ベイマツトラス橋周辺の温湿度環境に対する長期測定結果

The results of Long-term measurement of temperature and relative humidity around truss wooden bridge with Douglas-fir glue laminated timber

○原田真樹* 加藤英雄** 井道裕史* 長尾博文** 西村健*** 藤田和彦**** 軽部正彦*****
HARADA Masaki, KATO Hideo, IDO Hirofumi, NAGAO Hirofumi, NISHIMURA Takeshi, FUJITA Kazuhiko and KARUBE Masahiko

*博(農学) 森林総合研究所構造利用研究領域 (〒305-8687 茨城県つくば市松の里1)
**農修 森林総合研究所構造利用研究領域 (〒305-8687 茨城県つくば市松の里1)
***博(農学) 森林総合研究所木材改質研究領域 (〒305-8687 茨城県つくば市松の里1)
**** 広島県立総合技術研究所林業技術センター (〒728-0015 広島県三次市十日市東4-6-1)
*****博(工学) 森林総合研究所構造利用研究領域 (〒305-8687 茨城県つくば市松の里1)

ABSTRACT Air temperature and relative humidity around a wooden truss bridge were measured for about 15 months, and tendencies of these data were studied. As a result, the temperature and the relative humidity showed a seasonal cyclic variation. The evaluation of the deterioration was carried out by using the obtained temperature and relative humidity data. The adopted indexes were Equilibrium Moisture Content (EMC) and Fungal Index (FI). The deterioration environmental evaluation using the calculated EMC of members was tried. As a result, the surrounding of the girder was shown being deteriorated in summer. This result is useful also for the decision of the diagnosis schedule.

Keywords : 気温、相対湿度、平衡含水率、ベイマツ、劣化外力
Air temperature, Relative humidity, Equilibrium moisture content, *Douglas fir*, Environmental deterioration factor

1. はじめに

木橋あるいはその他の木質構造物において、その強度的性能を低下させる劣化要因として菌類（腐朽菌）が挙げられる。木橋の維持管理において、この腐朽菌の発生を早期に発見できれば、メンテナンスのコスト削減やメンテナンス計画策定の効率化につながると考えられる。

現段階での維持管理においては、腐朽の発生に関わる診断は、目視点検で異常の発見された箇所におけるサンプリングとその培養、もしくは腐朽菌同定試薬での判定が基本であり[1)]、腐朽発生箇所の予測に関する手法は実用化しているとはいえない。

ここで、腐朽菌の発生・生育進展に不可欠な要素として、酸素・栄養・水分の3点が挙げられている[2)]。、このうち水分については、木材中の自由水が主な供給源とされ、繊維飽和点（含水率約28%）以下の、結合水のみが存在する環境下では、原則として腐朽菌の生長は難しいとされている[2)]。従って、腐朽菌の発生あるいは進展の予測には、部材含水率の定期計測が有力な手段である。しかしながら、現時点では、木質材料の含水率を効率的に多点同時に計測する手法は広く一般に普及しているとは言い難い。

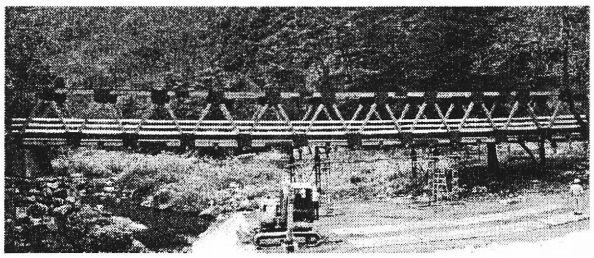
本研究は、部材含水率に影響を与える因子として構造物周辺の温湿度環境を取り上げ、実際の架橋時の3日間および再架設後の約15ヶ月間、対象橋梁の5カ所（再架設後は7カ所）で測定した温湿度の測定結果とその傾向を評価すると共に、温湿度と部材含水率とを関連づけることによる腐朽発生の可能性を予測する手法を提案するものである。

2. 対象橋梁および試験方法

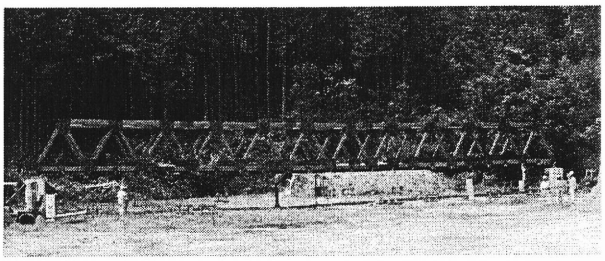
2.1 対象橋梁

気温および相対湿度を測定した橋梁は、広島県立山野峡自然公園（広島県福山市山野町）内に1990年5月から2003年12月まで13年間に亘って供与されたベイマツ集成材を主要構造材とする木造下路式単純トラス橋「かっぱ橋」である。同橋は、解体後、広島県立総合技術研究所 林業技術センター内に2007年3月から載荷破壊試験の行われた2008年6月まで再架設されていた。

