

投稿論文(和文報告)

**TECHNICAL
REPORTS**

流木炭窯の大規模化に伴う炭化過程における 熱伝導・熱応力挙動の解析的考察と奥只見大窯

黒田重徳

正会員 電源開発(株) 関東支社土木センター (〒102 東京都千代田区九段北4-2-5)

ダム貯水池流木の炭化窯として伝統的土窯の大型化を図ろうとする場合、炭化過程における窯の熱膨張そして収縮の繰り返し履歴による材料のひび割れ、剝離、劣化等に対する構造的安定や耐久性などが懸念される。そこで、本文では炭窯の材料特性と熱伝導性それに伴う熱応力・変位挙動を定量的に予測検討し、窯の規模拡大に伴う設計上の課題と対策に言及する。その施工例として「奥只見大窯」の機能性と稼働時の挙動について検討し、解析的考察ならびに設計・施工の妥当性について検証する。

Key Words : coal kiln, numerical analysis, heat transfer, stress-strain, design, construction

1. まえがき

毎年、ダム貯水池に大量に流れ込んで漂流する、ダム貯水池の管理にとって大変やっかいな流木対策として、木炭化による再資源化が提案され、流木が多孔質で灰分の少ない高カロリーの良質な炭(流木炭)に再生できること、副産物として排煙ガスから有用な有機化合物の混合物(流木木酢液)が採取できることが明らかにされた¹⁾。その結果、流木の再生資源化活動の一般的要件といえる、①流木の再生技術が確立されていること、②再生品はそれぞれ有用な属性を有すること、③再生品への需要が期待できること、④資源となる流木は毎年大量に流入していること、は同時に満足したと考えている。しかしながら、流木の再生資源化を活発化させ長期継続させるためには、木炭化による再生品の経済性はどうか、すなわち競合品とのコスト競争力はどうか問われるところである。流木の特長を最大限に生かし、しかも、適正な方法で製炭窯の大規模化ならびに量産化を図るスケールメリット追求が残された重要な工学的課題の一つであると同時に、企業化のためにも乗り越えなければならない壁と言える。

一方、炭窯について、樹木の炭化末期で炭窯内の温度は600~1000℃にまで操作されて上昇するにもかかわらず、山の炭焼き人の長年の経験と勘で巧みに窯が築造され、炭焼き操作されてきた歴史的経緯もあり、この炭化過程における土窯の特性や熱力学的挙動について、あまり知られていないのが実情である。流木炭

窯の大規模化と量産化にあたり、例えば、窯の構造、築造材料、築造方法、材料特性、炭化熱の発生ならびに熱操作法、窯への熱伝導、窯の熱変位・応力、熱収縮・膨張によるひび割れ、熱による材料劣化、窯規模の適正化問題等工学的に説明できるデータと合理性には不明な点が数多い。

本文では、まず、伝統的手法で行われてきた炭焼き窯の炭化過程における熱伝導・熱力学的挙動についての予測的解析を行う。解析対象は炭化過程で最も過酷な熱ガスに曝され、かつ、築造の上からも最も困難な熟練を要するとされる上部構造である天井鉢とする。解析条件として、1) 窯の築造材料の熱伝導率の違いによる時系列的熱伝導への影響、2) 炭化熱による窯の変位、応力挙動、3) 天井鉢端部の拘束条件の違いによる力学的影響などについて解析検討を行う。ここで、熱応力では、特に、ひび割れの原因となる引張応力とその発生状態について明らかにして、炭焼き窯の設計、施工そして操作上、特に配慮すべき点について言及する。そして解析的知見をもとに、只見川最上流に位置する奥只見ダムに流木群を原材料にする円型炭窯の大規模化を計画・施工した、「奥只見大窯」を例に、解析的考察や設計・施工の妥当性や問題点について考察する。

2. 伝統的土窯と奥只見大窯

日本の製炭法には焼くときの温度条件の違いと焼き

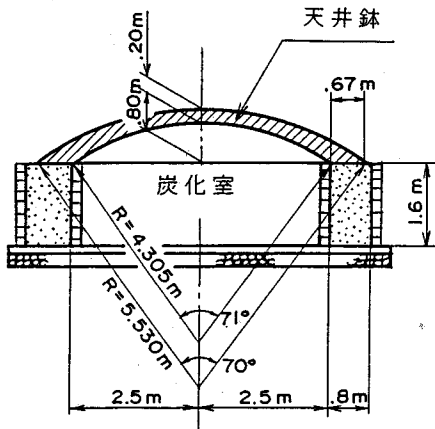


図-1 奥只見大窯の標準断面

表-1 標準的炭窯と奥只見大窯

項目	標準的伝統窯	奥只見大窯
窯種類	卵型	円型
平面形状	卵型	円型
奥行き (cm)	303	500
幅 (cm)	242	500
腰高 (cm)	106	160
生産容量 (kg)	600	2200

