年輪解析による震災が樹木の成長に与える影響評価

Assesment for Earthquake Disaster on Growth of Trees by Dendrochronological Method

中村彰宏* 森本幸裕*

Akihiro NAKAMURA Yukihiro MORIMOTO

摘要：阪神・淡路大震災の液状化、火災の影響が樹木の成長に与える影響を、年輪解析から明らかにした。成長錐で被災した神戸市内に生育する樹木の、また震災の影響のなかった大阪府堺市に生育する同一樹種のコアサンプルを採取し、年輪幅の比較を行った。その結果、液状化の生じた場所に生育するクスノキ、クロマツ、アキニレには、液状化による長期的な成長量低下の影響はなかった。また火災によって被災したクスノキには肥大成長量低下がみられたが、ケヤキにはみられなかった。しかし被災の翌年に成長量の低下した樹木も、2年後から成長量の増加がみられ、震災の影響は短期的であったと考えられた。

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、家屋やビル、また上下水道や電気、ガスなどの生活基盤施設、高速道路などの交通インフラ施設に多大な被害を与え、都市機能を麻痺させた。一方、地震が樹木に与えた直接的な影響は、空洞化していた枝や幹を折損しただけであることが震災後の緊急調査¹⁾によって明らかにされている。植栽基盤の崩壊や家屋等の倒壊によって樹木は二次的な被害を受けたが、反対に樹木によって家屋やブロック塀などの倒壊が防止されたことも確認されている。また公園に植栽され被害のなかった樹木は、テントや物干し台の支えとして、照明器具やブレーカーが設置され電柱代わりとしても利用された。その他に、ツル植物によるモルタルや瓦などの落下防止、樹木による火災での延焼防止効果についても明らかにされている。火災によって被災した樹木については、赤外線ビデオを用いたアラカン樹冠面の活力度評価¹⁾、大国公園・新長田公園の震災から1年半後のクスノキ、ケヤキなどの回復状況²⁾、樹木の燃焼度と火元距離との関係⁸⁾などが、液状化によって被災した樹木については、埋め立て地で震災直後の葉の展開などへの短期的な影響評価²⁰⁾が報告されている。

火災が樹木の成長に与える影響評価に関しては、林野火災の多く発生するアメリカ、カナダ、オーストラリアなどで様々な研究が行われ、日本では他国ではみられない防火樹の研究が古くから行われていることが紹介されている⁴⁾。欧米ではかつて、森林での火災を完全に排除する考えが、可燃物の減少、病害虫管理、自然植生の保全のため自然火や火入れを受け入れる考え方に变化した。それゆえ人工的な火入れによって植生管理がなされるようになり、火入れや自然火の影響を受けた樹木の処理判断基準の作成のため、欧米で火災が樹木の生育に与える影響評価に関する様々な研究が行われ²⁾、日本では、人工林での山火事による被害木の再生の可能性³⁾、材質変化⁷⁾についての研究が行われている。しかし、都市域での被災木に関しては、関東大震災後の樹木の被害状況とその回復力¹⁰⁾¹⁹⁾についての報告があるのみである。

アメリカの気象学者、A. E. Douglassによって20世紀初頭に案出された¹³⁾年輪年代学の解析手法は、樹木の生育する自然環境評価などの年輪気候学で、また建築物や遺跡から出土した木材の年輪幅計測による伐採年の決定するために考古学で利用されている¹³⁾。またブナの年輪幅と結実豊作とエル・ニーニョの関係

について¹⁵⁾、針葉樹の年輪指数と前年および当年の季節毎の平均気温、降水量、日照時間、年間積雪日数などの気象要素を用いた重回帰分析による大気汚染の影響評価¹⁾があり、幅広い分野で年輪年代学は利用されている。

そこで本研究は、今後の都市災害発生時の被災木の処理、管理方法決定のためのデータ蓄積を目的として、阪神・淡路大震災で生じた火災および液状化が樹木の生育に与える影響について、年輪解析から定量的評価を試みた。

