木材輸送時の炭素排出量を考慮した、都市と人工林の炭素ストック量の将来推計
―福岡県北九州市におけるケーススタディー―

山田　久太[1]・Guo Jing[2]・白川　博章[3]・谷川　寛樹[4]・深堀　秀敏[5]

[1]学生会員　名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1 （501））
E-mail: yamada.kyuta@d.mbox.nagoya-u.ac.jp

[2]正会員　名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1 （501））
E-mail: jing@urban.env.nagoya-u.ac.jp

[3]正会員　名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1 （501））
E-mail: shirakawa@urban.env.nagoya-u.ac.jp

[4]正会員　名古屋大学大学院　環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1 （501））
E-mail: tanikawa@nagoya.ac.jp

[5]北九州市立大学　国際環境工学部（〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの１－１）
E-mail: fukahori3@gmail.com

木材利用による炭素固定効果を評価する際には，木材の生産や輸送による炭素放出量を考慮することが必要がある．本研究では，地域材の輸送工程における炭素排出量を考慮し，都市と人工林の炭素ストック量の将来推計を行った．2020 年から 2070 年までの期間において，地域材の輸送工程で排出される炭素量は 1.1 千 t-C と推計された．他方，2070 年の期間に地域材で建設された木造住宅にストックされた炭素量は 46.3 万 t-C と推計され，木材利用による炭素ストック効果が，木材輸送に伴う炭素排出量を上回る値であることがわかった．

Key Words: *wood utilization, carbon stock, carbon balance, wood mileage*

1. はじめに

昨今，ウッドショックと呼ばれる木材価格の世界的な高騰を受けて，国産材の利用拡大が注目されている．日本は国土の約 7 割を森林が占める森林資源が豊富な国であるが，木材自給率は 2019 年時点で 37.8%[1]と低く，森林面積の割が利用期を迎えた齢級以上の森林で構成されている．そのため，木材生産量の拡大を図るポテンシャルは大いにある．井上（2015）[2]は，国内の木材需要量を全て国産材に置き換えても森林資源が減少することはないと推計している．一方で，戦後造林した人工林が本格的な利用期を迎えており，森林資源の蓄積量は増加傾向[3]である．このような背景から，国産材の利用拡大は喫緊の課題とされている．

国産材の利用を拡大することによって得られる便益として，森林資源の適切な循環利用の実現を促進できること，輸入材に比べて輸送距離が短く木材利用に伴う環境負荷物質の発生量を低減できることなどが挙げられる．木材はエコマテリアルとして知られている．木材を住宅や家具等として利用することによって，森林が光合成によって吸収した炭素を長期間大気中に放出せず，社会に滞留させることができるためである．これは，一般に炭素ストック効果と呼ばれる．木材利用によって得られる正味の炭素ストック量は，木材利用に伴って排出される炭素量を差し引いた値であるため，炭素ストック効果を効果的に活用するためには，輸送距離が短い国産材，とりわけ地域材を活用することが好ましい．

一方で，木材の生産や輸送の工程における炭素排出量など，木材利用に伴って発生する環境負荷量については，現状では十分な検討がされていない．

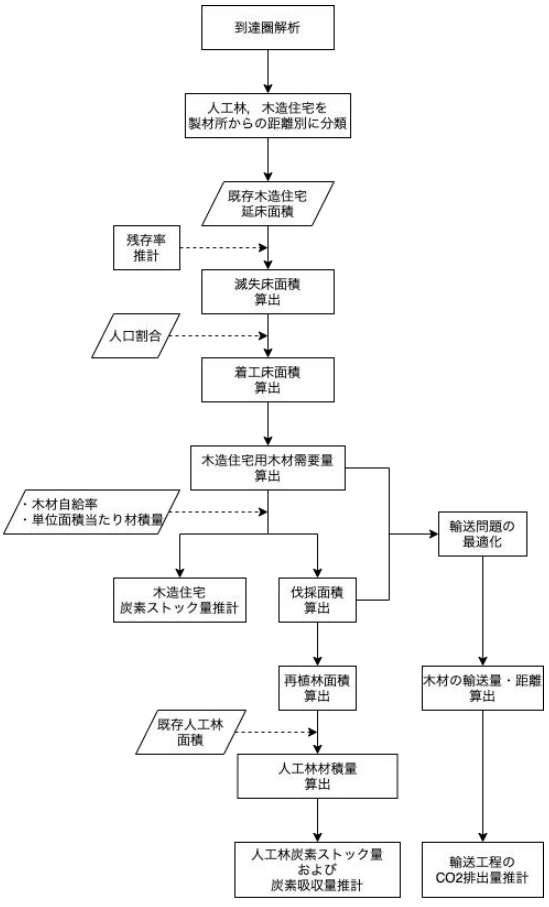
淵上ら（2010）[4]は，京都府産のスギを使用した合板製品の輸送プロセス由来の CO_2 排出量を定量評価したが，特定の工場で製造された製品のみを対象としている．また，小野（2017）[5]は，東海三県を対象に木材輸送の最適化を分析したが，市町村内の輸送距離や製材工程など多段階の工程間における輸送を考慮していない．

