

12. 地球温暖化対策のための木材利用の可能性について

Possibility of utilization of wood as a countermeasure of global warming

沼田 淳紀*・上杉 章雄*

Atsunori NUMATA and Akio UESUGI

ABSTRACT ; To address the problem of the global warming, using a lot of wood and making a forest active are one of the problems to be solved. Utilization of wood has a long history and wood piles had been used as a foundation of structure until around 1950 in Japan. After the 1950's, the amount of cement and steel production dramatically increased instead of wood. Reconsideration of how the wood can be used for construction would therefore be one of the countermeasures of global warming for the future. However, since one of the reasons for not using the wood as a foundation of structure these days is decay, investigation for the decay of wood as a foundation of structure should be carried out. For this reason, an investigation of a dug up wood pile which was used as a fence for 26 years in Iwamizawa city in Hokkaido is carried out.

KEYWORDS ; global warming, wood pile, decay, dug up investigation, countermeasure

1. はじめに

2005年2月16日に発効された京都議定書には温室効果ガスの具体的削減目標が示され、地球温暖化対策が実質的に大きく動き出したといえる。しかしながら、日本の温室効果ガス削減目標が1990年度比6%であるにもかかわらず、2003年度には1990年度比8.3%増加（2005年5月環境省発表）しており、合計14.3%の削減が必要となってきた。このように、温室効果ガスの削減はますます状況が厳しくなったといえる。この目標を達成するためには、温室効果ガス削減の可能性を色々な角度から探るべきであり、一般的に事業規模が大きく、自然を相手にする機会の多い建設業の役割は重要だと考える。

温室効果ガス削減には、排出される温室効果ガスを回収しそれを地中や海洋に隔離または分解する方法や、大気中の温室効果ガスを森林、海草、珊瑚などにより吸収固定化する方法などが考えられる。中でも森林にCO₂を吸収固定する方法は、安定的にかつ大量に植林を行うことが実現すれば、無理なく極めて自然に温室効果ガスを削減可能である。これに対応する仕組みとして松下¹⁾は、「建設業の活用」を示している。日本の森林は、国土の2/3を占めているが、林業経営の閉塞感や担い手の高齢化、さらには人手不足で手を掛けられない状況にあり、これが原因で生物多様性や森林土壌の質的低下、表土の流出、水源涵養機能の低下を生じている。人手不足を考えると、森林ボランティアが注目されるが持続性を欠き不安定である。そこで、長期的不況産業になる可能性の高い「建設業の活用」を想定してはどうかとしている。余剰になると予測される建設業の労働力を森林事業に活用しようということである。このような方法で森林を活性化させることが重要であるが、これと同時に、森林が活性化するためには木材の安定的かつ大量な需要が必須条件である。

大量需要の可能性として一つにはバイオマスエネルギーへの活用が考えられる。木材はカーボンニュートラルな材料なのでこれをエネルギーとして用いても温室効果ガスの増加には寄与しない。化石燃料に木材がいくらかでもとって代われば、トータルとしては温室効果ガス排出量の低減に寄与することとなる。一方で、もし木材を安定的に長期間腐朽させずに大量に使用することが可能になれば、温室効果ガスの排出量の低減からさらに温室効果ガスそのものの削減を行うことが可能になる。著者らは、このような木材の利用先としても「建設業の活用」

*飛島建設株式会社 防災 R&D センター 技術研究所 Research Institute of Technology, Research and Development Center, Tobishima Corporation, Kimagase 5472, Noda-shi, Chiba, Japan 270-0222

を考えている。

そこでここでは、まず、建設材料の現在までの推移を示し、地球環境を考える上でこれからの建設事業の方向性を示し、次に、木材を使用する場合の課題である腐朽に対して杭の堀出し調査を行った結果について述べる。

2. 建設事業の方向性

2.1 建設材料の過去の推移

建設工事で用いられる主要材料としてコンクリート、鉄、木材を考え過去の推移を検討する。表-1に、日本の1人当たりの主要建設材料の使用料(2000年)を示す²⁾。大内²⁾は、土構造物の量を除けば、建設材料としてはコンクリートの使用が容量的には圧倒的に多く、コンクリートに欠かせないセメント消費量をもって建設工事の量を推定している。図-1に、日本のセメント³⁾・粗鋼⁴⁾・木材⁵⁾の生産量対1964年比の推移を示す。ここでは、それぞれの生産量の絶対値が異なるので、東京オリンピックの開催された1964年の値で正規化して示した。なお、消費量の推移の形状²⁾もこれに類似している。

