

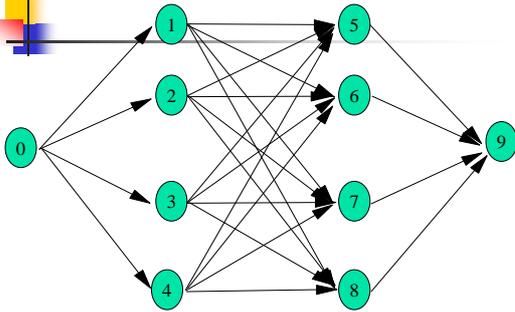
最適林分経営モデルによる 間伐戦略最適化と炭素吸収機能評価

吉本 敦(東北大学大学院)
柳原宏和(筑波大学)
能本美穂(九州大学大学院)

目的

- 動的計画法による最適林分経営モデルを用いて、炭素吸収を考慮した最適間伐戦略の探求
- 報告
- 動的計画法によるモデリング
- 密度管理図による成長モデル
- 炭素吸収量の推定
- シミュレーション分析

動的計画法の応用



Bellmanの最適性の原理

- "An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision. (訳: 最初の状態と決定がどうであっても残りの決定は、最初の決定の結果出てきた状態に関して最適方針となっていないといけない)

DP定式化

- 期間内のアクションによって得られる総収益の最大化

$$f_n^*(s_n) = \max_{\{x_n\}} \{f_n(s_n, x_n)\}$$

$$f_n(s_n, x_n) = c(s_n, x_n) + f_{n+1}^*(x_n)$$

N : 期間

s_n : 状態

x_n : n 期における決定変数

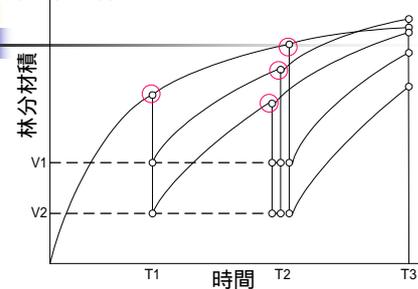
x_n^* : x_n の最適解

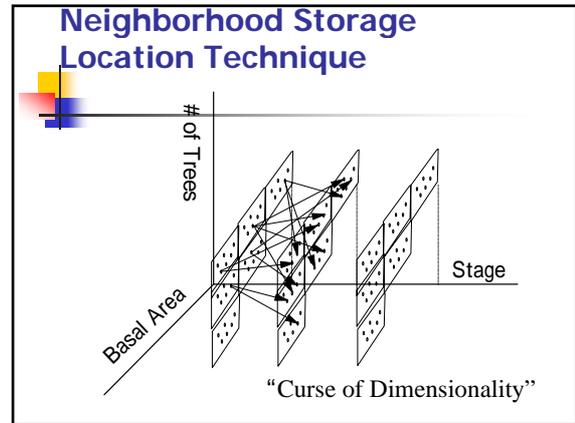
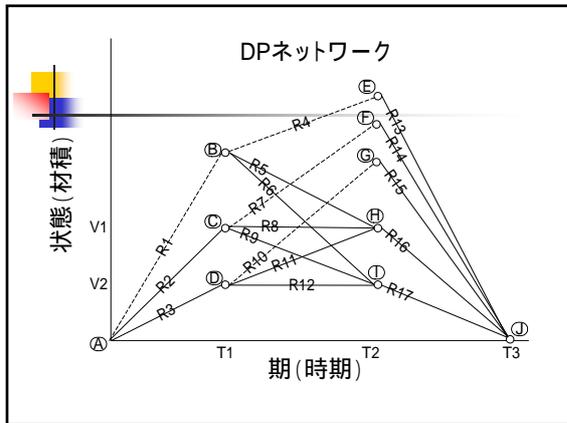
$f_n(s_n, x_n)$: 状態 s_n における決定 x_n の貢献