上記公園における架橋時（以下、架橋時と称する）の環境については、橋梁の下に高梁川水系小田川が流れていた。一方（公園入口側）の支承周辺には植生が繁茂しており、他方の支承は川の中州上に設置されていた（写真－1）。橋長方向はほぼ北東であり、上流側のトラス面が南東、下流側のトラス面が北西向きであった。一方、センター内への再架設時（以下、再架設時）の場合、橋梁の下はほぼ裸地であり水分発生源は存在しなかった（写真－2）。橋長方向はおよそ北西であり、上流側のトラス面が南西、下流側のトラス面が北東向きであった。支承近傍に植生の分布はなく、架橋時の上流側トラスの後方が林地であった。また、季節により橋梁全体を覆う霧が発生することがあった。



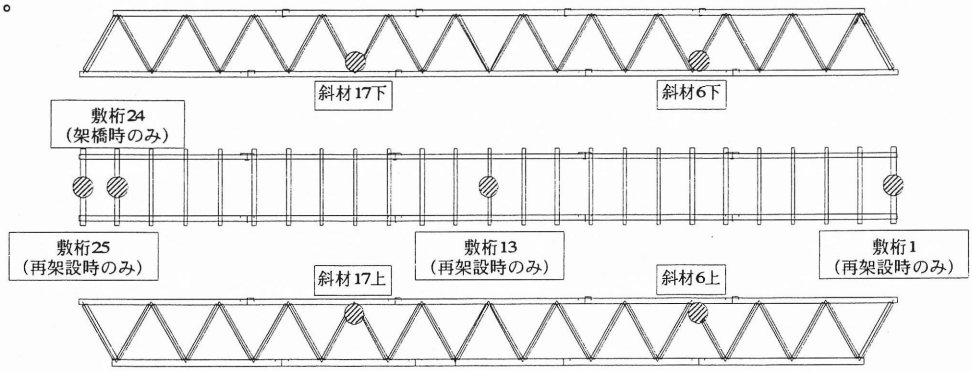
写真－1　対象橋梁概観（架橋時）



写真－2　対象橋梁概観（再架設時）

2.2 温湿度測定

対象橋梁の斜材と下弦材との交点付近および敷桁に温湿度ロガー（架橋時：マイクロテクノ株式会社 TH-101あるいはOnset社 HOBOPro H08-032-08、再架設時：Onset社 HOBOProv2 U23-001）をビスで固定し、温湿度を測定した。測定箇所は、架橋時については5カ所、再架設時については7カ所とした（図－1）。測定期間は、架橋時については2003年12月8日 9:00～同月10日 16:00（測定間隔：2分）、再架設時については2007年3月27日 9:00～2008年6月17日 17:20（測定間隔：20分）であった。



