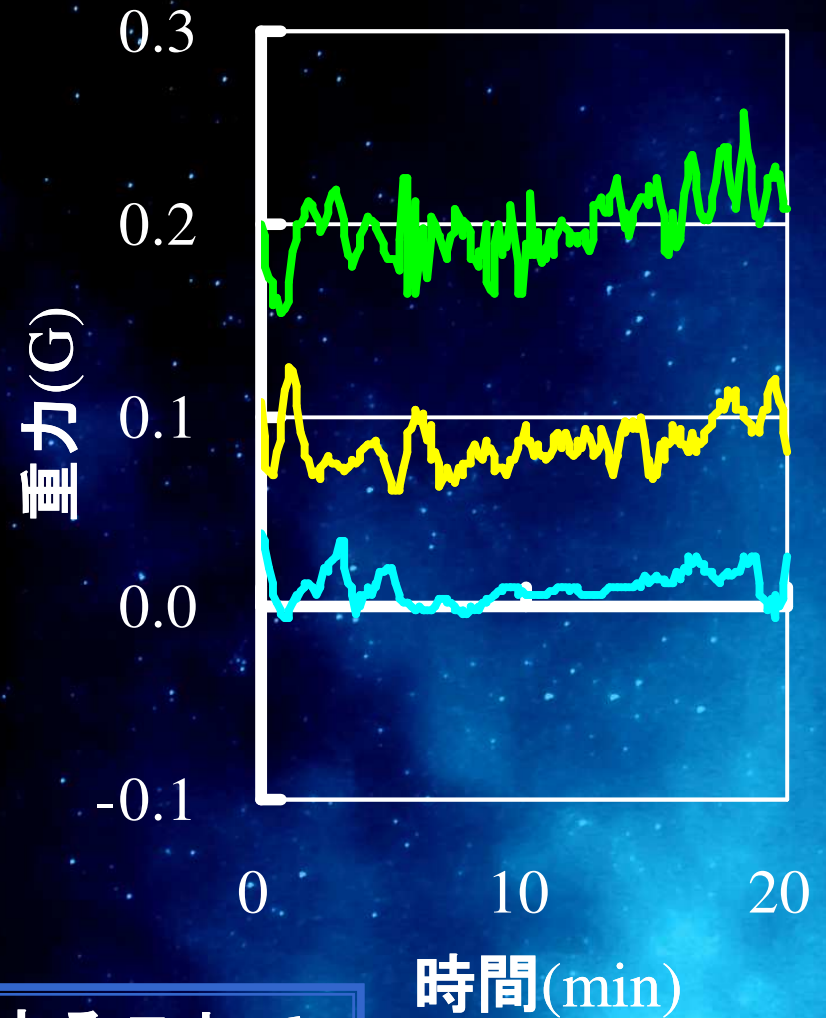
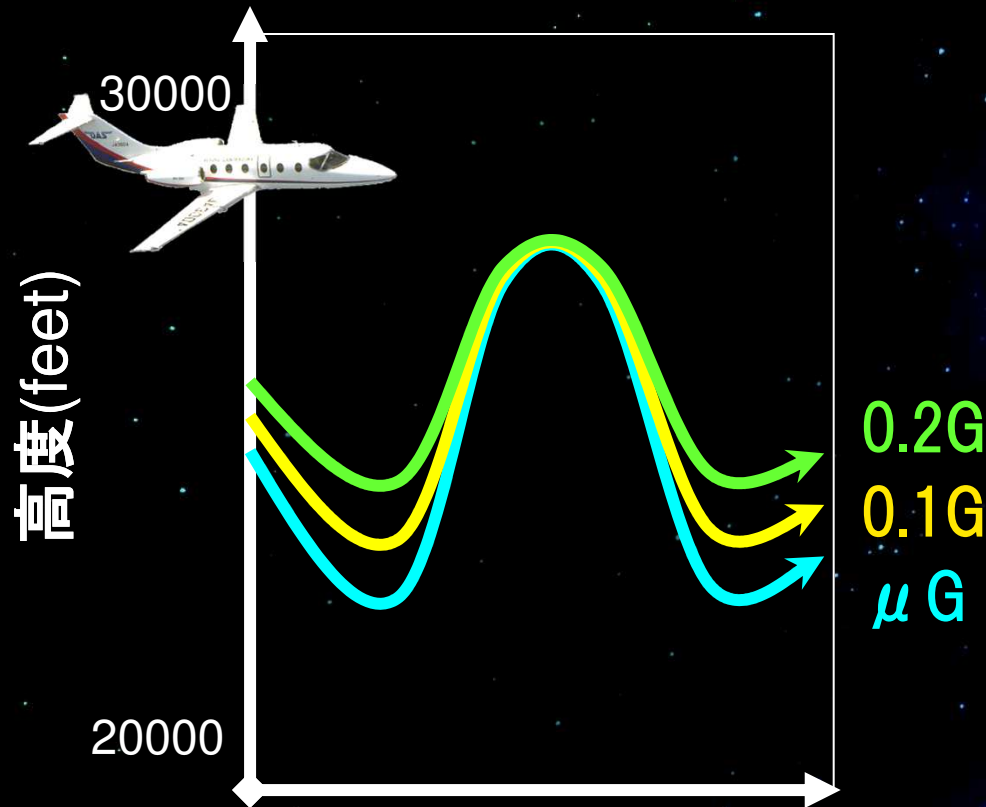
確認した62回の**摂餌行動全てが**
背光反射による正常遊泳