$c(s_n, x_n)$: 状態 s_n において決定 x_n を選択した際の部分目的関数値

$f_n^*(s_n)$: 状態 s_n での最適値

間伐戦略への応用





変分法 Calculus of Variation

$$J^* = \max_{\{x(t)\}} J = \int_{t_0}^{t_1} I(x(t), \dot{x}(t), t) dtz$$

$$x(t_0) = x_0$$

$$x(t_1) = x_1$$

PATHアルゴリズム (Calculus of Variation) Projection Alternative Technique

$$J^* = \max_{\{V(t)\}} J = \int_{t_0}^{t_n} \dot{V}(T(t), t) dt$$

$$V(t_0) = V_0$$

$$V(t_n) = V_n$$

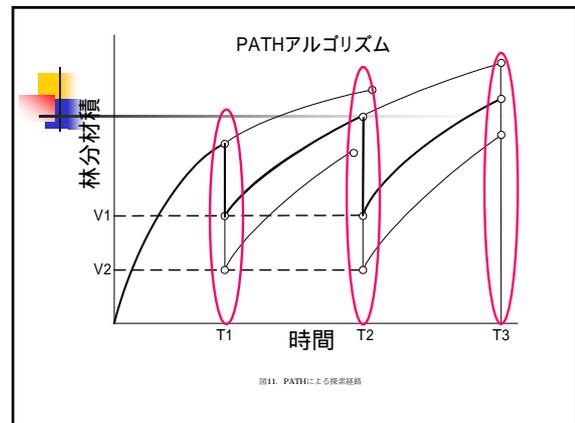
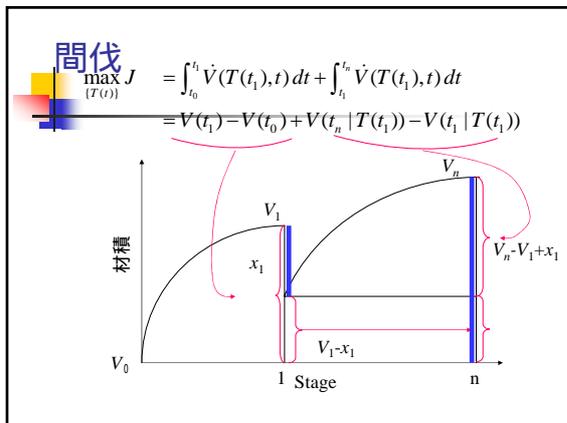
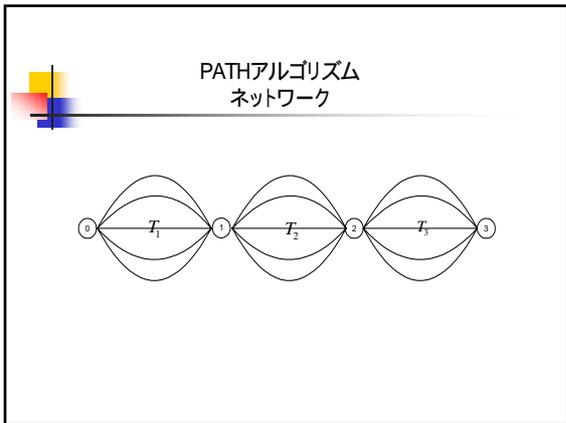


図11. PATHによる探索経路



最適解の探求

$$\max_{\{T(t)\}} J = \sum_{i=1}^n \int_{T_{i-1}}^{T_i} \dot{V}(T(t_{i-1}), t) dt$$

