

京都府沿岸におけるホンダワラ科海藻の炭素・窒素・リン含有量の季節変化

八谷光介^{1, 2}・西垣友和¹・道家章生^{1, 3}・和田洋藏¹

¹ 京都府立海洋センター (〒 626-0052 京都府宮津市小田宿野 1029-3)

² 現所属: (独) 水産総合研究センター西海区水産研究所 (〒 851-2213 長崎市多以良町 1551-8)

³ 現所属: 京都府水産課 (〒 602-8570 京都市上京区藪之内町)

Kousuke Yatsuya^{1,2}, Tomokazu Nishigaki¹, Akio Douke^{1,3} and Yoza Wada¹: Seasonal changes in carbon, nitrogen, and phosphorus contents of some sargassacean species in the coastal areas of Kyoto Prefecture, Sea of Japan. Jpn. J. Phycol. (Sôru) 56: 107–115, July 10, 2008

Carbon, nitrogen and phosphorus contents of sargassacean species in three coastal areas of Kyoto Prefecture, Sea of Japan, were investigated throughout the year. Carbon content did not show seasonal variation and ranged from 28.0 to 43.8% of dry weight. Range of nitrogen content was 0.64 to 5.10%. Nitrogen and phosphorus content of the leaf in the upper part of thallus varied seasonally, being higher in winter and spring. Maximum nitrogen content was ca. 3 to 4% in open coasts, and ca. 4 to 5% in an enclosed bay. Phosphorus content of thallus collected in the three areas was not as different as nitrogen contents, and range of phosphorus contents was from 0.033 to 0.331%. Nitrogen and phosphorus contents of leaf in the lower part of the thallus, main branch, and stem were relatively constant through the year. Data on the biomass and the carbon, nitrogen and phosphorus contents estimated that the maximum quantities of carbon, nitrogen and phosphorus stored in each sargassacean species were 211 to 1105 g C/m², 12.3 to 79.2 g N/m², and 0.63 to 4.47 g P/m², respectively.

Key Index Words: carbon, nitrogen, nutrient stored in Sargassum beds, phosphorus, sargassacean plant, Sea of Japan, seasonal change

¹Kyoto Institute of Oceanic and Fishery Science, 1029-3, Odasyukuno, Miyazu, Kyoto, 626-0052 Japan

²Present address: Seikai National Fisheries Research Institute, 1551-8, Taira-machi, Nagasaki, 851-2213 Japan

³Present address: Fishery Division, Kyoto Prefectural Government, Kamigyo-ku, Kyoto, 602-8570 Japan

藻場は、多くの魚介類に産卵・保育場や餌料を提供する生物生産機能だけでなく、海藻類による光合成や栄養塩吸収を通じて炭素・窒素・リンなどを大量に貯蔵する機能も有している。これらの物質は、食物連鎖網への取り込みや流れ藻による輸送を通じて藻場系外へ運び出され、様々な物理的・生物学的プロセスを経て循環する。藻場が沿岸域の物質循環において果たす機能は、大気中の二酸化炭素の増加による地球温暖化や沿岸域の富栄養化への対策として注目されている(有賀 2004)。ホンダワラ科海藻によって構成されるガラモ場については、日本沿岸の藻場の中では最も広い面積を有し(環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター 1994)、流れ藻の主要な供給源でもあることから、特に物質循環機能の定量的評価が求められている。

物質循環に果たすガラモ場の役割を明らかにするためには、藻場の面積や現存量を正確に把握することに加え、海藻による炭素・窒素・リン等の吸収・固定や藻場系外への流出等の収支を求める必要がある。そして、このような収支を求める際には、海藻類の炭素・窒素・リン含量について、その季節変化や部位による違いあるいは生育地による違いも考慮に入れて算定する必要がある。

海藻類の炭素・窒素・リン含量の季節的变化や部位による違いについての研究例は、コンブ類では比較的多数あるものの(例えば, Chapman & Craigie 1977, 1978, Rosell & Srivastava

1985, Mizuta *et al.* 1994, Flores-Moya *et al.* 1995), ホンダワラ科海藻ではごくわずかである(Wernberg *et al.* 2001, 吉田ら 2001)。ホンダワラ科海藻は、特定の時期に急速に生長・成熟し、現存量も明瞭な季節変化を示す(梅崎 1985)。また、海藻類の生長に必要な栄養塩濃度は、季節的に変化するとともに、陸域からの流入の度合いなどによって海域間でも違いがある。藻体内の炭素・窒素・リン含量が季節や生育地点によってどの

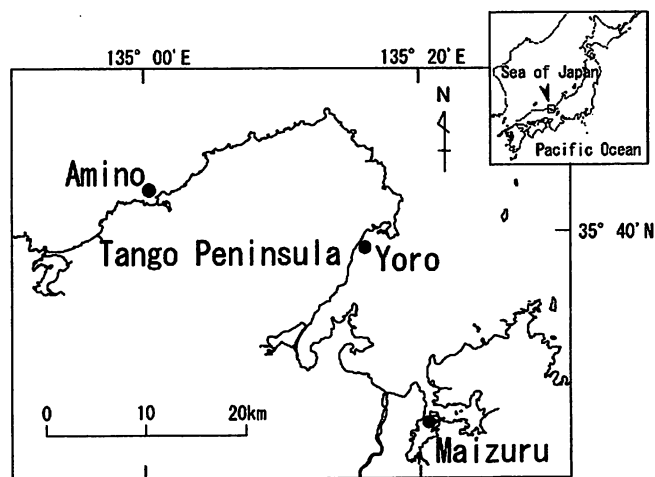


Fig. 1. Location of study sites, Yoro, Maizuru and Amino in Kyoto Prefecture.

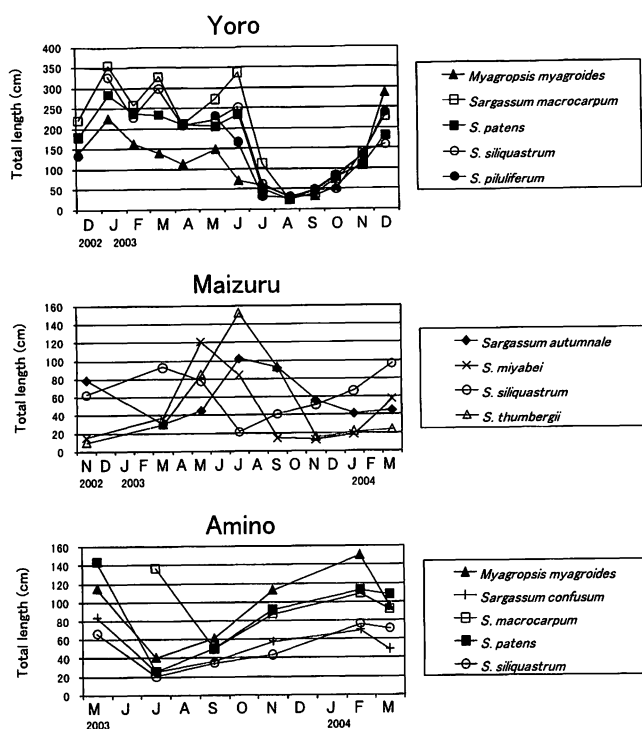


Fig. 2 Changes in mean total length of thalli collected for the analysis of carbon, nitrogen and phosphorus contents.