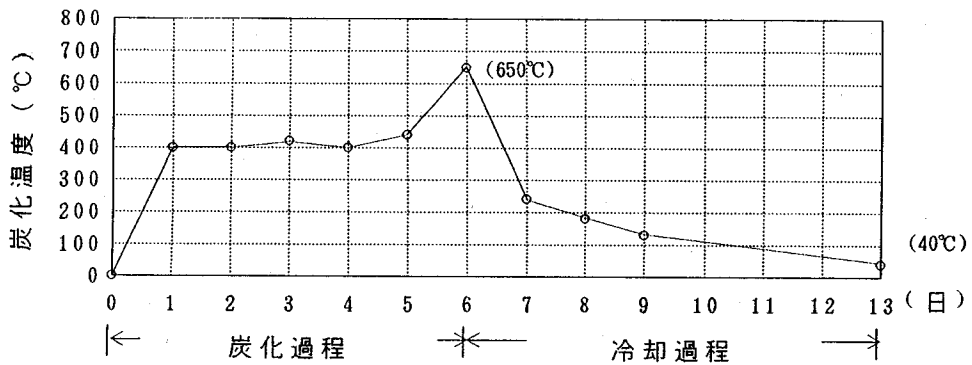


図-2 流木炭窯での炭化温度操作

終わった時の高温状態における炭の消し方、冷却の仕方の違いで、黒炭製炭法と白炭製炭法がある。そして、できあがる木炭も、火着きが良くて工芸品の香りを残す黒炭、金属のように硬くて火持ちの良い白炭とそれぞれ呼ばれて使い分けられている。窯内の温度は炭化末期で黒炭600~800°C、白炭1000°C位にまで上げて焼きあげる。この炭化過程の熱に耐えうるよう炭窯の天井、周壁は耐熱性のある土や岩石を巧みに用いて築造するのが日本の伝統的築窯法である。しかし、土で作った窯は熱による収縮が大きく天井がひび割れしやすい、高熱で土がぼろぼろになって壊れやすいことが知られている。そのため、統計的に割り出された平均的炭窯は、奥行き303cm、幅242cm、周壁高さ106cmと丈の低い卵型で、出炭量600kgの規模が標準的と言われている²⁾。これに対し、流木に大木の多い奥只見ダムでは、多量の大木を一窯で大量に木炭化する必要性と窯の大規模化による費用対効果を高める観点から、図-1に示すような直径500cm、周壁高さ160cmの円形型で、出炭量2200kgの大型窯を計画した。ここで、熱の流れがスムーズと思われる卵型の流線形からあえて円形を採用した背景には、大型化に伴う熱変位・応力をできるだけ

均等に分布させて材料負担を軽減させるねらいがある。日本の伝統的標準窯と流木利用の奥只見大窯について形状ならびに規模について比較したのが表-1である。

3. 円形炭窯の熱伝導と熱変位・応力解析

解析は有限要素法による非定常熱伝導・線形弾性熱応力解析³⁾により行う。

(1) 解析条件

a) 炭窯の解析モデル

解析対象域は炭窯の上部(天井鉢)構造とする。平面的に直径500cmの円形をし、断面的には天井中央で最小厚の20cm、端部で80cmの厚みを有する鉢状の軸対称鉢構造である。ここでは円筒座標系に変換した軸対称問題として取り扱い、天井鉢を上下方向に5分割、円周方向に20分割した100要素にモデル化する。

b) 炭化過程の温度条件

熱伝導解析に用いる温度条件は、炭窯内部で計測された図-2に示すような、流木の炭化過程から窯密閉後

表-2 解析ケースと解析条件

項目	ケース		
	1 A	2 A	1 B
土の締め固め度	密に	ゆるめ	密に
湿潤密度 (t/m ³)	1.9	0.5	1.9
熱拡散率 ×10 ⁻⁷ (m ² /s)	2.78	1.39	2.78
端部支持条件	水平可動	水平可動	固定
比熱 (J/(kg・K))	0.837	1.256	0.837
弾性係数 (kPa)		9806	
線膨張係数 (K ⁻¹)		1×10 ⁻⁵	
ポアソン比		0.4	

の冷却過程まで13日間の製炭サイクル窯内温度（最大650℃）を適用する。天井内面への熱入力条件は、窯の内周に沿って熱対流が一樣に生じているとして窯内面一様の温度分布とする。ただし、天井外面から大気への熱放射はここでは考えないことにする。

c) 窯材料の物性値

湿潤密度：天井鉢築造に用いる粘土材料は、最適含水比状態で繰り返し叩き締められて仕上げられている。ここでは、炭化過程における材料特性とおおまかな炭窯の熱挙動を把握する予測的解析がねらいであるため、解析上の湿潤密度 ρ は、窯土の締め固め度が両極端な2ケースを想定して、ローム土の最もゆるい土 $\rho=0.5\text{ g/cm}^3$ 、粘性土の最も締まった土 $\rho=1.9\text{ g/cm}^3$ の2種類について検討する。

熱伝導率：一般に、固体の熱伝導率、比熱、熱膨張率などは温度依存性があることが知られているが、ここでは温度変化に依存せず一定と仮定する。熱伝導率 λ について、土質の種類によらず土の湿潤密度がわかれば絶乾時の熱伝導率が推定できると、次式の実験式が報告されている⁴⁾。

$$\lambda = 0.0241\rho^2 + 0.207\rho + 0.0177 \quad (1)$$

ここで、 λ :熱伝導率(W/(m・K))、 ρ :湿潤密度(g/cm³)、ただし、 $0.4 < \rho < 2.0$

本式を2種類の窯土に適用すると、ゆるい土の場合、 0.092 W/(m・K) 、締まった土の場合、 0.463 W/(m・K) となる。

熱拡散率、比熱：熱拡散率 a は、 $a = \lambda / (\rho c)$ で表され、熱伝導率に比例、密度と比熱の積に反比例する。窯の比熱 c について、瓦粘土の比熱が $0.837 \sim 1.256\text{ J/(kg・K)}$ にあることが報告されている⁵⁾ので、ゆるい土の場合の熱拡散率は比熱 1.256 J/(kg・K) を適用して $1.39 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ 、締まった土の場合に比熱 0.837 J/

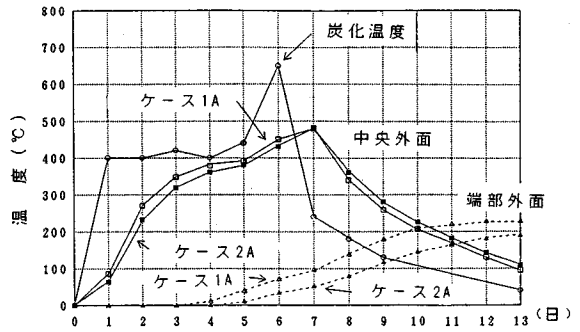


図-3 炭化過程における熱伝導性

(kg・K)を適用して $2.78 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ となる。材料の熱拡散率の比率は1:2である。