セメントの生産量は、東京オリンピックの開催された1964年を中心とした高度経済成長期に爆発的に増加し、1950年代初頭から1973年のオイルショックまでの約20年間で10倍近くになっている。その後2回の減少後、バブル景気による回復があり1996年にピークとなって以降は減少し続けている。しかしながら、1950年初頭と比べれば2002年の値は10倍近い値を示しており、高度経済成長を機に大量のセメントを使ってきたことがわかる。これは、勿論建設工事の影響が大きいと考えられる。

粗鋼は、自動車産業などの他産業の影響も大きいと考えられる。粗鋼の生産量は、第1次オイルショック後の傾向に若干の違いがあるが、1950年初頭から高度経済成長を経て第1次オイルショックに至るまで、爆発的な増加を示し、その後1950年初頭と比較し数十倍にも及ぶ高い値で推移しているという点でセメントと類似している。

全く逆の傾向を示しているのが、木材(薪炭を除く用材)の生産量である。1955年より若干増加傾向にあるが、1964年を中心とした7~8年間をピークとしてそれ以降は減少し続け、2004年にはピーク時の1/3以下になっている。この中には、パルプ・チップ用の木材も含まれており、これが全体に占める割合は1955年に対して2004年では増えているので、建設に用いられた国内産の木材は図に示される以上に減少が著しいと推察される。

1950年以前の建設材料としては、木材、土、石などが主流であったと考えられる。これを考慮すると、建設材料としての木材は1960年代に生産量のピークを迎える

表-1 日本の1人当たりの主要建設材料の使用料(2000年)²⁾

	消費量	消費金額
コンクリート	1.9m ³ /人	19,000円/人
鋼材(建設用)	0.026m ³ /人	7,000円/人
木材(建設用)	0.11m ³ /人	5,500円/人

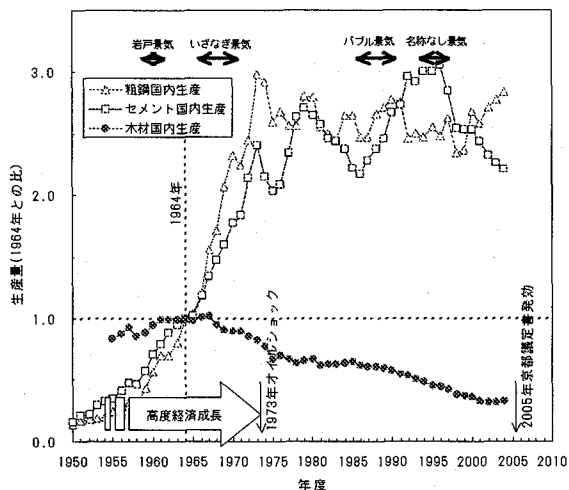


図-1 日本のセメント・粗鋼・木材の生産量(1964年との比)の推移³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾

表-2 各材料のCO₂ストック量(排出量)

材料	CO ₂ ストック量 (t-CO ₂ /材料1t)
セメント (ポルトランドセメント)	-0.77
鋼材(形鋼)	-1.26
木材	1.64

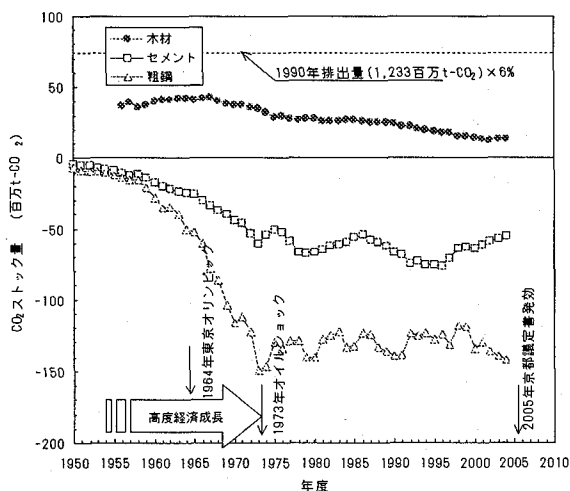


図-2 日本のセメント・粗鋼・木材生産量のCO₂ストック量換算の推移³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾

まで増加してきたが、高度経済成長期にそれがセメントや鉄に取って代わり、その後減少し続け現在に至ったと推察できる。現在、建設工事が減少してきたといわれる⁷⁾が、1950年代に比較すると現在もなお圧倒的にセメントと鉄の生産量が多い。

2.2 木材の有効活用

表-2は、セメント（ポルトランドセメント）、鋼材（形鋼）、木材のCO₂ストック量である。セメントと鋼材は、文献⁸⁾より材料1t当たりのCO₂排出量を負の値にして示した。木材のCO₂ストック量は、木材1t当たりの炭素量を0.5t-C/t-wood（木材の元素組成50%⁹⁾）とし、1t-CO₂=3.67t-C（分子量の比44/12）より、木材1t当たりのCO₂ストック量は1.84t-CO₂/t-woodとなる。製造段階でのCO₂排出量を大雑把に0.2t-CO₂/t-woodと仮定すると、製造工程を含めた木材1t当たりのCO₂ストック量は1.64t-CO₂/t-woodとなる。同じ性能を満足する材料必要量での比較にはなっていないので、これをそのまま単純に比較することはできないが、少なくともセメントや鋼材を木材に置き換えることで、確実にCO₂排出側からストック側へ転じることがわかる。

図-2は、図-1の元のデータに、表-2のそれぞれの材料1t当たりのCO₂ストック量を乗じたものである。図中には、目安のために京都議定書に示される1990年のCO₂排出量の6%の目標値を示した。

高度経済成長期に、CO₂排出側となるセメントと粗鋼の生産が増え、逆にCO₂ストック側となる木材の生産が減少していることがわかる。1950年代に着目すると、木材のCO₂ストック量はセメントと粗鋼のCO₂排出量の合計を上回っており、表-2を単純に生産量に乘じた比較を行うと、この3者の総量はCO₂ストック側になる。その後高度経済成長を経てこの関係は全く逆転し、セメントと粗鋼のCO₂排出量の合計は、木材のCO₂ストック量の10倍以上となっている。このように、建設業の主要材料であるセメント・鉄・木材を見る限り、高度経済成長を機に、温室効果ガスを大量に発生する材料に多くを依存してきたといえる。

セメントや鉄を用いることによって為し得た建設構造物が多くある一方で、逆に木材を用いても問題のないものも多くあると考えられる。そのようなことから、著者らは今後の建設材料の一つの方向性として図-3を考えている。江戸時代には、理想的な循環型社会が形成され、建設工事も天然材料である土・石・木を主体に用いていたと考えられる。その後、高度経済成長やバブル期を経てセメント・鉄・人工化学材料に頼った建設を行ってきた。この間、環境問題は深刻さを増し現在に至った。今後は、再度過去を見直し、今まで培ってきた技術を応用しつつ、できるものから江戸時代型のような土・石・木を主体とした将来型建設工事に移行していくということである。このように過去を振り返って考えてみると、土木工学という言葉自体が、これから目指すべき自然環境工学をもいい得ているように感じる。

さて、木材を大量に使うとかえって地球温暖化に逆行するように思われるがそうではない。植林と伐採をバランス良く行い、木材を長期保存できればCO₂削減が可能となる。図-4に、1ha当たりのカラマツとスギの1年間のCO₂吸収量と、それを毎年累積したCO₂貯蔵量（ストック量）を示した。データは北海道水産林務部森林計画課のURL¹⁰⁾を参考にした。カラマツは林齢15年までの間に大量にCO₂を吸収するがその後吸収量は激減し、25年後以降は毎年吸収量が徐々に低下する。スギは、林齢15年までの間にカラマツと同様に大量にCO₂を吸収