2. 調査地と調査方法

(1) 調査地

阪神・淡路大震災で発生した液状化および火災の影響を受けた神戸市内の4カ所の公園を調査地とした。液状化の影響を受けたと考えられる神戸市東灘区中央区ポートアイランド南公園、火災の影響を受けた長田区御蔵公園、水笠西公園、大国公園の3地点の計4地点(図-1)が被災地の調査地である。そして震災の影響のない大阪府堺市の大阪府立大学構内を対照区とした。各調査地点に植栽された、クスノキ、クロマツ、ケヤキ、アキニレを調査対象木とした。表-1に調査地および災害の種類、測定樹種、測定本数、平均樹高、平均胸高直径を示す。測定は原則として孤

表-1 調査地と測定樹種

	調査地	樹種	災害種	本数	平均樹高(m)	平均胸高直径(cm)
被災区	神戸市長田区 御蔵公園	クスノキ	火災	2	7.9	42.5
	長田区 大国公園	クスノキ	火災	6	7.2	24.1
	長田区 水笠西公園	ケヤキ	火災	2	7.8	23.5
		クスノキ	液状化	3	7.3	29.6
	中央区 ポートアイランド南公園	クロマツ	液状化	3	7.9	21.9
		アキニレ	液状化	3	8.2	21.4
対照区	大阪府堺市 大阪府立大学	クスノキ	なし	3	8.3	27.5
		ケヤキ	なし	3	10.4	29.2
		クロマツ	なし	6	14.1	35.2
		アキニレ	なし	2	8.7	18.9

図-1 調査地点

*大阪府立大学農学部地域環境科学科

立木を対象に行い、孤立木が存在しない場合には、群落内の樹冠上部に位置する優勢木を対象とした。測定木の樹高は5.9mから16.3mの範囲であった。なお御蔵公園のクスノキは被災後に剪定されたため、胸高直径に比べ樹高が小さい。

(2) 調査方法

年輪測定用のコアサンプルは、各調査区に生育する樹木の樹幹から成長錐を用いて採取した。採取部位は高さおよそ1mで枝の存在しない部分とした。火災の被害を受けた樹木については、サンプル採取の方向が限定されるため、樹木1個体につき3方向で採取した。神戸市内のサンプル採取は、1997年11月8日、1998年8月30日、1998年10月19日に、対照区の大阪府立大学構内では、1997年11月から1998年12月にかけて行った。樹木の樹高、胸高直径は1998年10月に測定した。ただし水笠西公園のケヤキのみ、1997年11月8日のデータである。火災によって被災した御蔵公園、大園公園のクスノキについては、およそ20cmの高度毎に幹周長と形成層が焼け焦げて焼死した部位の長さの計測を1998年10月19日に行った。なお、測定時は被災から3年半以上が経過しており、巻き込みのために焼け焦げた部分が減少していると考えられるが、補正等を行わず測定値をそのまま用いた。採取したコアサンプルは、カッターおよび剃刀で表面をなめらかにした後、実体顕微鏡と目盛り付き移動標本台で年輪幅を0.001mmの単位で測定した。そして採取した3方向の平均値を年輪幅として解析に用いた。しかし、偽年輪や節の影響があるものは計測せず、場所によっては2方向の平均値を利用した個体もある。

3. 結果と考察

(1) 年輪幅変動の特徴

まず図-2にポートアイランド南公園に植栽されたクスノキの年輪幅の変動を示す。3方向での年輪幅の絶対値は異なるが、変動パターンはおおむね同じ傾向であり、3方向での平均化が問題ないと考えられる。変動傾向は、1976年には10mm近くの年輪幅が、1981年から1988年までは1mm以下と低下している。この頃に移植によって肥大成長量が減少し、1989年から再び成長が回復されてきたことが示されている。年輪解析には通常、天然木や植栽から長い年月の経過した樹木が用いられ、部位や個体間の差を除去するために年輪幅変動に移動平均や、多項式、指数式、スプライン関数などの傾向線をあてはめてる方法で規準化がなされる²¹⁾。しかし、本研究では移植や震災といった非連続的なイベントが発生しており、傾向線によるあてはめを行うことは不適切と判断し、規準化を行わなかった。

図-2 ポートアイランド南公園のクスノキの年輪幅変動

図-3 大阪管区気象台の年降水量(上段)と年平均気温(下段)
(図中の矢印は、上段：干害、下段：冷害の発生した年)

