

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘性ダンパーを有する制振建物のエネルギーに関する分析（その2：粘性ダンパーのエネルギー分配の予測精度）
Title(English)	Analysis on energy of passive control structure with viscous dampers (part2: Prediction accuracy of absorbed energy by viscous damper)
著者(和文)	岡田亮佑, 佐藤大樹
Authors(English)	Ryousuke Okada, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 409-412
Citation(English)	, , , pp. 409-412
発行日 / Pub. date	2019, 3

粘性ダンパーを有する制振建物のエネルギーに関する分析 (その2: 粘性ダンパーのエネルギー分配の予測精度)

構造—振動

正会員 ○ 岡田亮佑^{*1}

//

佐藤大樹^{*2}

制振構造 粘性ダンパー 超高層建築物

時刻歴応答解析 エネルギー法 評価手法

1. はじめに

本報その1では、粘性ダンパーの性能低下の影響を踏まえた、エネルギー法による設計手法の確立のための初期段階として、既往研究で提案されている2つの応答評価手法について、入力エネルギーやダンパーのエネルギー分担率に関する分析を行った。

一方、有井ら⁸⁾はエネルギー法への粘性ダンパーの適用に向けて、文献9)で提案されている線形ダッシュポットを有する粘性ダンパー（以後、線形粘性ダンパー）を取付けた建物のエネルギー法による応答評価法（以後、原田式）を、Maxwellモデルでモデル化した非線形ダッシュポットを有する粘性ダンパー（以後、非線形粘性ダンパー）に展開し、時刻歴応答解析結果との比較によりエネルギー法での予測の精度及び適用範囲を検証した。しかし、その検証は実際に使用されている非線形性の強いダンパーに関しては未だ対象外であり、検証範囲を広げる必要がある。

本報その2では、時刻歴応答解析結果との比較により、強い非線形性（ダンパー速度の指数乗 α が小さい値）を持つ粘性ダンパー等に対する原田式の予測精度を検証する。

2. 入力地震動および検討モデルの概要

2.1 入力地震動

本報その2で用いる入力地震動は、本報その1で示したART HACHI, CH1, SANの3波とする。

2.2 建物モデル

本報その2での検討建物モデルは、その1で示した部材モデルを対象とする⁴⁾。本報その1と同様に、X方向を検討対象とする。なお、構造減衰は0、主架構は弾性とする。

2.3 粘性ダンパー

本報その2でのダンパーモデルは、本報その1で示したものと同様とする。なお、ダンパーの等価支持材剛性 K_b^* の変化による応答への影響は殆ど無いことを確認しているため、本報では剛とみなせる値を用いている。

2.4 ダンパー配置

本報では、「第1層の層間変形角 R_1 が1/100の時の第1層での全ダンパーの最大荷重の水平成分 Q_{d1max} を建物総重量 W_f で除した値」をダンパー効力の指標とし、これを第1層のダンパー量 α_{v1} とする。以下に第1層のダンパー量 α_{v1} を用いた第1層のダンパー1本の軸方向粘性係数 $\hat{C}_{d1}$ の算出式を示す。また、ダンパーの支持材剛性を剛と仮定しているため、支持材での変形は微小であり、第1層でのダッシュポットの最大変形 u_{d1max} は式(3)で表すことが出来る。

$$\hat{C}_{d1} = \frac{Q_{d1max}}{n \cdot \cos \theta \cdot (\hat{u}_{d1max} \cdot \omega)^\alpha} \quad (1)$$

$$Q_{d1max} = \alpha_{v1} \cdot W_f \quad (2)$$

$$\hat{u}_{d1max} \approx \hat{u}_{a1max} = \frac{\delta_{1max}}{\cos \theta} = \frac{R_1 \cdot H_1}{\cos \theta} \quad (3)$$

ここで、

ω : 建物の1次固有角振動数 ($=2\pi / T_1$)

n : 第1層のダンパーの設置本数 (各層8本ずつ)

θ : ダンパーの取付け角度 ($\cos \theta = \text{階高} / \text{柱スパン}$)

u_{a1max} : 第1層でのダンパーおよび支持材を含めた最大変形

δ_{1max} : 第1層の最大層間変形

H_1 : 第1層の階高

ダンパー配置は5ケースの指数乗 α ($=1.00, 0.80, 0.60, 0.38, 0.20$) に対して、第1層のダンパー量 α_{v1} を3ケース ($\alpha_{v1} = 0.01, 0.05, 0.10$) とし計15ケース設定した。なお、本報では紙面の都合上、5ケースの指数乗 α のうち、 $\alpha = 1.00, 0.60, 0.20$ の結果のみを示す。ダンパー量の高さ方向分布は、第1層のダンパー量 α_{v1} を基準として地震層せん断力分布係数 A_i の分布に基づいた設計用層せん断力比 Q_i/Q_1 を乗じ、1, 5, 9, 13, 17層のダンパー量を決定した。1~4層、5~8層、9~12層、13~16層、17~20層はそれぞれ同様のダンパーを用いる。Fig.1に、各ケースの高さ方向における粘性係数を示す。

