総 合 報 告

風土に根ざした地震火災用水供給システム

京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻* 小林正美・西村 直

Water Supply System Rooted in Culture and Climate for Earthquake Fires

Masami KOBAYASHI and Sunao NISHIMURA

Department of Global Environment Engineering, Kyoto university
Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

(Received January 10, 1999; Accepted May 28, 1999)

It is not only the direct damage but also the secondary damage of fire which spreads entirely over the city, that city suffers from when an earthquake occurs. Not only did the 1995 Hanshin-Awaji earthquake destroyed the quake-resistant structure, but caused a large amount of fire at the same time, especially firing the wooden-made housing areas for 10 days. It made it clear how weak the present city is against an earthquake. One of the most important problems is the shortage of extinguishing water. The available water in place of the hydrants being out of service was in short supply at the areas and that was the reason why the fire spread out largely to combustible wooden houses. This means the fire extinguishing system was heavily dependent upon hydrants. In order to avoid such situation, it is important to provide some stand-by systems in addition to the ordinary system. We have to prepare the systems which minimize the damage if fires should break out by an earthquake. Such system is based on the concept of "fail-safe". The water supply system in San Francisco is a typical safety system that consists of three backup systems, AWSS, Cisterns and PWSS. Against the fires after Loma Prieta Earthquake occurred in October 17, 1989, PWSS effectively functioned while the other systems were out of operation by the damages. On the other hand, in Japan, channel water is used as water supply system for fire prevention in Shirakawa-go and Gujo-hachiman. Channels form the basis of towns and support residents' daily lives while they are made the best use of as water supply system for extinguishing fire. This kind of nearly based water is effective when an unexpected disaster occurs. Most of the Japanese houses have been made of wood because wooden houses are suitable for Japanese climate. That is, many regions are at risk of big fire when big earthquake occurs. However, our country abounds in natural water, which is conveyed to our living spaces through channels. In order to protect wooden houses from fires, to secure our lives and to preserve our culture, it is recommended that channel network be used as water supply system for fire extinguishing. This is the system rooted in culture and climate.

Key words: Earthquake fires, Fail-safe, Water Supply System, Culture and Climate.

§1. はじめに

都市が地震に見舞われた場合の被害は、地震動による構造物などへの直接的な被害もさることながら、二次的な被害が、人為的に造られ複雑化を進める都市そのものの持つ構造によって連鎖的に発生し、都市全体にわたる

総体的な被害を指数的に広がらせるところに特徴がある。1995年1月17日に都市を直撃した阪神・淡路大震災は、耐震化の進められてきたはずの構造物を破壊しただけでなく、その直後の同時多発的な火災を招き、10日間にわたって都市を燃やし続けた。火災による被害の拡大は、1948年に発生した福井地震と類似した状況であり、なお地震火災に対する都市の備えが不十分であっ

* 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

たことが明らかにされた。

福井地震以降、我が国の防火対策の中心的課題とされたのは、1950年制定の建築基準法にも含まれた構造物の不燃化であり、近年の日常火災の減少に大きく貢献している。しかし、このような現代都市においても大規模な火災が発生してしまった背景には、発生した火災に対する消防的対策が欠落していたことが考えられる。都市の地震対策には、直接的被害を回避する技術だけでなく、不幸にも直接的被害を蒙ってしまった場合に発生する2次災害、間接災害を防ぎ、被害の拡大を最小化する安全工学的なアプローチが必要である。

本論文は、このような安全設計の立場から、阪神・淡路大震災で露呈された都市防火システムの欠点を再確認するとともに、フェイルセーフ・システムとしての地震に強い消火用水供給システムの重要性を主張し、典型的な事例としてサンフランシスコ、白川郷、郡上八幡をあげ、特に日本の風土を生かした開水路による消防水利システムを提案するものである。

§2. 都市の地震火災防火システム

2.1 安全設計の原理

安全とは、「安らかで災害の危険のないこと、とくに人間の死傷につながるような危険のないこと」と定義される。一方、人間がつくり出す製品や構造物、システムについては、その機能に対して信頼性が求められる。災害に対する最良の方法は、潜在危険性を完全に排除することであり、発生した潜在危険性を局所化するために各種の方法を考察することは、第二義的と考えるべきである。しかし、あらゆるシステムが複雑化し、それらの相互関係が把握しづらくなる一方の今日、システムに何らかの故障が生じることを念頭に置いた設計が必要となっている。信頼性工学は、主として、こうした故障及び故障率の軽減に関する学問である。故障が発生しないように、また、万が一故障が発生してもすぐにシステムや製品が使用できなくならないようにするための技術として、信頼性設計が発達してきた。

このようなシステムに対する信頼性の観点から発達したシステム設計の概念が、フォールトトレランス (fault tolerance) である。フォールトトレラント設計とは、誤りが障害となって現れるのを防いだり、あるいは、引き起こされる障害の影響をなるべく軽微なものに抑えようとする設計をいう [当麻・他 (1991)]。「誤り」とは、構成要素の異常な出力であり、「障害」はユーザーに対するサービスの異常と定義される。フォールトトレランスは、誤りがシステム全体に波及し、障害を引き起こすことを前提として、それらによる被害を最小化することを

目的とするものである。

フォールトトレランスには、いくつかのレベルがある。最も徹底したものは、誤りの発生にも関わらず、障害をいっさい生じさせないというレベルであり、静的マスク (static mask) と表現される。一方、誤りによってシステムは一時的に障害を引き起こすが、必要最小限の機能を回復、保持することで障害による被害の影響を最小化するレベルは、動的マスク (dynamic mask) と呼ばれる。このような技術の代表的なものに、故障を受容し、部分的な回復のみで必要最低限の機能を確保しようとするフェイルソフト (fail-soft) がある。

