

UDC 674.038.3 : 662.612 : 536.44

おがくず堆積層の熱発火限界温度

琴 寄 崇*

Critical Ignition Temperatures of Wood Sawdust Layers

by Takashi KOTOYORI*

There exists many research reports on various aspects of pyrolysis and combustion phenomena of wood or woody materials. Instances, however, have been only a few so far where the critical ignition temperatures of bulky stacks of wood sawdusts were measured actually. As for that point, the works by Akita¹⁾ or by Gross et al.²⁾, and lately by Anthony et al.³⁾, by John⁴⁾ and by Schliemann⁵⁾ are quite precious.

In the present work, critical ignition temperatures of fifteen species of wood sawdust layer, assuming each to be stacked in hot surroundings in air at normal pressure, were estimated with an adiabatic self-ignition testing apparatus (called SIT) following a procedure. Both apparatus and procedure have been developed at RIIS.

A detailed description of the apparatus has been presented elsewhere⁹⁾. So the procedure to estimate the critical ignition temperature of any self-heating substance and the results obtained when the procedure was applied to wood sawdust layers are mainly described in this report.

An equation [eqn. (2)] holding for the self-heating process under an adiabatic zeroth-order assumption is first shown. Then a relation [eqn. (9)] between Frank-Kamenetskii's critical condition for thermal ignition and equation (2) is derived. If we use eqn. (9), we may dispense with direct knowledge of the individual values of molar heat of reaction, apparent activation energy, frequency factor, thermal conductivity or specific heat of the substance, so far as the calculation of critical ignition temperature is in question. The only data required to estimate the temperature is the thermal diffusivity associated with the material, besides data obtained with SIT.

Wood species tested are Telaling (a sort of the Southeast Asian arbor), Meranti (*ditto*), Sawara cedar, Japanese cedar, Japanese red pine, Japanese cypress, Zelkova, Paulownia, Western red cedar, Douglas fir, Port Orford cedar, Alaska yellow cedar, Western hemlock, Sitka spruce and Eli ayanskya (a Siberian arbor).

Wood chips are pulverized on an ultra centrifugal mill, and size-graded to 35~60 mesh by sieving.

Measuring conditions are as follows: sample amount, 300 mg; sample container, silica cell (*ca.* 2 ml); starting temperature, 150~178°C; the SIT apparatus is left for 270 minutes at the starting temperature in nitrogen atmosphere, to remove all of the moisture from wood sawdust and to establish thermal equilibrium. The other measuring procedures have been described elsewhere⁹⁾.

Main conclusions are as follows:

1) The oxidative heating process of wood sawdusts proceeds, showing an almost linear temperature rise rate which varies with the starting temperature, at temperature ranges up to about 180°C under adiabatic conditions.

2) The relative liability of wood species to heat oxidatively is scarcely recognized by thermal analysis such as TG-DTA, meanwhile it can be clearly distinguished from one species to another under adiabatic conditions.

3) Assuming wood sawdust to be stacked in a form of infinite layer at a thickness of 60.96 cm (2 feet),

* 化学研究部 Chemical Safety Research Division

the critical ignition temperature is estimated to range from 118 for Zelkova to 142°C for Sitka spruce. Zelkova and Western red cedar are relatively easy to ignite, meanwhile Sitka spruce and Western hemlock are relatively hard to ignite. Paulownia may also belong under a category that is hard to ignite. Douglas fir and Port Orford cedar are medium in ignitability.

4) The critical ignition temperatures of wood sawdust layers estimated by calculation, following the procedure developed at the RIIS, agreed in the result reasonably with a few real data observed on wood sawdust stacks of similar sizes. So we can say that the procedure is applicable to estimate relatively and quantitatively the ignitability of any stacks of wood sawdust, at least.

Keywords: Critical ignition temperature, wood sawdust, self-ignition, thermal diffusivity.

1. 研究の目的

製材工場や家具工場など木材加工を行う事業場においては多量の木粉（おがくず）や削り屑などが発生し作業場内外に飛散堆積するため、これらによる火災爆発事故が発生しやすい。ちなみに、木屑・かな屑・鋸屑が関与した火災は、少し古いですが、損害保険料率算定会の作成に係る火災統計によれば、昭和45年から51年にかけて国内にて毎年1,100件前後発生している。したがって、これらの物質による火災爆発事故を防止するための基礎資料として役立たせるために、これらの熱的性質や発火性状を研究すべき必要性は依然として存在していると考えられる。

木材ないし木粉類の燃焼あるいは熱分解に関する研究はもちろん火災研究上の基本的なテーマの一つであるため、それらに関する報告例は古くから少なくないが、木粉類の断熱的酸化発熱性状を精密に測定したり、それらが大量に堆積している際の熱発火限界温度（限界発火温度ともいう、一定の堆積形状をとりつつ一定温度の常圧空气中に置かれているのみで断熱条件下にない物質の究極的な発火をもたらす最低の雰囲気温度）を実際に測定した例は極めて少ない。その点、秋田¹⁾、Gross *et al*²⁾、最近では Anthony *et al*³⁾、John⁴⁾および Schliemann⁵⁾らの仕事は大変貴重である。

本研究においては堆積している木粉類の火災爆発危険性を評価するための基本的なデータの一つとなり得るものとして熱発火限界温度（以下、 T_c 値という）を取り上げ、従来当所において開発してきた手法に基づき^{6),7)}、15種の木粉類について各々この値を算出し、材種によって発火温度がどの程度異なるかをみると同時に、これらの温度レベルを木粉類による発火事故を防止するための温度管理上参考となるデータとして役立たせることを第一の目的とし、一方、これらの計算値と上述の僅かに存在する実測値を比較することにより本法の妥当性を検証することをも目的とした。

