

木橋建設で生じるCO₂排出量の算定とその評価

Calculation and Evaluation of Carbon Dioxide Emissions from Timber Bridge Construction

○三上 卓* 堀越一輝** 笹田修司***
MIKAMI Taku, HORIKOSHI Kazuki, SASADA Shuji

*博(工学) 群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町580)

** 群馬工業高等専門学校専攻科環境工学専攻 (同上)

***博(工学) 阿南工業高等専門学校建設システム工学科 (〒774-0017 阿南市見能林町青木265)

ABSTRACT In Japan, we have a carbon-dioxide reducing obligation with 6% of the carbon dioxide emission in 1990. In the bridge construction that is one of the civil engineering, a large amount of carbon dioxide has been exhausted. In this paper, the carbon dioxides by timber bridge construction are calculated with the Excel sheets made by Microsoft. It is found that the timber Bridge construction is higher effective about a carbon dioxide reducing compared with the construction of the metal Bridge and the PC Bridge.

Keywords: 木橋, CO₂, 橋梁建設, 地球温暖化, 二酸化炭素固定
timber bridge, carbon dioxide, bridge construction, global warming, carbon dioxide fixation

1. はじめに

地球の平均気温は、1906年～2005年の100年間の間で約0.74℃上昇しており、2100年には、1990年より約1.8～4.0℃の気温上昇が予測されている¹⁾。このまま、地球の平均気温の上昇が進むことによって、異常気象の多発や生態系への深刻な影響が生じると危惧されている。この地球温暖化は、産業革命以降の急速な化石燃料の消費による大気中の温室効果ガスの濃度上昇が原因とされている。特に、CO₂が地球温暖化に及ぼす影響は、温室効果ガス全体の60%を占めている。その地球温暖化対策として、1997年に開催された地球温暖化防止京都会議では、先進国における温室効果ガス排出量の削減目標を定めた京都議定書が採択された。我が国は、2008年～2012年までの期間において1990年比の6%の温室効果ガス排出量の削減を目標とした。しかし、2005年の温室効果ガス排出量は、1990年比で8.2%増加しており、目標達成には、今後14.2%の温室効果ガスの削減が必要であることから、各分野での温室効果ガス排出量の見直しが望まれている。

全労働人口の約1割が、就業している建設産業は、我が国の主要産業のひとつである。そのため、この産業の生産規模は大きく、事業において大量の材料および建設重機を使用するため、多くの温室効果ガスが、排出されていると考えられる。建設産業の中のひとつである橋梁分野では、鋼橋、コンクリート橋が主流となっている。これらの橋梁に使用される主な材料は、鋼材やコンクリートであり、1tの鋼材を生産する際に1,617kg-CO₂、1m³のコンクリートを生産する際に311kg-CO₂のCO₂が排出される²⁾。そのため、鋼橋やコンクリート橋の建設では、大量のCO₂が排出されていると考えられる。また、材料生産以外でも、橋梁用資材の運搬や建設機械による施工などの過程で、多くのCO₂が排出されている。そのため、橋梁建設の際には、建設費用削減、長寿命化の他に、温室効果ガス排出などの環境へ配慮が求められている。

本論文では、我が国の建設事業のひとつである橋梁分野に着目し、高い耐力を有する鋼橋、コンクリート系橋梁の代表であるPC橋、近年注目されている木橋について、橋梁建設で生じるCO₂排出量の簡易算定を行った。その際、CO₂排出量の算定を容易に行えるように、Microsoft社Office Excel[®]で、計算シートを作成した。CO₂排出量の算定結果を用い、橋種別のCO₂排出量の比較を行うとともに、木橋の主材料である木材のCO₂吸収能に注目し、木橋のカーボンオフセット効果を明確にすることを目的とした。

2. 橋梁建設におけるCO₂排出量の算定

橋梁建設は、材料生産、製作、輸送、施工の4つの段階に分けることができる。それぞれの段階でCO₂の排出が考えられるが、本論文では、材料生産と輸送段階におけるCO₂排出量を対象として試算を行った。対象橋種は、高い耐力を有する鋼橋、現在の我が国における主流橋種である建設費が安価なPC橋、近年の環境への高まりから、注目されている近代木橋の3橋種とした。なお、橋種が異なることで、橋台や橋脚といった下部構造は異なった構造となるが、本論文では、CO₂排出量の計算においては、上部構造のみを対象とすることとした。