また、最終的な手段として、故障が生じた場合、それがより重大な故障につながらないようにシステムの機能を安全側で停止させるフェイルセーフ (fail-safe) の技術がある。フェイルセーフは、システムの内部に故障が発生した場合、サービスに誤った出力を出すことはあっても危険な出力は生じないように設計しておくことに等しい。狭義の意味では、フォールトトレラント設計における最終的な手段となるが、一般的にシステムの一部に故障が起きてもシステム全体に与える影響を少なくし、故障を災害まで発展させない機構という広い意味で使われており、特に人間の命を守る為に生まれ普及してきた。

信頼性工学は、一般にシステムの故障の確率論的处理に関心を持つ学問分野である。一方、システムの故障を認め、この故障がいつ起こるかわからないものとして、機能確認を常に行う立場は信頼度とは異なる安全性の立場であり、フェイルセーフはこの後者の立場を明確にとる [平野 (1991)]。時として災害は予測される確率を越えて発生するもので、そうした場合でも、少なくとも人間の命を安全に守ろうとするのがフェイルセーフのやり方である。

近藤 (1969) は、このようなフェイルセーフ設計の原理を、Fig. 1 のようなモデルで説明している。

(a) は、多経路荷重構造、重複構造あるいは並列 (リダンダント) 構造などと呼ばれる。複数個のユニットで並列構造や n 個のうち m 個が作動すればよい (m out of n) 構造をつくり、例えば、一本が破損しても2本が完全ならば、破壊することがないようにしておくものである。

(b) は、分割構造または組み合わせ構造というもので、1個のT字型部材を2個以上に分割しておき、それらの分割部材が結合してT字型部材の役割をするような設計である。破壊が生じても分割部材の一方だけで止まり、全体の破壊には至らないようにしてあるのが特徴である。

(c) は、肩代わり構造、支援構造または待機並列構造と呼ばれるもので、最初は左の部材が荷重に耐えている

Fig. 1. Idea of fail-safe. This figure refers to Kondo (1969).

が、そのうちこれが切断することがあると、それまで遊んでいた右の部材が引っ張りで真っ直ぐに伸びて荷重を受け持つような構造である。

(d) は、荷重軽減構造で、左側を右側に比較して故意に弱くしておき、左側が破損しても荷重が右側に移り、致命的な破壊にならないような構造を意味している。

(a), (c) の構造形式は、それぞれ冗長設計での並列冗長、待機冗長のシステムとも呼ぶことができるように、フェイルセーフシステムの多くは、冗長設計でも説明が可能である。反面、(b) と (d) は、フェイルセーフ設計に固有な構造ということもできる。

冗長系の構造をつくるには、

- ① 同一要素を並べる
- ② 同一機能を持つ要素を並べる
- ③ 機能的差のある要素を並べる

の3つの方法があるが、フェイルセーフシステムは、本来、主たるシステムの安全装置になるため、主システムに対しては③の冗長系になるのが基本的な姿である。

2.2 都市防災システム

都市の役割や活動をシステムとしてみた時、そこに人々が集まり住まい、日々の生活がいつも通りに繰り返されている状態が、システムとしての定常状態である。都市の防災システムは、この定常状態を地震などの自然災害が発生しても維持し続けていくために備えられるものである。都市防災システムは、都市に異常かつ急激な環境変化が発生した場合に作動するシステムであり、その目的は、自然災害などに起因する急激な環境変化があっても都市での活動を中断させることなく、都市の物理的構造と機能に定常状態の維持を図るものである。たとえ構造物等に直接的な被害があっても、それに続く間接的な被害を最小限度にとどめ、少なくとも人的な被害の発生は回避し、災害が収まった後にはできるだけ早く修復・復旧を行って以前の定常的な状態に戻す。都市の防災システムは、都市本来の機能からすれば、災害の発生の危険がある場合のみ作動する予備的、付属的な安全装置であり、フェイルセーフの典型である。

Fig. 2. Urban system for fire prevention.

Fig. 2 は、このような都市防災のシステムを表した図である。「被害の防止」は、都市が異常な自然現象に襲われても被害がでないように、予防的対策をあらかじめ施しておくサブシステムである。これに対して右側のシステムは、都市の構造物が何らかの被害を受けた後に作動する安全装置（システム）であり、直接被害に続いて発生する2次被害や間接被害をできるだけ軽微に終わらせる「被害拡大の防止」と、人命の安全を確保する「避難」、さらにできるだけはやくもとの正常な状態に機能回復させる「復旧・修復」のシステムからなる。このうち「被害拡大の防止」と「避難」からなる並列系の部分は、典型的なフェイルセーフシステムを構成しており、避難は、被害拡大の防止ができなかった場合の安全側の出力として位置づけられる。

2.3 地震火災に対するフェイルセーフの重要性

地震によって発生する火災の特徴は、主に

- ① 同時多発
- ② 消防力低下による延焼拡大

である。①は、地震動による家屋の倒壊や部屋の電気製品の転倒などによって市街の至る所で火災が同時期に発生するものである。②は、同時多発する火災に対して、様々な要因によって公設消防力が著しく低下し、平常時に期待される消火活動が充分行われないために、特に木造密集地を中心に火災が拡大するものである。日本火災学会(1996)によると、阪神・淡路大震災では、このような火災によって、294件、焼失面積83ha、死者600人の被害を発生させた。1,000m²を超える中規模以上の火災は49件、そのうち7件が33,000m²以上の大規模火災に発展している。

