

# 木質燃料サプライチェーンの最適化に基づく 木質バイオマス利用システムの評価

東京農工大学

秋澤 淳

バイオマス産業社会ネットワーク 2022年5月28日

第206回研究会

# 自己紹介

- 専門：システム工学をエネルギー関連分野に応用した「エネルギーシステム工学」
- 研究分野
  - **最適化モデルを用いたシステム分析・技術評価**
    - コージェネレーションを含む地域分散型エネルギーシステムの効果
  - **熱駆動冷凍サイクルの高性能化**
    - 吸着冷凍サイクルによる低温排熱 (<100°C) 利用
  - **太陽集光・集熱系の設計**
    - 太陽熱利用への応用

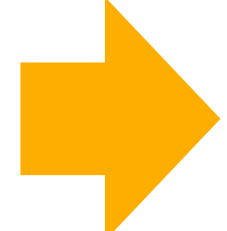
# 木質バイオマス燃料利用システム の評価

# アウトライン

## 木質燃料サプライチェーンの最適化に基づく木質バイオマス利用システムの評価

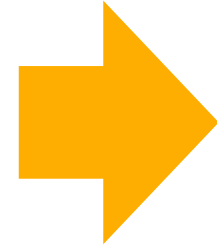
- ・ 研究背景・目的
- ・ 木質燃料サプライチェーンのモデル化
- ・ ケーススタディ対象エリア
- ・ 最適化型モデルの定式化
- ・ 最適化結果
- ・ 感度分析：林業生産性が与える影響
- ・ まとめ

# 研究の基本的な考え方

- 問題意識
    - 木質燃料の利用が林業の活性化につながる構造は描けるのか
    - バイオマス産業都市のポンチ絵は描かれているが、実際に地域の林業と燃料利用が結びついて運用されている事例があまり見受けられない
  - 望ましい全体像が見えていないのではないか
    - 燃料供給側，燃料使用側が別々に取り扱われている
-  **木質燃料利用のサプライチェーン全体が一気通貫で合理的につながる**ときの，地産地消の姿を描き出す

# 研究目的

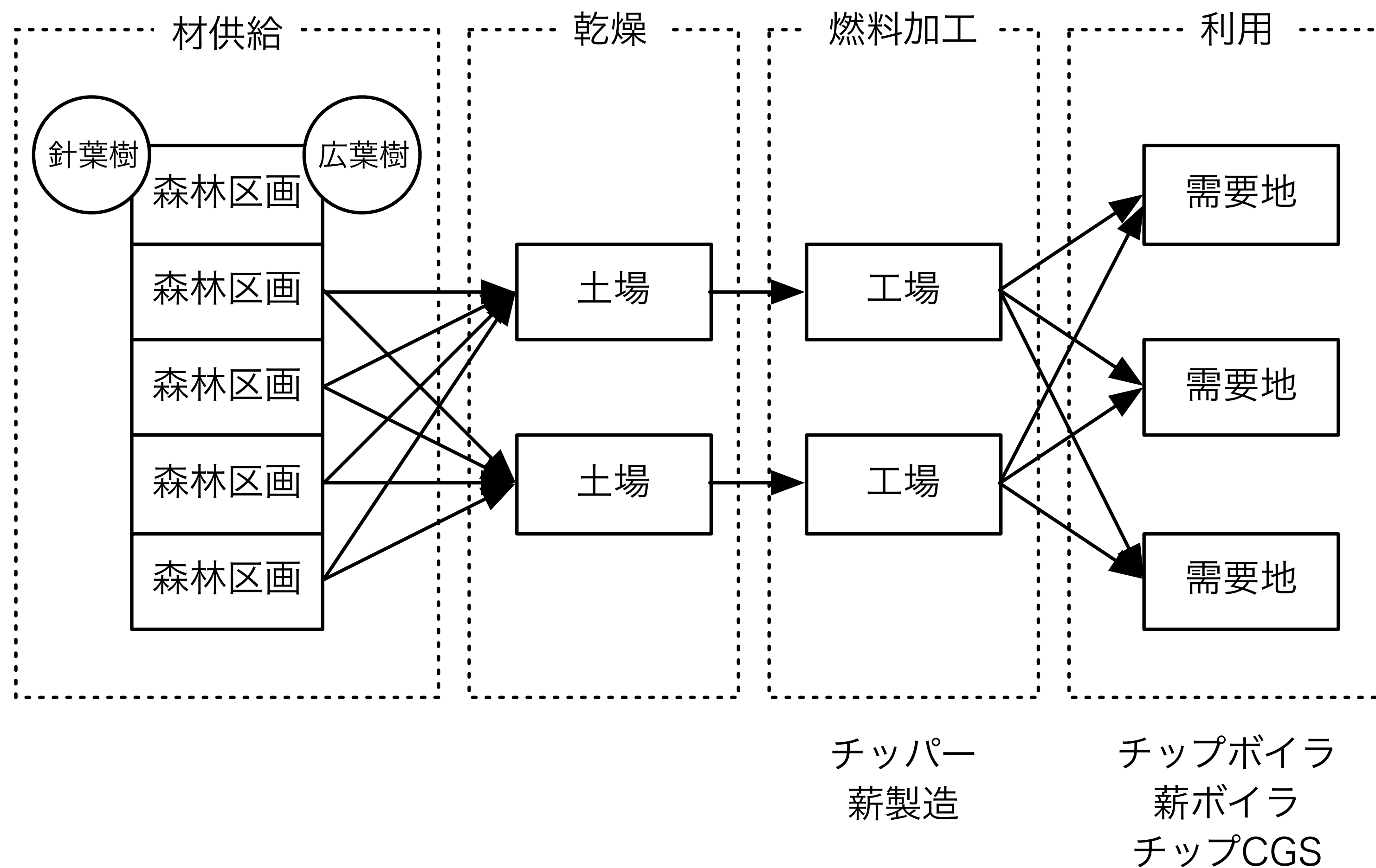
## 木質バイオマス燃料の利用を広めるには何をすればよいか

- 研究背景
    - 木質バイオマスの利用拡大を図るために、燃料利用と林業との連携をどのように構成すればよいのか？
  - 研究目的
    - **木質燃料の上流から下流までのサプライチェーン全体を合理的に運用すると、どのような絵姿が描けるのか**
      - 木質資源の間伐計画と整合性のある燃料利用の形態を探る
-  経済合理的な木質燃料利用の設備計画・運用計画を見出す

# 木質燃料のサプライチェーンのモデル化

## 上流から下流まで

- 木材資源
  - 針葉樹間伐 … 計画的
  - 広葉樹伐採 … 天然更新
- 土場に搬出（複数候補地）
- 乾燥（1年間）
- 燃料化
  - チップまたは薪に加工
- 需要側に輸送（複数用途）
- 燃料として使用



# 対象エリア ケーススタディ

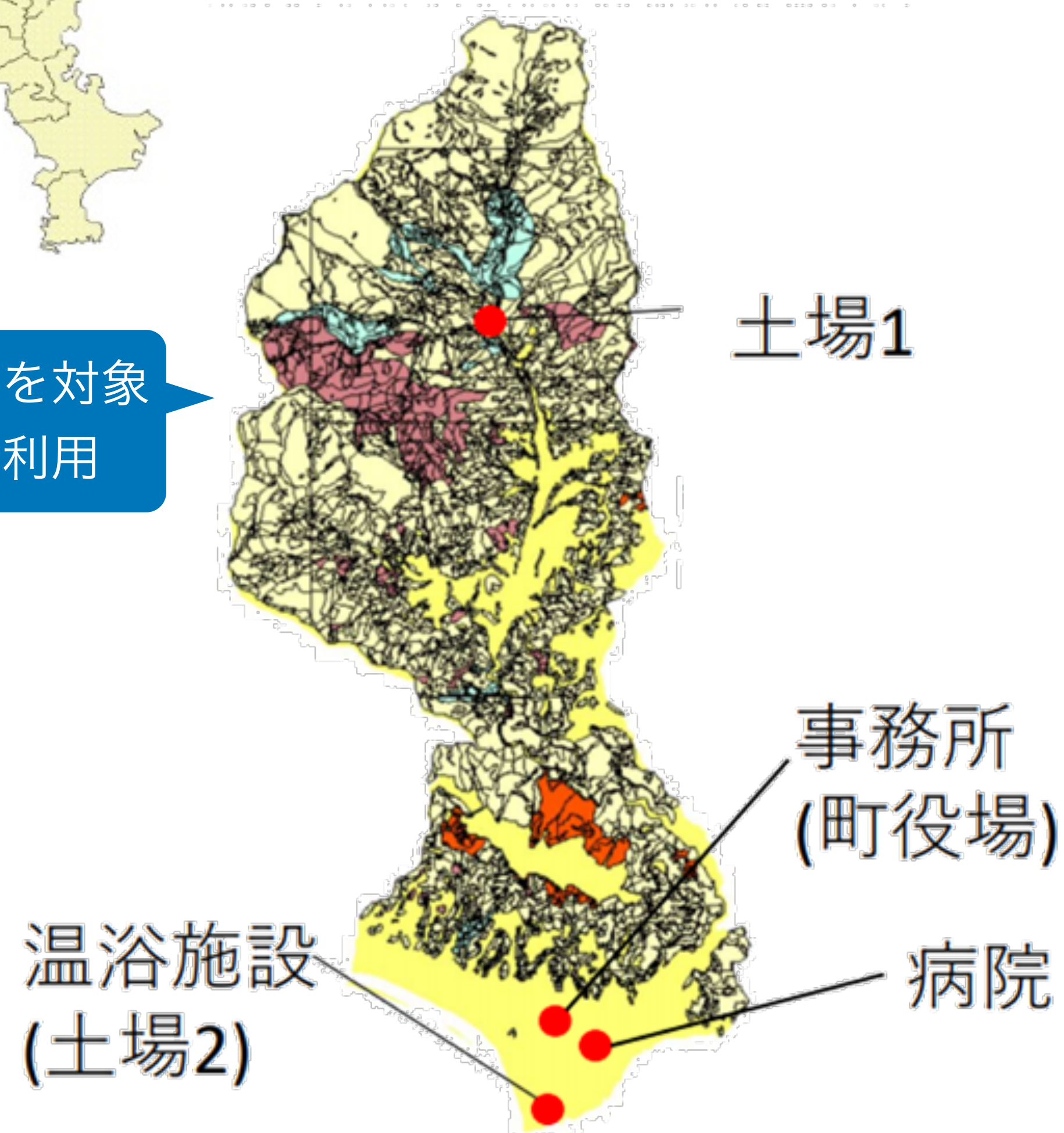
- ・ 神奈川県松田町
  - ・ 人口：約1万人（2021年）
  - ・ 森林面積：2,900ha（2015年）
    - ・ 町面積の76%を占める
- ・ 町有林・公社林を利用可能資源と仮定
- ・ 土場2ヶ所を想定
  - ・ 山林エリアと市街地エリアに各1ヶ所
  - ・ 乾燥ヤードおよび燃料化プラントが立地すると仮定