図－1　温湿度ロガー設置位置

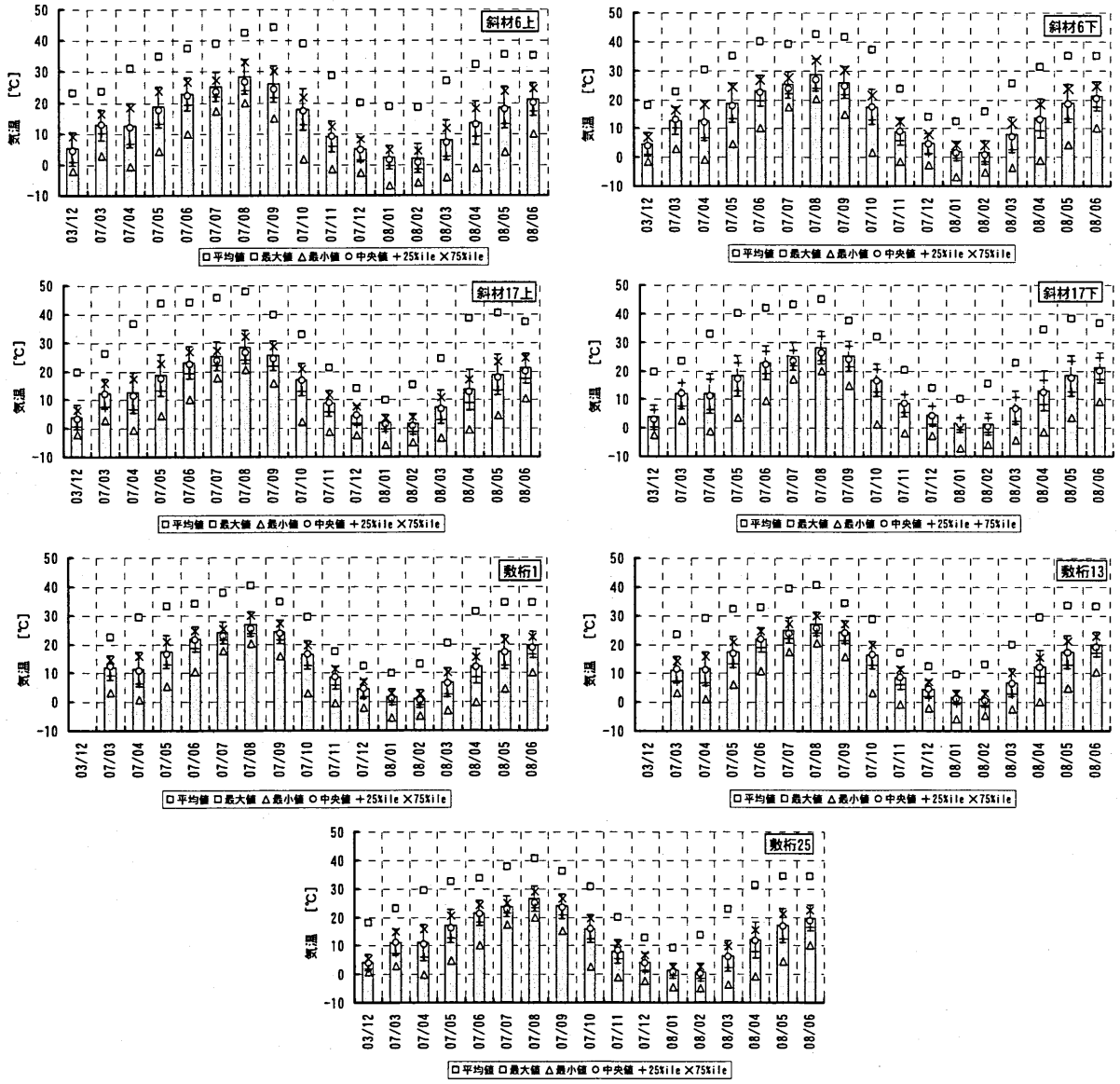
使用した温湿度ロガーは何れも、測定開始前にPCに接続して内蔵時計および測定間隔の設定を行い、現場へ設置した。設置後、温湿度測定データは内蔵メモリに蓄積されるため、メモリ容量（下記参照）が一杯になる前にPCに接続（TH-101、HOBOPro H08）するか、データ回収用の専用機器（Onset社 ウォータープルーフシャトル U-DTW-1）によりデータを回収した。各ロガーのメモリ容量は、TH-101については8000点（測定間隔2分で約266時間）、HOBO Pro H08については

21,763点（測定間隔2分で725時間）、そして、HOBO Prov2の場合約21000点（測定間隔20分で7000時間）である。また、バッテリの寿命は、TH-101については約3ヶ月、HOBO ProおよびHOBO Prov2については約3年（何れもマニュアルによる公称値）である。なお、屋外における温湿度測定では、相対湿度が100%RHになることがしばしばあるため、温湿度ロガーの選定にあたっては、湿度センサーの測定範囲が0～100%RHと明記されているものにすることが望ましい。

