

渦励振防止型無線鉄塔の開発

Development of New Type Communication Tower to Prevent Vortex-Induced Vibration

井出 義人 IDE Yoshito JFE エンジニアリング プラント建設本部 シビルエンジニアリングセンター 設計部
齋藤 健寛 SAITO Takehiro JFE エンジニアリング プラント建設本部 シビルエンジニアリングセンター 設計部
安永 隼平 YASUNAGA Jumpei JFE スチール 建材センター 建材技術部建築技術室 主任部員(副課長)・博士(工学)

要旨

ライフサイクルコストでコスト競争力の高い通信鉄塔を実現するために1本柱鉄塔に着目し、1本柱鉄塔の課題である渦励振による共振を抑制できる鉄塔を考案し、風洞実験や数値流体解析を行った。

その結果、鉄塔上部にテーパーを設ける形状とすることで、風作用時の渦励振による共振が劇的に抑制されることを実験、解析の両面で確認できた。そして、従来のトラス型鉄塔よりライフサイクルコストの低減や建て方期間の短縮が図れる渦励振防止型鉄塔を実用化できた。

Abstract:

In order to establish cost-competitive communication tower with low life-cycle cost, JFE Engineering devised single-pillar tower that can suppress resonance due to vortex excitation, which is the problem of single pillar, and conducted wind tunnel experiments and numerical fluid analysis.

It was confirmed in both experiments and analysis that resonance due to vortex excitation during wind action was dramatically suppressed by forming a taper on the upper part of the tower. New type communication tower in which life cycle cost and construction period can be reduced compared to the conventional truss type could be put into practical use.

1. はじめに

本稿では、ライフサイクルコストの安価な1本柱鉄塔として、1本柱の課題である渦励振による共振を防止できる鉄塔を考案し、風洞実験や数値流体解析を行った渦励振防止型鉄塔の開発の取り組みを述べる。なお、主な適用対象は通信鉄塔である。

2. 既存通信鉄塔の概要

既存の通信鉄塔の概要を表1に示す。トラス型は部材数が多く、再塗装費も高く美観性にも難点がある。4本柱型は、耐候性鋼板を使用することにより、部材数が少なく再塗装が不要になることからメンテナンスコストを削減でき、美観性も評価された。しかし、鋼材重量の削減に限度があり、さらなるコストダウンは厳しい。従来の1本柱型は、メンテナンスコストや美観性について4本柱型と同様の長所を有するが、風作用時の過大な変形を低減するために、鋼材重量が4本柱型より増大することが欠点である。一方で、解決すべき課題が風作用時の変形制御と鋼材重量低減と明

確なため、この課題に着目し、最もコスト競争力のある鉄塔の開発を目指した。

3. 1本柱鉄塔の開発課題




1本柱鉄塔の課題は、塔状比(高さH/幅D)が大きくスレンダーな形状のために発生する、風作用時の渦励振による共振振動である。渦励振は、鉄塔後方に生じるカルマン渦により風直交方向の力(以降、揚力)が左右交互に発生し、その渦発生振動数が鉄塔の一次固有振動数と一致することにより発生する(図1)。図2に渦励振による共振を確認した風洞実験の例を示す¹⁾。安定したデータ通信を確立するためには、レベル1の風に対して、鉄塔頂部のアンテナ転倒角を0.7度以下にする必要がある。レベル1の風で共振時の変形が約6倍程度になることから、共振時の変形を抑えるためには、大幅に鋼材重量が増加する。

4. 対応策の提案

下記2つの対応策により共振による過大な変形の抑制を図る。図3に各対応策の概要を示す。

2022年3月31日受付

表 1 既存の通信鉄塔
Table 1 Existing communication tower

Steel tower type		Truss type	Four pillar type	Conventional one pillar type
Appearance				
Component parts		Angle steel or steel pipe	Four steel pipes	One large diameter steel pipe
Cost	Initial	◎ (Steel weight ratio: 100)	△ (Steel weight ratio: 110)	× (Steel weight ratio: 200~300)
	Maintenance	△ (Repainting during service : Twice)	◎ (Repainting during service : Unnecessary)	◎ (Repainting during service : Unnecessary)
Aesthetic		△	○	○
Comprehensive evaluation		○	○	△

