

傷害心材の形成による微量元素分布の変化

岡田 直紀・片山 幸士・野瀬 正・石丸 優

Changes of the Distribution of Trace Elements in the Formation of Wound Heartwood.

Naoki OKADA, Yukio KATAYAMA, Tadashi NOBUCHI and Yutaka ISHIMARU

要 旨

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) とミズナラ (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*) の樹幹に成長錐で穿孔処理を施し、傷害心材の形成に伴う微量元素の分布の変化を調べた。各樹幹には穿孔に沿って着色部が表れた。着色域は穿孔に沿って軸方向に広がり、辺心材境界では10cm以上にも達したが、接線方向には5mmまでにすぎなかった。

傷害部周辺の組織中の6元素 (Na, K, Mg, Ca, Mn, Cl) を中性子放射化分析法で分析した。辺心材部では着色部の広がりとともに元素含量の変化がみとめられ、ミズナラでは心材部においても変化した。それらの変化の多くは正常材の辺心材境界付近で観察されるものと同様のものではあったが、スギのNaやミズナラのMnのような例外も存在した。傷害によって起こった微量元素含量の変化は心材形成時の変化とまったく同一のものとはいえないが、一般に認められている傷害心材と通常心材との類似性から判断すると、本研究の結果は心材形成に微量元素が関わっていることを示すものと言えよう。

1. 緒 言

樹木に傷害を加えると、傷害の周囲の組織に心材様の変化が生ずることが古くから知られている。傷害心材あるいは人工心材と呼ばれるこの組織は、心材形成を研究する手段として利用されてきた¹⁾。

多数の樹種の人工心材に関する一連の研究から、矢沢ら²⁾は通常的心材との比較を以下の様にまとめている。

類似点

- ・着色部の形成
- ・白線帯の出現
- ・同一の抽出成分の存在
- ・含水率の低下

相違点

- ・形成時期 (正常心材：休止期, 人工心材：成長期)
- ・色調 (正常心材に比べて人工心材では一般に暗色)
- ・正常では有色心材を形成しない樹種での着色部の発生
- ・抽出成分の量

形成を促す原因や、結果として引き起こされる組織の変化に多少の違いはあるものの、人工心材の形成に際しての基本的な代謝変動は正常心材のそれと同一と考えてよいとされる²⁾。

さて、著者らはスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don), ミズナラ (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*) 樹幹中の微量元素の放射方向の分布を異なる地上高にわたって調べ、辺材から心材への移行部でいずれも特異的な変化をすることを報告した³⁻⁵⁾。その変化の様子から、樹幹中の微量元素の分布に心材形成が関与しているものと推定された。人工心材の形成に際して通常的心材形成にみられるのと同様の微量元素の分布の変化が起これば、先の推定を裏付ける間接的な証拠となり、また心材形成の研究への新たな問題提起ともなる。

以上の背景のもとに本研究では、これまでに樹幹中の微量元素の分布を調べたスギとミズナラに穿孔処理を施して、傷害心材 (本報告ではこの用語を用いる) の形成による微量元素の分布の変化を調べた。

2. 試料と方法

2.1 穿孔処理

京都大学農学部附属芦生演習林 (京都府北桑田郡) に生育するスギ造林木 (胸高直径22cm, 樹高16m) とミズナラ天然木 (胸高直径32cm, 樹高19m) を試料とし、1984年6月27日に成長錐を用いて心材内部に達する穿孔処理を胸高部に施した。処理後は直ちにエポキシ樹脂を用いて穿孔をふさぎ、腐朽菌の侵入をできるだけ抑えた。4カ月後の10月27日に伐採し、傷害心材の形成に伴う着色域を肉眼で観察するとともに、組織の一部を微量元素の分析に供した。

2.2 微量元素分析

後述のように、傷害心材の形成に伴う着色域は穿孔に沿って上下方向に大きく広がり、接線方向の広がりには小さかった。したがって、周囲の正常組織から着色域にかけての変化が分かるように分析試料は以下のよう

