

◆ 報 文 ◆

地震時における橋梁上部構造端部と橋台間の衝突解析法 —積分時間間隔と衝突バネ定数の設定—

運上茂樹* 近藤益央** 三上 卓***

1. はじめに

大規模地震時に橋梁に大きな変位が生じた場合には、上部構造端部において隣接する上部構造間、あるいは、上部構造と橋台間で衝突が生じる場合がある。過去の地震被害においても、上部構造間の衝突が一方の上部構造の変位を増幅させたり、上部構造端部の変形や損傷、あるいは、橋台パラベットの損傷や背面土上の舗装の隆起などが生じた事例がある。一方、上部構造どうし、あるいは、上部構造と橋台間の衝突によるエネルギー吸収や変位の拘束によって逆に衝突部位以外の構造部材の損傷が低減されたと推測される被害形態も見られる。著者らの解析的検討¹⁾によれば、適切な抵抗を有する橋台と上部構造間で衝突が生じた場合には、橋全体の地震時応答を効果的に低減できる可能性があることを確認している。今後、橋梁の上部構造の端部構造の合理化や、より合理的かつ耐震性の高い橋梁の設計を考えた場合、このような点を適切に評価することが重要と考えられる。しかしながら、現状ではこうした衝突現象を考慮した地震応答解析手法や具体的な設計法に関しては十分に検討されていないのが実状である。

本文は、上記の背景のもとで橋梁上部構造と橋台間の衝突現象を考慮した地震応答解析手法の検討を目的として、地震時の衝突解析法のうち、特に衝突現象をモデル化する衝突バネ特性と数値積分時間間隔に着目して解析的に検討を行った結果をまとめたものである。

2. 衝突現象の解析手法の問題点

2.1 衝突バネモデル

隣接する上部構造間あるいは上部構造と橋台間の衝突現象の解析においては、衝突の影響を適切に解析に取り込むことが必要とされる。本解析で

は、川島ら^{2),3)}により提案された衝突バネモデルを用いた。川島ら³⁾は、弾性波理論を用いて桁衝突に関する検討を行い、時刻歴応答解析法で衝突解析を行う場合の適切な衝突バネおよび積分時間間隔の設定について提案を行っている。桁長を L 、桁の軸方向剛性を EA とし、これと同じ長さの n 個の梁要素でモデル化した場合に、1つの梁要素の軸方向剛性 nEA/L と衝突バネの剛性 $\tilde{k}_I$ の比

$$\gamma = \frac{\tilde{k}_I L}{nEA} \quad (1)$$

をパラメータとし、衝突後の桁の応答速度、さらに、桁に生じる応力分布を比較的正しくモデル化できる値として、 $\gamma = 1.5$ として解析している。また、積分時間間隔は、衝突後の桁の応答速度が弾性波動と同じ速度になるためには、衝突継続時間よりも短く設定しなければならないとしている⁴⁾。

2.2 地震時の衝突解析における検討課題

衝突現象は、上部構造内を波動が伝播していくように一般に非常に短い時間内に生じるため、衝突現象を解析的に追跡、再現するためには、その解析パラメータの設定に注意することが必要とされる。上記2.1のようにして求められる衝突バネ定数は、一般に大きな値となることから、衝突現象を追跡する解析を行う際には、積分時間間隔を十分に細かく設定する必要がある。一方で、数値積分間隔を過度に細かくした場合には、解析時間が長くなり、実用的とはならないような解析条件となることが考えられる。このため、ここでは、一般的な道路橋を対象にした場合に、上部構造と橋台間の衝突現象を適切に解析するために必要とされる衝突バネ定数の大きさと数値積分時間間隔の関係について検討した。

