

광역스케일의 환경 인자를 이용한 어류, 식물, 조류 종수의 공간적 분포에 대한 모델링¹

- 일본의 주요수계를 중심으로 -

한미덕^{2*} · 이기배³

Modelling of a Spatial Distribution of the Species Richness of Fishes, Plants, and Birds Using Environmental Factors on a Wide-Ranging Scale¹

- Focusing on the Major Drainage Systems in Japan -

Mi-Deok Han^{2*}, Gi-Bae Lee³

요 약

본 연구에서는 1990~2005년 사이에 일본전국의 109개의 주요하천유역에서 조사된 어류, 식물, 조류 데이터를 이용하여, 각 생물종의 종수와 기후 및 지형의 환경인자와의 관계를 분석하고 모델링을 수행하였다. 그 결과, 어류, 식물, 조류의 분포는 각각 연평균 기온, 유역면적, 연간 강수량에 의해서 가장 많은 부분이 설명되었다. 또한, 광범위 스케일에서의 환경인자데이터를 이용한 각 생물종에 대한 일반화가법모델을 이용하여 일본전국의 하천유역의 각 생물 종수의 값을 예측하고 그 값을 지도화하였다. 예측값을 지도화하는 것은 관리자가 생물종의 다양성을 확보하기 위해서 보호해야할 지역을 새롭게 설정하거나, 생물다양성 보호지역의 유효성을 평가하는데 활용될 수 있다.

주요어 : 공간적스케일, 생물다양성, 토지이용, 일반화가법모델, 지리정보시스템

ABSTRACT

This study analyzed and modeled the relationships between the species richness of fish, plant, and bird and environmental factors such as climatic and geographical variables based on data collected from 109 major drainage systems in Japan from 1990 until 2005. As a result, the most parts of the distributions of the fish, plant, and bird species richness were clarified by the average annual atmospheric temperature, dimension of drainage areas, and annual rainfall, respectively. In addition, this study predicted the value of each organism species distributed in national drainage areas in Japan using GAMs(Generalized Additive Models) for each organism model created by environmental factors on a wide-ranging scale, and also mapped out the value. Mapping out the predicted value could make it easier for its managers to newly set up the areas needing to be protected to

1 접수 10월 22일 Received on Oct. 22, 2007

2 명지대학교 환경생물공학과 Myongji University, Department of Environmental Engineering and Biotechnology, San 38-2, Nam-dong, Cheoin-gu, Yongin-city, Gyeonggi-do(449-728), Korea

3 동경공업대학 사회이공학연구과 Tokyo Institute of Technology, Graduate School of Decision Science and Technology, 2-12-1 Ookayama, Mekuro-ku, Tokyo 152-8552, Japan(asasky@soc.titech.ac.jp)

* 교신저자 Corresponding author(mdbiti@hanmail.net)

obtain diversity of the organism species and to assess their availability of conservation for bio-diversity.

KEYWORD : SPATIAL-SCALE, BIODIVERSITY, LAND-USE, GAM, GIS

서론

야생에서의 동식물의 분포특성 및 다양성, 그리고 그것을 결정하는 요인을 밝히고자 하는 것은 생태학의 중심과제의 하나이다(Lawton *et al.*, 1994). 또한, 최근 지구차원의 환경 문제의 인식과 더불어 연구의 공간적 범위가 점차 확대되는 경향을 보이고 있으며(Corsi *et al.*, 1999; Dunham and Rieman, 1999), 그에 따라서 비교적 넓은 범위, 예를 들어 유역스케일, 경관스케일 등에서의 생물의 서식에 관한 기초 자료의 작성에 대한 요구도 증가되고 있다. 일반적으로 생물의 분포를 파악하기 위해서는 직접 조사하는 방법을 생각할 수 있지만, 광역적인 범위에서의 생물의 종수를 파악하는 것은 많은 비용을 필요로 하며 그다지 용이하지도 않다.

본 연구는 이상과 같은 광역적 스케일에 대한 관심의 확대와 생물조사의 어려움을 배경으로 하여, 비교적 측정이 용이하거나 이미 조사되어 있는 각종 환경특성의 데이터를 사용하여, 어류, 식물, 조류의 종수를 예측할 수 있는 모델을 구축하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로는, ① 광역적인 공간범위인 하천유역을 대상으로 하여, 어류, 식물, 조류의 종수의 분포특성을 분석하고, ② 각 종수와 지형, 기상 등의 환경 특성과의 상관관계를 분석한다. ③ 그리고 환경 특성의 데이터를 사용하여 각 생물의 종수를 예측할 수 있는 모델을 구축하고, 모델의 적합성을 검증한다.

일본을 비롯하여 국내에 있어서의 지형 및 기후 등의 환경데이터와 생물 다양성의 관계를 평가한 선행연구를 살펴보면, 비교적 좁은 공간이나 특정 지점에 주목하여 생물의 다양성을 평가하거나 생물의 서식 특성과 환경과의 관계를 밝힌 연구(안영희 등, 2001; 이광열 등, 2006; Katoh *et al.*, 2003)가 많다. 그러나 비교적 넓은 광역적 스케일에서의 각 생물의 종수와 환경의 특성의 관계를 밝히거나, 종수를 예측하기 위한 모델에 관한 연구는 드물다. 국외, 특히 미국의 경우, 최근 들어 이러한 광역 스케일에서의 생물종의 다양성의 평가 및 이들의 분포를 결정하는 환경인자의 특정화(McKinney, 2001; Marchetti *et al.*, 2006; Olden *et al.*, 2006), 더 나아가서는 이러한 자연적 생물분포를 파괴시키는 원인인 외래종의 유입에 대한 연구(Gido and Brown, 1999; Stohlgren *et al.*, 2006)가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는, 일본 전국의 109개의 주요 하천유역에

대한 데이터를 사용하여 일본 전역에 적용할 수 있는 생물의 종수에 대한 예측모델을 구축하였으며 그 적합성을 검증하였다. 모델의 작성은 주요 하천유역에 대하여 생물의 종수 및 각종 환경에 관한 신뢰성 있는 데이터가 작성되어 공개되고 있으며, 각 데이터의 연계에 의해 일관된 분석을 할 수 있었기 때문에 가능하였다. 작성된 모델은 앞으로의 각종 환경정책의 실시 및 그와 관련된 지역의 평가 등에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

조사 및 분석 방법

1. 연구대상지

일본 전국의 109개 주요 하천유역을 대상으로 한다. 109개 주요 하천은 일본 하천법에 의하여 국토교통성 대신(大臣)이 지정한 1급 수계 하천을 의미하며, 유역의 면적은 240,829km²로, 일본 전역(377,915km²)의 63.7%에 해당 한다(Figure 1a).