3. 結果および考察

3.1 架橋時および再架設時における気温および相対湿度の分布性状

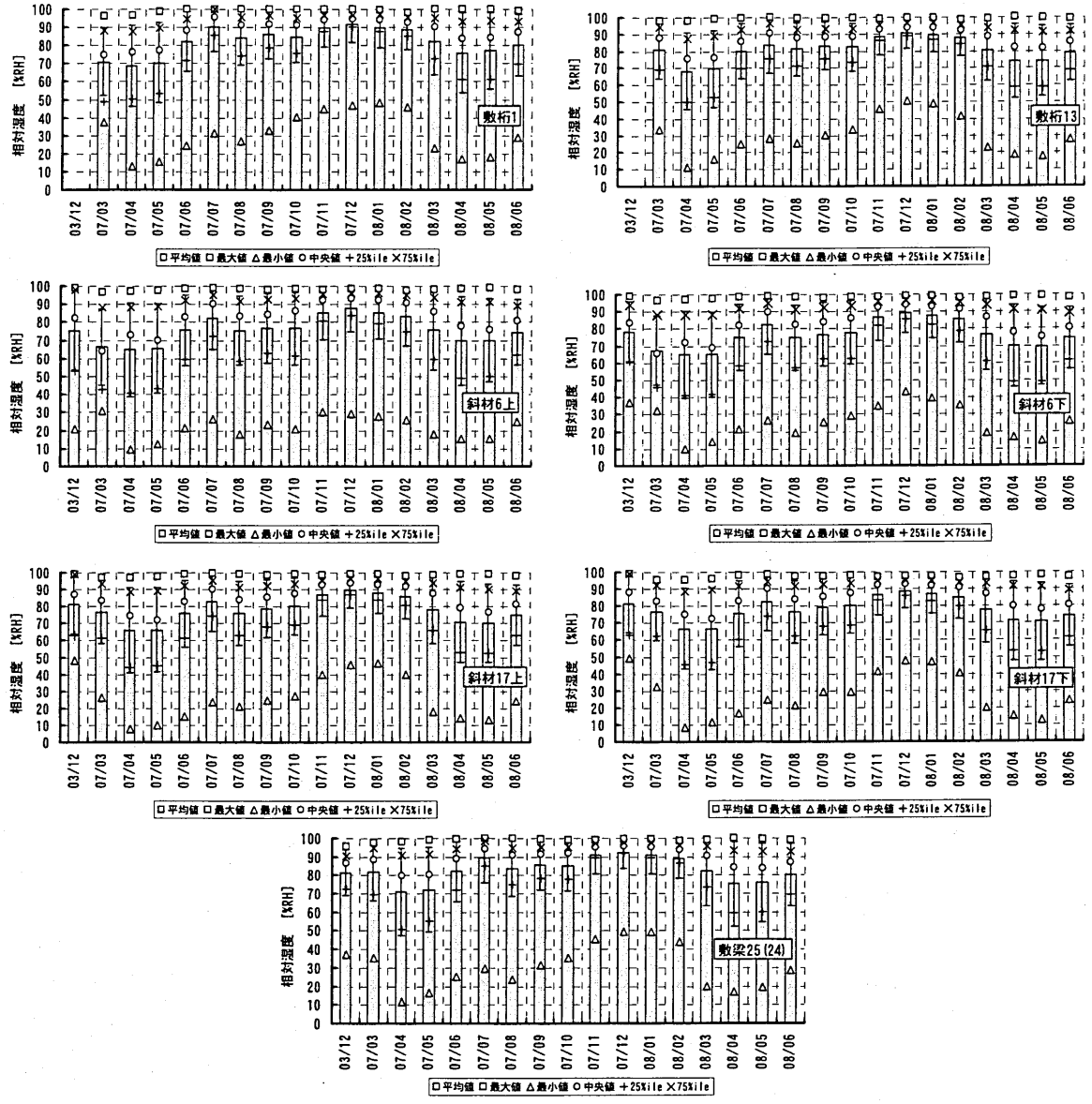
架橋時および架設時における気温および相対湿度について、各月の統計値を測定場所毎に示す（図－2、図－3）。図において、縦棒が月平均値、□および△が各月の最大値および最小値、○が中央値、＋が第1四分位数（25パーセンタイル値）、×が第3四分位数（75パーセンタイル値）、縦棒上端を中心とするバーが標準偏差を示している。



図－2　各測定部位における気温の月別統計量

まず、気温については、8月に最高、2月に最低を示す年周期を示した。月平均最高気温は28.516℃、同最低気温は0.699℃（較差＝28.817℃）であった。なお、周期的な変動傾向について、測定場所

による差異は認められなかった。次に、相対湿度については、12月に最大値、7月に極大値、そして、4月に最小値となる周期的変動を示した。月平均値の最大値は92.489%RH、最小値は64.633%RH（較差＝27.856%RH）であった。測定場所による周期変動の差異は認められなかった。また、架橋時の2003年12月と再架設時の2007年12月とを比較すると、両者の間に明確な違いは認められなかった。すなわち、架橋場所の移動による大きな気候上の変化は無かったものと推定される。