① 穿孔位置から下方に厚さ2.5cmの円盤を4点採り、順にa-dとした。② 次に穿孔位置を基準として各円盤の接線方向に1cmずつ隣合う部位を1-3とした (Fig.1)。③ ①と②で定められる12の部位 ($a_1, a_2, \dots, d_3$) のそれぞれより、辺材から心材にかけて数年輪おきにスギからは5点、ミズナラからは7点の分析試料を採った。なお採取後の試料は気乾状態で保存し、特別な処理は施していない。また成長錐で抜いたコアを対照試料として同様に分析した。

元素の定量は中性子放射化分析法で行った。分析試料には前処理を行わず、立教大学原子力研究所または京都大学原子炉実験所の原子炉で熱中性子を照射して、短寿命核種はその場で、中・長寿命核種は京都大学放射性同位元素総合センターでγ線スペクトロメトリーを行った。分析の詳細についてはすでに報告した⁶⁾ のでここでは省略する。

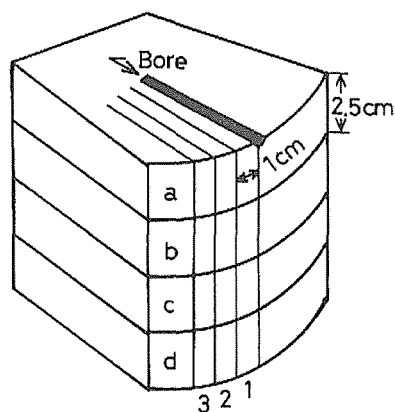


Fig 1 Sampling position of analytical samples.

3. 結果と考察

3.1 着色部の発生状態

スギとミズナラの辺材部にはいずれにも明瞭な着色部が発生した。その特徴は既往の報告¹⁾ と

同様の傾向を示した。すなわち、いずれの場合にも正常心材に比べて暗色であり、ミズナラでは心材内においても正常な部分との色の違いがみとめられた。

木口面で見ると両樹種とも穿孔にそって数mmの幅で着色が現れ、幹の外側から内側にかけて接線方向にやや広がる傾向にあった。まさ目面で見ると両樹種とも着色部ははるかに大きく、内側に向かって軸方向に広がっていく傾向も顕著であった。軸方向下方への着色部の広がりには辺心材の境界で両樹種ともに10cmをこえ、Fig. 1 に示したd₁に達していた。軸方向上方への広がりには下方へのそれに比べてやや小さかった。

3.2 傷害心材の形成に伴う微量元素濃度の変化

中性子放射化分析によって検出した元素は10数種類におよぶが、分析精度が高く、かつこれまでの両樹種に関する報告^{3,5)} から樹幹中での分布の傾向のよく分かっている6元素 (Na, K, Mg, Ca, Mn, Cl) にしぼって結果を報告する。

3.2.1 スギ

成長錐で採取した正常材コアの分析値と比較して、穿孔部周囲の組織中の元素濃度はいずれも変化した。穿孔部の軸方向放射断面におけるKとClの値をFig.2とFig.3に示す。

Fig.2のB図にみられるように、Kの濃度は正常材では心材の形成とともに上昇し、心材形成以後はほぼ一定となる。この変化はA図のd₁の変化に近い。一般にスギ樹幹中のアルカリ金属は放射方向にこの変化パターンをとるが、c₁~a₁と穿孔に近づくにつれて辺材中央部と最外部での濃度は上昇し、心材のレベルに近づく。穿孔によって生じた着色部での濃度の上昇は特に顕著である。スギの正常材でKと同様の変化をする元素のうち、Mgは傷害材の形成に際しても同様の変化をしたが、Naは変化をしないかむしろ反対に濃度が低下する傾向にあった。

正常材中のClの分布はKと全く反対で、Fig.3のB図のように心材形成とともに濃度が低下し、心材形成以後ではほぼ一定となる。これと比較してA図では分布パターンに大きな違いはないが、最外部を除いて全体に濃度の低下がみられる。興味深いことにClの場合、心材内でも若干の濃

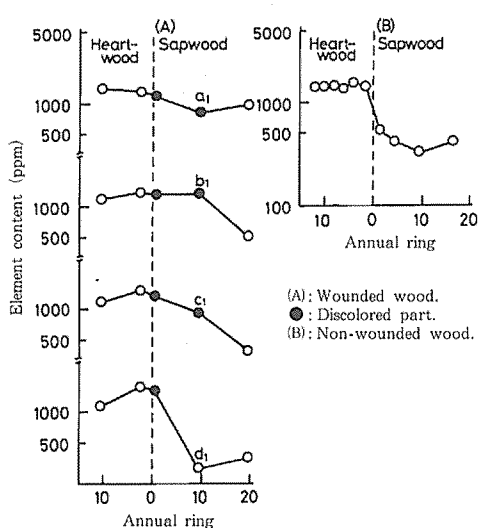


Fig 2 Potassium content in the wounded wood (A) and the non-wounded wood (B) of sugi.