## 松田町の地図

小区画がそれぞれ森林のポリゴンを表す

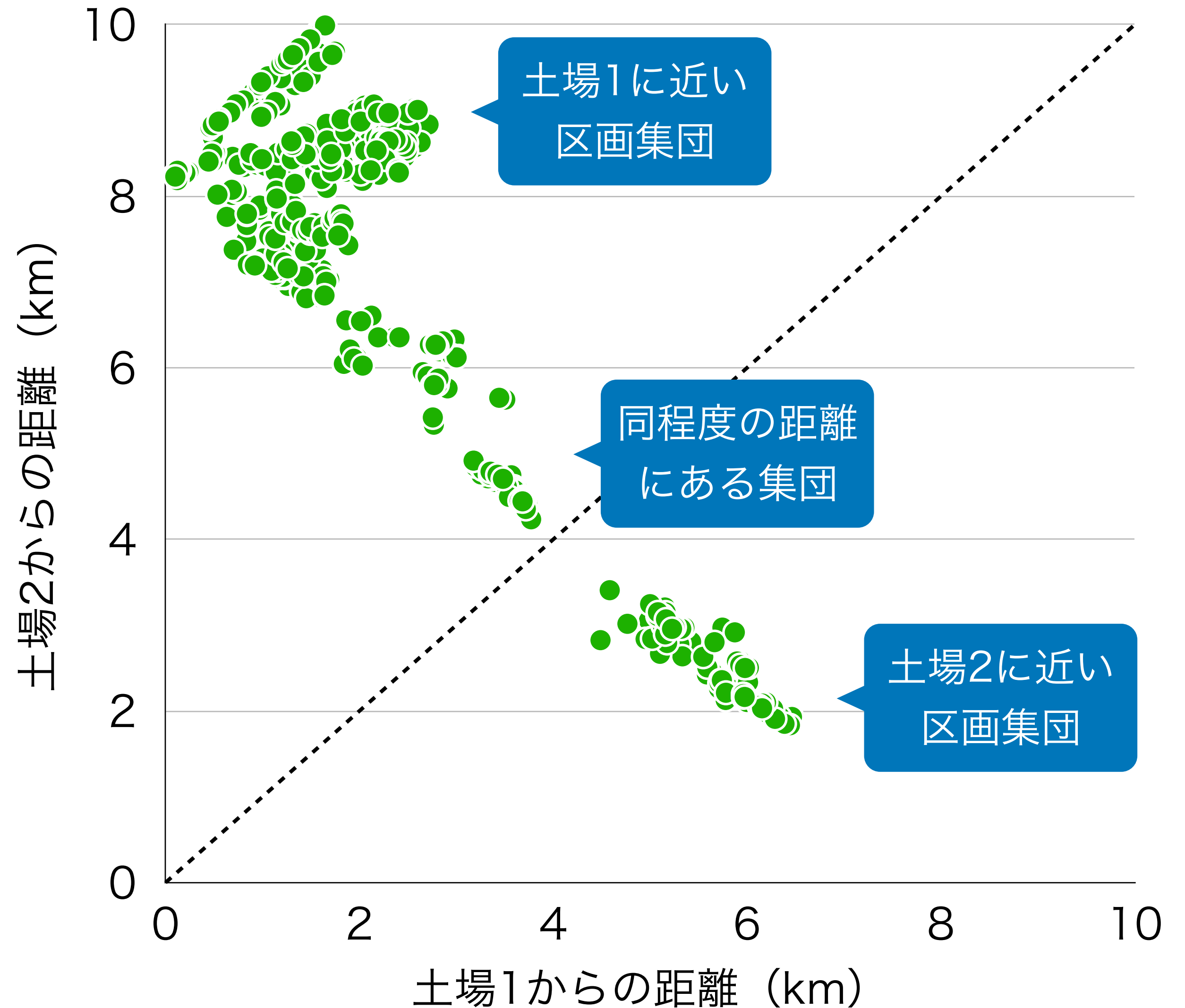
町有林等を対象  
に材を利用





# 森林区画の立地 土場との距離

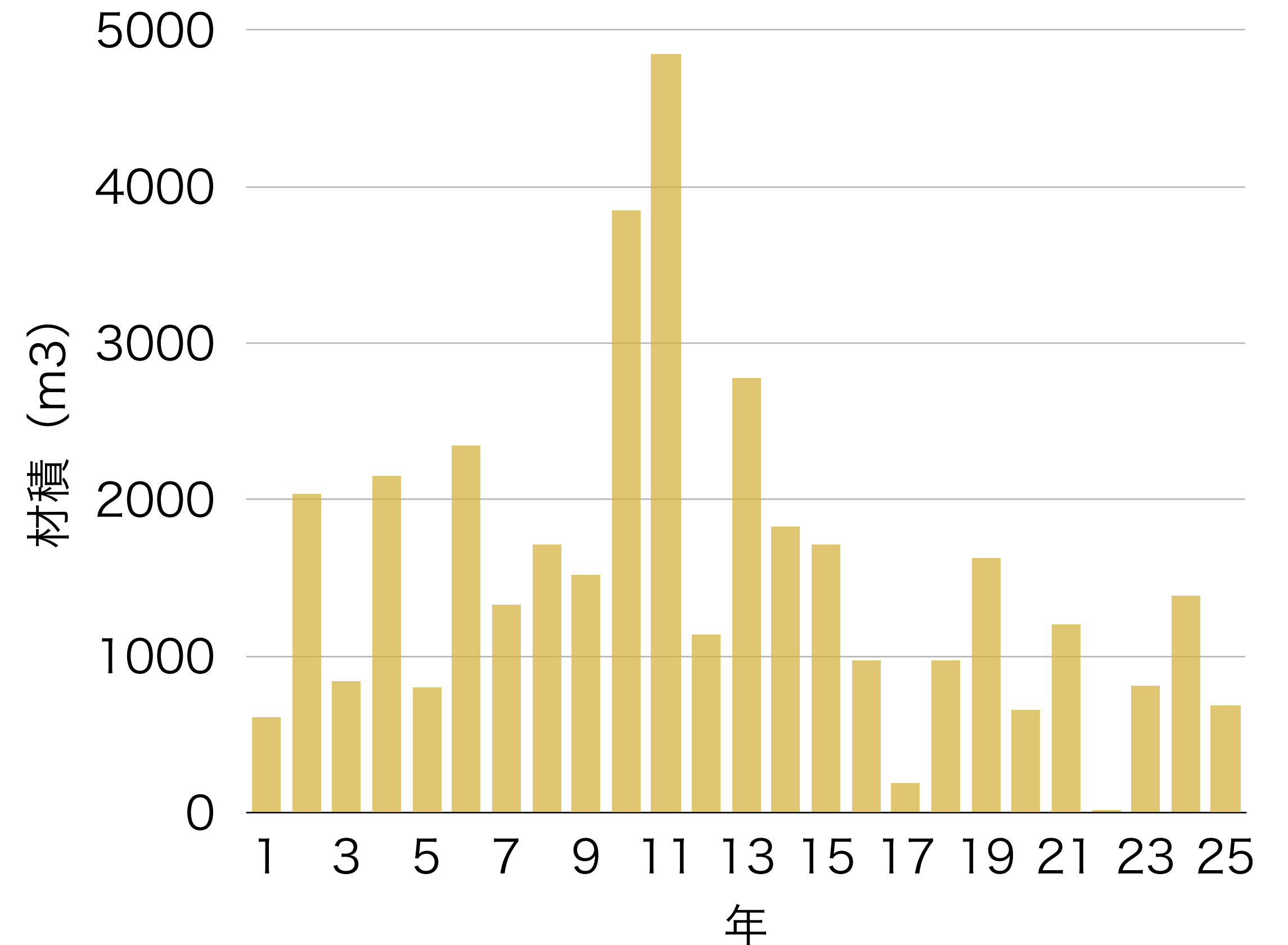
- 対象の森林区画：373区画
  - 1ha以下：82%
  - 約半分は0.2ha以下
- 土場との距離関係
  - 土場1に近い森林区画が非常に多い
  - 土場2に近い森林区画は少数



# 間伐材等の資源生産のモデル

- 木質資源ストック
  - GISを用いて区画ごとにデータを与える
  - 土場への輸送距離も考慮
- 針葉樹
  - 間伐計画ツールLycsを使用し、25年間の間伐材産出データを作成（材の質は区別せず）
- 広葉樹
  - 現在あるものを20年間で全て伐採。その後は天然更新とする
  - 年々の伐採量は最適化によって導く

針葉樹の間伐材積



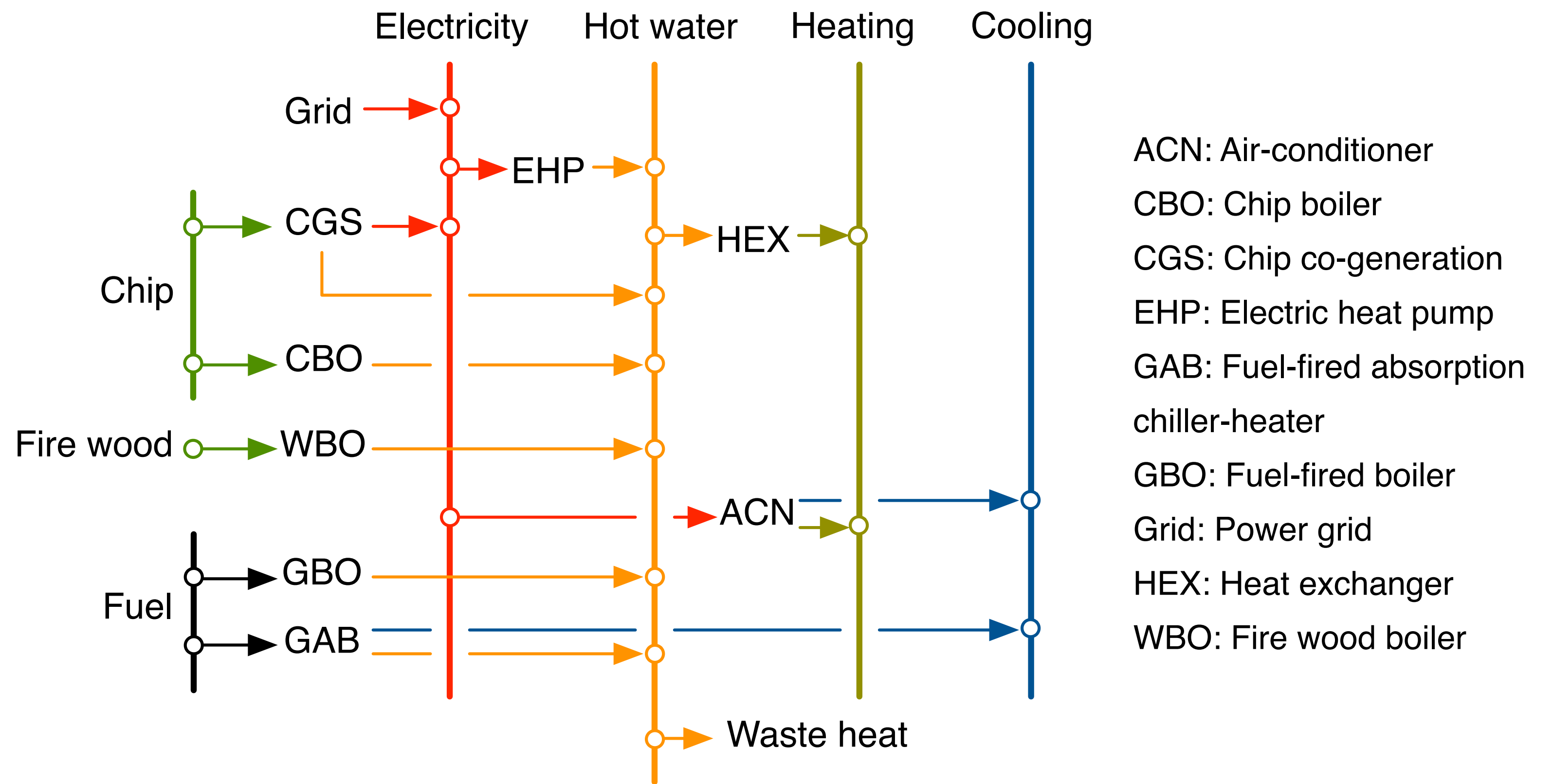
# 針葉樹と広葉樹の取り扱い

- 針葉樹と広葉樹の物性の違い
  - 密度
  - 発熱量
    - 広葉樹は重量あたりでは針葉樹とほぼ同等であるが、体積あたりでは大きい。
- 伐採労働生産性の違い
  - 広葉樹の方が生産性が低いと想定

種別	針葉樹	広葉樹
比重 (t/m <sup>3</sup> )	0.38	0.67
重量あたり発熱量 (MJ/kg)	12.8	12.1
体積あたり発熱量 (GJ/m <sup>3</sup> )	4.9	8.1
伐採コスト (円/m <sup>3</sup> )	3,700	11,500

# 需要家側のエネルギー利用のモデル

- 建物内の電力, 温熱, 冷熱の需給
  - 各月代表日
  - 1日24時間帯に区分
- 従来型技術, 木質燃料利用技術を同時に考慮し, 最適化によって技術選択を導く
  - 経済合理性のある技術が選ばれる
- 木質燃料は一ヶ月に一度搬入して, ストックする
  - 実際のプラントではもっと高頻度



# 最適化型モデルの定式化

## 線形計画法に基づいた多期間の最適化

- 変数
  - 設備容量, 設備運用 (出力) ... 連続値を取るとした (0/1変数を使うと計算時間が大幅にかかるため)
  - 木質燃料供給は一ヶ月単位, 需要側のエネルギー消費は1時間単位
- 目的関数
  - 25年間のシステムコストの最小化
- 制約条件
  - 木質燃料サプライチェーンの物量バランス
  - エネルギー種別ごとのエネルギーバランス (電力, 温熱, 冷熱)
  - 土場の乾燥ヤード容量
  - 燃料ストック場所の容量 他

# 木質燃料の需要家の想定

- 需要家種別
  - 事務所（役場）
  - 病院
  - 温浴施設
  - 農業ハウス
- 各月代表日の負荷パターン（24時間帯）
- 将来も負荷は変わらないと仮定

建物の延べ床面積

需要家	延べ床面積 (m <sup>2</sup> )
病院	32,000
事務所	2,000
温浴施設	1,000
農業ハウス1	1,000
農業ハウス2	1,000

