

◆ 耐震・危機管理技術特集 ◆

コンクリートの動的引張強度についての検討

永山 功* 佐々木隆** 波多野政博***

1. はじめに

現在、ダムの耐震性は、震度法を用いた解析によって確認している。震度法を用いたダムの耐震設計法は、これまでの経験と実績によって、信頼性の高い設計法として認められているが、高い耐震性を持ったダムをより経済的に設計するためには、地震時のダムの挙動を正確に再現したより合理的な耐震設計法の確立が必要である。

震度法を用いた重力式コンクリートダムの現行耐震設計法では、ダム堤体に一様な設計震度を作成させたとき、堤体内に引張応力が生じないように断面を定めることとしている。しかし、重力式コンクリートダムの動的応答解析結果によれば、大規模な地震時に、ダム堤体内に大きな引張応力が生じていることは明らかであり、今後、ダムの耐震設計の合理化を進めるにあたっては、コンクリートの引張強度の動的特性を明らかにし、地震時にダム堤体内に発生する引張応力の許容値を定めていく必要があるといえる。

このような背景から、ここでは、コンクリートの動的引張試験を行い、セメント水比の大小や動的応力の載荷速度がコンクリートの動的引張強度に及ぼす影響について考察した。

2. 試験の概要

2.1 試験方法

筆者らは、これまで、直接引張試験機を用いてコンクリートの動的引張強度の特性を検討してきた¹⁾。その結果、コンクリートの動的引張強度は載荷速度の増加とともに増大するが、直接引張試験では、その載荷方法の特性から、試験結果に大きなバラツキが生じ、載荷速度の影響を正確に評価するのが困難であることが分かってきた。また、直接引張試験と簡便な引張試験法として知られている割裂引張試験の結果を比較したところ、両者の結果により対応関係があることも分かってきた。このことから、今回の試験では、割裂引張

試験法を用いてコンクリートの動的引張特性を検討するものとした。

2.2 試験機の概要

本試験に用いた試験機の仕様を表-1に示す。本装置は、電気油圧サーボ方式で荷重制御または変位制御を行って動的圧縮荷重または動的引張荷重を載荷することができるようになっている。本試験では、荷重制御によって割裂引張試験用供試体に動的圧縮荷重を載荷させた。

また、動的ひずみ測定器の仕様を表-2に示す。

表-1 動的引張・圧縮試験装置の仕様

項目	機能
最大荷重	±390kN
最大変位	±10mm
加振波形	正弦波・三角波・矩形波 (0.01~25Hz)
最大速度	4cm/s
制御方式	電気油圧サーボ方式
荷重計	±450kN (ひずみ式)
変位計	±12.5mm (差動トランス方式)
荷重変換部	±10V/±390kN (モニター出力)
変位変換部	±10V/±10mm (モニター出力)
載荷盤の構造	球座(剛結でない)

表-2 動ひずみ計測器の仕様

項目	機能
チャンネル数	10 チャンネル
変換部	A/D および D/A 変換が可能 分解能 12bit データメモリ 16k ワード/チャンネル
サンプリング速度	最小 0.5ms 最大 100ms (1~100ms まで 1ms 単位で設定可能) 全チャンネル同時サンプリング
付属機能	AC カップリング機能、 トリガー機能
その他	パソコンから I/F(GP-IB) を介して 制御・データ収集を行う

本測定器は、各チャンネルが独立しており、全チャンネル同時にサンプリングができるようになっている。

なお、載荷荷重データ、計測データの入出力は全てパソコン用いて処理するものとした。

2.3 試験の種類

(1) 割裂引張試験

割裂引張試験は、横に倒した円柱供試体に圧縮荷重を作用させて割裂破壊を発生させ、その時の破壊荷重から間接的に引張強度を求める方法である。割裂引張試験の方法は、基本的に JIS A 1113 「コンクリートの引張強度試験法」に準拠したが、動的載荷試験を行うため、以下のように試験方法を一部変更した。

まず、JIS A 1113 では、載荷速度は供試体中央において $0.0067\sim0.0083\text{N/mm}^2/\text{s}$ が標準とされているが、本試験では、JIS の載荷速度を丸めた

