

受粉サービスを考慮したランドスケープ管理の最適化

吉本 敦 データ科学研究系 教授

本研究の背景: 受粉を必要とする農作物の生産では、ミツバチなど“送粉昆虫”の果たす役割は、生態系がもたらす重要な“生態系サービス”の一つである。ミツバチが蜜・花粉を求めて飛び回る際、体毛に花粉が付着し、雌しべの先につくことにより受粉が完了する。こうした自然受粉により生産される農作物は、市場においてオーガニック・フーズとして注目され取引されている。しかし、近年、世界各地で送粉昆虫、特にミツバチが減少し、花粉交配用のミツバチなどを入手することが困難になり、蜂蜜も含め自然受粉に依存する農作物の生産減少が危惧されている。その背景には、ミツバチの生息に適した植生の劣化・分断、蜜源植物の減少により、ミツバチの行動様式が激変したことに原因があるとされている。

本研究の目的: 本研究では、土地利用の改変に伴う効率的な花粉交配を念頭に蜂場・蜜源の最適配置を探索できる離散最適化モデルを構築する。

BESNet(Biodiversity & Ecosystem Services Network)による評価

Landdorf et al (2009)'s Model

(<https://www.besnet.world/modelling-pollination-services-across-agricultural-landscapes>)

PS(受粉スコア) =

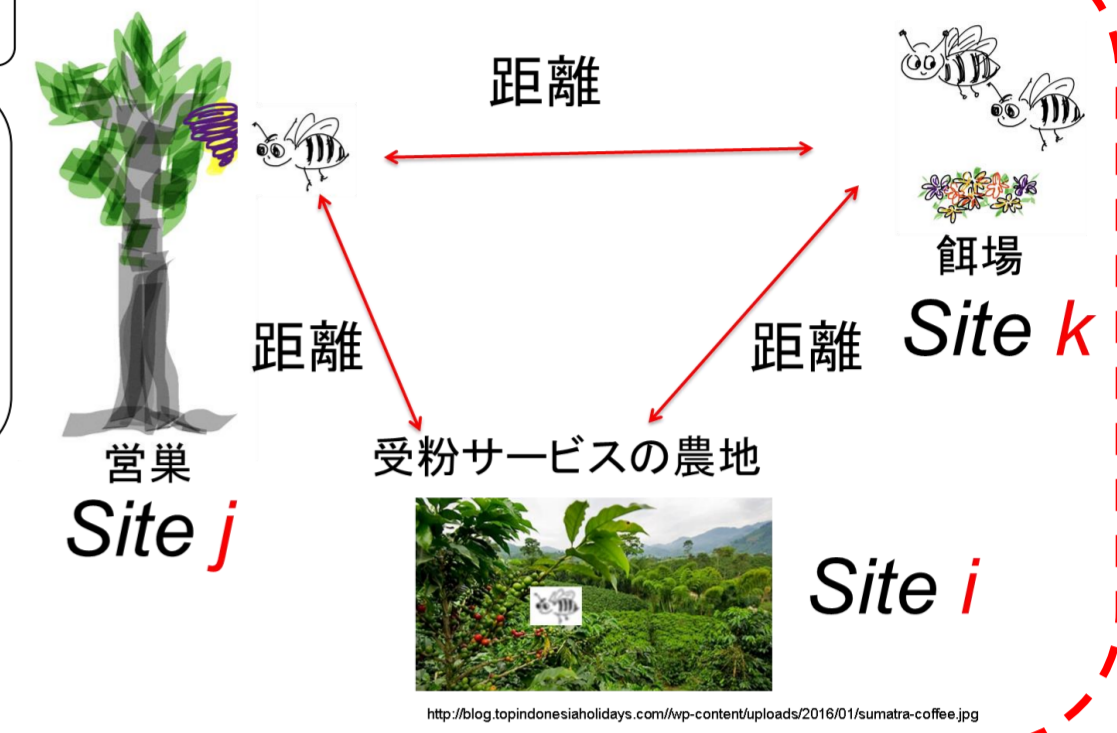
HN(営巣適地度) × HF(餌場適地度)

$$HN_i = C_h p_{ih}$$

C_h : Nest compatibility of h-land use for a pollinator
 p_h : Proportion of h-land use at i-site