立地場所と土場との距離

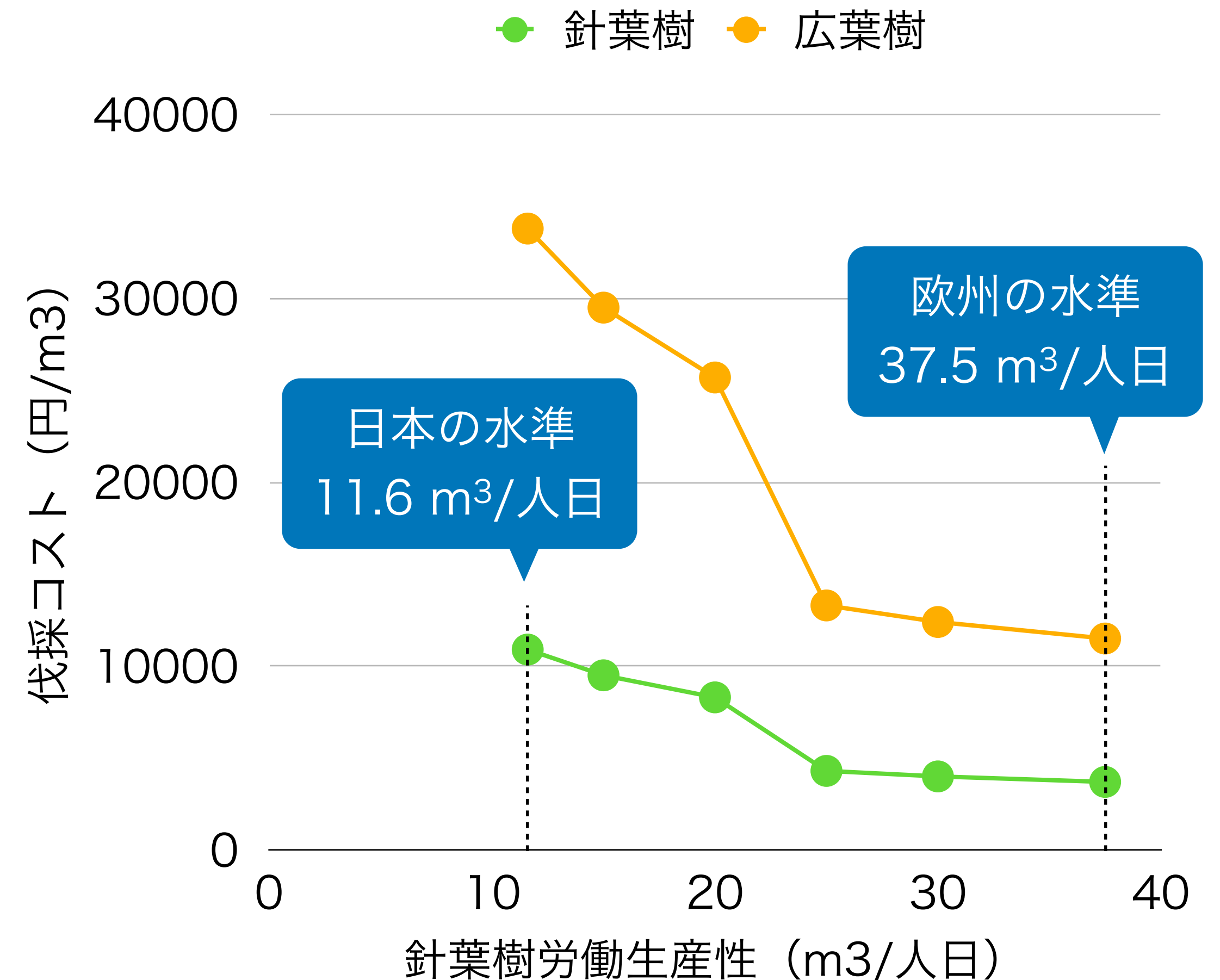
需要家	土場1 (km)	土場2 (km)
病院	7.5	1.0
事務所	7.5	1.0
温浴施設	8.1	0.0
農業ハウス1	11	7.5
農業ハウス2	7.5	3.0

# パラメータ設定

## 林業の生産性

- ・ 労働生産性（針葉樹の場合）
  - ・ 日本：11.6 m<sup>3</sup>/人日
  - ・ 欧州：37.5 m<sup>3</sup>/人日
  - ・ 広葉樹は労働生産性が1/3と想定
- ・ 20m<sup>3</sup>/人日以下では，複数箇所の間伐を同時に実施するため，機材の使用量が増加する
  - ・ 伐採コストが大きく増える
- ・ まずは欧州並みを想定して解析した

労働生産性が伐採コストに及ぼす影響



# パラメータ設定

## 設備コスト

### 木質燃料生産および利用設備のコスト想定

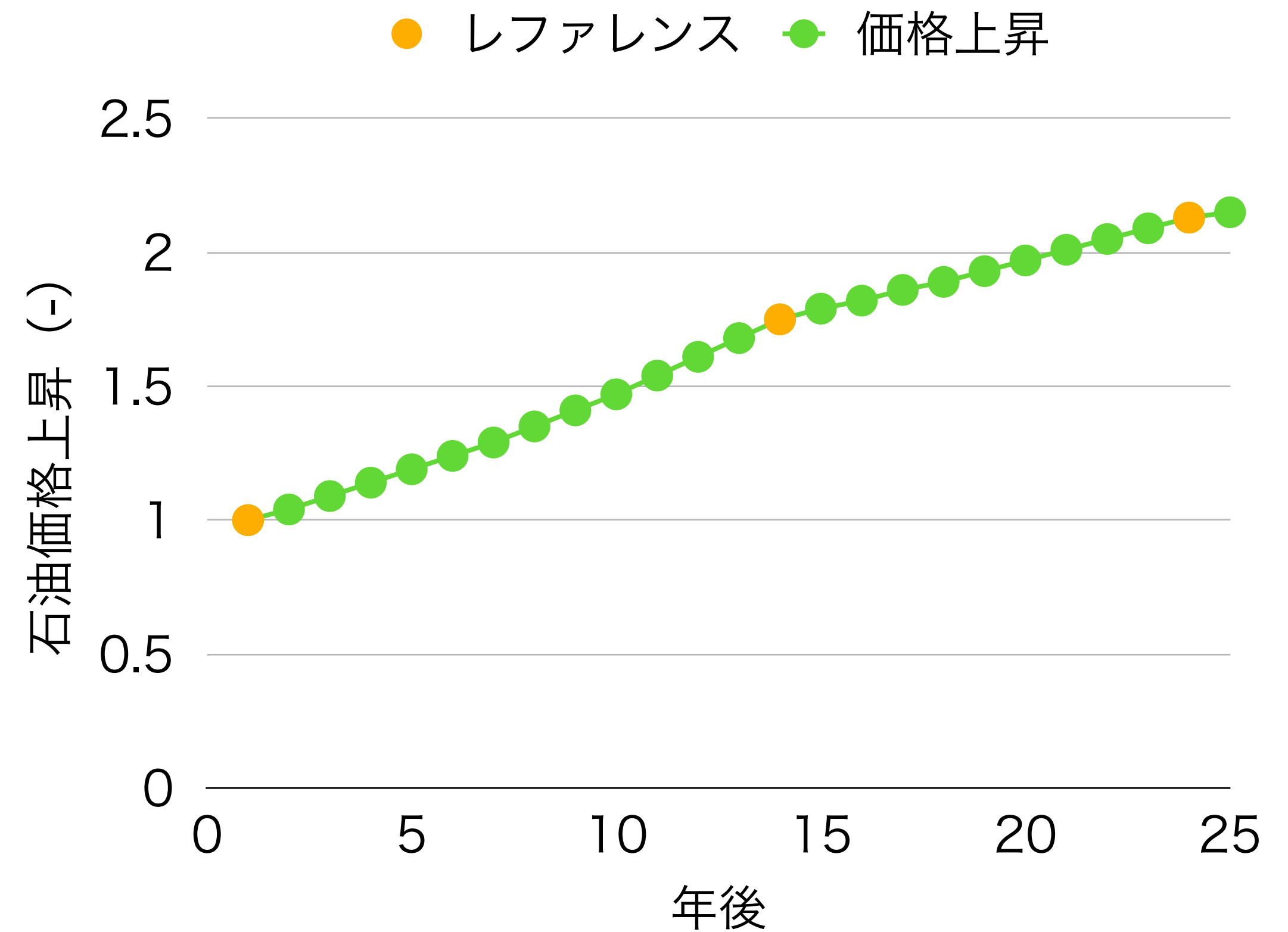
- ・ 燃料製造
  - ・ チッパー
  - ・ 薪製造機
- ・ チップコージェネレーション
  - ・ 電力出力40kW
  - ・ 熱出力100kW
- ・ 薪ボイラ
  - ・ 薪投入の人件費を見込んで運転コストを設定した

設備	設備コスト	運転コスト (円/kW/年)	耐用年数 (年)	変換効率 (-)
チップ製造	1,000,000 円/(m <sup>3</sup> /h)	-	8	1.0
薪製造	20,000 円/(m <sup>3</sup> /h)	-	8	1.0
チップボイラ	118,000 円/kWt	4,080	15	0.85
薪ボイラ	80,000 円/kWt	10,600	15	0.82
チップコージェネレーション	825,000 円/kWe	62,500	12	発電：0.22 熱：0.55



# 石油燃料価格の想定

- 石油燃料価格は将来の価格上昇を考慮した
  - 原油価格上昇率（文献値）
    - 2017～2030年：4.4%
    - ～2040年：2.0%
    - ～2050年：0.8%
- 参考文献
  - IEEJ Energy Outlook 2019, 日本エネルギー経済研究所, 2018.

