

水浸出土木材の埋没環境

酒井温子¹⁾・今津節生²⁾・仁王以智夫³⁾

1. はじめに

一般に、木材は腐るという印象が強い。野山を歩くと朽ちた木からキノコが生えているのを見かけたり、杭が地際部分で腐って細くなっていたり、公園の木製遊具が腐って軟弱になっていたりする。また、木材の耐朽性を調べるために、杭を土に埋めて立てておくとスギなどの腐りやすい木材では、4、5年以内に地際部から腐朽し倒れてしまう(松岡1970, 中村1990)。

一方で、日本各地の遺跡から何千年も昔の木製品が発掘されている。出土木材を顕微鏡で観察すると、細胞壁に微細な穴や空洞が見られ、その様子が微生物による分解痕跡に類似することや、劣化が不均一に進行すること等から、出土木材に見られる劣化は、微生物による腐朽が主な原因と考えられる(酒井1991, 酒井・仁王1993)。しかし、劣化はしているものの、出土木材は微生物によって分解され尽くすことなく、土壤中で長期間、形状を保ったまま残存してきた。そこで今回は、出土木材の埋没環境を調べ、木材が残存できた理由について考察を行った。

2. 材料と方法

2.1 材料

次の4遺跡にて土壌を2、3kg程度の固まりで採取し、ビニール袋に詰めてできるだけ密閉状態で持ち帰った。各実験には、固まりの内部を使用した。

奈良県御所市南郷大東遺跡では、図1に示したように、旧地表面に近く有機遺物が発見されなかった地点(A)と木材などの有機遺物が出土した地点(B, C)および、有機遺物を含む遺構の構築層(D, E)の5カ所から土壌を採取した。土壌採取地付近で出土した杭状木製品は図2のように下部ほど劣化が少なく、A地点を含む茶褐色土層とB地点を含む黒褐色土層の境目で、最も劣化していた。この劣化がいつ生じたかは明らかではないが、少なくとも下部については埋没中も劣化をほとんど受けなかったといえる。したがって、出土木材が土壤中で長期間残存できたことに大きな影響を及ぼした要因とは、木材が出土しなかったA地点とすぐ下で多くの木材が出土したB地点で大きく異なり、DおよびE地点でさらに顕著となるような土壌の特徴であると考えられる。

1) 奈良県林業試験場：〒635-01 奈良県高市郡高取町吉備1

2) 奈良県立橿原考古学研究所：〒634 奈良県橿原市畝傍町1番地

3) 静岡大学農学部：〒422 静岡県静岡市大谷836

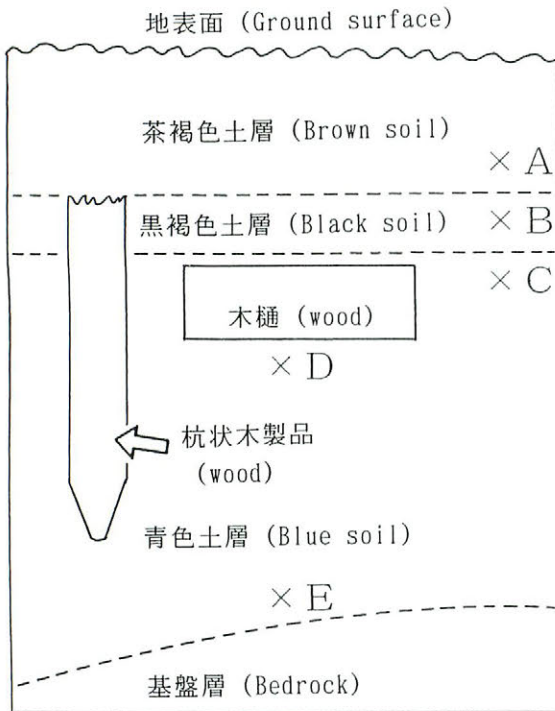


図1 南郷大東遺跡における土壌試料採集地点(A~E)の模式図

Fig.1 Sampling points (A~E) of soil at Nango ohigashi relics.

