中層木造建築を可能にしている諸外国の耐火基準

原 田 寿 郎*

1. はじめに

わが国においても、中層木造建設への期待は大きく、2009年6～7月に兵庫県三木市にある実大3次元震動破壊実験施設(Eディフェンス)で日米共同研究による木造7階建て建築物の実大振動台実験が行われたことは記憶に新しい^{1,2)}。この実験で木造建築物の耐震性能が確認され、中層木造の実現に向けた第一歩が踏み出されたが、実際に建物を建てるには防耐火性能の付与が避けて通れない。

2000年の建築基準法の改正を受け、わが国においても、法的には耐火構造の木質材料が認定される道が開かれ、木質構造による耐火建築物の建設も可能になっている³⁾。しかし、これはあくまで性能を満たせばという条件付きの話であって、現在のところ、1時間耐火構造の認定を有する木質部材がようやく開発され、4階建て以下の建物が建ち始めた段階で、5階建以上の木造建築物が建築されるまでには至っていない。

一方、諸外国に目を転じると、ロンドンにはクロスラミネーテッドティンバー(CLT)パネルを用いた9階建住宅が建設されており、ベルリンでは7階建て、スウェーデンのベクショーには8階建ての木質集合住宅が建てられているなど、中層木造建設に進展が見られる⁴⁾。これは各国の建築行政における防耐火基準の差異によるところが大きい。気候や風土、地震の発生頻度、建築に対する考え方などが国によって異なり、一律に論じることとはできないが、中層の木造建築物を可能に

するために各国で取り入れられている工夫は、今後の日本における中層木造の実現に向け、大きなヒントを与えてくれるものと思われる。

そこで、本稿では、EU諸国、アメリカ、カナダでの木造建築物を巡る防耐火規制の現状をとりまとめ、日本の現状と比較してみたい。

2. 諸外国の現状

2.1 EU諸国

EU諸国の建築規制の大枠はEurocode(ユーロコード)と呼ばれる構造設計法が欧州標準化委員会(CEN)により開発されて、木質構造設計法については、ユーロコード5⁵⁾としてとりまとめられている。ユーロコード5では、付録Fに構造部材の荷重支持機能確認のための設計手順と接合部の設計手順のフローチャートが示されている。荷重支持機能確認のための設計手順では、木材が未被覆の場合と被覆の場合に分け、それぞれの炭化深さを計算により求め、残存断面法ないしは残存性能法から必要な断面を決定する手順が示されているが、基本的な考え方は日本の燃えしろ設計と同じである。未被覆の柱・梁の有効炭化深さの求め方は次による。

密度 290kg/m^3 の針葉樹集成材の標準加熱下における隅角部での炭化進行の影響を含む公称設計炭化速度 β_n は 0.7mm/分 とされ、加熱時間 t 分の炭化深さは $d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t$ で与えられる。残存断面法においては、初期断面から有効炭化深さ d_{ef} を減じた断面を有効断面(強度と剛性が常温時と同じと仮定される部分)として有効炭化深さを決

*独立行政法人森林総合研究所

Corresponding author: Harada Toshiro (tharada@fpri.affrc.go.jp)

定することとしており、 $d_{ef} = d_{char, n} + k_0 \cdot d_0$ 、 $d_{char, n} = \beta_n \cdot t$ ($d_0 = 7 \text{ mm}$, $k_0 : t < 20 \text{ 分}$ のとき $t/20$, $t \geq 20 \text{ 分}$ のとき 1.0) の計算式が与えられている⁶⁾。この式より計算される耐火時間45分及び60分の有効炭化深さはそれぞれ39mm, 49mmである⁶⁾。

ユーロコードは、EU圏内の共通基準であって、各国での規制はそれぞれの国内法との併用により運用されており、同じEU圏内であっても、木質構造の取扱いは異なっている。河野は、2006年3月にベルギー・ブリュッセルで開催された日本・EU木造フォーラムで紹介されたドイツ、スイス、スウェーデン、オーストリア、フィンランド、ベルギーの多層木質構造の防火規制を基に各国の規制に関する比較をしている⁷⁾。表1は、それを基

に各国の建築可能な木造の仕様を取りまとめたものである。表中、アルファベットで示されるR, E, Iは、それぞれ、R：非損傷性、E：遮炎性、I：遮熱性を示し、それに続く数字は時間（分）である。つまり、たとえば、REI60は60分間の非損傷性、遮炎性、遮熱性を有する材料であることを意味する。ところで、Class-Aは、ユーロコードにおいて最も不燃性の高い材料であることを示している。また、KはEN14134：2004- Coverings- Determination of fire protection abilityに規定される防火被覆に関する試験法に基づく防火性を示し、数字（分）で示した時間の加熱を行った場合、防火被覆の裏面温度が平均で250℃、最高で270℃を超えず、下地の木材が着火しない（木材の着火