$0.01\text{N/mm}^2/\text{s}$ を最小として、 0.01 、 0.1 、 1 、 $50\text{ N/mm}^2/\text{s}$ の4種類を採用した。また、供試体数は、後述する試験ケース毎に各 18 本とし、供試体の寸法は直径 19cm 、長さを 19cm とした。

なお、本試験では、割裂破壊を確実に発生させるため、図-1 に示すようなアクリル板の載荷治具を採用した。

(2) 一軸圧縮試験

割裂引張試験に用いるコンクリートの均一性を確認するため、割裂引張試験用供試体を作製したのと同じバッチのコンクリートを用いて、JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験法」に準拠した圧縮強度試験を行った。載荷速度は JIS A 1108 の規定により $0.2\text{N/mm}^2/\text{s}$ とした。なお、本試験は割裂引張試験を補足する試験であることから、供試体寸法は JIS A 1108 の規定と異なる直径 10cm 、高さ 20cm を採用した。

2.4 供試体諸元

(1) 供試体寸法

割裂引張試験用の供試体は、ひずみゲージを貼る必要性と、できるだけ一様な供試体を作るという目的から、通常よりもやや大きい直径 19cm 、高さ 19cm の供試体とした。

一方、一軸圧縮試験用の供試体は、割裂強度試験の供試体をなるべく多く作るという理由から、必要最小限の寸法として直径 10cm 、高さ 20cm とした。

(2) 配合

コンクリートの材料として、セメントには普通ポルトランドセメント、骨材には笠間産砂岩の碎石を用いた。また、混合剤として遅延型 AE 減水剤を用いた。なお、供試体の均一性をできるだけ

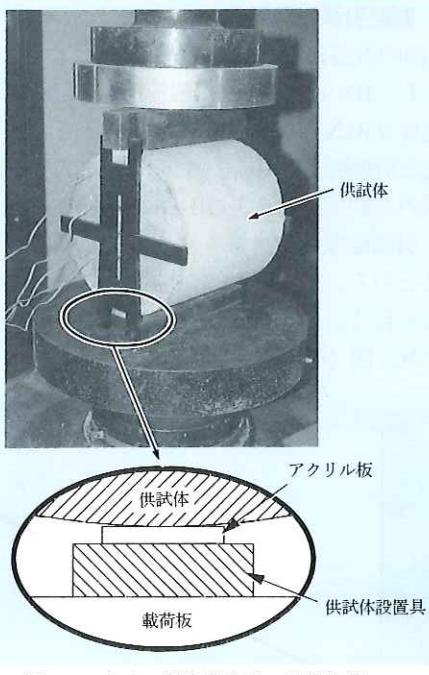


図-1 アクリル板載荷治具の設置状況

表-3 骨材の物性値

骨材	物性値
細骨材	笠間産砂岩、表乾比重=2.64 粗粒率=2.81
粗骨材	笠間産砂岩、表乾比重=2.68

表-4 試験配合

骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a(%)	セメント水比 C/W	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤
10	4±1	8±1	51.0	2.00	164	328	876	853	0.164
10	4±1	8±1	53.0	1.67	169	282	924	830	0.141
10	4±1	8±1	57.0	1.25	179	224	1,006	769	0.112

確保するため、骨材の最大寸法は10mmに制限した。骨材の物理試験結果を表-3に示す。

次に、試験に用いたコンクリートの配合を表-4に示す。コンクリートの強度に大きく関係するセメント水比は2.0、1.67、1.25の3ケースとした。

(3) 供試体作製方法

供試体の作製は、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠して行った。なお、突き固めは突き棒で行った。