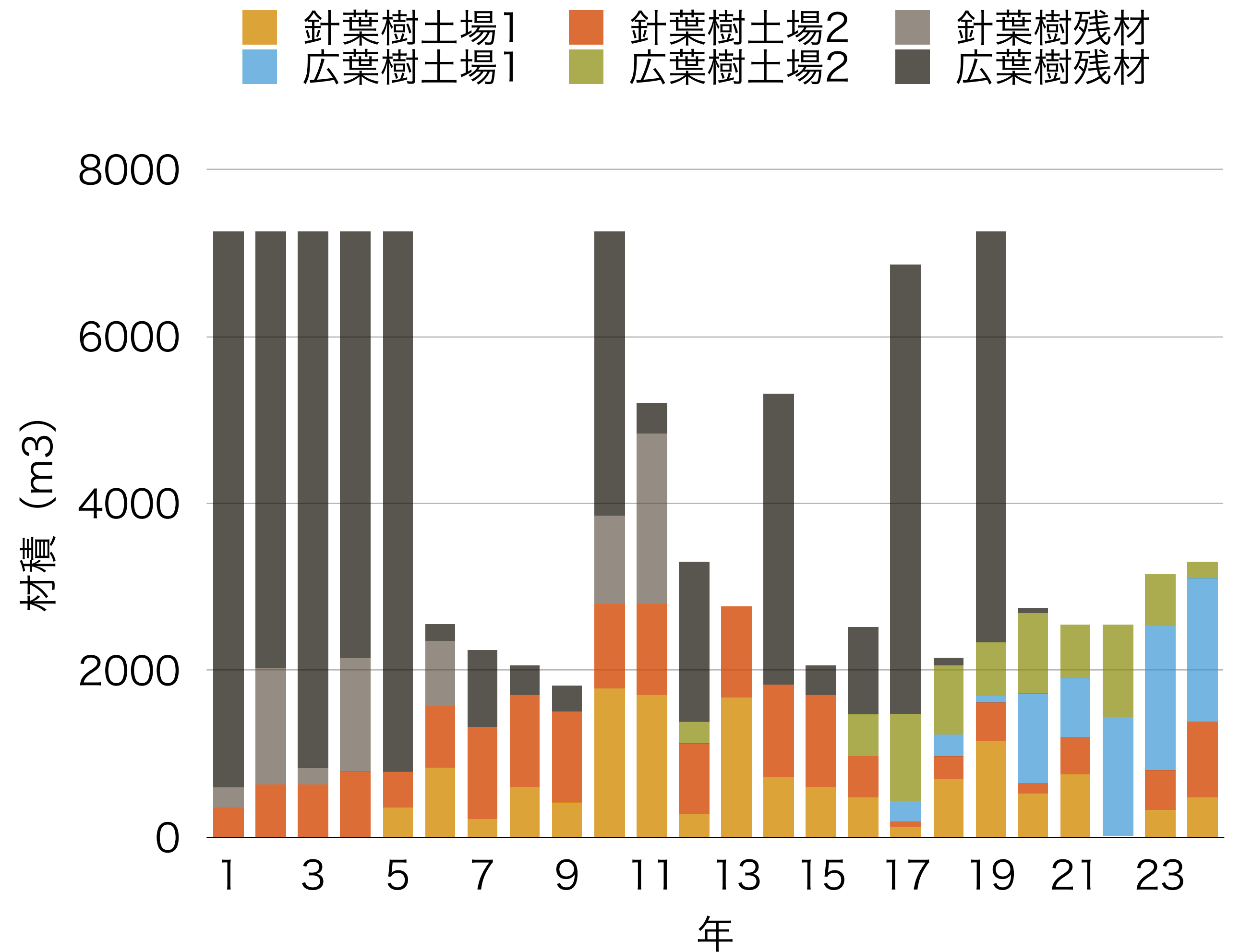


# 最適化結果

## 木質資源の利用形態

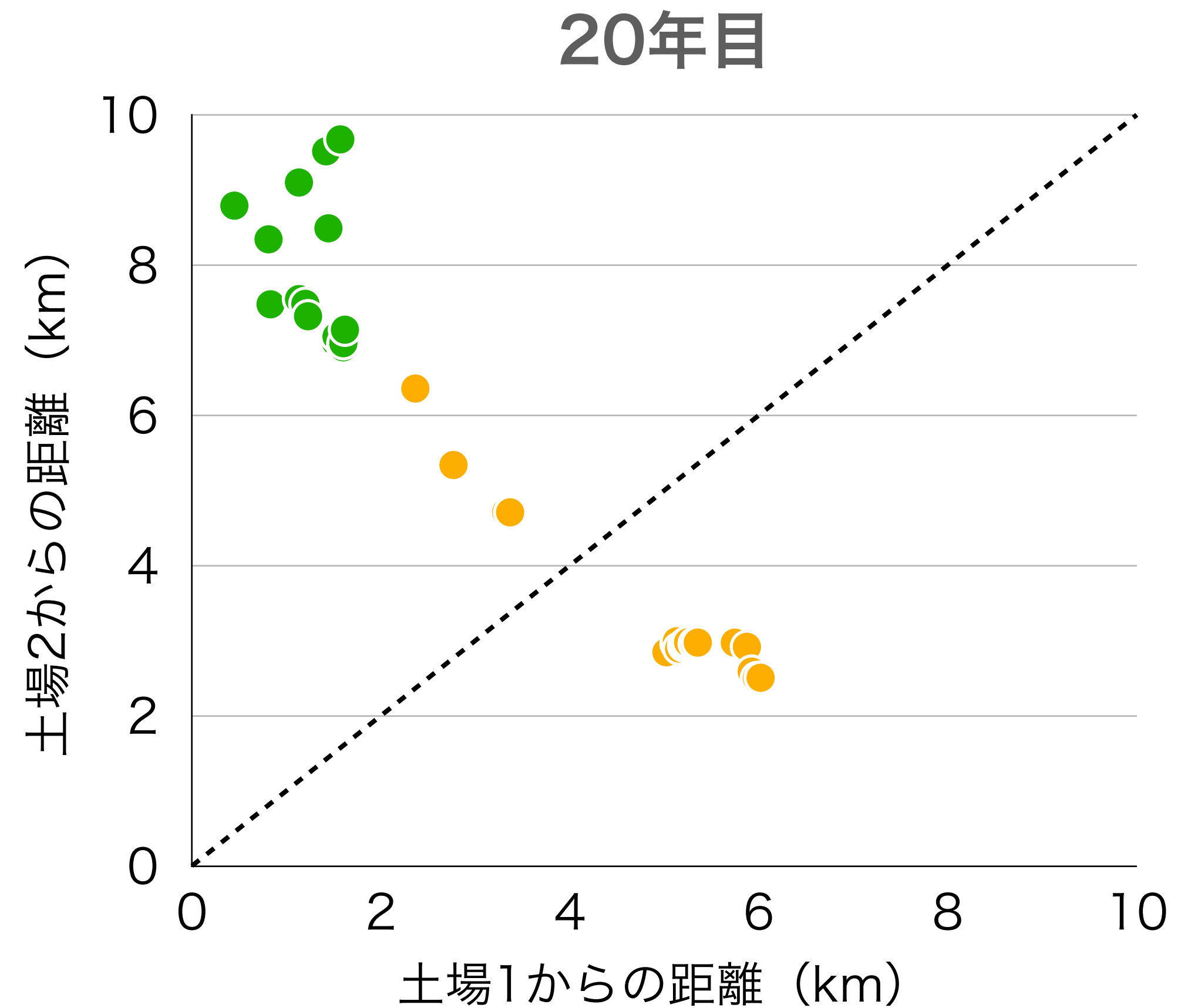
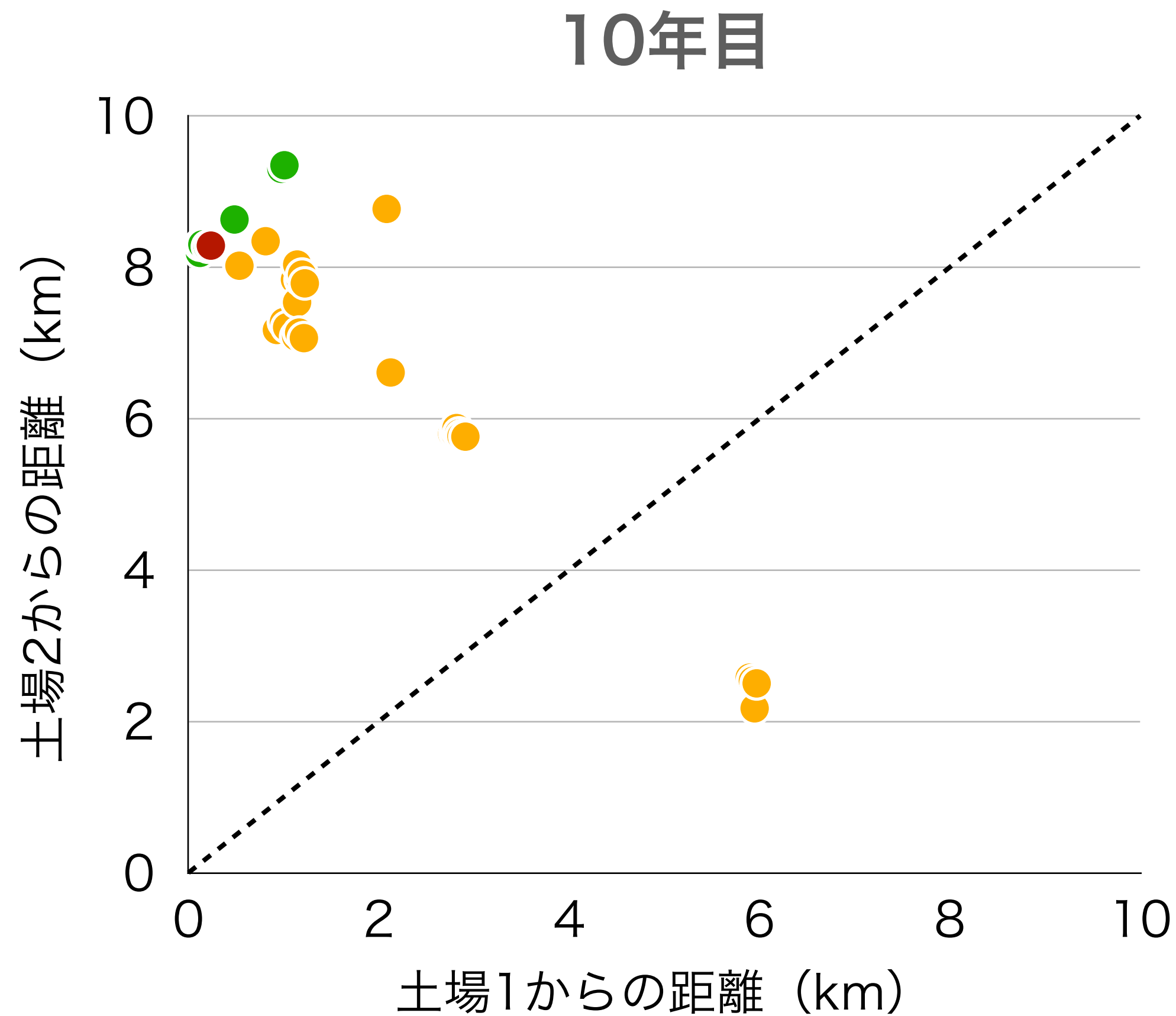
- 針葉樹を優先的に利用
- 広葉樹は針葉樹の間伐材の不足を補う形で利用
  - 16年目以降で利用量が増加
- 広葉樹を最初の5年間で伐採（未利用）するのは、21年目以降に利用するため
- 20年後の天然更新を予測した伐採計画になっている