CO₂排出量の算定では、算定を簡便に行うために、対象橋梁毎に、支間長、幅員、材料使用量等を入力すれば、CO₂排出量が表示される算出シートを、Microsoft社Office Excel[®]で作成した。そのシートを用い、各橋種の建設で生じるCO₂排出量を求めた。

2.1 CO₂排出量の算定に用いた橋梁の構造形式

CO₂排出量の試算に用いた橋梁の選定数は、支間長が10~75mの鋼橋27橋^{3),4)}、20~75mのPC橋5橋⁵⁾、5m~30mの木橋15橋^{6),7)}の計47橋とした。橋梁選定した橋梁の構造形式は、鋼橋の場合、単純鋼桁橋と単純箱桁橋である。PC橋の場合、鋼橋に比べると参考文献における単純桁形式の橋梁情報が少なかったため、単純桁の形式に限らず、PC単純バルブT桁、PC単純少主桁、PC単純波形ウェブプレテンション方式T桁、PC2径間連続ラーメン波箱桁、PC2径間連続ラーメン桁の構造形式を有する橋梁を対象とした。木橋は、他の橋種と比べ、絶対量が少なく、橋梁情報が不足していたため、桁橋だけでなく、下路アーチ、πラーメン、頬杖橋、2ヒンジアーチ、プレストレス木床版、4径間連続プレストレス木床版、3径間単純桁橋、2径間連続補剛トラス木桁橋といった構造形式の橋梁を対象とした。

2.2 材料生産に伴うCO₂排出量の算定方法

橋梁は、桁や床版といった部材から形成されており、建設の際には、コンクリートや鋼材などの材料を多く必要とする。これらの材料を生産する際には、化石燃料の燃焼によって作り出したエネルギーを消費するため、多くのCO₂が排出されると考えられる。この材料生産に伴うCO₂排出量の算定では、式(1)のように、各橋梁の主材料の使用量とCO₂排出原単位を掛け合わせて計算した。舗装厚やアスファルト使用量が記載されていない場合は、アスファルト厚を75mmと仮定し、単径間で支間長の情報がない場合は、橋長を支間長として計算した。

$$W_m(\text{CO}_2) = V_m \times E_m \quad (1)$$

式中の $W_m(\text{CO}_2)$ は材料生産に伴うCO₂排出量、 V_m は材料の使用量、 E_m は材料生産に伴うCO₂排出原単位を表す。ここで、橋梁の主な材料は、鋼橋では、コンクリート、鋼材、アスファルト混合物とし、PC橋では、コンクリート、鉄筋、PC鋼材、アスファルト混合物とし、木橋の場合は、木材、鋼材、アスファルト混合物とした。CO₂排出原単位は、数多く提案されているが、本論文では、今回試算対象とした橋梁が、土木構造物であることから、表-1に示す土木学会LCA小委員会推奨値²⁾を使用することとした。このCO₂排出原単位は、材料を1tもしくは、1m³生産する際に排出されるCO₂の量を示したものである。表-1より、木材やアスファルト混合物のCO₂排出原単位の値は、非常に小さく、一方で、鋼材のCO₂排出原単位は、1,617kg-CO₂/t、12,694kg-CO₂/m³と非常に大きな値を示しており、鋼材の使用量が、橋梁建設全体のCO₂排出量に及ぼす影響は、大きいと推測できる。

表-1 材料生産におけるCO₂排出原単位²⁾

| | kg-CO ₂ /t | kg-CO ₂ /m ³ |
|--------|-----------------------|------------------------------------|
| コンクリート | 125 | 311 |
| 鋼材 | 1,617 | 12,694 |
| アスファルト | 40 | 88 |
| 木材 | 190 | 77 |