ように異なるのか明らかにすれば、ホンダワラ科海藻の生長・成熟と栄養塩との関連について新たな知見を得ることができる。

ホンダワラ科海藻は、気胞の浮力により直立するため、藻体の上部と下部で光環境が大きく異なる(村瀬 2001, 新村ら 2004)。そして、光合成活性や光合成色素含量(Gao & Umezaki 1988)、炭素安定同位体比(Ishihi *et al.* 2001)も、藻体の上部と下部で異なることが報告されている。したがって、炭素・窒素・リン含量についても部位間で異なる可能性があるが、その違いについてはこれまでに調べられていない。

京都府沿岸には外海である日本海沿岸域と内湾の舞鶴湾、

およびその中間の若狭湾と、環境特性の異なる3海域があり(Fig. 1)、それぞれの海域においてホンダワラ科海藻の最大現存量や年間純生産量が明らかにされている(八谷ら 2007)。しかし、その現存量や生産量を炭素・窒素・リンなどの量で表すためには、それらの物質の含有量の季節変化、部位による違い、生育地による違いなどを明らかにしなければならない。そこで本研究では、京都府沿岸3海域のガラモ場で優占するホンダワラ科海藻について、部位別に炭素・窒素・リン含量を測定し、その季節変化と生長や成熟との関連について検討するとともに、藻場において藻体中に固定された炭素・窒素・リンの現存量を定量的に評価した。

材料と方法

京都府沿岸における調査地として、日本海に面した網野、舞鶴湾内の舞鶴、および若狭湾に面した養老を選定した(Fig. 1)。これらの調査地はそれぞれ外海性、内湾性、およびその中間の海域特性を有しているが、その詳細は、Yatsuya *et al.* (2005)、八谷ら(2007)に記されている。それぞれの生育地で優占する4~5種の多年生ホンダワラ科海藻を採集した。すなわち、養老では、ジョロモク *Myagropsis myagroides* (Mertens ex Turner) Fensholt、ノコギリモク *Sargassum macrocarpum* C. Agardh、ヤツマタモク *S. patens* C. Agardh、ヨレモク *S. siliquastrum* (Turner) C. Agardh、マメタワラ *S. piluliferum* (Turner) C. Agardhの5種、舞鶴では、アキヨレモク *S. autumnale* Yoshida、ミヤベモク *S. miyabei* Yendo、ヨレモク、ウミトラノオ *S. thunbergii* (Mertens ex Roth) Kuntzeの4種、網野ではジョロモク、フシスジモク *S. confusum* C. Agardh、ノコギリモク、ヤツマタモク、ヨレモクの5種を採集した。採集期間と回数は、養老では2002年10月から2003年12月まで約1ヵ月間隔で14回、舞鶴では2002年11月から2004年3月まで約2ヵ月間隔で8回、網野では2003年5月から2004年3月まで約2ヵ月間隔で6回であった。なお、養老のヨレモクは2002年12月と

Table 1. Carbon, nitrogen and phosphorus contents (% of dry weight) of the three species of seaweeds in Yoro.

| Species | Part | Month | C (mean ± SD) | N (mean ± SD) | P (mean ± SD) |
|-------------------------|---------------|-------|------------------|------------------|------------------|
| <i>Ulva pertusa</i> | | Apr. | 28.5 ± 0.5 | 1.28 ± 0.10 | 0.113 ± 0.009 |
| | | Aug. | 31.6 ± 1.5 | 0.78 ± 0.09 | 0.068 ± 0.003 |
| <i>Ecklonia kurome</i> | upper lateral | Apr. | 34.4 ± 3.6 | 1.44 ± 0.22 | 0.090 ± 0.025 |
| | lower lateral | Apr. | 33.6 ± 1.3 | 1.92 ± 0.06 | 0.224 ± 0.013 |
| | lower lateral | Aug. | 41.1 ± 1.2 | 0.77 ± 0.04 | 0.056 ± 0.003 |
| | lower lateral | Dec. | 33.1 ± 0.1 | 2.43 ± 0.08 | 0.249 ± 0.022 |
| <i>Gelidium elegans</i> | | Apr. | 39.6 ± 1.2 | 2.17 ± 1.43 | 0.128 ± 0.006 |
| | | Aug. | 39.1 ± 1.4 | 1.73 ± 1.68 | 0.091 ± 0.018 |
| | | Dec. | 39.3 ± 0.5 | 2.33 ± 0.60 | 0.100 ± 0.003 |

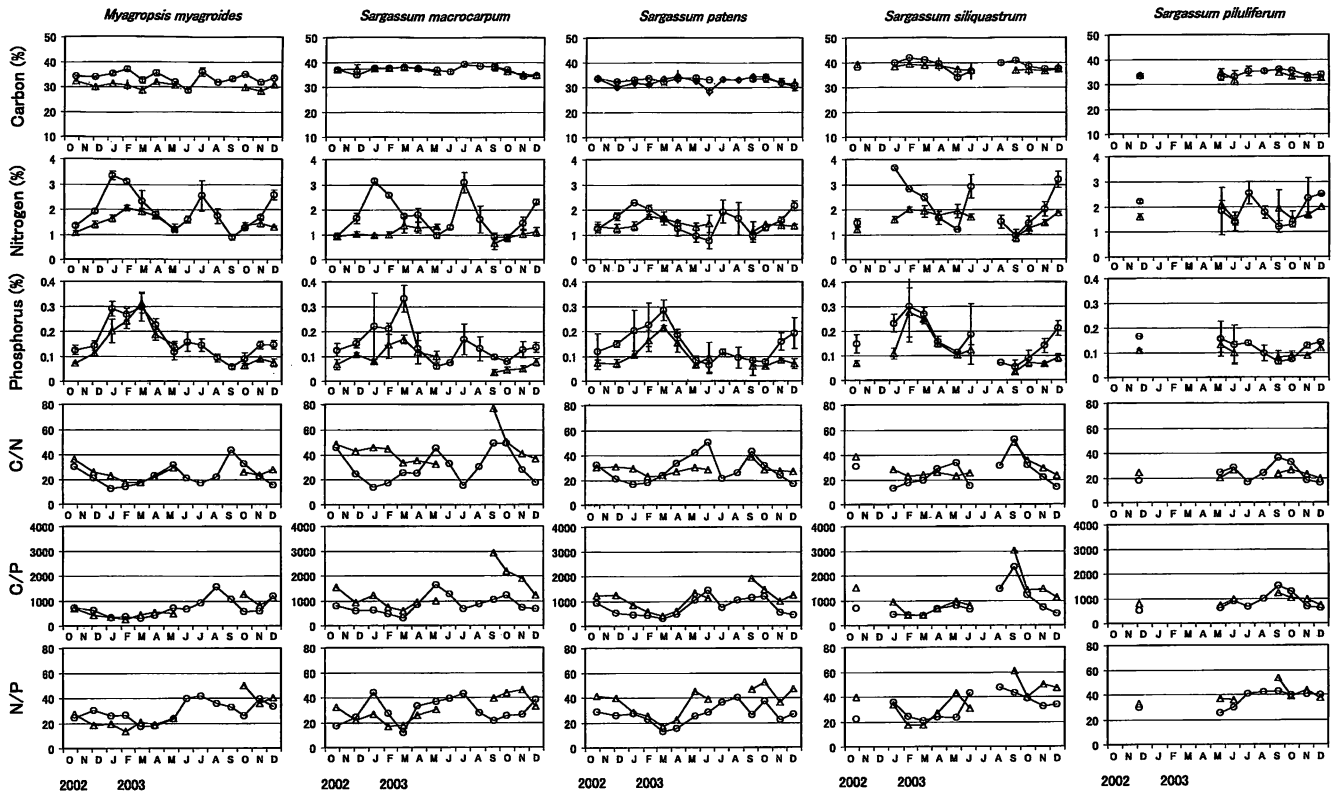


Fig. 3. Seasonal changes in carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents, and C/N, C/P and N/P of five sargassacean species in Yoro ($n = 3$). Carbon, nitrogen and phosphorus contents are expressed as percent by dry weight and C/N, C/P, N/P as atomic ratio. Circles and triangles indicate mean values of leaf in upper and lower parts of the thallus, respectively. Error bars for carbon, nitrogen and phosphorus contents indicate standard deviation.