일본은 북위 20°25'에서 45°33', 동경 122°56'에서 153°59'에 위치하고 있으며, 남북으로 3,000km에 달하는 폭이 좁고 긴 지형적 특성을 가지고 있다. 북쪽에서부터 홋카이도(北海道), 혼슈(本州), 시코쿠(四国), 큐슈(九州)의 4개의 주요 섬과, 6,800개 이상의 작은 섬들로 이루어져 있다(Figure 1a).

남북으로 긴 특성에 의해, 기후 및 동식물의 분포도 지역별로 차이를 보인다. 연간 강수량은 다우지역과 소우지역의 차이가 6배에 달하는데, 동해 쪽의 다우지역의 경우는 1월의 강설량이 많으며, 큐슈와 시코쿠의 다우지역의 경우는 7월의 장마에 의한 강우량이 많다(Figure 1b). 지역별의 기온도 차이가 큰 편인데, 홋카이도의 쿠시로시(釧路市)의 연평균 기온이 5.7°C인데 비해, 큐슈의 카고시마시(鹿児島市)는 17.6°C로 11.9°C의 차가 있다(Figure 1c).

일본 전역의 생물의 종수도 비교적 다양하다고 할 수 있다. 일본환경청의 「일본야생생물목록(1993; 1995)」에 의하면, 어류는 200종(담수어 및 기수어), 식물은 8,112종, 조류는 568종이 발견되고 있음을 알 수 있다.

전국의 인구는 약 1억 2,777만명(2006년 10월 기준)이며, 전체 47개 도도부현(都道府県) 중에 상위 5개의 도도부현

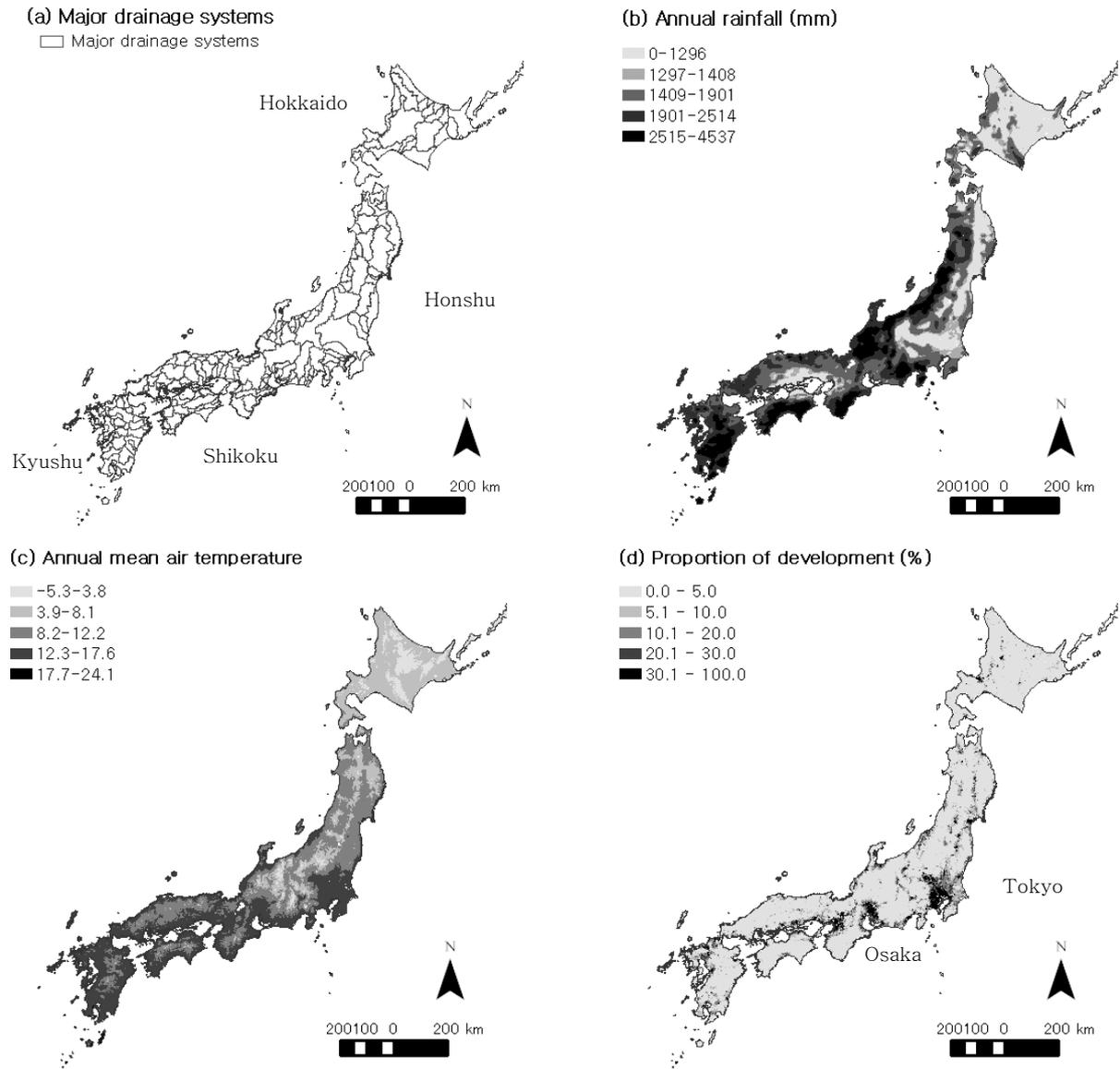


Figure 1. (a) 109 major drainage systems, (b) Annual rainfall, (c) annual mean air temperature, and (d) proportion of development in Japan