なお前述のように、15種類もの木粉あるいは木材について、材種によるそれらの発火性の違いを、熱発火限界温度を基準として用いることにより相対的かつ定量的に測定した研究例は未だない。したがって本報はこの方面における初の報告例ともいえるものである。

供試材種として、国内において汎用されているものの中から、次の材種を選んだ。すなわち、杉、檜、松、桐、けやき、さわら、テラリン（東南アジア材の一種）、メラ

ンチ（同左）、米杉、米ヒバ、米ヒ（檜）、米松、米ツガ、シトカスプルスおよび北洋エゾ松の15種である。

2. 熱発火限界温度について

自然発火あるいは低温発火とは、一般に、熱に不安定な物質が常温付近の環境に置かれた時僅かに酸化ないし自己分解して発熱するために、長時間経過するうちに物質中に熱や活性物質が蓄積して行き、やがて反応が急進して遂には発火爆発するに至る現象をいう。

ところで、ある物質が実際に発火するにあたっては、そのものの堆積状況や粒度、発熱量、反応の激しさ、熱伝導率や比熱等の熱物性値、空気や水分や触媒作用を有する物質の介在、物質の履歴など、いくつかの因子が影響するが、それらを踏まえつつ、何といてもその場の温度の如何が発火の生起を左右する最も重要な条件となることは論をまたない。

ある物質が一定形状をなして包装ないし堆積貯蔵されている時、その内部で発熱が生じた場合、発生した熱は物体の外部表面から雰囲気中へ逸散して行く。したがって、一般的には物体の温度は雰囲気のと平衡を保ちつつ一定値に維持されることになる。しかしながら、発熱速度には物質の温度の上昇と共に指数関数的に増大して行く性質があるので、発熱速度が熱損失速度に打ち勝ち蓄熱現象が開始され、遂には発火をもたらすような限界の温度が各物質ならびに各堆積状況について存在することとなる。

このような熱発火限界温度を各物質ならびに各堆積状況について把握しておくならば、発火事故を防止するための温度管理上、現実に信頼し得る目安として役立つこととなる。 T_c 値を実験的に測定する試験法としては、市販流通用の包装状態にある物質を対象とする等温貯蔵試験や SADT^{*}試験等が試みられてきたが、これらの試験法は未だ十分に確立されている訳ではなく、それに、実規模試験は必ずしも容易ではないので、もしも、少量の試料につき理論的根拠に基づき、物質の発熱反応に関するパラメータや熱物性値を用いて実測値にほぼ見合う T_c 値を算出予測できるようになるなら、それに越したことはない。

算出法にも、世界的にみて、これまでいくつか試みられてきたものがあるが、当所においても、自然発火試験

^{*} 自己加速分解温度の略。市販の最大サイズの包装状態にある物質が一定温度の空間に格納されている時、丁度一週間後にそのものの発火をもたらすような温度をいう。

装置（以下、SITと略称）なる断熱型の熱安定性試験装置から得られる物質の発熱反応に関するパラメータおよび別途測定される当該物質の熱拡散率を、Frank-Kamenetskiiによって初めに提出された熱発火条件式から誘導して得られる、 T_c 値算出用の式に代入することにより、この値を求める手法を、それが従来提案されてきた諸法よりはるかに容易で、しかも精度の良い値をもたらすものとして、開発してきた*2。

ちなみに、この測定に用いるSITも当所で開発したものであるが、これについては別報が既に出ている^{8),9)}。そこでこの報告においては、 T_c 値を算出するための数式の誘導ならびに粉体の熱拡散率を求めるための一測定法を説明した後、本研究の目的に沿い本手法を堆積木粉層の T_c 値算出に適用した結果について述べることにする。

3. T_c 値算出のための数式の誘導

3.1 断熱零次なる仮定の許に自己発熱過程について成立する式

試料が T [K] なる温度において自然に発熱する時、そのものが断熱条件下にあること、かつ、発熱反応の次数が零であること、という二つの仮定を設定すると、エネルギー保存則に基づき一般に(1)式が成り立つ。

$$c_p \frac{dT}{dt} = \Delta H \cdot A \exp\left[-\frac{E}{RT}\right] \quad (1)$$

ここに T [K]、 c [J mol⁻¹ K⁻¹]、 ρ [mol cm⁻³] および ΔH [J mol⁻¹] は各々試料の初期温度、モル熱容量、モル濃度およびモル反応熱であり、かつ、 E [J mol⁻¹] および A [mol cm⁻³ min⁻¹] は各々当該発熱反応の速度定数の見掛けの活性化エネルギーおよび頻度因子である。

さて、この場合、 T なる温度付近の微少な温度範囲内においては昇温速度 dT/dt は実際上一定値をとると仮定すると、(1)式は容易に積分できることとなる。そこで、定積分した後、両辺の自然対数をとれば(2)式が得られる。

$$\ln \Delta t = \frac{E}{RT} + \ln \left[\frac{\Delta T \cdot c_p}{\Delta H \cdot A} \right] \quad (2)$$

ここに、 Δt min は試料温度が T [K] から $(T + \Delta$

$T)$ [K] まで上昇するに要する時間である。(2)式は、 T の上方、数 K の温度範囲内において SIT によって記録される断熱的自己発熱軌跡に対して適用し得るものである*3。かくして $\ln \Delta t = (a/T) + b$ なる実験式の勾配 a および切片 b は各々、

$$a = \frac{E}{R} \quad (3)$$

$$b = \ln \left[\frac{\Delta T \cdot c_p}{\Delta H \cdot A} \right] \quad (4)$$

と表わされることとなる。

3.2 Frank-Kamenetskii の熱発火限界条件と(2)式から誘導される式

Frank-Kamenetskii によって提出された熱発火限界に関するパラメータ δ_c は以下の関係式にて表わされる。

$$\delta_c = \frac{\Delta H \cdot E r^2 A}{\lambda R T_c^2} \exp\left[-\frac{E}{RT_c}\right] \quad (5)$$