### 間伐等材積の推移



# 森林区画から土場への輸送

- 土場1+2
- 土場1
- 土場2
- $y=x$

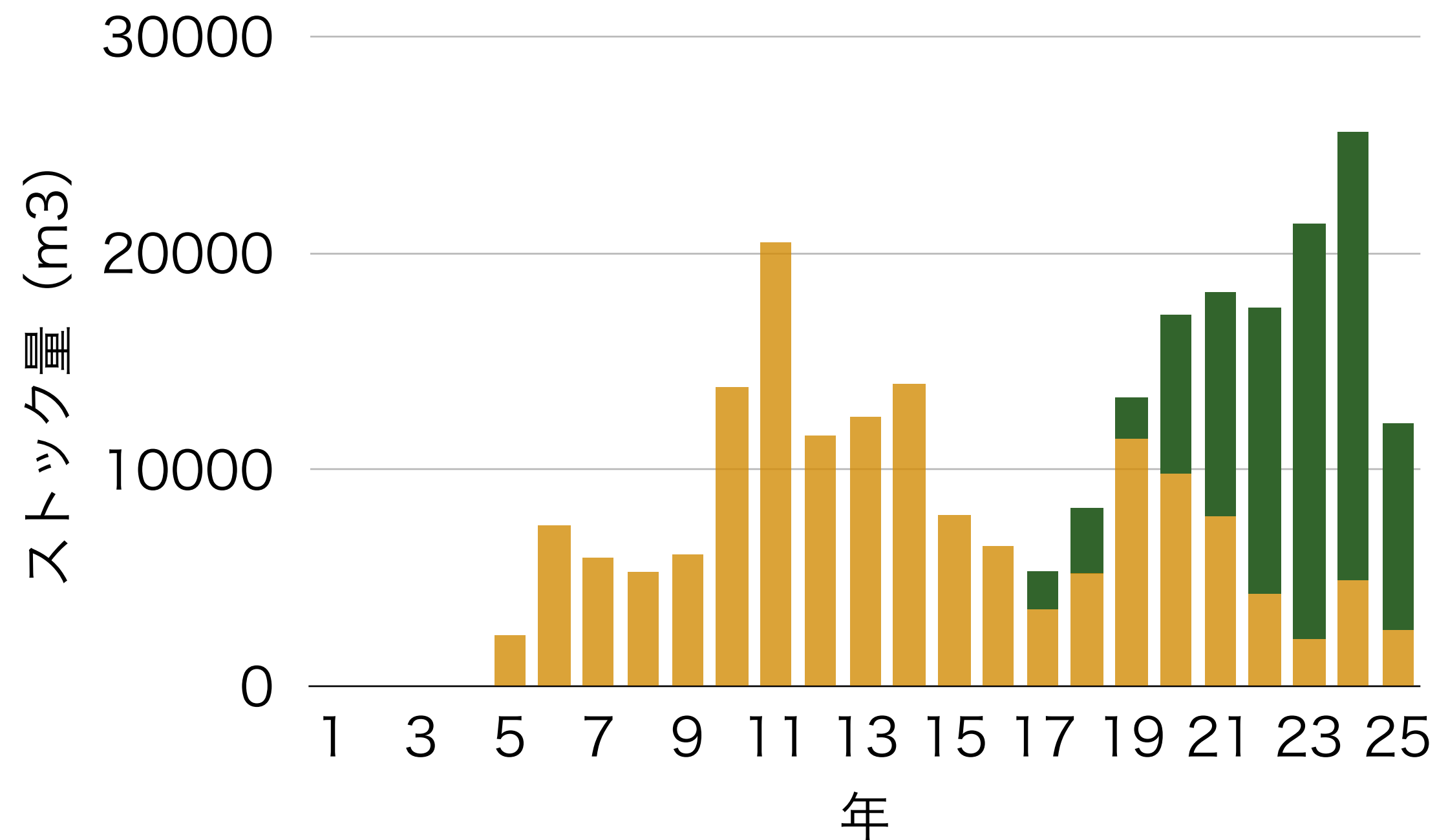


- 土場1には近隣から輸送し、それ以外から土場2に運ぶ。どちらにも輸送する区画は少ない

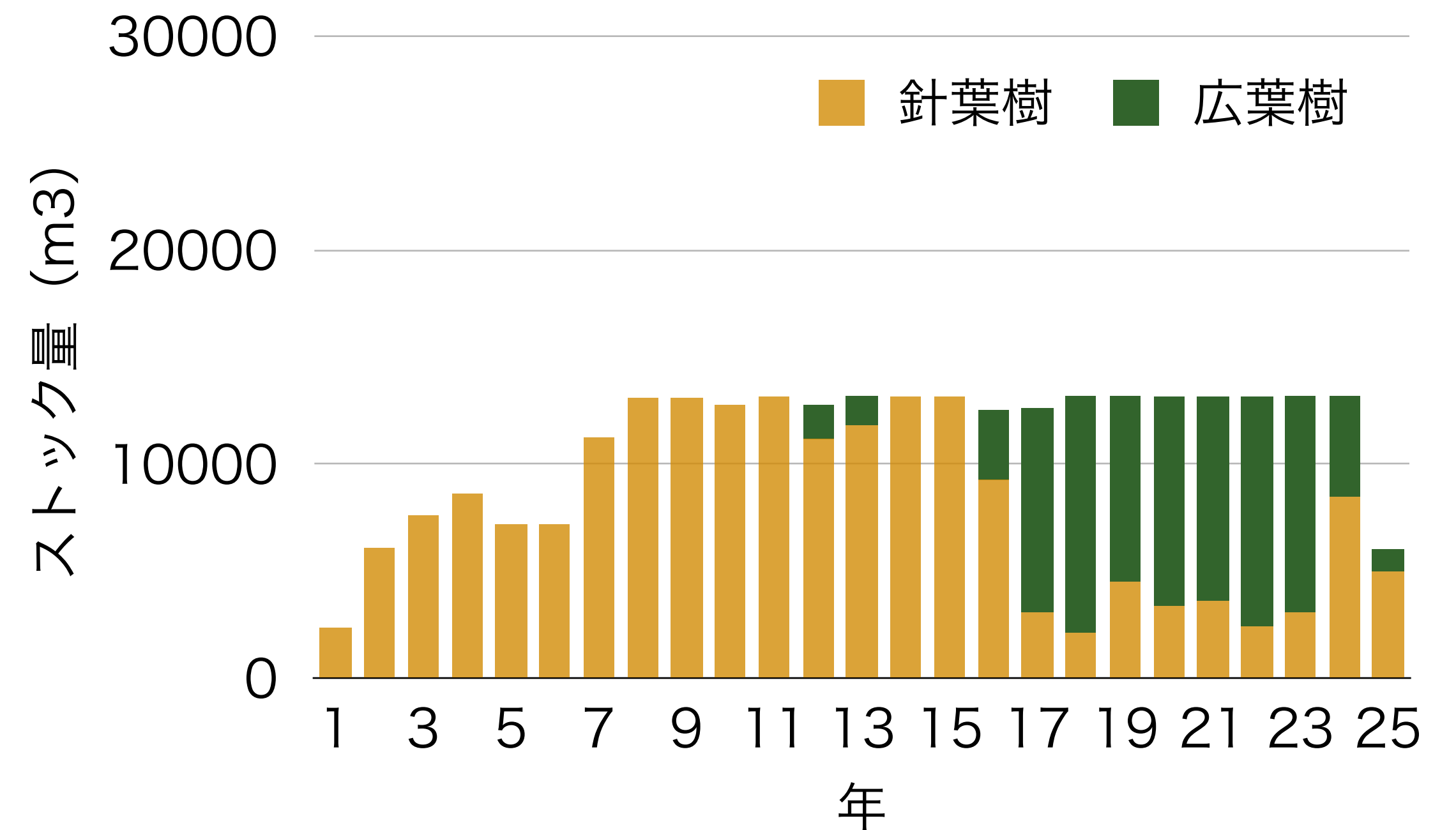
# 最適化結果

## 乾燥ヤードのストック状況

土場1



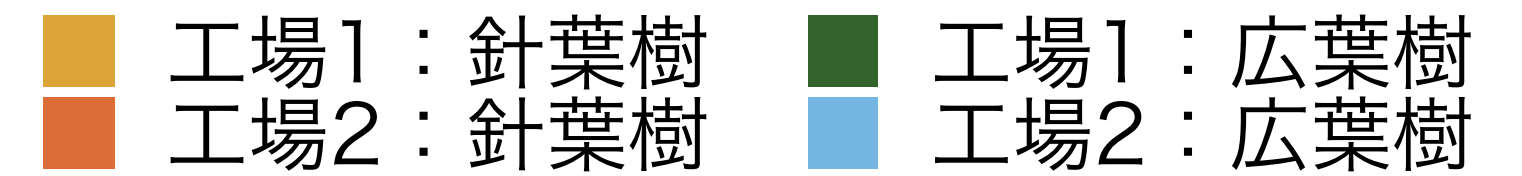
土場2



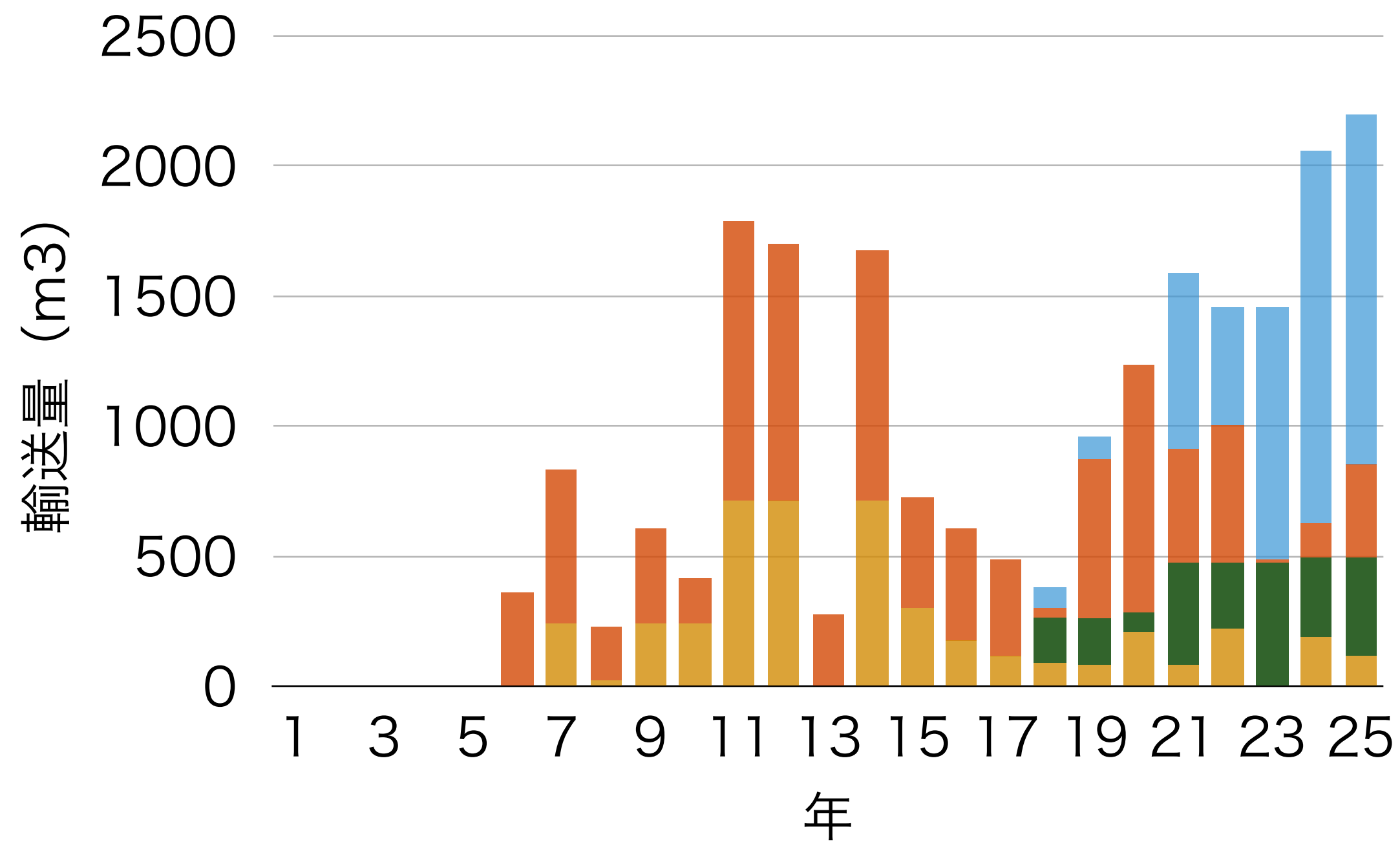
- 土場2から運用開始. 土場2では容量上限に達しているため, 土場1で乾燥プロセスの供給を調整している