(東京都, 神奈川県, 大阪府 나머지 2개 현)의 인구가 전국 인구의 35%를 차지하고 있다(총무성 통계국, 2007년 4월 발표자료). 수도권 및 대도시권에 인구가 집중하여 있다고 할 수 있다(Figure 1d).

2. 사용 데이터(어류, 식물, 조류데이터 및 환경데이터)

어류, 식물, 조류의 데이터는 국토교통성(国土交通省)에서 1990년부터 실시하고 있는 「하천수변국세조사(河川水辺の国勢調査)」의 결과를 이용하였다([http://www3.river](http://www3.river.go.jp/index_seibutu.htm)

http://www3.river.go.jp/index_seibutu.htm). 어개류(魚介類)조사, 저생동물조사, 식물조사, 조류조사, 양서류·파충류·포유류조사, 육상곤충류조사 등의 생물조사와 하천조사, 하천공간이용실태조사의 모두 8개의 항목을 대상으로 하는 이 조사의 결과는, 동일한 지점에 대해 같은 방법으로 이루어지기 때문에 특정 지역에 대한 일관성 있는 데이터로서의 가치를 가진다. 본 연구에서는 1990년부터 2005년 사이에 조사된 어류, 식물, 조류의 데이터를 사용하였는데, 단, 2번 이상 조사가 실시된 경우에는 가장 최근의 조사결과를 사용한다. 그 결과, 일본의 109개의 주요하천 유역에 대해서 어류는 169종, 식물은

Table 1. The summary of predictor variables used for the stepwise procedure for the GAMs of each species richness

Variable	Mean	SE	95% Confidence interval for mean		Min.	Max.
			Lower bound	Upper bound		
Watershed area	2203.05	276.12	667.23	2230.50	87.38	16840.31
Reach length	107.06	6.11	61.43	135.19	21.40	367.49
Mean elevation	435.05	23.85	290.51	493.38	43.57	1464.48
Annual rainfall	1629.37	43.55	1230.52	1947.37	685.84	2482.31
Annual temperature	10.79	0.29	8.90	12.87	3.47	16.043
Proportion of development	5.74	0.68	1.89	6.92	0.54	55.07

3,200종, 조류는 321종이 추출되었다.

생물의 종수를 평가하기 위한 환경데이터로는 위도와 경도, 유역면적, 유역내 하천 총연장, 평균 표고, 연간 강수량, 연평균 기온, 그리고 인문적 환경으로서 인구밀도, 토지개발율을 고려하였다. 그러나 인구밀도와 각 유역의 하구의 위도와 경도는 각각 토지개발율과 연평균 기온과 매우 높은 상관관계를 보임에 따라 모델링의 변수에서 제외하였다.

유역 면적과 하천 총연장은 「국토수치정보(国土数值情報)」의 수문데이터를 이용하여 계산을 하였으며, 표고, 연간 강수량, 연평균 기온 및 토지개발율은 「국토수치정보」의 1km²의 그리드 데이터로부터 산출하였다. 토지개발율은 건물과 도로의 면적이 차지하는 비율로서 설정하였으며, 수치지도 상에서 건물과 도로의 면적을 측정하여 계산하였다. 「국토수치정보」는 국토청(国土庁)의 국토정보정비사업의 실시에 의해 작성되는 국토에 관한 각종 지리적 데이터로, 1974년부터 작성되고 있다(<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>).

모델에 사용된 모든 설명변수 사이의 상관계수는 -0.48에서 0.62로 나타났으며, 각 설명변수의 총괄은 Table 1과 같다.

3. 통계분석 및 모델링

우선, 4개의 주요 섬의 각 생물의 종수가 통계적으로 차이를 보이는 지에 대해서 Kruskal-Wallis 검정을 실시하였다. 그리고 각 유역에서의 각 종수의 상관관계를 밝히기 위해서 피어슨 상관분석을 실시하였다.

각종 환경 데이터를 사용하여 어류, 식물, 조류의 출현 종수를 예측하기 위한 모델을 작성하였다. 작성은 포아송 분포(Poisson distribution)를 기본으로 한 일반화선형모델(Generalized Additive Models; GAMs), 즉 일반화선형모델의 선형예측 부분을 평균평화곡수(Smooth function)의 합으로 치환한 모델(Hastie and Tibshirani, 1990)을 사용하였다. 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\logit P = \alpha + \sum_{i=1} f_i(X_i)$$

모델에서 P 는 목적변수인 어류, 식물, 조류의 출현 종수를 나타내며, α 는 정수항, f 는 평균평화곡수로서 설명변수 X_i 는 하천 유역의 여러 가지 환경요인을 나타낸다. 설명변수의 선택은 스텝와이즈모델선택(stepwise model selection)을 실행하여, AIC(Akaike Information Criterion, Akaike, 1974)를 최대로 저하시키는 변수부터 채용하였다. 설명변수는 우도비검정(likelihood ratio test)을 통해 $P < 0.01$ 일 경우에 유의한 변수로 판단하였으며, 각 설명변수에 대한 비선형성은 모델 내에서의 변수가 선형일 경우와 비선형일 경우의 모델의 편차값에 대한 카이제곱검정(chi-square test)을 실시하여 $P \leq 0.001$ 일 경우에 유의하다고 판단하였다.