$$= \sum_{i=1}^n \{V(t_i | T(t_{i-1})) - V(t_{i-1} | T(t_{i-1}))\}$$

↓

$$V(t_{i-1} | T(t_{i-2})) = T(t_{i-1}) + V(t_{i-1} | T(t_{i-1}))$$

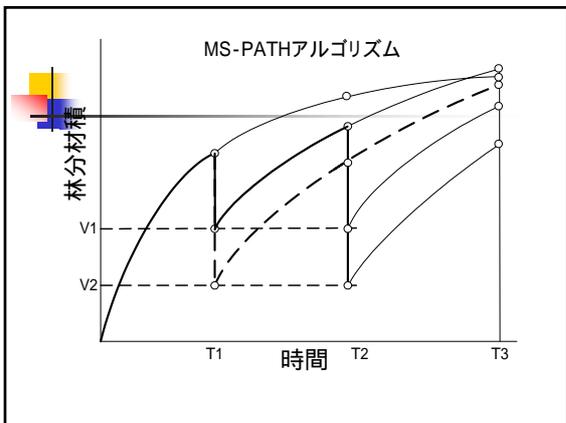
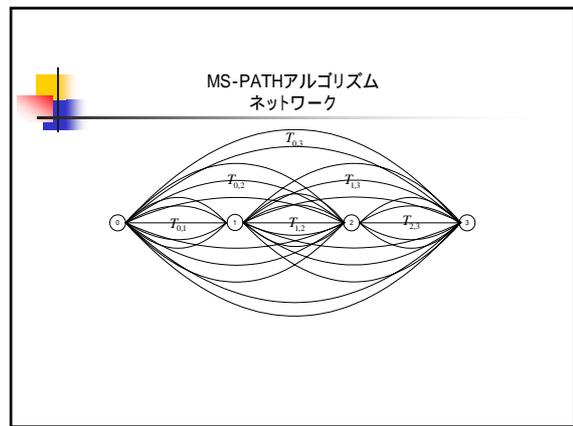
∴

$$\max_{\{T(t_i)\}} J = \sum_{i=1}^n \{-V(t_{i-1} | T(t_{i-2})) + \underline{T(t_{i-1}) + V(t_i | T(t_{i-1}))}\}$$

$$f_n^* = \max_{\{T_n\}} \{f_n(T_n)\}$$

$$f_n(T_n) = \underline{T_n + V_{n+1}(T_n)} - V_n^* + f_{n-1}^*$$

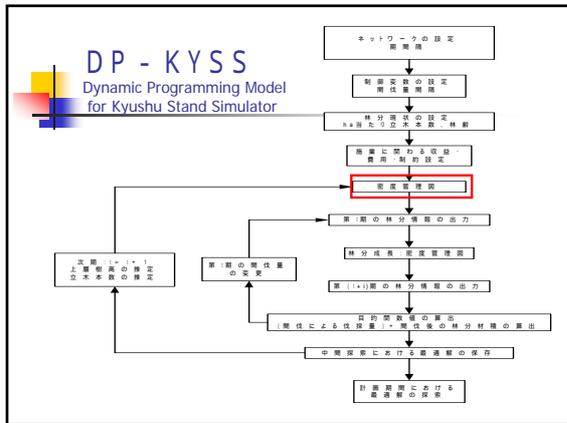
$T_n = T(t_n)$: 時間 t_n での間伐量
 $V_{n+1}(T_n) = V(t_{n+1} | T_n)$: 時間 t_n で間伐 T_n を施した後の時間 t_{n+1} における材積
 $V_n^* = V_n(T_{n-1}^*)$: 時間 t_{n-1} で最適間伐 T_{n-1}^* を施した後の時間 t_n での材積



$$f_n^* = \max_{\{T_{n-i,n}, i\}} \{f_{n-i,n}(T_{n-i,n})\}$$

$$f_{n-i,n}(T_{n-i,n}) = \underline{T_{n-i,n} + V_n(T_{n-i,n})} - V_{n-i}^* + f_{n-i}^*$$

$T_{n-i,n}$: 第 n 期をターゲットとした第 $(n-i)$ 期における間伐量
 $V_n(T_{n-i,n})$: $T_{n-i,n}$ を実行した時の第 n 期における林分材積
 i^* : 第 n 期をターゲットとした最適な期間 i
 T_n^* : 第 n 期をターゲットとした第 $(n-i^*)$ 期における最適間伐量
 V_n^* : $V_n(T_n^*)$



