

# 攪拌培養条件下における褐藻ホンダワラの 葉状部と気胞の形成に対する密度の影響

遠藤 光, 山本圭吾, 西垣友和, 竹野功璽

京都府農林水産技術センター海洋センター

2010年3月

# 攪拌培養条件下における褐藻ホンダワラの葉状部と気胞の形成に対する密度の影響

遠藤 光, 山本圭吾, 西垣友和, 竹野功璽

Effect of density on formation of leaves and vesicles of brown algae *Sargassum fulvellum* under stirred culture conditions

Hikaru Endo, Keigo Yamamoto, Tomokazu Nishigaki and Koji Takeno

The effects of density on the formation of leaves and vesicles of the brown algae *Sargassum fulvellum* was studied under stirred culture conditions from August to October 2009. Negative density-dependent leaf formation occurred from August to September. Then, negative density-dependent growth of the main branch and vesicle formation occurred from September to October. These results suggest that the negative density-dependent growth of the main branch and vesicle formation were caused by expansion of the leaf area under stirred culture conditions, while it was reported that there was positive density-dependent elongation of the main branch of other *Sargassum* species on the sea bottom through competition for light.

キーワード：ホンダワラ, 密度, 葉状部, 気胞

ヒバマタ目ホンダワラ科ホンダワラ属褐藻のホンダワラ *Sargassum fulvellum* は、三陸沿岸を除く本州、四国、ならびに九州沿岸に分布し（吉田, 1998）、秋田県から鳥取県にかけての本州日本海沿岸で収穫されている（池原, 1987）。京都府では、ホンダワラの安定供給を図るために、養殖技術の普及と養殖用種苗の生産が行われている。ホンダワラの種苗は、春季の人工採苗後に基質から剥離され、翌年の秋季まで屋外水槽で濾過海水により攪拌培養されることによって生産される（西垣ら, 2007）。種苗を安定的に生産するためには、ホンダワラの成長速度や形態に対する培養密度の影響を明らかにし、種苗の形態を観察しながら順応的に密度管理を行う必要がある。

これまで、ヒバマタ目褐藻の成長速度および形態は、基質上の生育密度によって変化することが知られている（Kendrick, 1994; Creed *et al.*, 1996; Arenas *et al.*, 2002）。例えば、成長速度については、ホンダワラ属褐藻 *Sargassum* spp. およびヒバマタ目褐藻の1種 *Fucus vesiculosus* において、生育密度が高いほど低下することが報告されており（Kendrick, 1994; Creed *et al.*, 1996）、その原因は栄養塩の多寡にあると考えられている（Creed *et al.*, 1996）。また、形態については、タマハハキモク *Sargassum muticum* において、生育密度が高いほど主枝を伸長させ、側枝の数を減少させることが報告されており（Arenas *et al.*, 2002）、その原因は陸上植物と同様に日陰回避反応（shade avoidance response）、すなわち主枝の長い個体の陰では遠赤色光（FR）に対する赤色光（R）の割合（R/FR比）が低下するといった光質の変化が起こることによって主枝の

短い個体の伸長成長が促進されるためであると考えられている（Arenas *et al.*, 2002）。

一方、基質から剥離して攪拌培養を行ったホンダワラにおいても、幼体の成長速度は密度が高いほど低下することが明らかにされている（西垣ら, 2007）。しかし、攪拌培養条件下におけるホンダワラの形態に対する密度の影響は明らかでない。

ホンダワラの生活史は、発芽以後数枚の葉状部を形成する幼体期、連続的に形成された葉状部間に間隔が生じて茎が肉眼的に明瞭となる茎形成期、茎の頂端に主枝を形成して伸長させるとともに主枝に葉状部を多数形成する主枝伸長期、主枝に葉状部とともに気胞を形成する気胞形成期、主枝に葉状部、気胞とともに生殖器床を形成する成熟期の5つの成長段階に区分されている（三浦, 中林, 2002; 吉田ら, 2008）。本研究では、攪拌培養を行ったホンダワラの主枝の伸長、葉状部および気胞の形成に対する密度の影響を明らかにするため、主枝伸長期から気胞形成期にかけて、3段階の密度条件でホンダワラを培養し、それらの形態を比較した。

## 材料と方法

**実験に用いた藻体** 実験には2008年春季に採苗し、2009年夏季まで培養したホンダワラを用いた。すなわち、2008年3月27日に、京丹後市久美浜町蒲井沿岸において生殖器床を形成しているホンダワラの雌15個体と雄11個体を採集した。採集した海藻を、京都府農林水産技術センター海洋センター（以下、海洋センターと略す）の屋外水槽棟に設置したFRP製水槽（底面積