(4) 材齢および養生方法

供試体は試験材齢91日(実際には88日~93日)の48時間前まで水中養生を行い、その後は水中から取り出し、ひずみゲージの貼付けを行った。

2.5 測定

(1) 載荷重

載荷重は試験機の載荷盤と供試体設置治具の間にロードセルを取り付けて測定した。なお、供試体に生じる応力 σ は、載荷重 P から次式によって求めた。

一軸圧縮試験

$$\sigma_c = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (1)$$

割裂引張試験

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dH} \quad (2)$$

ここに、

d : 供試体直徑

H : 供試体長さ

(2) ひずみ

全ての供試体でひずみを測定した。一軸圧縮試験用供試体においては、供試体側面に長さ30mmの

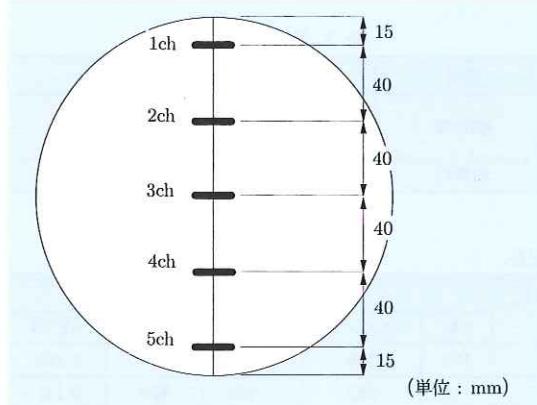


図-2 ひずみゲージ貼付位置

ひずみゲージを2枚配置した。また、割裂引張試験用供試体においては、図-2のように、供試体の片端面の想定破壊線上に長さ10mmのひずみゲージを5枚配置した。

(3) 測定間隔

載荷重、ひずみの測定間隔は、一軸圧縮試験では50ms、割裂引張試験では、載荷速度 $0.01N/mm^2/s$ の時には100ms、 $0.1N/mm^2/s$ の時には10ms、 $1N/mm^2/s$ の時には1ms、 $50N/mm^2/s$ の時には0.5msとした。

3. 試験結果

3.1 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮試験より得られたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係を図-3に示す。図によれば、圧縮強度の変動係数は8.5~12.4%の範囲に収まり、また、圧縮強度の大きさはセメント水比の法則によく従っていることから、コンクリートの品質は均質であったと考えてよい。

3.2 割裂引張試験結果

(1) 静的引張強度

まず、JISで規定された載荷速度には等しい載荷速度 $0.01N/mm^2/s$ の試験について、セメント水比と引張強度の関係を図-4に示す。図によれば、引張の変動係数は6.7~10.4%の範囲に収まり、また、引張強度はセメント水比と高い線形関係にあることから、割裂試験の試験誤差は小さいものと考えられる。