また、奈良県御所市大屋遺跡、大阪府八尾市春宮遺跡および鹿児島県加世田市で10万年前の木材が出土した場所では、木材が出土した層のみで土壌を採取し、その特徴が南郷大東遺跡の試料で得られた結果と矛盾しないかどうかを検討した。

2.2 実験方法

土壌中での木材の化学的あるいは生物的劣化に影響を及ぼすと考えられる土壌の要因について、以下の方法で測定を行った。

2.2.1 含水率の測定

木材が出土する土壌は、含水率が高いことが経験的に知られている。土壌の含水率が高いことは、土壌に含まれる空気の量が少ないことを意味し、好気的な微生物の活動を制限することになる。

土壌の含水率は、土壌約5kgを3日間105°Cで乾燥後、(土壌に含まれる水分重量÷湿潤土壌の重量)で算出した(久馬1984)。

2.2.2 pHおよび酸化還元電位(Eh)の測定

pHとは、酸性、中性、あるいはアルカリ性を表示する尺度である。これは土壌中のH⁺とOH⁻の濃

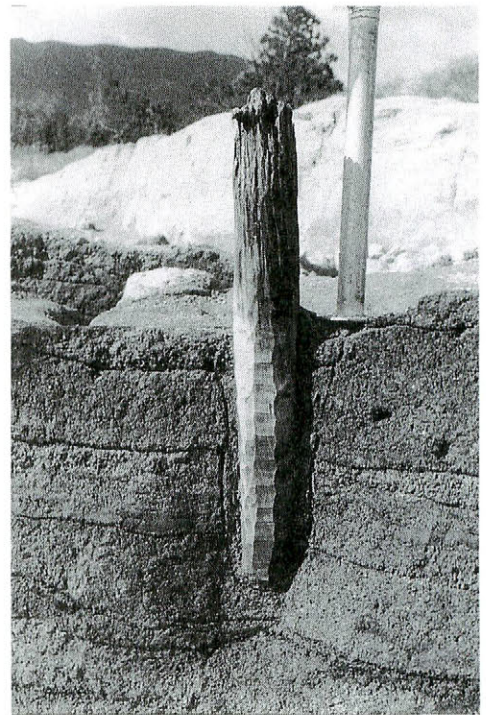


図2 杭状木製品の出土状況

Fig.2 Photograph of a wooden object (pile) excavated at Nango ohigashi relics.

A・B・C層を除去し、D・E層を断ち割ったところ。A・B層の境目で木製品は朽ち果てているが、D・E層では加工痕跡が明瞭に残る。

This photograph was taken after the brown and black soil was taken off. The pile didn't remain at the brown soil, was degraded at the black soil, and remained almost sound at the blue soil.

度によって決まる。一般に日本の土壌は弱酸性 ($\text{pH} = 6 \sim 7$) であることが多く、この pH の範囲では木材に対して少なくとも急速な化学的な劣化は生じない。しかし、 pH が極端に低いあるいは高い場合には、化学的な変化が生じる可能性がある。

一方、 Eh とは、酸化・還元状態の表示に用いられる値である。酸化とは物質が電子を奪われる変化であり、還元とは物質に電子を添加する変化である。微生物の活動と Eh には密接な関係があり、 $\text{Eh} \geq +300\text{mV}$ の場合は酸化状態で分子状の酸素が存在するため、酸素を必要とする好気的な微生物が活動するのに対して、 $\text{Eh} < +300\text{mV}$ の場合は還元状態であるため、酸素がなくても生育できる嫌気的な微生物が活動する。したがって、どのような微生物が活動できるかを考える上で、 Eh の値は重要である。

pH の測定は、まず300ml 容ビーカーに約100 gの土壌と約100mlの蒸留水を入れて、静かにかき混ぜて空気を除去した後、ホリバ製F22型の pH メータに pH 用のガラス電極をつなぎ、電極の先を土壌中に差し込んで行った。次いで、電極を Eh 用の白金電極につなぎ換え、同様の方法で Eh の測定を行った。さらに Eh は pH によって値が変化するので、 pH の影響なしに土壌の酸化還元状態を比較できるように、換算表を用いて $\text{pH} = 6$ のときの酸化還元電位 (Eh_6) を求めた。