3. 衝突バネ定数と数値積分時間間隔の関係

3.1 解析対象橋梁と解析モデル

解析対象橋梁としては、道路橋を対象とするこ

Collision Analysis between Bridge Deck and Abutments during Earthquakes

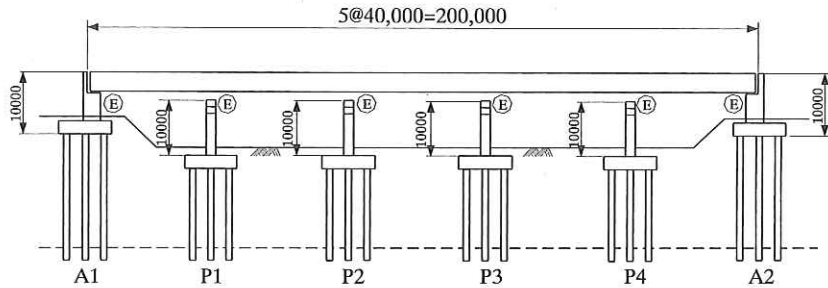


図-1 解析対象橋梁モデル

表-1 解析対象橋の設計条件

上部構造形式	5径間連続鋼I桁橋
橋長および支間長	40m × 5径間 = 200m
橋台形式	逆T式
橋脚形式および 橋脚躯体高さ	単柱橋脚、躯体高さ10m
基礎形式	杭基礎
支承形式	積層ゴム支承
支承条件	ゴム支承による 地震時水平力分散構造
地盤種別	II種地盤

ととし、文献5)に示される5径間連続の地震時水平力分散構造の橋を基本に設定した(図-1参照)。上部構造端部での衝突は、上部構造と左右両端の橋台間で生じるものと仮定した。解析対象橋の設計条件は表-1のとおりである。

上部構造端部における衝突現象を考慮して橋の地震時挙動を解析的に追跡するために、本検討では図-2に示すような骨組モデルを用いた非線形地震応答解析を行うこととした。上部構造は2次元はり要素でモデル化し、橋脚および橋台は地盤反力をモデル化した地盤バネに支持される骨組部材とし、橋脚については橋脚基部に塑性化が生じることを考慮した塑性回転バネを設けた。支承は、ゴム支承をバネとしてモデル化した。

衝突現象に関しては、上部構造端部と橋台パラペット間に衝突バネを設けた。実際の構造条件に即して衝突現象を再現できるモデル化を図るために、衝突バネとしては、桁と橋台間に図-3に示すような非線形の履歴特性を有するバネを設けた。上部構造の変位が所定の遊間量を超えて橋台のパ

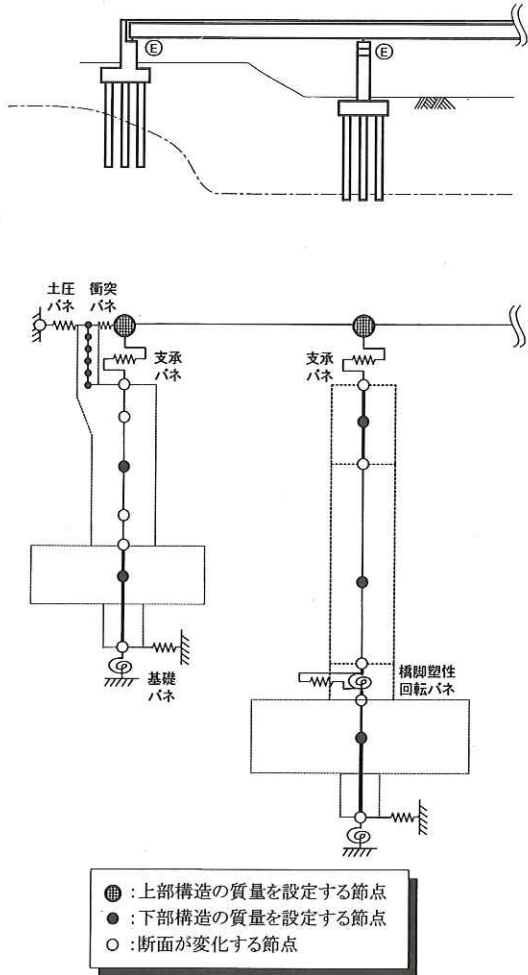


図-2 上部構造と橋台の衝突を考慮するための解析モデル

ラペットの方向に移動した際、衝突が始まり、衝突バネに反力が生じるものと仮定した。したがって、上部構造の応答変位が遊間変位量よりも小さい場合には衝突バネには反力が生じないが、遊間量を超えるとバネ定数 k を有する衝突バネに反力が生じるものと仮定した。

