

有用植物の自生地条件に関する ネットワーク分析による適地群の抽出

古沢 浩^{1*} 臼井 良介¹

高木 方隆² 渡邊 高志³

(受領日：2016 年 5 月 16 日)

¹ 高知工科大学環境理工学群
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

² 高知工科大学システム工学群
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

³ 熊本大学薬学部附属薬用資源エコフロンティアセンター
〒862-0973 熊本市中央区大江本町5番1号

* E-mail: frusawa.hiroshi@kochi-tech.ac.jp

要約：四国全域での植物インベントリにより得られた有用植物の自生地分布について、地理情報システム（GIS）を用いた解析を行う際に直面する課題として、空間相関以外の属性値（環境条件）相関をどのように可視化するかという点がある。本研究では、GIS 解析と相補的な新しい解析手法の確立を目指して、2 地点間の相関関数を新たに定義し、その相関値をネットワーク図として表現した。これにより、栽培化に必要な適地群条件の抽出が実現できたので報告する。具体的には、ここ数年間の植物インベントリで採取された自生植物の採取地点 536 のうち、97 地点で採取されたウバユリについて検討を行った。97 地点に関する 2 地点間の属性値相関をネットワーク図として表現した結果、類似度が高い自生地コミュニティ（適地群）が、四国には二箇所存在することがわかった。苛酷環境条件の適地群が抽出された一方で、栽培が容易な穏和環境の適地群も抽出できた。後者の条件は、「降水量が高知県平均値程度、傾斜方位が南向きで傾斜角度が緩やかな平地、植生境界線や水辺からの距離が近い場所」であり、本プロジェクトの想定フィールドである佐岡地区がウバユリの栽培適地であることを示唆している。

1. 緒言

世界には約 235,500 ~ 500,000 種の維管束植物種が自生しており、日本にはそのうちの約 5,628 種、高知県には 3,170 種が存在するとされている。また、そのなかでも利活用可能な「有用植物」と呼ばれるものは、全種類の約 1 割程度である。具体的には、世界には約 24,000 ~ 50,000 種、日本には約 400 種、高知県には約 345 種が存在している。すなわち、高

知県は日本に自生する有用植物のうちの約 86 % が存在しているということとなる。このことは、高知県地域の創生にとって、地域資源としての有用植物の利活用が有望であることを示唆している。

有用植物の活用施策の 1 つとして、熱帯地域や地中海沿岸で行われている「アグロフォレストリー」¹⁾ の日本版を実現することが挙げられる。日本版アグロフォレストリーにより、地域の森林資源（ここでは自生有用植物）のマネタイズを推進すること

は、複層林化(とくには表土流出防止のための林床植生の維持管理)に経済的インセンティブを提供し森林の多面的機能を高めることにつながる²⁾。このような実効性・実利性を兼ね備えた森林管理施策に基づいた防災機能強化と地域創生の同時実現は、気候変動に伴い、降雨の局地化・集中化・激甚化が懸念される高知県において、とりわけ重要である。

本研究では、有用植物の中でも特に、ウバユリに着目する。ウバユリは、抗高血圧性などの薬理作用が顕著であり、高付加価値商品としての販路が確保されつつある「有望種」の一つである。ウバユリの自生地分布は、この数年間の四国全域にわたる大規模な植物インベントリにより明らかとなっている。そこで我々は、各自生地の環境条件に関する相互類似度をネットワーク図として表現することにより、強い類似性を持ったコミュニティ(適地群)を抽出することを目指した。

2. 方法

2.1 ウバユリとそのインベントリ詳細

植物インベントリの結果得られた四国内のウバユリ 97 採取地点の GPS データを用いた。なお、用いたウバユリ (*Cardiocrinum cordatum*) は、ユリ科 (*Liliaceae*) ウバユリ属 (*Cardiocrinum*) の多年生植物である。日本周辺から中国・ヒマラヤにかけて分布し、日本では本州(宮城県・石川県以西)・四国・九州に分布する。ユリ科の植物ではあるが、我々の知っている一般的なユリはリリウム属であるのに対し、ウバユリはカルディオクリナム属であり、属が異なる。開花時期は 7~8 月で、7~15cm 程度の緑白色の花を複数つける。葉は長さ 15~25cm 程度のハート型のような形であり、輪生状に 5 枚程度ある。