そこで，本研究では，地域内で使用される建築木材を対象に，製材工程を含む多段階の工程における輸送時の炭素放出量を考慮して，都市と人工林の炭素ストック量の将来推計を行った．

対象地域は，北九州市を選定した．北九州市は2021年時点で94万人[6]の人口を有する政令指定都市であり，住宅用の木材需要が大きいと考えられる．一方で，市域の約4割[7]を森林が占めているが，林業の停滞によって，2018年時点では人工林面積の約56%が利用期を迎えた8齢級以上の人工林で構成されており，森林資源の活用が課題とされている． このような背景を有する北九州市を対象に，木材利用に伴う炭素放出量を分析し，木材利用によって得られる正味の炭素ストック効果を推計することは，地域材の利用拡大による効果を評価するうえで有用である．

2. 研究の手法

(1) 研究フロー



図−1 研究フロー図

本研究の研究フローを**図−1**に示す．本研究では，北九州市内の人工林と木造住宅を対象とし，その炭素ストック量の将来推移を推計した．また，地域材で建設される新規着工住宅を対象に，木材の輸送工程で排出される炭素排出量を推計した．

初めに，Arc GIS Network Analystの到達圏解析を使用して製材工場を起点に到達圏レイヤーを発生させ，北九州市内に位置する人工林および木造住宅を製材工場からの距離別に分類した．各到達圏内の伐採量と需要量を推計し，これらをパラメータとし輸送量を変数とする線形計画問題として各到達圏と製材工場間の木材輸送量を算出し，地域材の輸送に伴って排出される環境負荷量を推計する．人工林および木造住宅の炭素ストック量は，それぞれ人工林の材積量，木造住宅の延床面積にパラメータを乗じて算出した．

本研究では，将来の人工林材積量は，経年による樹木の成長と木材需要量に依存して変動するとして推計した．また，木造住宅の炭素ストック量は，2020年以降に地域材で建てられた新規着工住宅の炭素ストック量とした．

(2) 人工林の炭素ストック量の推計

人工林の炭素ストック量は，以下に示す式(1)に従って算出した．

$$C=\sum_j\{(V_j * D_j * BEF_j)\cdot(1+R_j)\cdot CF\} \qquad (1)$$

ここで，C：炭素ストック量（t-C），V：材積（㎥），D：容積密度（t-dm/㎥），BEF：バイオマス拡大係数（㎥/㎥），R：地上部・地下部比（㎥/㎥），CF：炭素含有率（t-C/t-dm），j：樹種である．各パラメータの値を**表−1**に示す．

人工林の材積量は，式(2)に従って算出した．

$$V=\sum_{m,j}(A_{m,j} * v_{m,j}) \qquad (2)$$

ここで，V：材積(㎥)，A：面積(ha)，v：単位面積当たり材積(㎥/ha)，m：齢級，j：樹種 である．単位面積あたり材積量は，林野庁が公表している人工林齢級別面積および蓄積[7]から算出した，樹種別，齢級別の単位面積当たり材積を使用した．本研究では，スギ，ヒノキを対象樹種とした．