なお、図-5は同一バッチのコンクリートから作

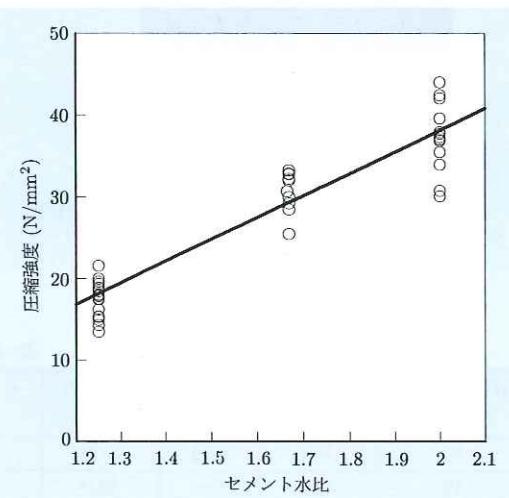


図-3 セメント水比と圧縮強度

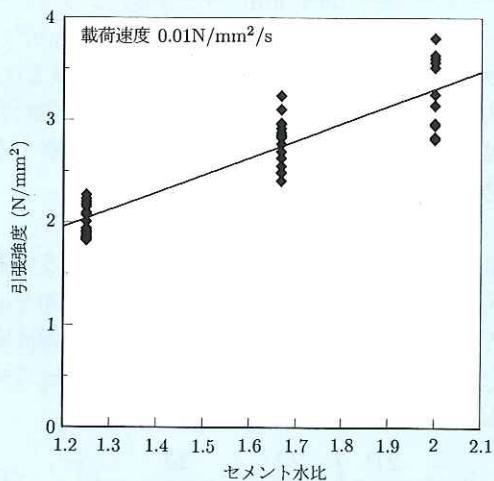
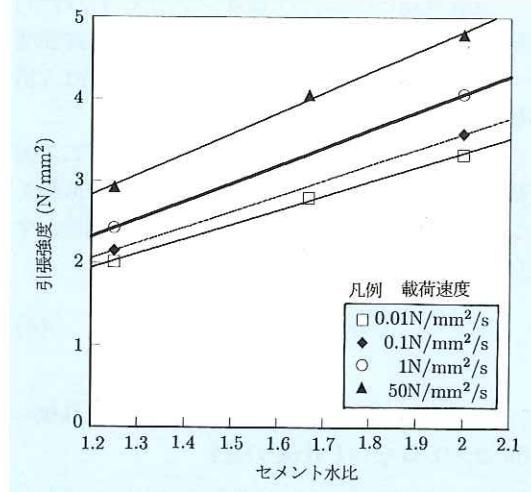
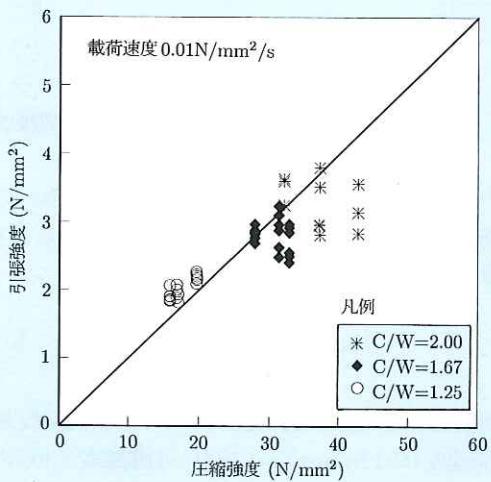
図-4 セメント水比と引張強度(載荷速度 $0.01\text{N}/\text{mm}^2/\text{s}$)

図-6 セメント水比と引張強度

図-5 圧縮強度と引張強度(載荷速度 $0.01\text{N}/\text{mm}^2/\text{s}$)

製した供試体について、圧縮強度と引張強度の関係を示したものである。図によれば、強度の大きいセメント水比 $C/W=2.0$ の配合でややばらつきが高いものの、引張強度と圧縮強度の比は概ね $1/10$ 程度となっており、一般的なコンクリートと同様の性質が得られたといえる。

(2) 動的引張強度

次に、各載荷速度毎に、セメント水比と引張強度の関係を求めた結果を図-6に示す(各点は18供試体の引張強度の平均値)。図によれば、いずれの載荷速度においても、セメント水比と引張強度の間には線形の関係があること、また、載荷速度の増加とともに引張強度が増加することがわかる。なお、図-7は、セメント水比 $C/W=1.25$ の時の

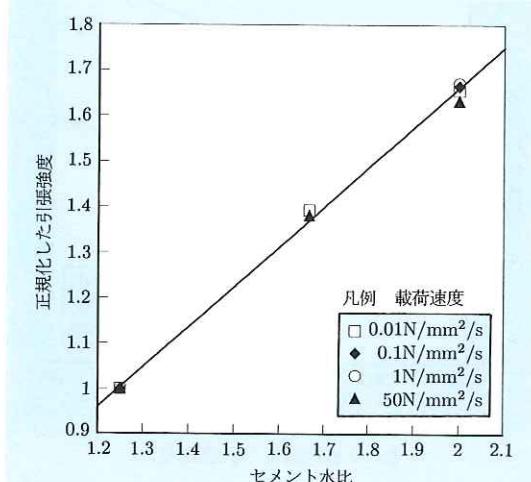


図-7 セメント水比と正規化した引張強度

引張強度を基準として試験値を正規化し、図-6を書き直したものである。図によれば、正規化した引張強度は載荷速度によらず、同じセメント水比であれば同じ値を示すことがわかる。

また、各セメント水比毎に、載荷速度と引張強度の関係を求めた結果を図-8に示す。図によれば、いずれのセメント水比においても、載荷速度の増加とともに引張強度も増加していくことがわかる。なお、図-9は、載荷速度 $v = 0.01\text{N}/\text{mm}^2/\text{s}$ の時の引張強度を基準として試験値を正規化し、図-8を書き直したものである。図によれば、正規化した引張強度は、セメント水比によらず、同じ載荷速度であれば同じ値を示すことがわかる。