2.2 属性値データ

属性値は以下のデータベースより Q-GIS を用いて抽出した: 国土地理院・基盤地図情報ダウンロードサービス(地形情報) 国土交通省国土政策局国土情報課・国土数値情報ダウンロードサービス(降水量等) および環境省自然環境局・生物多様性センター(植生境界線)。

抽出した属性値は以下の 6 つである: (1) 標高、(2) 降水量、(3) 傾斜、(4) 傾斜方位、(5) 水辺からの距離、(6) 植生分布境界線からの距離。

2.3 相関関数の定義式

各地点が有するこれらの属性値がどの程度類似

しているかを表す指標として、新しい相関関数を以下のように定義した。各地点の環境条件が、 m 種類の属性値セットで特徴づけられるとき、任意の i 番目の属性値 F_i に関する平均操作 $\langle \rangle$ は以下のように与えられる:

$$\langle F_i(\mathbf{r}) \rangle = \frac{1}{N} \int d\mathbf{r} F_i(\mathbf{r}) \hat{\rho}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

$$\hat{\rho}(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^N \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_k) \quad (2)$$

ここで 2 行目の式は、 N 地点の自生地から生成される密度演算子を表している。従って、上式の平均操作は、各地点での属性値を均した加算平均に相当する。さらに、地点間のばらつきに関する標準偏差 S_i を導入することにより、

$$z_i(\mathbf{r}) = \frac{F_i(\mathbf{r}) - \langle F_i(\mathbf{r}) \rangle}{S_i} \quad (3)$$

のように標準化された属性値が得られる。この標準化属性値を用いて、今回指標として用いる相関関数が定義される。具体的には、標準化データセット $z_i (i = 1, \dots, m)$ に関する各地点ごとの標準偏差 $\sigma_z(\mathbf{r}_k) (k = 1, \dots, N)$ を用いて、

$$C_{kl} = \sum_{i=1}^m \frac{F_i(\mathbf{r}_k) F_i(\mathbf{r}_l)}{\sigma_z(\mathbf{r}_k) \sigma_z(\mathbf{r}_l)} \quad (4)$$

と与えられる共相関関数値(以下、相関値)により、 m 種類の属性値セットの地点間類似性を評価する。

なお本研究では、2.2 節で述べた通り、 $m = 6$ と $N = 97$ である。

2.4 地点間相関のネットワーク図表現と適地群抽出

得られた地点間相関値 C_{kl} と地点間を辺でつなぐ際の重み w とを同一視することにより、グラフィックソフト (Gephi) を用いてネットワーク図を生成する。ただし、定義により $w \geq 0$ なので、負の相関については $w = 0$ と見なすこととする。その結果、ゼロ以下の相関値を示す地点間は、属性値間の類似性がない、あるいは、逆相関していることを反映して、辺で結ばれない。

さらに、GePhi のフィルタ機能をもちいて、 $0 < w \leq w_c$ の相関値を有する地点間についても辺を除去するルールを採用しよう。このとき、 w_c を徐々に大きくしていくにつれ、ネットワーク構造は徐々に疎になってくる。希薄化が進むと、ネットワーク構造がシステムに広がらず局在したクラスターが残る。本研究では、このような相関値の高いクラスター(コミュニティ)を適地群と見なし、群内の平均的環境条件について検討を行った。

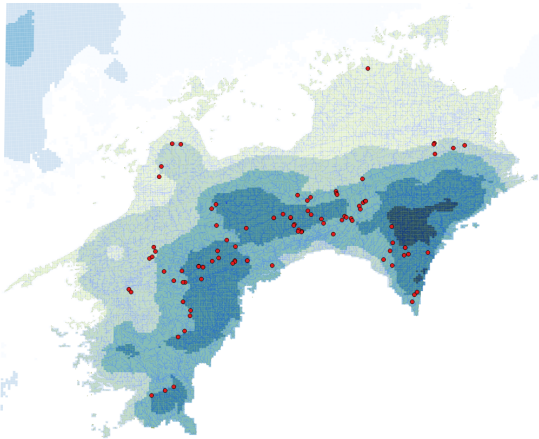


図 1. GIS plot of *Cardiocrinum cordatum* habitat.