(2) 平均温度および年降水量の変動

図-3に神戸市から30km、堺市から13km離れた大阪管区気象台の年降水量、年平均気温の変化を示す。なお理科年表に記載された近畿地方での干害と冷害の発生年もあわせて図示した。最近では、1993年に冷害、翌1994年には干害・酷暑、そして1995年に阪神・淡路大震災が発生した。この3年間は、特徴的な気象状況および震災の影響が発生している可能性があり、1993年から1995年にかけての年輪幅変動を中心として以下に考察を行った。

(3) 液状化が樹木の年輪幅変動に与える影響

図-4上段に震災の影響を受けなかった大阪府立大学構内の対照区での、下段には液状化が生じたポートアイランド南公園でのクスノキの年輪幅変動を示す。両調査区のすべての樹木で、干害の1994年には、冷害の1993年の年輪幅変動よりも小さい。そしてポートアイランドの1本を除いたすべての樹木の1995年の年輪幅は1994年よりも大きかった。また震災前後の肥大成長量の比較のため、震災前の1992年から1994年の3年間の平均年輪幅と、震災後の1995年から1997年の3年間の平均年輪幅の比率、1995、1996、1997各年の年輪幅と震災前3年間の平均年輪幅の比率を表-2に示す。対照区およびポートアイランドの震災前後の年輪幅の比率はともに1前後であった。図-5に気象官署で測定された1992年から1997年までの神戸と堺、そして図-3に示した大阪の年平均気温、年降水量、年積算日照時間を示す。いずれの地点も瀬戸内海気候地域に属し、距離も短いこともあり、植物の生育に大きな影響を与えられと考えられるこの3項目の気象要素は大差ないことがわかる。それゆえ、神戸と堺において1992年から1997年までの樹木の肥大成長量は、気象要素の差による影響はほとんど受けていないと考えられ、震災前後の年輪幅比率がほぼ同じであるため、液状化がクスノキの成長に与えた影響はほとんどなかったと推測される。

図-6、7の上段には対照区、下段にはポートアイランド南公

図-4 クスノキの年輪幅変動
(上段：対照区、下段：液状化の被災区)

図-5 神戸と堺、大阪の1992年から1997年までの年間の平均気温、降水量、日照時間の関係

表-2 震災前後の年輪幅の比率

樹種	処理区	調査地	本数	比率(3年間)	比率(95年)	比率(96年)	比率(97年)
クスノキ	対照区	大阪府大	3	1.53	1.22	1.51	1.88
	液状化	ポートアイランド南公園	3	0.99	1.14	0.79	1.03
	火災	御蔵公園	2	0.51	0.19	0.57	0.76
	火災	大園公園	8	0.60	0.56	0.55	0.69
クロマツ	対照区	大阪府大	6	0.91	0.75	0.89	1.08
	液状化	ポートアイランド南公園	3	0.85	0.41	0.89	1.25
ケヤキ	対照区	大阪府大	3	0.95	0.85	0.98	1.02
	火災	水笠西公園	2	1.22	1.05	1.12	1.46
アキニレ	対照区	大阪府大	2	0.80	0.99	0.88	0.52
	液状化	ポートアイランド南公園	3	0.82	0.60	0.89	1.19

比率(3年間)：震災後3年間の平均年輪幅／震災前3年間の平均年輪幅
比率(95年)：95年の年輪幅／震災前3年間の平均年輪幅
比率(96年)：96年の年輪幅／震災前3年間の平均年輪幅
比率(97年)：97年の年輪幅／震災前3年間の平均年輪幅