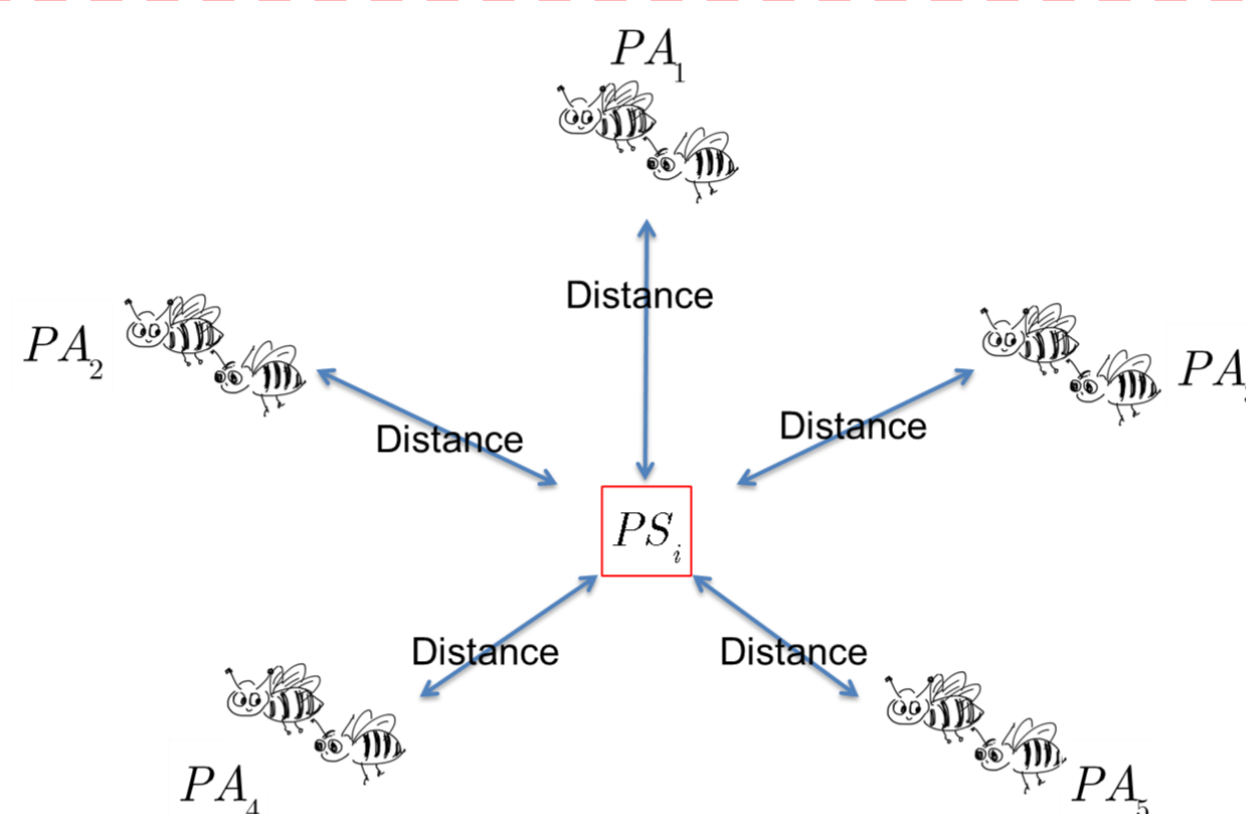
$$HF_i = \frac{\sum_{j=1}^N \exp(-D_{ij} / \alpha) F_l p_{jl}}{\sum_{j=1}^N \exp(-D_{ij} / \alpha)}$$

D_{ij} : Euclidian distance from i-parcel to j-site
 F_l : Forage Compatibility of l-land use for a pollinator
 α : Expected foraging distance for a pollinator
 N : The total number of sites
 p_j : Proportion of l-land use at j-site



$$PA_i = HN_i \cdot HF_i: \text{Pollinator Abundance}$$

$$PS_i = \frac{\sum_{j \neq i} \exp(-D_{ij} / \alpha) PA_j}{\sum_{j \neq i} \exp(-D_{ij} / \alpha)}$$



$$PS_i = \frac{\sum_{j \neq i} \exp(-D_{ij} / \alpha) \nu_j(h) \left[\frac{\sum_{k \neq j} \exp(-D_{jk} / \alpha) \varphi_k(l)}{\sum_{k \neq j} \exp(-D_{jk} / \alpha)} \right]}{\sum_{j \neq i} \exp(-D_{ij} / \alpha)}$$