각 생물의 출현 종수에 대한 모델의 추정능력을 검증하기 위해서는 다음과 같은 교차확인(cross-validation)을 실시하였다(Neter *et al.*, 1996). 우선 전체 109개의 유역 샘플을 랜덤하게 10등분한 후, 전체의 9/10의 데이터를 이용하여 모델을 작성하고, 그 모델로 나머지 1/10의 샘플에 대한 각 생물의 종수를 추정하는 작업을 10회 반복하여, 각 유역에 대한 10개의 추정값을 산출하고, 이들의 평균값을 각 유역에 대한 모델의 예측값으로 하였다. 마지막으로, 예측값과 실측값을 비교함으로써 모델의 정확성을 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 공간적 분포특성과 종간의 상호관계

일본의 홋카이도, 혼슈, 시코쿠, 큐슈의 4개 섬의 각각의 유역 내에 서식하는 생물의 종수는 통계적으로 차이를 보였는데, 어류의 경우 혼슈의 평균종수(\pm 표준편차)는 57.3 (± 25.6), 시코쿠는 64.8(± 25.6), 큐슈는 59.0(± 17.8)로 나타났다. 이에 비해 홋카이도의 유역 내에서의 평균종수는 29.5(± 6.4)로 유의하게 낮은 값을 보였다($P < 0.01$, Kruskal-Wallis검정, Figure 2a). 그리고 혼슈의 토네가와(利根川) 유역에서 150종의 가장 높은 출현 종수를 나타냈다.

식물 종수의 경우도 어류와 유사한 분포특성을 보였는데,

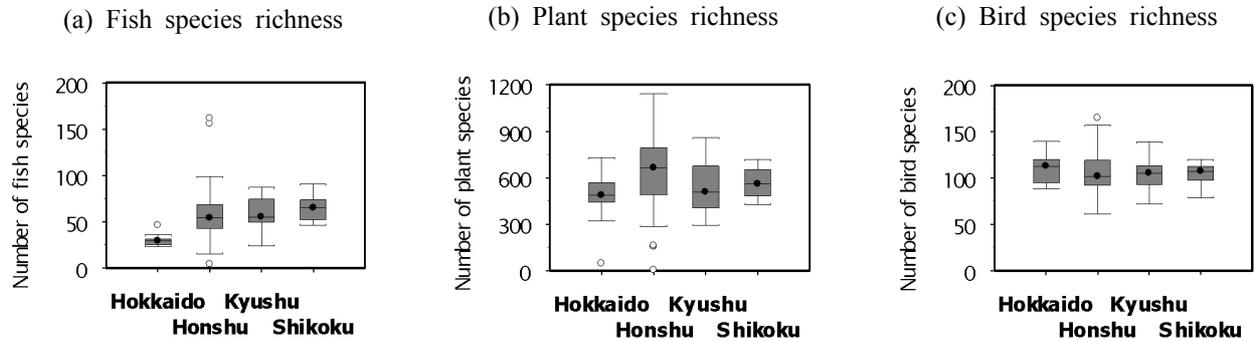


Figure 2. Box plots for 4 local areas(i.e. Hokkaido, Honshu, Shikoku, and Kyushu) of (a) fish species richness, (b) plant species richness, and (c) bird species richness

4개의 섬 각각의 평균종수는 혼슈에서 682.6(±218.8)로 가장 높았으며($P<0.01$, Kruskal-Wallis검정. Figure 2b), 뒤로는 시코쿠 567.4(±102.3), 큐슈 534.2(±172.7), 홋카이도 506.0(±109.3) 순으로 높게 나타났다. 그리고 어류와 마찬가지로 혼슈의 토네가와 유역에서 1,145종의 가장 많은 식물 종수를 나타냈다. 한편 인문환경과 관련해서는 인구밀도가 상대적으로 높은 지역에서 많은 출현 종수를 나타냈다.

조류 종수의 경우에는, 어류 및 식물과는 다른 패턴이 보였는데, 혼슈 북부와 홋카이도에서 비교적 높은 종수를 나타냈다. 홋카이도 지역의 유역의 평균종수는 111.1(±15.3), 혼슈지역은 105.2(±21.7), 시코쿠 지역은 104.3(±12.8), 큐슈 지역은 102.3(±16.5)로 타나났으며, 각 지역 별의 차이는 유의하지 않았다($P<0.01$, Kruskal-Wallis검정; Figure 2c).

마지막으로, 어류, 식물, 조류의 출현 종수에 대한 상관관계를 보면, 어류와 식물은 $r=0.43(P<0.01)$, Pearson's

correlation test), 어류와 조류는 $r=0.36(P<0.01)$, 식물과 조류는 $r=0.49(P<0.01)$ 로서 모두 유의한 정의 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있었다.

2. 일반화가법모델의 결과

회귀분석의 결과 어류의 출현 종수의 경우는, 하천 총연장과 토지개발율을 제외한 4개의 설명변수, 즉 유역면적, 평균표고, 연간 강수량, 연평균 기온과 유의하게 비선형관계를($P<0.01$) 보였으며(Table 2), 특히, 연평균 기온과 유역면적에 의해 전체 어류 종수 분산의 23%가 설명되었다. 각각의 설명변수와의 관계를 살펴보면, 유역면적(Figure 3a), 연간 강수량(Figure 3c), 연평균 기온(Figure 3d)과 정의 관계를 보였으나, 표고에 관해서는 평균표고가 400m 미만의 유역에서는 감소하는 경향을 보였으며, 400m 이상의 평균표고를 가진 유역에서는 큰 변화가 확인되지 않았다(Figure 3b).