表1 EU諸国で建築可能な木造の仕様

	ドイツ	スイス	スウェーデン	オーストリア	フィンランド	ベルギー
階数・高さ	5階	6階	8階	4階 屋階の表面をClass-A材料で包むまたは2mのセツバックをすればペントハウス建設可能	14m	10< H < 25m
壁	防火保護された耐力構造	防火保護された耐力構造	Class-Aの材料で囲まれた耐力構造	現し(木材露出)の耐力構造	Class-Aの材料で囲まれた耐力構造	現し(木材露出)の耐力構造
床	2～5階 REI 60, K 60 融点が1000℃を超える不燃材による絶縁	2～6階 REI 60, K 30 融点が1000℃を超える不燃材による絶縁	全階 REI 60	1～2階 REI 90 融点が1000℃を超える不燃材による絶縁 3～4～(5)階 REI 60 可燃物による絶縁	2階以上 REI 60 融点が1000℃を超える不燃材による絶縁	2階以上 REI 60 絶縁の規定なし
外壁	全階 REI 60, K 60 融点が1000℃を超える不燃材による絶縁	全階 REI 60, K 60 融点が1000℃を超える不燃材による絶縁	全階 R 90	1階 REI 90 融点が1000℃を超える不燃材による絶縁 2～4～(5)階 REI 60 可燃物による絶縁	全階 REI 60 融点が1000℃を超える不燃材による絶縁	全階 R 60
スプリンクラー	必須ではない	設置の場合、REI 60, K 30がR 60に低減	設置の場合、可燃材料の表面が使用できる	必須ではない	必須	設置の場合、可燃材料の表面が使用できる
火災警報器	必須ではない	必須ではない	住宅は必須	必須ではない	必須	必須ではない

温度は260℃とされる)ことを示している。この表からも明らかなように、許容される階数、高さは国によりまちまちであるが、スプリンクラーの設置によって防火規制を緩和するなどの措置が取られている国が多いことは注目に値する。

2.2 アメリカ合衆国

アメリカ合衆国の建築基準は International Building Code (IBC)⁸⁾ と International Residential Code (IRC)⁹⁾ で規定されている。IBC は全ての建築物に適用されるのに対し、IRC は3階建て以下の1ないし2世帯住宅ユニット、複数の戸建住宅(タウンハウス)に適用される。また、IRC がより規範的であるのに対し、IBC は複雑なケースに適用される設計をより重視している。

木質部材の耐火設計手順は、米国木材協議会(American Wood Council)の「火災により加熱を受ける木質部材の耐火性の計算法¹⁰⁾」に示される。ここでも、わが国の燃えしろ設計と類似の概念が2時間以内の耐火性能計算に組入れられている。時間 t (hr) における炭化速度、有効炭化深さの取扱いは以下のとおりである。

$$\cdot \text{炭化速度 } \beta_{\text{eff}} = 1.2 \cdot \beta_n / t^{0.187}$$

β_{eff} = 加熱時間 t (hr) に合わせて調整された有効炭化速度 (inch/hr)

β_n = 公称炭化速度 (1時間加熱に基づく線形炭化速度) (1.5 inch/hr)

これから計算される有効炭化深さは1時間：45.7mm, 1時間30分：63.5mm, 2時間：81.3mm である。

建築物のタイプ別、用途別の規定は、IBC にまとめられている。建築物のタイプは次の5つに分類される。

- ・タイプⅠ, タイプⅡ：全ての建築部材は不燃材料で構成される
- ・タイプⅢ：外壁は不燃材料か防火処理木材(最低でも2時間耐火)だが、内装はコードに示されたいずれの材料でも使用可能
- ・タイプⅣ(大断面木材)：外壁は不燃材料か防火処理木材(最低でも2時間耐火)だが、内装は中空部分のない製材若しくは積層木材が使用可能
- ・タイプⅤ：外装、内装ともコードに示されたいずれの材料でも使用可

建築物の用途は、A-1～5(劇場、レストラン、美術館、観覧場、遊園地など)、B(事務所など)、E(学校など)、F-1～2(工場など)、H-1～4(危険物取扱所など)、I-1～4(医療施設など)、M(デパートなど)、R-1～4(ホテル、住宅など)、S-1～2(可燃物・不燃物倉庫)、U(飛行機格納庫、農業用施設、塔など)に区分されている。このうち、B(事務所)、E(学校)、M(デパート)、R-1(ホテル)、R-2(アパート)の建築物に許容される用途別、タイプ別の高さ制限、面積制限を表2に、また、建築部材に求められる耐火性能を表3に示す。これから事務所ビルでは5階建、ホテルや住宅では4階建までが外壁不燃のタイプⅢ、大断面木材を用いるタイプⅣで建設可能であることがわかる。また、スプリンクラーシステム