$\nu_j(h) = C_h p_{jh}$
 $\varphi_k(l) = F_l p_{kl}$ } ← Land use dependent

ランドスケープ管理の最適化問題

$x_{ih} = \begin{cases} 1 & \text{if the h-th land use is selected for the i-th parcel} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

$$\sum_{h=1}^H x_{ih} = 1 \quad \forall i$$

$$C_h p_{ih} = \nu_i(h) = \nu_h \cdot x_{ih}$$

$$F_l p_{jl} = \varphi_j(l) = \varphi_l \cdot x_{jl}$$

$$PS_i = \frac{\sum_{j \neq i} \exp(-D_{ij} / \alpha) \left[\frac{\sum_{k \neq j} \exp(-D_{jk} / \alpha) \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^H \nu_h \varphi_l x_{jh} x_{kl}}{\sum_{k \neq j} \exp(-D_{jk} / \alpha)} \right]}{\sum_{j \neq i} \exp(-D_{ij} / \alpha)}$$

Method III

$$y_{jh}^{kl} = x_{jh} \cdot x_{kl}$$

$$1: \sum_{l=1}^H y_{jh}^{kl} = x_{jh}, \quad \forall h, \forall k (\neq j), \forall j, (\text{note: } \sum_{l=1}^H x_{kl} = 1)$$

$$2: \sum_{h=1}^H y_{jh}^{kl} = x_{kl}, \quad \forall l, \forall k (\neq j), \forall j, (\text{note: } \sum_{h=1}^H x_{jh} = 1)$$

Forest	森林
Coffee	コーヒー
Cane	砂糖キビ
Pasture	草地
Scrub	雑木林
Bare	裸地
Build	建造地

受粉サービスを考慮した最適ランドスケープ

1. PS最大化

$$\max J = \sum_{i=1}^N PS_i$$

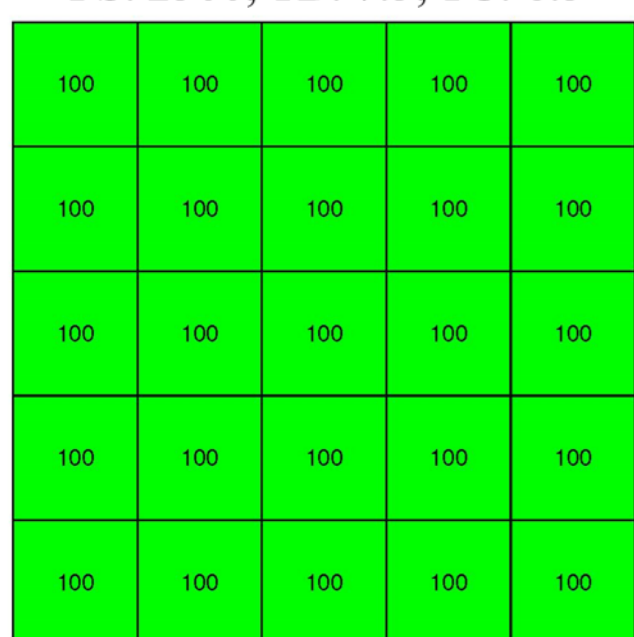
subject to

$$PS_i = \sum_{j \neq i} \sum_{k \neq j} \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^H a_{jk}^i \nu_h \varphi_l y_{jh}^{kl}, \quad \forall i$$

$$\sum_{h=1}^H x_{ih} = 1, \quad \forall i$$

Method III

PS: 2500, TB: 7.5, TC: 6.5



2. 便益最大化

$$\max TB = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^H b_h \cdot L_i \cdot x_{ih}$$

subject to

$$PS_i = \sum_{j \neq i} \sum_{k \neq j} \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^H a_{jk}^i \nu_h \varphi_l y_{jh}^{kl}, \quad \forall i$$