3 m<sup>2</sup>, 深さ75 cm)に收容し, 雌性生殖器床の表面に幼胚が付着するまで濾過海水をかけ流して4日間静置した。その後, 雌個体をプラスチック製コンテナ(55×85×18 cm)に收容し, 底面に幼胚が落下するまで3日間静置した。4月3日に, FRP製水槽(5×1×0.55 m)内にコンクリート製建材ブロック(40×20×15 cm)を敷き詰め, その上にコンテナから回収した幼胚を駒込ピペットで散布した。6月23日に, ブロック上に発芽した幼体期のホンダワラをスクレーパーで剥離して透明ポリカーボネイト製1 t水槽に收容し, 2009年8月5日まで換水率1回転/時間で通気培養を行った。なお, 6月23日~9月4日にかけては30個体/lの密度で, 9月4日~11月21日にかけては5個体/lの密度で, 11月21日~2009年8月5日にかけては3個体/lの密度で培養した。

**培養実験** 2009年8月5日に, 1 t水槽から全長約15 cmの主枝伸長期のホンダワラを90個体回収し, 西垣ら(2007)が設計した透明ポリカーボネイト製50 l水槽2基に5個体ずつ(密度0.1個体/l), 2基に15個体ずつ(密度0.3個体/l), 2基に25個体ずつ(密度0.5個体/l)收容し, それぞれを低密度区, 中密度区, ならびに高密度区とした。換水率は1.8~2.0回転/時間とし, 通気培養を行った。また, 同時に1 t水槽から全長約15 cmの15個体を回収し, 葉状部と気胞の数を測定した。その後, 主枝, 葉状部, ならびに気胞に切り分け, 主枝長を1 m物差し(精度1 mm)で, 各部位の湿重量を電子天秤(精度0.1 g)で測定した。実験開始から40日後の9月14日と80日後の10月23日には, 各密度区の水槽2基のうちの1基から全個体を回収し, 上記と同様の項目を測定した。

ホンダワラの主枝長, 主枝重量, 葉状部数, 葉状部重量, 気胞数, 気胞重量の月間および密度区間の有意差は, 統計ソフトSPSS (SPSS社)を用いてKruskal-Wallis法により検定し, Scheffe法による多重比較を行った。

実験期間中の濾過海水温は, 海洋センターの取水海

水(栗田湾の水深12 mから揚水)の水温観測資料を参照した。

## 結 果

実験期間中の水温をFig. 1に示した。2009年の水温は, 8月1日~19日にかけて23.1~24.5°Cの範囲で推移し, 以後26日に26.1°Cへと急激に上昇した。その後, 10月27日の21.3°Cへと徐々に低下した。2009年の水温は同期間の過去10年間(1999年~2008年)の平均値と比べて, 8月には0.8~4.1°C, 9月には0.1~2.0°C, 10月には0.2~0.7°C低く推移した。

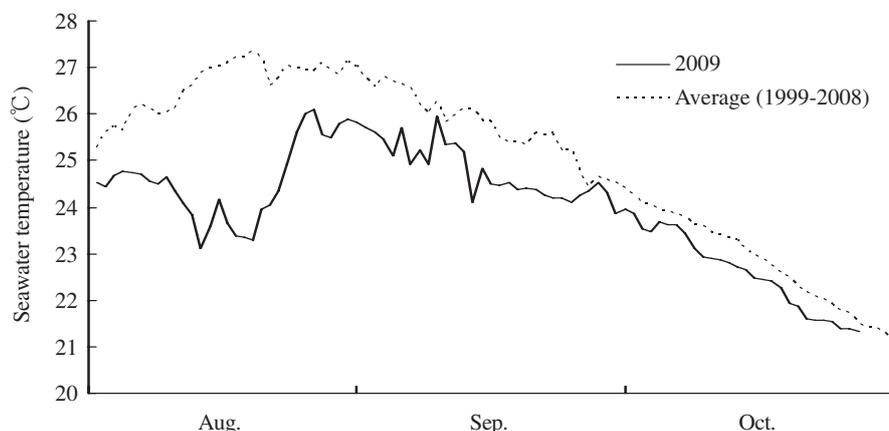
低密度区, 中密度区, 高密度区におけるホンダワラの主枝長, 主枝重量, 葉状部数, 葉状部重量, 気胞数, 気胞重量の経時変化をFig. 2に, 月間の有意差をTable 1に, 密度区間の有意差をTable 2に示した。