線膨張係数、弾性係数他：線膨張係数ならびに弾性係数は大きくなるに従い、窯の変位ならびに応力はそれぞれ増加するが、ここでは、焼かれた窯土の線膨張係数 α は $1 \times 10^{-5}\text{ (K}^{-1}\text{)}$ 、弾性係数 E は 9.8 MPa と仮定する。窯土のポアソン比 ν は 0.4 とする。

(2) 解析ケースと入力条件

図-2に示す炭化過程から冷却過程の窯内の温度条件に対し、a) 締まった窯土ならびにゆるい窯土の築造粘土材の熱拡散率の違いによる窯の熱伝導性（ケース1A, 2A）について、b) この伝導性の違いによる窯の変位、応力挙動（ケース1A, 2A）について、c) 天井鉢端部の拘束条件が、可動する水平ローラの場合と固定の場合の力学的挙動に与える影響（ケース1A, 1B）についてそれぞれ検討する。それぞれの解析ケースならびに計算条件をまとめて示したものが表-2である。

(3) 解析結果

a) 熱伝導性への熱拡散率の影響と温度分布

流木の炭化過程から冷却過程における熱拡散率の違い（ケース1A, 2A）による窯の熱伝導性シミュレーション解析結果の時系列的な熱伝導性について、天井鉢断面の中央部外面と端部外面での温度履歴を比較示したものが図-3である。炭化熱の天井鉢構造への伝搬は窯内温度に比し徐々に進行することを表している。中央部外面では、熱ピークになる7日後まで上昇し約480℃をピークに下降する。一方、端部外面では、熱伝導に大幅な遅れがみられ、冷却過程終了時においてもなお温度上昇を示すなど、窯内温度より逆に端部外面が高くなる温度の逆転現象が生じている。点火開始1日、4日後ならびに窯内温度が最高温度に達する6日後の天井鉢断面の等温線分布を図-4にそれぞれを示す、1日後の点火時は、窯内の温度を400℃まで急激に上昇させるため天井鉢内面に高温線が密に集中する。その後、

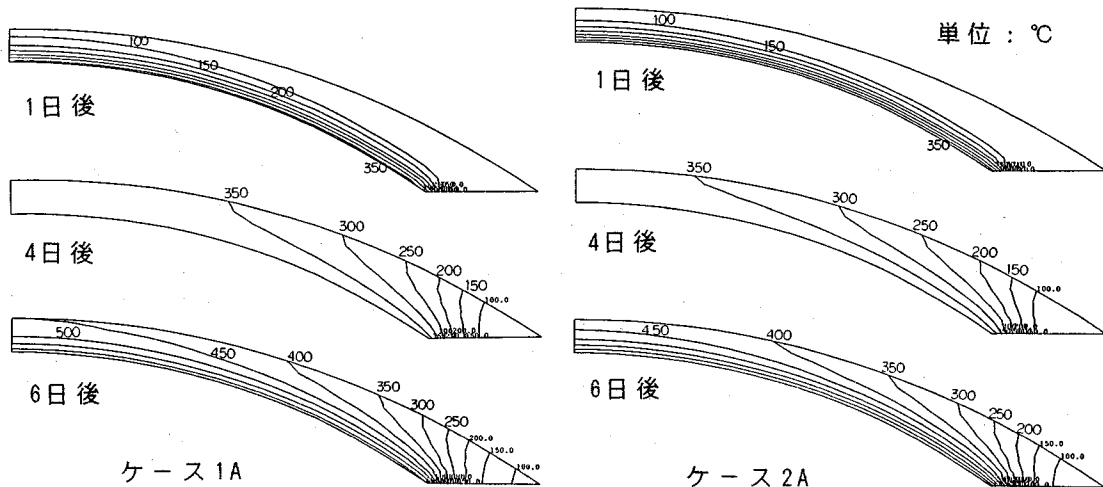


図-4 時系列的温度分布の推移 (ケース1A, 2A)

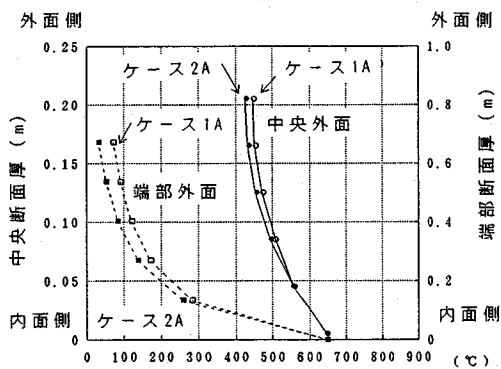


図-5 天井鉢の温度勾配 (切断面方向), 6日後

4日後までは窯内部に立て込まれた原材料を炭化させるため窯内温度を400℃に維持する。この間、熱量は内から外向きに中央部から端部に熱拡散が進行して次第に等温線は疎になり、断面肉厚のうすい中央部が端部に比べて温度が高い定常な状態になる。炭化末期の5日後より精錬のため窯内温度をさらに上昇させるため最高温度になる6日後には再び等温線が天井鉢内面側で密になる。炭化過程の温度操作に伴う熱伝導挙動は、築造材料の熱拡散率の違いにより、言い換えれば、窯土の締め固め度の違いによって内部の等温線分布も変化することを示している。天井鉢中央部ならびに端部の肉厚(横断)方向における温度分布の状態(6日後)を図-5に示す。中央部と端部での伝達温度分布比較において、端部外面が100℃以下に対し中央部外面は約450℃と大きな差が生じている。しかし両者を温度勾配で見ると、中央断面では比較的緩やかであるが、端部は外面温度が低いため、温度勾配は大きくなって