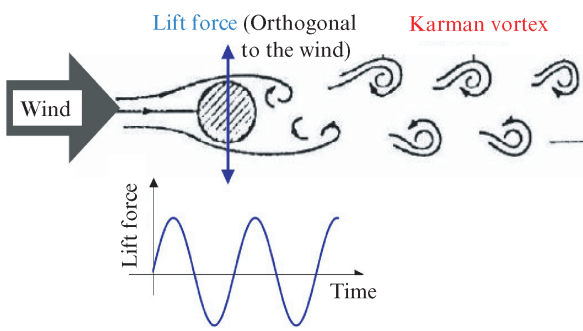


図 1 カルマン渦による共振発生のメカニズム
Fig. 1 Mechanism of resonance by Karman vortex

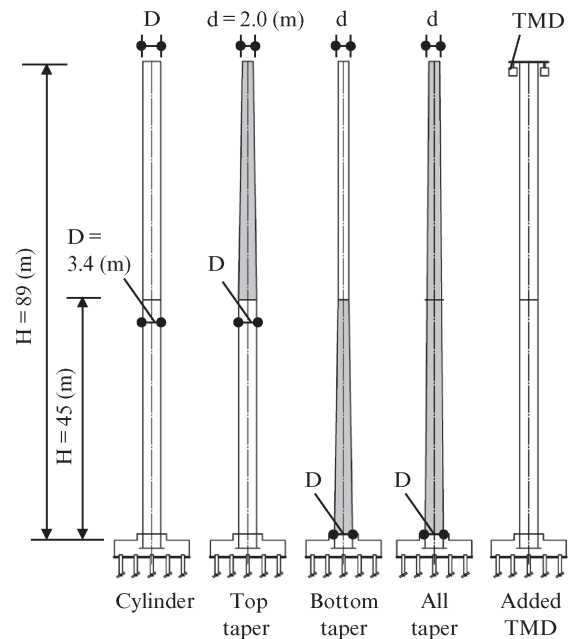


図 3 対応策の概要
Fig. 3 Outline of countermeasures

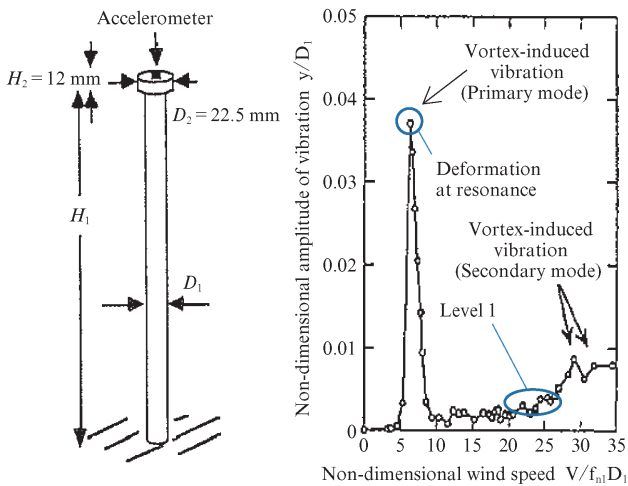


図 2 渦励振を確認した風洞実験例¹⁾
Fig. 2 Vortex-induced vibration in wind tunnel experiment¹⁾

(1) 鉄塔形状の工夫

4 パターンの形状を検討した。曲げ剛性を大きくするために、鋼管径は工場製作品で陸上運搬可能な最大径 3.4 m を基準とし、さらに、受風面積を少なくして風荷重を低減するために鋼管にテーパ（傾斜）を採用する。テーパつき円柱では、一様な径の円柱（Cylinder）に対して渦励振の性状が変化することが既往の研究²⁾で確認されている。ただし、上部テーパ（Top taper）に関する検討はこれまででないこ

とから、新たな工夫による渦励振の抑制効果が期待できる。

(2) 制振装置 TMD (Tuned Mass Damper) の設置

超高層建築の変形抑制のために用いられる TMD を無線鉄塔に適用する。なお、TMD は建物頂部の錘が建物の振動と逆方向に動いて、建物の揺れを低減する制振技術である。