Table 2. Changes in deviance when dropping a variable from the final models of fish species richness, plant species richness, and bird species richness. Percentage change in deviance is given in parenthesis as deviance change/(null deviance - residual deviance) × 100. ns, not significant

Variable	Fish species richness	Plant species richness	Bird species richness
Null deviance	1078	7081	393
Degrees of freedom(null model)	108	108	108
residual deviance	479	3089	196
Degrees of freedom(full model)	84	84	84
Deviance change			
Watershed area	60 (9.9)	349 (8.7)	12 (6.0)
Reach length	ns	92 (2.3)	16 (8.1)
Mean elevation	10 (1.7)	220 (5.5)	17 (8.6)
Annual rainfall	22 (3.7)	51 (1.3)	18 (9.4)
Annual temperature	78 (13.1)	307 (7.7)	11 (5.4)
Proportion of development	ns	282 (7.1)	ns

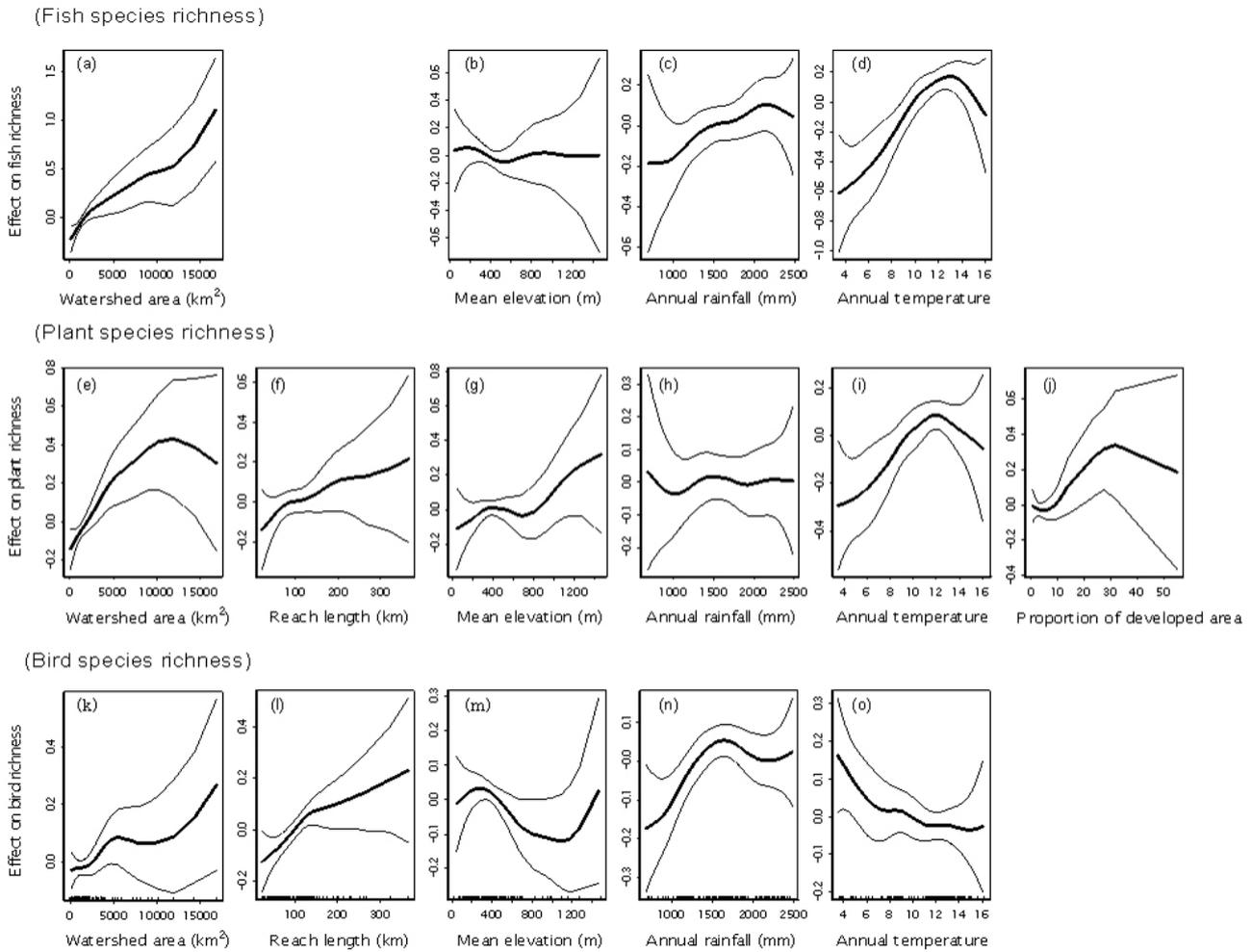


Figure 3. The effects of the significant predictor variables on fish species richness (a-d), plant species richness (e-j), and bird species richness (k-o), as estimated by GAMs. The thin lines indicate plus and minus two pointwise standard deviation

식물 출현 종수에 대한 모델링의 결과에서는, 모델에 사용된 총 6개의 설명변수와 유의한 관계를 보였으며(Table 2), 연간 강수량을 제외한 나머지 변수와 정의 관계를 가지고 있었다. 즉 유역면적(Figure 3e), 하천 총연장(Figure 3f), 평균 표고(Figure 3g), 연평균 기온(Figure 3i), 토지개발율(Figure 3j)이 증가할수록 높은 출현 종수를 나타냈다. 특히 토지개발율은 어류와 조류에 대한 모델에서는 선택되지 않았으나 식물종수 분포와는 비교적 높은 관계를 가지고 있었다.

조류 출현 종수의 경우에는, 토지개발율을 제외한 유역면적, 하천 총연장, 평균표고, 연간 강수량, 연평균 기온과 유의한 관계를 보였는데, 연간 강수량과 가장 높은 상관관계가 있었으며 전체 분산의 9.4%가 설명되었다(Table 2). 유역면적(Figure 3k), 하천 총길이(Figure 3l)에 대해서는 어

류와 식물 종수와 같이 유의하게 정의 관계를 보였으나, 평균표고(Figure 3m)와 연평균 기온(Figure 3o)에 대해서는 상반되는 결과가 나타났다. 즉 표고가 높고 연평균 기온이 높은 유역일수록 낮은 종수를 나타냈다. 또한 조류 종수는 연간 강수량이 약 1,500mm인 지역에서 가장 높은 것으로 나타났다(Figure 3n).