2003年7月に、養老のマメタワラは2002年10月と2003年1月から4月に、網野のノコギリモクでは2003年5月に採集できなかった。ホンダワラ科海藻との比較のために、クロメ *Ecklonia kurome* Okamura, アナアオサ *Ulva pertusa* Kjellman, マクサ *Gelidium elegans* Kützinger を2003年4, 8, 12月に養老において採集した。クロメについては、中央葉の上部(4月のみ)と下部に形成された側葉を採取し、アナアオサとマクサについては付着器を取り除いた藻体全体を試料とした。採集水深(MSL基準面)は、養老では2.0~2.5 m, 舞鶴では0.5~1.3 m, 網野では3.0~5.5 mであった。

現場の海水を入れたクーラーボックスを用いて、採集した藻体を実験室に持ち帰り、ホンダワラ科海藻の場合には、全長を測定した後に、藻体の上部(藻体の先端部)と下部(藻体の高さ1/3以下の部位)の葉を切り取った。ただし、藻体の全長が50 cm以下の場合には、藻体上部の葉のみを採取した。また、養老については4ヵ月に1回の頻度で、主枝(全長の半分程度の高さの部位)と茎からも試料を得た。

試料については、付着物をピンセットで可能な限り取り除き、80°Cで24時間乾燥後、乳鉢と乳棒で粉末状に磨り潰して、測定時までデシケーター内で保存した。炭素および窒素含量はCHNコーダー(Yanaco, MT-5)を用いて測定し、リン含量はペルオキシ二硫酸カリウム分解-モリブデンブルー法(日

本分析化学会北海道支部2005)により分光光度計(Shimadzu, UV-2400PC)を用いて比色定量した。各種とも3個体を採集し、それぞれの個体の部位から1試料を分析し、結果については各部位ごとに3個体の平均値で示した。炭素(C)、窒素(N)、リン(P)含量については乾燥重量に占める各元素の重量割合(%)で示し、C/N, C/P, N/Pについては原子(モル)比で示した。

生育地の藻場における単位面積(m²)当たりの藻体現存量(Yatsuya *et al.* 2005, 八谷ら2007)に、同じ調査時の藻体中の炭素・窒素・リン含量を乗じたものを、それぞれの元素の貯蔵量とした。貯蔵量の計算における炭素・窒素・リン含量には、藻体上部と下部の葉の平均値を用いた。既報(Yatsuya *et al.* 2005, 八谷ら2007)により現存量が明らかになっている種を対象に、現存量が最大となった月と窒素・リン含量が最大となった月について、藻場における各元素の貯蔵量を推計した。

結果 養老

試料を採集したホンダワラ類の全長の変化をFig. 2に示す。養老のホンダワラ科海藻の各種は秋から冬にかけて急速に伸長し、12月には全長が2 m前後に達した。冬から春にかけて全長は年間最大に達し、年間最大全長は

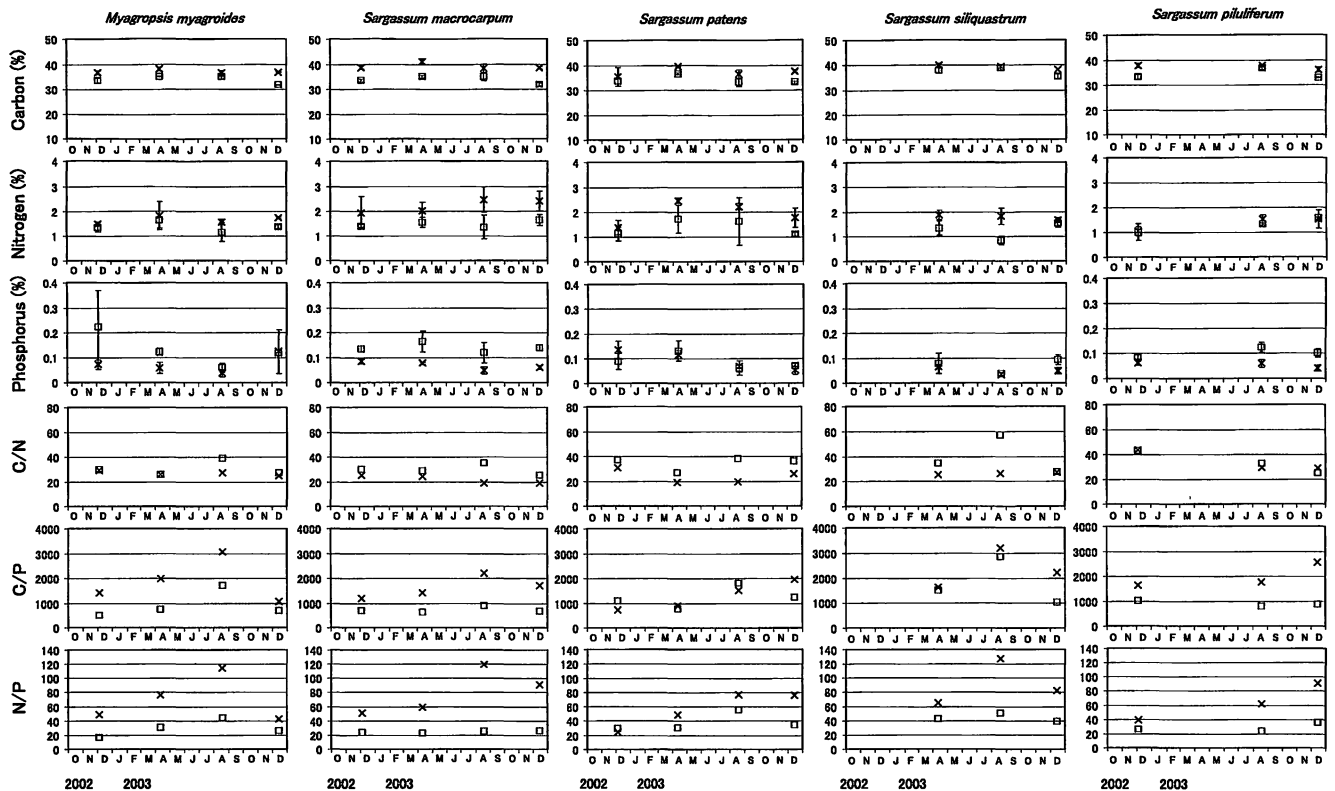


Fig. 4. Seasonal changes in carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents, and C/N, C/P and N/P of five sargassacean species in Yoro ($n = 3$). Squares and crosses indicate the mean values of main branch and stem, respectively.