園でのクロマツおよびアキニレの年輪幅変動を示す。冷害および干害の生じた1993, 1994年とその翌年の1995年の年輪幅変動は、対照区ではクスノキと同様に1994年に減少して1995年には増加した。一方液状化の生じたポートアイランドにおけるクロマツでは、1993年から1994年への傾向が1本のみ異なっているが、他はいずれも1994年に比べ震災の生じた1995年の年輪幅が小さかった。また表-2中の、ポートアイランドにおける1995年と震災前3年間の年輪幅の比率が対照区の半分程度であり、クスノキや対照区のクロマツとは異なる傾向であった。図5を考慮すると、被災区で見られた成長量の低下は気象要素以外によると考えらる。同公園内の震災直後の土壌のECは0.15~3.59mS/cmと高い場所が存在し、震災後の1995年4月25日には、300mm程度の降雨などの影響で0.5mS/cmと植物の生育に問題のないレベルに低下したとの報告²⁰⁾がある。しかし、震災直後にクロマツの観察を行っておらず、液状化が測定樹木に与えた影響は詳細にはわからない。それゆえ、液状化によってクロマツの1995年の年輪幅が小さくなったと結論づけることはできないが、液状化の影響がなかったと否定することもできない。震災の翌年である1996年以降には、年輪幅が震災前の1994年に比べ増加した。以上から、クロマツには液状化による一時的な成長量低下の可能性が残されるが、翌年にはその影響はなくなり、長期的な液状化の影響はないことが明らかとなった。図-7のアキニレの年輪幅では、冷害

と干害の生じた両年の傾向は、クスノキ、クロマツと同様であった。対照区では、震災前後の年輪幅が大きく変動するが、液状化の被災区では変動が小さく、また、1995年の年輪幅の比率は対照区に比べて小さいが、クロマツのように震災後に大きく年輪幅が低下することはなかった。アキニレについては、震災直後の1995年5月上旬まで液状化により同公園内で開葉は遅れたが、5月下旬には回復したと報告されている²⁰⁾。このように開葉状態が回復していることもあり、年輪幅から液状化がアキニレの成長に与えた影響は小さいと考えられる。

(4) 火災と年輪幅変動

図-8の上段には対照区、中段、下段には火災の影響を受けた御蔵公園、大国公園のクスノキの年輪幅変動を示す。上段の対照区のクスノキは、図-4上段と同一である。冷害と干害の発生した1993年から1994年への年輪幅変動の傾向は、両被災区でも対照区とはほぼ同じだった。被災区の1995年の年輪幅は、大国公園の1個体を除き、1994年の値に比べ低下した。特に御蔵公園のクスノキの年輪幅の低下は著しく、1995年の年輪幅は震災前3年間のおよそ20%であった。御蔵公園および大国公園のクスノキの高度別の幹の周長と火災によって焼け焦げ、焼死した部位の周長を図-9に、表-3に高度5mおよび3mまでの幹周長の焼け焦げ率(図-9の焼焦げ長/幹周長)の平均値、造園学会の緊急報告書¹⁴⁾に記載された樹木番号および被害度、樹高と幹部の焼け焦げ範囲(最小高と最大高)、1995年と震災前3年間の年輪幅の比率を示す。御蔵公園の樹木は、現存する幹の最上部までが焼け焦げ、地上5mまでの平均焼け焦げ率は50%以上と大きい(写真-1)。一方大国公園の樹木は、幹の一部が焼け焦げ、御蔵公園に比べ焼け焦げ率が小さい。図-10に高度5mまでの幹の焼け焦げ率と1995年と震災前3年間の年輪幅の比率の関係を示す。

図-6 クロマツの年輪幅変動
(上段: 対照区, 下段: 液状化の被災区)

図-7 アキニレの年輪幅変動
(上段: 対照区, 下段: 液状化の被災区)

図-8 クスノキの年輪幅変動
(上段: 対照区, 下段: 火災の被災区)