いる。

このような温度勾配は熱拡散率が小さい程(ケース2A)大きくなる傾向を示している。伝統的築窯法で、湿潤粘土を繰り返し、繰り返し叩き締めて造りあげていることは熱伝導性の改善という面からも合理性があると言える。

b) 熱変位・応力挙動への熱拡散率の影響と応力分布

製炭サイクルの中で、炭化過程での温度上昇そして窯閉後の温度下降と、窯は熱膨張過程と収縮過程を繰り返し履歴する。窯の自重による初期応力状態に対し、窯内温度が最大に達する6日後の、熱拡散率の違い(ケース1A, 2A)による円周方向応力 σ_θ 分布について図-6にそれぞれ示す。圧縮応力域は外面に向かう半ばで完全に消滅し外面全域で逆に引張応力が生じている。この引張応力は中央部外面で最も大きくなるが端部に近づくに従い小さくなる。この最大引張応力度は、熱拡散率の小さなケース2Aの場合により大きくなる傾向を示しており、約23.5kPa(0.24kgf/cm²)である。一方、熱拡散率の大きい場合の最大引張応力度は19.6kPa(0.20kgf/cm²)である。しかし、引張応力の発生する領域は、双方とも、外面表層付近に限定され内面まで到達してはいない。このような引張応力の発生相違は、天井外面に向かう熱の伝わり方に遅れが生じる結果、内面と外面の温度差が大きくなる。その温度勾配が大きい程(ケース2A)、応力勾配も大きくなっている。炭焼き現場においては、土窯の天井が熱でひび割れてしばしば落下することはよく知られているところである。解析結果は、窯土はよく締め固めて熱伝導性をあげることが窯のひび割れ軽減に効果があることを示唆している。

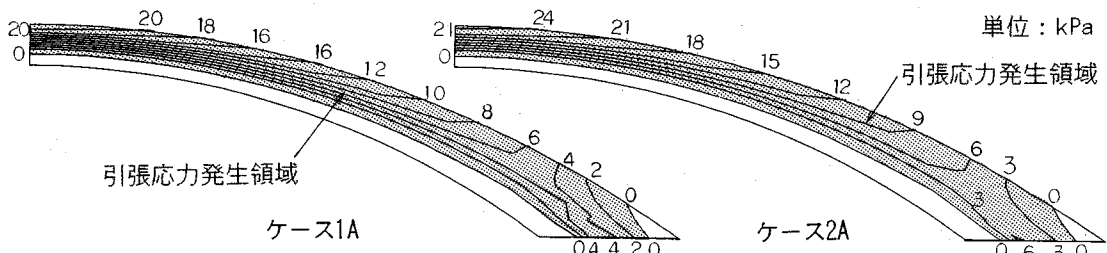


図-6 熱拡散率の応力分布 σ_θ への影響, 6日後 (ケース1A, 2A)

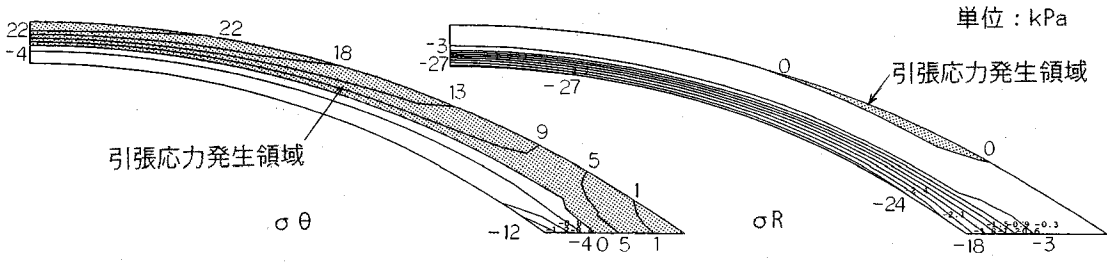


図-8 最大引張応力発生時 (点火時) の応力分布 σ_θ, σ_R , 1日後 (ケース1A)

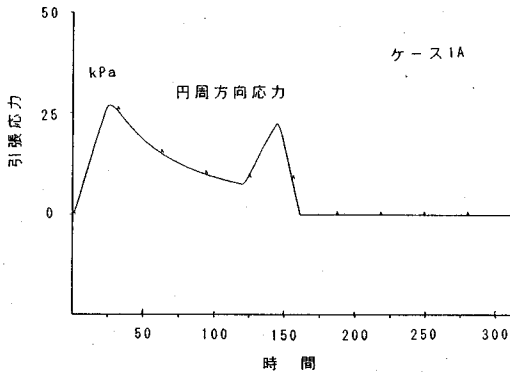


図-7 中央部外面 σ_θ の経時的変化 (ケース1A)

炭化過程での熱変位について、炭化熱に追従した温度上昇に伴い、中央部で鉛直方向上向きに端部で水平方向外向きに変位が生じる。最大変位量は最高温度に達する6日後に生じ、熱伝導率の大きい場合 (ケース1A) は中央部上向き方向に1.53cm、端部外向き水平方向に0.94cmである。また熱伝導率が小さい場合 (ケース2A) は中央部上向き方向1.63cm、端部外向き水平方向に0.85cmである。熱伝導率の大きい窯土の場合、中央部上向き方向変位は若干小さくなる。

c) 天井鉢中央外面の経時的応力変化

炭化温度操作の時系列的変化 (図-2) により、天井鉢に発生する応力分布とその大きさはそれぞれ異なる。最も荷がかかる天井鉢中央外面における円周方向応力 σ_θ の経時的変化を、ケース1Aの場合について、図-7に示す。 σ_θ について、炭化温度変化に応じて熱膨