ここに r [cm] および λ [J cm⁻¹ K⁻¹ min⁻¹] は各々堆積している物質の寸法因子と熱伝導率である。

さて、Frank-Kamenetskii の熱発火限界条件式は非断熱条件下における零次反応に基づく発熱過程と熱損失過程の間のバランスに基づいて成立している。ところで、(2)式は断熱条件下という前提に立つため発熱過程のみを対象としている。しかしながら、発熱過程に関する限り、両式とも物質の発火に先立つ同一の緩慢な発熱過程を対象としている点では共通している。それ故、(2)式にみられる E 、 A や ΔH 等の諸因子と(5)式中の対応するそれらは各々同一の物理量を表わしていると考えられる。

(5)式の両辺において自然対数を取り整理すると、

$$\ln T_c + \frac{(E/R)}{2T_c} = \ln r + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(\Delta H \cdot A)(E/R)}{\delta_c \cdot \lambda} \right] \quad (6)$$

となる。ついで、(6)式に(3)および(4)式を代入して (E/R) や $\ln(\Delta H \cdot A)$ を消去すると、

$$\ln T_c + \frac{a}{2T_c} = \ln r + \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{a \cdot \Delta T \cdot c_p}{\delta_c \cdot \lambda} \right) - b \right] \quad (7)$$

を得る。ここで、熱伝導率は(8)式におけるように熱

$$\lambda = \alpha \cdot c_p \quad (8)$$

拡散率 α [cm² min⁻¹] と単位体積当りの熱容量 c_p [J cm⁻³ K⁻¹] の積として表わされるので、最終的に(9)式が

*2 ただし、本手法は一定の堆積条件下にある物質の熱発火限界温度値のみを示すに過ぎず、誘導時間、つまり保温開始後どれほどの時間が経ってからその物質が発火するか、については全く予言できない。

*3 SIT の試料セル周辺において試料がその初期設定温度から数 K 程度昇温する間はほぼ完全な断熱条件が成立することが実測により確かめられている。

得られる。

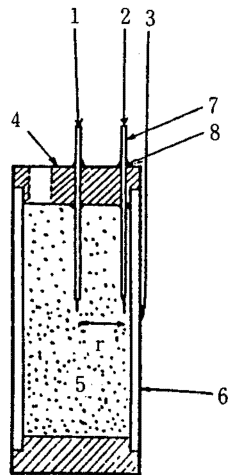
$$\ln T_c + \frac{a}{2T_c} = \ln r + \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{a \cdot \Delta T}{\delta_c \cdot \alpha} \right) - b \right] \quad (9)$$

(9)式によれば、 T_c 値の算出のみを目的とする限り、その物質の ΔH 、 E 、 A 、 λ や c 等の個々の値は知らなくても済み、SIT等の断熱型の熱安定性試験装置から直接得られる a 、 b や ΔT 等の実験データの他、当該物質の α 値のみ承知していればよいことになる。

なお、当然のことながら、SITならびに α 値測定装置の試料セルへの物質の充填密度 ρ は実際の包装ないし堆積状態におけるそれとできるだけ一致させねばならない。

4. 定速昇温法による粉体用熱拡散率測定装置

木粉類の熱拡散率は、名工試の小坂氏によって開発され(佛真空理工によって製品化された、定速昇温法熱拡散率測定装置を用いて測定した。この装置の測定原理は、均一加熱炉内に円柱状の試料容器を置き、その中に粉体試料を詰め、容器の上下方向への熱リークが無視できるとして、容器側面を θ [K/min]なる一定昇温速度で加熱して行く時、試料内にて半径方向に生ずる温度差 ΔT [K]は昇温開始後数分以内に一定となり、その際、熱拡



1,2,3,CA sheath thermocouple 0.5 mm ϕ ; 4, fire brick; 5,powder sample; 6,metallic cylinder 30x34x80 mm; 7, alumina insulating tube; 8, cement.

Fig. 1 Sample cell of the effective thermal diffusivity measuring apparatus.
粉体試料の有効熱拡散率測定用の試料容器

散率 α [cm²/min]と諸量との間に、

$$\alpha = \frac{r^2 \cdot \theta}{4 \cdot \Delta T} \quad (10)$$

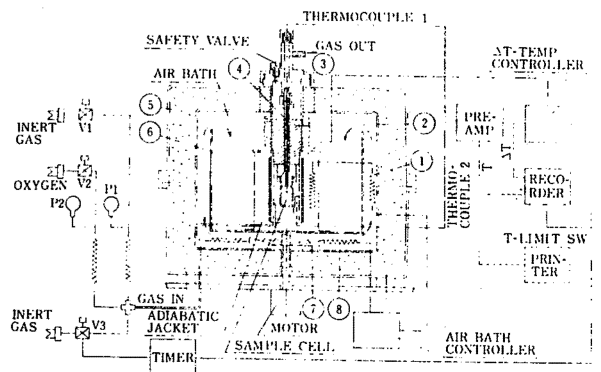
なる関係が成立することを利用するものである (Fig. 1)¹⁰⁾。ここに、 r [cm]は容器内の中心と周辺にそれぞれ挿入されている2本の熱電対の先端間の距離である。

5. 測定法

5.1 SITのスタート操作法

酸化発熱性物質に関するSIT測定法は既に報告してあるが^{8),9)} (Fig. 2), 本研究においては木粉の性質に鑑み、その一部を変更した。

300mgの木粉試料を内容積約2 mlの、底に通気孔のある、セルに充填する。次に、試料温度測定用熱電対を試料の中心部に挿入する。このようにして用意した試料セル系を断熱ジャケット内に挿入した後、2 [ml min⁻¹]の流量にて窒素ガスの系内への送給を開始する。初期試料温度はエアバスについている温度ダイヤルをセットすることにより好みのように設定できる。ついでパワーをスイッチオンしバス加熱を開始する。その後270分間、装置を初期試料温度に保持したままにしておく、というのは木粉等の天然物をSITにかける場合、水分が抜け切って試料周りに熱平衡が達成されるまでに長時間を要することと、また、脱水過程が続く間は、たとえ測定を強いてスタートしたとしても、脱水による吸熱が支配的とな



1, thermocouple; 2, glass wool;
3, sample holder assembly; 4, silica tube; 5, glass wool;
6, wind guide plate; 7, fan; 8, heater.