表2 米国の建築物の許容高さ (ft)、面積 (ft²/階)

用途	タイプ	Ⅰ		Ⅱ		Ⅲ		Ⅳ	Ⅴ	
		A	B	A	B	A	B	HT	A	B
	許容高さ	UL	160ft	65ft	55ft	65ft	55ft	65ft	50ft	40ft
B	S(階数)	UL	11	5	4	5	4	5	3	2
	A(面積)	UL	UL	37500	23000	28500	19000	36000	18000	9000
E	S	UL	5	3	2	3	2	3	1	1
	A	UL	UL	26500	14500	23500	14500	25500	18500	9500
M	S	UL	11	4	4	4	4	4	3	1
	A	UL	UL	21500	12500	18500	12500	20500	14000	9000
R-1	S	UL	11	4	4	4	4	4	3	2
	A	UL	UL	24000	16000	24000	16000	20500	12000	7000
R-2	S	UL	11	4	4	4	4	4	3	2
	A	UL	UL	24000	16000	24000	16000	20500	12000	7000

1 ft = 305mm, 1 ft² = 0.0929m², HT: Heavy Timber, UL: 制限なし

建築物タイプのA, B: 許容される高さによる区分を示す記号で、Aはより高い耐火性能が求められる。

表3 米国の建築部材に求められる耐火性能 (hr)

タイプ	I		II		III		IV	V	
	A	B	A *	B	A *	B	HT	A *	B
構造フレーム (柱, 桁, トラス)	3	2	1	0	1	0	HT	1	0
耐力壁									
外壁	3	2	1	0	2	2	2	1	0
内壁	3	2	1	0	1	0	1 or HT	1	0
非耐力壁	(省略)								
床 (梁, 根太を含む)	2	2	1	0	1	0	HT	1	0
屋根 (梁, 根太を含む)	1.5	1	1	0	1	0	HT	1	0

HT : Heavy Timber

建築物タイプの A, B : 許容される高さによる区分を示す記号で, A はより高い耐火性能が求められる。

* 認可自動スプリンクラーシステムは, 他の規定に抵触しなければ, 1 時間耐火建築物の代替物となる。ただし, 外壁には適用されない。

についても防耐火性能向上の手段として有効に取り入れられている。

2.3 カナダ

カナダの建築基準は National Building Code of Canada (NBCC)¹¹⁾ で規定されている。

カナダにおいても建築物の用途は, A-1 ~ 4 (劇場, 美術館, アリーナ, 遊園地など), B-1 ~ 2 (刑務所, 病院など), C (住宅・ホテル・学校など), D (事務所), E (デパートなど商業施設), F-1 ~ 3 (工場, 発電所など) のグループに区分されており, グループ別, 不燃材料・可燃材料の使用別, スプリンクラーの有無, 建築物が面する道路の数別に必要とされる耐火性能や建築可能床面積などが定められている。Division B (Acceptable solution) には NBCC の目的を満たす最低限度の性能を示されており, それによれば, グループ C (住宅) で耐火性能を付与することで

建築可能な木造住宅は表 4 に示すとおりである (<http://www.canlii.org/en/on/laws/regu/o-reg-350-06/latest/o-reg-350-06.html>)。

Division B に加え, alternative solution という手法も整備されている。これは, Code に載っていない新しい方法や材料, システムであっても Division B との同等性を示せば, alternative solution として提案されるデザインやシステムの採用が可能であることを意味する。これにより, より多くの技術革新が建築に取り入れられるようになり, 6 階建のプラットフォームフレームの木質建築物, 8 階建や 6 階建の木材-コンクリート・ハイブリッド建築物などの建設が検討されている^{12, 13)}。