張・収縮による応力が生じ、急激に400℃まで温度を上げる点火時(1日後)に25.5kPa(0.26kgf/cm²)、炭質を均質化するため温度を最高まであげる精錬時(6日後)に23.5kPa(0.24 kgf/cm²)と2つのピーク引張応力が発生する。最大引張応力が発生した点火時(1日後)の天井鉢の応力分布 σ_θ, σ_R を示したのが図-8である。円周方向応力 σ_θ では外面側でより大きな引張応力が発生する。その引張発生領域は外面全域に分布するが端部に近づくに従って小さくなる。中央外面で最も大きく26kPa(0.26kgf/cm²)の引張応力が発生する。半径方向応力 σ_R では内面側により大きな圧縮応力領域が生じるが、中央部から2.3m付近の外面に0.2kPa(0.002 kgf/cm²)と極小さいが剥離性引張応力領域が局部的に発生している。応力の経時的変化から、温度を急激に上昇させる点火時にピーク引張応力が発生することから、炭化温度操作において、窯への熱応力負荷軽減の観点からも原材料の乾燥と点火操作はできるだけ時間をかけてゆっくり行うことの重要性を示唆している。

d) 天井鉢端部、拘束条件の力学的影響と応力分布

端部固定の場合の天井鉢中央部外面における円周方向応力 σ_θ の経時的変化を、ケース1Bの場合について、図-9に示す。急激に400℃まで温度を上げる点火時(1日後)に34.3kPa(0.35kgf/cm²)と、最大温度に達する精錬時(6日後)に49.0kPa(0.50kgf/cm²)と2つのピーク引張応力が発生する。しかし、端部固定の場合は、点火時に最大引張応力が発生した端部条件が水平ローラの場合(ケース1A)と違って精錬時に最大応力度が発生する。そして、その最大引張応力度は水平ローラ

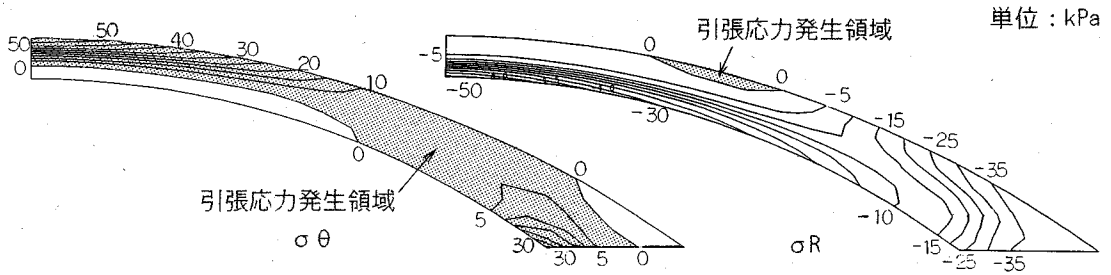


図-10 端部固定条件の応力分布 σ_θ , σ_R への影響, 6日後 (ケース1B)

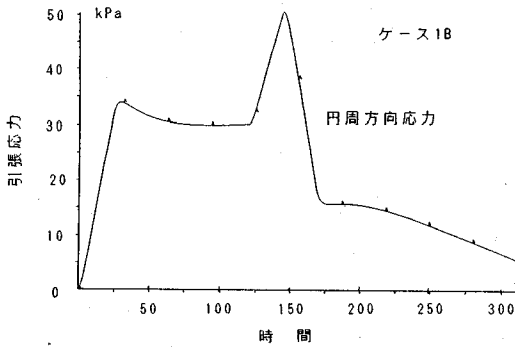


図-9 中央部外面 σ_θ の経時的变化 (ケース1B)

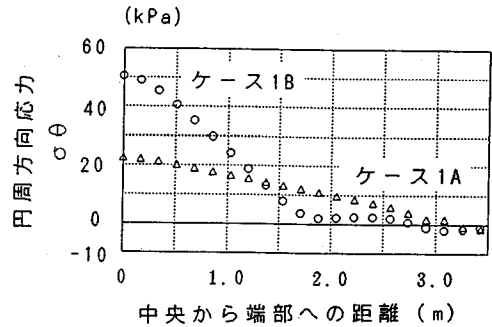


図-11 天井鉢外面の応力状態 σ_θ の比較, 6日後

の場合の約2倍とより大きくなる。天井鉢端部が拘束されない水平ローラと拘束された固定端でどのように窯の熱変位・応力に影響するかを、同様な熱条件の下で温度が最大に達する6日後の σ_θ , σ_R 分布について示したのが図-10である。円周方向応力 σ_θ について、水平ローラの場合、内面側は全面圧縮応力領域で外面が逆に引張応力領域という異面性があったが、端部固定の場合は、端部固定により全体の变形が拘束され中央部の曲率が大きくなり圧縮領域は内面中央部付近に限られる一方、引張領域が広範囲に分布する。特に、中央部外面で最大49.0kPa(0.50kgf/cm²)および端部内面で最大29.4kPa(0.30kgf/cm²)の引張応力領域の発生が見られる。中央部から端部に向かって約2m付近で引張領域が全断面で発生することから、天井落下の危険性を示唆している。天井鉢外面に時系列的に最大引張応力が発生する6日後の天井鉢外面の円周方向応力 σ_θ の分布状態について示したのが図-11である。端部固定の場合、水平ローラの場合より最大引張応力度が中央部で約2.5倍と急激に大きくなる傾向を示す。

窯の熱変位への端部拘束条件の影響について、最高温度に達する6日後の天井鉢の变形状態を図-12に示す。水平ローラの場合(ケース1A)は中央で上向き方向に最大1.53cm、そして端部では水平方向外向きに0.94cm変位する。これに対して端部固定の場合(ケース1B)