成長モデル

林分密度管理関数構成アクトー

構成要素	関数式
上層樹高	$H = a(1 - e^{-bH})^c$
平均単木材積	$V = \frac{1}{0.068509N \cdot H^{-1.347464} + 2658.2 \cdot H^{-2.814681}}$
自然枯死線	$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} \cdot e^{-\lambda t}$
植栽本数 N_0	$3.47089 \times 10^4 \cdot N_0^{-0.9194}$
ha 当たり材積	$V = v \cdot N$
林分形状高	$HF = 0.791213 + 0.244012H\sqrt{N} / 100 + 0.353895H$
ha 当たり断面積	$G = \frac{V}{HF}$
断面積平均直径	$\overline{D}_G = 200\sqrt{G/(v \cdot N)}$
平均胸高直径	$\overline{DBH} = -0.048940 - 0.034814H\sqrt{N} / 100 + 0.98937Dg$
最多密度における ha 当たり本数	$N_{Ry} = 10^{5.3083} H^{-1.4672}$
最多密度における ha 当たり材積	$V_{Ry} = \frac{N_{Ry}}{0.068509 N_{Ry} \cdot H^{-1.347464} + 2658.2 H^{-2.814681}}$
収量比率	$Ry = \frac{V}{V_{Ry}}$

ランダム効果を伴う多変量非線形回帰モデルによる樹高成長曲線モデルの推定

成長データ $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{ip})'$ に成長曲線 $\eta(t, \xi)$ をあてはめる。

- 従来の成長曲線モデル

$$y = \eta(t, \xi) + \varepsilon$$

$$\varepsilon: \text{誤差項, } E(\varepsilon) = 0, \text{Cov}(\varepsilon) = \sigma^2 I_p \quad \text{系列相関無し}$$
- ランダム効果を伴った成長曲線モデル

$$Z(t, \theta) = \frac{\partial}{\partial \xi'} \eta(t, \xi) \Big|_{\xi = \theta}$$

$$y = \eta(t, \xi) + \varepsilon$$

$$y = \eta(t, \theta) + e$$

$$\varepsilon: \text{誤差項, } E(\varepsilon) = 0, \text{Cov}(\varepsilon) = \sigma^2 I_p$$

$$\xi: \xi = \theta + \beta, E(\beta) = 0, \text{Cov}(\beta) = \Psi$$

$$\text{Cov}(e) = \Sigma(t, \theta)$$

$$= Z(t, \theta)\Psi Z(t, \theta)' + \sigma^2 I_p$$

系列相関有り

林分平均成長

n 本の林木がある林分での平均成長の推定。

- 従来の成長曲線モデル

$$y_i = \eta(t, \theta) + \varepsilon_i, (i = 1, \dots, n)$$

残差平方 $\sum_{i=1}^n (y_i - \eta(t, \theta))^2$ の最小化
- ランダム効果を伴った成長曲線モデル

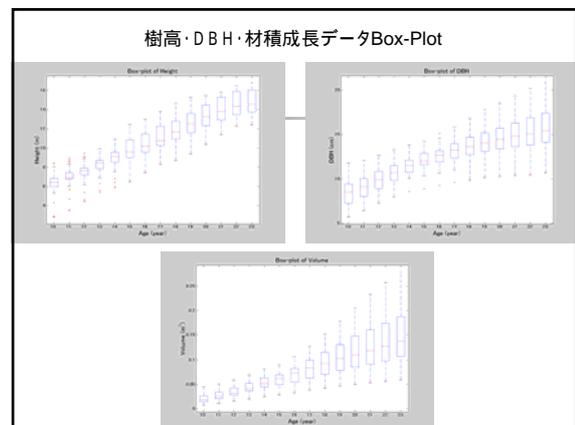
$$y_i = \eta(t, \theta) + e_i, (i = 1, \dots, n)$$