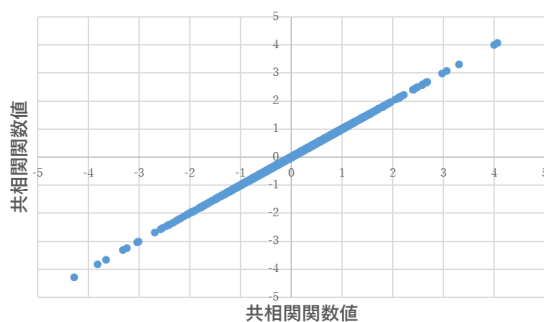


図 2. Distribution of co-correlation function values for all combinations of 97-habitat locations.

3. 結果・議論

3.1 ウバユリ自生地の GIS プロット

図 1 は、自生地の GPS データを降雨量分布と重ね合わせて GIS プロットしたものである。これより、四国全体での網羅的な植物インベントリにもかかわらず、降雨量が高い太平洋側（とくに高知県）に自生地が偏在していることが見てとれる。

3.2 地点間相関値の数分布

図 2 は、縦軸と横軸ともに同じ相関値を用いた散布図である。相関値が負の場合もプロットしているので、4560 組の分布概要が見やすい。これより、正と負の相関値を持つ地点間ペアは、それぞれ約 50 % 程度であると見積もられる。ネットワーク図を作成するときは、前述の通り $C_{kl} < 0$ を $C_{kl} = 0$ と置いた上で、さらに各相関値を辺の重み w と同一視することにより、ゼロ以下の相関値を示す地点間ペアが辺で結ばれないように前処理した。

次に図 3 では、正の相関値に着目し、この値を 0.1 ごとに区切り、該当範囲の相関値を取る地点ペア数 n をヒストグラム表示した。なお、地点ペア数

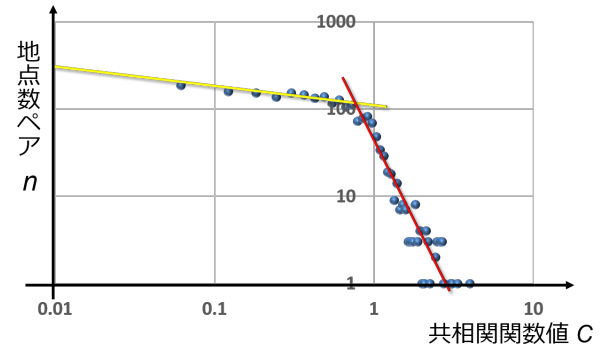


図 3. Log-log plot of positive co-correlation function values. Yellow and red lines depict $\alpha = 0.5$ and 3, respectively, indicating the crossover behavior of the power law, $n \sim C^{-\alpha}$

の総計は 97 地点の総組み合わせに等しく 4560 組であるが、負の相関値をプロットしていないため全組のデータが記載されているわけではない。

なお、両対数表示の図 3 は、相関値の分布が 2 本の直線で近似できることを示している。言い換えると、2 種類の指数則 ($n \sim C^{-\alpha}$) の存在を示唆している。ここで C は、各相関値範囲の中間値を表わすものとする。具体的には、 $C = 1$ 付近で指数則が $\alpha = 0.5$ から $\alpha = 3$ へとクロスオーバーすることが図 2 よりわかる。ここでクロスオーバー後の指数則 ($\alpha = 3$) は、複雑ネットワークにおける次数（各頂点からの辺数）と頂点数との間の指数則³⁾と類似している。この指数則の一致 ($\alpha = 3$) は、高い正の相関値分布は複雑ネットワークの次数分布³⁾と同程度に裾野の広がったロングテール分布であることを表している。