図－3　各測定部位における相対湿度の月別統計量

3.2 部材含水率の推定およびその分布性状

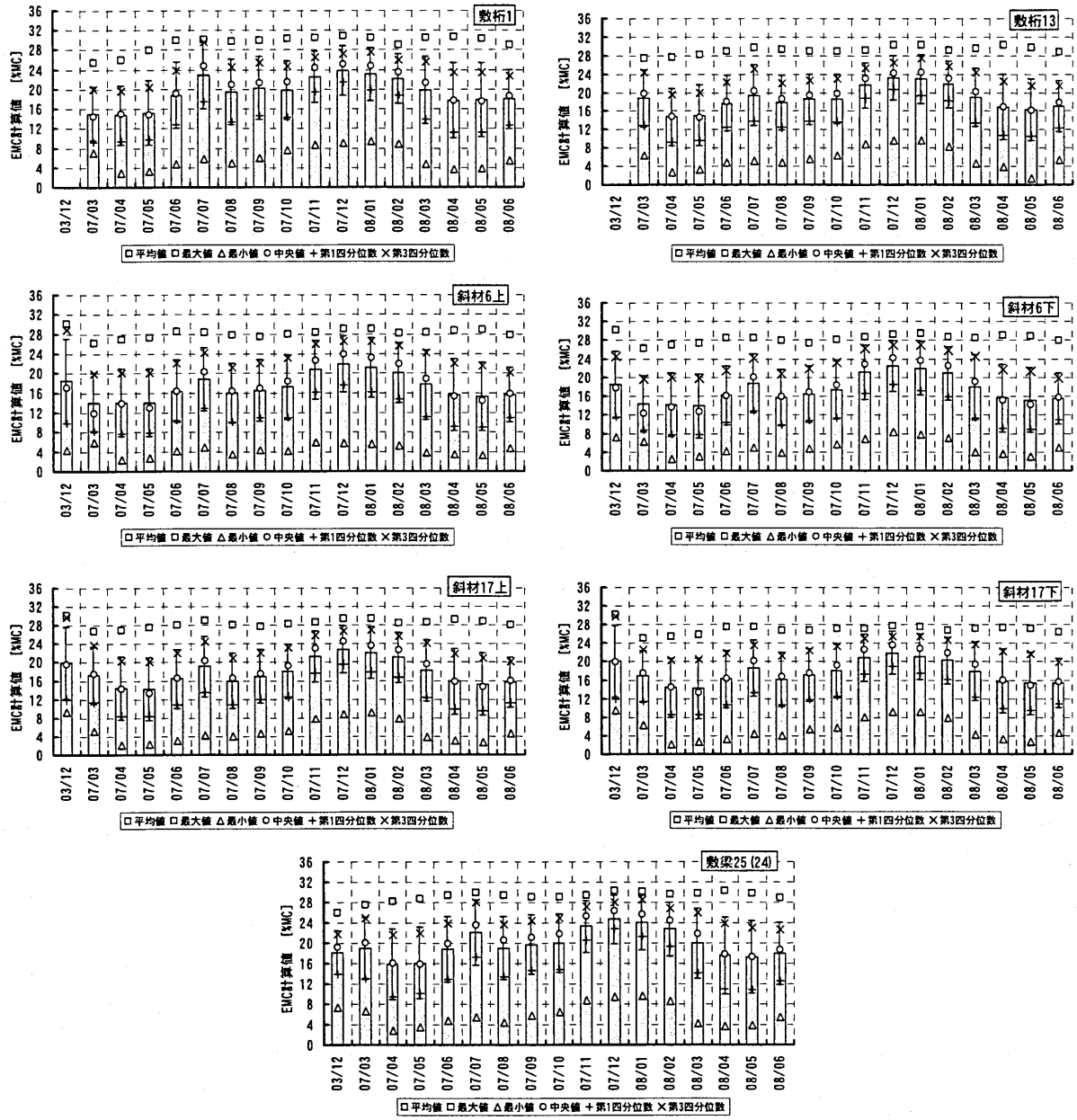
齋藤は、温度および相対湿度のデータから平衡含水率を求める式として下記の式を提案している[3)]。

$$Z = \frac{a + bx + cx^2 + dy + ey^2 + fy^3}{1 + gx + hy + iy^2 + jy^3} \qquad \text{（式－1）}$$

ただし、Z：平衡含水率(%)、x：温度(℃)$(-10 \le x \le 30)$ 、y：相対湿度（$0 \le y \le 100$）

$a = 1.33, b = -8.27\times10^{-3}, c = 6.40\times10^{-5}, d = 1.10\times10^{-1}, e = -2.28\times10^{-3}, f = 1.47\times10^{-5},$
$g = -1.16\times10^{-5}, h = -1.16\times10^{-5}, i = 2.54\times10^{-4}, j = -9.85\times10^{-7}$

上式は、日本国内の任意の地点における平均気温および平均相対湿度から、その地点における木材の平衡含水率を推定するための式である。すなわち、上式の根拠となっている平衡含水率推定曲線は、任意の気温および相対湿度の雰囲気中に一定期間以上置かれた木材の平衡含水率を示したものであり、各時刻における温湿度データから含水率を計算することは、本来の使い方ではない。しかしここで、ある一定期間の温湿度条件に対して出現する平衡含水率の分布は、各時刻のデータから上式を用いて計算される計算値の分布で近似できると考えられる。従って、本研究では、一定期間における上式の計算結果の統計値を測定箇所近傍の部材含水率推定値として用いることとした。式－1 から計算される部材含水率について、測定場所別に月ごとの集計結果を図－4 に示す。