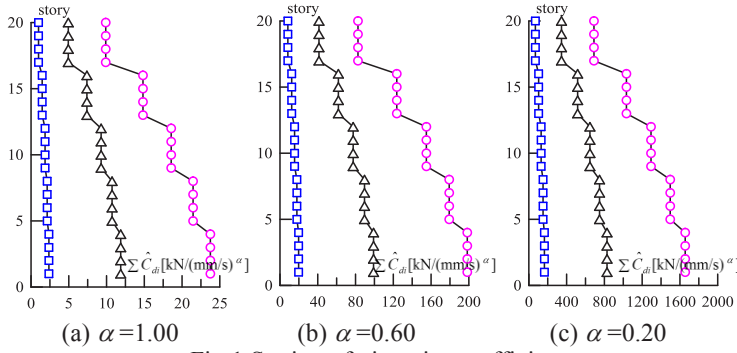


Fig.1 Setting of viscosity coefficient

3. エネルギー分配の予測

本章では、原田式の仮定条件を明確にするため、線形粘性ダンパーのエネルギー吸収量の算出式を利用した方法による原田式の導出を行う。さらに、制振建物の時刻歴応答解析より得られた、高さ方向におけるダンパーのエネルギー分配（以後、解析値）と原田式を用いて得られたもの（以後、予測値）を比較し、その予測精度を検証する。

3. 1 エネルギー分散係数式 γ_{di} の導出

各層の線形粘性ダンパーの全サイクルでのエネルギー吸収量 W_{di} は等価繰り返し数 n' （各層で一定）を用いて式(4)で表される。各層の粘性ダンパーの粘性係数の総量 ΣC_{di} を式(5)のように無次元化したパラメータ h_i で表したものと、 u_{d1max} は式(6)のように仮定する。

$$W_{di} = \pi n' \Sigma C_{di} \omega \hat{u}_{di}^2 \quad (\alpha = 1.00) \quad (4)$$

$$\Sigma C_{di} = \frac{4\pi M}{T_1} \cdot h_i \quad (5) \quad u_{di} \equiv \frac{Q_{imax}}{k_{fi}} \quad (6)$$

ここで、

M : 主架構の総質量, k_{fi} : 第 i 層の主架構の剛性

Q_{imax} : 第 i 層の全体架構（主架構＋ダンパー）の最大せん断力

一方、各層の最大応答せん断力係数分布 $\overline{\alpha}_i$ および最大応答せん断力係数 α_i を以下に示す。

$$\overline{\alpha}_{ri} = \frac{\alpha_i}{\alpha_1} \quad (7) \quad \alpha_i = \frac{Q_{imax}}{\sum_{j=i}^N m_j g} \quad (8)$$

ここで、

m_i : 第 i 層の主架構の質量, g : 重力加速度

式(4)に、式(5)と式(6)を代入することで次式が得られる。

$$W_{di} = \pi n' \left(\frac{4\pi M}{T_1} \right) \omega \left(\frac{Q_{imax}}{k_{fi}} \right)^2 h_i \quad (9)$$

さらに式(9)に、式(7)および式(8)の Q_{imax} について解いたものを代入することで、 W_{di} は次式のように表される。こ

で、 ω は $2\pi / T_1$ として展開している。

$$W_{di} = \pi n' \left(\frac{8\pi^2 M^3}{T_1^2} \right) (\overline{\alpha}_{ri} \alpha_1)^2 \left(\sum_{j=i}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 g^2 \left(\frac{1}{k_{fi}} \right)^2 h_i$$

$$= A \cdot (\overline{\alpha}_{ri})^2 \left(\sum_{j=i}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{fi}} \right)^2 h_i \quad (10)$$

$$\text{ここで、} A = \pi n' \left(\frac{8\pi^2 M^3}{T_1^2} \right) (\alpha_1)^2 g^2 \quad (11)$$

これより、全層の線形粘性ダンパーの全エネルギー吸収量 $\sum_{i=1}^N W_{di}$ は、次のように表すことができる。

$$\sum_{i=1}^N W_{di} = A \sum_{i=1}^N (\overline{\alpha}_{ri})^2 \left(\sum_{j=i}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{fi}} \right)^2 h_i \quad (12)$$