3.3 地点間相関のネットワーク表示

図 2 より示唆されるように、 $w_c = 0$ では約半分の地点間ペアが辺で結ばれているため、密なネットワーク図となってしまふ。そこで、これを起点に、徐々に w_c を上げ、相関値の低い辺を取り除いていく。例えば、指数則のクロスオーバー点 ($w_c = 1$) を上回る $w_c = 1.7$ に設定すると、辺数が減り、ネットワーク構造の視認が可能な程度まで疎なネットワーク図が与えられる（図 4(a)）。さらに $w_c = 2.05$ まで上げると、図 4(b) のように、ネットワーク構造が 97 地点全体に広がらず局在する。このとき得られた、2 つの大きな孤立ネットワーク（コミュニティ）は、属性値の異なる適地群と見なすことができる。

3.4 適地群の属性値

図 4 において赤と青で色分けした地点群を、それ

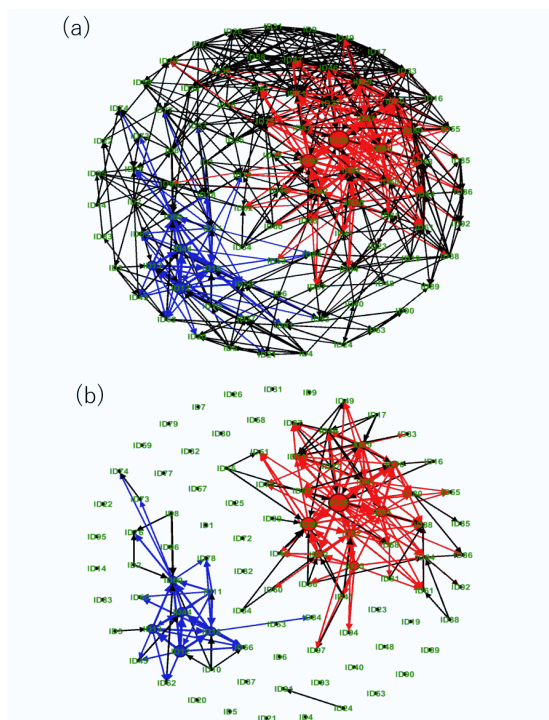


図 4. Network representations of similarity between environmental conditions of 97 habitat locations. Two network structures are delineated for comparison: while the weight in the range of $0 < w \leq 1.7$ is disconnected (a), the edges in the weight of $0 < w \leq 2.05$ are deleted (b).

ぞれ、適地群の2グループとみなして、その属性値の違いを分析する。まずその前に、Q-GISによる空間解析の結果、各パラメータの97全地点に関する属性平均値を記す：(1)降水量(2720 mm)、(2)標高(350 m)、(3)傾斜角度(20.1°)、(4)傾斜方位(178°)、(5)植生分布境界線からの距離(84 m)、(6)水辺からの距離(178 m)。

表1は、上述の2適地群の属性平均値をまとめたものである。これより、6パラメータのうち傾斜方位以外の5パラメータに関する属性平均値が、2適地群間で大きく異なることがわかる。具体的には、表1の適地群1は「降水量が多い、標高が高い、傾斜角度が急、植生境界線および水辺から遠い」という特徴があり、自生適地としては厳しい環境条件であることがわかる。一方、表1の適地群2は、「標高が低く、傾斜角度が緩やか、植生境界線および水辺からの距離が近い」という穏和な環境条件である。また、上述の全地点間平均値と比較すると、適地1よりも適地2の方が、全体の平均的傾向により近い条件であることがわかる。

表 1. Comparison between environmental conditions of total and suitable locations.

