

9. 土木事業における木材利用による 地球温暖化防止および林業再生への貢献

富松 義晴¹・沼田 淳紀^{2*}・濱田 政則³・三輪 滋²

飛島建設株式会社 (〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1)

飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

早稲田大学 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 55 号館 S-803)

飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

*E-mail: atsunori_numata@tobishima.co.jp

地球は、長い年月を費やし、大気中の二酸化炭素を地中に封じ込めることで、現在の大気環境、温度環境、土壌環境など人類が生存し生活できる地表環境が形成された。この恩恵を受けて生存している人類が、現在その化石燃料を掘出し大気に放出し、自らを生存の危機に曝している。これからの土木事業は、持続可能社会への対応を第一義とすべきであり、その意味で木材の使用を見直すべきである。現在豊富な森林資源を土木工事で積極的に利用していくことが、土木事業における地球温暖化防止対策の現実的な緩和策である。本論文は、土木技術者のなすべき役割、木材利用の意義と日本における林業の実状、具体的な利用方法について示す。

Key Words : carbon stock, civil engineering, global warming, revitalizing forestry, sustainability, wood

1. はじめに

18世紀後半、西欧に起きた産業革命は、人類に大きな繁栄と物質的な豊かさをもたらした。半面、資源の無原則な採取により、生態系を破壊してきた。土木事業においても、化石燃料を大量に使用して加工するセメントや鉄などの材料を、経済性、合理性、効率性を最優先とし大量に使用してきた。これにより、人類を含む全自然生態系にまで負の影響が拡大してきている。

土木事業は、人類にとってのみならず、地球環境への影響の配慮、そして便利さから生態系の復元への発想の転換が求められている。これからの土木事業は、我々が閉じた系に存在していることを認識し、持続可能な社会の構築を目指すべきである。

その意味で、土木工事でかつては主要材料であった木材の利用を見直すべきである。本論文は、まず現在の土木技術者の思想的な背景となすべき役割を示し、次に木材利用の意義と今が木材利用する絶好機であるという日本における林業の実状を示し、最後に木材の具体的な利用方法について示す。

2. 土木技術者のなすべき役割

土木は、その時代の人間の営みの為の社会基盤であり文明の支えである。現在の土木界が陥っている閉塞状況の根源的な要因を知るには、現時点で起こっている表層的現象の把握と分析だけではなく、現在の文明を支えている哲学、思想的原理を理解する必要がある。

現在、世界は近代ヨーロッパ文明の支配下にある。此の文明は、科学技術の文明であり、力の文明である。近代ヨーロッパ哲学の始祖であるデカルトは、思惟する人間と物質のみが、真に存在するものであるとした。物質の探究を科学技術が推し進め、物質への信頼が近代文明の前提になっている。人間と物質だけが真の実存とすれば、自然も動植物も人間の為に利用されるべき単なる物質である。自然は人間に支配され改変されるべきものである。

最近よく言われる“自然との共生”や“持続可能な……”等のフレーズがややもすると虚しく響くのは、我々の思考が近代ヨーロッパ哲学に洗脳されているからと思われる。デカルト哲学からすれば、人が、人間の支配下の物

質である自然と対等な関係として共生することはあり得ないし、人間にとって利用するだけの動植物や自然と、人間に不利益な形で共存・持続など考えられない。先だつての口蹄疫問題でも、感染していない20数万頭の牛の殺処分や、鳥インフルエンザ感染での同様な処置など、動物を物質と扱うことに何の抵抗もなくなっている我々は、まさにデカルトの弟子である。

現在の我々の文明は、一言でいえば人間以外の生物の生命を認めない文明である。このデカルト哲学を基礎として産業革命がおこり、西欧による植民地政策を経て、世界は物質と進歩を信仰する近代ヨーロッパ文明に統一された。産業革命により科学技術が急速に進歩し、人類に繁栄と豊かさをもたらしたが、デカルト哲学を基礎にしたヨーロッパ文明下で、自然の再生を無視した資源の無原則な採取と廃棄により、自然生態系を破壊してきた。