この震災で問題となったのは、第一に、近年の火災出火件数を低減させてきた耐火構造物が地震動によって被害を受け、多くの火災を出火させたことである。室崎(1995)によると、調査を行った181件の火元建物のうち、74件(約4割)が耐火構造物からの出火であった。

木造建物からの出火は、92 件（約 5 割）と耐火造建物のそれを上回るが、母集団の数を考慮すれば耐火造建物の出火リスクが非常に高い。ある規模以上の地震が都市を直撃した場合、火災は、建物の構造にかかわらず、主としてその用途や地震の規模・発生時期などに依存して発生することが示された。一方、発生した火災に対して消火栓の被災による圧倒的な消防水利不足によって消火活動が進められなかったことも問題となった〔日本火災学会(1996)〕。消防力の低下は、人命救助などの他の活動との競合や交通渋滞などにも起因しているが、特に水利の不足は、発生する火災に対してなすすべをなくした。

地震火災に対する備えは、耐火構造物や空地等の防火帯を建設し都市全体を不燃化する対策をとる方法もあるが、今回の震災のように火災の発生を完璧に阻止するのは不可能である。むしろ、現時点で日本の住宅の約 7 割が木造構造であることを認め〔総務庁統計局(1993)〕、発生した火災を拡大させない対策として、被害=システムの故障が発生してもその被害を連鎖的に拡大させない都市設計が重要である。このシステムこそがフェイルセーフ・システムであり、現行の防災システムに多くの場合欠けている要素である。特に、消火するための水利の確保は、予測できない災害に対する目下の急務である。

2.4 サンフランシスコの都市防火システム

フェイルセーフの概念を全面的に応用したものにサンフランシスコの都市防災システムがある。サンフランシスコ市は、かの有名な 1906 年の大地震火災の洗礼を受けた街であり、この教訓を、その直後から取り組みを始めた地震火災に備えた安全な都市づくりに生かしている。特に 1908 年頃から作り始められ、1912 年に完成した、重力式補助給水システム AWSS (Auxiliary Water Supply System) は、発想のユニークさ、スケールの雄大さとともに、システムの全体構成から各部施設に至るまでフェイルセーフ、リダンダンシーといった安全設計の思想が徹底的に実践された施設である。

1985 年にはこの AWSS のバックアップシステム PWSS (Portable Water Supply System) が加えられ、それが 1989 年 10 月 17 日に発生したロマ・ブリエタ地震におけるマリーナ地区の火災延焼の阻止に大いに活躍した。以下に、これらシステムの概要を整理した。

(1) AWSS の構成

中央部に山を持つサンフランシスコの地形をうまく利用して重力により高水圧を得る AWSS は、市街中心部の約 8 平方マイルをカバーする給水管路網と、それに高水圧を送る Twin Peaks の大型貯水槽、Ashbury と Jones St. の 2 つのタンク、及び緊急時に淡水の代わりに海水も利用できる 2 カ所のポンプ場を基本施設とし、

それらのバックアップ施設として、市中各所の交差点下に埋められた耐震地下貯水槽 (Cisterns)、臨海部と船舶を守るための 2 台の消防艇、その艇からも管路網に海水を送水できるようにしてある 2 カ所の多岐管設置場からなる (Fig. 3)。

a. Twin Peaks の大型貯水槽 (reservoir)

AWSS の給水源となる大型貯水槽は標高約 230 m の Twin Peaks に設けられており、ここから市内各所に水を配分する 2 つの給水タンクに水が供給される。Twin Peaks の貯水槽は容量約 38,000 m³ の耐震設計を施したコンクリート構造で、中央に隔壁を設けて等しい大きさの 2 つの貯水槽に区画化されている。通常、一方の貯水槽のみを使用し、貯水槽の修理機能を保持させたまま稼働できるよう、またパイプラインに突発的な破損があって水が漏出して半分以上失うことですむようにし

Fig. 3. Schema of AWSS network. This figure was produced by Department of Public Works, San Francisco.

である。Twin Peaks への水供給は、Spring Valley Water Co. から供給される淡水が用いられ、そのポンプアップは、交流モーターで動く 2 台の多段階式タービンポンプで行われる。交流モーターは 2 種類の燃料で動くように設計されており、燃料補給の不備で稼働できないようなことがないように配慮されている。

b. 2 系統の給水管路網と 2 つの給水タンク

凸凹した地形のサンフランシスコで均一な水压を確保するため、市域を上部ゾーン (Upper Zone) と下部ゾーン (Lower Zone) の 2 つに分け、主貯水槽から送水される水を独立した 2 つの配水タンクから給水する。上部ゾーンには標高 150 m にある鉄製の Ashbury タンクから水が供給され、下部ゾーンには、標高 10 m の Jones St. に 2,800 m³ の容量を持つ円筒のコンクリートタンクが給水する。タンクの底のスラブと円筒形の壁の間は、耐震のためエクспанションジョイントになっている。

c. ブロック化された管路網

供給管路網は、ゲートバルブにより独立したブロックに分割することができる。管路はグリッド状に布設されており、1 ブロックごと管の両端にバルブが取り付けられ、これらのバルブを操作することで他に影響を与えずにどのブロックでも、またいくつのブロックでも遮断・孤立させることができる。ダウントウンでは、グリッドの間隔を密にして、細かな対応ができるようにしてある。普段は一方のバルブのみを開け、他方は閉じられている。

d. 2 台の消防艇

ウォーターフロント船舶関係の防御のために、2 艇の消防艇が配備されている。各艇は、2 台のボイラー、スクリューを回す 2 台のエンジン、2 台の蒸気タービンポ

ンプが取り付けられており、この消防艇から AWSS に海水をポンプアップ、給水する事も可能で、そのための取り入れ口が 2 カ所設けられている。

(2) 地下貯水槽: Cistern

シスターン (cistern) は、市内の主要交差点に埋設されている消防用の地下貯水槽である。AWSS を補完する施設として、AWSS とは別系統の独立した消防施設である。地下貯水槽は容量約 285 m³、内径 9 m の円筒形で、設置場所が容易にわかるように、貯水槽上部の路上の舗石を周辺と変えて輪郭を示している。全部で 135 個の貯水槽を完備させている。