ケベックで検討されている 6 階建の木質-コンクリート・ハイブリッド事務所の概要は以下のとおりである¹³⁾。

表4 カナダで建設可能な耐火構造の木造住宅

耐火時間 ^{a)}	階数	最大床面積 (m ² /階)			
		スプリンクラーあり	スプリンクラーなし		
			1 道路 ^{b)}	2 道路 ^{b)}	3 道路 ^{b)}
1 時間	1	7200	2400	3000	3600
1 時間	2	3600	1200	1500	1800
1 時間	3	2400	800	1000	1200
1 時間	4	1800	—	—	—
45 分	1	5400	1800	2250	2700
45 分	2	2700	900	1125	1350
45 分	3	1800	600	750	900

a) 床, 耐力壁, 柱に必要な耐火性能, b) 建築物に接する道路数

表5 NBCC2005による6階建事務所ビルの Acceptable Solution

耐火時間 ^{a)}	構造	最大床面積 (m ² /階)			
		スプリンクラーあり	スプリンクラーなし		
			1 道路 ^{b)}	2 道路 ^{b)}	3 道路 ^{b)}
1 時間	不燃	7200	2400	3000	3600

a) 床, 耐力壁, 柱に必要な耐火性能, b) 建築物に接する道路数

- ・高さ: 22.1m, 面積: 1000m²/階
- ・主たる構造は木質の床隔壁を伴った集成材の柱・梁による構造だが, 鉄筋コンクリートの補助構造やコンクリート耐震壁, コンクリート・コアも耐震システム (SFRS) として併用
- ・材料寸法: 主梁は 6m, 3 スパン。ブラックスプルス集成材で 24f-EX, 362×527mm
- ・総床面積約 6000m², 3 面が道路に面している

なお, 6 階建事務所ビルの acceptable solution は表 5 のとおりであるが, 上記の検討が可能となるのは, 混構造であることに加え, スプリンクラーを設置することで不燃材料と同等であることを確認しているからである。

3. 日本の現状

建築可能な建物の仕様は, 建設される場所や規模, 用途によって制限を受ける¹³⁾。2000 年の建築基準法改正により, 木質構造であっても耐火建築物や耐火構造の認定をとることは可能となったものの, 認定への道は今なお厳しく, 耐火構造以外の木造で建築可能な建築物は, 住宅では, 準防火地域に建設可能な 1 時間準耐火構造の 3 階建て共同住宅が限界である。木質の準耐火構造は燃えしろ設計が基本であり, わが国における集成材の燃えしろは 45 分準耐火構造では 35mm, 1 時間準耐火構造では 45mm となっている⁶⁾。

防火地域や準防火地域以外では高さ 13m, 軒高 9m を越える建物, 4 階建以上の建物, 延床面積 3000m² を超える建物, 準防火地域では延床面積が 1500m² を超える建物, 防火地域では 3 階建以上の建物, 延床面積が 100m² を超える建物は, 耐火建築物でなければならない。用途制限が加わるとさらに厳しくなり, 住宅や事務所を除く 3 階建て以上の特殊建築物 (劇場, 集会場, 病院, 学校, 百貨店など) は耐火建築物であることが求められる。

耐火建築物であることを証明する方法には,

ルート A (「大臣が定めた, または認定した」仕様規定に基づく方法), ルート B (「耐火性能検証法」に基づき, 告示に示される計算方法を用いて検証を行う方法), ルート C (「耐火性能検証法」以外の方法で耐火性を検証し, 大臣認定を受ける方法) がある。ルート B, C は, 木材使用箇所の温度が火災時に 260℃ 以下であることが必要なので, 適用範囲は, 体育館やドーム, 大会議場などの大空間に限定される。従って, 住宅やオフィスビルを木質耐火構造で建設する場合は, ルート A による大臣認定の取得が必要となる。

柱や梁では, 建築物の最上階から数えた階数が 4 以内の階には 1 時間, 最上階から数えた階数が 5 以上 14 以内の階には 2 時間, 最上階から数えた階数が 15 以上の階には 3 時間の耐火性能が求められるなど, 建物の部分により要求性能が異なる。ルート A では, 実大寸法の柱や梁, 壁, 床などに所定の荷重を負荷し, ISO834-1 に示される標準温度曲線に従った加熱試験を行う耐火性能評価が行われる。ただし, 耐火建築物には, 火災による火熱に火災が終了するまで耐える性能が求められるため, 指定性能評価機関の業務方法書で規定される性能試験では, 要求耐火時間 (1 時間耐火構造であれば 1 時間) の加熱では終了せず, 試験体を要求耐火時間の 3 倍時間 (1 時間耐火構造であれば 3 時間) 加熱炉にセットしたまま放置し, 材料が壊れないか等が評価される。業務方法書には定めはないが, 木質材料の場合は, さらに試験を継続し, 自然に消炎して「燃え止まる」ことが, 評定上, 求められている。木材や集成材は, 火災に際して表面は炭化するものの, 内部の温度が上がりにくいので, 断面を大きくすれば, 避難に必要な時間, 建物が壊れないようにすることができるが, 加熱終了後に燃え止まらない。この 3 倍時間放置や「燃え止まり」は, 諸外国の規制にはない評価項目で, 木質耐火構造の開発を著しく厳しい