2.3 輸送に伴うCO₂排出量の算定方法

橋梁は、橋梁会社の工場で製造され、海路及び陸路で輸送されることが多い。陸路を用いた橋梁の輸送では、一般に、ポルトトレーラーと呼ばれるトラクターとトレーラーが連結された輸送車両を用いる。輸送車両が走行する際には、CO₂が排出されており、国土交通省Websiteで公表している自動車の燃費性能に関する公表⁸⁾では、積載量24tのポルトトレーラーのCO₂排出量は、888kg-CO₂/kmとされている。kg-CO₂/kmという単位は、車両が1km走行する際のCO₂排出量を示している。この数値を用いて輸送に伴うCO₂排出量を算出する。試算方法は、式(2)のように表される。本論文では、輸送車両の積載量Cを24t、橋梁工場から架設地点までの距離Lを100kmと仮定し、輸送に伴うCO₂排出量の算出を行なった。

$$W_t(\text{CO}_2) = (W/C) \times 2L \times E_t \quad (2)$$

式中のW_t(CO₂)は輸送に伴うCO₂排出量、Wは使用材料の重量、Cは輸送車両の積載量、E_tは輸送車両1km走行時のCO₂排出量、Lは輸送距離を表す。

2.4 橋梁建設で生じるCO₂排出量の算定方法

CO₂排出量の算定対象とした全47橋梁について、2.2および2.3で示した材料生産と輸送におけるCO₂排出量の算定方法を用いて、橋梁建設で生じるCO₂排出量を、式(3)により求めた。

$$W_a(\text{CO}_2) = W_m(\text{CO}_2) + W_t(\text{CO}_2) \quad (3)$$

式中のW_a(CO₂)は各橋梁の橋梁建設で生じるCO₂排出量、W_m(CO₂)は2.2の材料生産に伴うCO₂排出量、W_t(CO₂)は2.3の輸送に伴うCO₂排出量を表す。

2.5 橋梁建設で生じるCO₂排出量の算定シートの作成

橋梁建設で生じるCO₂排出量の試算の際、誰もが容易に試算することができるようなCO₂排出量算定シートをMicrosoft社Office Excel[®]を用いて作成した。計算シートは、試算する橋梁の諸元・部材別材料使用量を入力するシート(図-1)とCO₂排出量の計算結果を出力するシート(図-2)で構成されている。

| 1 | A | B | C | D | E |
|---|---|--------|------|------|------|
| 2 | | 諸元 | 1 | 2 | 3 |
| 3 | | 橋梁名 | 菅原橋 | 竹原開橋 | 大猿橋 |
| 4 | | 橋種 | 鋼橋 | PC橋 | 木橋 |
| 5 | | 支間長(m) | 37.4 | 43.0 | 25.6 |
| 6 | | 幅員(m) | 11.0 | 10.5 | 5.5 |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | 桁 | 桁 | 桁 |
| 9 | | | | | |

図-1 CO₂排出量算定シートの諸元入力画面

| 計算結果一覧 [互換モード] - Microsoft Excel | | | | |
|----------------------------------|---|-------|-------|-------|
| F10 | | | | |
| A | B | C | D | E |
| 2 | 諸元 | | | |
| 3 | 橋梁名 | 菅原橋 | 竹原開橋 | 大猿橋 |
| 4 | 形式 | 鋼橋 | PC橋 | 木橋 |
| 5 | (a)支間長(m) | 37.4 | 43.0 | 25.6 |
| 6 | (b)幅員(m) | 11.0 | 10.5 | 5.5 |
| 7 | | 1 | 2 | 3 |
| 8 | (1)桁(t-CO ₂) | 45.7 | 0.0 | 7.1 |
| 9 | (2)床板(t-CO ₂) | 30.0 | 0.0 | 0.0 |
| 10 | (3)舗装(t-CO ₂) | 2.5 | 3.0 | 1.0 |
| 11 | (4)その他・不明 | 149.8 | 113.4 | 39.5 |
| 12 | (5)合計(t-CO ₂) (5)=(1)+(2)+(3)+(4) | 228.1 | 116.4 | 47.5 |
| 13 | (6)橋面積あたりの CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /m ²) (6)=(5)/(a)×(b) | 554.4 | 257.8 | 337.6 |
| 14 | (7)輸送(t-CO ₂) | 2.8 | 5.8 | 0.6 |
| 15 | (8)橋面積あたりの CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /m ²) (8)=(7)/(a)×(b) | 6.7 | 12.8 | 4.6 |
| 16 | (9)全体(t-CO ₂) (9)=(5)+(7) | 230.8 | 122.2 | 48.2 |
| 17 | (10)橋面積あたりの CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /m ²) (10)=(9)/(a)×(b) | 561.1 | 270.6 | 342.2 |