図-9 被災木の高度別の幹周長と火災によって焼け焦げた部位の長さ

図-10 幹の焼け焦げ率と95年の年輪幅の震災前3年間の平均年輪幅との比率

写真-1 火災の被害を受けた御蔵公園のクスノキ

写真-2 火災の被害を受けた水笠西公園のケヤキ

表ー3 火災被災区のカスノキ幹部の焼け焦げ率と95年の年輪幅の比率

調査地	樹体番号	樹高 (m)	幹高直径 (cm)	被害度	焼け焦げ範囲(m) 最小高 最大高	焼焦率(0-5m)	焼焦率(0-3m)	比率(95年)
御蔵公園	8	8.3	49.0	A	0.0 8.3	55.2	52.3	0.12
	9	7.4	36.0	A	0.0 6.0	56.2	49.6	0.27
大園公園	22	10.0	32.1	B	— —	0.0	0.0	1.14
	20	6.4	25.1	A	0.0 3.1	12.5	20.3	0.13
	19	5.9	24.5	B	0.0 4.8	22.8	26.8	0.98
	17	6.8	20.4	B	0.1 2.8	10.0	16.3	0.28
	7	6.9	20.4	B	1.1 3.7	3.4	4.7	0.48
	7	7.4	22.3	B	0.3 2.2	3.1	5.1	0.35
	7	7.4	22.3	B	0.3 2.2	3.1	5.1	0.35

樹体番号、被害度は阪神大震災緊急調査報告書¹⁹⁾から

サンプル数が少ないため、明瞭な傾向は見られなかったが、焼け焦げ率がおおよそ15%~55%の個体で、被災直後の年輪幅が被災前の20%程度に減少していることがわかる。

図-11に对照区と火災の影響を受けた水笠西公園のケヤキの年輪幅変動を示す。对照区での1995年のそれ以前の年輪幅との比率は、1以下であるが、被災区では1以上であり、年輪幅が増加したことを示している。しかし写真-2にみられるように、幹周の半分程度が焼死しているため、活動している形成層部分による断面積増加量は震災前よりは低下していると考えられる。

Ducrey²⁾らは、冬季にAleppo pine 幹部のヒーター加熱実験とその後のモニタリングにより、幹周100%の加熱処理区では1~5ヶ月後に枯死し、枯死直前の数日まで夜明け前の水ポテンシャル、純光合成速度、気孔コンダクタンスが对照区と差がないことを示した。また幹周で38~78%加熱処理をした樹木では、被害を受けなかった形成層部分の活動により上述の生理特性は对照区と有意な差はなく、この樹種の耐火性が高いことも示した。またBrown¹⁾らは、火によるポプラの枯死の調査によって、平均で幹周75%以上が焦げた個体が枯死すると報告している。御蔵公園のカスノキは、広葉樹で萌芽性が強いことも影響したためか、高度5mまでの幹部が周長で50%以上焼け焦げるとの山火事³⁾¹⁸⁾に比べて多大な被害を受けたにもかかわらず生育が続いている。水笠西公園のケヤキも幹部の半分程度が焼け焦げたにもかかわらず年輪幅の減少がみられなかった。これらから両種の耐火性が高いことが考えら、関東大震災後の調査で得られた中程度の耐火性との結果¹⁹⁾と矛盾しない。Ryan¹⁶⁾らは7種の針葉樹に

図-11 ケヤキの年輪幅変動
(上段：对照区、下段：火災の被災区)

ついて、火災による樹木個体の枯死率は、樹皮の厚さと樹幹の焼死率の関数で良好に推定できることを示している。図-9において幹部の焼け焦げ率と年輪幅の比率の相関がみられなかったが、これはサンプル数が少なかったこと、本研究では行っていない樹冠の被害評価を考慮していないためだと思われる。山火事では、林床に堆積した落葉落枝が可燃物となって地表面が高温となることがあり⁵⁾、また地表面の細根が焼失および焼死する¹⁷⁾。大園公園および御蔵公園の火災後の写真¹⁴⁾からは、両公園の被災樹木周辺に落葉落枝は見られないため、地表面温度は高温とならず、また地中深くなるにしたがって急激に温度は低下するといわれているため⁵⁾、火災が被災木の根系に与えた影響は小さいと考えられる。Harrington⁶⁾は火事の被災時期に関し、光合成産物の貯留量の多少によって、生育期に比べ休眠期に被災する方が回復が良いことを示している。

本研究の年輪測定の結果から阪神・淡路大震災において火災の影響を受けた樹木の回復がおおむね良好であることが示されるが、これらは、森林の土壌構造や山火事の根系への影響の相違、樹種特性、被災時期が冬季であったことが影響していた可能性が考えられる。