한편, 각 생물종에 대한 모델을 이용하여 일본전국의 339개의 하천유역에서의 각각의 생물종의 출현 종수를 예측한 결과, 식물($R^2=0.73$), 어류($R^2=0.68$), 조류 ($R^2=0.61$) 순으로 높은 정확도를 보였다(Figures 4a-c). 또한 109개의 하천 유역데이터를 이용하여 구축된 모델을 통하여, 일본전국의 하천유역에 대한 각각의 생물종에 대한 종수를 예측하고, 그 값을 지도화 하였다. 그 결과, 어류의 경우는 핫카이도를

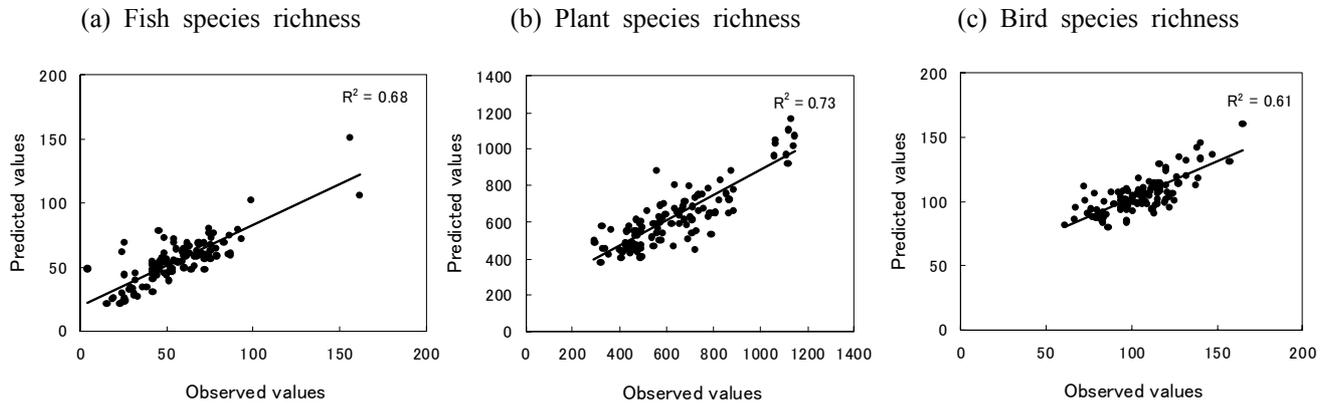


Figure 4. Predicted value and observed value of fish species richness (a), plant species richness (b), and bird species richness (c)