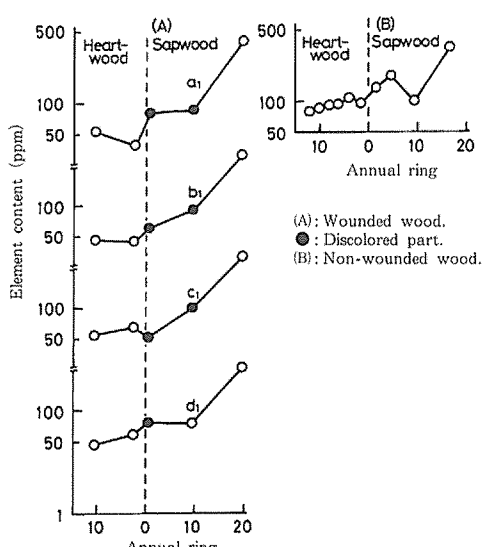


Fig 3 Chlorine content in the wounded wood (A) and the non-wounded wood (B) of sugi.

度低下が起こっている。正常材でClと同様の分布をするMnは傷害材でもClと同様の変化を示した。

辺材の最外部, 中央部, 最内部について正常材に対する傷害材の元素濃度比を軸方向に調べた結果をTable 1にまとめた。K, Mg, Mn, Clについては上に述べた傾向が表れているが, Naではほとんど濃度変化がないかやや低下する傾向にある。Caは正常材では大きな濃度変化を示すことは少なく, 特定の変化傾向を持たないが, 傷害材では辺材最外部で濃度の上昇が起こり, 中央部と最内部では逆にやや低下気味である。

Table 2では辺材中央部の元素濃度を接線方向に比較した。KとMnおよびClでは穿孔部に近い組織での濃度がそれぞれ上昇および低下しており, Table 1の結果と一致するが, その他の元素でははっきりしない。着色域が a_2 , a_3 にまで達していなかったことからみても, 穿孔処理による影響が接線方向にはそれほど遠くまで及ばないことをTable 2の結果は示しているといえる。

スギ傷害材の形成に伴って起こる元素濃度の変化は軸方向では顕著であるが, 接線方向では小さい。正常材での心材への移行部においてみとめられた濃度変化と本研究のスギ傷害材中のK, Mg, Mn, Clではその傾向はほぼ一致しているといえるが, NaとCaでは変化幅が小さく正常材にみられる傾向を示すとはいえない。

3.2.2 ミズナラ

成長錐コアの分析値は試料量が少ないために分析精度が劣ったので, 穿孔処理後の材の分析値のみをKとMnについてそれぞれFig.4とFig.5に示す。

穿孔部から最も離れた d_3 では着色がみられず, 正常材と同様の元素濃度の分布に近いものと考えられるので, これと比較して傷害による元素の分布の変化を見ることにする。

ミズナラ樹幹中の微量元素の分布には二つの代表的なパターンがみられることを著者らは以前に報告した⁹⁾。すなわちアルカリ金属やハロゲンは辺材材境界付近で濃度が極大となり, MgとMnは辺材から心材にかけて急激に濃度が低下した。Mgを除くアルカリ土類金属の変化には特定の傾向はみとめられなかった。

Fig.4において d_3 と比較すると, 穿孔部にもっとも近い a_1 でKの濃度は一様に高く, b_1 でも辺材を中心にして高い。 c_1 になると濃度差は小さく, d_1 では辺材材境界付近を除けば d_2 , d_3 との濃度差はほとんどない。 d_3 を基準として見ると, K濃度の変化域は着色域の広がりに対応

Table 1 Concentration ratio of elements in wounded wood to non-wounded wood of sugi.