2.2.3 土壌の色と腐卵臭の確認

一般に木材が出土する土壌の色は、黒色、灰色あるいは青色であることが多く、茶色の土壌からはほとんど木材は出土せず、出土したとしても大変劣化していたり、木材の周辺だけは土壌が黒灰色や青色になっていることが多い。土壌の色は含有される成分によって決定され、特に含有量の多い鉄の結合状態に影響される。茶色は酸化鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)、黒灰色は硫化鉄 (FeS)、青色は炭酸鉄 (FeCO_3) を含むことを示す。鉄の結合状態は、土壌の酸化還元状態によって変化し、 Eh が $+200$ から -200mV へと移行するにしたがって、3 価の鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) は2 価の鉄 (FeS , FeCO_3) へと移行する (和田・蘭1981)。

土壌の臭いとしては、木材が出土する黒灰色や青色の土壌では、腐卵臭が生じることがある。これは、 $-200 < \text{Eh} < 0 \text{ mV}$ で、硫酸還元菌の活動により S^{2-} が生成され、これが水素と結びついて硫化水素 (H_2S) となり、気体の形で発生するのが原因である (和田・蘭1981)。

したがって、土壌の色と腐卵臭の有無から、酸化還元電位を大まかに推測することができると予想される。そこで今回は、土壌採取時に、色と腐卵臭の有無の確認を行い、酸化還元電位の測定値と比較を行った。

2.2.4 粒度の測定

土壌の粒度が大きくなると、水の保持力が弱くなるため、水の流れが生じやすく、乾燥に伴って含水率の変化も生じやすい等、土壌およびそこに含まれる微生物や木材は、環境変化を受けやすくなると考えられる。

粒度は、れき (粒径 2 mm 以上)、砂 (粒径 $0.02 \sim 2 \text{ mm}$)、シルト (粒径 $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$)、および粘土

(粒径0.002mm以下)で区分した。れきには水分保持力はほとんどないが、粘土には高い保持力がある(原口1982)。今回は、ややおおざっぱな方法ではあるが、肉眼、ルーペ、光学顕微鏡等で、粒度の大きさを調べた。

3. 結果と考察

3.1 土壌分析の結果

結果を表1にまとめた。まず、南郷大東遺跡において、木材が出土しなかったA地点およびその真下で木材が出土したB地点で大きく異なり、かつDやE地点でさらに顕著となる土壌の特徴を探した。

含水率については、基盤層に近いE地点付近から地下水が湧き出していたことと関連して、下ほど高くなる傾向にあった。これは大まかに表現すると、下の層ほど土壌粒子の隙間が水で埋められ、空気の割合が少ないことを意味する。したがって、下の層ほど顕著になる特徴ではあるが、旧地表に近く有機遺物が発見されなかったA地点と有機遺物が大量に出土したB地点の含水率の差はそれほど大きくなく、また有機遺物を含む遺構構築層のC地点ではB地点よりも含水率が下がっていることから、含水率が木材の残存に影響を与える可能性はあるが、決定的な要因とは考えにくい。

Ehの値も下の層ほど低くなる傾向にあり、酸素が欠乏した状態になることを示しているが、これは下の層ほど含水率が高く空気の量が少なくなることと関連があるといえる。また、注目すべきことに、Eh $>$ +300mVの範囲が酸化状態であるので、A地点ではEhが+366mVで好気的な微生物が活動できるのに対して、木材が多く出土したBおよびC地点では、Ehが+100および+37mVで嫌気的な微生物しか活動できないことが明らかになった。このことが、木材の生物劣化に大きな影響を与えた可能性が高い。