上記対応策による渦励振による共振の抑制効果を確認するため、風洞実験と数値流体解析などを実施した。本稿では特に効果があった鉄塔形状の工夫の結果を述べる。

5. 風洞実験

前章で提案した鉄塔形状 (図3) に対して風洞実験を行った。本章では、当初の想定以上に変形の抑制効果を確認できた上部テーパについて述べる。

5.1 実験概要

実験は東京工芸大学・風工学研究センターの大型乱流境界層風洞で行った。実験気流は地表面粗度区分Ⅲ相当の境

界層乱流とした。図4に示すようにモデル1, 2で鉄塔形状の影響を、モデル3~5で付属物の影響を把握する。試験体の幾何学的尺度は1/100とする。モデル1は円柱とし、モデル2はH=450mmより上部にテーパがある。モデル3~5は、モデル2にステージ、アンテナ、TMD模型を段階的に設置した。表2に建築基準法に規定される設計風速と無次元風速の関係を、写真1に風洞実験の様子を示す。



写真1 風洞実験の様子

Photo 1 Wind tunnel experiment

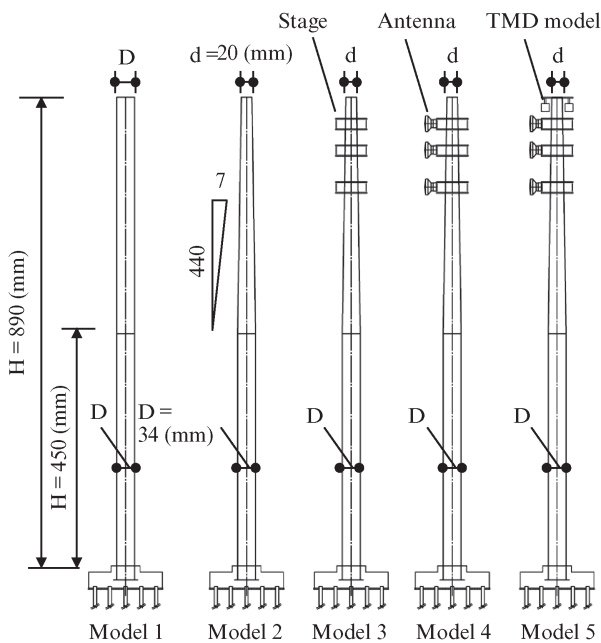


図4 実験モデル図

Fig. 4 Experimental model

表2 設計風速と無次元風速の関係

Table 2 Design wind speed and dimensionless wind speed

Wind speed level	Return period	Design wind speed V_{full} (m/s)		Non-dimensional wind speed $V_{model}/(f_{model} \times D_{model})$	
		Reference wind speed (10 m)	Top (89.15 m)	Reference wind speed (10 m)	Top (89.15 m)
Level 1	100 year	36.8	41.8	21.6	26.7
Level 2	500 year	42.5	52.3	25.0	30.8

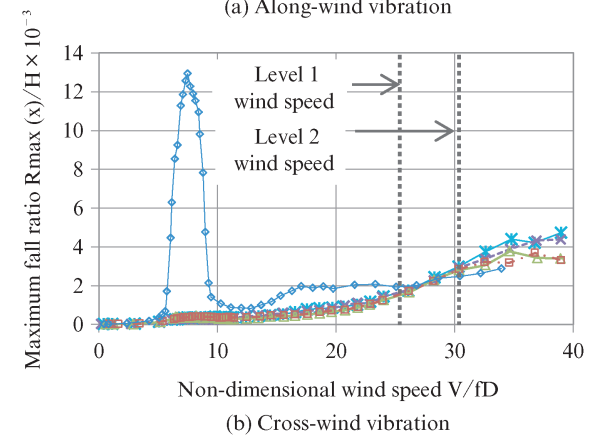
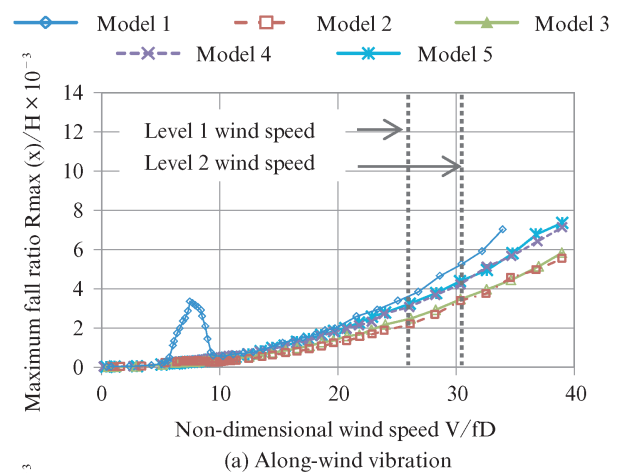