Fig. 2. Block diagram of the self-ignition testing apparatus.
SITの構造

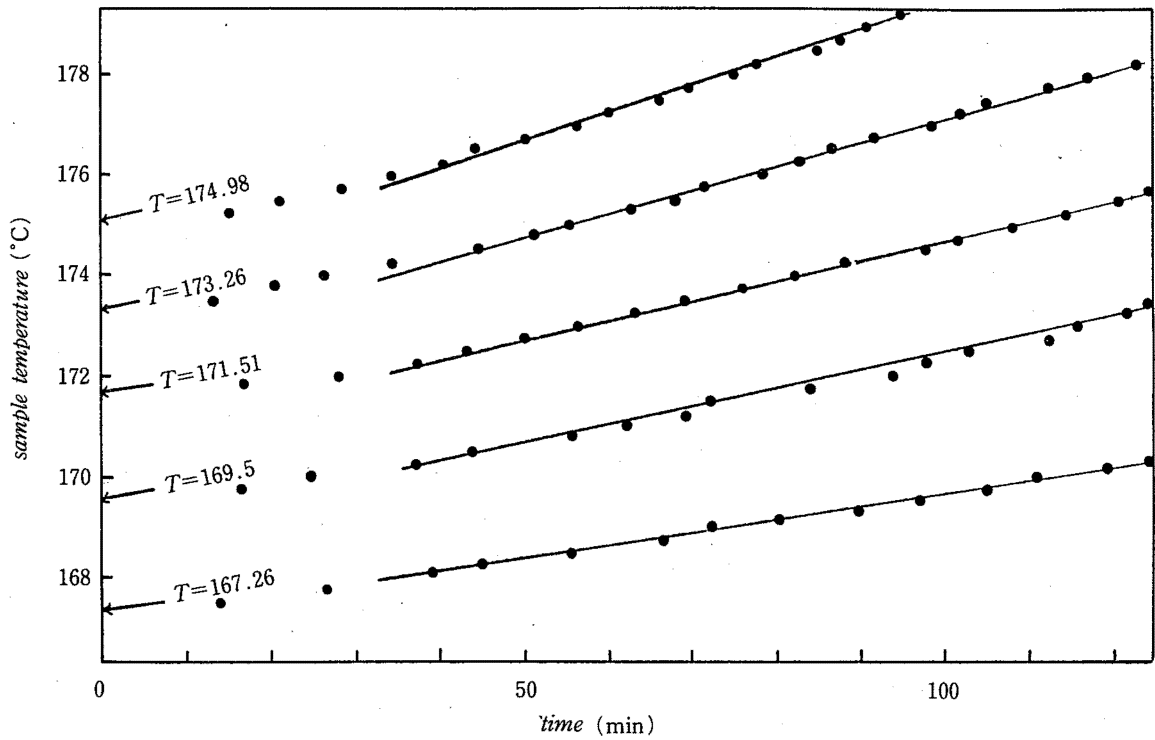


Fig. 3 Adiabatic oxidative heating loci of Port Orford cedar sawdust.
米ヒ粉の断熱的酸化発熱軌跡