図-2 CO₂排出量算定シートの計算結果画面

3. 橋梁建設で生じるCO₂排出量の試算結果

2. で示した橋梁建設で生じるCO₂排出量算定シートにより算出した各橋種のCO₂排出量の試算結果を示す。なお、計算結果は、橋梁毎に幅員が異なることから、橋面積1m²あたりのCO₂排出量で比較するものとした。

3.1 鋼橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量

鋼橋のCO₂排出量では、橋梁建設で生じるCO₂排出量の中で、材料生産時に排出されるCO₂排出量の割合が大きく、試算対象とした全ての鋼橋でその割合は95%以上となった。鋼橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量の支間別分布を図-3に示す。支間長が35m以上で、CO₂排出量が支間長の2乗で比例的に増加していることがわかる。ここで、鋼橋建設で生じるCO₂排出量と支間長Sに関する回帰式を式(4)に示し、相関係数は、0.94であった。

$$W_s(\text{CO}_2) = 0.168S^2 - 4.763S + 492.670 \quad (4)$$

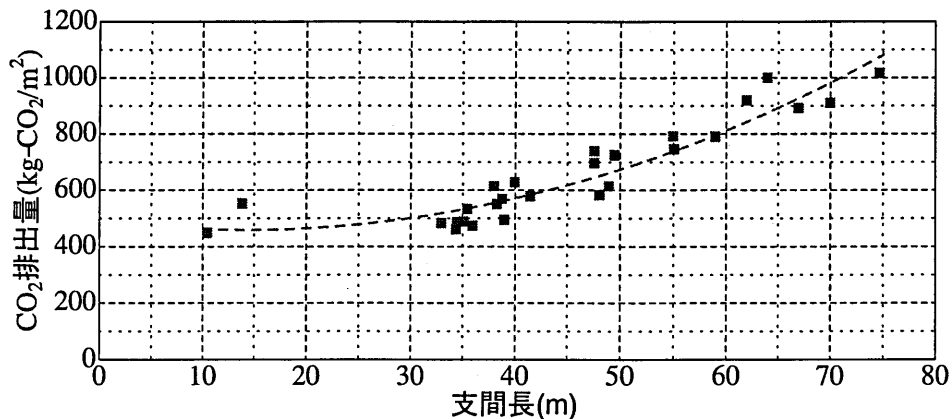


図-3 鋼橋のCO₂排出量(単位面積あたり)の支間長別分布

3.2 PC橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量

PC橋のCO₂排出量も、鋼橋同様、橋梁建設で生じるCO₂排出量の中で、材料生産時のCO₂排出量の割合が大きくなった。これは、PC橋の主材料がコンクリートであり、他の橋種と比較すると材料の使用量が多くなるためである。算出したPC橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量の支間別分布を図-4に示す。PC橋のCO₂排出量の支間長別分布のサンプル数は5橋と少ないが、支間長が25~75mの区間で支間長の増加に伴ってCO₂排出量が比例的に増加していることがわかる。ここで、PC橋建設で生じるCO₂排出量の支間長Sに関する回帰式を式(5)に示し、相関係数は、0.95となった。