図5 無次元風速と最大転倒角の関係

Fig. 5 Relationship between non-dimensional wind speed and maximum tipping angle

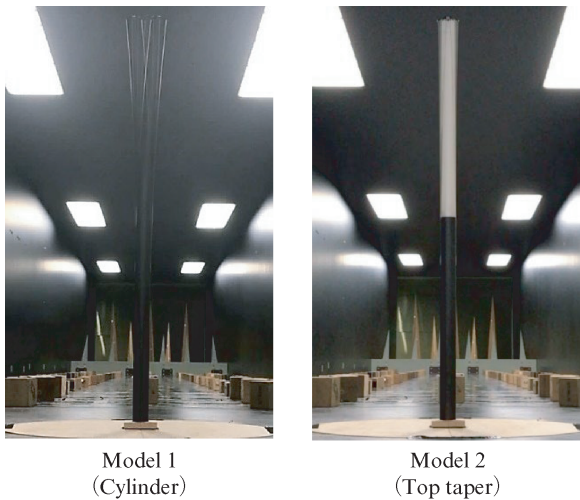


写真2 風洞実験状況（共振風速時の振動特性）

Photo 2 Wind tunnel experiment (Characteristics of vibration at resonance wind speed)

5.2 実験結果

図5に無次元風速と最大転倒角の関係を示す。

設計風速（無次元風速 26.7～30.8）に近づくにつれて転倒角も増大するが、モデル1は無次元風速7付近で、渦励振による共振が起きている。しかし、テーパを採用したモデル2～5では、渦励振がほとんど確認されず、付属物は風応答に影響しないことが分かる。モデル2～5はモデル1と比較して渦励振を抑制できることを確認した。また、写真2に風洞実験状況を示す。共振風速時にモデル1では過大な揺れが発生したのに対して、モデル2では目視で確認できる揺れは発生しなかった。既往の研究²⁾などで実施された下部テーパおよび全テーパの検討では確認できなかった明確な振動抑制効果を上部テーパの場合には確認できた。

なお、モデル5はTMDの制振効果を見逃し、受風面積のみ考慮した結果である。TMDの制振効果は、別途実施する風応答解析や実鉄塔での振動計測で確認する。

6. 数値流体解析

6.1 渦励振抑制メカニズムの仮説

前章の風洞実験により上部テーパ（モデル2）は共振を大幅に抑制できることを確認した。上部テーパは円柱と比較して、上部で発生するカルマン渦の性状および渦の発生周波数が高さに応じて変化し、塔体に作用する風力が変化したため、渦励振が抑制されたと考えられる（図6（a））。カルマン渦の渦放出周波数 f は概略式（1）により算出される³⁾。

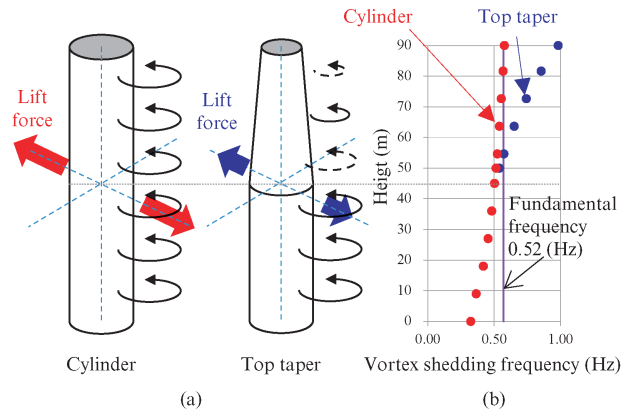


図6 カルマン渦発生イメージ及び渦放出周波数と高さの関係
Fig. 6 Image of Karman vortex generation and relationship between vortex shedding frequency and height

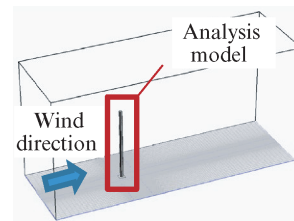


図7 解析空間全体図
Fig. 7 Analytical area

$$f = S_t \frac{V}{D} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V : 風速 (m/s)、 D : 構造物の直径 (m)、 S_t : ストローハル数（円形の場合 0.2）である。