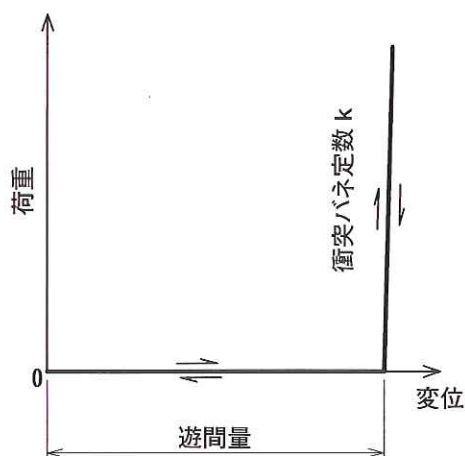


図-3 衝突バネのモデル化

また、衝突が生じると橋台パラベットの抵抗力によっては、パラベット部が破壊することが想定され、これを通常の非線形部材としてモデル化することができるが、以下の解析では簡単のため弾性と仮定した。また、橋台背面土については、この影響を押し込み側は受働土圧を上限として降伏する地盤反力を表すバネに、引出し側は抵抗しないバネとしてモデル化することができるが、以下の解析では同様に簡単のため背面土の抵抗は考慮しないこととした。なお、これらの仮定は衝突現象における今回の目的である衝突バネと数値積分時間間隔の検討への影響は小さいと考えた。

減衰定数は、上部構造が主に水平変位する1次振動モードと橋脚が主に変形する2次振動モードを対象にレイレイ型の減衰マトリックスを設定した。

3.2 解析ケース

衝突バネのバネ定数の値に応じて必要とされる積分時間間隔の関係の検討を目的として、本解析では、衝突バネのバネ剛性としては $1k$ 、 $2k$ 、 $5k$ 、 $10k$ 、 $20k$ 、 $100k$ の6ケースを、積分時間間隔としては $1/200$ 、 $1/500$ 、 $1/1000$ 、 $1/5000$ (秒) の4ケースを設定した。ここで、 k は上部構造の軸方向剛性であり、 $k = EA/L$ (ここで、 E は弾性係

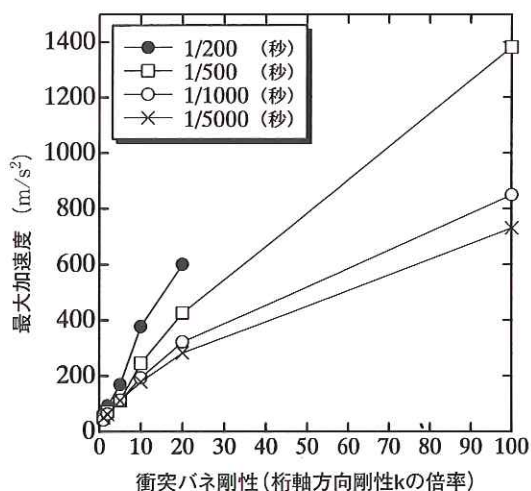


図-4 上部構造端部の最大加速度

数、 A は断面積、 L は桁長)である。また、遊間量は $10cm$ と仮定した。

解析に用いる入力地震動としては、文献5)に示されるタイプIIの標準加速度波形 (II種地盤)の1つの波形を用いた。

3.3 積分時間間隔の影響解析結果

3.3.1 上部構造の端部および中央位置の最大加速度

衝突現象といった短時間の解析現象に及ぼす数値積分時間間隔の影響を把握することから、ここでは数値上影響が大きく生じる加速度に着目して検討を行った。

表-2および図-4は、各解析ケースにおける上部構造端部の最大応答加速度を示したものである。これらより、上部構造端部の最大加速度は、衝突バネ剛性の大きさによって大きく異なり、衝突バネ剛性が大きくなるに従って最大加速度も比例的に大きくなっている。これは、当然ながら、剛度の高いものに衝突が生じた場合には、衝突によって生じる衝撃的な加速度も大きくなるというものである。

また、同じ衝突バネ剛性に対しても、積分時間

表-2 上部構造端部の最大加速度 (遊間量 $10cm$) (m/s^2)

	$1k$	$2k$	$5k$	$10k$	$20k$	$100k$
$\Delta t = 1/200$ (秒)	62.1	93.8	169.3	378.6	601.2	発散
$\Delta t = 1/500$ (秒)	51.2	71.7	112.6	246.3	426.5	1381.8
$\Delta t = 1/1000$ (秒)	42.4	63.9	113.4	194.2	322.5	849.9
$\Delta t = 1/5000$ (秒)	51.0	62.4	112.5	180.0	284.0	731.4