引用文献

- 1) Brown, J.K. and DeByle, N.V. (1987): Fire damage, mortality, and suckering in aspen: Can. J. For. Res. Vol.17, 1100-1109
- 2) Ducrey, M., Duhoux, F., Huc, R., and Rigolot, E. (1996): The ecophysiological and growth responses of Aleppo pine (*Pinus halepensis*) to controlled heating applied to the base of trunk: Can. J. For. Res. Vol.26, 1366-1374
- 3) 後藤義明(1987): 火災や寒害をうけたスギ、ヒノキ林の再生可能性 (スギ林の火災枯死率の推定法): 林試場報 277, 6-7
- 4) 後藤義明・大谷義一(1988): 森林火災の概念と研究動向: 森林立地(2), 41-56
- 5) 後藤義明(1998): 山火事と地域環境: 森林科学 24, 14-21
- 6) Harrington, M. G. (1993): Predicting *Pinus ponderosa* mortality from dormant season and growing season fire injury: Int. J. Wildl. Fire Vol.3 No.2, 65-72
- 7) 長谷川浩一・佐々朋幸(1993): 山火事 (地表火) によってもたらされるスギ樹幹基部の材質変化: 森林立地 35(2), 1-9
- 8) 菅藤武(1996): 阪神淡路大震災の火災と樹木の燃焼(防火性)と復活(耐火性): 林業技術 Vol.651, 19-22
- 9) 加藤輝隆・加須屋実・鏡森定信・河野昭一・狐塚寛(1988): スギの年輪幅に及ぼす大気汚染の影響評価 (I): 大気汚染学会誌 23(6), 311-319
- 10) 河田全・柳田由蔵(1923): 火災と樹林並ビニ樹木ノ関係: 林試輯報 特別号, 1-33
- 11) 森本幸裕・中村彰宏・佐藤治雄(1996): 街路樹の機能と阪神・淡路大震災: 国際交通安全学会誌 Vol.22 No.1, 49-56
- 12) 森本幸裕・木田幸男(1996): 震災からの回復経過からみた樹木の防災機能と防火機能: ランドスケープ研究 Vol.60 No.2, 111-112
- 13) 奈良国立文化財研究所編(1990): 年輪に歴史を読むー日本における古年輪学の成立ー: 同朋舎, 195pp
- 14) 日本造園学会阪神大震災調査特別委員会 (1995): 阪神大震災緊急調査報告書, 163pp
- 15) 野堀嘉裕・尾形俊成・高橋教夫(1995): プナ年輪変動とエルニーニョの関係: 日林論 106, 409-410
- 16) Ryan, K.C. and Reinhardt, E.D. (1988): Predicting postfire mortality of seven western conifers: Can. J. For. Res. 18, 1291-1297
- 17) 佐々朋幸・佐々木茂・後藤和秋(1988): 山火事が森林生態系に及ぼす影響 (II) - 焼失有機物の量と根への被害 -: 日林論 99, 167-168
- 18) 佐々朋幸・長谷川浩一・後藤和秋(1989): 地表火による樹幹の焼け焦げ程度からみた樹体の生死将来予測法確立への事例解析 - 被災2年後のスギ樹木健全度調査結果より -: 森林立地 31(2), 46-54
- 19) 田中八百八(1923): 大正の大地震及び大火と帝都の樹園: 山林輯報 臨時増刊, 1-29
- 20) 田中義則・山瀬敬太郎(1996): 液状化現象による緑化木への影響: 日林関西支論 Vol.5, 173-174
- 21) 安江恒・野田真人・深沢和三(1993): 天然木における標準化手法の検討: 樹木年輪 Vol.6, 18-24

Summary: The influences of fire and liquefaction caused by the Hanshin-Awaji disaster on the radial growth of trees were investigated. Ring widths of trees which were suffered by the disaster in Kobe were compared with the increment cores of trees of same species planted in Sakai City which were not suffered from the disaster. The long term effects of liquefaction on growth of *Cinnamomum camphora*, *Pinus thunbergii*, *Ulmus parvifolia* were not observed. Fire decreased the ring widths of *Cinnamomum camphora* after the disaster, but *Zelkova serrata* were not affected. The ring widths of trees which were suffered from fire or liquefaction were increased after two years from disaster, so the influences of fire and liquefaction do not remained for long period in Kobe City.