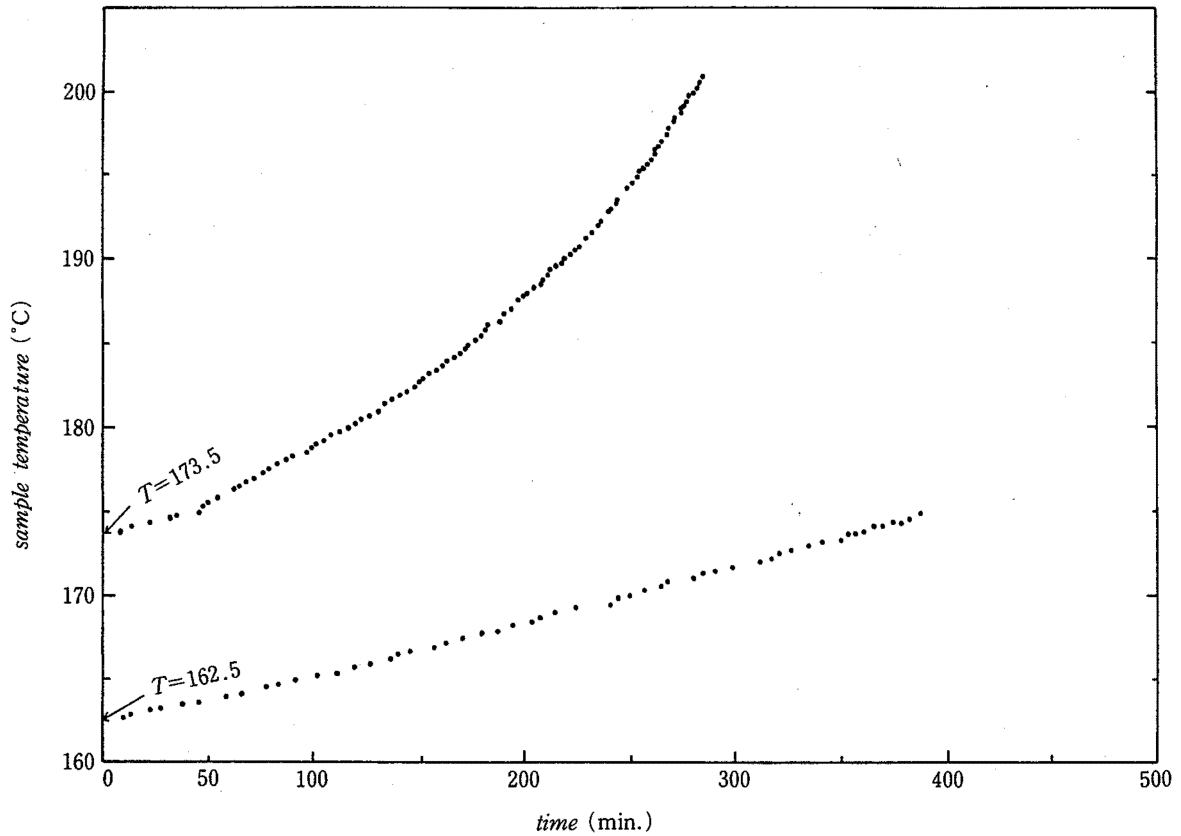


Fig. 4 Adiabatic oxidative heating loci of Western red cedar sawdust with wider temperature increments.
米杉粉の比較的広い昇温幅にわたる断熱的酸化発熱軌跡

って酸化による発熱が覆い隠される現象が生ずることがあるからである。熱処理終了後、まず zero-suppression 操作⁹⁾を行い、その直後、2 [ml min⁻¹] の流量にて系内への空気送給、断熱制御ならびに酸化発熱過程の記録を開始する。

5.2 木粉類の熱発火限界温度の算出手順

a. まず、バンドソーとニッパーを用いて目視により供試材中の均質とみられる部分から約 2~3 mm 角のチップを約 20g 作成し、ついでこれを西独 Retsch 社製の ultra centrifugal mill にかけて木粉とし、その後 35~60 mesh に篩別する。

b. 上記のスタート操作法に従い、初期試料温度を 150 ないし 170℃ として各種木粉の断熱的酸化発熱軌跡を記録する。Fig. 3 に米ヒ粉に関する軌跡を例示する。これらの場合スタート後約 30 分間は試料セル内外の窒素雰囲気は空気によって置換されて行くにつれて、断熱的酸化発熱反応の速度が次第に加速して行く様子がみられる。

木粉類の断熱的酸化発熱過程を SIT によって記録してみると、それらはほとんど直線状に昇温して行くことが観察される。たとえば、米杉粉について比較的広い昇温幅にわたって断熱条件下における酸化発熱過程を記録してみると、160 から 175℃ に亘る温度レベルにおいてはその発熱軌跡はほとんど直線状であるが、180℃ 以上に昇温した後においては昇温速度は次第に加速して行く様子がみられる (Fig. 4)。同様な事が Akita¹⁾, Anthony *et al*²⁾ や Schliemann⁵⁾ によっても既に報告されている。そこで、本研究においては昇温軌跡の直線の上昇部分の傾斜を当該木粉の発熱反応の速度に相当する物理量として用いることとした。

c. 各昇温軌跡の直線部分につき試料温度が 1.25K なる ΔT 値だけ上昇するに要する時間 Δt 分を読み取り、 $\ln \Delta t$ 対 $1/T$ プロットを作成する。Fig. 5 に米ヒ粉についてのプロットを例示するが、用いたデータは Fig. 3 より採録したものである。15 種類の木粉すべてについてのプロットは Fig. 6 に掲げている。この図を一見すれば木粉類のおよその相対的酸化発熱 (つまりところ、発火) のし易さを知ることができよう。

(3) および (4) 式によって表わされる係数 a および b の値を、これらのプロットのそれぞれにつき最小二乗法によりコンピュータを用いて求める。結果は Table 1 に掲げている。

d. 定速昇温法により各種木粉の熱拡散率 α 値を室温および 100℃ にて測定する¹⁰⁾。木粉類の場合、いずれの

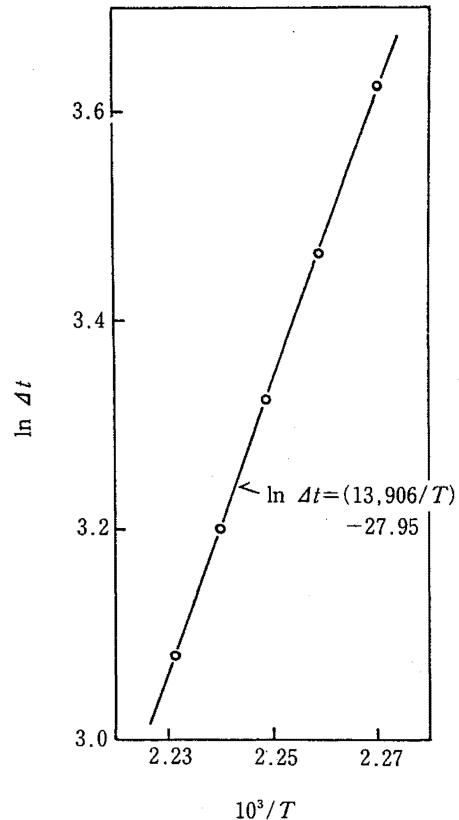


Fig. 5 The $\ln \Delta t$ vs. $1/T$ relationship for Port Orford cedar sawdust, plotted in accordance with eqn. (2). Data correspond to those of Fig. 3.
米ヒ粉についての $\ln \Delta t$ 対 $1/T$ プロット