表−1 炭素ストック推計のパラメータ

	バイオマス拡大係数		地下部の比率	容積密度 (t-dm/㎥)	炭素含有率 (t-C/t-dm)
	齢級 ≤ 4	齢級 > 4			
スギ	1.57	1.23	0.25	0.314	0.51
ヒノキ	1.55	1.24	0.26	0.407	0.51

将来の材積量の推移は，2013年時点の人工林蓄積量を基

に，伐採量と再植林量を考慮して推定した．2013年時点の人工林材積量については，対象地域の自治体から提供されたデータに基づいて，齢級別の面積および空間分布を推定した．伐採量は，木造住宅用木材需要量に木材自給率を乗じた材積量とした．木造住宅用木材需要量は，木造住宅の着工面積に，面積あたり木材投入量と丸太換算率 1.57 を乗じて求めた．木材自給率については，林野庁が森林・林業基本計画(2016)[9]において，2025 年までに木材自給率を 50%にすることを目標としている．そこで，本研究では，北九州市内の木材自給率が，2020年から2025年までは現状から50%まで一定の割合で増加し，2025 年以降は 50%を保つと仮定した．なお，北九州市森林整備計画(2017)[9]では，北九州市の木材生産量は 16 ㎥とされており，この値を現状の値として使用した．
人工林の伐採は11齢級を伐期とし，11齢級以上の樹木を齢級の高いものから伐採するとした．伐採後には，翌年に伐採面積分の同樹種の木を再植林すると仮定した．
なお，本研究では齢級別の面積に基づいて材積量推計を行なったため，材積量は5年間隔で変動するとした．

(3) 木造住宅の炭素ストック量の推計

木造住宅の炭素ストック量は，式(3)に従って算出した．

$$Cw = stock(t) \times MI \times D_j \times CF \qquad (3)$$

ここで、Cw：木造住宅による炭素固定量(t-C) ，stock(t)：木造住宅の延床面積(㎡) ，MI：単位面積当たりの木材量(㎥/㎡) ，D_j：容積密度(t-dm/㎥) ，CF：乾物重量あたりの炭素含有率，j：樹種である．
将来の木造住宅延床面積は，2014年における既存木造住宅の延床面積を基に，滅失と新規着工による変化量を考慮して推定した．滅失床面積は，以下に示す式(4)に従って算出した残存率を用いて算出した．

$$R(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_0^x \frac{1}{t} exp\left\{-\frac{(lnt-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (4)$$

ここで，x：築年数，μ：平均値，σ：標準偏差である．各パラメータの値は，小松ら(1992)[10]によって推計された値を引用し，μ=3.655，$\sigma = 0.633$とした．また，将来の新規着工床面積は、前年の滅失床面積に 2000 年比の人口割合を掛け合わせた値を用いて推計した．将来の人口予測値は，全国小地域別将来人口推計システム [11]を引用した．

(4) 地域材の輸送工程における炭素排出量の推計

本研究で対象とする工程の範囲を図-2 に示す．

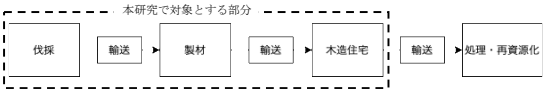


図-2　システム境界

本研究では，北九州市内の森林で伐採される地域材を対象に，木材が伐採され，製材工場での加工を経て，需要地点で木造住宅が建設されるまでの輸送工程を対象とした．上記の工程における地域材輸送工程の炭素排出量を，以下に示す式(5)で算出した．

$$W_{CO2} = (\sum_i \sum_j x_{ij} \times d_{ij} + \sum_k \sum_l y_{jk} \times d_{jk}) \times E_T \quad (5)$$

ここで，：x_{ij}：人工林 i から製材工場 j への輸送量(㎥)，y_{jk}：製材工場 j から需要地点 k への輸送量(㎥) ，dx_{ij} ：人工林 i から製材工場 j への輸送距離(km)，y_{jk}：製材工場 j から需要地点 k への輸送距離(km)，E_T：輸送 CO2 排出原単位(kg-CO2/m3・km)である．なお，本研究では，人工林の材積量を 5 年間隔で推計したため，輸送時工程における炭素排出量は 5 年間隔で推計した値を 5 等分した値を年間の炭素排出量として扱った．
各工程間の輸送量は，式(6-1)から式(6-8)に示す線形計画問題として解いた．