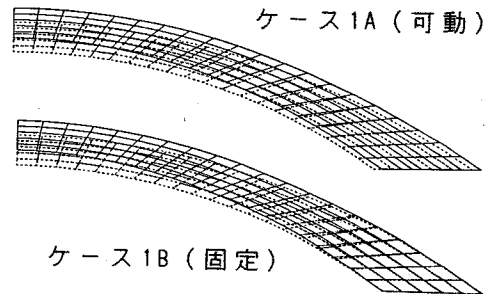


図-12 天井鉢の熱変形, 6日後 (ケース1A, 1B)

は、全体の变形が端部で拘束され中央部での曲率が大きくなる結果、中央で上向き方向に最大4.44cm変位する。この上向き変位量は水平ローラの場合の約3倍大きくなる。

e) 天井鉢外面から熱放散の影響

天井鉢外面を断熱境界としたケース1Aに対して大気との熱交換を考慮した場合の影響について検討する。天井外面からの熱伝達係数 h の大きさによって解析結果は左右されるが、ここでは、窯が外気に曝されており風速2.5 m/sによる熱交換があるとして $h=14.0W/(m^2 \cdot K)$ とした⁶⁾。熱応力計算(ケース1A')による6日後、中央部外面の円周方向応力 σ_θ の分布状態を図-13に示す。熱放散の影響で6日後の中央部外面は最大約

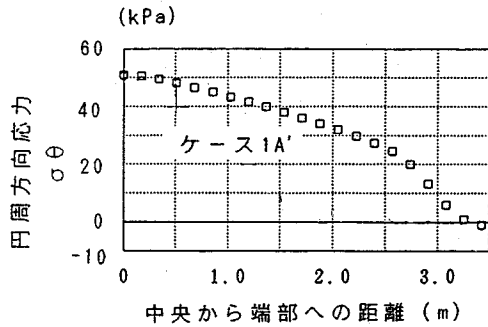


図-13 風による放熱を考慮した応力状態 σ_θ , 6日後
(ケース1A', ただし, $h=14.0\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

70℃までしか上がらない結果, 内外の温度差から横断面での温度勾配が大きくなり, 外面に生じる引張応力も大きくなっている. 最大引張応力は中央部外面で約49.0kPa(0.50kgf/cm²)である. 外面全面引張応力領域であるが, 内面は全面圧縮領域であることから, ひび割れが内部まで及ぶことはない. この場合の中央部上向き方向変位は1.42cmで, 水平方向の変位は0.50cmである. 窯天井からの熱放散を考慮した場合, 変位量は若干小さくなるが, 内外温度差が大きくなるため天井鉢構造にとっては引張応力よりひび割れが起こり易くなると言える. 実際の炭焼き窯は雨風から守るため屋根掛けなどが行われている.

(4) 解析結果のまとめ

熱伝導・熱応力シミュレーション解析結果をまとめると, 以下のように要約される.

熱伝導について,

- 1)炭化熱の熱伝導について, 流れは内から外へ中央部から端部へ拡散して天井鉢中央部と端部の間で遅れが生じる. 中央部でより高い温度分布となるが, 切断面での温度勾配は内外面での温度差が大きい端部でより大きくなる.
- 2)炭化温度操作による窯内温度の急激な変化時(点火時, 精錬時)は, 熱の伝わり方に遅れが生じ, 等温分布線が内面側が密に外側面が疎になり, 温度勾配はより大きくなる.

熱応力・変位について(端部が水平ローラの場合),

- 3)炭化過程において, 天井鉢外面全域に引張領域が発生する. 温度勾配が大きい程, 応力勾配も大きくなり, このピーク応力は点火時と精錬時に発生する. 最大引張応力は一気に400℃まで温度上昇操作する点火時(1日後)に発生し, その応力は中央部外面で25.5kPa(0.26 kgf/cm²)で, 端部に行くほど応力は低減する.
- 4)築造材料の熱拡散率の影響について, 熱拡散率の大

きな窯は, 温度勾配をより緩和させるため応力度が小さくなり有利になる.

- 5)炭化熱による変形について, 熱拡散率の大きな窯は中央外面で上向き方向に1.53cm, 端部外面で外向き水平方向に0.94cm変位する. 一方, 熱拡散率の小さな窯は中央外面で上向き方向1.63cm, 端部外面で外向き水平方向に0.85cm変位して中央部の曲率が上向きに若干大きくなる.

端部拘束条件の影響について(端部が固定の場合),

- 6)水平ローラ(可動)とする場合, 天井鉢に生じる引張応力は大幅な軽減緩和が見込まれるが, 端部固定の場合は, 全体的に変形が拘束されて中央部に集中, 上向き方向変位の曲率が大きくなる結果, 中央部外面の引張応力度が大きくなる. この最大引張応力度は精錬時(6日後)に発生し, 49kPaである. また, 中心から端部にむけて約2m付近の中間部において引張応力発生領域が内外に貫通する可能性がある. 端部拘束度は小さい程, 発生応力度は緩和される. 窯の変形について, 水平ローラの場合の中央外面上向き方向変位1.53cmに対して, 端部固定の場合は4.44cmと約3倍大きくなる.

天井鉢外面からの熱放散の影響,

- 7)天井鉢外面からの放熱は外面の温度低下を招く結果, 応力勾配は大きくなり発生引張応力も大きくなる.

4. 奥只見大窯の設計・施工と実挙動について

(1) 奥只見大窯の基本方針と施工

奥只見ダムでの流木炭窯の大型化(図-1)に伴い, 前述した数値解析的知見と従来の炭焼き窯作りの経験から, 基本的につきのような設計・施工方針で挑んだ.