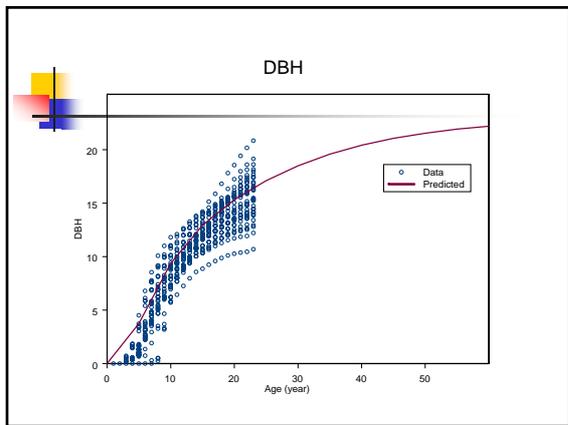
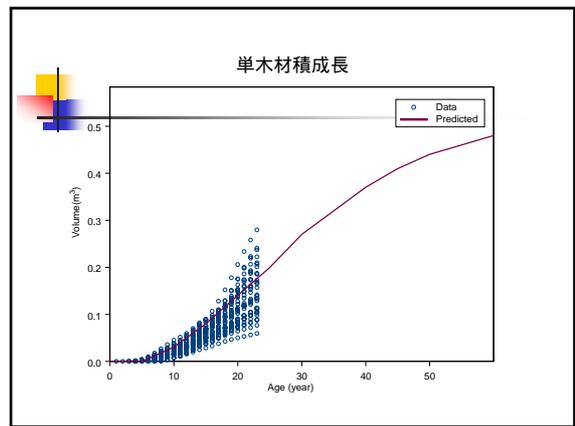
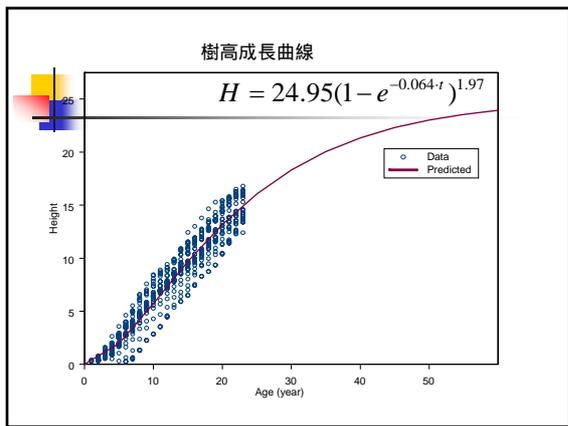
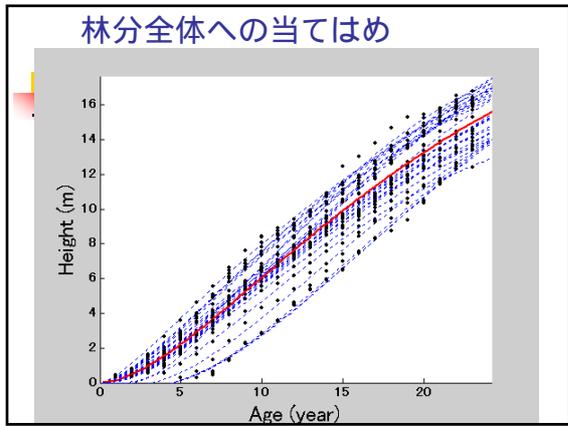
重み付き残差平方 $\sum_{i=1}^n (y_i - \eta(t, \theta))' \Sigma(t, \theta)^{-1} (y_i - \eta(t, \theta))$ の最小化

個々の林木の成長曲線のパラメータは $\xi_i = \theta + \beta_i$ であり、後に β_i を推定することで ξ_i を推定可能。

成長データ

- 福岡県八女群野村における23年生の無間伐林により抽出した30本
- 林分内の林木の総数は136本

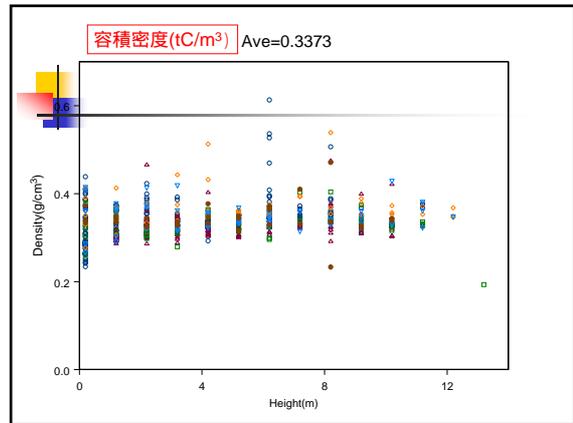
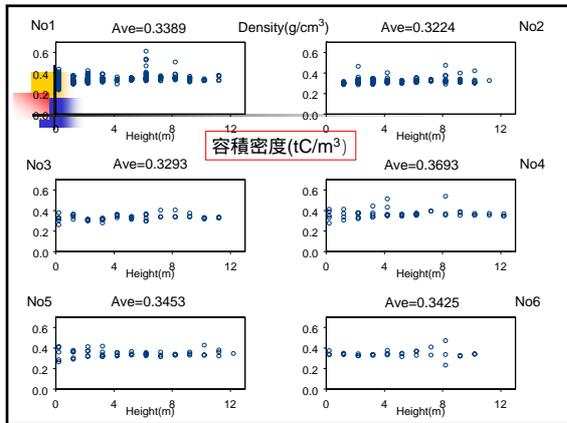