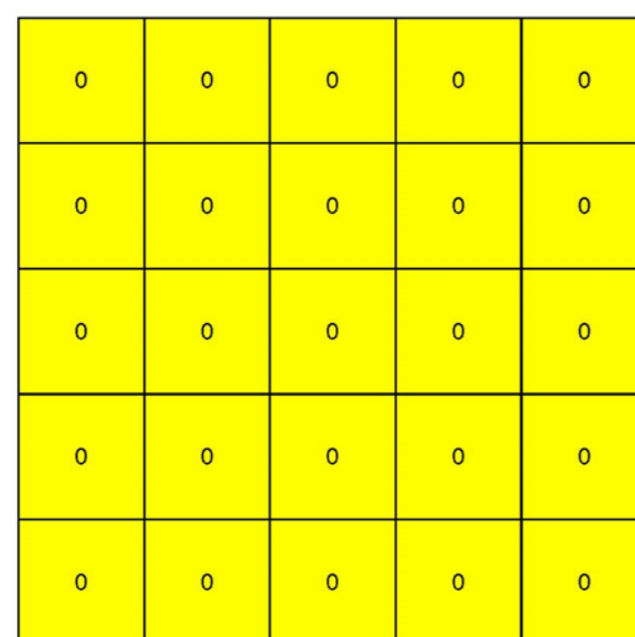
$$\sum_{h=1}^H x_{ih} = 1, \quad \forall i$$

Method III

L_i : land area of the i-th cell

1 Forest	0.3
2 Coffee	1
3 Cane	1.2
4 Pasture/grass	0.7
5 Scrub	0.1
6 Bare	0
7 Built	0

PS: 0, TB: 30, TC: 5.7



3. PS制約下の便益最大化

$$\max TB = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^H b_h \cdot L_i \cdot x_{ih}$$

subject to

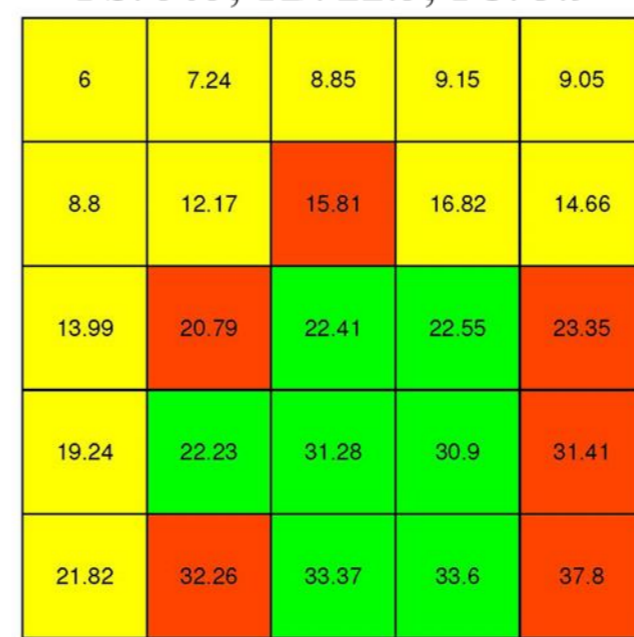
$$PS_i = \sum_{j \neq i} \sum_{k \neq j} \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^H a_{jk}^i \nu_h \varphi_l y_{jh}^{kl}, \quad \forall i$$

$$\sum_{i=1}^N PS_i \geq 0.2 \cdot PS_{\max}$$

$$\sum_{h=1}^H x_{ih} = 1, \quad \forall i$$

Method III

PS: 505, TB: 22.5, TC: 3.9



4. 利益最大化

$$\max TB - TC$$

subject to

$$TB = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^H b_h \cdot L_i \cdot x_{ih}$$

$$TC = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^H c_{hl} \cdot L_i \cdot z_{hl}^i$$

$$2z_{hl}^i \leq x_{ih}^0 + x_{ih} \leq 2z_{hl}^i + 1, \quad \forall i, h, l$$

$$PS_i = \sum_{j \neq i} \sum_{k \neq j} \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^H a_{jk}^i \nu_h \varphi_l y_{jh}^{kl}, \quad \forall i$$

$$\sum_{h=1}^H x_{ih} = 1, \quad \forall i$$

Method III

Conversion Cost	1 Forest	2 Coffee	3 Cane	4 Pasture/grass	5 Scrub	6 Bare	7 Built
1 Forest	0	0	0.5	0.8	0.2	0.1	0
2 Coffee	0.5	0	0.5	0.2	0.1	0	0
3 Cane	0.8	0.8	0	0.2	0.1	0	0
4 Pasture/grass	0.2	0.2	0.2	0	0.1	0	0
5 Scrub	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0
6 Bare	0	0	0	0	0	0	0
7 Built	0	0	0	0	0	0	0

PS: 11, TB: 28.3, TC: 2.5