(3) 可搬式給水システム (PWSS)

可搬式給水システム PWSS (Portable Water Supply System) とは、サンフランシスコ消防局で 1985 年開発された移動式の給水システムのことで、地上を走らす 5 インチの消防用ホースに持ち運び式の減圧バルブ付き消火栓を取り付けて延長し、消防艇や消防ポンプ車から海水、貯水槽の水をポンプアップして送水、可搬式ポンプから消防用水や飲料水の緊急供給を行うものである (Fig. 4)。1989 年に発生したロマ・プリータ地震の際には、使用が不可能となったほかのシステムに代わって、火災の消火に大きく貢献した。

(4) システムの全体構成

サンフランシスコ市の消防水利システムは、以上のシステムに一般家庭用の給水システム: MWSS を加えた 4 つのサブシステムで構成されている (Fig. 5)。

- ① 一般給水システム: MWSS (Municipal Water Supply System)
- ② 重力式補助給水システム: AWSS (Auxiliary Water Supply System)
- ③ 地下埋設貯水槽: Cisterns
- ④ 可搬式給水システム: PWSS

システムには、地震動による予期せぬ故障に備えて、同時に何系統にもわたる供給システムを整備しておく必要

Fig. 4. Schema of PWSS. Seawater is carried to the scene of a fire through the hoses. This figure was produced by San Francisco Fire Department.

Fig. 5. Structure of Water Supply System in San Francisco. AWSS, Cistern and PWSS back up MWSS as a fail-safe system.

Table 1. Actual conditions of used water for extinguishing fires, Hanshin-Awaji earthquake disaster.

	Kobe City		Ashiya City		Nishinomiya City		Amagasaki City	
	ordinary	that time	ordinary	that time	ordinary	that time	ordinary	that time
Hydrant	1083	4	10	1	65	0	205	2
Reservoir	18	74	0.4	8	11.4	29	17	5
River	6	55	0.2	3	1.8	19	5	4
Swimming Pool	1.6	29	0	1	0.2	2	3	1
the others	315	380	19	11	48.6	11	0	0

Note: This table was made by the Fire Department of Kyoto City.

Table 2. The present state of water for extinguishing fires (the whole country).

	number	ratio
the total	1,728,695	100.0%
Hydrant	1,277,829	73.9%
Reservoir	429,346	24.8%
20~40m ³	108,089	6.3%
40m ³ ~	321,257	18.6%
Well	21,520	1.2%
20~40m ³	10,029	0.6%
40m ³ ~	11,491	0.7%

Note: Hydrants account for about 70 percent of all sources of extinguish water. The numerical data is after Fire and Disaster Management Agency (1998).

がある。サンフランシスコのシステムにおいては、②の主システムに対して、万が一それが故障した場合に切り替わって別の方法で水利を確保する②~③の3つが待機システムとして並列に配置されるフェイルセーフの概念が実現されている。

§ 3. 地震に強い消防水利システムの条件

3.1 予想されるシステムの故障

地震発生によって通常のシステムに与えられる故障には、

- ① 上水道の被災による消火栓使用不可
- ② 公設消防力の低下

が考えられる。①に関しては、阪神・淡路大震災で示されたように、ほとんどの消火栓が使用不能となって深刻な消防水利不足をもたらした (Table 1)。管路の耐震性の向上は今後も図られるべきであるが、地震動の被害を受けやすい地下に埋設され、破壊された場合の迅速な対応（修理）が困難であることから、消火栓等の従来の消

Table 3. The present state of water for extinguishing fires (Kobe, Kyoto, and Tokyo).

	Kobe City (before earthquake)	Kyoto City	Tokyo
Hydrant	86%	87%	80%
Reservoir	5%	9%	14%
the others	9%	4%	6%

Note: “The others” mainly notes water for extinguishing fires. The numerical data was given by Fire Department of Kyoto City.

防水利は、大地震においては使用がかなり制限されることを前提とすべきである。一方②は、消火以外の消防活動（特に救助）の必要性や、交通渋滞など緊急時に独特の様々な要因から通常時のように公設消防力が発揮されないことは容易に想像ができることであり、特にこれらに依存しすぎない体制、つまり防災まちづくり的な視点で、市民による消火活動を促す水利を確保すべきである（阪神・淡路大震災における市民による消防活動の実態とその有効性については、室崎 (1996) によって報告されている）。

3.2 安全設計上の条件

震災前、神戸市では消防水利の 87% を消火栓に依存しており、そのために不測の事態に対応できなかったと考えられている。このような消防水利の状況は全国的に共通している (Table 2, 3)。これに対してサンフランシスコ市では、1989 年のロマ・プリータ地震の際に使用できなくなった MWSS、およびそのバックアップシステムである AWSS, Cistern に代わって、さらにそれらのバックアップとして配備されていた PWSS が発生する火災の消火に大きく貢献した [小林 (1995)]。緊急時にシステムが安全に稼働するには、主システムに対する待機システムを設け、それらが相互に関連しない別系統で構成されるフェイルセーフシステムを準備しておく必要がある。