主枝長は, 8月の14.4 cmから有意に増加して9月にはそれぞれ32.8, 33.0, 31.1 cm, 10月にはそれぞれ68.9, 56.3, 47.9 cmとなった( $p < 0.0001$ )。9月の主枝長には密度区間の有意差は認められなかったが, 10月の主枝長は低密度ほど有意に長かった( $p < 0.05$ )。

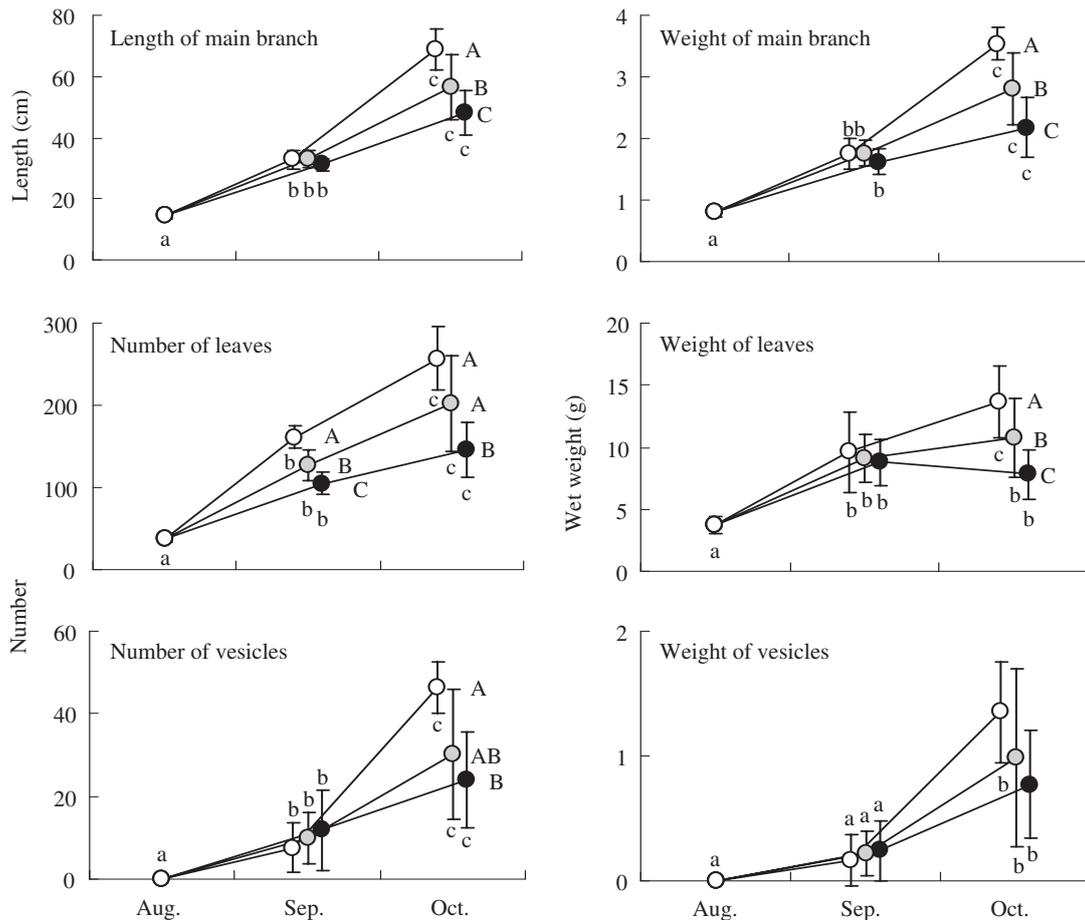
主枝重量は, 8月の0.80 gから有意に増加して9月にはそれぞれ1.76, 1.76, 1.62 g, 10月にはそれぞれ3.54, 2.81, 2.18 gとなった( $p < 0.0001$ )。9月の主枝重量には密度区間の有意差は認められなかったが, 10月の主枝重量は低密度ほど有意に大きかった( $p < 0.05$ )。

葉状部数は, 8月の38.5枚から有意に増加して9月にはそれぞれ161.4, 127.2, 105.0枚, 10月にはそれぞれ256.8, 201.9, 145.6枚となった( $p < 0.0001$ )。9月の葉状部数は低密度ほど有意に多く( $p < 0.0001$ )。10月の葉状部数は低・中密度区では高密度区よりも有意に多かった( $p < 0.01$ )。

葉状部重量は, 8月の3.73 gから9月のそれぞれ9.62, 9.06, 8.77 gへと有意に増加した( $p < 0.0001$ )。9月の葉状部重量には密度区間の有意差は認められなかったが, 低密度ほど大きくなる傾向が認められた。その後, 葉状部重量は低密度区では10月の13.66 gへと有意に増



**Fig. 1** Temporal changes in the seawater temperature during this study (solid line) and the average from 1999 to 2008 (dotted line).