式(10)および式(12)から、エネルギー分散係数の逆数 $1/\gamma_{di}$ は、次のように表すことができる。

$$\frac{1}{\gamma_{di}} = \frac{W_{di}}{\sum_{i=1}^N W_{di}} = \frac{A (\overline{\alpha}_{ri})^2 \left(\sum_{j=i}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{fi}} \right)^2 h_i}{A \sum_{i=1}^N (\overline{\alpha}_{ri})^2 \left(\sum_{j=i}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{fi}} \right)^2 h_i} \quad (13)$$

さらに、式(12)の分母分子に k_{f1}^2 を掛け整理すると、式(13)は次式のように表すことができる。

$$\frac{1}{\gamma_{di}} = \frac{(\overline{\alpha}_{ri})^2 \left(\sum_{j=i}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{fi}} \right)^2 h_i}{\sum_{i=1}^N (\overline{\alpha}_{ri})^2 \left(\sum_{j=i}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{fi}} \right)^2 h_i} \cdot \left(\frac{k_{f1}}{k_{fi}} \right)^2 = \frac{s'_i h_i}{\sum_{i=1}^N s'_i h_i} \quad (14)$$

$$\text{ここで、} s'_i = \left(\sum_{j=i}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \overline{\alpha}_{ri}^2 \left(\frac{k_{f1}}{k_{fi}} \right)^2 \quad (15)$$

以上より、原田式（式(14)および式(15)）を導出し仮定条件を確認した。以下に、原田式の仮定条件を示す。

①線形粘性ダンパーのみを対象とし、エネルギー吸収量の算出および粘性係数の無次元化を行っている。②等価繰り返し数は各層で共通としている。③全体架構の最大せん断力は主架構の剛性とダッシュポットの最大変形から近似的に算出している。

次節で示す予測値は $\overline{\alpha}_{ri}$ を次式¹⁾を用いて算出する。

$$\overline{\alpha}_{ri} = \begin{cases} 1 + 0.5x & (0 \leq x \leq 0.2) \\ 1 + 1.5927x - 11.8519x^2 + 42.5833x^3 - 59.4827x^4 + 30.1586x^5 & (0.2 \leq x \leq 1) \end{cases} \quad (16)$$

3. 2 速度に関する指数乗 α を変化させた場合

本節では、ダンパー速度に関する指数乗 α ($=1.00, 0.60, 0.20$) を持つ線形・非線形粘性ダンパーにおける原田式 (式(14)および式(15)) の予測精度を検証する。

Fig.2 (a) ~ (c)に ART HACHI, SAN, CH1 入力時における解析値と予測値を高さ方向におけるエネルギー分散係数の逆数 $1/\gamma_{di}$ で比較したものを示す。なお、「(i) ~ (iii)」はそれぞれのダンパー量 α_{v1} での結果を示している。ここで、解析値をプロットで示し、原田式による予測値 (図中, Pre.) を赤線で示す。

Fig.2(a)の(i)より、指数乗 $\alpha=1.00$ 、ダンパー量 $\alpha_{v1}=0.01$ の場合でそれぞれの地震動入力時での解析値を比較すると、差異は小さく、地震動による影響は殆ど見られない。これは他のケースでもほぼ同様の傾向となった。

Fig.2 (a)より、線形粘性ダンパーである、指数乗 $\alpha=1.00$ のダンパー量 $\alpha_{v1}=0.01$ と 0.10 を比較すると、ダンパー量による予測精度への影響は殆ど見られない。これに対して、Fig.2 (c)をみると、指数乗 $\alpha=0.20$ の場合では、ダンパー量が大きくなるに従い、解析値では下層付近にエネルギー吸収が過大に集中しており、それに伴い、予測精度も落ちていく傾向となった。Fig.2 (b)より、この傾向は指数乗 $\alpha=0.60$ の場合でも多少確認されており、指数乗 α が小さい値、つまり非線形性が強くなるに従い、下層付近でのエネルギー吸収量の集中と、原田式の予測精度の低下の傾向が確認された。

次に、Fig.2 (a)と(c)の(i)より、ダンパー量 $\alpha_{v1}=0.01$ について、指数乗 $\alpha=1.00$ と 0.20 を比較すると、指数乗 $\alpha=0.20$ での予測精度は指数乗 $\alpha=1.00$ に比べ、多少良い傾向を示している。これに対しダンパー量 $\alpha_{v1}=0.10$ では、指数乗 $\alpha=1.00$ に比べ、指数乗 $\alpha=0.20$ での解析値は下層にエネルギー吸収が集中し、それに伴い、予測精度も落ちていく結果となった。