Position	Na	K	Mg	Ca	Mn	Cl
a_1 *	0.53	2.4	1.9	1.2	0.61	1.2
b_1 *	0.87	1.3	3.8	3.7	0.83	0.93
c_1 *	0.96	0.96	2.2	3.3	0.83	0.92
d_1 *	1.0	0.82	1.4	1.4	0.65	0.79
a_1 **	0.99	1.7	0.96	0.83	0.48	0.89
b_1 **	0.76	2.8	1.4	0.80	0.57	0.92
c_1 **	0.95	1.9	1.3	0.67	0.30	1.0
d_1 **	0.86	0.60	0.88	0.89	0.46	0.76
a_1 ***	1.1	2.2	1.6	0.81	0.27	0.60
b_1 ***	0.92	2.4	2.1	0.81	0.20	0.45
c_1 ***	0.78	2.4	1.7	0.70	0.18	0.39
d_1 ***	0.95	3.0	1.9	0.72	0.16	0.57

*: Outermost sapwood. **: Center part of sapwood.
***: Innermost sapwood.

Table 2 Element content in tangential direction of wounded wood of sugi ($\mu\text{g/g}$).

Position	Na	K	Mg	Ca	Mn	Cl
a_1	13	840	99	830	1.1	90
a_2	16	340	130	1100	1.6	140
a_3	18	350	110	1000	1.4	140

Note: All positions are in the center part of sapwood.

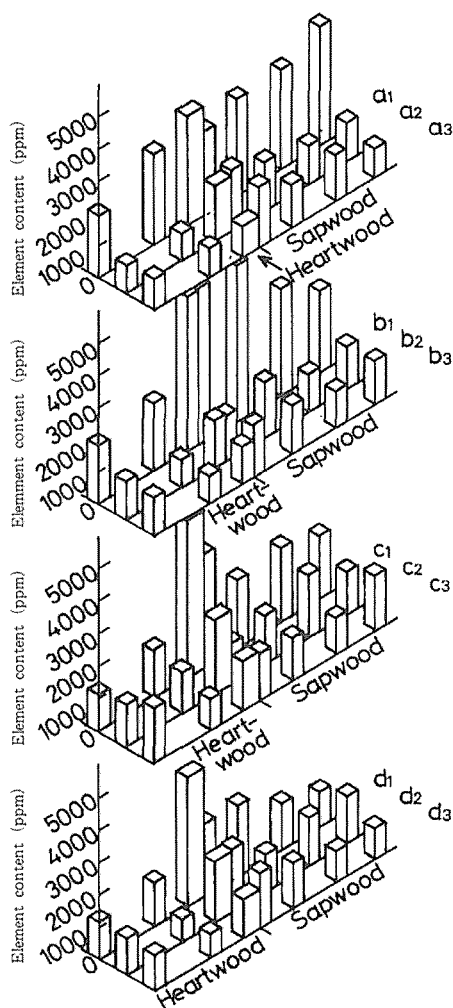


Fig 4 Potassium content in the wounded wood of mizunara.

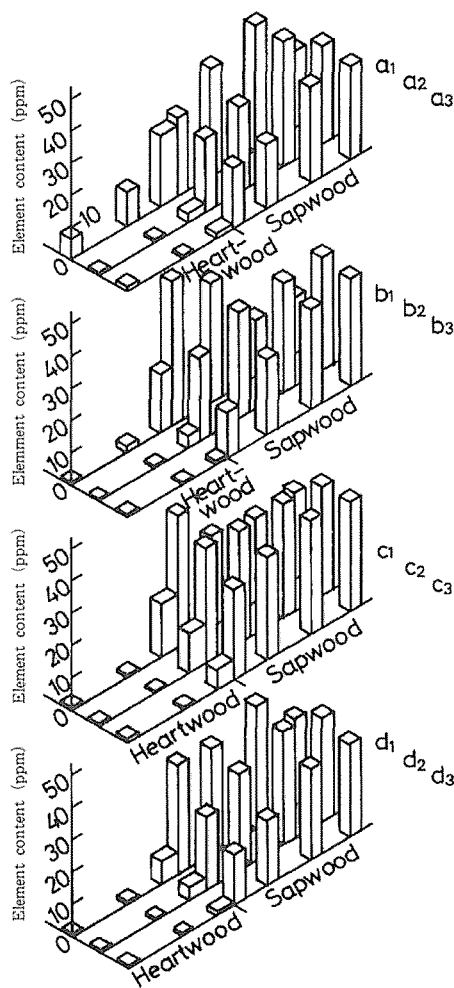


Fig 5 Manganese content in the wood of mizunara.