風速の鉛直プロファイルは基準風速 8 m/s、地表面粗度区分Ⅲとし、実構造物を想定して高さごとに渦放出周波数 f を算出した結果を図6（b）に示す。円柱は渦放出周波数が鉄塔の一次固有振動数 0.57 Hz（ $=1/1.7$ s）とほぼ一致している。一方で、上部テーパは高さごとに渦放出周波数が変化しており、鉄塔の一次固有振動数から外れていることが確認できる。

6.2 解析概要

前節の渦励振抑制メカニズムの仮説を検証するために、鉄塔に対する3次元流れ場の解析を行った。具体的には、鉄塔周辺の気流と、上部テーパの有無による作用風力の変化を把握した。

解析には汎用3次元熱流体解析プログラム WindPerfect（（株）環境シミュレーション社製）を用いた。支配方程式は Navier-Stokes 方程式と連続式であり、乱流モデルは LES（標準 Smagorinsky モデル）とした。空間差分は風上1次と中心差分のハイブリッドとし、時間積分は SMAC 法とした。解析空間の全体図を図7に示す。ここでは、渦放出の高さ

方向分布の変化に着目するために、風速の高さ方向分布のみを考慮した一定風速を流入・流出境界に適用した。風速の鉛直プロファイルは基準風速 10 m/s、地表面粗度区分Ⅲである。

6.3 解析結果

鉄塔高さ GL+75 m 地点での速度分布図を **図 8** に示す。円柱より上部テーパの方が渦を放出する間隔が短く、渦放出周波数が大きいことが確認できる。これは、渦発生周波数が鋼管径により変化していることを意味する。鉄塔上部 1/3 の範囲に生じる揚力の時刻歴を **図 9** に示す。円柱で

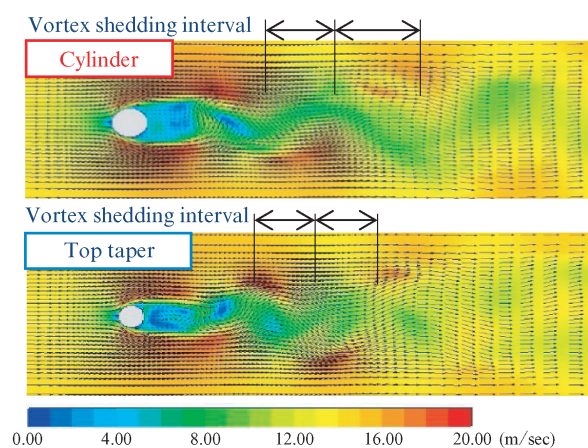


図 8 速度分布図 (GL+75 m 地点)
Fig. 8 Distribution of velocity (GL + 75 m)

は揚力がほぼ等しい大きさで左右に規則的に生じているが、上部テーパでは揚力の変動が小さく不規則である。これは、渦の発生周波数が高さ方向に変化した影響で、揚力が不規則に生じているためと考えられる。流入風の乱れによる影響など再現性に課題は残るが、前述した渦励振抑制メカニズムの仮説証明の一助となる結果が得られた。

以上、風洞実験と数値風洞解析の両方から、鉄塔形状の工夫による共振抑制効果を確認できた。

7. 実案件への適用

7.1 適用効果

従来鉄塔と新型 1 本柱鉄塔の比較結果を **表 3** に示す。新型 1 本柱鉄塔は鋼材重量が一番小さく、耐候性鋼板の採用によってメンテナンスコストも抑えられることから、最も競争力のある鉄塔となっている。ライフサイクルコストも、ト

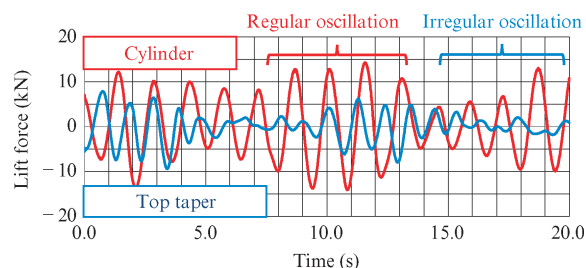


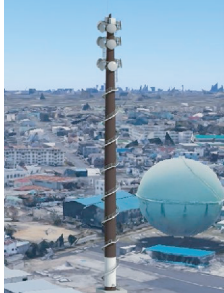


図 9 鉄塔上部 1/3 の範囲における揚力の時刻歴
Fig. 9 Time history of lift force acting on top 1/3 area of tower