ジョロモクでは約2 mであり、それ以外の種では3～4 mであった。生殖器床を形成していた期間は、ジョロモクが2～4月、ヨレモクが3～5月、ノコギリモクが3～6月、マメタワラが4、5月、ヤツマタモクが5、6月であった。成熟期が終わると、上部の空間を占めていた長い主枝が流失し、7月から藻体下部で短い新主枝が伸長しはじめた。いずれの種も9月に全長30～50 cmに達するまでは、新主枝の生長速度は緩やかであったが、それ以降は急速に伸長した。

養老のホンダワラ科海藻の炭素・窒素・リン含量(重量%)およびC/N, C/P, N/P(原子比)の季節変化のうち、藻体上部と下部の葉のものをFig. 3に、主枝と茎のものをFig. 4に示す。各種および各部位それぞれの炭素含量の変化には明瞭な季節的傾向が認められず、窒素やリン含量と比較して相対的に年間の変動幅は小さかった。全ての試料の炭素含量の範囲は28.2～41.6%であった。ジョロモクでは上部の葉の炭素含量が下部の葉のものより明らかに高かったが、それ以外の種では大きな差はなかった。また、全ての種において茎の炭素含量(35.4～40.9%)のほうが主枝の炭素含量(31.7～38.9%)よりも若干高い傾向がみられた。

窒素含量は、藻体上部の葉では季節的な増減がみられたが、下部の葉、主枝、茎では増減の幅が比較的小さかった。藻体上部の葉の窒素含量の範囲は0.75～3.65%であり、藻体下

部の葉、主枝、茎の窒素含量の範囲は、それぞれ0.64～2.06%、0.82～1.70%、1.03～2.46%であった。マメタワラ以外の種では、11月から3月に上部の葉の窒素含量が増加し、1月に年間最大となった。年間最大値はヨレモク、ジョロモク、ノコギリモク、ヤツマタモクの順に大きく、それぞれ3.65、3.32、3.13、2.27%であり、C/Nはそれぞれ12.7、12.4、14.0、16.3であった。また、調査期間の前半に欠測したマメタワラも含めて、新主枝が伸長を開始した6月から8月にかけて窒素含量の若干の増加がみられた。

C/Nは、炭素含量の変動幅が相対的に小さかったため、主に窒素含量の増減によって変動した。藻体上部の葉のC/Nの範囲は12.4～50.5であり、下部の葉のC/Nは2003年9月のノコギリモクの76.6を除き17.4～50.0の範囲内であった。主枝と茎のC/Nの範囲は、それぞれ24.5～57.4、18.7～43.3であった。

リン含量は、藻体上部と下部の葉で季節的な増減がみられたが、主枝と茎のものは変動の幅が比較的小さかった。藻体上部と下部の葉のリン含量の範囲は、それぞれ0.053～0.331%、0.033～0.311%であり、主枝と茎ではそれぞれ0.036～0.223%、0.039～0.134%であった。葉のリン含量は10月から上昇し、2、3月に年間最大に達し、その後5、6月まで減少した。リン含量の年間最大値は、ノコギリモク(0.331%)がもっとも高く、ヨレモク(0.301%)、ジョロモク(0.297%)、

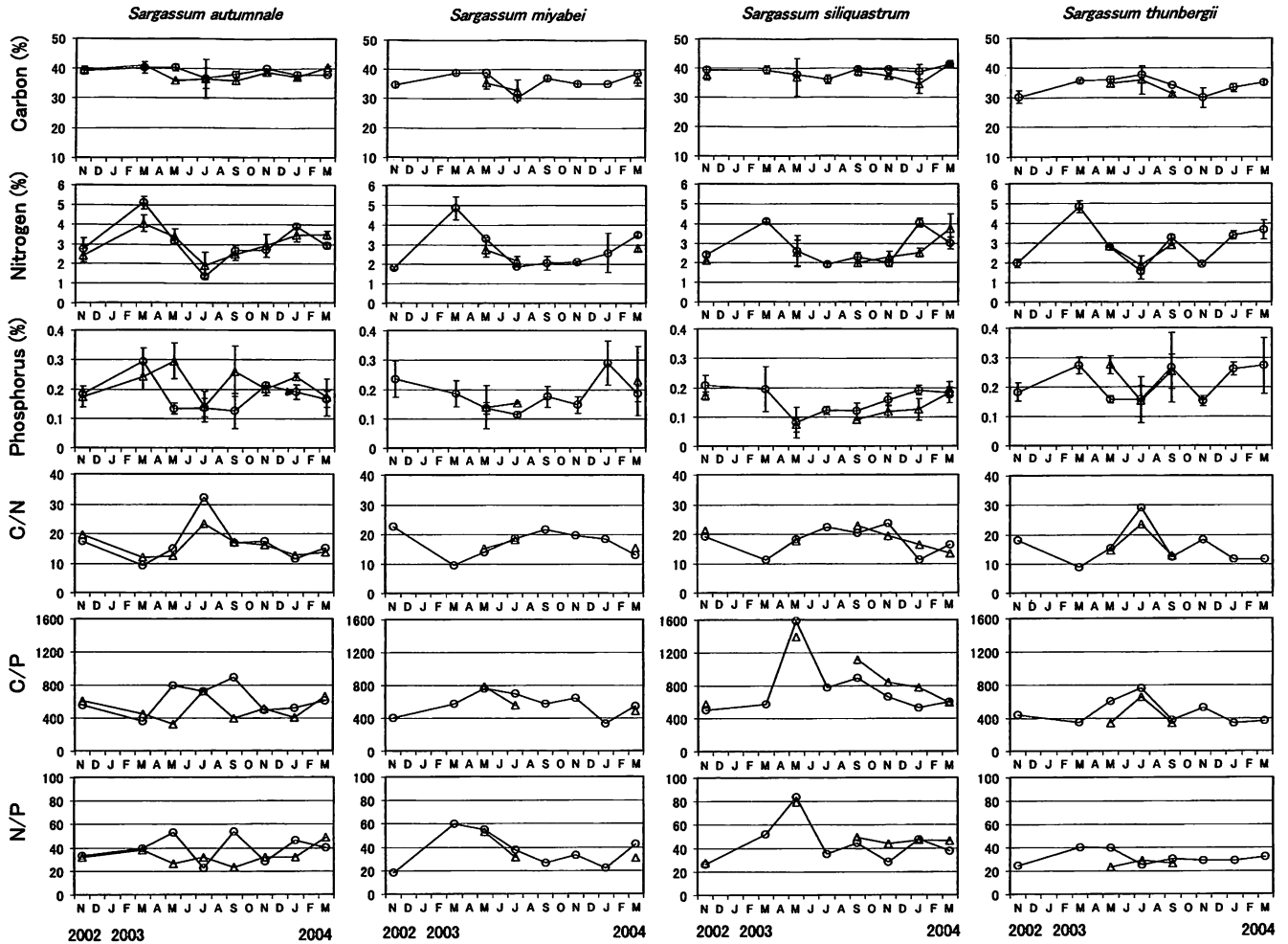


Fig. 5. Seasonal changes in carbon, nitrogen and phosphorus contents, and C/N, C/P and N/P of four sargassacean species in Maizuru ($n = 3$). Symbols are as in Fig. 3.