現在の地球人口は約69億人でさらに増加傾向にあり、飽和人口は100億人前後といわれ、既にその半数以上に達し、人類の生存に必要な食料、水、資源の不足が顕在化している。技術が人口の増加を支えている側面は大いに評価されるが、地球規模での大気、水、土壌の汚染や森林の減少、それに伴う自然生態系の破壊等環境に対する負の影響も無視できない。

我が国は明治以降、猛烈な勢いでヨーロッパ文明を取り入れ、技術大国となり豊かな生活を手に入れた。ヨーロッパの科学技術文明を導入することは、同時にその思想も受け入れることになり、ヨーロッパ文明の指導原理が浸透し、無意識のうちに我々の文化が近代ヨーロッパ哲学の足下となっている。特に、1960年代以降土木事業においても、化石燃料によるエネルギーを大量に使用して加工する材料（セメントや鉄、その他ほとんどの資材等）を経済性、合理性、効率性を至上なものとして使用し、工事を行ってきた。このような状況下、自然を畏怖し、自然に対し力で立ち向かうのではなく“折り合い”をつけながら対峙するという日本人の自然観は完全に排除され、すべての生き物を衆生として敬う日本古来の思想は消滅した。“自然は人間によって改変されるべきもの”という近代ヨーロッパ哲学のもと、社会資本の整備が進められてきたが、人間圏を含む人工生態系さらには自然生態系が再生不能になりつつある。

更に、“自然は人間により解明され征服されるもの”とするヨーロッパ近代思想下で、誤った安全神話（多くの不明確な条件の基に組み立てられた理論上安全であれば絶対的に安全）が作られ自然に対しての謙虚さが失われている。土木技術者は、土木が経験工学だといわれることを嫌い、又、説得力の弱さを補強するために、不明な部分を「仮定」し、時には強引に理論構成して科学的根拠としてきた。しかし、自然と対応する土木技術は“科学的根拠”では収まらないものもあることを認め、自然

との折り合いという形で解決することも必要である。

現在は、文明史的次元で地球的規模の大転換期である。産業革命後の無制限に資源を採取しての成長は、自然生態系を破壊し再生不能を予感させるまでになった。貧しい時代には許された、化石燃料のエネルギーにより作られた土木材料を大量に使用することの修正が迫られている。土木においては、人類にとってのみならず、地球にとってどうかという視点、そして便利さから生態系の復元への発想の転換が求められている。これからの土木事業の方向は、使いすぎた資源の後始末、地球あるいは地域が閉じた系としての持続可能社会への対応を第一義とすべきである。

自然生態系は植物が太陽エネルギーを得て、二酸化炭素と水を原料に有機体を作り上げる。動物は植物を食べ、その廃棄物や死骸を土壌の微生物が分解し、それを養分として植物が吸い上げる。この循環が生態系の基本である。この自然の循環の処理能力を超えて廃棄物を投棄し森林を傷つけてきた事が人類存亡の危機となっている。

然しながら、我々は生活レベルを江戸時代に戻すことは不可能であるし、人口を4千万人に減らすこともできない。自然環境を復元し、かつ、豊かな生活と安全・安心を担保する為には、土木技術の進化・新技術開発と近代ヨーロッパ哲学に代わる新しい思想が必要である。我々土木技術者は、明治時代からの純粋な技術者魂を遺産として受け継いでいる。又、自然を畏怖し、あらゆる生物を衆生として共生するバランスを尊ぶ日本独自の自然観が備わっている。

これからの土木技術者は、自然は支配するものとする西欧的自然観を排し、自然との折り合いを大切にする日本人の自然観と工学者としての良心を持ち、新しい環境技術を開発することが使命である。特に、生態系循環の基本である木材（植物）、水、土壌に対する技術開発が求められている。ただし、技術（特に土木技術）は自然の法則の中から生まれてきたものであり、自然を制御できない未熟な技術をあたかも自然を制したかのような傲慢な対応は決してしてはならない。土木技術者には特段の自然に対する謙虚さが求められる。