一方、pHも下の層ほど低くなる傾向を示したが、A地点とB地点の差はごくわずかであった。日本の一般的な土壌が弱酸性であることを考えると、この土壌は特殊な状態とはいえない。またこの範囲のpHは、木材の生物的あるいは化学的劣化に対して大きな影響を与えるとは考えにくい。

土壌の粒度については、E地点の試料がれきをやや多く含んでいたが、それ以外の地点については「シルトを多く含むれき～粘土」で共通しており、木材が残存するかどうかにはあまり影響がないといえる。

次に、以上の南郷大東遺跡の結果を、大屋遺跡、春宮遺跡および加世田市において、木材が出土した層の土壌の分析結果と比較したところ、木材が出土したいずれの土壌にも共通する要因は、Ehが+300mV以下という点であることが明らかになった。そこで、Ehに注目して土壌中での木材の劣化についてさらに考察を行うことにした。

なお、Ehの値と土壌の色の関係は、2.2.3で予想した通りで、Eh \geq +200mVで茶色、Eh $<$ +200mVで青または黒灰色、Eh $<$ 0 mVで青または黒灰色が濃くなったが、腐卵臭については0 mV $<$ Eh $<$ -200mVでもほとんど生じない場合があった。したがって、色によって酸化還元状態

表1 土壤分析の結果

Table.1 Characters of soil

| 測定位置 Site | 含水率 (%) Moisture content | 土壌の色 Color | 腐卵臭 Smell of H ₂ S | *1 Eh (mV) | pH | *2 Eh _s (mV) | 粒度 Size of grain |
|---|-----------------------------|------------------------|----------------------------------|---------------|------|----------------------------|---|
| 南郷大東遺跡 A地点 "A" point at Nangoohigashi relics where no woods were found. | 20.8 | 茶色 Brown | なし No smell | +336 | 6.50 | +366 | れき～粘土 (シルト多い) Conglomerate～clay (Content of silt was high.) |
| 南郷大東遺跡 B地点 "B" point at Nangoohigashi relics where many woods were found. | 26.8 | 黒色 Black | なし No smell | +70 | 6.45 | +100 | " (") |
| 南郷大東遺跡 C地点 "C" point at Nangoohigashi relics where many woods were found. | 22.7 | 青色 Blue | なし No smell | +25 | 6.22 | +37 | " (") |
| 南郷大東遺跡 D地点 "D" point at Nangoohigashi relics where little woods were found. | 31.8 | 濃い青色 Deep blue | あり Smell | -113 | 5.65 | -131 | " (") |
| 南郷大東遺跡 E地点 "E" point at Nangoohigashi relics where little woods were found. | 40.1 | 濃い青色 Deep blue | あり Smell | -36 | 5.62 | -60 | " (れき多い) (Content of conglomerate was high.) |
| 大屋遺跡 木材出土地点 Site where many ancient woods were buried at Oya relics. | 31.4 | 青灰色 Grayish blue | なし No smell | +21 | 5.80 | +9 | 砂～粘土 (砂多い) Sand～clay (Content of sand was high.) |
| 春宮遺跡 木材出土地点 Site where some ancient woods were buried at Harumiya relics. | 39.6 | 青色 Blue | なし No smell | -24 | 6.01 | -24 | シルト～粘土 (粘土多い) Silt～clay (Content of clay was high.) |
| 加世田市 10万年前の木材出土地点 Site where an ancient wood was buried at Kasada city | 34.0 | 濃い青色 Deep blue | なし No smell | -226 | 7.57 | -131 | 砂～粘土 (砂多い) Sand～clay (Content of sand was high.) |

*1 Oxidation-reduction potential measured actually.

*2 Oxidation-reduction potential estimated when pH is 6.0.