表-3 上部構造端部の最大加速度 (遊間量 10cm) (m/s^2)

	1k	2k	5k	10k	20k	100k
$\Delta t = 1/200$ (秒)	32.8	39.9	46.3	43.3	42.5	発散
$\Delta t = 1/500$ (秒)	32.0	38.7	43.0	41.9	40.9	40.2
$\Delta t = 1/1000$ (秒)	31.8	38.5	42.8	41.8	40.8	39.7
$\Delta t = 1/5000$ (秒)	31.8	38.5	42.7	41.7	40.8	39.6

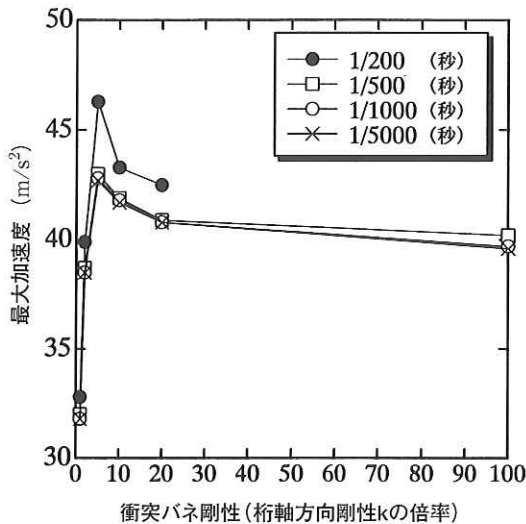


図-5 上部構造中央の最大加速度

間隔による最大加速度への影響も大きい。例えば、衝突バネ剛性が1kであれば、積分時間間隔が1/200～1/5000(秒)によらずほぼ同程度の最大加速度が得られているが、衝突バネ剛性が20kになると、最大加速度は、1/200(秒)と1/5000(秒)で2倍程度の違いとなっている。また、衝突バネ剛性が100kの場合には積分時間間隔が1/200(秒)では発散して解が求められなくなっている。このように、衝突バネ剛性の値に応じて、積分時間間隔を十分に注意して設定する必要があることがわかる。

表-3および図-5は、同様に各解析ケースにおける上部構造中央位置の最大加速度を示したものである。これらより、上部構造中央位置の最大加速度における衝突バネ剛性と積分時間間隔の関係は、上部構造端部の場合とは異なり、衝突バネ剛性が5k以上になると数%異なる程度である。これは、解析上、上部構造端部で衝突により生じた加速度が中央部までには伝播していないことを示している。また、積分時間間隔を1/200(秒)とした場合を除けば、衝突バネ剛性の値によらず、積分時間間隔の違いによる上部構造中央位置の最

大加速度の違いはほとんどない。

このように、上部構造端部の最大加速度の値までを適切に解析する場合には、衝突バネ剛性に応じて積分時間間隔の影響が大きいことに注意することが必要とされる。

3.3.2 衝突バネの最大変位量

上部構造端部における上部構造と橋台の衝突現象を考えると、上部構造端部の応答変位が遊間量と等しくなったときに接触が始まり、上部構造あるいは橋台に衝突力が発生することになる。上部構造と橋台は端部で接触したままで、このような衝突力によって上部構造内に変形が生じることになる。一方、衝突解析では、前述のモデル化で示したように、上部構造内を伝播する波動を考慮してこれを再現する衝突バネとしてモデル化を行っている。図-3に示したように上部構造と橋台間の接触バネとしてモデル化した場合には、衝突バネに変形が生じて衝突力が生じることになるが、衝突バネの変形は、本来は上部構造全体に生じる変形であり、これが上部構造端部の衝突バネに集約されて生じるというモデル化をしていることになる。本来は衝突により遊間は閉じた状態で上部構造に変位が生じるはずであるが、解析上は衝突バネに変形が生じ、遊間量を超えた変形をすることになる。そこで、衝突バネでモデル化した場合に解析から得られた上部構造端部の変位量の解釈を適切に行うために、衝突バネにどの程度の変位量が生じるかを検討した。