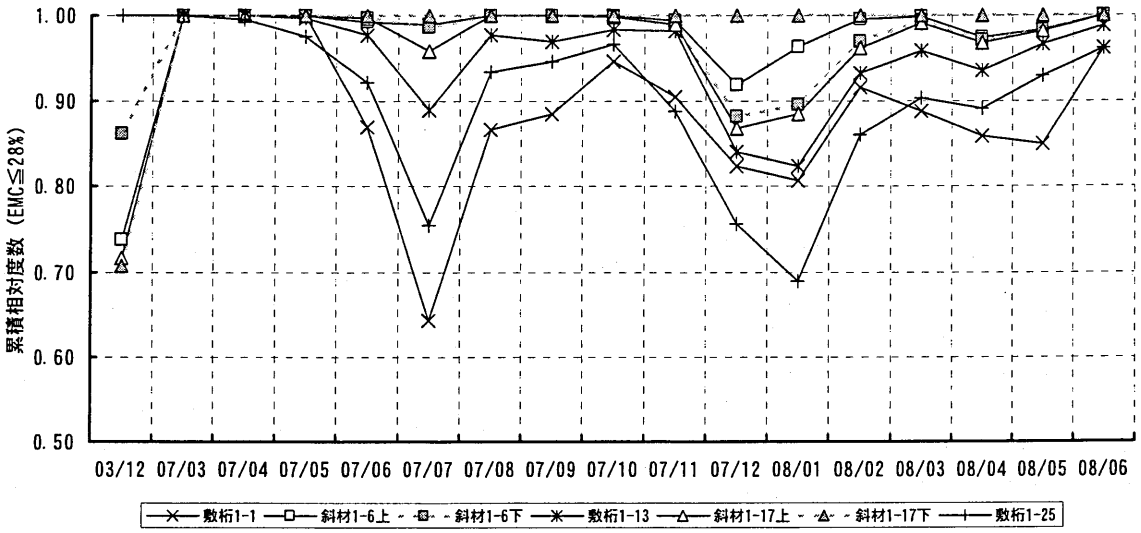


図－4　部材含水率推定値の計算結果（測定場所および月別）

概観すると、12月に最大、5月に最小のピークを示す緩やかな周期的変化を示した。この変化について、測定場所による違いは認められなかった。各月平均値の最大値は24.6%MC、最小値は13.9%MC（較差＝10.7%MC）であった。

3.3 劣化発生・進展指標への適用

前節で求めた平衡含水率推定値の相対累積度数分布から、繊維飽和点（約 28%）以下のデータの割合を図－5 に示す。図の縦軸は EMC 計算値が 28%以下の累積相対度数であるため、数値が小さいほど繊維飽和点以上の含水率が推定されたデータ多かったことになり、劣化しやすい環境であったと判定される。



図－5　EMC≦10%の累積相対度数

斜材（□および△）は 90%以上のデータが繊維飽和点以下であったのに対し、敷桁は 7 月と 1 月に累積相対度数が低くなり、含水率の高いデータが多くなった。年間を通しての値の変化に周期性はなかった。敷桁において夏および冬に劣化しやすい環境となっていたことが分かった。従って、定期的な診断を、夏の後半から秋にかけてと冬の終わりから春にかけて、敷桁を重点的に行うと良いことが示唆された。

ここで、これまでに提案されている劣化に関する判定手法について比較検討する。気温および相対湿度を用いた木質構造物の劣化評価に関する既存の手法として、「建築物・部材・材料の耐久設計手法」における劣化外力係数（木造建築・腐朽菌の生育係数）[4]と鈴木らによる腐朽指数[5),6)]がある。まず、前者である腐朽菌生育係数は気温 15℃以上の累積時間が 5900 時間より大きい場合に係数を 1 未満の危険と判定している。また、後者の腐朽指数は、好乾性カビ（*Eurotium herbariorum*）の菌糸生長量を基準気候下における同量の生長時間に対応させた数値[7)]であり、この数値が大きいほど菌糸が生長しやすい環境であることを示す指標である。鈴木らはこの指標の計算式として、気温および相対湿度を変数とする下記の式を提案している。

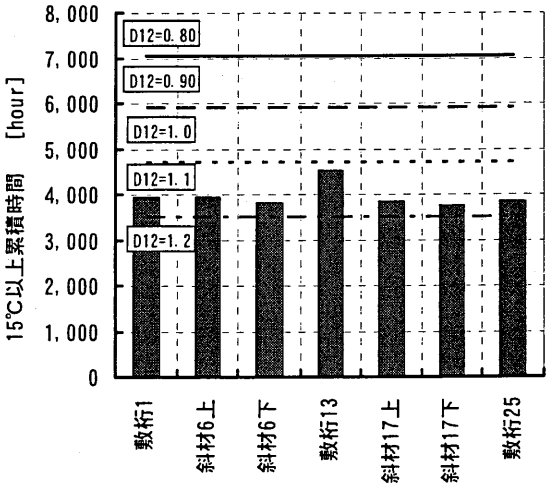
$$FI(h,t) = 187.25\exp\left\{\left(x^2 - 2axy + y^2\right)\cdot b/\left(2a^2 - 2\right)\right\} - 8.25 \quad \text{（式－2）}$$

ここで、h：相対湿度、T：温度（℃）、
$x = (h - c_1)/c_2$、$y = (T - c_3)/c_4$、
$a = -0.3, b = 0.685, c_1 = 0.95,$
$c_2 = 0.07, c_3 = 25, c_4 = 7.2$