の大きな推定が可能であることが確認された。

3.2 埋没環境での木材の分解

まず、木材を腐らせる微生物（木材腐朽菌）が活動できるための条件について考えると、これらは好氣的微生物であり、水と酸素の両方が必要であることがあげられる。そして、木材腐朽菌の活動のしやすさは、木材に含まれる水分の量（含水率＝木材に含まれる水分の重量÷木材の乾燥重量）によって、3段階に分けることができる（原口1982）。木材の含水率が30%以下の乾燥した状態では、水分の不足により、木材中で一般の腐朽菌は生育できない。このため、乾燥状態の木材は長期間にわたって大変安定している。次に、木材の含水率が約30%から150%前後まででは、水と酸素が共に十分に存在するため、木材中で腐朽菌が生育し、細胞壁の分解つまり腐朽が生じやすい。さらに、木材の含水率が大変高いときは、酸素が不足するために、一般の腐朽菌（担子菌）は生育できなくなり、高含水率下でも生育できる酸素要求度の低い一部の微生物（軟腐朽菌など）によって、徐々に腐朽が進行することになる。また、より酸素が不足する嫌氣的な環境下では、木材を分解できる微生物がいるかどうかは、今のところ明らかになっていない。

以上の現象を、酸化還元電位を使って説明すると（和田・蘭1981, 上木1993）、 $E_h > 300\text{mV}$ では、酸素呼吸が可能であり、酸素を利用して有機物を分解する、好氣的分解が進行する。一般の木材腐朽菌はこの範囲でしか活動できない。 $0 < E_h < +300\text{mV}$ では、酸素はわずかに存在するが、酸素呼吸ができるほどの量はなく、部分的に還元状態となる。この範囲で生育できるのは、酸素を利用することもできるし、酸素がなくても生育できる通性嫌気菌であり、半嫌氣的分解が進行する。これらの微生物によって、セルロースは分解されるがリグニンには分解されないことが定説になっている。しかし、木材中のセルロースはリグニンによって囲まれた状態で存在するため、分解されるかどうかは今のところ明らかにされていない。さらに、 $E_h < 0\text{mV}$ では、完全に酸素がなく還元状態となる。この範囲では通性嫌気菌および絶対嫌気菌等の嫌氣的微生物が活動する。この範囲でも、木材は分解されるかどうか明らかになっていない。

今回の土壌分析の結果から、まず、南郷大東遺跡のA地点では、 E_{h_6} は $+366\text{mV}$ であり、木材を積極的に分解する好氣的な腐朽菌が活動できることが明らかになった。この層に木材が埋没していてもやがて分解され尽くし、消滅すると推定される。出土木材に観察される劣化は木製品として使用されていたときから発掘までの総合的なものであり、埋没環境だけで説明できるものではないが、出土した杭状木製品が、茶色と黒色の層の境目以下で存在し、茶色の層に接したところで著しく劣化し、下部ほど劣化が少なかったことと関連がある可能性がある。

これに対して、木材が多く出土したBおよびC地点では、 E_{h_6} は $+100$ あるいは $+37\text{mV}$ という低い値であった。この他にも、大屋遺跡で木材が出土した層では、 E_{h_6} は $+21\text{mV}$ 、春宮遺跡では -24mV 、加世田市で10万年前の木材が出土した土壌では、 -131mV であった。このように、木材が出土した土壌では、酸化還元電位は $+300\text{mV}$ 以下で、部分的にあるいは完全に還元状態であった。

比較のために、一般の土壌や水域における酸化還元電位を示す（和田・蘭1981，上木1993）と、水田の土壌表面では+400～+500mV，湛水状態の水田土壌の底部では-100～-250mV，湖沼や河川等の底では+500mV，湖沼や河川等の有機物の多い底泥の深部では-200～-250mVである。