炭素重量の推定

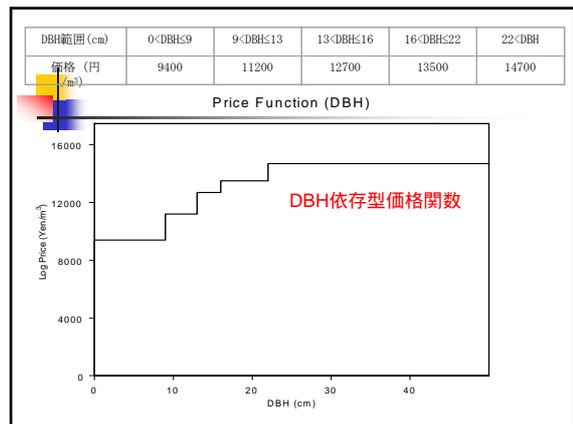
$$Wc = \rho_0 \times V \times E \times C$$

- Wc: 炭素重量 (tC)
- ρ_0 : 容積密度 (g/cm³)
- V: 幹材積 (m³)
- E: 拡大係数 (針葉樹: 1.7)
- C: 炭素含有係数 (gC/g: 0.5)



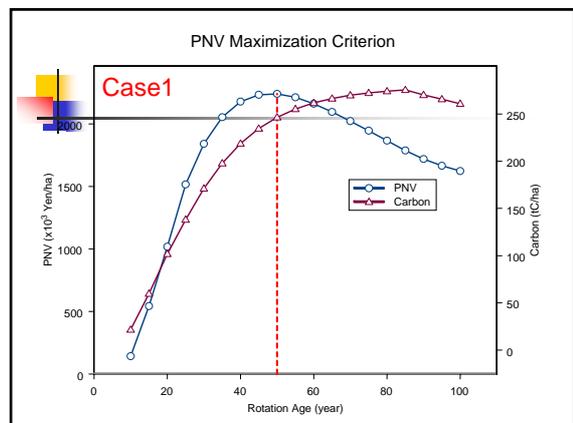
最適間伐戦略と炭素吸収シミュレーション設定1

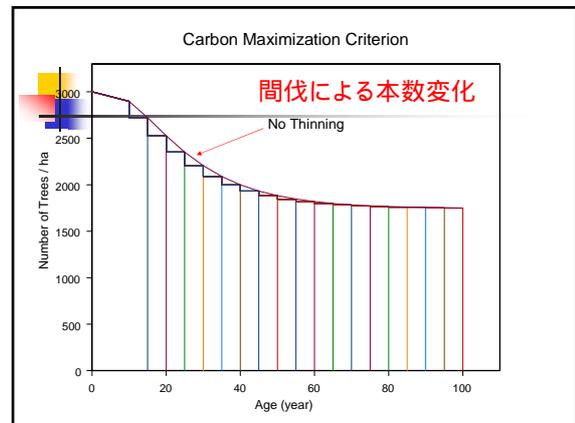
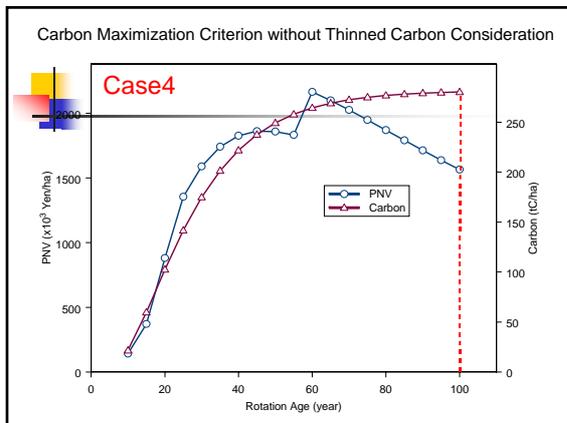
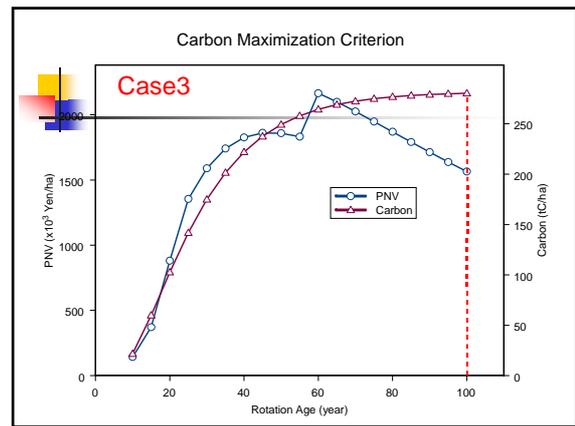
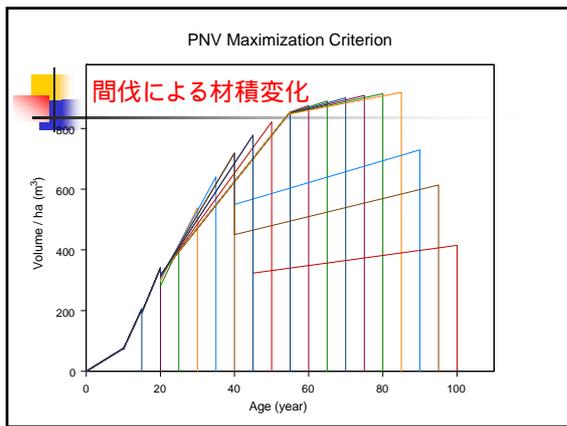