# 最適化結果

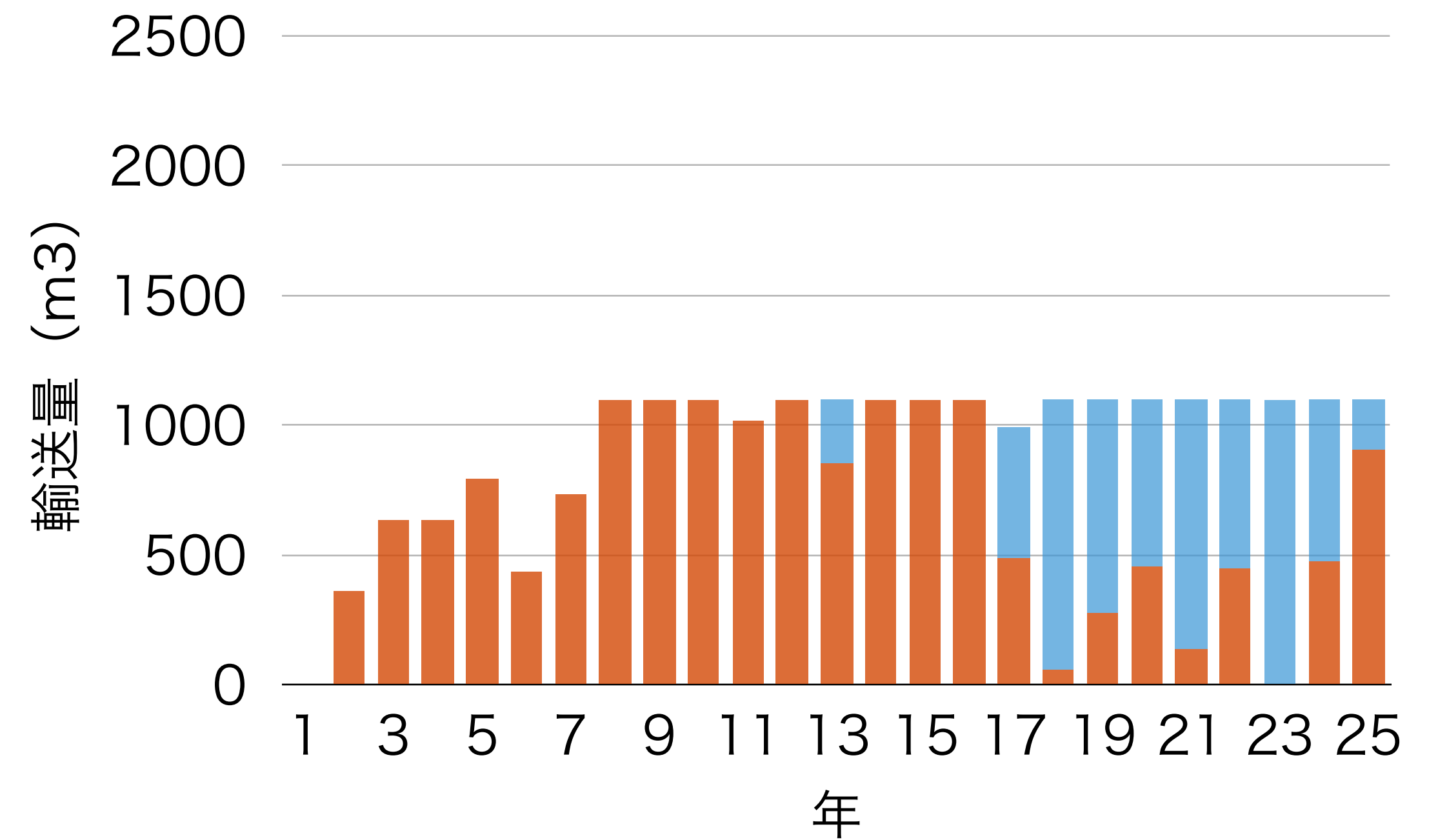
## 乾燥ヤードから加工工場への輸送状況



土場1



土場2

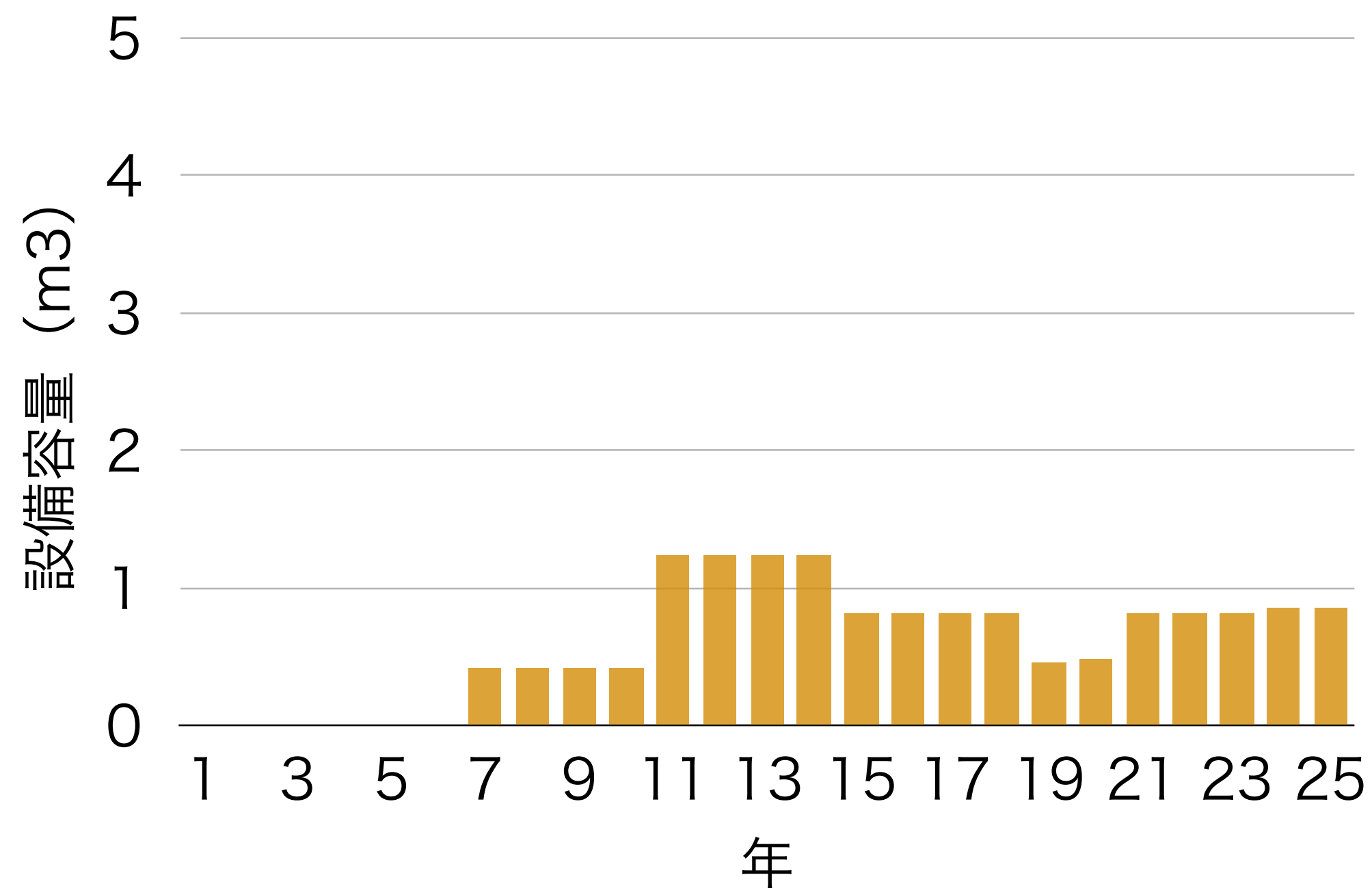


- 土場2は隣接する工場2に輸送. 土場2がストック容量上限に達しているため, 土場1で乾燥した材を工場2に輸送している

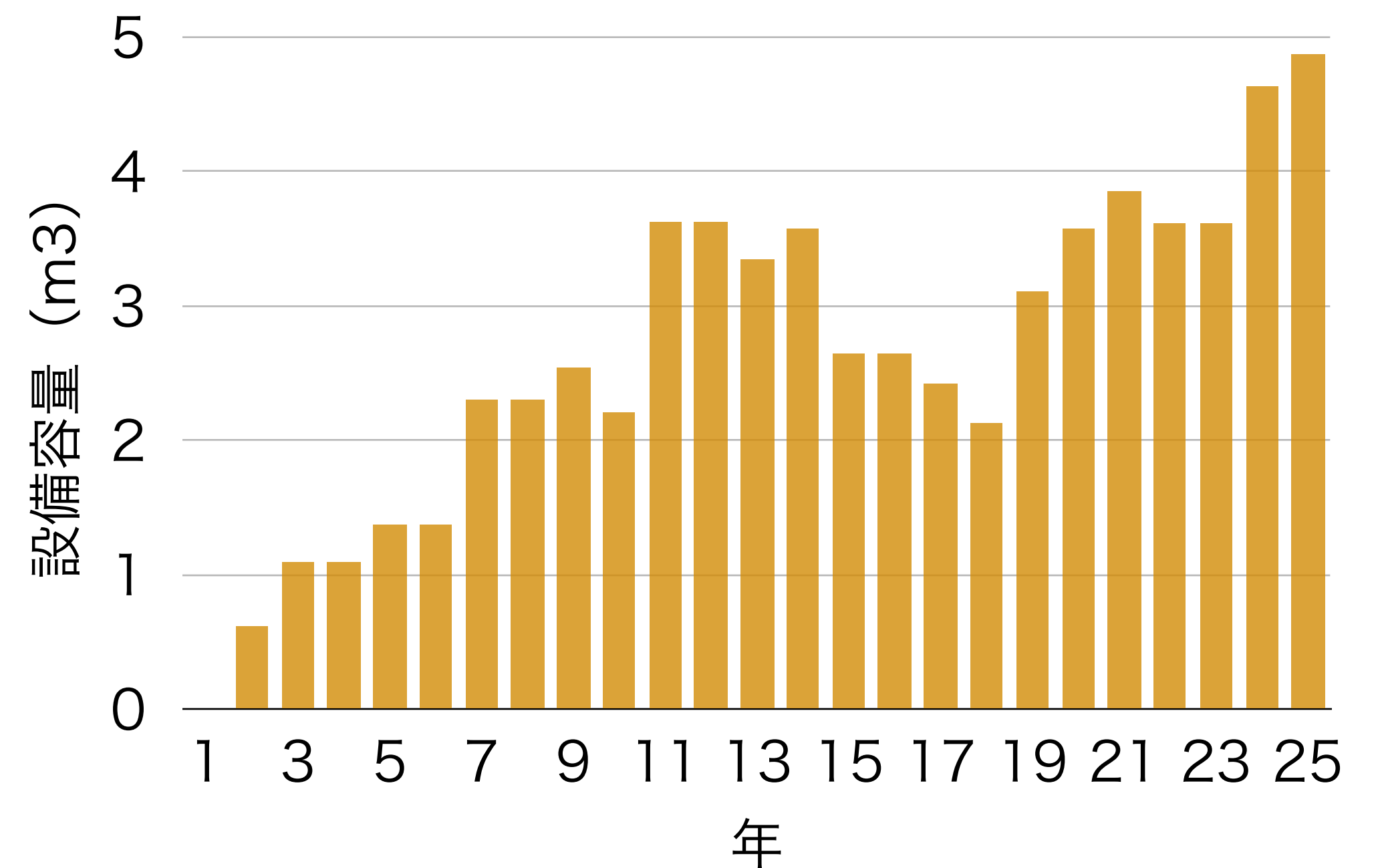
# 最適化結果

## 燃料加工設備の容量

チップ工場1



チップ工場2



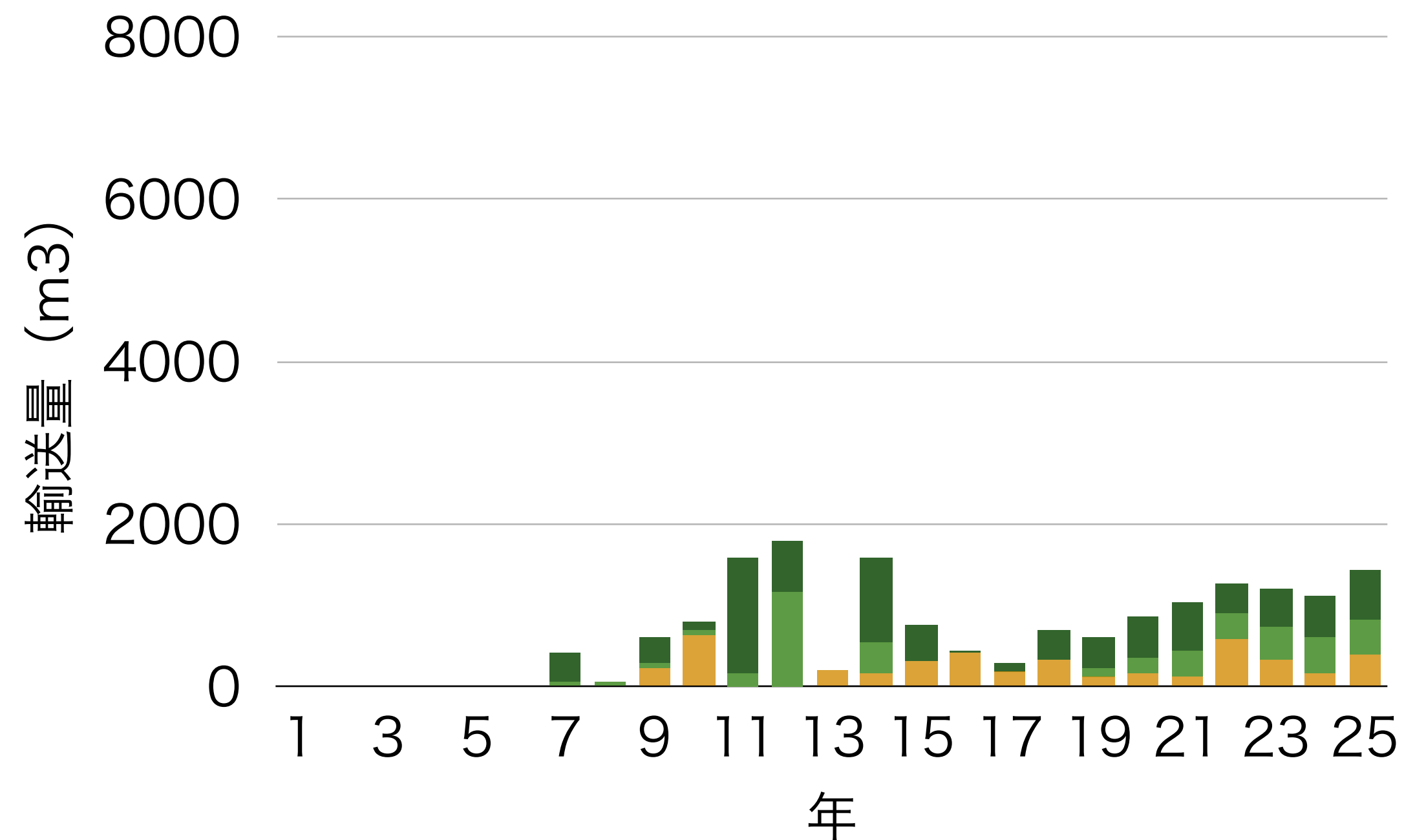
- 最適化の結果工場1/2ともにチップ製造のみが選択された → 薪ボイラ利用は相対的に高コスト
- 病院・温浴施設に近接するチップ工場2で、大部分のチップが製造される