しており、軸方向へは著しいが接線方向にはそれほどではない。そして、K 濃度の変化で見るかぎり辺心材境界が最も敏感に傷害に対して反応するようである。またスギでも観察されたことであるが、 a_1 に特に顕著にみられるように心材部においても穿孔に沿って濃度の変化が起こっている。

ミズナラ正常材の辺心材境界でKと同様の挙動を示した元素のうち、Naは a_1 においてもKほどの濃度上昇を示さなかった。Clの濃度変化もKに比べるとはるかに小さく、 a_1 の辺材で周囲の組織よりもやや低めであったほかは大きな違いはなかった。

Fig. 5)において d_3 と比較すると、Mn濃度は辺心材境界付近で著しく高かったが、辺材部では a_1 で高かったほかは b_1 と c_1 では反対に低かった。すなわち元素濃度の変化は着色域の広がりに対応するといえるが、変化の傾向は一定ではない。正常材の辺心材境界付近でMnと同様の分布をするMgは、 a_1 の辺材部で周囲よりも低い元素濃度を示した。

Caも穿孔処理が原因と考えられる濃度変化を示したが、その傾向は必ずしも一定ではなかった。d₃と比較すると、a₁では全体として濃度が高かったが、b₁の辺材部では低く、c、dでは不規則に変化した。

3.3 元素濃度の変化とその要因

スギとミズナラの結果から傷害心材の形成による変化をまとめると、1) 穿孔処理による着色域は辺材内部に行くに従って軸方向に大きく広がるが、接線方向にはあまり広がらない、2) 傷害部の周囲の組織で元素濃度の変化が起こり、それは着色域と対応がある、3) 元素濃度の変化は正常材の辺心材境界での変化と同様のものとそうでないものがある、4) 穿孔部の近傍では心材部においても正常材よりも元素濃度が上昇する、5) 辺心材境界付近では多くの元素の濃度が上昇する。

スギとミズナラでは傷害心材の形成によって元素濃度に変化することは、以上の結果から現象的に明らかと判断される。Blanchardら⁷⁾もred maple (*Acer rubrum* L.)を用いて、傷害を受けた組織にKが集積しそれが樹体内での再移動によるものであることを確かめている。

しかし傷害組織中の元素濃度が上昇または低下する要因は、正常材の辺心材境界において元素の特異的な分布をもたらす要因とは必ずしも一致していないと考えられる。例えばスギのNaやミズナラのMnでは正常材の場合とは逆の濃度変化を起こす例があった。またCaのように通常は濃度変化が小さい元素も、穿孔の近傍ではしばしば大きく変化した。さらに、すでに心材化した組織においても元素濃度の変化が生じた。矢沢ら⁸⁾も指摘しているように、傷害によって引き起こされた変化である以上、腐朽菌の影響も考えられよう。ただ、傷害心材と同様に異常な着色部を発生するボタン材の研究によれば、腐朽菌の関与には否定的である⁹⁾。そのほか穿孔処理によって引き起こされる穿孔周囲の樹幹中水分の移動も微量元素の分布に影響し得る。なお穿孔を塞ぐのに用いたエポキシ樹脂は、樹皮より内側あまり入り込んでいないことから、分析値への影響はほとんどないものと考えられる。

しかしながら、a₁のような穿孔部のごく近傍は別にしても、やや離れた周辺の組織では元素濃度の変化傾向は正常材の辺心材境界付近でのそれによく似ている。また、スギでもミズナラでも傷害による着色域は辺心材境界付近で最も大きく広がり、そこでの元素濃度の変化が他の辺材部に比べて顕著であったことも、傷害心材と正常心材との強い関連性を示唆するといえる。