ヤツマタモク (0.284%) と減少した。また、新しい主枝が伸長し始めた 6, 7 月にも、葉のリン含量はやや増加した。ジョロモクとヨレモクでは、藻体上部と下部の葉のリン含量はほぼ同様な値を示しながら変動したが、ノコギリモクとヤツマタモクでは、藻体下部の葉のリン含量が上部の葉ほど増加しなかった。また、全ての種において葉のリン含量は 9, 10 月に年間最小となった。

藻体上部と下部の葉の C/P の範囲は、それぞれ 287 ~ 2344, 238 ~ 3014 であり、主枝と茎では、それぞれ 619 ~ 2841, 900 ~ 3192 であった。N/P の範囲は、茎 (23.8 ~ 126.7) のほうが葉 (11.9 ~ 60.7) と主枝 (16.6 ~ 55.0) よりも大きい傾向があった。

4, 8, 12 月に測定したアナアオサ、クロメ、マクサの炭素・窒素・リン含量を Table 1 に示す。炭素含量はアナアオサ (28.5 ~ 31.6%) とマクサ (39.1 ~ 39.6%) では大きく変化しなかったが、クロメでは 8 月に 41.1% となり、4 月と 12 月の 33.1 ~ 34.4% よりも増加した。窒素・リン含量は、各種とも 4 月と 12 月に比べ、8 月に減少する傾向が認められ、特にクロメ

では顕著であった。アナアオサ、クロメ、マクサの 3 種が示した炭素・窒素・リン含量の範囲は、それぞれ 28.5 ~ 41.1%, 0.77 ~ 2.43%, 0.068 ~ 0.249% であり、これらはホンダワラ科海藻の示した値の範囲内であった。

舞鶴

ホンダワラ科海藻の全長は、ヨレモクでは 3 月、ミヤベモクでは 5 月、ウミトラノオとアキヨレモクでは 7 月に年間最大となった (Fig. 2)。これらの種の年間最大全長は 1.0 ~ 1.5 m であり、各種とも最大全長に達した月から生殖器床を形成した。成熟した主枝は放卵後に流失し、ヨレモクでは 7 月、ミヤベモクは 9 月、ウミトラノオは 11 月、アキヨレモクは 1 月に全長が年間最小となった (Fig. 2)。

舞鶴のホンダワラ科海藻の炭素・窒素・リン含量 (重量%) および C/N, C/P, N/P (原子比) を Fig. 5 に示す。各種および各部位それぞれの炭素含量の変化には、明瞭な季節的傾向が認められず、窒素やリン含量と比較して相対的に年間の変動幅は小さかった。舞鶴で採取された全ての試料の炭素含

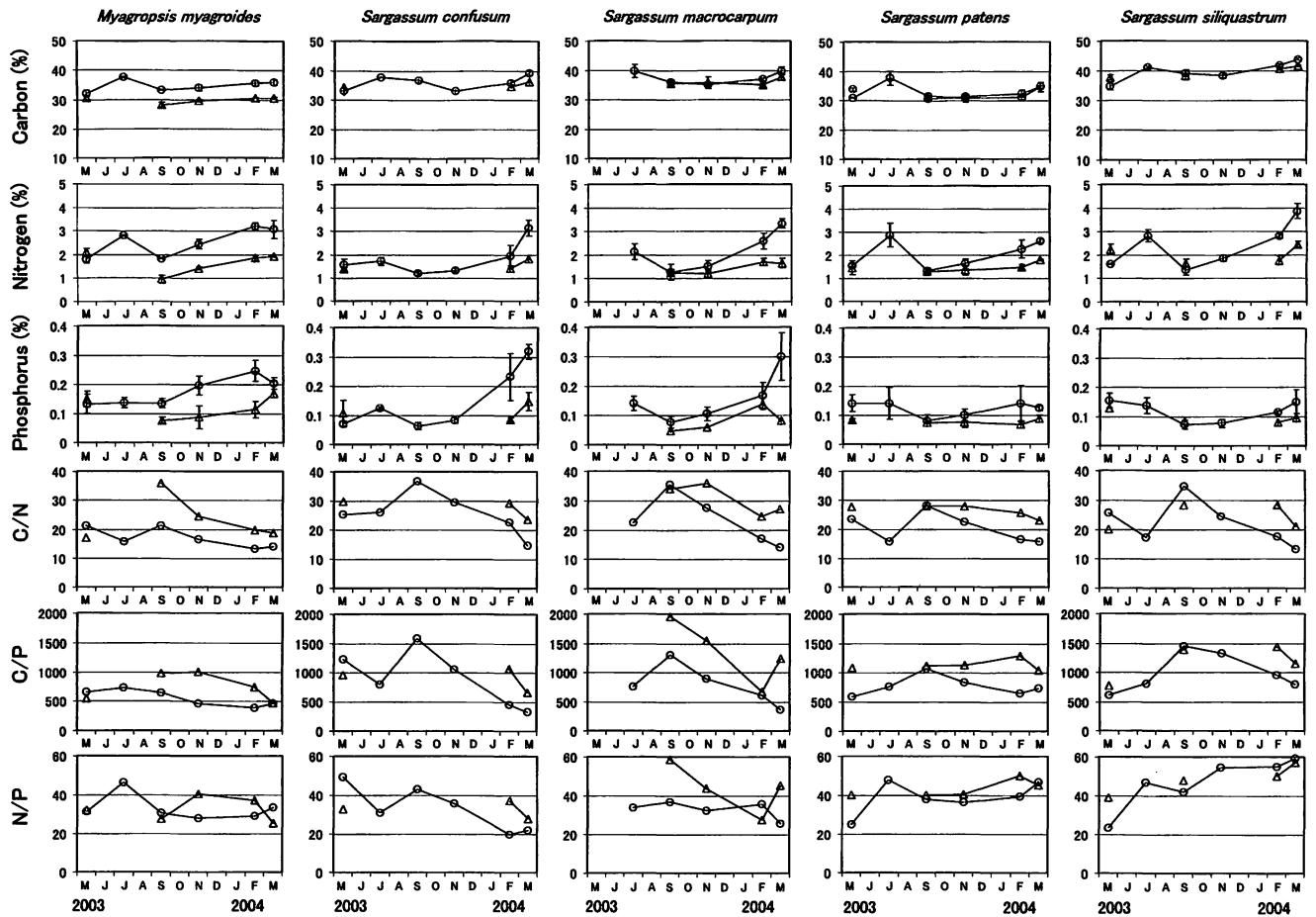


Fig. 6. Seasonal changes in carbon, nitrogen and phosphorus contents, and C/N, C/P and N/P of five sargassacean species in Amino ($n = 3$). Symbols are as in Fig. 3.

量の範囲は 29.8 ~ 40.8% であった。

藻体上部と下部の葉の窒素含量は、ほぼ同様な季節変化を示した。窒素含量は 2002 年 11 月から翌年 3 月にかけて増加し、その後 7 月まで減少した。窒素含量の年間の変動範囲は藻体上部と下部で、それぞれ 1.32 ~ 5.10%, 1.87 ~ 4.04% であった。藻体上部の葉の窒素含量は 2003 年 3 月に年間最大、7 月に年間最小となり、それらの変動範囲はアキヨレモク、ウミトラノオ、ミヤベモク、ヨレモクの順にそれぞれ 1.32 ~ 5.10%, 1.55 ~ 4.84%, 1.88 ~ 4.82%, 1.90 ~ 4.11% であった。また、2004 年 1, 3 月にも窒素含量は増加したが、その値は前年よりも低かった。C/N の範囲は、藻体上部と下部の葉でそれぞれ 8.6 ~ 32.2, 11.9 ~ 23.3 であった。

リン含量は、ヨレモクとミヤベモクでは、夏季に減少し秋季から春季にかけて増加する傾向がみられたが、アキヨレモクとウミトラノオでは、季節性の不明瞭な変化を示し、個体間の差も大きかった。リン含量の年間の変動範囲は、藻体上部と下部の葉でそれぞれ 0.080 ~ 0.292%, 0.071 ~ 0.294% であった。C/P の範囲は、藻体上部と下部の葉でそれぞれ 340 ~ 1579, 320 ~ 1390 であった。舞鶴で採取された全ての試料の N/P の範囲は 17.8 ~ 83.1 であった。