$$W_P(\text{CO}_2) = 0.0137S^2 + 3.744S + 111.900 \quad (5)$$

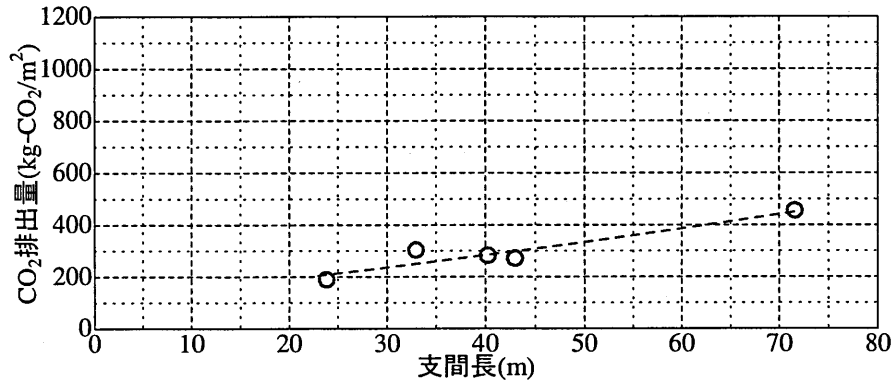


図-4 PC 橋の CO₂ 排出量(単位面積あたり)の支間長別分布

3.3 木橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量

木橋のCO₂排出量も、橋梁建設で生じるCO₂排出量の中で、材料生産段階でのCO₂排出量の割合が大きい結果となった。木橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量の支間長別分布を図-5に示す。木橋のCO₂排出量も、他の橋種同様に、支間長の増加に伴って増加している。同じ支間長におけるCO₂排出量のばらつきは、他の橋種と比べてかなり大きくなっているが、これは支間長が20mを超える木橋の構造形式が、桁、ラーメンやアーチといった様々な形式の木橋が混在しているためであると考えられる。ここで、木橋建設で生じるCO₂排出量の支間長Sに関する回帰式を式(6)に示し、その相関係数は、0.86となった。

$$W_T(\text{CO}_2) = 0.90501S^2 - 15.241S + 109.98 \quad (6)$$

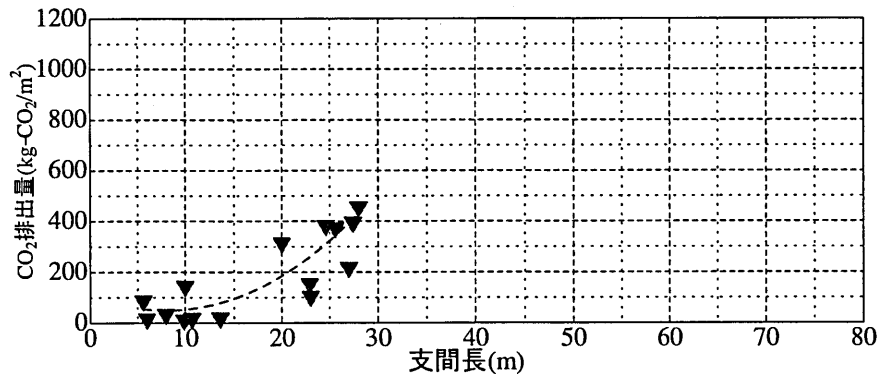


図-5 木橋の CO₂ 排出量(単位面積あたり)の支間長別分布

3.4 橋種別の橋梁建設で生じるCO₂排出量の比較

橋梁建設で生じるCO₂排出量の支間別分布図の橋種別の比較を、図-6に示す。図より、鋼橋が

橋梁建設で生じるCO₂排出量が最も多い橋種であると言える。PC橋と木橋については、同じ支間長のデータがほとんど無いことから、その大小関係は明確ではないが、PC橋のCO₂排出量が支間長の大きさによる影響がそれほど大きくないのに対して、木橋のCO₂排出量は支間長の影響を大きく受けていることがわかる。これは、木橋の建設において支間長の増大が橋梁形式や強度等に与える影響が大きく、木材の使用量が大きく増えることが要因であると考えられる。この結果から、橋梁建設で生じるCO₂排出量については、PC橋、木橋、鋼橋の順で大きくなる傾向がある。