μGおよび1G下、可視光照射時における 摂餌行動の時間的比較

		μG	1G(地上)
餌を確認してから 捕食までの時間	(秒)	0.16 ± 0.03 (0.03 ~ 0.37)	0.15 ± 0.05 (0.04 ~ 0.37)
	N (回)	62	79
餌の投入から最初の 捕食までの時間	(秒)	3.88 ± 2.37 (0.33 ~ 12.75)	3.78 ± 1.94 (0.30 ~ 15.76)
	N (回)	24	29
捕食の間隔	(秒)	2.23 ± 0.96 (0.60 ~ 3.41)	1.88 ± 1.24 (0.50 ~ 3.96)
	N (回)	46	49

すべての項目において有意差なし(*t* 検定、*p* < 0.05)

航空機による低重力の発生

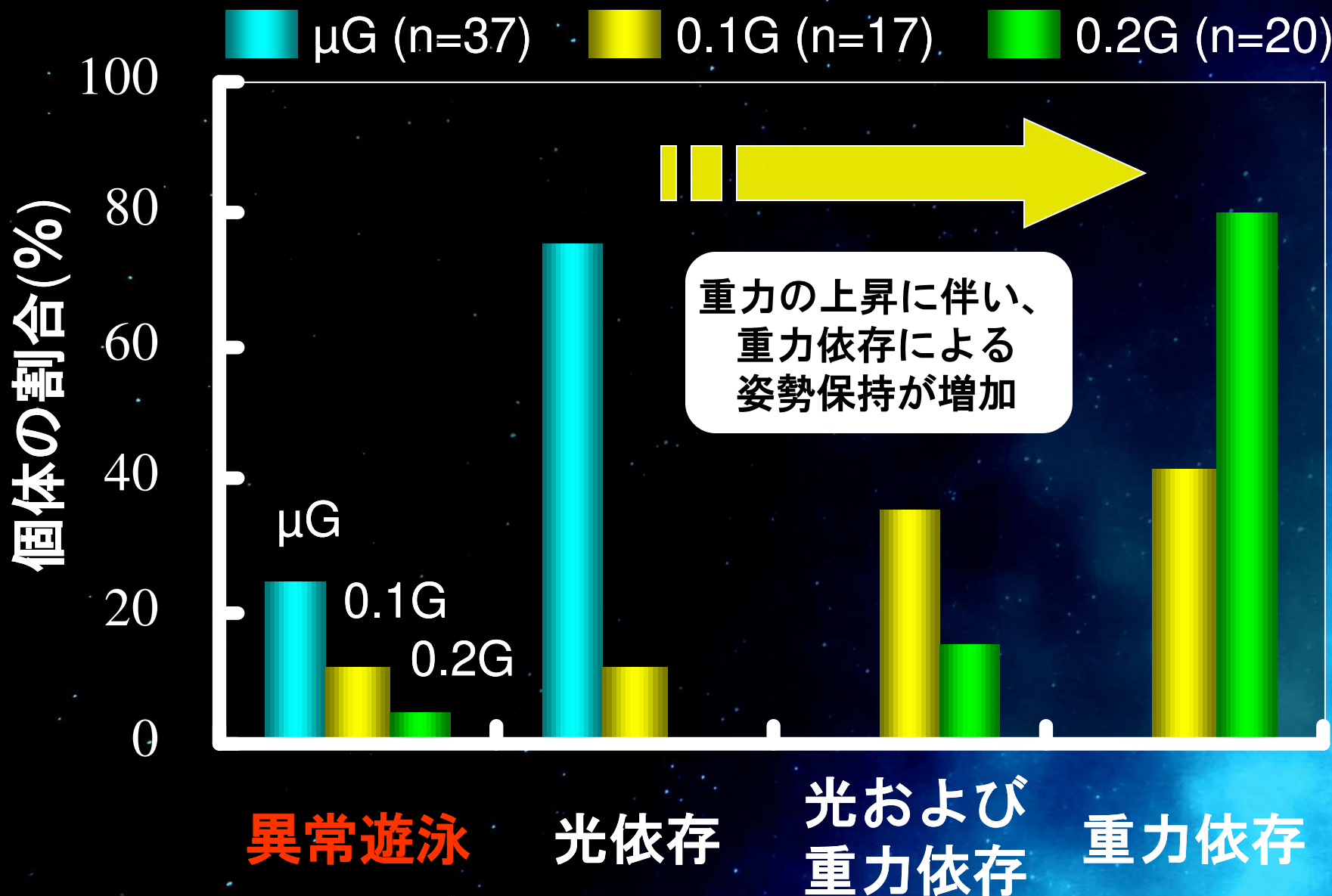


放物線よりも緩やかな軌道を維持することで
0.1および0.2G環境が得られる

姿勢保持における光および重力依存の分類

<p>上から下へ</p>	<p>異常遊泳</p>	<p>正常遊泳</p>	<p>正常遊泳</p>	<p>正常遊泳</p>
<p>下から上へ</p>	<p>異常遊泳</p>	<p>背光反射</p>	<p>異常遊泳</p>	<p>正常遊泳</p>
<p>光照射条件</p>	<p>異常遊泳</p>	<p>光依存</p>	<p>光および 重力依存</p>	<p>重力依存</p>

姿勢保持における可視光および重力依存の調査結果





地上とは異なる重力下におけるティラピア 行動解析で分かったこと

- 1) 目の良し悪しが微小重力下での正常遊泳に影響し、目の良し悪しは遺伝する。
- 2) 同種2系統において暗視下の異常遊泳行動に差があることが明らかになった。
- 3) 微小重力下における摂餌行動は、可視光下において背光反射による正常遊泳の上に成り立ち、地上と同様の索餌・摂餌行動が可能であることが分かった。