社会資本整備を担う土木事業は、公共性の強い行為、あるいは公共そのものであり、産業の発展を支え、生活を豊かにし、利便性を高め自然の猛威から生命・財産を守ることを大命題とする。このような事業に携わる土木技術者は、高い倫理観と工学者としての良心を兼ね備えた存在でなければならない。それ故、地球の再生は、土木技術者こそが成しえることであり、これこそがシビルエンジニアの使命である。

3. 持続可能社会へ向けた木材利用の意義

持続可能な社会を構築する上で、木材利用がその一つの解決策である。本章では、木材利用の意義と、今こそ木材利用の拡大をはかる絶好の機会であるという日本の森林の実状を示す。

(1) 木材利用の意義

樹木は、光合成により大気から二酸化炭素を吸収し、酸素を排出しながら樹木として炭素を固定し成長するので、樹木の成長は単純に大気中からの炭素(二酸化炭素)削減を意味する。一方、化石燃料を燃やすと、長い年月を要して地中に封じ込められた炭素を大気中に放出し、大気中の二酸化炭素濃度を上げる。現在の大気中の二酸化炭素の濃度は0.0379% (379ppm) (2005 年) であるが、誕生直後の地球は何十%もの高濃度であったと言われる。その後、水の誕生、生物の誕生によりそれが固定化され濃度を減じてきた。長い年月を費やし、大気中の二酸化炭素を地中に封じ込めることで、現在の大気環境、温度環境、土壌環境など人類が生存し生活できる地表環境が形成された¹⁾。この恩恵を受けて生存している人類が、現在その化石燃料を掘出し大気に放出し、自らを生存の危機に曝している。

樹木の炭素固定能力を利用し、人為的に大気中の二酸化炭素を削減する方法として、①植林し樹木を増やすこと、②間伐を行い樹木の成長を促すこと、③木材として長期に使用し木材の全体量を増やすことが上げられる。写真-1 は、45 年生の間伐が実施されなかった樹木と、5 年毎に間伐が実施された樹木の胸高位置における断面の比較例である。間伐が樹木の成長を促し、断面積が4 倍程度に大きくなっていることがわかる。

さらにこのような木材を利用することによる二酸化炭素削減効果として、①炭素貯蔵、②省エネ、③化石燃料代替、④森林活性化、の各効果が期待できる²⁾。森林活性化効果とは、木材の需要を拡大することで、大気中の二酸化炭素を取り除く働きを持つ持続的林業が活性化し、さらに、林業が活性化することで森林の多面的な機能である、生物多様性保全、地球環境保全、土砂災害防止、土壌保全、水源涵養、快適環境形成、保健・レクリエーションの機能を高める効果である³⁾。この効果は、安定化に向けた好循環いわゆるマイナスのフィードバック効果をもたらし、波及的に二酸化炭素排出削減に貢献する。

(2) 日本の森林の実状

日本は、国土の68%に当たる2,487 万haが森林であり、その内の約4 割に当たる1,032 万haが人工林である。日本の森林率は、フィンランドに次いで2 位あり、人工林面積も第4 位である。このように、日本は、現在は森林

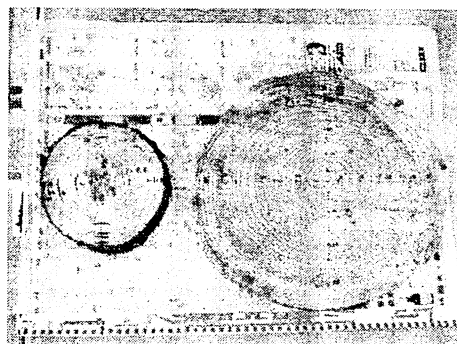


写真-1 45 年生の間伐されなかった樹木と5 年ごとに間伐された樹木の胸高位置における断面の比較 (左: 間伐無し, 右: 5 年毎に間伐を実施) (提供: 長野県井出政次氏)