目的関数

$$\sum_i \sum_j x_{ij} \times d_{ij} + \sum_j \sum_k y_{jk} \times d_{jk} \qquad (6\text{-}1)$$

制約条件

$$\sum_j x_{ij} \leq f_i \qquad (6\text{-}2)$$

$$\sum_i x_{ij} \leq s_j \qquad (6\text{-}3)$$

$$\sum_k y_{jk} \leq s_j \qquad (6\text{-}4)$$

$$\sum_j y_{jk} \leq h_k \qquad (6\text{-}5)$$

$$\sum_i x_{ij} \leq \sum_k y_{jk} \qquad (6\text{-}6)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ij} = \sum_j \sum_k y_{jk} \qquad (6\text{-}7)$$

$$x_{ij} \geqq 0, y_{jk} \geqq 0 \qquad (6\text{-}8)$$

ここで，f_i：人工林の伐採量(㎥) ，s_j：製材工場の供給能力(㎥)，h_k：需要ゾーンの木造住宅用木材需要量(㎥)とする．
また，輸送距離は Arc GIS Network Analyst の到達圏解析を使用し，以下の手順で推定した．使用した道路データは，三井 E&S システム技研株式会社が作成した TMI 道路

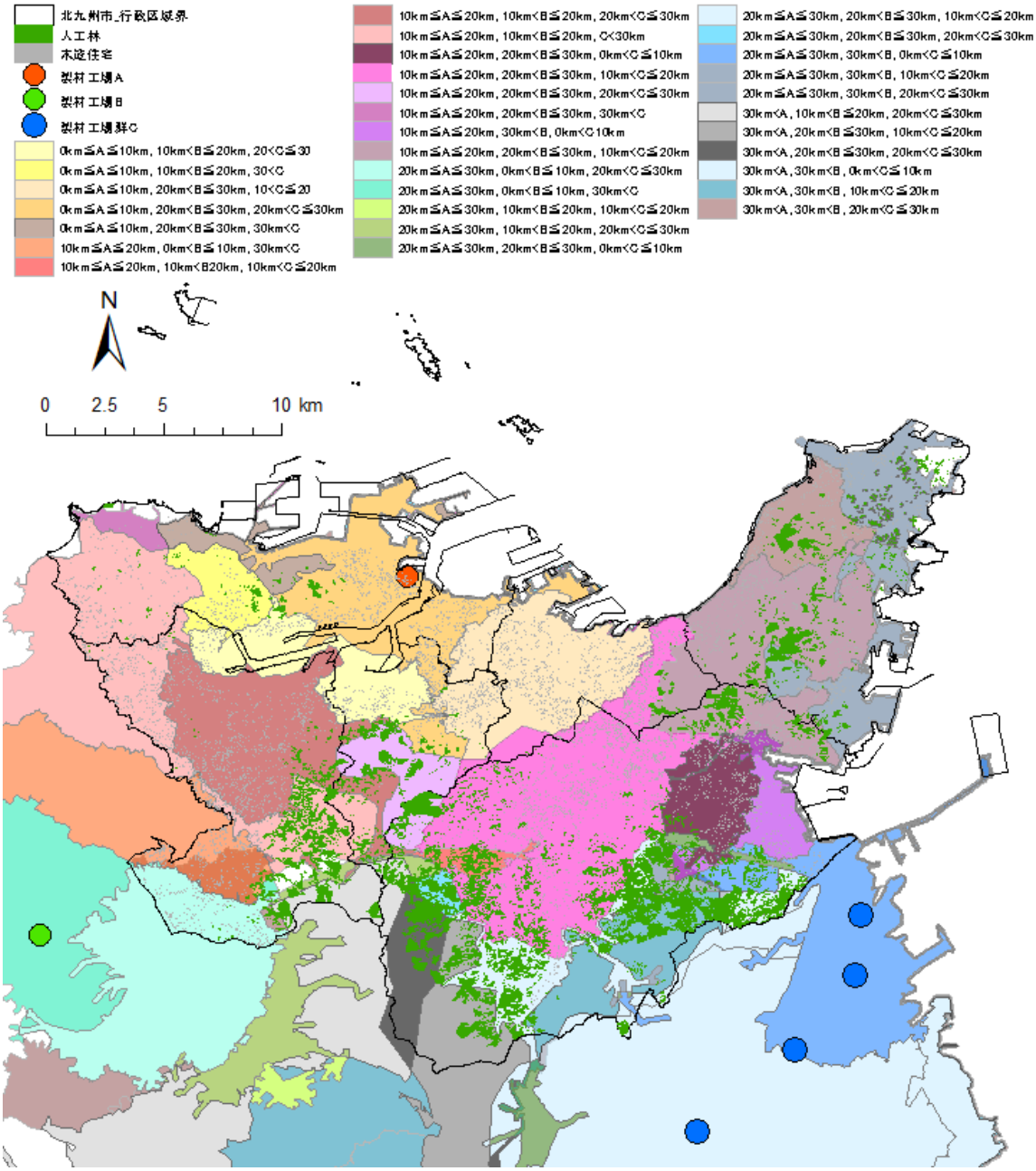


図-3　到達圏レイヤー