ちなみに、本試験における最大載荷速度である

$v = 50\text{N/mm}^2/\text{s}$ におけるコンクリートの動的引張強度は、JISで規定されている静的引張強度($v = 0.01\text{N/mm}^2/\text{s}$ における引張強度)の約1.5倍の値を有している。

ここで、100m級の重力式コンクリートダムの固有周期を0.2~0.25秒(1/4周期が0.05~0.06秒)、コンクリートの静的引張強度を 2N/mm^2 程度とすれば、

$$v = \frac{2 \times 1.21v^{0.044}}{0.05 \sim 0.06} \quad (3)$$

(ここに、 $1.21v^{0.044}$ は図-9の近似式。また0.05~0.06は、0.05ないし0.06の意)

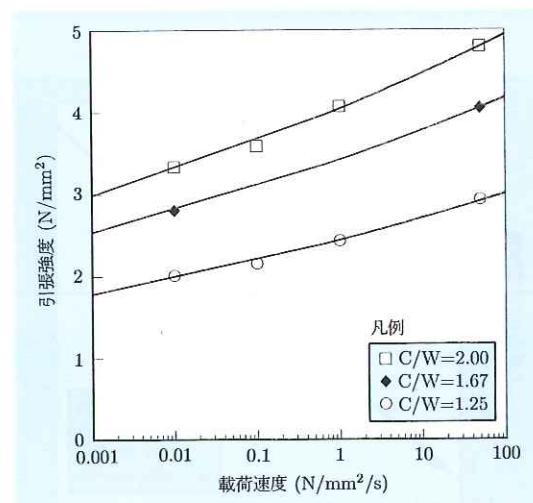


図-8 載荷速度と引張強度

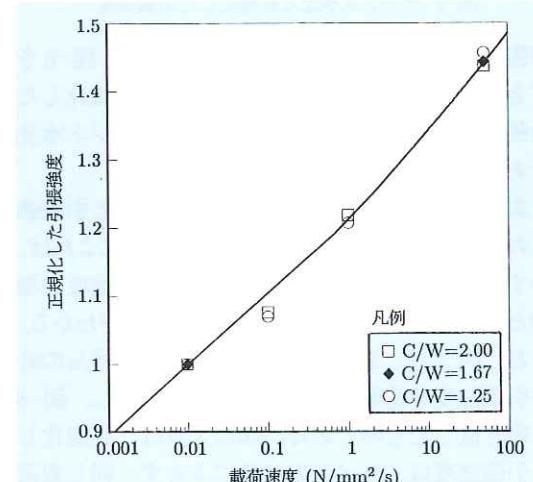


図-9 載荷速度と正規化した引張強度

より、 $v = 48 \sim 58\text{N/mm}^2/\text{s}$ となる。よって、クラックが発生するときの載荷速度は $50\text{N/mm}^2/\text{s}$ のオーダーと考えてよい。したがって、図-9より、重力式コンクリートダムの設計において、動的引張強度は静的引張強度の1.5倍程度の値を有すると考えることができる。

(3) 試験時のひずみ

割裂引張試験では、割裂破壊面に作用する引張応力 σ_x は前述した(2)式で表される一様分布を示すが、割裂破壊面に直交する面に作用する垂直応力 σ_y は次式で表され、割裂破壊面に沿った σ_y の分布は一様でない。

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi dH} \left(\frac{2d}{d-2y} - \frac{2d}{d+2y} - 1 \right) \quad (4)$$

ここに、

d : 供試体直径

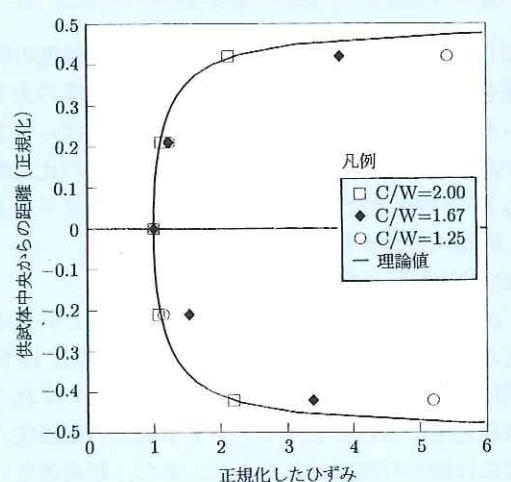
H : 供試体長さ

y : 割裂破壊面の中心を基準とした割裂破壊面沿いの長さ

このため、割裂破壊面に直交する方向のひずみ ε_x の分布は、ポアソン比の影響を受け、次式($\sigma_z = 0$ を仮定)で表される非一様な分布を示す。

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (5)$$

割裂破壊面に沿った引張ひずみの代表的な測定例(載荷速度 $0.01\text{N/mm}^2/\text{s}$ 、応力=引張強度×30%)