3.3 操作に関する条件

非常時の操作性はより平易であることが求められる。このような設計の方法には、フールプルーフ (fool-proof) がある。フールプルーフとは、人間が誤りをおかさないように、もっと積極的に、誤操作を起こすことができないように工夫された設計のことである [林 (1981)]。緊急時においては、操作に要する時間が重要で、所要動作の難易が被害を拡大するか否かを左右する。先に述べたように、公設消防による消火活動が様々な要因によって期待できない地震時には、市民の力を頼らざるを得ない状況が発生することもあり、誤って間違えた操作をすることがないようなシステムを構築すべきである。これらを考慮すると、非常時に迅速な対応をするには、日常から場所や操作方法などが認識される水利システムを整備することが重要であると考えられる。

§4. 消火用水供給システム事例

ここで取り上げる事例は、いずれも過去に大火を発生させた経験をもち、それを教訓として守るべき地域の財産を保全しつつ町独自の消火水利供給システムを構築しているものである。紹介するシステムは、岐阜県に位置する白川村と郡上郡八幡町で、ともに地域的条件を有効に利用している。

4.1 白川郷荻町の防火システム

(1) 白川村の概要

1995年12月、「白川郷・五箇山の合掌造り集落」として世界文化遺産に登録された伝統的建造物を今に継承する白川村は、岐阜県北部の豪雪地帯に位置する人口2,000人ほどの村である。合掌造りは、荘川上流域の山岳・豪雪地帯に発達した大型木造家屋であり、激しい地形・気候風土の中で培われた集落は特色的な生活・生産方式とともに我が国における大型木造住宅集落の典型を示す (Photo. 1)。1976年、荻町地区45.6ha (合掌造り59棟) が国の重要伝統的建造物群保存地区に選定

Photo. 1. "Gassho-zukuri" (steep rafter) houses.

され、現在、村全体の合掌造り建造物の総数は180棟となっている。なお、荻町の戸数および人口は、152戸、634人 (1994年8月現在) である。

(2) 荻町における防災体制

合掌造り、特に茅葺き屋根は火災に対して非常に弱く、1棟に火災が発生すればその飛び火によって隣接家屋の茅葺きに引火し、それが拡大して集落全体が焼失してしまう危険性を抱えている。そのため白川村荻町では、保存地区認定の翌年、1977年から国庫補助事業として地区全体に川の水を利用した防災施設として、59基の消火栓付き放水銃と62基の消火栓 (屋外消火栓34基+屋内消火栓28基) を集落にくまなく配置し、集落全体を飛び火による火災の延焼から守るシステムを構築している。一方、集落に流れ込む用水路は、農業用水、あるいは生活用水として利用されるとともに、実質的な消火用水となる防火水槽等に供給している。荻町では、これら2系統の自然水利の利用形態を合掌造りを守るシステムとして構築している (Fig. 6)。

(3) 重力式水供給システム

この防災施設は、集落の背後に位置する小高い山 (通称「前山」) に設置された貯水槽より、地区に配置された消火栓設備に、高低差によって生み出される高圧水を送り、火災時の消火水として活用するものである。消火栓設備には一般的な $\phi 40$ mm および $\phi 65$ mm の屋外消火栓以外に、直接放水可能な放水銃がある。屋外消火栓は消防ホースを接続して火元および延焼拡大の可能性のある部分へ放水するものであるが、放水銃は直接の消火には寄与せず、特に火元から発生する火の粉などによる飛び火を防ぐ「水膜」を、火元を取り囲むように作り出すことを目的とするものである。

a. 貯水槽自然流下圧式

貯水槽は平地より80 m高所の山頂に設置されている。有効水量 (容量) は 600 m^3 で、貯水槽への流入量を0とすると、一度に18基の放水銃による連続40分の使用が可能であり、 $15 \text{ m}^3/\text{min}$ の流量の送水を可能としている。貯水槽の水は牛首川の上流から水路で送水される河川水であり、荻町倉谷の収水用水路から常に貯水タンクの上水面に流入して補給される。

b. 放水銃

放水銃の役割は主に隣家への延焼を防ぐための水膜を作り出すことである。そのため、荻町の60棟の合掌造りに対して45基設置された放水銃は、合掌造りを主な対象として配置され、どの家屋から火災が発生しても隣家との間の飛び火が防げるよう、1棟あたり2基の放水銃が取り囲むようになっている。放水銃による放水は、高さ20 m程まで吹き上げられ、カーテン状の水の膜を

Fig. 6. Detailed map of Ogimachi town, Shirakawa-go. There are two “Hosui-ju” (water gun) per a house. Owing to the form of channel network, the water reaches every part of the town.

Photo. 2. “Hosuiju”. “Hosui-ju” is covered with the roof for protecting itself from the fallen snow.

つくり出す。放水銃の構造は、火災の発生箇所によって決まる飛び火の方向に対して柔軟に対応できるように360度回転できるようになっている。また、豪雪厳寒地

のため、積雪や凍結による機能低下を防ぐため、地上140 cm あまりの立ち上がりとなっており、さらに凍結防止の不凍パルプ付きの機器を設置している。また、この放水銃とともに口径 40 mm の消火栓も設置されている。景観を考慮した屋根ぶせの放水銃収納庫は、緊急時に女性でも容易に取り扱いできるように軽量化されている (Photo. 2)。

(4) 開水路による水供給システム

荻町では、放水銃等の消防施設が整備されるまで、自然水利のみを利用して消火活動が行われていた。十分な水が流れる水路から随時水が供給される防火貯水池や各家の池の水は、現在でも消防水利として有効に利用されている。これらは延焼防止を目的とする放水銃に対して、小型動力ポンプを利用した火災の消火に有効である。

a. 水路網形態

山頂貯水槽で用水路用に分岐された水は、山際の等高線を沿うように流れ、荻町へは5カ所から流入している (Fig. 6)。元々農業用水として利用されてきたため、すべての田畑に水が供給されるよう、巧みなネットワークを形成しながら網状の水路網が発達している。このような

Photo. 3. Channel, Shirakawa-go.