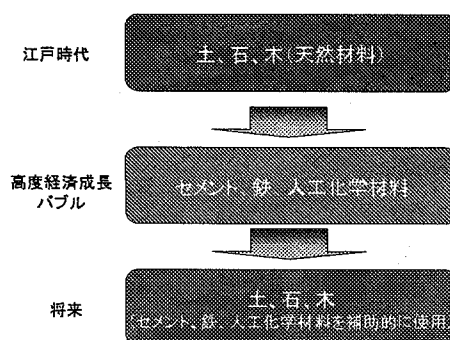
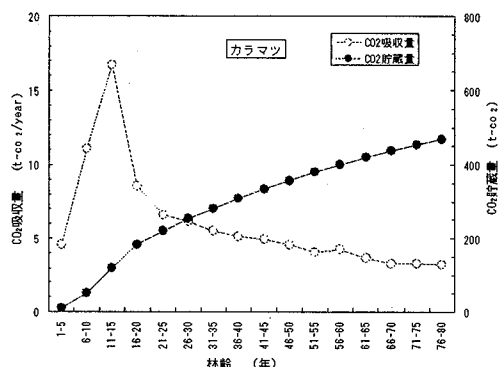
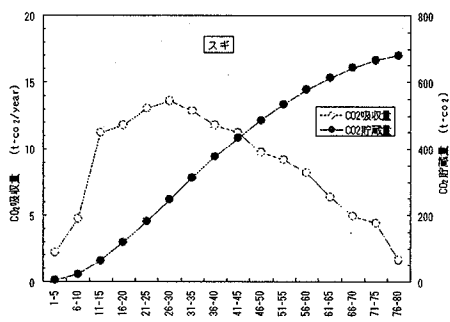


図-3 地球温暖化対策を考える上での今後の建設材料の方向性



(a) カラマツ



(b) スギ

図-4 1ha 当たりのカラマツとスギの年間CO₂吸収量と貯蔵量

しそれ以降は徐々に吸収量が低下する。したがって両者とも貯蔵量は、林齢 15～40 年までの間に急勾配で CO_2 を吸収し貯蔵するが、それ以降は貯蔵の増加速度は低下していく。このような関係を模式的に示したのが図-5 である。植林すると若木のうちは CO_2 を大量に吸収貯蔵していく。しかし老齢化すると CO_2 吸収量は低下し、やがては飽和状態になると考えられる。このような状態では樹木による CO_2 削減を期待できない。このように老齢化する前に木を伐採すべきである。それを燃やしたとしても木に貯蔵された CO_2 が大気に放出されるだけなので、大気中の CO_2 総量は大局的には変化しない。さらに、伐採した木材を保存するとともに植林を行うことを繰り返せば、新しく貯蔵した分を足し合わせることができ、図中の破線のように CO_2 を貯蔵可能となる。しかし、一般に貯蔵した木材は、腐朽したり途中で燃えてしまったりするので、破線のように完全には CO_2 を貯蔵することは実際にはできない。図の細線は、腐朽したり燃えたりする平均的な CO_2 貯蔵減少分を示し、その傾きを α とした。 $\alpha=0$ のとき、木材が完全に保存された状態であり、 $\alpha=90\text{deg}$ のとき、木材が完全に分解され尽くした状態を意味している。この減少分を加味して総ストック量を示すと太線となる。 α をできるだけ 0 に近づけながら、植林・伐採を繰り返すことで CO_2 を貯蔵、すなわち、温室効果ガス削減が可能となる。

このような考えに基づき、学校の内装、机やイス、ガードレールや沈床に木材を用いられることが既に行われている。一方、土木工事では、例えば 1950 年頃まで構造物基礎として多数使われてきた木杭基礎¹¹⁾は、現在新規本設工事においては姿を消してしまったといっても過言ではない。この理由として木材の腐朽に対する不安が考えられる。この点に関しては、腐朽に対する適用範囲を明確にした上で、過去に倣い木材を積極的に使うということが考えられる。事実、過去に施工された構造物で長期間地中や水中にあった木杭や木工沈床が健全であったことが報告¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾されており、このような考え方が決して夢ではないことがわかる。

3. 木杭の掘り出し調査¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾

3.1 調査方法

木材の腐朽を検討する目的で、北海道岩見沢市で木杭の掘り出し調査を行った。ここでは、その概要を述べる。

木杭（色丹カラマツ）は、北海道岩見沢市上幌向（カミホロムイ）町で採取した。図-6 に、木杭採取地点の地盤柱状図と木杭の設置状況¹⁸⁾を示す。地盤は、地表付近から GL-5m 付近までが泥炭層で、N値は 3 以下といずれも小さく軟弱な地盤である。地下水位は、GL-0.6m である。木杭は、1979 年に打設され、26 年間この場所では柵として利用された後、2005 年 6 月に掘り出された。寸法は全長 8m、直径は末口で約 30cm、元口で約 35cm である。5.5m が地中部にあり、2.5m が地表面以上にあった。設置時には地表面付近上下それぞれ約 1m の範囲に防腐剤（武田薬品工業：キシラモン）が塗布されていた。年輪数は、先端部より 0.5m 位置で 143、先端部より 5.0m の位置で 150 であった。