表 3 適用効果の比較表

Table 3 Comparison of applied effects

Steel tower type		Truss type	Four pillar type	New one pillar type
Appearance				
Component parts		Angle steel or steel pipe	Four steel pipes	One large diameter steel pipe
Cost	Initial ^{※1}	○ (Steel weight ratio: 100)	△ (Steel weight ratio: 110)	◎ (Steel weight ratio: 80)
	Maintenance ^{※2}	△ (Repainting for 50-year service period : Twice)	◎ (Repainting for 50-year service period : Unnecessary)	◎ (Repainting for 50-year service period : Unnecessary)
Aesthetic		△	○	○
Comprehensive evaluation		○	○	◎

※1: Estimate based on a case with a foundation size of 14 m × 14 m

※2: Estimates based on the use of the following materials: Four pillar type and new one pillar type are weather-resistant steel plates, truss type is ordinary steel plate



写真3 鉄骨建方状況
Photo 3 Steel frame erection

ラス型より約2割安くなると試算している。施工性に関して、新型1本柱型鉄塔はトラス型鉄塔と比較して部材数を少なくできるため、建て方期間を短縮できる。

7.2 受注案件の概要

競争入札で受注した通信鉄塔（第1号機）の概要を以下に示す。

- ・高さ：88.75 m
- ・基礎サイズ：幅 14.0 m×奥行 14.0 m×厚さ 3.0 m
- ・パラボラアンテナ：計 15 基
- ・鋼材重量：230 t（アンテナ取付用ステージ，階段含む）

本案件では風洞実験結果を活用して実施設計し、共振が防止できる鉄塔として国土交通大臣認定を取得したことで、本鉄塔の設計の妥当性が公的に確認された。

写真3に2019年11月の鉄骨建方状況を示し、写真4に完成後の外観写真を示す。既往トラス鉄塔と比較して、本鉄塔は占有建設地が非常にコンパクトである。2号機の完成パースを写真5に示す。建設地はテニスコート（4面）であったが、同鉄塔のコンパクトさを活かし、コート面数を減らさずに建設するニーズにも応えられた。

8. おわりに

ライフサイクルコストの安価な1本柱鉄塔として、1本柱鉄塔の課題である渦励振による共振を防止できる鉄塔を考案し、以下の結果を得られた。

- (1) 上部テーパを設けることで暴風時の渦励振による共振が大幅に抑制されることを実験、解析の両面で確認できた。
- (2) 渦励振の防止により、鋼材重量が従来の1本柱と比較



写真4 第1号機の外観写真
Photo 4 Appearance of first project



写真5 第2号機の外観パース
Photo 5 Appearance of second project

- して大幅に低減し、従来のトラスタイプの鉄塔と比較しても、ライフサイクルコストが約2割削減できた。
- (3) 大口径鋼管を用いることで部材数が減少し、受注案件ではトラス型と比較して建て方期間を大幅に削減できた。
 - (4) 国土交通大臣認定により、本鉄塔の設計の妥当性が公的に認められた。
 - (5) 本鉄塔は従来トラス鉄塔と比較して建設地がコンパクトに抑えられるので、既施設内の建替え提案に有効である。

今回得られた知見をもとに、無線塔以外の構造物にも適用範囲を拡大していく所存である。

謝辞

本開発の風洞実験は、東京工芸大学工学部建築学科吉田昭仁教授にご指導いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 北川徹也, 藤野陽三, 木村吉郎. 塔状弾性模型を用いた風洞実験による高風速渦励振の発現特性に関する研究. 土木学会論文集. 1998, no. 591, p. 163-173.
- 2) 河井宏允. テーパーつき円柱の渦励振. 日本風工学会誌. 1994, no. 59, p. 49-52.

- 3) 日本鋼構造協会. 構造物の耐風工学. 第1版, 東京電機大学出版局, 1997, 688p. (p. 58.)



井出 義人



齋藤 健寛



安永 隼平