**Fig. 2** Temporal changes in the length and weight of the main branch and number and weight of leaves and vesicles ( $\pm$ SD) of *Sargassum fulvellum* cultured at densities of 0.1 (white), 0.3 (grey), and 0.5 individuals / l (black) from 5 August to 23 October, 2009. Upper and lower case letters indicate the groups differentiated by Sheffe's method which were significant at  $p < 0.05$  among densities and months, respectively.

加した ( $p < 0.05$ )。中密度区では10.71 gへと増加したが、9月の値との間に有意差は認められなかった。高密度区では7.80 gへと減少したが、9月の値との間に有意差は認められなかった。10月の葉状部重量は低・中密度区では高密度区よりも有意に大きかった ( $p < 0.01$ )。

気胞数は、8月の0.0個から有意に増加して9月にはそれぞれ7.6, 9.9, 11.8個、10月にはそれぞれ46.2, 30.2, 23.9個となった ( $p < 0.05$ )。9月の気胞数には密度区間に有意差は認められなかったが、高密度ほど多くな

る傾向が認められた。10月の気胞数は低密度区では高密度区よりも有意に多かった ( $p < 0.01$ )。

気胞重量は、8月の0.00 gから9月にそれぞれ0.17, 0.22, 0.24 gへと増加したが、8月の値との間に有意差は認められなかった ( $p > 0.05$ )。9月の気胞重量には密度区間に有意差は認められなかったが、高密度ほど多くなる傾向が認められた。その後、気胞重量は10月のそれぞれ1.35, 0.99, 0.77 gへと有意に増加した ( $p < 0.0001$ )。10月の気胞重量には密度区間に有意差は認められなかったが、低密度ほど大きくなる傾向が認め

**Table 1** Statistical significance of morphological values of *Sargassum fulvellum* among months by Kruskal Wallis test.

|                       | 0.1 individual/l        |                   |          | 0.3 individual/l |    |          | 0.5 individual/l |    |          |
|-----------------------|-------------------------|-------------------|----------|------------------|----|----------|------------------|----|----------|
|                       | $\chi^2$ <sup>**1</sup> | df <sup>**2</sup> | p        | $\chi^2$         | df | p        | $\chi^2$         | df | p        |
| Length of main branch | 18.504                  | 2                 | <0.0001* | 38.978           | 2  | <0.0001* | 54.869           | 2  | <0.0001* |
| Weight of main branch | 18.483                  | 2                 | <0.0001* | 37.478           | 2  | <0.0001* | 45.887           | 2  | <0.0001* |
| Number of leaves      | 18.533                  | 2                 | <0.0001* | 35.704           | 2  | <0.0001* | 47.493           | 2  | <0.0001* |
| Weight of leaves      | 17.848                  | 2                 | <0.0001* | 30.324           | 2  | <0.0001* | 34.388           | 2  | <0.0001* |
| Number of vesicles    | 23.541                  | 2                 | <0.0001* | 37.833           | 2  | <0.0001* | 39.558           | 2  | <0.0001* |
| Weight of vesicles    | 23.529                  | 2                 | <0.0001* | 36.911           | 2  | <0.0001* | 44.757           | 2  | <0.0001* |

\*1 X squared

\*2 Degree of freedom

**Table 2** Statistical significance of morphological values of *Sargassum fulverum* among three density treatments by Kruskal Wallis test

|                       | September   |      |           | October  |    |           |
|-----------------------|-------------|------|-----------|----------|----|-----------|
|                       | $\chi^2$ ※1 | df※2 | p         | $\chi^2$ | df | p         |
| Length of main branch | 4.176       | 2    | 0.124     | 16.386   | 2  | <0.0001 * |
| Weight of main branch | 4.519       | 2    | 0.104     | 19.145   | 2  | <0.0001 * |
| Number of leaves      | 22.323      | 2    | <0.0001 * | 17.719   | 2  | <0.0001 * |
| Weight of leaves      | 0.246       | 2    | 0.884     | 16.813   | 2  | <0.0001 * |
| Number of vesicles    | 0.810       | 2    | 0.667     | 9.991    | 2  | 0.007 *   |
| Weight of vesicles    | 0.497       | 2    | 0.780     | 4.729    | 2  | 0.094     |