表-2 橋梁建設で生じるCO₂排出量 [t-CO₂] の算定結果の一例

| 橋種 | 橋名 | 支間長 (m) | 材料生産 | | | | | 輸送 小計 | 合計 (全体) | 合計 (kg-CO ₂ /m ²) |
|----|------|---------|------|----|----|-----|-----|-------|---------|--|
| | | | 桁 | 床版 | 舗装 | その他 | 小計 | | | |
| 鋼 | 萱原橋 | 37.4 | 46 | 30 | 3 | 150 | 228 | 3 | 231 | 561 |
| PC | 竹原開橋 | 43.0 | - | - | 3 | 113 | 116 | 6 | 122 | 271 |
| 木 | 大猿橋 | 25.6 | 7 | 0 | 1 | 40 | 48 | 1 | 48 | 342 |

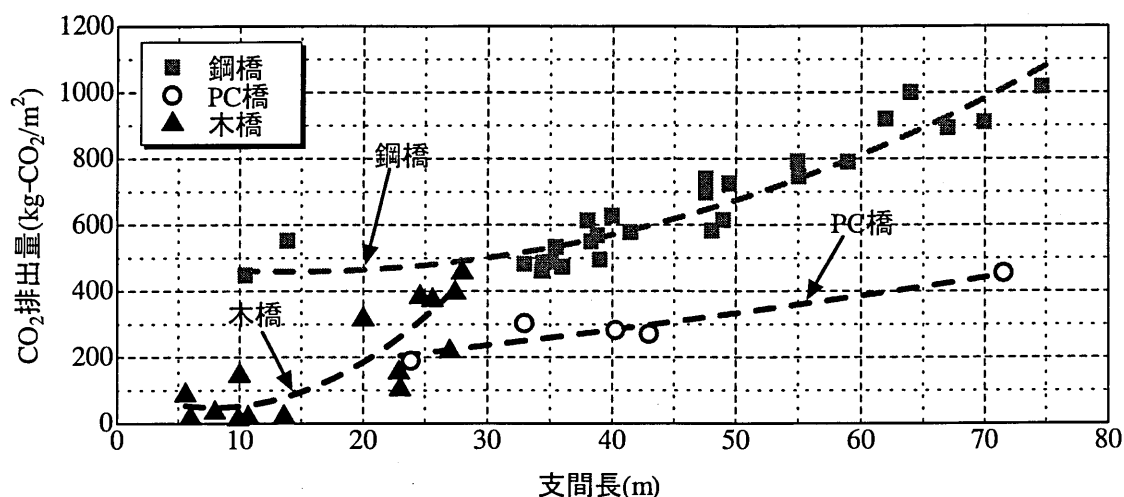


図-6 橋梁建設で生じるCO₂排出量(単位面積あたり)の橋種別比較

4. 木橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量の評価

近年、木橋が見直され、普及してきた理由の一つとして、地球温暖化抑制効果が挙げられる。樹木は、光合成により、大気中のCO₂を吸収し蓄えることができるため、森林はCO₂の吸収源として地球温暖化抑制に大きな役割を担っていると言える。現に、京都議定書で定められた日本の温室効果ガス削減目標6%には、森林による吸収量が約4%含まれている。本論文では、木橋の主材料である木材のC貯蔵量に着目し、その効果を3. で示した結果に盛り込むことで、木橋のCO₂排出量を評価することとした。ただし、本論文では、CO₂排出量での評価を行っていることから、木材のC貯蔵量は、CO₂換算の上、表示することとした。

4.1 木橋のC貯蔵量(CO₂換算量)の算出方法

酒井ら⁹⁾によると、木材のC貯蔵量は、727kg-CO₂/m³であるとされている。本論文では、この数値を元に、式(7)を用いて、対象とした木橋のC貯蔵量の算出を行った。式中のW_{T(s)}(CO₂)は木橋のC貯蔵量、V_Tは木橋の木材使用量、E_{T(s)}は木材1m³あたりのC貯蔵量である。

$$W_{T(s)}(\text{CO}_2) = V_T \times E_{T(s)} \quad (7)$$

4.2 木橋のC貯蔵量の算出結果

4.1で試算した木橋のC貯蔵量を支間長別に図-7に示す。なお、縦軸を排出量として統一したため、貯蔵量はマイナスの値で表示されている。図より、木橋のC貯蔵量は、支間長が伸びることによって増加しているが、これは支間長が伸びるにつれて、木材の使用量が増えることで、木橋のC貯蔵量が増大しているからと考えられる。