国家である。しかし、日本の森林資源は江戸時代も含め1950 年代頃までは枯渇状態で、里山は禿げ山だらけで、100 年前の森林は国土の半分程度までに減少していた⁴⁾。これを受け1955 年には「木材資源利用合理化方策」が閣議決定されている。これは、枯渇していた木材資源の利用から鉄鋼やコンクリートへの転換を促すものであった。この方策により、木材資源が鉄鋼やコンクリートに代替されている半世紀の間に、国内の森林は成長を続けることができた。

図-1 は、近年における日本の森林面積と蓄積量の推移である。1966 年以降森林面積はほとんど変化がないが、蓄積量は全体では2 倍以上、人工林では約5 倍にまで成長していることがわかる。

図-2 に、2006 年時点の人工林における樹木の5 年単位毎の年齢別面積を示す。45 年前後の面積が多く、伐採期を迎えた樹木が豊富に存在している。一方で、それより若齢の面積が少ないことがわかる。さらに、これから10 年経過すると50 年を超える高齢の面積が70%程度となり、いわゆる樹木の高齢化が生じる。これを解決するには、伐採期を迎えた樹木を伐採し、植林により若い世代へ世代交代し、法正林化(成長に見合った立木を伐採植林することで、図-2 の棒の長さがどの年齢でも同じになる状態)を目指す必要がある。日本の森林は、今が伐り時なのである。

4. 土木事業における木材利用

持続可能社会の構築を目指す上で、土木事業においても木材を積極的に利用することが有効である。本章では、これからの土木資材のあり方を示し、土木事業における具体的な木材利用の一つの方法として、地盤の地下水に深で軟弱粘性土地盤対策、液状化対策、摩擦杭に木材を利用することが有効であることを示す。

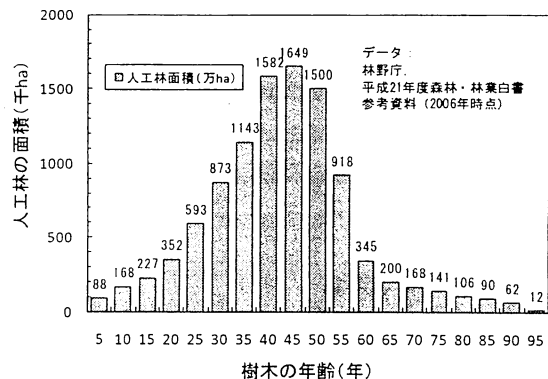
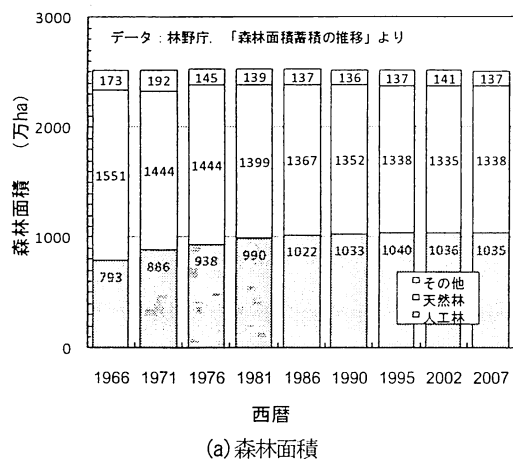


図-2 人工林の年齢別面積 (2006年時点)