- ①窯の大型化に伴う熱伝導性ならびに熱応力・変位の履歴挙動に対し, 窯の平面形状を円形型とすることで, できるだけ築造材料の均等負担を図る.
- ②窯の築造材料は, 予想される発生引張応力度に対して, 約98kPa(1kgf/cm²)程度以上の引張強度を有する必要がある. そのため, 当該ダム周辺で入手可能な山砂土(土質分類:シルト質砂SM)と耐火セメント(重量比13%)の混合により強度補強した材料を使用する. 今回初めて使用した築造材料の物理的・力学的諸性質の試験結果については表-3に示す.
- ③天井端部の力学的拘束条件は, 熱応力, 変形の軽減, ひび割れ落下の回避を図るため可動端とする.
- ④築造材料を最適含水比状態で繰り返し叩き締め, 窯は均一かつ高密度とする.
- ⑤天井端部の支持体は鋼材を配置して十分な断面強度と断熱性を確保する.

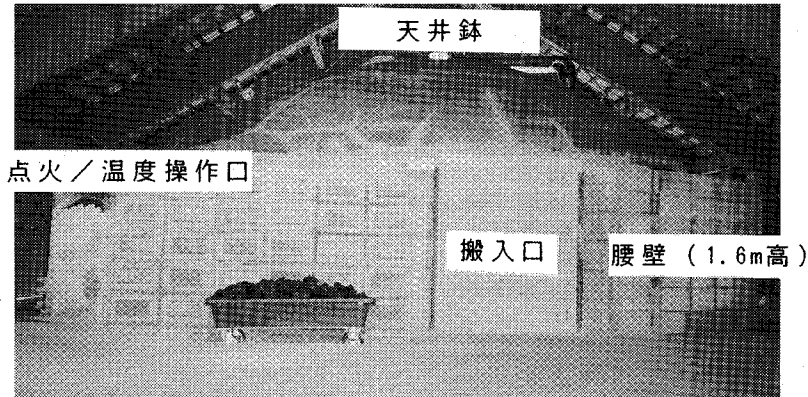


写真-1 稼働中の奥只見大窯

表-3 奥只見大窯の築造材料の性質

試験項目	試験値	新混合材
最大湿潤密度 (t/m ³)		2.07 (2.03)
最適含水比 (%)		15.6 (16.7)
間隙比		0.466 (0.511)
弾性係数 (MPa)	1日	162 (6)
	7日	777
	28日	1076
熱拡散率 (m ² /s)		* 3.055×10 ⁻⁷ (* 3.055×10 ⁻⁷)
線膨張係数 (K ⁻¹)		1.00×10 ⁻⁵ (1.00×10 ⁻⁵)
一軸圧縮強度 (kPa)	1日	1343 (60)
	7日	3306
	28日	4416

ここで、()内は現地山砂(シルト質砂)の試験値、

* は式(1)の適用により算定

⑥天井鉢外面からの熱交換を極力回避するため、炭窯自体を雨風から完全に遮断できる建物に格納する。

写真-1に1993年9月に初めて火入れして現在稼働中の奥只見大窯の様子を示す。

(2) 奥只見大窯の熱変位測定

製炭サイクルにおける奥只見大窯の変位挙動について、窯内温度100℃ごとに天井鉢中央外面の上方向変位ならびに端部外面の外向き変位を測定した。それらの測定結果を図-14に示す。中央部外面の変位は、炭化温度にかかわらず、終始、測定限界に近い極めて微

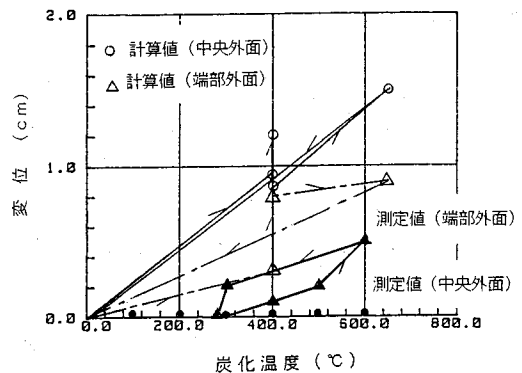


図-14 奥只見大窯の熱変位測定と計算結果

少な変位にとどまっていた。一方、端部外面は可動端として、炭化温度300℃位からはじめて側方変位が始まる非線形性が見られた。その後は温度上昇に応じてほぼ比例して変位が進行し、600℃で水平外向き方向に最大0.5cm変位した。炭化が終了し冷却過程に入ると、280℃位で再び変位0cmに原状回復する弾性的履歴を繰り返した。この間、炭化温度の上昇過程と下降過程の変位に差が生じるヒステリシス現象が認められた。

現在も、過酷な熱膨張・収縮の繰り返し負荷を受ける大窯の目視点検を継続しているが、天井鉢のひび割れ、剝離の発生、材料劣化あるいは気密機能低下などは確認されていない。

新材料の試験値(表-3)を適用した解析結果の変位挙動(図-14)について、中央部外面の変位挙動は、炭化温度操作に追随しながら変形が進行し最高温度に達する6日後上向き方向に最大約1.5cm変形する。端部外面の変位挙動は伝搬温度の遅れに応じて変形は徐々に進行し6~7日後側方方向に最大約0.9cm変位する。

奥只見大窯の変位と計算値の相違について、本解析の対象は大窯を簡略化した天井鉢のみの解析モデルを用いている、炭化温度は天井鉢内面で一律に同温度と

仮定したが実際は中央部で最も高温となる不等分布の可能性があり、実窯は約300℃を境に非線形挙動を示すが計算は線形で行っている、実窯は建物に格納して風の影響を遮断しているが大気へ熱伝達が行われている可能性がある、築造後の乾燥仕上げ過程で生じた外面の表面ひびの補修箇所初期ひずみを吸収して変位を緩和している可能性がある、などに起因したものと考えられる。これらの課題については解析精度を高めるため今後実測検証する必要がある。ともかく炭窯の大規模化を図り、その炭窯機能は製炭活動を通して十分満足できるものであることが今回確認できたことから、事前の準備として行った予測解析的考察ならびに新材料の適用を含む大窯の設計・施工法に妥当性はあったものと評価される。