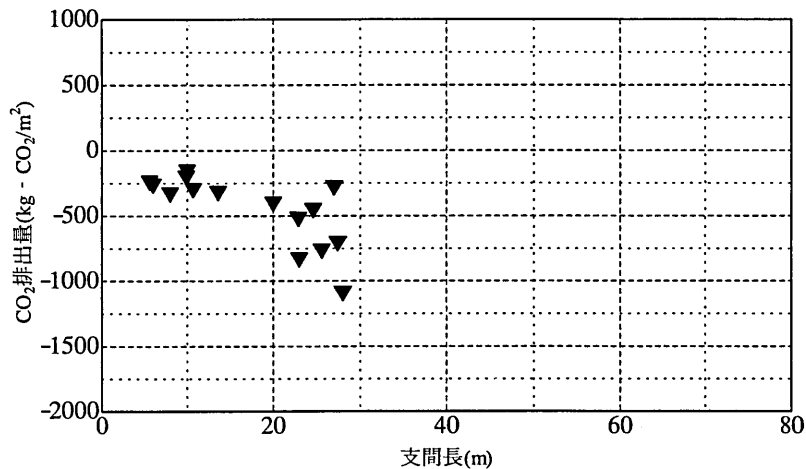


図-7 木橋のC貯蔵量(単位面積あたり)の支間長別分布

4.3 木橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量の収支

本論文では、木橋の橋梁建設時に生じるCO₂排出量の算定において、4.2で示した木橋のC貯蔵効果を取り入れることで、再評価を行うことにした。これは、橋梁建設の材料として木材を使用することで、持続可能な林業経営により、新たな植樹を促し、その樹木によって大気中のCO₂が吸収されることによるCO₂の削減効果が見込まれるからである。具体的には、木橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量を、CO₂排出量とC貯蔵量の合計、すなわち、CO₂排出量の収支で算定することとした。

図-5に示した木橋建設で生じるCO₂排出量に、図-7に示した木橋のC貯蔵量を加えることにより、木橋建設で生じるCO₂排出量を算定し直し、図-6を図-8として示し直す。図より、木橋の橋梁建

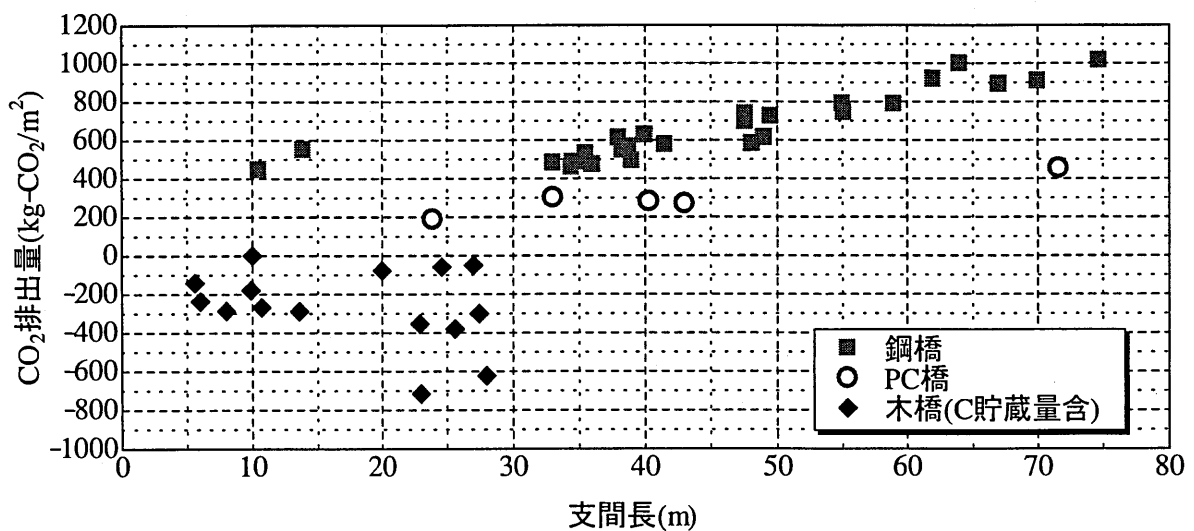


図-8 橋梁建設で生じるCO₂排出量(単位面積あたり)の橋種別比較(木橋のC貯蔵量含む)