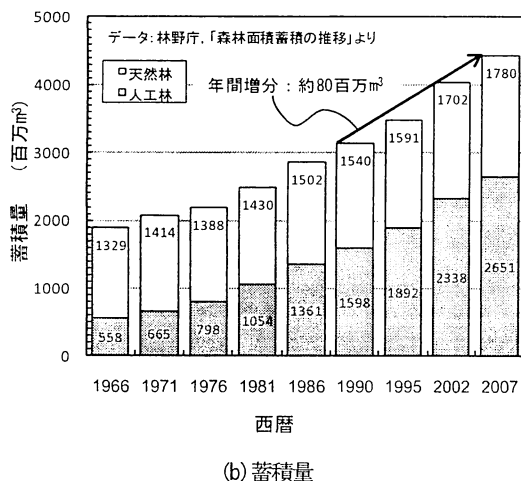


図-1 近年の日本の森林の推移

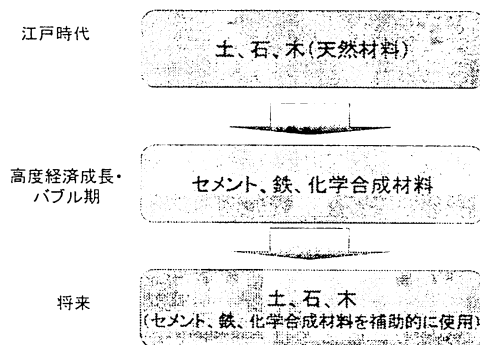


図-3 今後の土木資材のあり方

(1) これからの土木資材のあり方⁵⁾

図-3に、持続可能社会へ向けた今後の土木資材のあり方を示す。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。このため、温室効果ガス排出という問題は生じる要因がなかった。その後、高度経済成長やバブル期を経て、材料の主流はセメント・鉄・化学合成材料に移行され、経済性、合理性、効率性重視で建設が行われてきた。この間、環境的視点は欠如し、地球温暖化問題は深刻さを増し現在に至った。一方、国の施策により森林資源は豊かになり、セメント・鉄・化学合成材料や輸入木材に全てを頼らなくても国内の森林資源を使える環境が整った。そこで今後は、過去を見直し、培ってきた技術を応用しつつ、可能なものから土・石・木といった天然材料への見直しをはかるべきである。特に、木材は、建設資材として積極的に見直すべき材料である。まず、これを主体に考え、使用できない場合には、セメント・鉄・化学合成材料の使用を考えていくといった考え方が今後必要である。

(2) 土木事業における具体的な木材利用方法⁶⁾

木材は、地中の地下水位以深では腐朽せず、このような環境で使用すれば、木材の最大の欠点の一つである腐朽に対する心配が解消される。これは、腐朽菌が繁殖するためには酸素が必要であるが、地下水位以深ではこれがないためである。

具体的には、軟弱粘性土地盤対策、液状化対策、摩擦杭としての使用が有効である。このように利用すれば、同時に、燃えやすい、乾燥すると変形するといった問題も解消される。皮を剥いだだけの丸太を用いれば、乾燥工程や加工工程を経る必要がなく、製造時エネルギーの削減およびコスト削減になる。さらに、このような利用方法であれば、丸太自体の強度は重要ではなくなるので、丸太の強度のばらつきもほとんど問題にならない。また、腐朽しないので長期耐久性を有し、最大限に炭素貯蔵効果を活かすことができる。加えて、天然素材を使用するので、地下水汚染などの環境的なリスクもない。

(3) 具体的な木材利用の一例

具体的な木材利用方法として、軟弱粘性土地盤対策に木材を用いてその有効性を検証した実験事例を示す。木材利用が環境的に優位であっても、機能的に劣っていればなかなか利用されない。木材を周面摩擦杭として用い