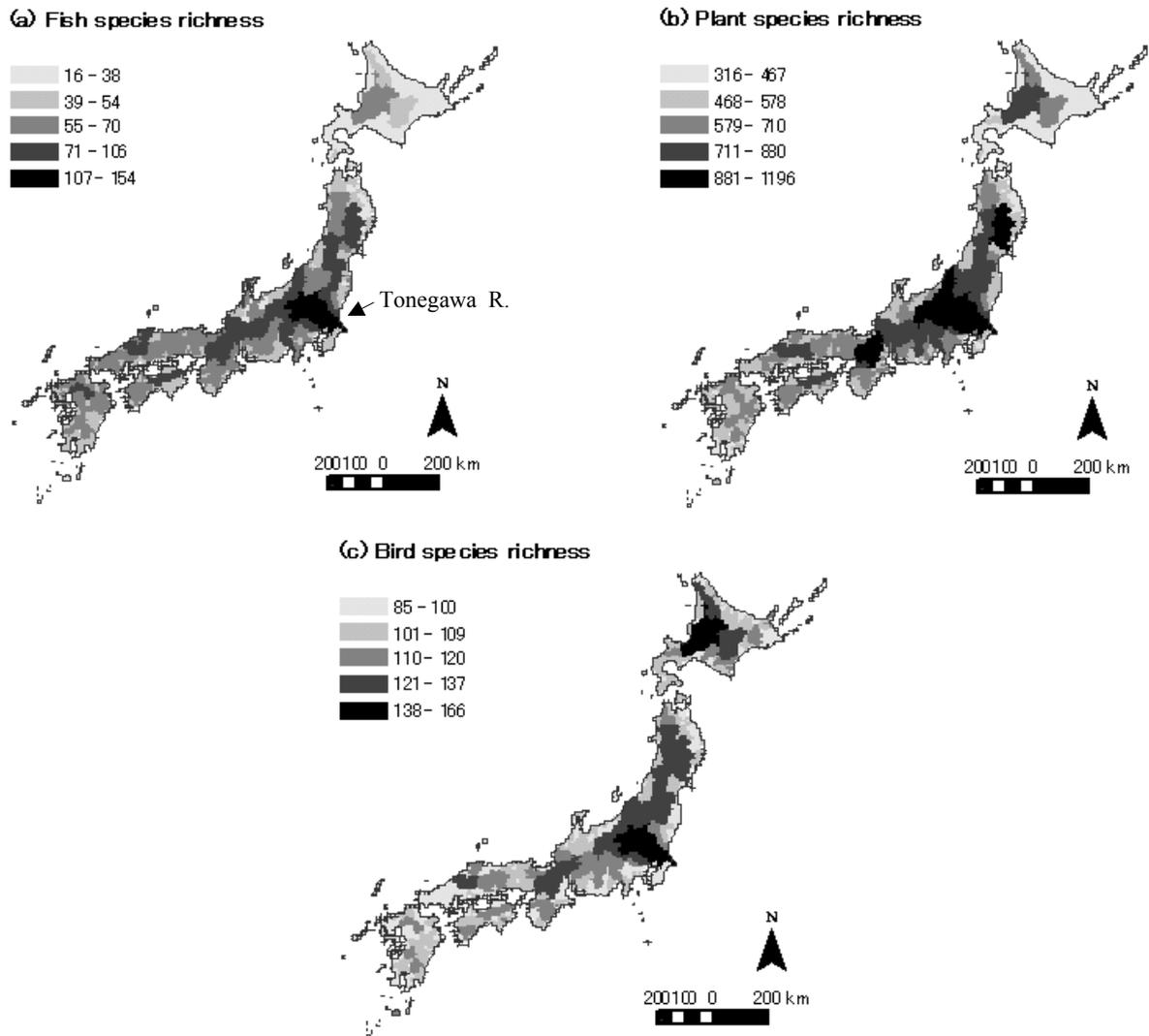


Figure 5. Predicted spatial distributions of (a) fish species richness, (b) plant species richness, and (c) bird species richness

제외한 비교적 온난하고 유역면적이 넓은 지역에서 높은 종수를 나타냈으며(Figure 5a), 식물의 경우는 유역면적이 넓고 인구밀도가 비교적 높은 지역에서 높은 출현 종수를 나타냈다(Figure 5b). 마지막으로 조류의 경우는 어류와 식물과는 달리, 홋카이도를 비롯한 혼슈북부지역에서 높은 종수를 나타냈다(Figure 5c). 어류, 식물, 조류의 출현 종수는 공통적으로 일본에서 가장 유역면적이 넓은 토네가와 유역에서 비교적 높은 값을 보였다.

3. 생물다양성에 영향을 미치는 환경요인

각 생물군 사이에 유의한 정의 관계가 있음으로부터, 하나의 생물군의 종수가 풍부한 지역의 경우, 다른 생물군의 다양성도 높게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 즉, 각 생물군의 다양성은 해당 생물군 이외의 생물군에도 유의한 영향을 미칠 수 있다고 할 수 있다.

또한 유역의 환경은 어류, 식물, 조류의 출현 종수에 있어 매우 중요한 인자로서 작용하였는데, 특히 유역면적이나 하천의 총연장과 같은 공간의 크기는 각 생물군과 공통적으로 정의 관계를 나타냈다. 이러한 패턴은 기존연구에서 주장한 면적과 종수(species richness-area)의 관계와 일치되는 결과라고 할 수 있다.(Angermeier and Schlosser, 1989; Matthews and Robison, 1998; Carey *et al.*, 2006). 생물이 서식하기 위해서는 적절한 생식환경이 필요한데, 생물종이 동일하지 않을 경우 필요로 하는 생식환경 역시 다르다. 바꾸어 말하면, 다양한 생식환경이 존재할 경우 다양한 생물 종의 서식이 가능하게 되며, 다양한 생식환경을 확보하는 것은 다양한 종의 보전에 기여하게 된다. 유역 면적이 넓은 지역일수록 다양한 생식환경이 존재하게 되고 다양한 생물종이 존재하게 된다고 볼 수 있다.

어류와 식물의 경우, 연평균 기온과 매우 높은 정의 상관관계를 가지고 있었다. 이러한 관계는 일본뿐만이 아닌 전 세계적인 패턴으로, 따뜻한 지역일수록 다수의 생물종이 생번식하고 있다고 할 수 있다(Francis and Currie, 2003). 본 연구에서 연평균 기온이 각 생물종, 특히 어류와 식물종수에 미치는 영향이 두드러지게 나타난 이유의 한 가지는, 남북으로 길게 뻗어있는 일본의 지리적 특성일 것으로 생각된다. 홋카이도의 경우 다른 3개의 섬과는 현저하게 다른 연평균 기온을 나타냄으로써 일본전국의 종수를 평가하는데 있어 큰 변수로 작용하였을 것이다.

한편, 주목할 만한 결과의 하나는, 조류의 경우는 어류와 식물과는 반대로 연평균 기온과 부의 관계를 보였다는 것이다. 혼슈의 북부지역과 홋카이도에서 높은 종수를 나타낸 것이다. 이 결과에 대한 원인 분석을 위해서는 조류의 생물학적 특성이나 이동패턴에 대한 충분한 고찰이 필요할 것

로 생각된다.

토지개발율의 경우, 어류와 조류의 출현 종수에는 유의한 영향을 미치지 않았으나, 식물 출현 종수에 대해서는 비교적 큰 영향을 미치는 요인으로 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유의 하나는, 식물 출현 종수의 구성에서 찾을 수 있다. 어류나 조류와의 경우 전체 출현 종수에 대하여 5.6%(±4.1%), 2.3%(±1.4%)가 외래종(exotic species)인 것에 비해 식물의 경우에는 17.9%(±4.2%)가 외래종으로 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 외래종은 인구밀도가 높은 지역이나 토지개발이 활발히 진행된 도시지역에서 많은 종수를 나타내는 특징을 가지는데(McKinney, 2001; Smith, 2006), 따라서 외래종의 비율이 높은 식물의 경우, 토지개발율과 높은 정의 상관관계를 나타내었을 것으로 생각된다. 실제로 109개 유역 내에서 외래 식물 종수와 인구밀도와의 상관관계를 살펴보면 $r=0.39(P<0.01)$ 로, 유의한 정의 상관관계를 나타냈다.

4. 광역스케일 분석의 중요성 및 문제점

본 연구에서는 하천의 유역이라고 하는 비교적 넓은 지역에서의 어류, 식물, 조류의 분포특성 및 환경요인과의 관계를 분석하였다. 그리고 그 결과에 근거하여, 일본 전국에 대하여 각종 환경요인을 통하여 생물의 종의 수를 예측할 수 있었다.