※1 X squared

※2 Degree of freedom

られた。

## 考 察

本研究において攪拌培養を行ったホンダワラは、基質上における生育密度が高いほど主枝の伸長成長を促進させるタマハハキモクの報告 (Arenas *et al.*, 2002) とは対照的に、低密度ほど主枝長を伸長させただけでなく、主枝重量も大きく増加させた。このことは、攪拌培養条件下では高密度であってもホンダワラの主枝の伸長成長が促進されずに、低密度ほど主枝の成長が促進されたことを示している。

タマハハキモクの主枝が高密度ほど長くなるのは、主枝の長い個体の陰では光質が変化することによって主枝の短い個体の伸長成長が促進されるためであると考えられている (Arenas *et al.*, 2002)。一方、攪拌培養条件下では高密度であっても継続的に他の個体の陰になることが少ないため、光を巡る競争が少なく、光質の変化の影響も小さいと考えられる。

また、攪拌培養を行ったホンダワラは、8月～9月には密度依存的な主枝および葉状部の成長を示さなかったが、低密度ほど葉状部数を著しく増加させ、それに次ぐ9月～10月には低密度ほど主枝と葉状部を成長させた。このことは、低密度ほど葉状部の形成が促進され、葉面積が拡大したことによって、主枝および葉状部の成長が保障されたことを示している。なお、低密度ほど葉状部数が多くなった原因は、攪拌培養条件下では光を巡る競争が少ないと考えられることから、栄養塩を巡る競争にある可能性が高い。

これらのことから、攪拌培養条件下におけるホンダワラの主枝長が高密度ほど短くなったのは、他の個体の陰になることが少ないために主枝の伸長成長があまり促進されないことに加えて、葉状部の形成が抑制されたために主枝の成長が保障されなかったためであると考えられる。したがって、攪拌培養条件下の種苗生産過程において、主枝が著しく短い個体や葉状部の著しく少ない個体が観察された場合には、培養密度を下げることによって葉状部の形成が促進され、それに次いで主枝の成長も促進されると考えられる。

一方、気胞の形成は8月～9月に開始されたが、気胞

の数および重量は、主枝の長さおよび重量と同様に8月～9月には密度依存的な増加を示さず、9月～10月に低密度ほど大きく増加した。したがって、気胞の形成は、主枝の成長と同様に葉状部の拡大によって保障されたと考えられる。しかし、9月における気胞数には、密度間に有意差が認められないものの、高密度ほど多くなる傾向が認められた。この傾向は葉状部数の結果とは対照的であることから、栄養塩を巡る競争以外の要因によってもたらされた可能性が高い。攪拌培養条件下では光を巡る競争が少ないと考えられたが、密度間における光量あるいは光質のわずかな差異によって気胞の形成開始時期が変化したのかもしれない。今後は、ホンダワラ属褐藻の気胞の形成に対する光量および光質の影響を検証することが望まれる。

## 文 献

- Arenas F., Viejo R.M., Fernandez C. 2002. Density-dependent regulation in an invasive seaweed: responses at plant and modular levels. *J. Ecol.*, **90**: 820-829.
- Creed J.C., Norton T.A., Kain J.M. 1996. Are neighbours harmful or helpful in *Fucus vesiculosus* populations? *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **133**: 191-201.
- 池原宏二. 1987. 日本海における食用としてのホンダワラとアカモク. *藻類*, **35**: 233-234.
- Kendrick G.A. 1994. Effects of propagule settlement density and adult canopy on survival of recruits of *Sargassum* spp. (Sargassaceae: Phaeophyta). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **103**: 129-140.
- 三浦信昭, 中林信康. 2002. 地域特産藻類増養殖技術開発研究 (ホンダワラ, アカモク, エゴノリ). 平成12年度秋田県水産振興センター事業報告書. 196-200. 秋田県水産振興センター, 秋田.
- 西垣友和, 道家章生, 和田洋蔵. 2007. 立体攪拌方式によるホンダワラの種苗生産. *京都海洋七研報*, **29**: 13-16.
- 吉田吾郎, 八谷光介, 寺脇利信. 2008. 天然および水槽培養下における褐藻ホンダワラの成長様式. *藻類*, **56**: 1-8.
- 吉田忠生. 1998. 新日本海藻誌. 内田老鶴圃, 東京.