- 4) ティラピアの姿勢保持において光依存から重力依存に切り替わる閾値は0.1G程度であり、0.2Gではほぼ重力に依存した遊泳行動を示すことが分かった。

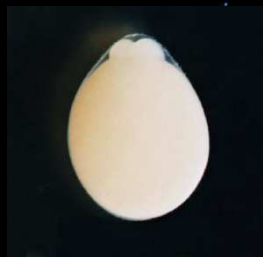
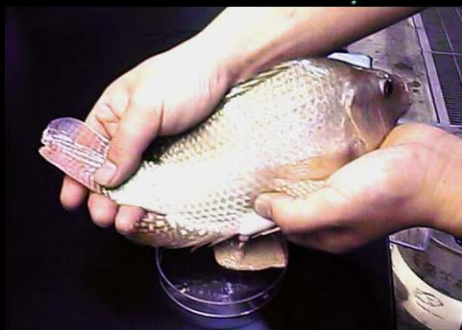
宇宙養殖における食用魚ティラピアの生物種としての課題

生存→**摂餌**→**成長**→**成熟**→**繁殖**

これまでの研究結果から微小重力および低重力下で**生存**が可能であることがわかった。

また、正常遊泳を行う個体では**摂餌**が可能であることもわかった。

長期的な微小重力および低重力実験により**成長・成熟**を確認後、人工採苗(**繁殖**)を行い、継代飼育の可能性を探る必要がある。



宇宙居住施設におけるティラピア養殖の適用

ティラピアの姿勢保持

光依存
重力伝...

光感知能力および微小重力下における姿勢保持能力に系統差があることから、
育種による微小重力耐性ティラピアの系統樹立

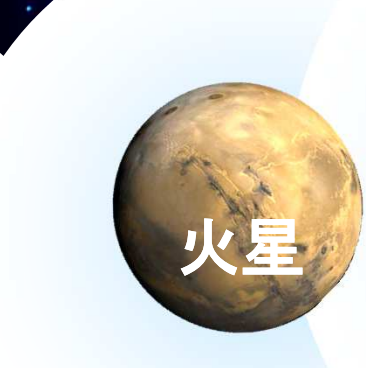
飼育装置



人工肺等の酸素供給
装置を装備した
密閉式無重力飼育装置

通気が可能な循環濾過式

居住施設
の建設地



重力値

μG

0.17G

0.38G

1.00G

4. まとめ

本講演のまとめ

これまでの研究によって異なる重力における水棲生物の飼育管理法、水産養殖を中心とした物質循環型養殖における物質フロー、エネルギー所要量などが分かってきた。

今後（これから）は宇宙居住施設の食料生産サブシステム全体、さらに居住施設全体の運用に関わる制御技術、物質フローの把握、エネルギー所要量の調査研究などが必要となる。

しかし、一人ではできなそう・・・