材種についても α 値は二つの温度においてほとんど一定の値を示した。これらの値も同じく Table 1 に掲げている。

e. 木粉の堆積形状を層厚 $2r=60.96\text{cm}$ (2 feet) の無限平板、すなわち、 $\delta_c=0.88$ 、と仮定する。

f. これらの数値を (9) 式に代入すると、Table 1 に掲げるような木粉類の T_c 値がそれぞれ求まる。Table 1 においては熱発火限界温度の高い材種ほど下に位置するように配列してある。

6. 結 果

① 木粉類は約 180℃ に達するまでは酸化反応により各温度レベルに相応する一定の昇温速度を示しつつ発熱して行く。

② 当所において案出された手法に従い、計算によって得られる木粉類の T_c 値は、材種は異なるものの、同様

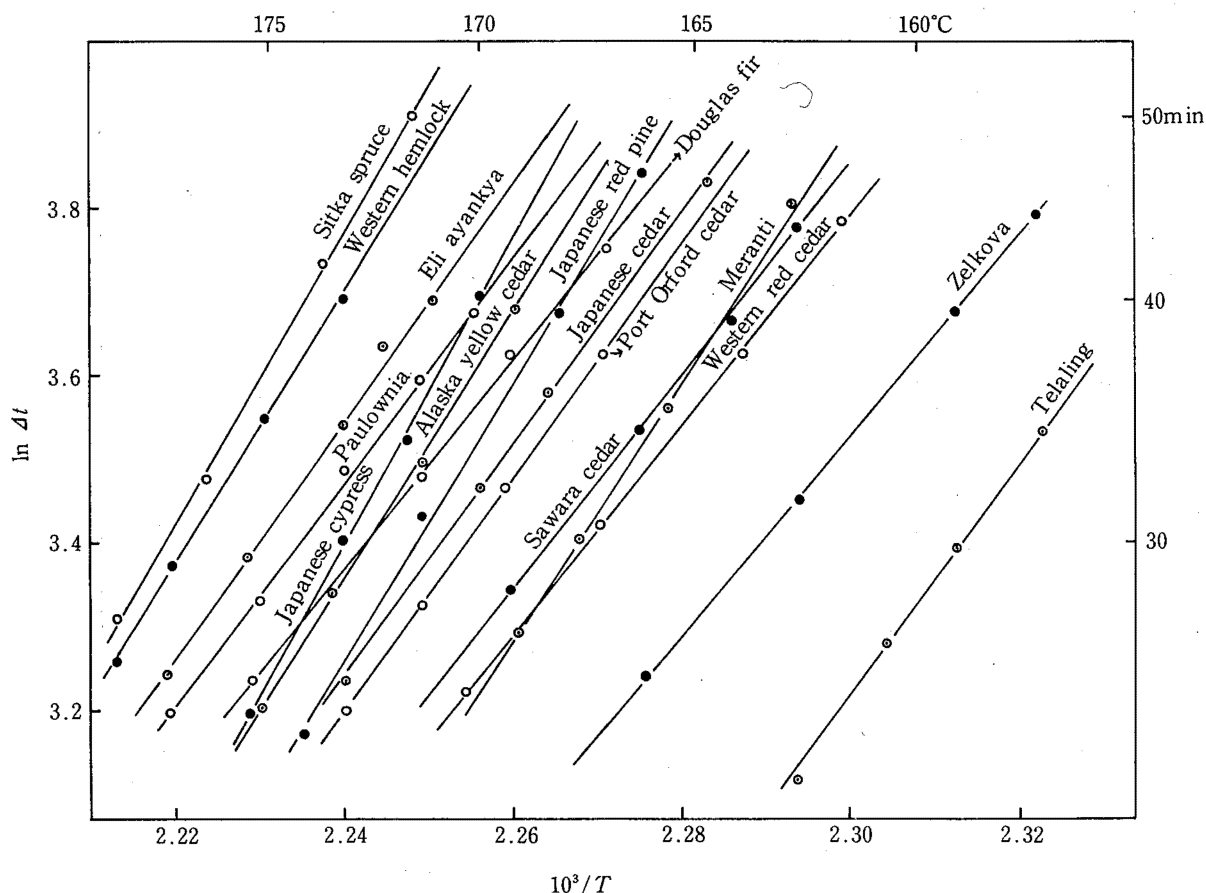


Fig. 6 The entire $\ln \Delta t$ vs. $1/T$ plots for fifteen species of wood sawdust.
15種類の木粉についての $\ln \Delta t$ 対 $1/T$ プロット

な寸法の堆積状態にあるそれらについての実測値とほぼ同一レベルにある結果が得られたが、このことは本手法が少くとも木粉類に対しては十分に適用され得ることを示すものであると考えられる。

③ けやきやさわらそれに米杉は比較的発火しやすい材であることが示されたが、この事実は既報の結果と一致している。テラリンやメランチは一般にラワンと総称されている材の一種と考えてよいが、これらも発火しやすい方の材に属する。日本松や日本杉、それに米松や米檜等は中位の発火性を示す。桐や米ヒバそれに北洋エゾ松は発火しにくい方の材に属するといえる。日本檜も発火しにくい方の材に属するが、米ツガやシトカスプルスはそれよりさらに発火しにくい。結局、今回供試した15種の材のうち、もっとも発火しやすい材はけやき、もっとも発火しにくい材はシトカスプルスであった。

7. 考 察

7.1 木粉類の T_c 値に及ぼす堆積層の厚味の効果

容易に推察し得るように、木粉類の熱限界温度は、層厚が減少するほど放熱効果が効いてくるため、次第に上昇して行く。この場合、木粉間の熱発火限界温度についての序列は不変であるとは限らない。何故なら層厚が変ることによる熱発火限界温度の変化の度合は酸化発熱反応のパラメーターや熱拡散率等の、各木粉に固有の、因子によって影響されるからである。

一例として、各木粉が $2r=20.32\text{cm}$ (8inch) なる層厚にて無限平板状に堆積していると想定した場合、(9)式を適用することにより、それらの T_c 値は $147\sim 167^\circ\text{C}$ に上昇するであろうと見積ることができる (Table 2)。ただし、木粉類の T_c 値を 20cm 級の層厚の許で実測した例が見当たらないので、この場合いずれかの実測値と比較することができないのは残念である。

Table 1 Adiabatic experimental parameters of slow oxidative heating reaction and critical ignition temperatures of 15 species of wood sawdust, when stacked in a layer, 60.96 cm thick.