Photo. 4. Pond placed in front of a house.

水利網を介して各家の池および防火水槽に消防水利としての水が供給されている。水路には水位を調節する水門はないが、水位を高上げし、防火水槽などへ供給する水の量を確保するために簡易な板が堰として利用されたり、微妙な流れの方向を調節するために石が水路内に配置されているなど、巧みな水のコントロール技術が見受けられる (Photo. 3).

b. 前庭のタナ池

水路の水は飲料水・洗濯水あるいは融雪水等の生活用水として、村民生活を支える資源であったため、住居との間に密接な関係を持ちながら流れている。合掌造りの裏手の台所（ミンジャ）を経由したあと、敷地内の前庭のタナ池に溜められ、再び敷地外へと流れ出ていく。このような水路パターンが多くの合掌造りの周辺で繰り返され、住居の隣接空間に常に水が溜められる仕組みになっている (Photo. 4).

c. 防火水槽

小型動力ポンプを用いた実際の消火活動に大きく貢献する防火水槽は、開水路網から供給される自然水を貯留している。水路沿いに設けられた防火水槽には水が供給

され、余剰水がオーバーフローして水路に戻っていくようになっている。防火貯水槽は11カ所あり、うち消防水利基準である40 m³を満たすものは8カ所、有蓋貯水槽は4カ所となっている。防火水槽に貯留される水の総量は403.9 m³である。

4.2 郡上八幡の防火システム

郡上郡八幡町（郡上八幡）は三方を山に囲まれ、長良川、吉田川と小駄良川の三川が合流する盆地に発達した、人口約18,000人の町である。昔から、金山、高山、白川郷および美濃各地に通じる要所であり、山頂の八幡城の眼下には城下町として栄えてきた風情を今なお町並みにとどめている。清流が流れ、豊富な湧水や鉱泉を至るところで湧出するという地理的条件による水の恩恵を享受するため、住民は谷川、沢川に流れる水を水門によって用水路に導入し、生活用水として利用している。一方、度重なる市街地大火を経験してきた郡上八幡には、消火用水確保のため、新たな水路を掘削しながら、用水路の水を消火用水としての利用方法を確立してきた歴史があり、現在でもそれらを消防水利として位置づけて有効に活用している。

(1) 水路網を利用した水供給システム

郡上八幡における水供給システムの特徴は、農村形態を色濃く残す白川郷に比べて、より人為的に形成されている点にある。市街地における大火とその都度水路掘削・改修が行われ、密集する家屋群において、限られた空間に十分な水を流す工夫が見受けられる。市街地の広範囲をカバーする水路網は、常に火災の発生を危惧する木造密集市街地においては非常に有効な消防水利として活用される。

Fig. 7 は、郡上八幡における水路ネットワークを表すものである。南北約500 m、東西約300 mの北町をカバーするのは、小駄良川上流で取水された「北町用水」と、小駄良川に注ぎこむ小河川である初音谷川から取水される「柳町用水」である。流量はさほど多くないものの、北町の3本の主要街路沿いにはそれぞれ水が流れるように水路が配置され、より多くの防火水槽と家屋に面する空間に水が供給されている。吉田川以南の南町には、町内で最も多い水量を流す「島谷用水」が東西に流れている。吉田川の八幡大橋付近で水門により取水される島谷用水は、吉田川と平行に市街中心部から西端までを流れると共に、本川より南の密集地に水を供給する。また、東部の小野には、現在も農業用水としての役割を強く残す「小野用水」が流れ、西部にも、下流域の農業用水の利用を主とする「穀見用水」が豊かな水を供給している。

Fig. 7. Detailed map of Gujo-hachiman, Gifu Prefecture. There are innumerable artificial channels in this town. Particularly, Kitamachi Channel was built in the 16th century for fire prevention.

Fig. 8. The way of supplying reservoir.

(2) 水のコントロール技術

a. 防火水槽への取水形態

大容量の水を確保する防火水槽には、発達した水路によって水が随時供給されている。水路の水は「セギ板」とよばれる取り外し可能な木製の堰によって一定のレベルまで嵩上げされて防火水槽の取水口に流入する。水位が嵩上げされるのは、水路の水が減少した場合、防火水槽の水が逆流するのを防ぐために取水口が高く設置されているためである。また、出水口は防火水槽の水位を決定する高さが設けられ、一定以上の水が流入されれば、オーバーフローして再び水路に戻される形式となってい

る (Fig. 8)。これら取水口と出水口の微妙な高低差によって防火水槽の水位が保たれる。また、常に新しい水を循環させることで、できるだけ清潔な水を確保できる。

ある程度の敷地面積を必要とし、とかく地下式とされやすい防火水槽であるが、緊急時の柔軟な対応を可能とする開渠型が、その土地の形状に合わせて決定され、必要水量の確保を可能にしている点も注目される (Photo. 5)。

b. 水路内貯留方法

a. で取り上げた防火水槽は敷地に余裕のある箇所では有効であるが、一方で防火水槽を設置するのに十分な敷地が得られない場合は水路内の水が直接利用されるような形式を有している。郡上八幡は他都市の古い町並みと同様、狭い路地空間で形成される場所が多く、水路には、バケツなどの初期対応だけでなく、小型動力ポンプの活用を可能にするような工夫が多く施されている。このような水路の利用方法には以下の2つの形態がある。

Type. 1

比較的大きな水路断面を有する水路は、段階的な水門による水量調節によって大容量の水の確保を可能にす

Photo 5. Reservoir, Annyouji Temple.