表-4および図-6は、各解析ケースにおける衝突バネに生じた最大応答変形量、すなわち、変形が遊間量を超す量を示したものである。バネ剛性を1kと設定した場合、衝突バネには約10cmの変位が生じている。したがって、地震により上部構造に変形が生じ、遊間量10cmの変位を超えると衝突が生じるが、橋台は変形しないまま、さらに最大約10cmの変位が生じたことを示している。実際には、これは上部構造端部の変位ではな

表-4 衝突バネの最大変位量 (cm)

	1k	2k	5k	10k	20k	100k
$\Delta t = 1/200$ (秒)	10.96	5.47	2.13	1.33	1.81	発散
$\Delta t = 1/500$ (秒)	10.84	5.43	2.13	1.05	0.64	0.50
$\Delta t = 1/1000$ (秒)	10.81	5.43	2.13	1.05	0.57	0.30
$\Delta t = 1/5000$ (秒)	10.80	5.43	2.13	1.05	0.52	0.22

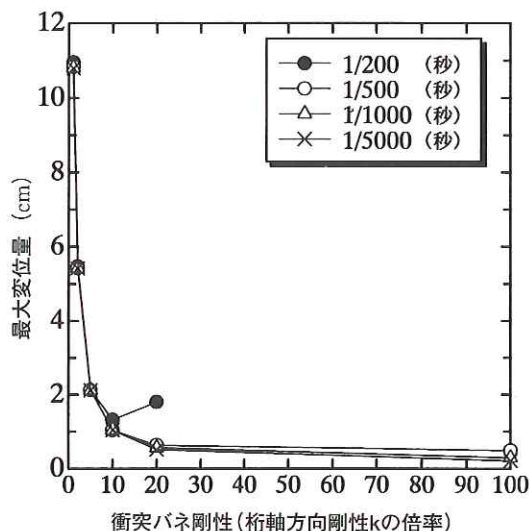


図-6 衝突バネの最大変位量

く、上部構造全体に生じる変位であることに注意する必要がある。

なお、この変位は、衝突バネ剛性が大きくなると急激に小さくなり、10k 以上では2cm 以下の値となることがわかる。衝突バネ剛性については、川島らの提案した $\gamma = 1 \sim 1.5$ 程度は、式(1)における梁要素数が $n = 10$ であることから本解析モデルでは10k ~ 15k となり、上部構造変位に及ぼす衝突バネの変形の影響は1cm 以下となり、小さいことがわかる。

一方、こうした衝突バネの変位量に及ぼす積分時間間隔の影響を見てみると、1/200 (秒) の場合に衝突バネ剛性が10k 以上となると相違が大きくなっているが、積分時間間隔を1/500 (秒) 以下とすれば、衝突バネ剛性が10k ~ 20k ではいずれの場合についてもほぼ同程度の結果が得られている。