4. 結 論

スギとミズナラの樹幹では傷害心材の形成に伴って材中のNa, K, Mg, Ca, Mn, Clの分布が変化した。元素濃度の変化が生じた領域は傷害による着色域の広がりに対応があり、辺材内では辺心材境界に近い所ほど著しかった。元素濃度の変化は正常材の辺心材境界にみられるものと同様の傾向を示したが、例外もみられた。したがって、傷害によって生じた材中の元素濃度の変化は腐朽菌の侵入のような外部要因と、傷害による放射線細胞の壊死のような樹木自身の反応の結果として起こったものと考えられた。傷害心材の形成に際しての基本的な代謝変動が正常心材のそれと同一であるとすれば、穿孔処理による元素濃度の分布の変化も正常材の心材形成時に見られるものと同様のものであろう。したがって、辺心材境界における特異的な微量元素の分布³⁻⁵⁾が心材形成と密接な関連があるとのこれまでの報告を、本報告の結果は傷害材を用いて確認したものである。

本研究を遂行するにあたり、試料採取に協力いただいた京都大学農学部附属芦生演習林、放射

化分析の際に便宜をはかって頂いた京都大学原子炉実験所, 立教大学原子力研究所, 京都大学放射性同位元素総合センターの関係各位に対して, 記して感謝します。

引用文献

- 1) 例えば, 矢沢亀吉・石田茂雄・大谷 諄 (1967) 心材の人工形成に関する研究。北海道大学農学部演習林研究報告 25(1). 9~57.
- 2) 近藤民雄 (1975) 心材形成の化学。化学と生物 13(11). 691~697.
- 3) OKADA, N., KATAYAMA, Y., NOBUCHI, T., ISHIMARU, Y., YAMASHITA, H. and AOKI, A. (1987) Trace Elements in the Stems of Trees I. - Radial distribution in sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) -. Mokuzai Gakkaishi. 33(12). 913~920.
- 4) OKADA, N., SATO, M., KATAYAMA, Y., NOBUCHI, T., ISHIMARU, Y., YAMASHITA, H. and AOKI, A. (1988) Trace Elements in the Stems of Trees II. - Influence of age and vertical position on radial distribution in sugi (*Cryptomeria japonica*) -. Mokuzai Gakkaishi. 34(11). 874~880.
- 5) OKADA, N., KATAYAMA, Y., NOBUCHI, T., ISHIMARU, Y. and AOKI, A. (1990) Trace Elements in the Stems of Trees III. - Radial distribution in mizunara (*Quercus mongolica* var. *glosseserrata*) -. Mokuzai Gakkaishi. 36(2). 93~97.
- 6) 片山幸士・岡田直紀・石丸 優・野淵 正・山下 洋・青木 敦 (1986) 屋久島産スギの微量元素の熱中性子放射化分析。RADIOISOTOPES. 35(11). 577~582.
- 7) BLANCHARD, R. O., SMITH, D., SHIGO, A. L. and SAFFORD, L. O. (1978) Effects of soil-applied potassium on cation distribution around wounds in red maple. Canadian Journal of Forest Research. 8. 228~321.
- 8) 大迫靖雄・堤 利夫・野淵 正・森田 学 (1972) 木材の質的生産技術に関する研究 (1) ボタン材について。京都大学農学部演習林報告 44. 159~175.

Résumé

Stems of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and mizunara (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*) were bored with an increment borer to survey the changes in trace element content in the formation of wound heartwood. Discoloration of wood was occurred around the bore in each stem. The discolored area extended along the bore in longitudinal direction and reached more than 10 cm at the sapwood-heartwood boundary, but up to only 5 mm in tangential direction.

The changes in content of 6 elements (Na, K, Mg, Ca, Mn and Cl) around the wound were determined by neutron activation analysis. The increase/decrease in the element contents occurred in discolored area in sapwood and were observed even in heartwood in mizunara. Most of the changes were similar to those observed around the sapwood-heartwood boundary of non-wounded stem but had some exceptions (Na in sugi and Mn in mizunara). Although the changes were slightly different from those in the normal heartwood formation, the results suggested the close relation between those trace elements and the heartwood formation.