15種類の木粉の断熱的酸化発熱反応に関するパラメータと、それらが厚さ60.96cmに堆積していると仮定した場合の熱発火限度温度

Wood species	a	b	α	* E	* ρ	T_c (°C)
Zelkova	11,899	-23.838	0.14	99	0.279	118
Telaling	13,736	-28.379	0.15	114	0.214	119
Western red cedar	12,487	-24.936	0.16	104	0.153	124
Sawara cedar	12,536	-24.994	0.16	104	0.173	125
Douglas fir	12,430	-24.474	0.14	103	0.197	127
Meranti	15,998	-32.881	0.15	133	0.185	130
Port Orford cedar	13,906	-27.950	0.17	116	0.138	131
Japanese cedar	13,944	-27.994	0.18	116	0.145	132
Paulownia	13,110	-25.887	0.17	109	0.173	133
Japanese red pine	16,483	-33.656	0.13	137	0.253	133
Eli ayanskya	14,478	-28.882	0.16	120	0.138	135
Alaska yellow cedar	16,124	-32.765	0.17	134	0.138	136
Japanese cypress	17,644	-36.123	0.16	147	0.131	138
Western hemlock	16,505	-33.267	0.17	137	0.131	141
Sitka spruce	17,092	-34.517	0.17	142	0.131	142
Reference data						
Mixed hardwood sawdust ³⁾ , when stacked in a 61 cm cube, but in cool surroundings,					0.178	135(obs)
Kiefernholz (German pine) sawdust ^{4), 5)} , when stacked in a sphere, 1 m diameter,					0.125	130(obs)

* E : the actual unit of E is [kJ mol⁻¹].

* ρ : the actual unit of ρ is [g cm⁻³]

7.2 熱発火限界半径について

ある堆積物がある一定温度の雰囲気中に置かれている場合、その物質が発熱することがあると、そのものの寸法を表わす値 r が大きい程、その内部において蓄熱しやすい条件が調う筈である。つまり、 r が大きい程、 T_c 値は低下して行くこととなり、たとえ雰囲気温度が室温に近い程低かったとしても、その堆積物の発火をもたらす限界の r 値(以下、限界半径、 r_c 値という)は必ずや存在する筈である。この値は、堆積物の発火を防止するために、その場の温度管理とは別な観点から、そのものの寸法をどの程度以下に抑えるべきかを定める際に参考となるデータとなり得る。

以上のことは(9)式において a , b , ΔT , δ_c , α の各値の他、 T_c 値にも一定値を与えた場合に、 r 値(すなわち、この場合は r_c 値となる)がどれほどになるかを求める問

題に帰着する。

さて、けやき粉について、25°Cの環境下においてそれを無限平板状に積んだとして、その発火に要する限界高さ(層厚=2 r_c)を求めてみる。Table 1より関係する数値($a=11,899$, $b=-23.838$, $\alpha=0.14$, $\Delta T=1.25$, $\delta_c=0.88$)を見出して(9)式に代入すると、2 $r_c=53$ mなる値が得られる。

ところで、Bergströmの報告した事故例によると、140,000m³という桁外れに大きな木材屑の堆積が常温で発火したとのことであるが¹¹⁾、もしもこれが立方体状に積んであったとすると、その一辺は約52mであったことになり、堆積状況(恐らく野天積みであったらうので、水分の効果や腐敗等の生物学的効果も存在したかも知れない)の差や材種の差、形状の差その他を考慮に入れば偶然ではあろうが、上述の計算結果と比較的よく一致してわれわれを勇気づけてくれる。

Table 2 Critical ignition temperatures of fifteen species of wood sawdust when stacked in a layer, 20.32 cm thick.

15種類の木粉が厚さ20.32cmに堆積していると仮定した場合の熱発火限界温度

Wood species	T_c °C
Telaling	147
Zelkova	151
Meranti	155
Western red cedar	157
Sawara cedar	157
Japanese red pine	158
Douglas fir	160
Port Orford cedar	160
Japanese cedar	161
Japanese cypress	162
Alaska yellow cedar	162
Eli ayanskya	164
Paulownia	164
Western hemlock	166
Sitka spruce	167

Table 3 Exothermic initiation temperatures T_i s of fifteen wood species, determined by calculation, when we define each of them to be a temperature at which each wood sawdust sample shows a temperature rise rate of 1(K/day) under the experimental conditions of this study.