パラメータ	97 点平均値	適地 1	適地 2
降水量	27200	32100	25100
標高	350	725	158
傾斜角度	20.1	41.4	10.1
傾斜方位	178	151	154
植生境界線からの距離	83.9	130	33.9
水辺からの距離	178	388	45.8

4. 結語

GISと関連したネットワーク分析は、通常、空間的隣接性に注目して行われる。しかし、四国地方、とりわけ高知県を考えたとき、空間的に隣接していても、環境条件が全く異なるケースが多々見られる。これは、86 %という他県と比べて極めて高い山地率に起因した急峻な地形による標高差、および、土佐湾沖を流れる黒潮の影響等によって幅広い気候帯が存在するからである。従って、空間的隣接性のみでは自生地環境条件を抽出しきれない。

本研究では、空間的隣接以外の環境条件の相互類似性を表現する1手法とし、ネットワーク分析が有効であることを示した。具体的には、属性値群の類似性を評価するのに新たに定義した相関値が有効に機能していること、ならびに、相関値分布の1表現としてのネットワーク図がコミュニティ(相関値の高い類似グループ)の検出に有効であることを示した。従って、本研究で新たに提示したネットワーク分析が、単に植生分布研究の1手法としてだけでなく、空間統計学全般に対する相補的手法として広く活用されるものと期待される。

更に、本手法の適用例であるウバユリの自生地分布に関しても、社会実装に役立つ適地群に関する知見が得られた。詳細は、3.4節に記したとおりである。特に、適地群2の環境条件は、佐岡プロジェクトで想定している実験圃場の条件とよく合致しており、佐岡地区における日本版アグロフォレストリーの実現が期待される。

文献

- 1) A. R. Rodríguez, J. McAdam, and M. R. Mosquera-Losada. (Eds.), “Agroforestry in Europe: habicurrent status and future prospects”, Vol. 6, Springer Science & Business Media, 2008.
- 2) 渡邊高志, 村井亮介, “地域社会の持続安定的な発展に資する有用植物資源利活用システムに関する研究”, 高知工科大紀要, Vol. 10, No. 1, pp. 217–224, 2013.
- 3) A. Réka, and A.-L. Barabási. “Statistical mechanics of complex networks”, Reviews of Modern Physics. Vol. 74, No, 1, pp. 47–97, 2002.

Network Analysis on the Habitat Distribution of Medicinal Plants for Extracting Suitable Conditions

Hiroshi Frusawa^{1*} Ryosuke Usui¹

Masataka Takagi² Takashi Watanabe³

(Received: May 16th, 2016)

¹ School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology
185 Tosayamadacho-Miyanokuchi, Kami, Kochi, 782–8502, JAPAN

² School of Systems Engineering, Kochi University of Technology
185 Tosayamadacho-Miyanokuchi, Kami, Kochi, 782–8502, JAPAN

³ Eco-Frontier Center of Medicinal Resources,
5–1 Oe-honmachi, Chuo-ku, Kumamoto-shi, 860–0973, JAPAN

* E-mail: frusawa.hiroshi@kochi-tech.ac.jp

Abstract: We performed the GIS analysis on the habitat distribution obtained from medicinal plant inventory overall the Shikoku island. A variety of environmental conditions, including the slope and orientation of habitat locations, is extracted from the GIS plot. Our focus is placed on the similarity among environmental conditions of different habitat locations, rather than the spatial adjacency. We develop a new method of visualizing the environmental similarity, as a complementary technique to the geostatistics using the GIS. Our methodology consists of two unique parts: First, a new co-correlation function for representing the environmental similarity is defined. Next, the similarity is visualized by networking the habitat locations as nodes. The GIS data sources used are obtained from the inventory of *Cardiocrinum cordatum* whose habitat has been found at 97-locations. Based on the co-correlation function value as a measure of similarity between an arbitrary pair of environmental condition sets, it is adjusted which node pair is to be connected by edge. As the critical function value for connecting vertices is larger, the network structure is more diluted. Consequently, localized networks remain instead of covering the whole habitat distribution, which can be considered as emergence of the so-called communities. Our analysis provided two communities for the habitat distribution of *Cardiocrinum cordatum*. While the former environment is severe, another set of environmental conditions prove to be modest for culturing *Cardiocrinum cordatum* in the site of the Saoka project.