Photo 6. Shimatani Channel.

る。八幡町随一の島谷用水は、「いがわ小径」と呼ばれる非常に狭い路地空間を流れている。Photo. 6 に示すように容量いっぱい水の流れが、3カ所の水門によって下方を流れる吉田川に水を落とすことで、洪水を調整している。特に、Photo. 7 に示す水量調節は、人為的な水門調節を必要としない原始的ではあるが洗練された水位調節機能を有する。流量は約 10 m^3 で、過去の消火活動によると、同時に10台の小型動力ポンプを稼働させた記録もある（郡上八幡中消防署による資料提供）。また、水面が街路上面と近接しており、水路からの直接の取水を容易にしている。

Type. 2

流入する水量がType. 1ほど多くなく、街路構成上大断面の水路断面を確保できない箇所においては、前項でも取り上げた「セギ板」が水位確保に効果を発揮する。このセギ板は、平時においては、洗濯や水さらし等をす

Photo 7. The method of the flow adjustment without the gate.

Photo 8. "Segi-ita" (removable wooden board). The water level rises according to "Segi-ita".

るのに十分な水位を得るために利用され、北町では、水路に面する住宅一件につき一枚のセギ板が住宅の壁面等に設置されている。少ないところでは水路に約10 cm ほどの水位しか普段保たれていないが、このセギ板によって、その水深が3~4倍にも嵩上げられ、小型動力ポンプを活用する上では十分な水位となる（Photo. 8）。このタイプの水路利用は、住民による平時の生活用水利用が中心であり、構造が非常に平易であるため、緊急時において水の確保が必要とされる場合にも瞬時の反応を促す。

c. 用水の補給方法

豊富な水を保有する本町の水路空間であるが、部分的な亀裂等による漏水と治水の要請から、下流域に至れば上流ほどの大容量の水量を確保できていない。これに対

Fig. 9. The method of water supply.

して、火災時には水門の調節によって必要箇所へより多くの消火用水を送水するシステムが水路ネットワーク内に構築されている (Fig. 9)。例えば、島谷用水は本町の中心部までは非常に豊富な水を流すが、ある一地点で大量の水が吉田川に流出してしまっており、それ以降の地域では平時において少量しか流下していない。これに対して、下流域に火災が発生した場合は取水口の水門を大きく開けるとともに、段階的に吉田川への流出を許す水門を閉じることで緊急時の消火用水を確保している。必要水量を完全には確保できない現状に対して、手動で行える平易な装置によって流量を調節し、火災発生箇所へより多くの水を補給するネットワークを構築することで対応している。

§ 5. システムの特性

5.1 システムの構成

それぞれのシステムの構成を図で表すと Fig. 10 のようになる。白川村では消火栓の水利を上水道ではなく放水銃と同じ系の重力式水供給システムから得ているため、消火栓には主システムとしての役割はない。むしろ、3つのシステムが同じ程度に使用される並列系のシステムを構成している。郡上八幡は消防庁の定める消防水利の基準（昭和36年）をほぼ満たす消火栓設備を完備しているが、白川村と同じく、火災の現場で最も有効な手段を複数あるいは全て選んで消火活動を行っており、一般的な都市の持つ過度な消火栓依存の傾向はみられない。これは、システムのどれかが故障してもほかのシステムが補完する体制が常に整っている状態である。

これらの事例で特にフェイルセーフシステムとして注目されるのは、自然水利を既設の開水路を使って供給する消防水利システムがバックアップとして有効に利用さ

Fig. 10. Structure of Water Supply System, Shirakawa-go and Gujo-hachiman.

Fig. 11. Daily and urgent use of channels.

れていることである。ここで、そのような開水路を介した水利供給体系をCWSS (Channel Water Supply System) と表現するものとする。

5.2 CWSSの特性

(1) システムの柔軟性

開水路を利用したCWSSは、微妙な勾配と手動の水門・堰などによる流量および流路の維持管理で成り立つごく単純なシステムである。このことは、システムの操作を容易にし、故障が発生してもそれを早い時点で知覚して回避・修理の方法を検討できる柔軟性を生み出す。地中に埋設された管路を経由する消火栓はあらかじめブロック化しておいて、一部の故障を全体の破壊に発展させない構造をとることはできるが、復旧してその地域の消火活動に貢献できるまでには多大な時間を必要とする。CWSSは、一部が故障しても全体に影響を与える災害に発展することを容易に回避できるフォールトトレラントシステムである。

(2) 日常と非常の併用

人々の生活との関わりが強い媒体である水路を多角的に活用しようとするCWSSは、非常時の利用方法も日常生活の利用形態に根ざしている (Fig. 11)。住民が日頃慣れ親しんだ方法がそのまま火災時の水利用に反映されているため、非常時に火災活動に従事することが期待される市民に対しては、活用できる水利源が増えて、より火災に対応しやすくなる。このことは、逆に日常的な防火意識を地域に植え付けける要素ともなっている。また、日常生活に根ざした水利は、災害中もしくは災害後の飲料水、トイレ用水など、阪神・淡路大震災でその不