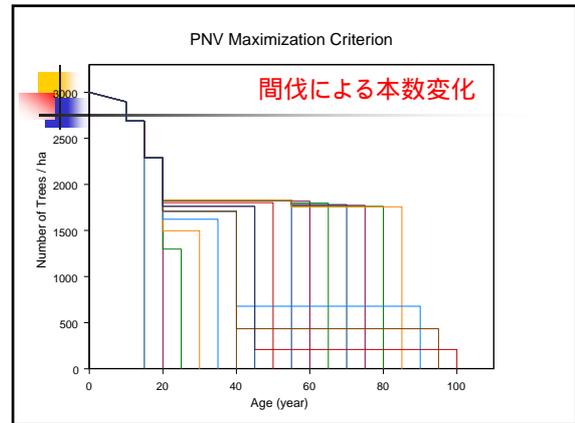
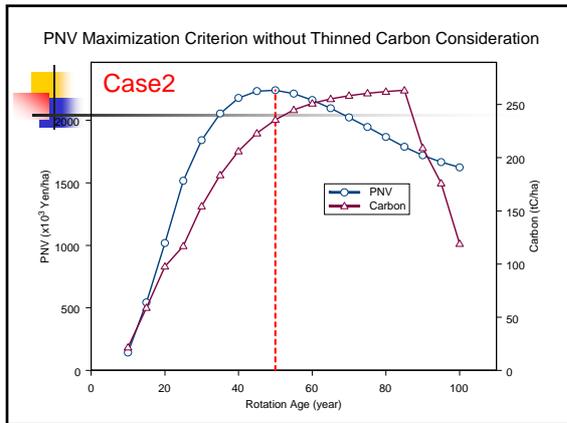
- 林齢 (年) : 0
- 立木本数 (/ha) : 3000
- 年割引率 (%) : 1%
- 主伐費用入力(立米毎) : 8000円/m³
- 間伐費用入力(立米毎) : 10000円/m³
- 丸太歩留率 (%) : 65%
- 容積密度入力 (g/cm³) : 0.3373
- 拡大係数入力 : 1.7
- 炭素含有係数 (gC/g) : 0.5
- 間伐可能林齢 (年) : 10年
- 間伐に関わる最大収量比 (0.15) : 1
- 次期先基準 : MSPATHアルゴリズム
- 目的関数 : PNV最大化・炭素吸収量最大化
- 間伐間隔 : 5本
- 期間隔 : 5年
- 計画期間 : 100年