図-10 割裂破壊面における引張ひずみの分布(載荷速度 $0.01\text{N/mm}^2/\text{s}$ 、応力=引張強度×30%)

場合)を図-10に示す。なお、図中のひずみは、ポアソン比を0.2と仮定し、さらに割裂破壊面の中心における値を基準に正規化して表現している。図によれば、ひずみの測定値は式(5)より求めた値とほぼ同一の値を示し、理論どおりの割裂破壊が生じたものと判断される。

次に、ひずみ分布が比較的平坦な中央3枚のひずみゲージから、次式によって弾性係数(弾性係数は引張強度の30%の応力時における割線弾性係数として定義)を求め、載荷速度と弾性係数の関係を整理したものが図-11である。

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \left\{ 1 + \nu \left(\frac{2d}{d-2y} + \frac{2d}{d+2y} - 1 \right) \right\} \quad (6)$$

図によれば、弾性係数の値にややばらつきが見られるものの、載荷速度の影響は比較的小さい。これは、引張強度の載荷速度依存性と比べ、大きく異なる点である。すなわち、動的載荷において

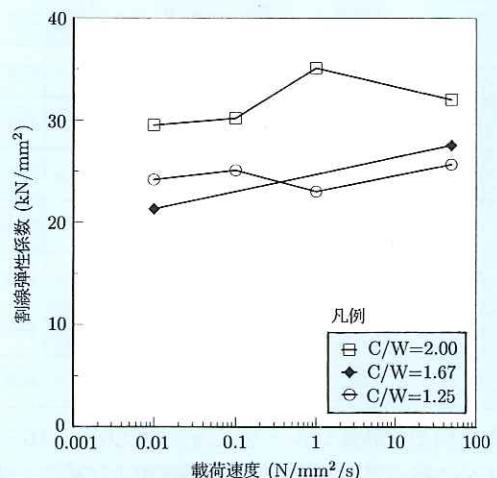


図-11 載荷速度と割線弾性係数

は、引張強度は大きく変化するが、弾性係数はあまり変化しない。このことは、動的載荷においては、引張ひずみ能が大きくなることを示している。

4. まとめ

本試験で得られた結果をとりまとめると、次のとおりである。

- (1) コンクリートの引張強度は載荷速度の増加とともに大きくなる。
- (2) いずれの載荷速度においても、セメント水比と引張強度の間には線形の関係がある(セメント水比の法則は引張強度についても成り立ち、また、任意の載荷速度において成り立つ)。
- (3) 静的引張強度(載荷速度 $v = 0.01 \text{ N/mm}^2/\text{s}$)を基準に正規化した場合、同じ載荷速度であれば、動的引張強度はセメント水比の大小によらず一定の値を示す。すなわち、動的載荷による引張強度の増加率はセメント水比に依存しない。
- (4) コンクリートの引張強度は載荷速度に依存するのに対し、弾性係数は載荷速度の大小に関わらず、概ね一定の値を示す。

本試験では、急速であるが一様な載荷速度に対して、コンクリートの引張強度の載荷速度依存性を検討した。今後は、実際の地震動のように荷重速度が変化する状態における引張強度についても検討する予定である。

参考文献

- 1) 永山功、渡辺和夫、佐々木隆、尾畠伸之、首藤美誠：ダムコンクリートの直接引張強度についての実験的検討、土木研究所資料第3223号、1994.12

永山 功*



建設省土木研究所ダム部
ダム構造研究室長
Isao NAGAYAMA

佐々木 隆**



同 ダム構造研究室
主任研究員
Takashi SASAKI

波多野政博***



同 ダム構造研究室
Masahiro HATANO