掘り出された木杭は、目視観察を行い、円盤状に切断後飽和状態にし、ピロディン試験²¹⁾、圧縮試験を行うとともに、地盤工学で用いられる含水比などを求めた。なお、ここで述べる含水比は、採取時の含水比ではなく、試験室で飽和にした状態での含水比である。

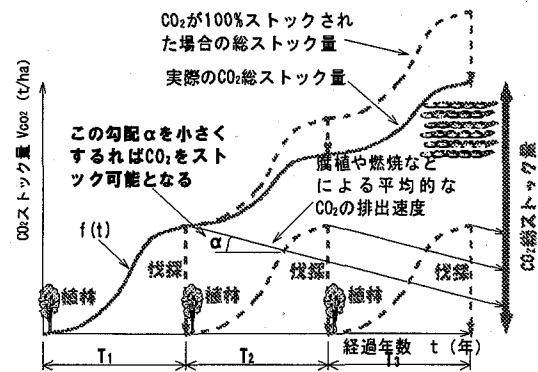


図-5 木材の CO_2 吸収量と貯蔵量の模式図

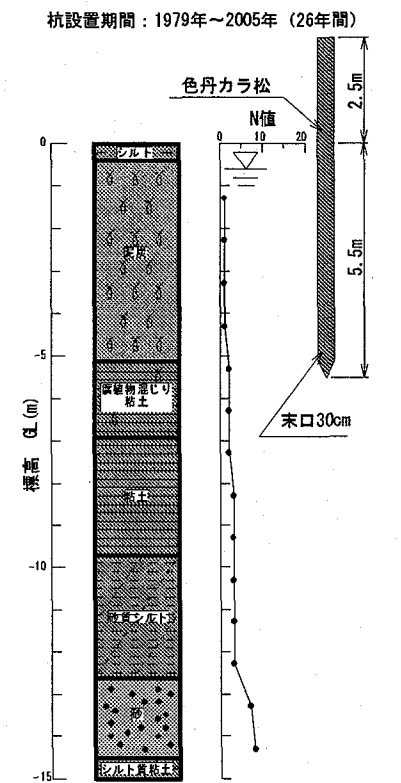


図-6 木杭採取地点の地盤柱状図と木杭の設置状況¹⁸⁾

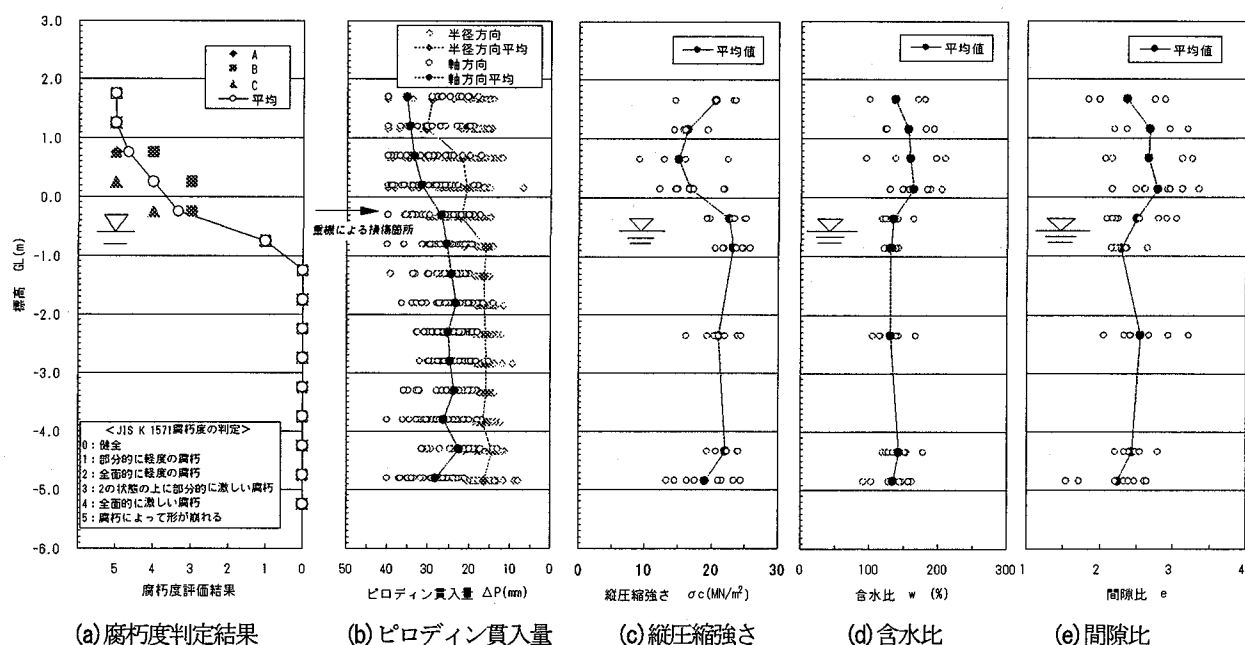


図-7 採取した木杭の調査結果^{18) 19) 20)}

3.2 調査結果

図-7に調査結果を示す。(a)はJIS K 1571:2004「木材保存剤の性能試験方法及び性能基準」に示される腐朽度の判定を行った結果である。判定は、杭先端より50cmの区間に区切り、それぞれの範囲の状況を目視で観察し判定を行った。実線は、ABC3者による評価の平均値である。GL-1m以深では全く健全であることがわかる。地下水位付近より、軽度の腐朽が観察され、地表面より上では激しい腐朽であることがわかる。

(b)はピロディン試験結果である。ピロディン貫入量30～35mm程度以上が高い腐朽度の目安となる²¹⁾。軸方向のピロディンの貫入量は、ばらつきが大きいのが平均的にはGL-0.3m付近より浅い部分で貫入量が大きくなり、地表以上では明らかに大きな値を示している。半径方向のピロディン貫入量は、地下水位以下のGL-0.8m以深では概ね15mm程度でばらつきも少ない。なお、腐朽が進みピロディンが実施できない箇所では、貫入量を最大値の40mmとした。半径方向のGL-0.35m付近で、地表より上の値と比べても大きな値を示している。この箇所では杭引き抜き時に生じた重機による損傷が見られ、ここで大きな値を示したのはその影響だと考えられる。