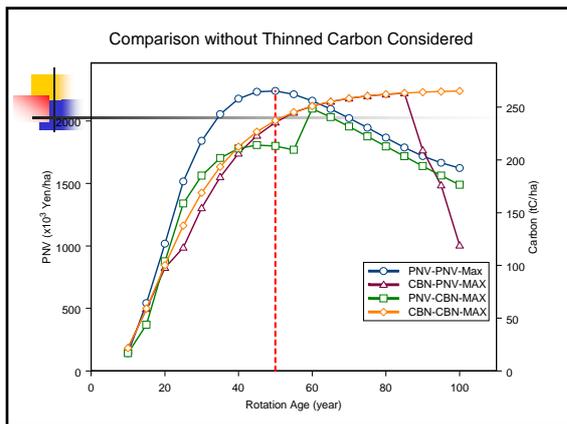
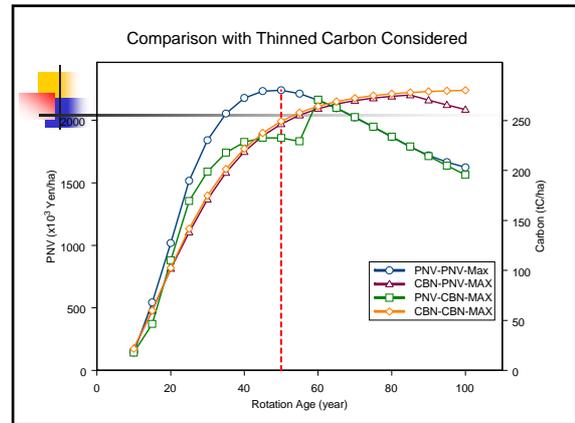
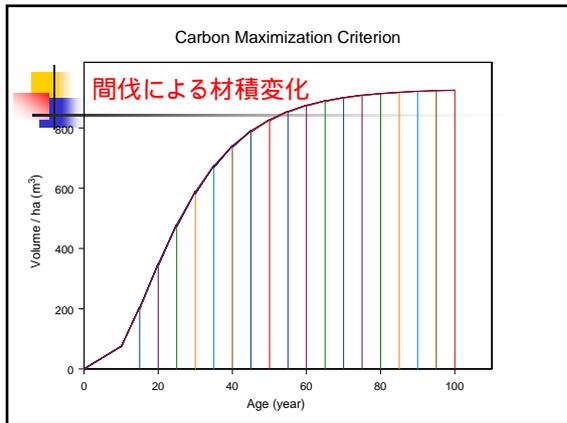


最適間伐戦略と炭素吸収シミュレーション設定2

- PNV最大化
 - Case1: 間伐による炭素吸収量 → 貯蔵
 - Case2: 間伐による炭素吸収量 → 排出
- 炭素吸収量最大化
 - Case3: 間伐による炭素吸収量 → 貯蔵
 - Case4: 間伐による炭素吸収量 → 排出







結論

- 成長モデルの改良の問題もあるが、
- 間伐 = 貯蔵
 - PNV最大化による炭素吸収量と炭素吸収量最大化による炭素吸収量の差はそれほどない
 - しかしながら、得られるPNVに差が生じる
- 間伐 = 排出
 - 炭素吸収量だけを考慮すると何もしない方がいい
 - PNV最大化によっても80年位までの伐期齢であれば、吸収される炭素の量はそれほど変わらない

➡ 集材工程まで考慮した炭素収支分析は林学会で！