足が大きな問題となった生活用水の確保にも対応する。

(3) 初期消火への対応

常に開かれた空間として水利を提供する開水路を媒体とする CWSS は、火災を拡大させないために重要な初期消火を可能にする。阪神・淡路大震災では初期消火用水が身近に常備されていなかったことも火災の延焼拡大の要因であったと考えられる。利用可能な消火用水を扱いやすい状態で居住空間の近傍に確保しておくことは、特に火災が一瞬のうちに拡大してしまう可能性を潜在的に有する密集木造住宅群において、非常に重要な消火用水となると考えられる。

(4) 既存の環境の有効利用

開水路は、郡上八幡の北町のような、あらかじめ消防用水路として整備されてきたものを除いて、生活の必然性から建設された人工構造物である。我が国の特徴であるモンスーン気候は、豊富な自然水をもたらし、その恩恵を受けて形成されてきた都市は少なくない。現代においては、既設の環境の一部となっている水路を有効に利用する方法は、洪水の調節の必要はあるが、水門等の調整によって必要流量を取水するだけで地震時に消防水利が不足するリスクを軽減できる実行可能な手段である。用水路、特に都市内小河川となって流れる水路の現状は、飲料水、農業用水の必要性がなくなった時点から、雨水や洪水を流下させるだけの空間となり“ドブ化”しているところが少なくない。そこで、これらの環境を改善するとともに消防水利として位置づけを明確にすれば、本来の流れを取り戻して環境にも良い影響が与えられると考えられる。

§ 6. おわりに 風土に根ざした防災システム

本論文で取り上げた安全設計上有効なシステムは、その土地の性質を有効に活用したシステムであるとともに、延焼しやすい構造を持つ木造の町並みを保全するために構築されてきたシステムであった。翻って、現在の都市の多くは、古くから継承されてきた地域特性を否定し、再構築することによって不燃化を達成させようとする選択肢を選んできた。この選択が、画一的な都市の形成を促し、コミュニティや文化の崩壊を招いた一つの原因であるといっても過言ではない。

和辻(1979)は、『風土』の中で次のように述べている。

「風土と呼ぶものはある土地の気候、気象、地質、地味、地形、景観などの総称である。…家屋の様式は家を作る仕方の固定したものであるといわれる。その仕方は風土に関わりなしに成立するものではない。家は寒さを防ぐ道具であるとともに暑さを防ぐ道具でもある。…さらにそれは暴風、洪水、地震、火事などにも

耐えなくてはならぬ。屋根の重みは地震に対して不利であっても暴風や洪水に対しては必要である。…これらの様々な制約がその軽重の関係において秩序づけられつつ、ついにある地方の家屋の様式が作り上げられてくるのである。そうすれば家を作る仕方の固定は、風土における人間の自己了解の表現にほかならなであろう」。

これは、我々のとるべき地震火災対策が、建設的に火災を耐え跳ね返すやり方だけでなく、その土地の風土から生まれる制約をうまく融合させて災害をしのぐやり方が重要であることを暗に示している。

白川村および郡上八幡のシステム構築には、公設消防の整備の遅れが影響しているとも捉えることもできるが、一方で、住民自らが、人命・地域の財産を守ろうとする意識を今に継承し、地域性に根ざした防火体制を構築しようとしてきたことが大きな要因となっている。システムの複雑化に伴い、自主的な管理が及ぶ領域が矮小化され、住民の手元から離れつつある今日において、住民自身による危機管理体制を日常的な視点から作り上げる両事例は、豊かで、地震に強いまちづくりの最も基本的な要因を示唆している。

地震から守らなければならない町とは、人々が豊かな生活を営める環境を整えた場所であり、住環境として日常生活に潤いを与えつつ、緊急時には火災を消火する用水としての活用が期待される開水路は、そのようなまちづくりを促す媒体である。我が国には、農村部に限らず、都市においても発達した開水路を有しているところが少なくない。日本の気候に適した形態として今に継承されてきた木造文化を否定しないで地震に強い環境をつくっていくためには、気候によりもたらされる豊富な自然水利を利用した開水路を再評価し、開水路系消防水利システム：CWSS (Channel Water Supply System) として検討されることが推奨される (Fig. 12)。

Fig. 12. Water Supply System rooted in Culture and Climate.

文 献

- 小林正美, 1990, サンフランシスコ市の地震火災と都市の安全設計の思想, 都市計画学会, 25, 715-720.
- 小林正美, 1993, 都市防災におけるフェイルセーフ設計, オペレーションズ・リサーチ, 38, 24-28.
- 近藤次郎, 1969, 安全を設計する, 講談社, 160-164.
- 消防庁, 1998, 平成9年度版消防白書, 159-160.
- 総務庁統計局, 1993, 平成5年 住宅統計調査, 135 pp.
- 当麻善弘・南谷 崇・藤原秀雄, 1991, フォールトトレラントシステムの構成と設計, 槇書店, 4-7.
- 日本火災学会, 1996, 1995 年阪神・淡路大震災における火災に関する調査報告書, 181 pp.
- 野中 保・島岡 淳, 1990, 冗長系, 日科技連出版, 41 pp.
- 林 善男, 1981, 人間工学, 日本企画協会, 277 pp.
- 平野敏右, 1991, 安全の目盛, コロナ社, 64 pp.
- 室崎益輝, 1995, 兵庫県南部地震時の火災被害からなにを学ぶか, 1995 年度日本建築学会大会防火部門研究協議会資料.
- 室崎益輝, 1996, 1995 年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書, 日本火災学会, 120-126.
- 和辻哲郎, 1979, 風土, 岩波書店, 15-16.