# 最適化結果

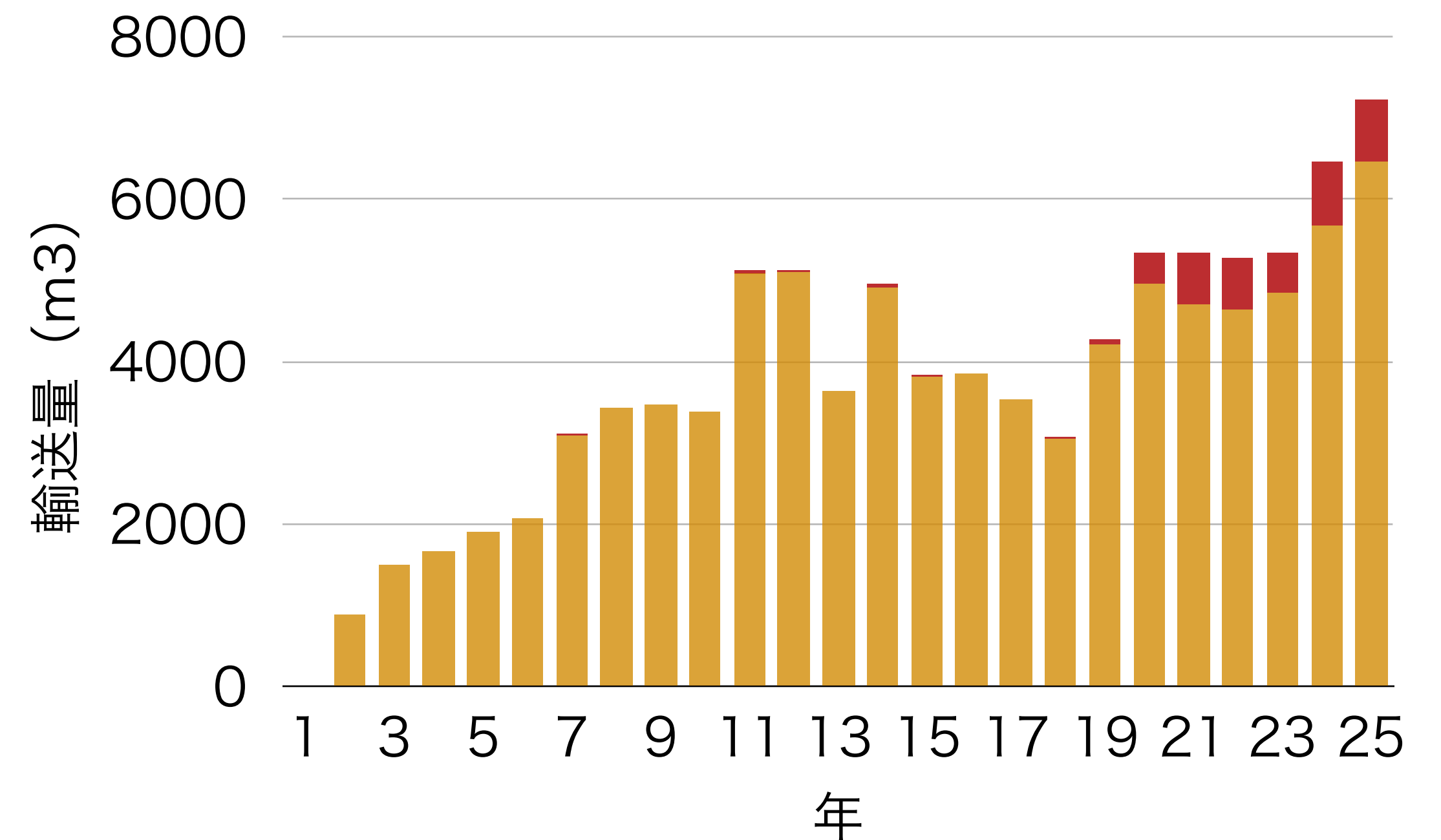
## 木質資源の加工・輸送

■ 病院 ■ 温浴施設 ■ 農業ハウス1 ■ 農業ハウス2

### チップ工場1



### チップ工場2



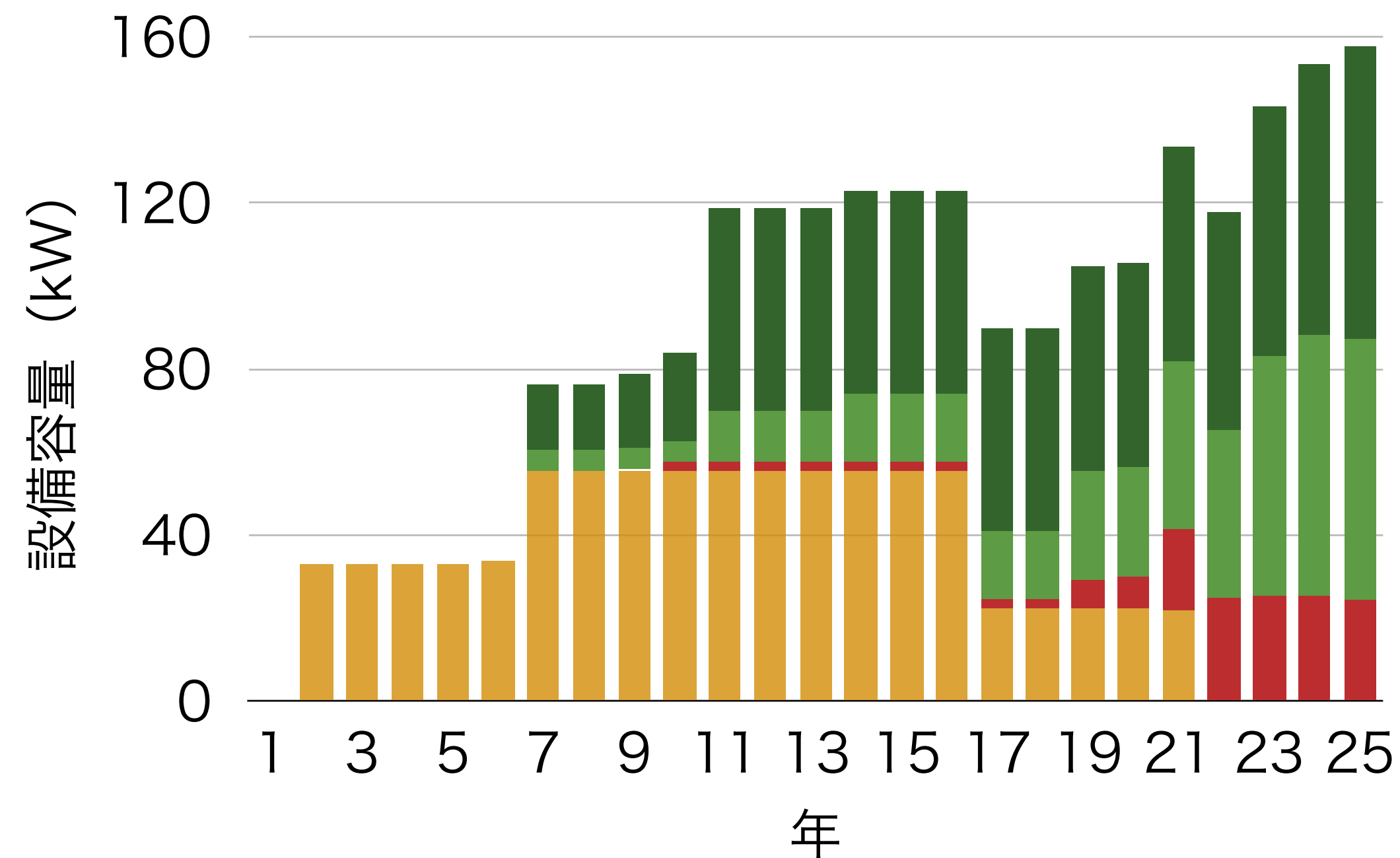
- ・ チップ工場2から近接する病院・温浴施設に供給する
- ・ チップ工場1から一部を病院に（工場2で不足する分），残りを農業ハウス1/2に供給する

# 最適化結果

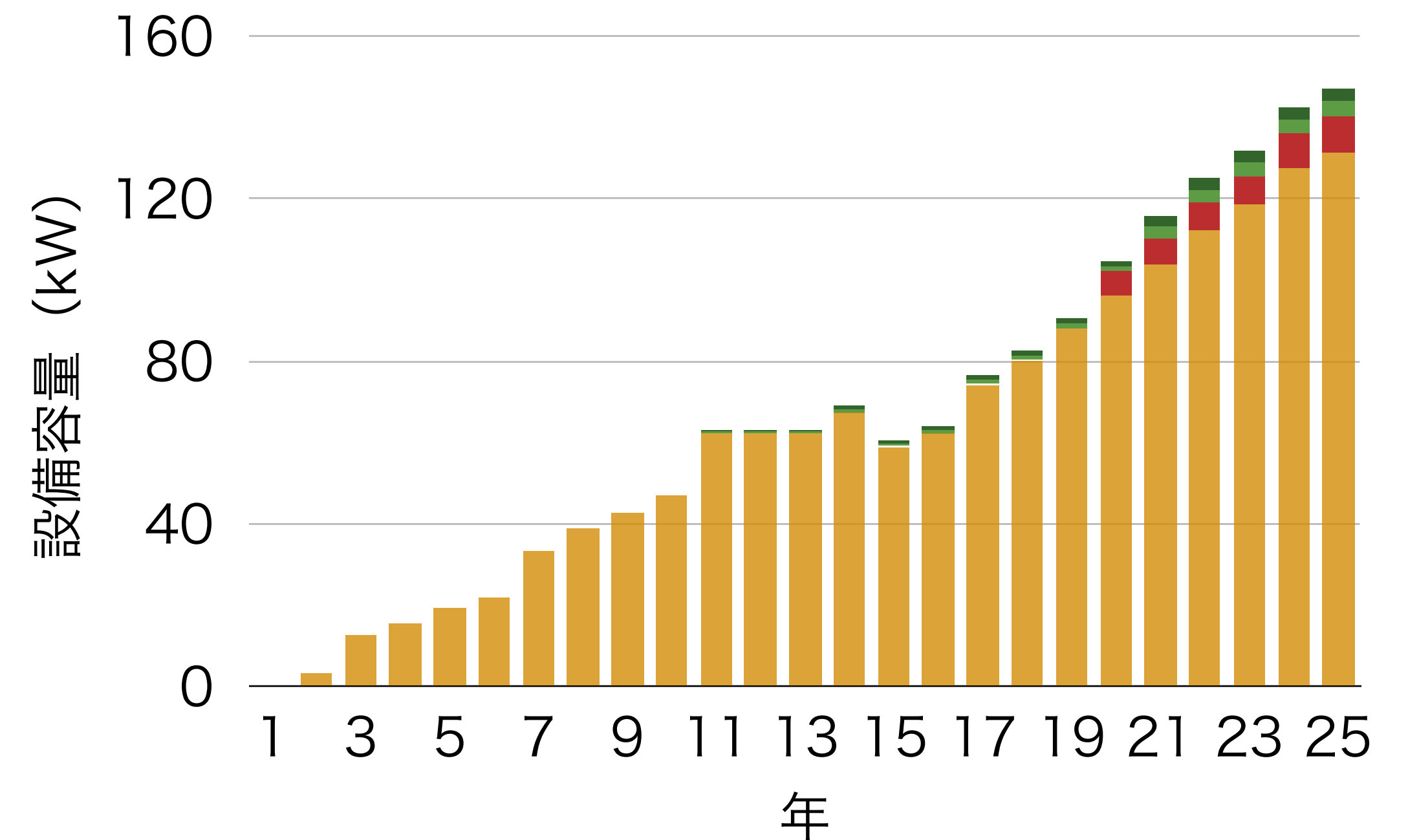
## バイオマス燃料設備の導入

■ 病院 ■ 温浴施設 ■ 農業ハウス1 ■ 農業ハウス2

### チップボイラ



### チップコージェネ



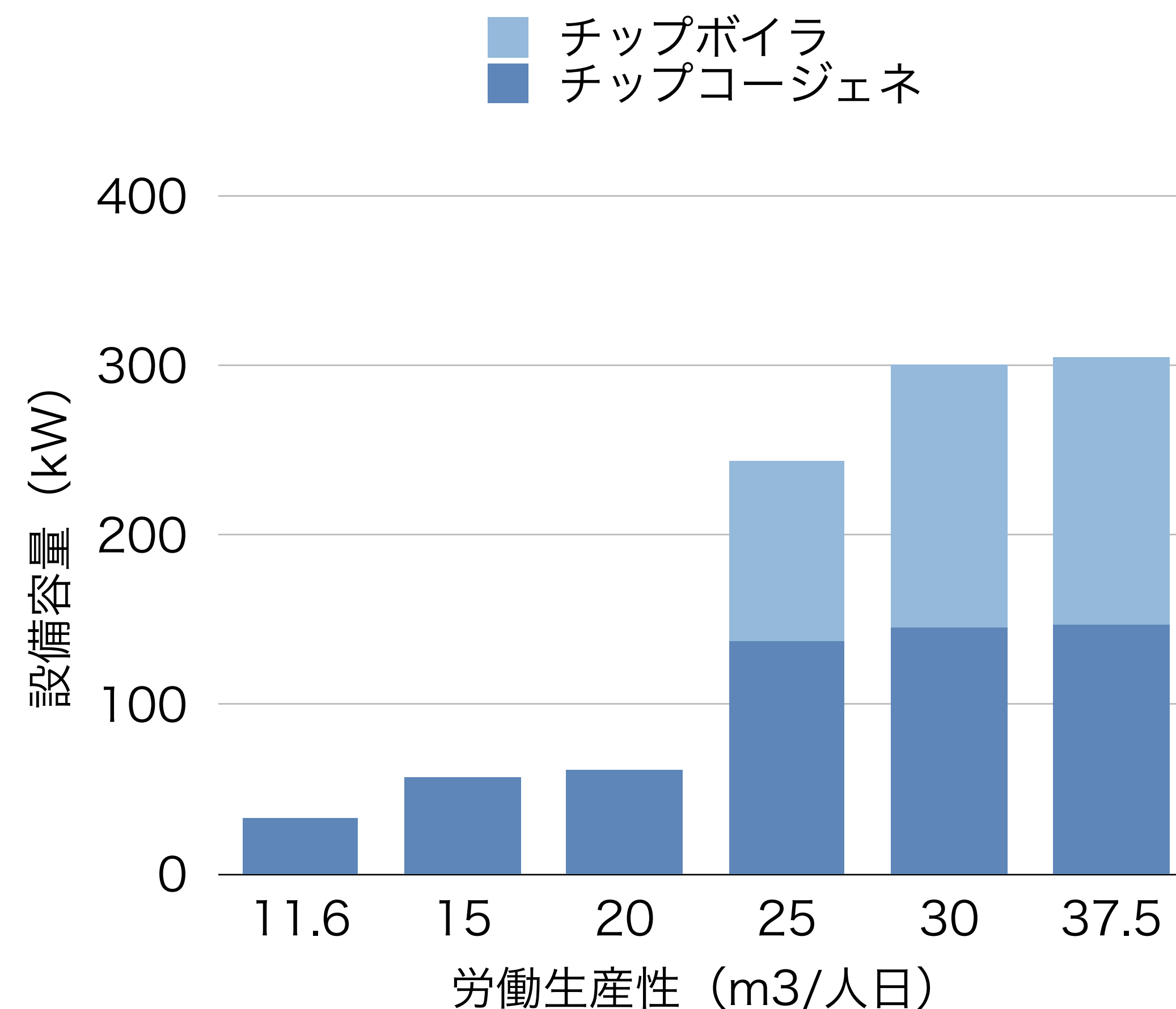
- ・チップボイラは各種の需要家に導入されるが、事務所では木質燃料は利用されない
- ・チップコージェネが病院に導入される（連続値としたので徐々に増えるが、実際的ではない解）