地図 V2020 である．まず，各製材所を起点に 10km 間隔で 0～10km，10km～20km，20～30km，30km～の４つの到達圏レイヤーを発生させた．対象としたのは，北九州市内および北九州市の行政域界から 10km 以内に位置する製材工場である．到達圏レイヤーを**図-3** に示す．さらに，到達圏レイヤーに人工林および木造住宅の空間分布を重ね，各到達圏内に位置する人工林および木造住宅を抽出することで，各人工林から製材工場，製材工場から各需要地点の距離を推定した．

ここで，各到達圏内には人工林および木造住宅が一様に分布していると仮定し，輸送距離には中央値を使用した．例えば，0km～10km の到達圏では輸送距離を 5km とした．輸送 CO2 排出原単位は，地域材の輸送手段を全て自動車と仮定し，ウッドマイルズ研究会が公表している自動車輸送 CO2 排出原単位である 0.0835 kg-CO2/m3・km[12]を採用した．

3. 結果

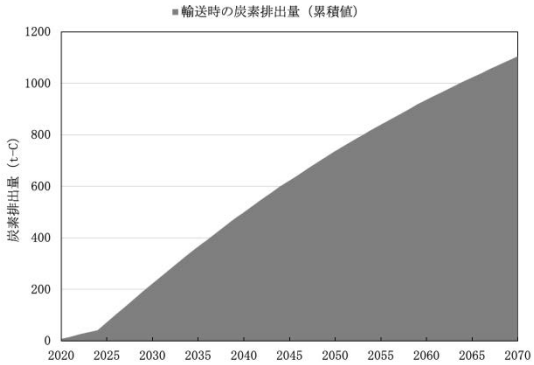


図-4 輸送工程における累計炭素排出量

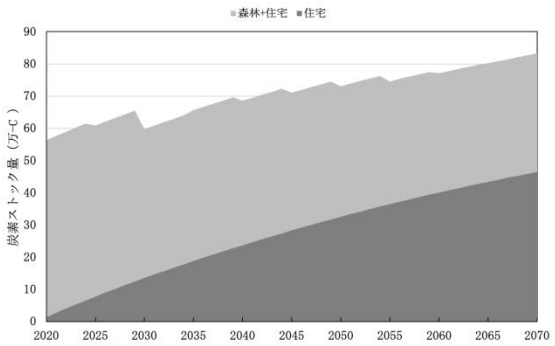


図-5 人工林と木造住宅の炭素ストック量

2020 年から 2070 年までの期間における，地域材の輸送工程における累計炭素排出量の推計結果を**図-4** に示す．2020 年から 2070 年までの地域材の輸送による累計炭素排出量は 1.1 千 t-C と推計された．一方で，2020 年から 2070 年までに地域材で建てられた新規着工の住宅の炭素ストック量は 46.3 万 t-C と推計され，地域材で建てられた木造住宅では，輸送工程で排出される炭素量は木造住宅の炭素ストック量の約 0.2%と非常に小さい値であった．また，2070 年における地域材の平均輸送距離は，13㎞と推計された．この値は，藤原ら(2005)[13]によって推計された国内に流通する製材品の国内供給拠点までの平均輸送距離 6919㎞と比較して大幅に小さい値である．