3.4 設定した衝突バネ定数と積分時間間隔を用いた解析例

3.3 に示した検討結果によれば、今回程度の規模の橋梁において、衝突現象を適切に解析してい

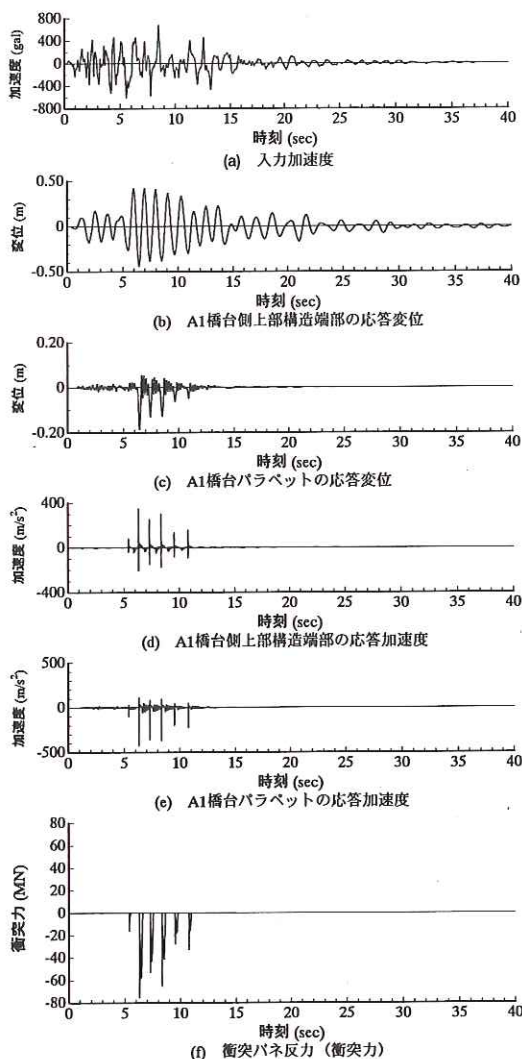


図-7 上部構造端部、パラベットおよび衝突バネの応答波形

くためには、衝突バネ剛性の値に応じて積分時間間隔の影響の大きい上部構造端部の最大加速度が安定して再現できることを考慮しても1/1000 (秒) 程度とすればよいことがわかった。ここでは、このように設定した場合の時刻歴波形が適切に求め

られているかどうかを確認した。

図-7は、桁遊間量25cm、積分時間間隔 $\Delta t=1/1000$ (秒)、衝突バネ定数を $20k$ と仮定した場合の橋台側上部構造端部およびパラベットの応答変位波形と応答加速度波形、衝突バネ反力の応答波形を示したものである。

最初にまず時刻5秒付近でわずかに衝突が生じていることがわかる。時刻6秒付近では上部構造端部で約50cmの最大応答変位が生じ、これと同時に衝突によって橋台パラベットに変位が生じるとともに、上部構造端部およびパラベットにスパイク状の加速度が生じている。加速度は、数値計算上は40～50Gという非常に大きなものとなっているが、衝突特有の短時間の作用となっている。また、衝突バネにおいても衝突と同時に大きな反力が生じている。

以上のように、衝突バネ剛性が $20k$ の場合で積分時間間隔を $1/1000$ (秒)として解析を行った結果によれば、応答加速度および衝突力の時刻歴波形として現象的に妥当な結果が得られ、上部構造と橋台の衝突現象をほぼ再現できていると考えられる。

4. まとめ

上部構造と橋台の衝突を考慮した地震時応答解析における重要なパラメータである衝突バネ剛性に応じた積分時間間隔について検討し、以下のような知見を得た。

- ① 衝突現象の解析における積分時間間隔は、衝突バネ定数の値に応じて適切に設定する必要がある。衝突バネ剛性が大きくなるほど、積分時間間隔を小さくする必要がある。
- ② 橋長200m、橋脚高さ10mの連続橋の場合には、衝突バネ剛性としては $10k \sim 20k$ 程度(k : 上

部構造の軸剛性)となるが、この場合には積分時間間隔としては $1/1000$ (秒)以下をとれば、一般に影響が大きくなる衝突部の上部構造端部の最大加速度についてもほぼ安定した結果が得られる。また、時刻歴波形についても、現象的にほぼ妥当な結果が得られると考えられる。

- ③ 今回の検討では、衝突解析を行う際に重要なパラメータとなる衝突バネ剛性の大きさに応じた積分時間間隔の影響について検討した。なお、衝突バネそのもの、あるいは、衝突現象に関しては、ある理想的な状態をモデル化したものであり、今後、実験等により解析手法等の妥当性の検証を行う必要がある。さらに、伸縮装置や床版部、背面土の影響を含めより実際の道路橋の構造特性を反映させた衝突現象について検討を行い、具体的かつ実用的な解析法・設計法の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 運上茂樹、近藤益央、三上卓：上部構造端部と橋台の衝突が橋全体の地震時挙動に及ぼす影響，土木技術資料，Vo.44，No.2，pp.20-25，2002.2.
- 2) 川島一彦：動的解析における衝突のモデル化に関する一考察，土木学会論文報告集，第308号，pp.123-126，1981.
- 3) 川島一彦、庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999.1.
- 4) 渡邊学歩、川島一彦：衝突ばねを用いた棒の衝突の数値解析，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.125-139，2001.4.
- 5) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.3.

運上茂樹*



独立行政法人土木研究所
耐震研究グループ耐震チーム
上席研究員，工博
Dr.Shigeki UNJOH

近藤益央**



同 振動チーム主任研究員
Masuo KONDOH

三上 卓***



同 耐震チーム研究員，博(工)
Dr.Taku MIKAMI