(c)は縦圧縮強さである。縦圧縮強さは、地表面以深では概ね20～25MN/m²であるが、気中にあった地表より上部ではそれより小さくなっている。GL1.7m付近で若干縦圧縮強さが強くなっているが、これはこの部分で腐朽が激しく、供試体切り出し時に損傷箇所から若干採取位置をずらして比較的健全な所から供試体を採取したためだと考えられる。縦圧縮強さの傾向は、半径方向のピロディン試験結果のGL-0.85m以深とGL0.15m以浅の傾向と整合するが、GL-0.35m部では異なった傾向となった。これは、ピロディン試験と圧縮試験の測定位置の違いを反映したものだと考えられる。前述のようにこの深度は、重機による杭の損傷が認められた。圧縮試験用の供試体は杭内部から切り出しているの、杭内部の腐朽程度を反映している。一方、この位置でのピロディン試験は、杭表面部より半径方向にピンを貫入しているの、杭表層付近数十mmの腐朽程度を反映している。その結果、ピロディン試験結果は重機による損傷を受けている杭表層付近の影響を受けたといえる。これを考慮すると、地下水位から地表の範囲あたりから腐朽の程度が大きくなったと推察される。このような傾向は、杭内部の軸方向で行ったピロディン試験の結果とも一致している。ただし、一般的には地表部付近が最も腐朽が進む場合が多く、ここではそうならず地表部付近よりも上部の腐朽が激しかった。これは、防腐剤の影響が考えられ、地表付近の腐朽に関しては他地点の調査を追加するなどし、今後さらに検討する必要がある。

(d)と(e)は含水比と間隙比である。含水比も、地中部ではばらつきが少なく概ね150%未満であるが、地表より上の部分ではばらつきが大きく平均値は150%以上となっていた。杭は飽和化を行っており、その飽和度は80～100%程度であったので、(e)からもわかるように、含水比が大きいということは間隙比が大きいという意味があり、地表より上の部分で空隙が増えている、すなわち腐朽が進んでいたと考えられる。