하천생태계의 평가 등에 있어서, 환경요인과 생물분포의 관계를 계층적으로 수식화하는 것의 중요성은 이미 인식되고 있지만(Labbe and Fausch, 2000; Stoddard and Hayes, 2005), 광역적 스케일에 있어서는 생물의 종수 혹은 개체수를 직접 조사하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 실상에서는 대부분의 경우, 개별적으로 이루어진 각각의 조사결과를 수집하여 사용하는 경우가 많은데, 결국 데이터의 일관성과 정확도는 떨어질 수밖에 없게 된다. 또한, 각 조사지점이 서로 독립적이지 않고 인근 지역의 관측값과 비슷한 값을 가지게 되는 문제 등이 존재하게 되어 통계적 처리를 하는데 장애가 되고 있다(Legendre and Fortin, 1989; Lichstein *et al.*, 2002). 본 연구에서 사용한 109개 유역의 데이터는 충분히 넓은 유역에 대해 종합적으로 이루어진 조사결과로서, 공간적으로 독립하는 변수로서 인정되었기 때문에, 모델을 구성하는 것이 가능하였으며, 예측의 결과는 통계적으로 유의하다는 것이 확인되었다.

이와 같이 상대적으로 조사가 손쉬운, 혹은 이미 조사가 되어 있는 환경 데이터를 이용하여 광역적 공간에서의 생물의 종수를 예측하는 것은, 생물의 직접조사를 위한 시간과 비용의 절감을 가능하게 하는 것은 물론, 예측값을 GIS상에 지도화 하였을 경우, 환경정책과 관련하는 다양한 의사결

정, 예를 들면 자연의 보전 및 복원 대상지의 우선순위의 평가 및 결정 등을 지원하는 틀로서 활용될 수 있을 것이다.

인용문헌

- 안영희, 양영철, 전승훈(2006) 안성천 수계의 버드나무과 식물의 분포특성에 관한연구-월동천, 옥정천, 조령천, 기술천을 중심으로-. 한국환경생태학회지 15(3): 213-223.
- 이광열, 장영수, 최재석(2006) 평창간의 어류상 및 법적보호종의 서식 실태. 한국환경생태학회지 20(3): 331-339.
- 国土交通省(1990-2005) 「河川水辺の国勢調査」 . 環境庁(1933; 1995) 「일본산야생생물목록」 .
- Akaike H.(1974) A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Autom. Control. 19: 716-723.
- Angermeier P.L. and I.J. Schlosser(1989) Species-area relationships for stream fishes. Ecology 70(5): 1450-1462.
- Carey S., J. Harte, and R. del Moral(2006) Effect of community assembly and primary succession on the species-area relationship in disturbed ecosystems. Ecography 29(6): 866-872.
- Corsi F., E. Dupre, and L. Boitani(1999) A large-scale model of wolf distribution in Italy for conservation planning. Conserv. Biol. 13: 150-159.
- Dunham J.B. and B.E. Rieman(1999) Metapopulation structure of bull trout: influences of physical, biotic, and geometrical landscape characteristics. Ecol. Appl. 9: 152-163.
- Francis A.P. and D.J. Currie(2003) A globally consistent richness-climate relationship for angiosperms. Am. Nat. 161: 523-536.
- Gido K.B. and J.H. Brown(1999) Invasion of North American drainages by alien fish species. Freshw. Biol. 42: 387-399.
- Hastie T. and R.J. Tibshirani(1990) Generalized Additive Models. Chapman & Hall, London.
- Katoh K., T. Ichinose, and T. Takahashi(2003) Clasification of habitats by "Classification Tree": a case study on riparian habitats of birds. Ecol. Civil Eng. 5(2): 189-201.
- Labbe T.R. and K.D. Fausch(2000) Dyanamics of intermittent stream habitat regulate persistence of a threatened fish at multiple scales. Ecol. Appl. 10: 1774-1791.
- Lawton, J.H., S. Nee, A.J. Letcher, and P.H. Harvey(1994) Animal distributions: Patterns and processes. In: Largescale ecology and conservation biology, pp. 41-58. Blackwell Scientific Publications, Boston.
- Legendre P., M.J. Fortin(1989) Spatial pattern and ecological analysis. Vegetatio 80: 107-138.
- Lichstein J.W., T.R. Simons, S.A. Shriner, and K.E. Franzreb(2002) Spatial autocorrelation and autoregressive models in ecology. Ecol. Monogr. 72: 445-463.
- Marchetti M.P., J.L. Lockwood, and T. Light(2006) Effects of urbanization on California's fish diversity: Differentiation, homogenization and the influence of spatial scale. Biol. Conserv. 127: 310-318.
- Matthews W.J. and H.W. Robison(1998) Influence of drainage connectivity, drainage area and regional species richness on fishes of the interior highlands in Arkansas. Am. Midl. Nat. 139: 1-19.
- McKinney C.L.(2001) Effects of human population, area, and time on non-native plant and fish diversity in the United States. Biol. Conserv. 100: 243-252.
- Neter J., M.H. Kutner, C.J. Nachtsheim, and W. Wasserman(1996) Applied Linear Regression Models, 3rd edn. Times Mirror Higher Education Group, Inc., Chicago.
- Olden J.D., N.L. Poff, and M.L. Mckinney(2006) Forecasting faunal and floral homogenization associated with human population geography in North America. Biol. Conserv. 127: 261-271.
- Smith K.G.(2006) Patterns of nonindigenous herpetofaunal richness and biotic homogenization among Florida counties. Biol. Conserv. 127: 327-335.
- Stoddard M.A. and J.P. Hayes(2005) The influence of forest management on headwater stream amphibians at multiple spatial scales. Ecol. Appl. 15: 811-823.
- Stohlgren T.J., D. Barnett, C. Flather, P. Fuller, B. Peterjohn, J. Kartesz, and L.L. Master(2006) Species richness and patterns of invasion in plants, birds, and fishes in the United States. Biol. Inv. 8: 427-447.