5. 結論

本論文では、長年の間に培われた日本独特の技法により、良質な木炭が生産されてきた伝統的炭焼き土窯の炭化過程における熱力学的挙動を明らかにして、その合理性と炭窯の大規模化の可能性について検討した。その方法として、炭窯の天井鉢構造を解析対象としたモデルによる築造材料の物理的性質や熱拡散率、力学的拘束条件、天井面からの熱交換などをパラメータに、熱伝導と熱応力・変位挙動について数値シミュレーション（軸対称問題）を行い、それらの影響について検討した。

予測解析結果について、炭化熱の伝わり方の遅れにより天井鉢内部で温度勾配が生じ、この温度勾配が大きいほど応力勾配も大きくなること、特に、急激な温度変化を伴う点火時と精錬時で天井鉢での温度勾配は大きく、鉢外面の全域で引張応力によるひび割れ発生の可能性があり、また、天井鉢端部の力学的拘束度が高いほど鉢中央部での変位曲率が大きくなり、生じる引張応力度も大きくなること明らかになった。

これに対して、流木炭窯の大型化のための設計・施工として操作上の要点を要約すると以下の様である。

(1) 熱拡散率の大きい材料、すなわち締め固め度の大きい材料が温度勾配をより緩和することから、築造土は均一により高密度に施工する。伝統的築窯法で、湿潤粘土を繰り返して、繰り返して叩き締めして造りあげていることは熱伝導性の改善という面からも合理性があると言える。

(2) 窯の熱膨張・収縮は避けられないことから、ある程度の引張強度を有する築造土材の採用が有利である。

(3) 天井鉢端部の力学的拘束によって変位曲率が大き

くなり引張応力度も大きくなるため、気密性を確保しながら拘束はできるだけ緩和する。一般に伝統的土窯は端部拘束度が高いためか、しばしば天井鉢がひび割れして気密機能を損なったり、落下したりすることはよく知られている。

(4) 炭化過程での炭化温度操作について、急激な温度変化は温度勾配を大きくしてひび割れ誘因となるため、温度操作はなるべく緩やかに行き、発生応力を小さく抑制する、特に、点火時の緩やかな温度管理が重要である。

(5) 炭窯の設置環境について、天井鉢外面からの熱放射は温度低下を招き温度勾配を大きくすることから、雨風を遮断できる建物に格納する必要がある。

以上の解析的知見をもとに、毎年、大量に流入してくる流木群の再資源化を可能にすること、そのために大量生産というスケール・メリットによるコスト競争力をつける必要から円形大窯を独自に考案し、奥只見ダム近傍に設計・施工した。その際、築造材料についてもダム近傍で採取できる山砂にセメントを混合して強度補強した経済的な新混合材料を開発、今回はじめて適用した。竣工後、火入れした奥只見大窯の天井鉢で変位挙動測定を行った結果、炭化温度約300℃を境にして変位の非線形性がみられるものの、製炭サイクルでは伝搬温度に応じて変位0～0.5～0cmの弾性的挙動を繰り返していることがわかった。その後も、過酷な熱膨張・収縮の繰り返し負荷を受ける大窯の安定性、機能性、耐久性についての目視点検を継続しているが、天井鉢のひび割れ、剝離等の発生、材料劣化あるいは気密機能低下などは生じておらず、奥只見ダム貯水池に毎年漂着する大量の流木群の再生資源化活動としての製炭事業は順調に続けられている。

以上、熱力学的側面から炭窯の検討を行ってきたが、今後、炭化過程における熱流体現象と熱収支という伝熱学的解明も取り組むべき研究課題と考えている。

謝辞：本報告における数値計算は（株）開発計算センター井田文雄氏に、奥只見大窯の施工、管理運営は小出電力所の木村英雄、中西啓二の両氏に、試験分析では総合技術試験所の小菅正敏氏の協力を戴いたことを記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 黒田重徳、小山喜久二：ダム貯水池流木の木炭化による再資源化、土木学会論文集、No. 503/II-29, pp. 177-186, 1994, 11.
- 2) 岸本定吉：木炭の博物誌、pp. 140, 総合科学出版, 1984.

- 3) 矢川元基他：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1991.
- 4) 黒木勝一他：土壌の熱物性に関する実験的研究，建材試験情報，Vol. 25, No. 4, pp. 6-16, 1989.
- 5) 山本順他：いぶし瓦の高品質化 比熱について，高知県工業試験場報告，No. 21, pp. 23-26, 1990.
- 6) 横山慎司他：地表面における熱伝達係数について，農業土木学会大会講演要旨集，Vol. 1993, pp. 124-125, 1993.

(1995. 8. 9 受付)

AN ANALYTICAL CONSIDERATION AS TO HEAT TRANSFER, HEAT STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF A LARGE SCALE COAL KILN DURING CARBONIZATION PROCESS AND THE OKUTADAMI COAL KILN

Shigenori KURODA

To scale up the traditional clay coal kilns as they are for the purpose of carbonizing voluminous drift-woods in reservoirs can be questionable from the viewpoints of the structural stability and durability, because of taking place of cracks, exfoliation and deteriorations caused by high heat expansion and its shrinkage through cyclic heat process. In the paper, numerical studies as to heat transfer, stress-strain and deformation behaviors during carbonization process using a large scale kiln model will be examined in order to refer to the problems and their solutions on the design antecedently. Finally, the large scale OKUTADAMI kiln applied above lessons learnt is constructed and operated satisfactorily.