網野

ホンダワラ科海藻各種の全長は 7 月（ノコギリモクでは 9 月）に年間最小となり、そのときの全長は 20 ~ 50 cm であった (Fig. 2)。その後、秋季~春季にかけて主枝が伸長し、ジョロモクでは 2 月、ヨレモクでは 3 月、フシスジモクとヤツマタモクでは 5 月、ノコギリモクでは 7 月に各種の全長が年間最大に達し、その全長は 0.8 ~ 1.5 m であった (Fig. 2)。各種とも全長が最大となった時期から生殖器床を形成し、その後 7 ~ 9 月までに成熟した主枝が流失した。

網野のホンダワラ科海藻の炭素・窒素・リン含量 (重量 %) および C/N, C/P, N/P (原子比) を Fig. 6 に示す。全ての種において、炭素含量の年間の変動幅は、窒素やリンよりも小さかった。藻体上部と下部の葉の炭素含量の範囲は、それぞれ 30.7 ~ 43.8%, 28.0 ~ 41.4% であった。

藻体上部の葉の窒素含量は、下部の葉のものに比べ年間の変動幅が大きく、上部と下部の葉の窒素含量の範囲は、それぞれ 1.26 ~ 3.84%, 0.94 ~ 2.43% であった。藻体上部の葉の窒素含量は、ヤツマタモク以外の種において 2, 3 月に年間最大値を示し、新しい主枝が伸長しはじめた 7 月にも増加した。藻体上部の葉の窒素含量の年間最大値はヨレモク、ノコギリモク、ジョロ

Table 2. Quantity of carbon, nitrogen and phosphorus stored in sargassacean plants growing in *Sargassum* beds with their maximum biomass.

| Site | Species | Month of maximum biomass* | Maximum biomass* (g dw/m ²) | Percentage by dry weight (%) | | | Stored quantity (g/m ²) | | |
|---------|------------------------------|---------------------------|---|------------------------------|------|-------|-------------------------------------|------|------|
| | | | | C | N | P | C | N | P |
| Yoro | <i>Myagropsis myagroides</i> | Apr. | 779 | 33.6 | 1.76 | 0.205 | 262 | 13.7 | 1.60 |
| | <i>Sargassum macrocarpum</i> | Apr. | 1263 | 37.5 | 1.52 | 0.124 | 473 | 19.2 | 1.57 |
| | <i>S. patens</i> | May | 1607 | 33.1 | 1.12 | 0.074 | 532 | 18.0 | 1.19 |
| | <i>S. siliquastrum</i> | Apr. | 1108 | 39.0 | 1.70 | 0.152 | 432 | 18.8 | 1.68 |
| Maizuru | <i>S. autumnale</i> | Jul. | 3038 | 36.4 | 1.61 | 0.137 | 1105 | 48.9 | 4.16 |
| | <i>S. siliquastrum</i> | Mar. | 2122 | 40.3 | 3.73 | 0.188 | 855 | 79.2 | 3.99 |
| Amino | <i>M. myagroides</i> | Feb. | 766 | 33.0 | 2.51 | 0.179 | 253 | 19.2 | 1.37 |
| | <i>S. siliquastrum</i> | Jul. | 492 | 42.9 | 3.33 | 0.129 | 211 | 16.4 | 0.63 |
| | <i>S. confusum</i> | May | 839 | 33.6 | 1.46 | 0.088 | 282 | 12.3 | 0.74 |

* Biomass of the plants are cited from our previous studies (Yatsuya *et al.* 2005, Yatsuya *et al.* 2007)

Table 3. Quantity of nitrogen and phosphorus stored in sargassacean plants growing in *Sargassum* beds with their maximum N, P content.

| Site | Species | Month of maximum N content | Nitrogen | | | Month of maximum P content | Phosphorus | | |
|---------|------------------------------|----------------------------|---------------|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| | | | N content (%) | Biomass* (g dw/m ²) | Stored quantity (g N/m ²) | | P content (%) | Biomass* (g dw/m ²) | Stored quantity (g P/m ²) |
| Yoro | <i>Myagropsis myagroides</i> | Feb. | 2.58 | 399 | 10.3 | Mar. | 0.304 | 271 | 0.83 |
| | <i>Sargassum macrocarpum</i> | Jan. | 2.04 | 315 | 6.4 | Mar. | 0.250 | 909 | 2.27 |
| | <i>S. patens</i> | Feb. | 1.89 | 862 | 16.3 | Mar. | 0.250 | 865 | 2.16 |
| | <i>S. siliquastrum</i> | Jan. | 2.62 | 389 | 10.2 | Feb. | 0.288 | 629 | 1.81 |
| Maizuru | <i>S. autumnale</i> | Mar. | 4.57 | 1676 | 76.6 | Mar. | 0.267 | 1676 | 4.47 |
| | <i>S. siliquastrum</i> | Mar. | 4.11 | 1578 | 64.9 | Mar. | 0.194 | 1578 | 3.06 |
| Amino | <i>M. myagroides</i> | Feb. | 2.51 | 237 | 5.9 | Mar. | 0.186 | 237 | 0.44 |
| | <i>S. siliquastrum</i> | Mar. | 3.33 | 261 | 8.7 | May | 0.140 | 261 | 0.37 |
| | <i>S. confusum</i> | Mar. | 2.47 | 459 | 11.3 | Mar. | 0.232 | 459 | 1.06 |

* Biomass of the plants are cited from our previous studies (Yatsuya *et al.* 2005, Yatsuya *et al.* 2007)

モク, フシスジモク, ヤツマタモクの順にそれぞれ 3.84%, 3.33%, 3.19%, 3.14%, 2.86% であった。C/N の範囲は, 藻体上部と下部の葉でそれぞれ 13.0 ~ 36.6, 16.9 ~ 35.9 であった。

藻体上部の葉のリン含量は, ジョロモク, フシスジモク, ノコギリモクの 3 種では, 季節的な増減が明瞭であったが, ヤツマタモクとヨレモクでは年間の変動幅が前記 3 種より相対的に小さかった。藻体上部の葉のリン含量の範囲は, 前 3 種では 0.062 ~ 0.317% であるのに対し, 後 2 種では 0.072 ~ 0.152% であった。ジョロモク, ノコギリモク, フシスジモクの藻体上部の葉のリン含量は, 秋季から冬季にかけて増加し, 2, 3 月に最も高くなった。また, ノコギリモクとフシスジモクでは, 7 月にも若干増加した。一方, 藻体下部の葉のリン含量は, 上部の葉と比較して年間の変動幅が小さく, その範囲は 0.047 ~ 0.148% であった。C/P の範囲は, 藻体上部と下部の葉でそれぞれ 319 ~ 1578, 467 ~ 1956 であった。網野で採取した全ての試料の N/P の範囲は 19.6 ~ 56.9 であった。

藻場における各種の炭素・窒素・リンの貯蔵量

ホンダワラ科海藻の各種が最大現存量を示した月における, 藻場単位面積 (m²) 当たりの炭素・窒素・リンの貯蔵量を Table 2 に示す。炭素貯蔵量は, 舞鶴の藻場 (855 ~ 1105 g C/m²) が最も大きく, 養老 (262 ~ 532 g C/m²) が続き, 網野 (211 ~ 282 g C/m²) が最も小さかった。また, 窒素・リンの貯蔵量も舞鶴, 養老, 網野の順に大きかった。それぞれの種の窒素・リン含量が最大となった月の両元素の貯蔵量を Table 3 に示す。なお, 炭素含量は, 窒素やリン含量に比べ変動の幅が相対的に小さかったため, この表に記載しなかった。窒素の貯蔵量は, 舞鶴の藻場では 64.9 ~ 76.6 g N/m² であり, 養老 (6.4 ~ 16.3 g N/m²) や網野 (5.9 ~ 11.3 g N/m²) よりも大きかった。また, リンの貯蔵量も舞鶴で大きく 3.06 ~ 4.47 g P/m² であり, 養老では 0.83 ~ 2.27 g P/m², 網野では 0.44 ~ 1.06 g P/m² であった。