以上から、木材が出土する土壌は、地表面の土壌のみならず、水中である湖沼や河川の底よりもはるかに酸化還元電位が低く、酸素がほとんどない状態といえる。このような環境では、半嫌気的あるいは嫌気的な微生物しか生育できず、しかも先にも述べたように、木材を分解する微生物が存在するかどうかは明らかになっていない。また、酸化還元電位が低下すると、微生物を阻害する物質が生成集積されるという報告もある（和田・蘭1981）。出土木材が埋没している土壌は、水を多く含んでいるだけでなく、酸素がほとんどない還元状態であり、木材を積極的に分解する一般の木材腐朽菌が活動できないという、特殊な環境であるといえる。

3.3 出土木材を取り巻く土壌の変化

木材を含む土壌がどのように還元状態へと変化したかを考える。先に示したように、湛水状態の水田土壌の底部や有機物を多く含む湖沼，河川等の底泥の深部も高い還元状態であるが，その理由についての説明（和田・蘭1981，上木1993）を参考に，遺跡の土壌中で生じた変化を推定すると次のようになる。すなわち，①木材が水を含む土壌という物質の移動速度が遅い閉鎖的な環境に埋まった直後には，木材中や周辺の土壌中に酸素が存在するため，酸素を必要とする好気的な微生物が活動できる。これらの微生物によって木材が分解される可能性もある。②閉鎖的な環境の中で，好気的な微生物が酸素を消費し尽くす。③嫌気的な環境になり，この中で生育可能な嫌気的な微生物が活動し始める。これらが木材をさらに分解するかどうかは明らかではない。また分解ができていても極めてゆっくりの速度であると考えられる。著者らが現在行っている実験の途中経過では，大屋遺跡で古墳時代の木材が出土した土壌中に現在の健全な木材を埋め込んだところ，針葉樹材のスギには腐朽は生じないが，広葉樹材のブナにはわずかに生じるという結果が出ている。

もしも，①の段階で土壌が乾燥し，土壌中に十分な酸素の供給があれば，好気的な微生物によって木材はさらに分解され，やがて消滅するであろう。また，微量の酸素の供給があれば，その供給量に応じて好気的な微生物がわずかに活動し，酸素の供給と消費が平衡状態になり，ある一定のEhが続く可能性もある。

以上をまとめると，埋没後の好気的な微生物の一時的な活動により，Ehの低下が生じ，木材の周辺が還元状態になり，さらにその還元状態が継続することが，木材の残存に必要であるといえる。また，出土木材に見られる主な生物劣化は，木製品として使用されてから埋没初期（Eh > +300mV）の間に生じ，Ehが+300mV以下になってからは，生じたとしてもゆっくりの速度であったと推定される。

4. まとめ

4 遺跡における出土木材の埋没環境は，Ehが+300mV以下という，嫌気的（還元的）な環境であっ

たことが共通していた。また、含水率も比較的高かった。木材は好気的な環境では微生物によって分解されるが、嫌気的な環境では分解が生じないか、生じても極めてゆっくりであると考えられる。木材が残存するためには木材およびその周辺が嫌気的であることが、必要条件であるといえる。

またこの環境は、安定して水を多く含む土壤中という閉鎖的な雰囲気下で、酸素を必要とする微生物が活動して酸素が消費され、新たな酸素の供給がなかったかあるいは微量であったために、長期間安定に保たれたと考えられる。水を多く含む土壌としては、池や川、井戸の跡や現在も地下水の供給がある所があげられ、水を安定して保持するという点では土の粒子が細かい粘土が適する。谷や盆地で粘土層から木材が出土することが多いことと関連があるといえる。

もしも木材を取り上げずに遺跡を埋め戻すならば、この嫌気的な環境を再現しないと、木材は土壌中で分解され、消滅する可能性がある。また、地下水の流れが、地震や地下水の利用等で変化して、土壌中の水が減少した場合、土壌が乾燥して空気（酸素）が流れ込むようになり、好気的微生物が活動し始め、木材の腐朽が進むと考えられる。現在、平城宮跡において地下水の水質調査が続けられているが（鶴巻1995）、特にEhや Fe^{2+} の変化に注目する必要があるだろう。