設で生じるCO₂排出量は、全ての木橋でマイナスとなり、木橋は、鋼橋やPC橋と比較して、橋梁建設で生じるCO₂排出量の観点からは、地球に優しい構造物であると考えられる。ただし、本論文では、橋梁建設における橋梁の施工等で生じるCO₂排出量を考慮していないことや算定に用いた橋梁データが偏っていることなどから、さらに詳細な検討をすることが必要である。しかしながら、本論文で得られた結果は、これからの木橋の建設推進において、アピールポイントの一つとなることと言える。

5. おわりに

本論文では、鋼橋およびPC橋、木橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量の算定を、Microsoft社Office Excel[®]の計算シートを用いて行った。さらに、木橋の主材料である木材のCO₂吸収能に着目し、木材のC貯蔵量を考慮した木橋のCO₂排出量の算定とその評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 鋼橋は、他の2橋種に比べ、CO₂排出量がかかなり大きく、木橋とPC橋については、同じ支間長でのデータが乏しいため一概には言えないが、支間長が長い程、PC橋のCO₂排出量の方が小さいと考えられる。
- 2) 各橋種の橋梁建設で生じるCO₂排出量の支間長に関する回帰式は、算定結果の値を概ね再現していると言える。各橋種の橋梁設計を行った際、その橋梁のCO₂排出量とこの回帰式により算定されるCO₂排出量を比較することで、設計を行った橋梁の建設時におけるCO₂排出量の評価が行える。
- 3) 木材のC貯蔵量を考慮することで、木橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量は、全ての木橋について、マイナスの値を示したことから、木橋はカーボンオフセットの効果がある構造物と考えられる。

本論文で行ったCO₂排出量の算定は、限られた橋梁データにより得られたものである。また、橋梁製作や施工、橋梁の維持管理や架け替えにおけるCO₂排出量を考慮していないことから、更なる検討が必要があり、今後の検討課題と考えている。しかしながら、木材のC貯蔵量を考慮することで、木橋の橋梁建設で生じるCO₂排出量は、他の橋種に比べて、大幅に小さく、その値はマイナスを示していることから、支間長が30m以下の橋梁を建設する際には、橋梁選定の一つとして、木橋を検討することを提案するに十分な結果であったと考えられる。

参考文献

- 1) 気象庁・気象研究所：IPCC第4次評価報告書，第1作業部会報告書，政策決定者向け要約，p.6，2007.3.
- 2) 酒井寛二：土木建設物の二酸化炭素排出量原単位の推定，土木学会第4回地球環境シンポジウム講演集，pp.43-48，1996.7.
- 3) (社)日本橋梁建設協会：橋梁年鑑(平成17年版)，pp.154-155，2005.9.
- 4) (社)日本橋梁建設協会website：<http://www.jasbc.or.jp/kyoryodb/index.cgi>
- 5) (社)日本道路協会：道路橋年鑑(平成15・16年度版)，2006.3.
- 6) 土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会Website：<http://tbl.tec.fukuoka-u.ac.jp/jsce-mokkyo02/act.htm>
- 7) 環境にやさしい橋梁技術研究委員会：環境にやさしい橋梁技術に関する調査・研究，(社)建設コンサルタンツ協会近畿支部，pp.82-83，1999.8.
- 8) 国土交通省Website：自動車の燃費性能に関する公表，<http://www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpikouhyou>
- 9) 酒井寛二，漆崎昇，相賀洋，下山真人：建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究，日本建築学会計画系論文集，NO. 484，pp.102-112，1996.6.