各々が1[K/day]なる昇温速度を示す温度と定義した場合の15種類の木粉の発熱開始温度 T_i 値

Wood species	T_i °C
Zelkova	107
Telaling	110
Western red cedar	112
Sawara cedar	113
Douglas fir	116
Port Orford cedar	119
Japanese cedar	120
Paulownia	120
Meranti	123
Eli ayanskya	125
Japanese red pine	127
Alaska yellow cedar	127
Japanese cypress	131
Western hemlock	132
Sitka spruce	134

7.3 木粉類の発熱開始温度

木粉類の断熱的酸化発熱速度は Fig. 2 にみられるように単に温度の関数として増減するに過ぎず、したがって酸化発熱現象生起に下限温度あるいは threshold temperature は存在しないと考えられる。さてこそ、前節におけるように25℃という低温においてもなお、極めて緩慢ではあるが、酸化発熱反応は生起しているとの前提の許に発火のための限界半径を議論することも正当化されるのである。ちなみに、熱分析等という発熱開始温度とは機器によって検知し得る程度の発熱速度を示すに至る試料温度を意味し、決して文字通りの意味での、物質の不連続的現象としての、発熱開始温度ではない。

それ故、木粉類の酸化発熱開始温度とは、それらが空气中に置かれた時、人間の感覚にとって妥当であると受け取れる（発熱開始という形容にふさわしい）程の、一定の発熱速度を示す温度である、と定義する必要がある。

幸い、木粉類の150~170℃程度の温度レベルにおける断熱条件の許での酸化発熱挙動はいずれの材についても直線的昇温であり、その際昇温速度は温度に関して Arrhenius 的に、つまり(2)式に従って変化する。そこで、この際大方への参考までに、木粉類の発熱開始温度とはそれらが本報の実験条件下において1 K/day なる昇温速度を示す温度である、と定義して(2)式に基づき算出した値を Table 3 に掲げておく。

8. まとめ

① TG-DTA によっては木粉類の材種による酸化発熱性の差はほとんど認められないが、断熱条件下においてはそれが明確に区別できるようになる。

② 木粉類は約180℃以下の温度レベルにおいて酸化反応により各初期試料温度に相応する一定の昇温速度を示しつつ発熱する。

③ 当所で案出された堆積物の熱発火限界温度を求める手法は木粉類に対して実測値にほぼ見合う値をもたらすので、本手法は少なくとも木粉類に対しては十分適用可能であると考えられる。

④ 木粉類は60cm 程度の厚味に堆積している場合、120~140℃程度に保温されることがあれば究極的に発火する可能性がある。万一20cm 程度に層厚が減少すると、この値は147~167℃程度に上昇する。

⑤ けやきやさわらそれにラワン材類は発火し易い材である。わが国特産の杉や松は中位の発火性を示す。桐

や檜は発火しにくい方の材に属するが、米ツガやシトカスプルーはそれらよりもっと発火しにくい。結局、今回供試した15種の材のうち、もっとも発火しやすい材はけやき、もっとも発火しにくい材はシトカスプルーであった。
(昭和60年5月7日受付)

参考文献

- 1) 秋田一雄, “木材の発火機構に関する研究”, 消防研究所報告, 9-1, 9-2 (1959).
- 2) D. Gross, A. F. Robertson, J. Res. Nat. Bur. Standards, 61, 413 (1958).
- 3) E.J. Anthony, D. Greaney, “The Safety of Hot Self-Heating Materials”, Combustion Science and Technology, 21, 79 (1979).
- 4) R. John, “Zur Selbstentzündung von Holz. Aufheizphase und freiwerdender Wärmestrom. Brandentstehung und Brandausbreitung-Thema 1”, Proceedings of the 4th International Brandschutz-Seminar, Zürich, pp. 59~84 (1973).
- 5) H. Schliemann, “Die Anwendung der Differential-Thermoanalyse [DTA] zur Einschätzung des Selbstentzündungsverhaltens von Holz”, Holzindustrie, 1977/5, p.140.
- 6) 琴寄 崇, 内藤道夫, 丸田道男, 秋田一雄, “自然発火試験装置を用いて熱発火限界温度を算出する試み”, 安全工学, 20, 9 (1981).
- 7) 琴寄 崇, 内藤道夫, “自然発火試験装置による熱発火限界温度の算出法および数種の料品の自然発火性の検討”, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-28-2 (1980).
- 8) 琴寄 崇, 内藤道夫, “自然発火試験装置の構造と性能”, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-27-2 (1979).
- 9) T. Kotoyori, M. Maruta, “An Adiabatic Self-Ignition Testing Apparatus”, Thermochemica Acta, 67, 35 (1983).
- 10) 小坂岑雄, 朝比奈 正, 生田史朗, “定速昇温法による熱拡散率の測定法 (I) 葉ロウ石試料への適用”, 榊真空理工編, 熱分析実験技術入門, p.160, 科学技術社 (1979).
- 11) H. Bergström, Proceedings of the 3rd International Conference on Bituminous Coal, 1097 (1932).

UDC 674.038.3 : 662.612 : 536.44

Critical Ignition Temperatures of Wood Sawdust Layers

by Takashi Kotoyori

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety RIIS-RR-85-4, 33~44
(1985)

Critical ignition temperatures of fifteen species of wood sawdust layers were estimated with an adiabatic self-ignition testing apparatus following a procedure. Both apparatus and procedure have been developed at RIIS.

Assuming each wood sawdust to be stacked in a form of infinite layer at a thickness of 60.96 cm (2 feet), the temperatures were estimated to range from 118 for Zelkova to 142°C for Sitka spruce.

These values are in reasonable agreement with a few real data observed on wood sawdust stacks of similar sizes.

(6 figures, 3 tables, 11 references)

UDC 674.038.3 : 662.612 : 536.44

オガクズ堆積層の熱発火限界温度

琴寄 崇

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-85-4, 33~44 (1985)

15種の木材から各々作成した木粉の仮想的な堆積物について、それらの熱発火限界温度を、産安研にてそれぞれ開発してきた自然発火試験装置および手法を用いて算出した。各木粉が層厚60.96cm(2フィート)の無限平板状に堆積していると仮定した場合、それらの熱発火限界温度は最低けやきの118°Cから最高シトカスプルースの142°Cの間に分布した。これらの値は僅かに存在する実測値と比較的よく一致する。(図6, 表3, 参11)