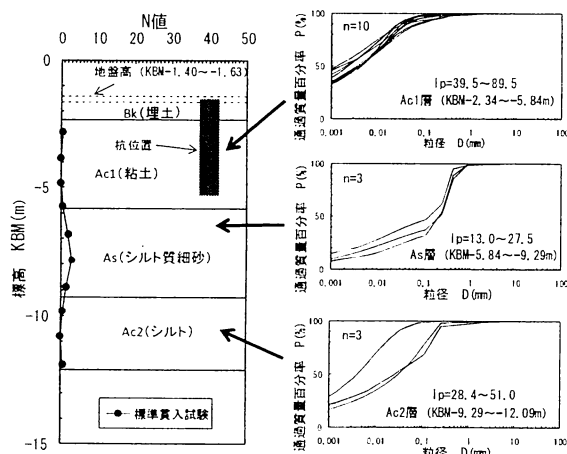


図-4 鉛直载荷試験実施地盤の土質柱状図と粒度組成

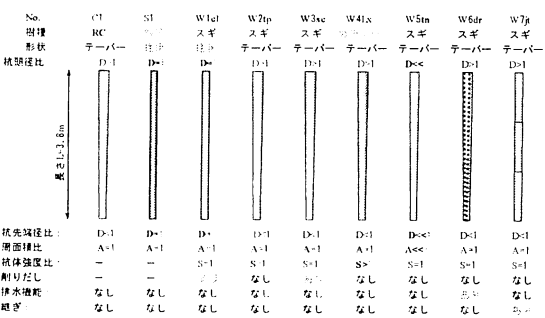


図-5 実験に用いた杭の種類と特徴

ると、木材は機能的にも有利である。

実験は、N 値がほぼ 0 の軟弱粘土地盤に種々の杭を打設し比較検討を行った。図-4 に、試験実施地盤の土質柱状図と各層の粒度組成を示す。杭打設は、N 値がほぼ 0 の埋土層と粘土の Ac1 層に圧入により貫入した。地中部における杭長は、杭先端が N 値のやや大きい As 層に届かないように 3.8m としたので、杭の支持形式は周面摩擦支持杭である。なお、粘土の Ac1 層の粘着力は、 $C=16\text{ kN/m}^2$ である (乱さない試料の一軸圧縮試験)。

図-5 に、実験に用いた杭の種類と特徴を示す。実験では 9 種類の杭を用いたが、ここでは、C1、SI、W2tp、W4Lx についてのみ示す。C1 と SI は、それぞれ RC 杭と鋼管杭 (先端部閉塞) であり、W2tp と W4Lx はそれぞれスギとカラマツの杭である。形状は、鋼管杭が直径 $D=165\text{ mm}$ の円柱状であり、その他は、末口直径が 140~159mm、元口直径が 171~195mm とテーパが付いている。ただし、周面積は、鋼管杭とほぼ同じである。スギとカラマツは、伐採後皮を剥いだだけのいわゆる丸太であり、テーパは自然形状である。

図-6 に、種々の杭の配置図を示す。現場は、 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ の杭打設ヤードを 4 面設け、それぞれのヤードには 9 種類の杭を 2m 間隔で打設した。それぞれのヤードの杭は、