藻場の窒素貯蔵量は、舞鶴のアキヨレモクを除き、藻体の現存量が最大に達した月に最大となったが、リン貯蔵量は、現存量が最大に達した月のほうが多くなる場合と、藻体内リン含量が最大となった月に多くなる場合があった (Tables 2, 3)。いずれの推定法を用いても、貯蔵量は窒素・リンともに舞鶴の藻場が最も大きく、養老、網野の順に減少した (Tables 2, 3)。

考察

京都府沿岸で調査されたホンダワラ科海藻の炭素・窒素・リン含量の範囲は、それぞれ 28.0～43.8%, 0.64～5.10%, 0.033～0.331% であった。これらの値は、これまでに調べられた他の海藻類の分析値 (Niell 1976, Atkinson & Smith 1983, Duarte 1992) の範囲内であり、ヒバマタ目やコンブ目で報告されている範囲 (Rosell & Srivastava 1985, Wheeler & Björnsäter 1992, Flores-Moya *et al.* 1995, Rico & Fernández 1997, Wernberg *et al.* 2001, 吉田ら 2001) とほぼ一致する。

本研究においては、ホンダワラ科海藻の炭素含量は、季節的あるいは部位別にほとんど変化しなかったが、クロメでは側葉部の 8 月の炭素含量が 4 月と 12 月よりも増加していた。ホンダワラ科やコンブ科海藻の炭素含量については、季節的に変化するものや (Chapman & Craigie 1978, Rosell & Srivastava 1985, 吉田 2005)、大きな季節変化がみられないもの (Mann 1972) がある。コンブ類で夏季に顕著な炭素含量の増加がみられるのは、この時期には日射量も多く光合成活性が高まるが、海水中の栄養塩不足によって藻体の生長が抑制され、光合成産物が活用されず藻体内に蓄積するためと考えられている (Chapman & Craigie 1977, 1978)。ホンダワラ科海藻の場合でも、光合成活性や同化産物の蓄積などの観点から、藻体中の炭素含量について検討する必要がある。

調査海域のひとつの舞鶴湾では、毎年 1, 5, 7, 11 月に湾内の 4 地点で海水中 (水深 0.5 m) の硝酸態窒素濃度が測定されている (京都府 2004–2007)。2002 年 5 月から 2006 年 1 月までの期間でみると、1 月に測定されたもののうち 94 % ($n = 16$) が検出限界 (0.01 mg/L) 以上であるのに対し、5, 7, 11 月ではそれぞれ 19%, 31%, 38% にとどまっておき (京都府 2004–2007)、1 月に硝酸態窒素濃度が上昇していることが示唆される。なお 1 月に検出限界以上となった硝酸態窒素濃度の平均値は 0.07 mg/L であった (京都府 2004–2007)。また、養老と網野にちかい波見崎沖と竹野川沖で測定された COD の平均値は、それぞれ 1.2 mg/L, 1.1 mg/L であり、舞鶴湾内 4 地点の平均値 2.0 mg/L よりも低く (京都府 2004–2007)、このことは舞鶴湾の栄養塩濃度が開放海岸の網野や養老よりも高かったことを示唆している。

海藻類の窒素含量は、海水中の栄養塩濃度を反映していると推察されており (Hanisak 1979)、広島湾のアカモク (吉田 2005) や北大西洋西岸の *Laminaria longicuris* Bachelot de la Pylaie (Chapman & Craigie 1977) などでは、海水中の栄養塩濃度の上昇にともない藻体内窒素含量が増加することが示されている。ホンダワラ科海藻の窒素含量が年間最大値を示し

たのは、養老・舞鶴・網野のいずれの地点でも 1～3 月であり、この時期の海水中の栄養塩濃度の上昇を反映していると考えられる。また、舞鶴のホンダワラ科海藻の窒素含量が、網野や養老のものよりも高かったのは、生育地の比較的高い栄養塩濃度を反映しているものと考えられる。一方、リン含量の場合では、3 生育地のほとんどの種で 2, 3 月を中心に冬季～春季に年間最大値が認められるが、舞鶴のアキヨレモクとウミトラノオのように不規則な季節変化を示すものもみられた。また、リン含量は、窒素含量と比較して生育地間の差異が小さかった。

コンブ類では、低水温・低照度により生長が制限される冬季から春季に、海水中に豊富に存在する無機態窒素を吸収・蓄積し、水温・光条件の好転する春季以降に体内に蓄積した窒素を利用して急速な生長を示すことが報告されている (Chapman & Craigie 1977)。京都府沿岸のホンダワラ科海藻の場合は、冬季～春季に窒素・リン含量が増加し、その後、年間最大現存量に達して成熟を開始した時期には、窒素・リン含量が年間最小値にまで減少していた。このような窒素・リン含量の変化は、ホンダワラ科海藻の生長・成熟に、冬季～春季に蓄積された窒素・リンが利用された可能性を示唆している。

養老と網野では、成熟した古い主枝が流失した時期に、新生した主枝に形成された葉の窒素・リン含量が増加した。コンブ類では末枯れる古い組織から新しい組織への物質輸送が確認されている (Lüning *et al.* 1973) が、ホンダワラ科海藻ではこのような報告はなく、新生した主枝で増加した窒素・リンの供給源については、現在のところ明らかではない。

ホンダワラ科海藻の窒素・リン含量は、藻体上部の葉では季節変化の明瞭な場合が多く、藻体下部の葉や主枝や茎では年間を通じて不明瞭であった。コンブ類では、光量の増加に伴った光合成活性や栄養塩吸収速度の上昇が報告されており (Kopczak 1994, Ozaki *et al.* 2001)、ホンダワラ科海藻の部位間に窒素・リン含量の違いをもたらした要因として、光環境の違いが挙げられる。ホンダワラ科海藻は頂端生長を行うため、より多くの光を受ける藻体上部で光合成をはじめとする生理活性が高く、群落内部にある藻体下部は活性が低い (Gao & Umezaki 1988)。そのため、栄養塩の吸収においても部位間に違いがあり、窒素・リン含量の違いに反映すると考えられる。また、海水流動も藻体の栄養塩吸収に影響を与える要因であるが、群落内部では海水流動が抑えられることから (Komatsu & Murakami 1994)、藻体下部では吸収量が少なくなった可能性もある。

本研究では、ホンダワラ科海藻の窒素・リン含量が、季節や藻体の部位あるいは生育地によって大きく異なり、これらをもとに算出される藻場の炭素・窒素・リンの貯蔵量に影響することが示された。すなわち、ホンダワラ科海藻の藻体重量の年変動と藻体中の窒素・リン含量の年変動には季節的なずれがあり、藻場が貯蔵可能な窒素・リン現存量を定量評価する上で、いつの季節の藻場を対象とするかにより結果が異なることが示唆された。また、藻体の測定部位や生育地の環境条件によっても、これらの物質の含有量が大きく異なり、藻