# 林業生産性が与える影響

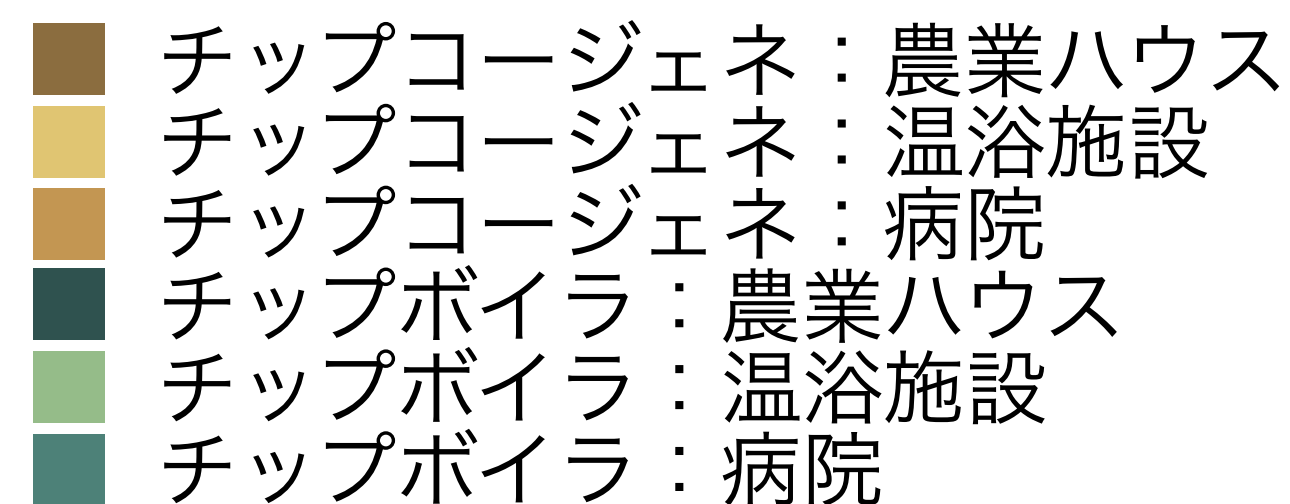
## バイオマス利用設備導入量

- ・ 労働生産性が $20\text{m}^3/\text{人日}$ 以下になると伐採コストが増加する
- ➡ その結果、バイオマス利用設備の導入量が大きく減少する
  - ・ チップコージェネのみ
  - ・ チップボイラなし
- ・ 日本の現状並みの労働生産性では、欧州並みに比べて設備導入量が $1/10$ になる

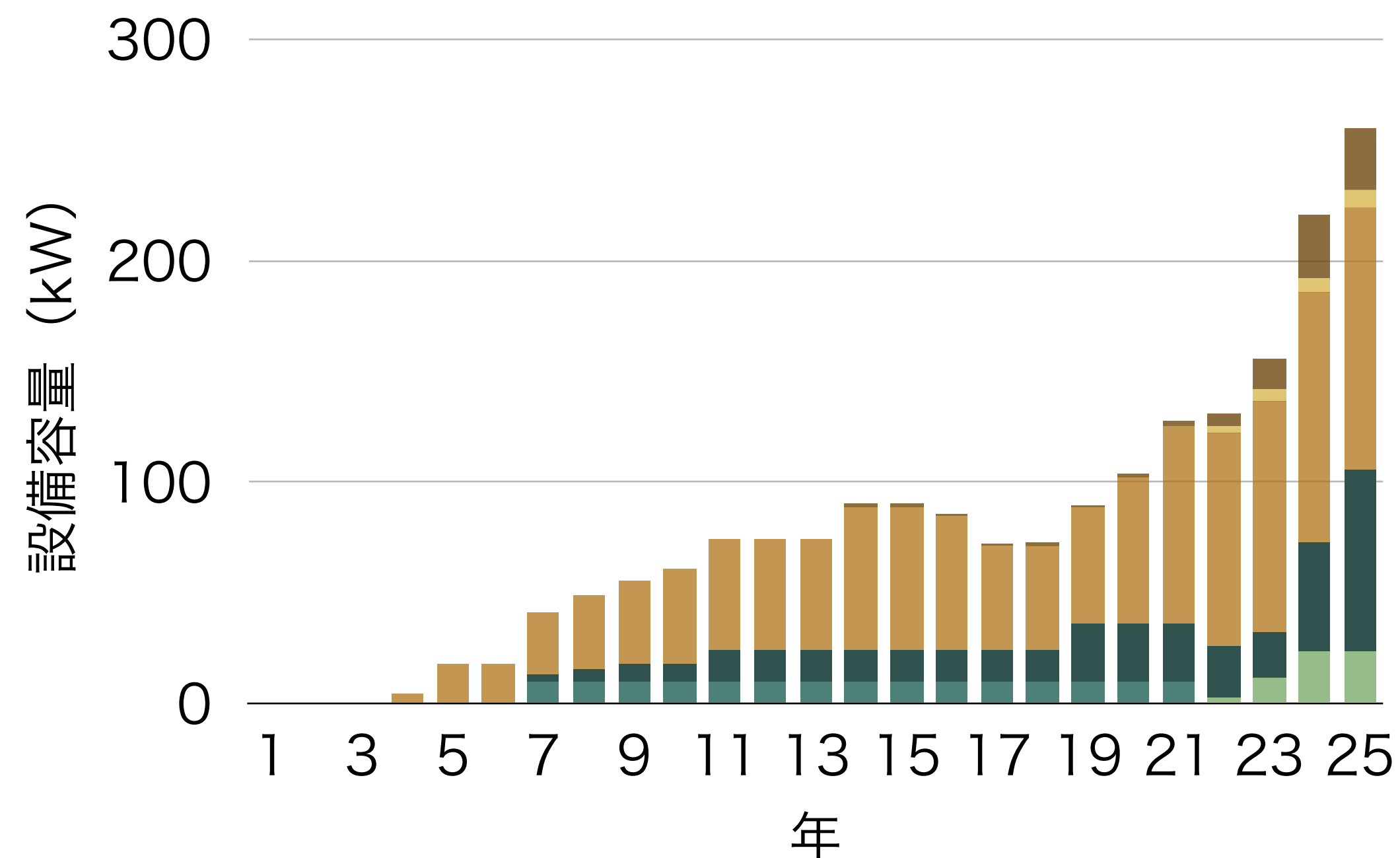


# 林業生産性が与える影響

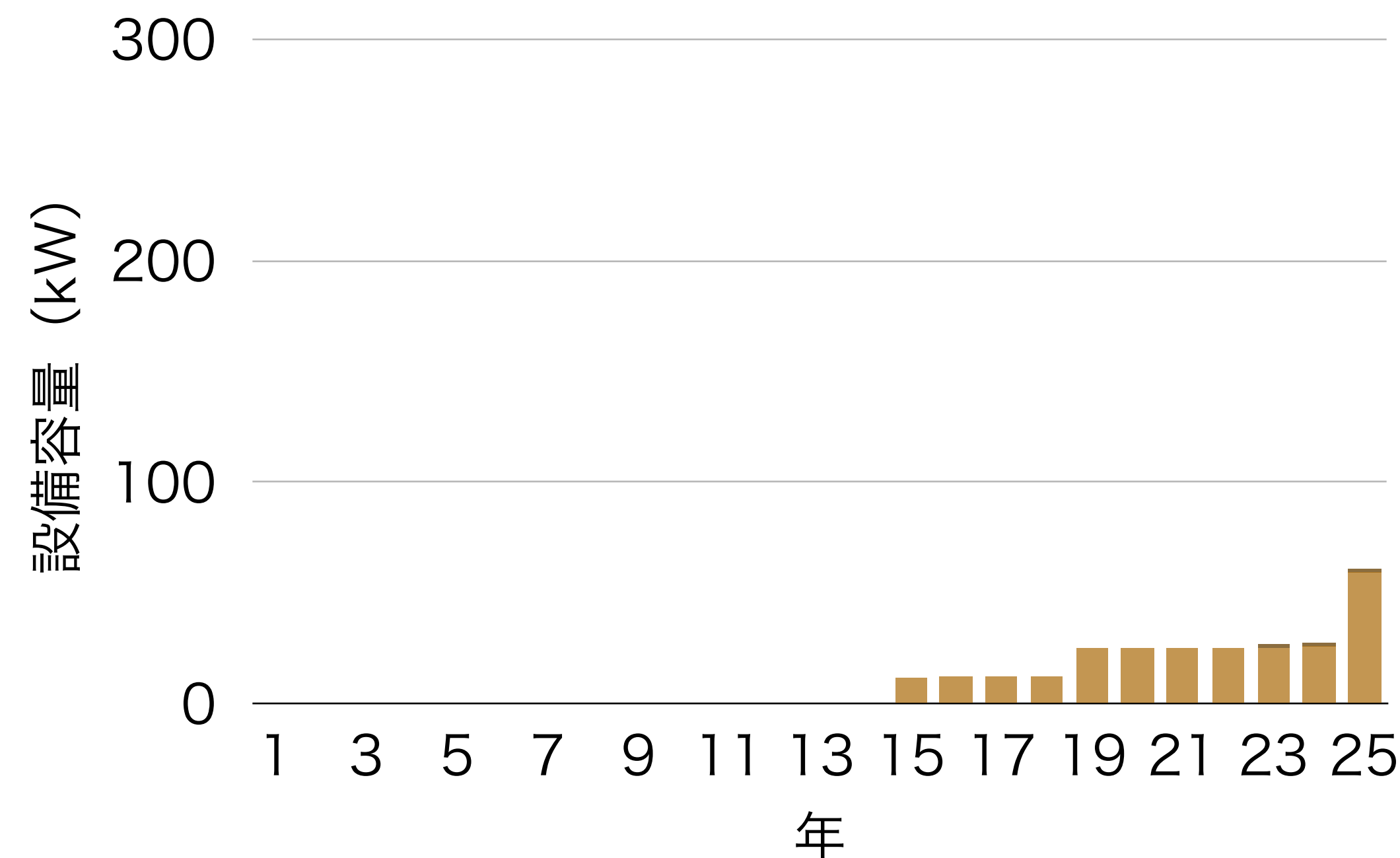
## バイオマス利用機器導入量



労働生産性25m<sup>3</sup>/人日



労働生産性20m<sup>3</sup>/人日



- ・ 生産性25m<sup>3</sup>/人日の場合，病院のコージェネ，農業ハウスのチップボイラが主として利用される
- ・ 生産性20m<sup>3</sup>/人日の場合，病院のコージェネが15年目以降に導入される（その他用途はほぼなし）

# まとめ

## 神奈川県松田町を対象としたケーススタディ

- 木質燃料の利用シナリオを導くために、間伐～燃料利用のサプライチェーン全体を最適化した解を導いた
  - すべて連続変数としたので、現実的でない挙動を含む点が課題
- 針葉樹を優先的に利用し、広葉樹は後半から利用する
- エネルギー負荷の大きい病院にチップコージェネ、チップボイラを導入する。さらに農業ハウスにチップボイラが導入される
  - 薪ボイラは選択されなかった
- 労働生産性が $20\text{m}^3/\text{人日}$ 以下の場合、病院のチップコージェネのみが導入されるが、導入時期が15年目以降に遅くなる