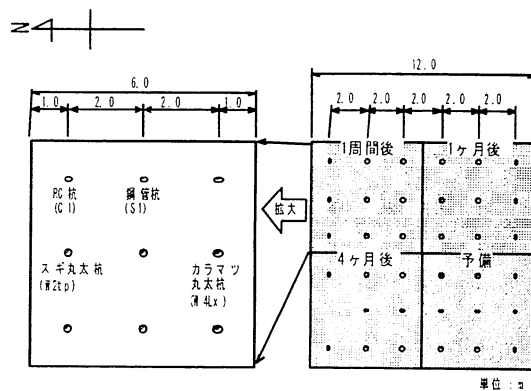


図-6 種々の杭の鉛直载荷実験杭配置図

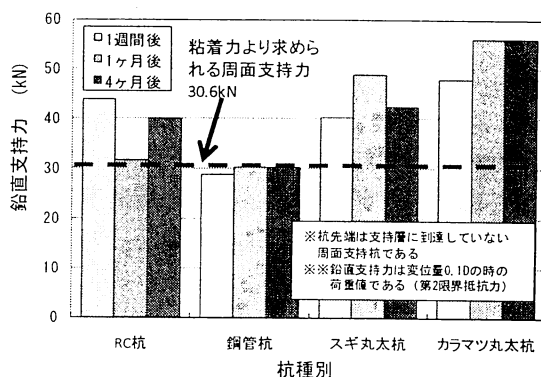


図-7 軟弱粘性土地盤に打設した種々の杭の鉛直载荷試験結果

打設後 1 週間後、1 ヶ月後、4 ヶ月後に鉛直载荷試験を実施した。

図-7 に、鉛直载荷試験結果を示す。鉛直支持力は、杭貫入量が 0.1D の時の载荷値 (第 2 限界抵抗力) である。また、図中の破線は、粘着力より計算した杭の周面摩擦力である (先端支持力は、N 値 ≈ 0 より無視した)。

スギ丸太杭とカラマツ丸太杭の鉛直支持力は、鋼管杭より大きく、RC 杭と比べて同等またはそれ以上である。このように、スギとカラマツの杭が、地盤の粘着力より求められる鉛直支持力以上支持力があるのは、木材が地盤内の水分を吸い込むとともに若干膨張することで、木材周囲の粘性土地盤を圧密し、木材周囲に強度増加した粘土層が形成されるためだと考えられる。

このように、周面摩擦杭とした時、鉛直支持力は、杭体の強度に依存されず、杭体の形状 (周面積) と、杭体と地盤との摩擦力に支配される。このため、同じ形状とした場合には、地盤と杭表面との馴染みのよい木材の方が、鋼管杭や RC 杭よりも優位となる。

5. まとめ

(1) 我々土木技術者は、人間以外の物を物質として捉える近代ヨーロッパ哲学からの転換をはかり、我々が閉じた系に存在していることを認識し、自然に対し

謙虚で高い倫理観と工学者としての良心を持つべきであることを示した。

- (2) 地球温暖化防止と林業再生に結びつくために、木材利用が必要であることを示し、これを実行する上で日本の森林が今正に伐採を行っていく絶好機であることを示した。
- (3) 今後土木事業においても、木材を主要材料と考えて行くべきことを述べ、その具体的方法として、軟弱粘性土地盤対策、液状化対策、摩擦杭などの地中の地下水以深での利用が有効であることを示した。
- (4) 実際の実験事例により、丸太打設による軟弱粘性土地盤対策が環境的に優位なばかりではなく、鉛直支持力においても鋼管杭よりも大きく、RC杭と同等またはそれ以上に大きく、機能的にも優位であることを示した。

謝辞：木杭の打設実験は、日本合板工業組合連合会による「地域材利用加速化支援事業のうち国産材原料転換技術開発事業」の助成を受け、福井工業高等専門学校吉田雅穂教授、福井県雪対策・建設技術研究所の久保光氏の指導により、兼松日産農林株式会社と昭和マテリアル株式会社との共同研究で実施したものである。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 太田猛彦：かつて地下資源は地表にあった—温暖化時代における木材利用の意味を問う—，CE 建設業界，pp.18-19，2004.4.
- 2) 外崎真理雄：環境材料としての木材，木材工業，Vol.54，No.11，pp.511-515，1999.11.
- 3) 太田猛彦：21 世紀における日本の森林と山岳地の管理について，地学雑誌，Vol.113，No.2(993)，pp.203-211,2004.
- 4) 太田猛彦：森林の変遷と現代の森林"荒廃"，水利科学，No.304（第 52 巻第 5 号），pp.1-26，2008.12.
- 5) 沼田淳紀，上杉章雄：地球温暖化対策のための木材利用の可能性について，第 14 回地球環境シンポジウム，土木学会，pp.97-102，2006.8.
- 6) 沼田淳紀，吉田雅穂，濱田政則：木材による 1964 年新潟地震における液状化対策事例，木材学会誌，Vol.55，No.5，pp.305-315，2009.