4. まとめ

- (1) 建設工事の主要材料だと考えられるセメント・鉄・木材について地球環境面から過去の推移を検討し、高度経済成長を経て今まで多く使われていた木材にセメント・鉄がとって代わったことを示した。
- (2) 高度経済成長を経てセメント・鉄が主要材料となったが、建設業の活用により地球温暖化対策を行うということも考えられ、これからの将来型建設材料としては、現代技術を応用しながらも土・石・木を主体として行くことが一つの方向性として考えられることを示した。
- (3) 実際に木材を利用していくためには腐朽が課題だが、打設後 26 年間経過した色丹カラマツの木杭を調査した結果、気中に曝されていた部分については腐朽が進んでいたが、地下水位以下は全く健全であった。一方、地下水位が変動していると考えられる地表面～地下水位の範囲の腐朽については、明瞭な結論を出せなかった。

謝辞：2 章は、港湾空港技術研究所の菅野高弘博士との環境についての議論を参考にさせて戴いた。また、調査では、木杭の採取に関しては昭和マテリアル株式会社の五十嵐誠氏に御協力戴き、検討については（独）森林総合研究所の桃原郁夫氏にアドバイスを戴いた。ここに記して心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 松下潤：建設業と森林資源循環マッチングの必要性と可能性，EARTH & FOREST, NEWSLETTER, 土木学会地球環境委員会, No.38, pp.1-2, 2006.1.
- 2) 大内雅博：第 1 回建設工事の量，当たらすといえども遠からず，土木学会誌, Vol.91, No.4, pp.60-61, 2006.4.
- 3) セメント協会：セメントハンドブック 2005 年度版, p.7, 2005.6. (1969 年以前はセメント協会資料)
- 4) 日本鉄鋼連盟：鉄鋼統計要覧 2005, p.57, 2005.10.
- 5) 経済産業省：通商白書
- 6) 農林水産省 URL：木材需給（供給）量累年統計
- 7) 大内雅博：第 2 回経済成長で建設は衰退？，当たらすといえども遠からず，土木学会誌, Vol.91, No.5, pp.76-77, 2006.5.
- 8) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（指針），コンクリートライブラリー125, 丸善, p.15, 2005.11.
- 9) 高橋徹，中山義雄編：4.1 元素組成，木材科学講座 3 物理，海青社, p.23, 1995.3.
- 10) 北海道水産林務部森林計画課森林山村グループ URL
- 11) 土質工学会：4.1.5 我が国の杭基礎の歴史，構造物基礎入門，入門シリーズ 4, pp.106-113, 1980.11.
- 12) 川上敬介，大原明神：土木用材として 40 年近く水中に設置されていたマツ丸太の強度性能，木材工業, Vol.55, No.4, pp.165-169, 2000.
- 13) 山田周平，稲田達夫，小川一郎，田口典生，永井香織，真島正人：丸ノ内ビルディング（旧丸ビル）の構造調査 その 8 松杭の鉛直載荷試験，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1069-1070, 2000.9.
- 14) 木方洋二，金川靖，奥山剛，服部芳明，高田喜久夫：名古屋駅基礎木杭の 50 年間の変質に関する調査（第一報）—杭材の強度，老朽度試験—，名大演報, No.10, pp.70-80, 1990.
- 15) 富田徹，高山明久：旧橋の木杭載荷試験，ピーエス三菱技報, 第 2 号, pp.20-21, 2004.
- 16) 佐藤信彦，天野勲，宇野浩樹：既設橋梁における木杭基礎の健全性に関する基礎調査—その 1 木杭の施工状況調査および杭体の劣化試験—，土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.517-518, 2005.9.
- 17) 羽矢洋，西岡英俊，西田尚史，木村礼夫：木杭基礎橋脚に対する大変位載荷試験，第 40 回地盤工学研究発表会, pp.1557-1558, 2005.7.
- 18) 沼田淳紀，上杉章雄：岩見沢市で掘り出した木杭の目視観察，第 41 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2006.7., 投稿中
- 19) 上杉章雄，沼田淳紀：岩見沢市で掘り出した木杭の強度について，第 41 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2006.7., 投稿中
- 20) 沼田淳紀，上杉章雄：岩見沢市で掘り出した木杭の腐朽状態の定量評価，土木学会第 61 回年次学術講演会概要集, 第 7 部, 2006.9., 投稿中
- 21) 森満範：木製土木構造物の耐朽性を予測する，林産試だより, pp.1-3, 2002.5.