適用範囲：相対湿度 0.6～1.0、温度 0～40℃

本研究で得られたデータを用いて腐朽菌生育係数を求めた。ここでは、15℃以上であったデータをカウントし、これに測定間隔を乗じたものの総計を累積時間とした。測定部位別の腐朽菌生育係数の結果を図－6 に示す。

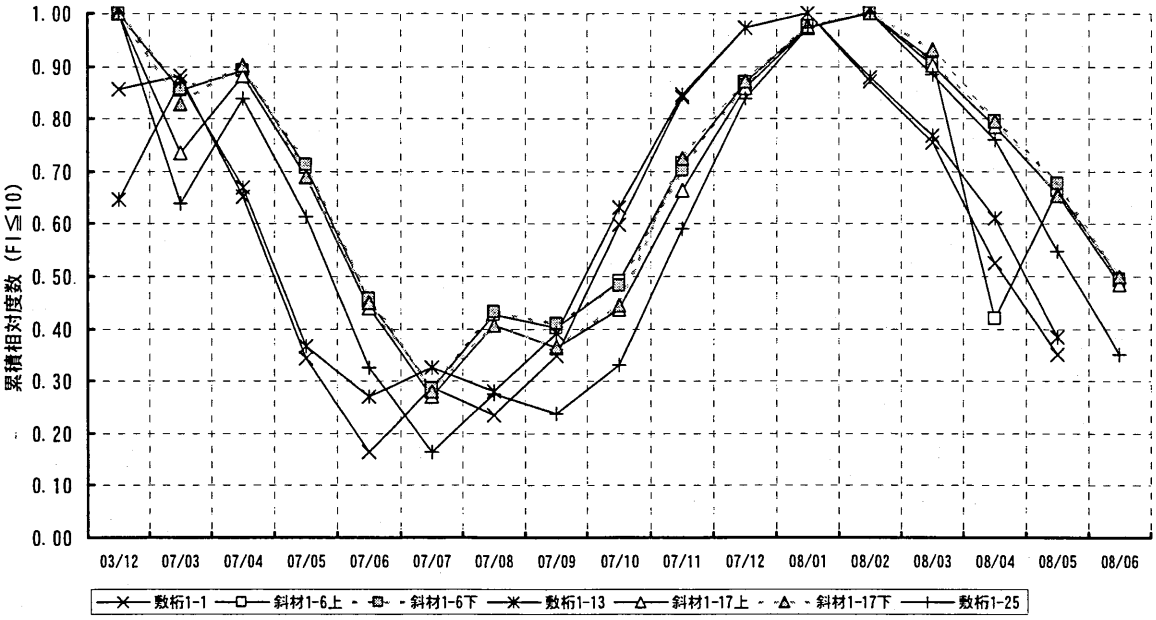
約 16 ヶ月間の測定期間の範囲では、15℃以上の累積時間は5900時間に達することはなかった。



図－6　腐朽菌生育係数の計算値

ただし、例えば、最大値（4534 時間）を示した中央部の敷桁（No.13）の場合、この傾向が維持されるならば、6 ヶ月後には 5900 時間を越えて係数が 1 以下となることが推定される。従って、この時期に重点的な点検を行うであろう。

また、腐朽指数の計算値については、測定場所および月ごとに集計した結果について、10 以下における累積相対度数を図－7 に示す。



図－7　腐朽指数10以下である累積相対度数

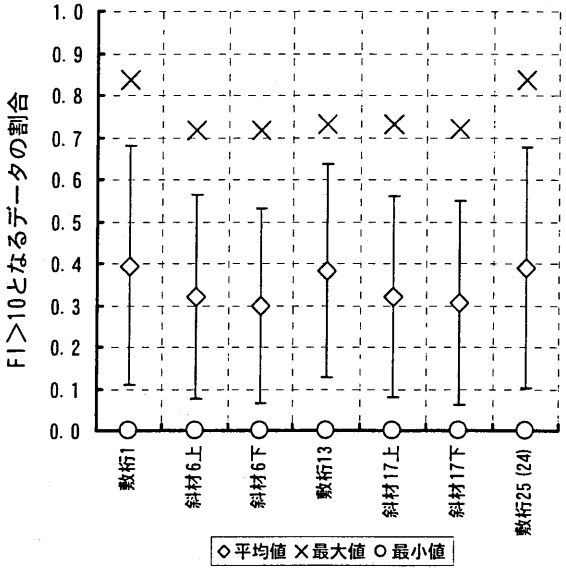
ここで、腐朽指数=10とは、測定環境 1 週間あたりの菌糸長が基準気候下（25℃、92.4%RHまたは93.6%RH）における標準菌の生長量の10時間分に相当することを示している[7]。ちなみに、集合住宅（神奈川県伊勢原市）1 戸内での測定結果（測定期間：1991/10/1から1週間）では、北側の外壁に面した室内のコーナー部（床上30cm）で最大値26を示した[7]。なお、図の縦軸は10以下の累積相対度数であるため、値が小さいほど腐朽指数の大きいデータの占める割合が大き位こととなり、劣化しやすい環境であったと判定される。図－7については、全体の傾向として、腐朽指数≦10のデータが占める割合は、夏に少なく、冬に多くなる周期的な変化を示し、対象橋梁は夏場に最も劣化しやすく、冬に最も劣化しにくい環境下にあったと判定された。従って、この橋梁については、定期診断を夏の終わりに行うと有効であると考えられる。