続いて，人工林と木造住宅の炭素ストック量の将来推計結果を**図-5** に示す．2070 年における人工林と木造住宅の炭素ストック量は 83.2 万 t-C と推計された．北九州市の木材自給率を 50%とした本推計では，伐採量が再植林された森林の成長速度を上回り材積量が減少し，森林の炭素ストック量は減少した．一方で，木造住宅の炭素ストック量が増加したことにより，市内全体の炭素ストック量は，2020 年から 2070 年にかけて 56.3 万 t-C から 83.2 万 t-C に増加すると推計された．

4. まとめと今後の課題

本研究では，北九州市内の人工林と木造住宅を対象とし，2020 年から 2070 年の期間における，その炭素ストック量の将来推移を推計した．また，地域材で建設される新規着工住宅を対象に，木材の輸送工程で排出される炭素排出量を推計を行った．

推計の結果，地域材で建てられた木造住宅を対象とした場合では，期間中に輸送工程で排出される炭素量は 1.1 千 t-C と推計され，2070 年における木造住宅の炭素ストック量の推計値 46.3 万 t-C と比較して約 0.2%程度のオーダーであった．この結果から，地域材を利用した場合では，輸送時の炭素排出量を差し引いても，木材利用による炭素ストック効果が得られることが示唆された．

今後の課題として，i)各製材工場における素材生産能力の実測値をパラメータとして織り込んだ分析を行うこと，ii)中間処理施設の容量を考慮し，解体後の処理・再資源化の工程における木材輸送時の環境負荷物質の発生量推計および中間処理の容量の妥当性を評価する分析を行うことが挙げられる．

謝辞：本研究は，環境研究総合推進費：S-18-4-2，3-1902，2-2103，1-2003 による助成を受けて行われたものである．ここに感謝の意を記す．

参考文献

1) 林野庁：令和元年木材需給表，2020.
2) 井上雅文：木材産業の将来展望，pp.101，2015.
3) 林野庁: 森林資源の現況，2017.
4) 淵上佑樹：木材製品の製造プロセスにおける CO2 排出量の評価， 2010.
5) 小野聡: 木材利用の推進が都市と森林の炭素固定に与える影響， 2017.
6) 北九州市：北九州市の人口（町別），https://www.city.kitakyushu.lg.jp/soumu/file_0311.html ，2021.
7) 林野庁: 森林・林業統計要覧 2020 1．国民経済及び森林資源，pp.8-11，2020.
8) 林野庁：森林・林業基本計画，2016.
9) 北九州市: 北九州市森林整備計画，参考資料，pp.7，2019.
10) 小松幸夫，加藤裕久，吉田倬郎，野城智也：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告，日本建築学会計画論文報告書，第 439 号，1992.
11) 井上孝：全国小地域別将来人口推計システム，

https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=00804e1e1beb45e1864c5f24a65fd40d
12) 滝口泰弘: ウッドマイルズ関連指標算出プログラムの改訂について，pp.1，ウッドマイルズ研究ノート（その 21），2016.
13) 藤原敬: 国内に流通する製材の平均的輸送距離と環境負荷，ウッドマイルズ研究ノート（その５），2005.

(Received August 23, 2021)
(Accepted ?, 2021)

Changes in Carbon Stock in wooden house and Man-made Forests considering carbon emission during transportation process
-Case Study for Kitakyushu City, Fukuoka Prefecture-

Kyuta YAMADA, Guo Jing, Hiroaki Shirakawa, Hiroki TANIKAWA and Hidetoshi FUKAHORI

When evaluating the carbon fixation effect of wood utilization, it is necessary to consider the amount of carbon emission through timber production and transportation process. In this study, we estimated future carbon stock in cities and forests considering carbon emissions from transportation process of local timber. During the period from 2020 to 2070, the amount of carbon emitted in the transportation process of local timber was estimated to be 1.1 thousand t-C. On the other hand, the amount of carbon stocked from local timber in wooden houses constructed from local timber during the period of 2070 was estimated to be 463,000 t-C. These results show carbon stock effect of timber utilization exceeds the carbon emissions from timber transportation.