なお、今回は酸化還元状態に注目して考察を行ったが、木材が残存する条件として、埋没土壌が還元状態であることは必要条件ではあるものの、十分条件であるとは限らない。微生物活動に影響を与える他の要因として、土壌に含まれる微量成分、たとえば窒素含有量等も考えられる。また、埋没中に木材に化学的な劣化が生じる可能性についても、今のところ否定できない。今後さらに多方面からの検討が必要であると考えている。

謝 辞

土壌試料の採取に関してご協力いただいた、奈良県立橿原考古学研究所 青柳泰介氏、小池香氏、大阪府教育委員会 山田隆一氏、加世田市教育委員会 伊地知治喜氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 上木厚子, 上木勝司 (1993): 「嫌気微生物学」第8章各種嫌気環境における微生物の生態. 上木勝司, 永井史郎編, 養賢堂, p.167~196.
- 酒井温子 (1991): 出土木材の劣化過程. 木材学会誌, 37, p.363~369.
- 酒井温子, 仁王以智夫 (1993): 出土木材に観察された劣化と埋没土壌の特徴. 木材学会誌, 39, p.69~74.
- 鶴巻道二 (1995): 「平城宮跡の地下水の水質調査」保存科学研究集会95 (奈良国立文化財研究所・考古学研究会), p.10~13.
- 中村嘉明 (1990): 「奈良県材試加工ハンドブック」VI保存2 木材 (素材) の耐朽性. 奈良県林業試験場編, p.272~281.

- 原口隆英 (1992) : 「木材保存学」第 1 章腐朽. (社)日本木材保存協会編, 文教出版, p.21~72.
- 久馬一剛ら (1994) : 「新土壌学」III土壌の無機成分, VI土壌の化学性, VII土壌の物理性. 朝倉書店, p.18~38, 73~96, 97~129.
- 松岡昭四郎他 5 名 (1970) : 各樹種の野外試験による耐朽性調査結果. 林業試験場研究報告, 第232号, p.109~135.
- 和田秀徳, 蘭道生 (1991) : 「土の微生物」第 6 章水田土壌における物質変化と微生物. 土壌微生物研究会編, 博友社, p.127~172.

Condition of Soil around Ancient Waterlogged Wood Remained till Today

Haruko SAKAI¹⁾, Setuo IMAZU²⁾, Ichio NIOH³⁾

- 1) Nara Prefecture Forest Experiment Station, Takatori-cho, Takaichi-gun, Nara 635-01, Japan.
- 2) Kashihara Archaeological Institute, Unebi-cho, Kashihara-shi, Nara 634, Japan.
- 3) Faculty of Agriculture, Shizuoka University, Ohya, Shizuoka-shi, Shizuoka 422, Japan.

Ancient waterlogged wooden objects were excavated keeping the shapes originally, though they were degraded. The purpose of this study was to clear the reason why ancient woods could remain, from characters of soil around waterlogged woods.

Moisture content, pH, Eh (oxidation-reduction potential), color, smell of H₂S and size of grain were measured to grasp conditions of soil at 4 sites. The common character at the soils where ancient waterlogged woods were excavated, was that Eh was low (Eh < +300mV).

Generally, wood is attacked by aerobic fungi at the aerobic sites where Eh > +300mV. But it is not evident whether wood is attacked by anaerobic microorganisms or not at the anaerobic sites where Eh < +300mV. Even if it takes place, the speed of degradation is estimated to be very slow. Therefore, it is thought not only theoretically but also experimentally that anaerobic condition is necessary for wood to remain. And the reason why soil around wood became anaerobic, is thought to be that aerobic microorganisms consumed oxygen in the closed soil containing rich water.