3. 4 全期間にわたるデータを用いた劣化危険度判定

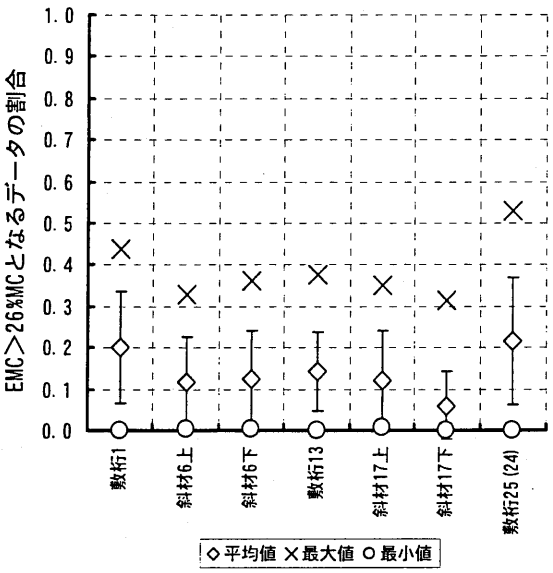
測定場所による劣化環境の違いを検討するため、全期間のデータを用いて劣化判定を行った。判定に用いた指標は、腐朽指数（FI）および平衡含水率（EMC）であり、測定場所毎に、腐朽指数が10より大きくなるデータの割合（累積相対度数）とEMC＞26%となるデータの割合を計算した。結果を図－8および図－9に示す。図において、◇は全期間の累積相対度数の平均値、×は最大値、○は最小値、◇の上下に伸びる縦棒は標準偏差を示す。

腐朽指数の結果を見ると、敷桁に対する平均値が斜材の平均値よりも大きくなっており、敷桁は斜材と比較して相対的に劣化しやすい環境下にあったと判定された。

平衡含水率の結果を見ると、支承部の敷桁（No.1およびNo.25）について高い含水率の出現頻度が高く、相対的に劣化しやすい環境下にあったと判定された。逆に、斜材（No.17・上流側）は高含水率の出現頻度が低く、相対的に劣化しにくい環境であったと判定された。



図－8　FI>10となるデータの累積相対度数
（測定場所別）



図－9　EMC>26となるデータの累積相対度数
（測定場所別）

4. まとめ

広島県内に架設された下路式単純トラス橋について、7カ所の温湿度を約15ヶ月間測定し、その傾向について考察した。また、得られた温湿度データを用いて劣化発生・進展に資する指標値を求めた。求めた指標は腐朽指数（FI）および平衡含水率（EMC）である。結果を要約すると以下の通りである。

①気温及び湿度は、季節的な変動を示した。測定場所による大きな違いは認められなかった。

②温湿度データから部材の平衡含水率を計算し、測定場所近傍の劣化環境評価を試みた。その結果、敷桁部分周辺が夏場においてより劣化しやすい環境となることが示され、判定の対象となる期間を調整することによって、診断スケジュールの策定にも役立つことが示された。

③既存の手法である腐朽指数および腐朽菌生育係数による判定結果は、平衡含水率を用いた方法の結果とほぼ同じであり、敷桁近傍の環境がより劣化しやすかったと判定された。

本研究は、森林総合研究所運営費交付金プロジェクト（課題番号：200702）によって行った。

参考文献

1) (社)日本木材保存協会住宅生物劣化診断部会編：“実務者のための住宅の腐朽・虫害の診断マニュアル 改訂版”、pp.135-145、(社)日本木材保存協会、2007.
2) (社)日本木材保存協会編：“木材保存学入門　改訂2版”、pp.42-44、(社)日本木材保存協会、2005.
3) 齋藤周逸：気象データによる日本国内の平衡含水率、第56回日本木材学会大会研究発表要旨集（CD-ROM）、PF707、2006.
4) (社)日本建築学会編：“建築物・部材・材料の耐久設計手法・同解説”、p.68、丸善（東京）、2003.
5) (社)日本建築学会 材料施工委員会 耐久保全運営委員会：“建築物・部材・材料の耐用年数予測手法に関するシンポジウム”、p.44、(社)日本建築学会、2007.
6) H. Suzuki et al: Development on Damage Functions of Wood Decay for Building Envelope Design, IRG/WP05, 2005.
7) 阿部恵子：好乾性カビをバイオセンサーとする室内環境評価法、日本防菌防黴学会誌、pp.557-565、1993.