ものになっている。

木質部材を耐火構造にする手法には、(1)石膏ボードなど無機材料による被覆、(2)鋼材との組合せ、(3)耐火集成材の開発がある。(1)には主要構造部分を石膏ボードで被覆した1時間耐火構造のツーバイフォー工法や軸組構法があり、1000棟を超える実績がある。(2)は鋼材の周りを集成材で被覆した1時間耐火構造の木質ハイブリッド部材で、2棟の建築実績があり、現在、標準仕様の作成が行われている。(3)は視覚的に木材が見える耐火木造の開発で、燃え止まりを期待する部分にジャラ等の高密度材や難燃処理した木材を配置する方法があり、既に1時間の耐火構造認定は取得しているが、建築実績はまだない。

4. おわりに

諸外国と日本の中層木造建設を取り巻く状況を比較すると、改めてわが国の規制の厳しさを思い知らされる。「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が可決・成立し、木造建築への期待が膨らんでいるが、現行規定から一歩進んだ取組みに期待したい。

戸建や共同住宅、事務所ビルでは4階建以上が必要とされる耐火構造が、他の特殊建築物では3階建以上となっているが、火気が想定されにくく、避難誘導が比較的容易な学校などの特殊建築物なら、耐火構造は4階建以上としてよいのではなかろうか。

耐火構造については、諸外国に例を見ない、木質材料に課せられた「燃え止まり」の規制が大きく立ちはだかっていることがよくわかる。燃えしろ設計は、非常に合理的な木造への耐火性付与技術といえる。諸外国の事例を見ると、これを活用した中層木造に特化した防耐火規制の検討に活路が見出せそうである。鉄筋コンクリート造と木造の混構造についても検討の余地がありそうである。また、現行法令では、スプリンクラーなどの消防用設備の有無が耐火構造認定とは必ずしもリンクしていないが、耐火構造がスプリンクラーの設置と合わせて認定されるようになれば、木質耐火構造はもっと身近なものになるに違いない。中層木造の実現に向け、新たな課題が見えてきたように思える。

引用文献

- 1) 五十田博, 腰原幹雄, 立花和樹, John W. van de Lindt, 岡崎友也, 清水秀丸, 林彦孝: 枠組壁工法7階建て振動台実験その1 試験体の設計・実験方法, 日本建築学会2010年度大会(北陸)学術講演梗概集 CD-ROM 版, 22113 (2010).
- 2) 林彦孝, 五十田博, 腰原幹雄, John W. van de Lindt, 立花和樹, 岡崎友也, 清水秀丸: 枠組壁工法7階建て振動台実験その2 実験結果, 日本建築学会2010年度大会(北陸)学術講演梗概集 CD-ROM 版, 22114 (2010).
- 3) 原田寿郎: 日本における木質耐火構造開発のあゆみ, 木材学会誌, **55** (1), 1-9 (2009).
- 4) 谷篤子: 中高層木造における防耐火法規の日壊比較 ウィーン工科大学 Urban Wood の研究より, 火災, **60** (3), 31-36 (2010).
- 5) European Committee for Standardization (CEN): "EN1995-1-2: 2004 (E), Eurocode 5- Design of timber structures Part 1-2: General - Structural fire design", 2004.
- 6) 日本建築学会編: "構造材料の耐火性ガイドブック", 2009, pp.25, pp.346-358.
- 7) 河野守: EU の木材産業と大規模木質建築物 日本・EU 木造フォーラム報告, 火災, **56** (2), 9-14 (2006).
- 8) International Code Council: "International Building Code 2006", 2006.
- 9) International Code Council: "2009 International Residential Code For One- And Two-Family Dwellings", 2009.
- 10) American Wood Council: Technical Report 10 "Calculating the firer resistance of exposed wood members", 2003.
- 11) National Research Council: "National Building Code of Canada 2005", 2005.
- 12) S. Gagnon, W Munoz & M. Mohammad, K. D. Below: "Structures and Architecture (Design guideline for an 8-storey hybrid wood-concrete multi-family building)", Paulo J.S. Cruz ed., Taylor & Francis Group, London, 2010, pp.372-379.
- 13) S. Gagnon, R. Rivest: "Structures and Architecture (A case study of a 6-storey hybrid wood-concrete office building in Quebec Canada)", Paulo J.S. Cruz ed., Taylor & Francis Group, London, 2010, pp.380-387.
- 14) 財日本住宅・木材技術センター編: "木造建築のすすめ", 一般社団法人木を活かす建築推進協議会, 2009, pp.1-41.

(2010.12.1 受付)