場の「物質貯蔵」機能を評価する上で大きく影響することが明らかとなった。このようにして推定されたホンダワラ科海藻各種の炭素貯蔵量の年間最大値は 211 ~ 1105 g C/m², 窒素貯蔵量の最大値は 12.3 ~ 79.2 g N/m², リン貯蔵量の最大値は 0.63 ~ 4.47 g P/m²であった (Tables 2, 3)。また, 和歌山県田辺湾に生育するコアマモ *Zostera japonica* Ascherson et Graebner 群落の炭素・窒素・リンの年間蓄積量は, それぞれ 108.2 ~ 134.8 g/m², 7.11 ~ 7.36 g/m², 0.99 ~ 1.18 g/m²と報告されている(上出 2007)。これらのデータから, 炭素・窒素・リンの貯蔵場としての機能は, コアマモ群落よりもホンダワラ藻場のほうが高いことが分かった。今後, 同様の方法を用いて, ホンダワラ藻場の生産量, 流失量や被食量なども, 炭素・窒素・リンの量で表すことが可能となり, 藻場の物質循環機能を評価できるのではないかと考えられる。

謝辞

京都大学大学院地球環境学堂の中原紘之教授には本研究に対する有益なコメントをいただいた。同大学大学院農学研究科の藤原建紀教授には CHN コーダーの使用について便宜を図っていただいた。京都府立海洋センター所属栽培漁業指導船「みさき」の乗組員の皆様には, 野外調査においてご助力いただいた。ここに記して厚く御礼申し上げる。本報は京都府立海洋センター業績 No. 160 である。

引用文献

- Atkinson, M. J. & Smith, S. V. 1983. C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnol. Oceanogr.* 28: 568–574.
- 有賀祐勝 2004. 海藻の環境浄化機能を評価する。日本水産資源保護協会月報 465: 4–7.
- Chapman, A. R. O. & Craigie, J. S. 1977. Seasonal growth in *Laminaria longicuris*: Relations with dissolved inorganic nutrients and internal reserves of nitrogen. *Mar. Biol.* 40: 197–205.
- Chapman, A. R. O. & Craigie, J. S. 1978. Seasonal growth in *Laminaria longicuris*: Relations with reserve carbohydrate storage and production. *Mar. Biol.* 46: 209–213.
- Duarte, C. M. 1992. Nutrient concentration of aquatic plants: Patterns across species. *Limnol. Oceanogr.* 37: 882–889.
- Flores-Moya, A., Fernández, J. A. & Niell F. X. 1995. Seasonal variations of photosynthetic pigments, total C, N, and P content, and photosynthesis in *Phyllariopsis purpurascens* (Phaeophyta) from the strait of Gibraltar. *J. Phycol.* 31: 867–874.
- Gao, K. & Umezaki, I. 1988. Comparative photosynthetic capacities of the leaves of upper and lower parts of *Sargassum* plants. *Bot. Mar.* 31: 231–236.
- Hanisak, M. D. 1979. Nitrogen limitation of *Codium fragile* ssp. *tomentosoides* as determined by tissue analysis. *Mar. Biol.* 50: 333–337.
- Ishih, Y., Yamada, Y., Ajisaka, T. & Yokoyama, H. 2001. Distribution of stable carbon isotope ratio in *Sargassum* plants. *Fish. Sci.* 67: 367–369.

- 環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター 1994. 第 4 回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書 (干潟, 藻場, サング礁調査), 第 2 巻 藻場. 環境庁, 東京.
- Komatsu, T. & Murakami, S. 1994. Influence of a *Sargassum* forest on the spatial distribution of water flow. *Fish. Oceanogr.* 3: 256–266.
- Kopczak, C. D. 1994. Variability of nitrate uptake capacity in *Macrocystis pyrifera* (Laminariales, Phaeophyceae) with nitrate and light availability. *J. Phycol.* 30: 573–580.
- 京都府 2004–2007. 平成 14 ~ 17 年度公共用水域及び地下水の水質調査結果. 京都府企画環境部環境管理課, 京都.
- Lüning, K., Schmitz, K. & Willenbrink J. 1973. CO₂ fixation and translocation in benthic marine algae III. Rate and ecological significance of translocation in *Laminaria hyperborea* and *L. saccharina*. *Mar. Biol.* 23: 275–281.
- Mann, K.H. 1972. Ecological energetics of the seaweed zone in a marine bay on the Atlantic coast of Canada I. Zonation and biomass of seaweeds. *Mar. Biol.* 12: 1–10.
- Mizuta, M., Maita, Y. & Yanada, M. 1994. Seasonal changes of nitrogen metabolism in the sporophyte of *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). *Nippon Suisan Gakkaishi* 58: 2345–2350.
- 村瀬 昇 2001. 褐藻ノコギリモク *Sargassum macrocarpum* C. Agardh の生態学的研究. 水大校研報 49: 131–212.
- Niell, F. X. 1976. C:N ratio in some marine macrophytes and its possible ecological significance. *Bot. Mar.* 19: 347–350.
- 日本分析化学会北海道支部 2005. 水の分析 第 5 版. 化学同人, 京都.
- 新村陽子・吉田吾郎・玉置 仁・寺脇利信 2004. 広島湾に生育する大型褐藻群落の内部における光環境の違い. 水産工学 42: 133–138.
- Ozaki, A., Mizuta, H. & Yamamoto, H. 2001. Physiological difference between the nutrient uptakes of *Kjellmaniella crassifolia* and *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). *Fish. Sci.* 67: 415–419.
- Rico, J. M. & Fernández, C. 1997. Ecology of *Sargassum muticum* on the north coast of Spain II. Physiological differences between *Sargassum muticum* and *Cystoseira nodicaulis*. *Bot. Mar.* 40: 405–410.
- Rosell, K. G. & Srivastava, L. M. 1985. Seasonal variations in total nitrogen, carbon and amino acids in *Macrocystis integrifolia* and *Nereocystis luetkeana* (Phaeophyta). *J. Phycol.* 21: 304–309.
- 上出貴士 2007. 和歌山県田辺湾内及び内ノ浦の潮間帯に生育するコアマモ *Zostera japonica* の年間純生産量と C, N, P の年間蓄積量. 日水誌 73: 851–858.
- 梅崎 勇 1985. ホンダワラ群落の周年変化. 月刊海洋科学 17: 32–37.
- Wernberg, T., Thomsen, M. S., Stærh, P. A. & Pedersen, M. F. 2001. Comparative phenology of *Sargassum muticum* and *Halidrys siliquosa* (Phaeophyceae: Fucales) in Limfjorden, Denmark. *Bot. Mar.* 44: 31–39.
- Wheeler, P. A. & Björnsäter, B. R. 1992. Seasonal fluctuations in tissue nitrogen, phosphorus, and N:P for five macroalgal species common to the Pacific northwest coast. *J. Phycol.* 28: 1–6.
- Yatsuya, K., Nishigaki, T., Douke, A. & Wada, Y. 2005. Annual net production of the five Sargassaceae species in Yoro, western Wakasa Bay, Sea of Japan. *Fish. Sci.* 71: 1098–1106.
- 八谷光介・西垣友和・道家章生・井谷匡志・和田洋藏 2007. 環境特性の異なる京都府沿岸域でのホンダワラ科海藻の年間純生産量. 日水誌 71: 880–890.
- 吉田吾郎 2005. 広島湾における褐藻アカモクのフェノロジーとその個体群間分化に関する研究. 水研センター研報 15: 27–126.
- 吉田吾郎・内村真之・吉川浩二・寺脇利信 2001. 広島湾に生育する海藻類の炭素・窒素含量とその季節変化. 瀬戸内水研報 3: 53–61.

(Received Apr. 1, 2007; Accepted Apr. 14, 2008)