Fig.3 (a) ~ (c)に、縦軸に予測値 (図中, Pre.) を解析値 (図中, Ana.) で除したものとし、横軸に解析より得られたエネルギー吸収量 $W_{di(Ana.)}$ としたものを示す。なお、ここでは SAN 入力時の結果のみを示す。予測値/解析値が 1.0 (図中, 黒線) を下回ると、予測値が W_{di} を危険側に評価していることとなる。

Fig.3 (a)より、SAN 入力時の線形粘性ダンパーである指数乗 $\alpha=1.00$ 、ダンパー量 $\alpha_{v1}=0.01$ の場合をみると、原田式による予測は危険側の評価となっているものの、 W_{di} が大きくなるに従い予測値/解析値は 0.8 程度で収束していく傾向となった。この傾向は、ダンパー量 $\alpha_{v1}=0.05, 0.10$ においても同様にみられ、ダンパー量に関わらず確認された。

Fig.3 (c)より、指数乗 $\alpha=0.20$ 、ダンパー量 $\alpha_{v1}=0.01$ の場合をみると、線形粘性ダンパーでみられた傾向と同様に応答が大きくなるに従い、予測値/解析値は 0.8 程度となった。これに対して、指数乗 $\alpha=0.20$ 、ダンパー量 $\alpha_{v1}=0.05, 0.10$ の場合をみると、応答が大きい場合においても予測値が大きく過小評価していることが分かる。

次に入力地震動での原田式の予測精度の比較をする。Fig.4 (a) ~ (c)に、縦軸に予測値 (図中, Pre.) を解析値 (図中, Ana.) で除したものとし、横軸に解析より得られたエネルギー分散係数の逆数としたものを示す。なお、ダンパー量 $\alpha_{v1}=0.05$ の結果のみを示している。Fig.4 (a)と(b)より、各地震波入力時における解析値が最大となる結果に着目すると、どちらも予測値/解析値が 0.85 程度となっており、地震波による応答予測精度の影響は少ないといえる。同様に、Fig.4 (c)より $\alpha=0.20$ においては多少、予測値/解析値にばらつきはあるが地震波による応答予測精度の影響は少ないといえる。

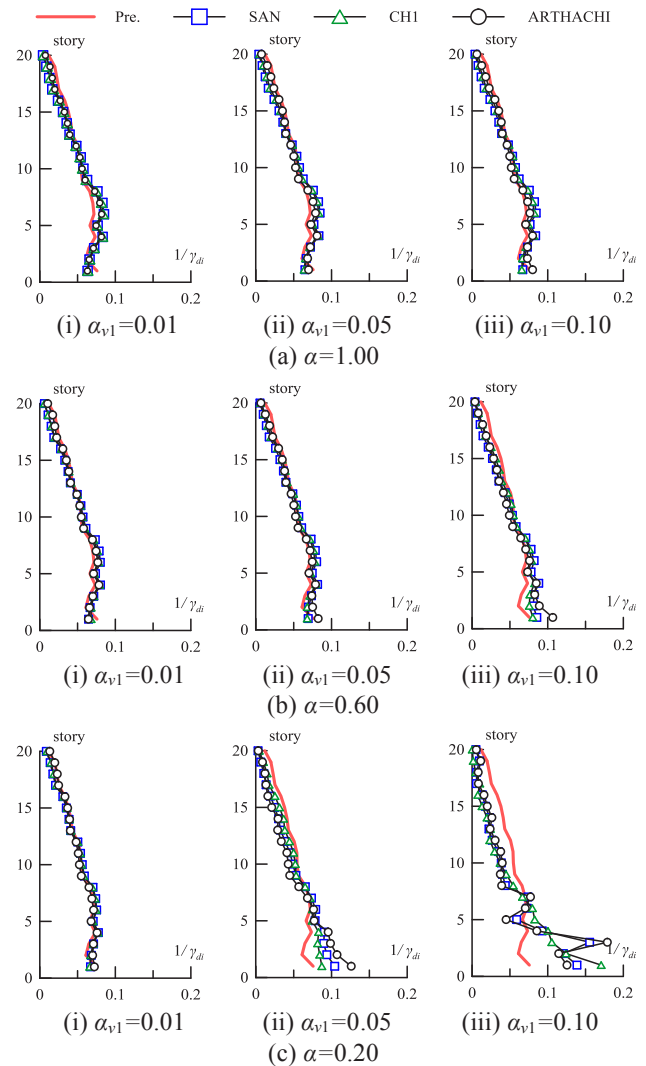


Fig.2 Absorbed Energy of Damper

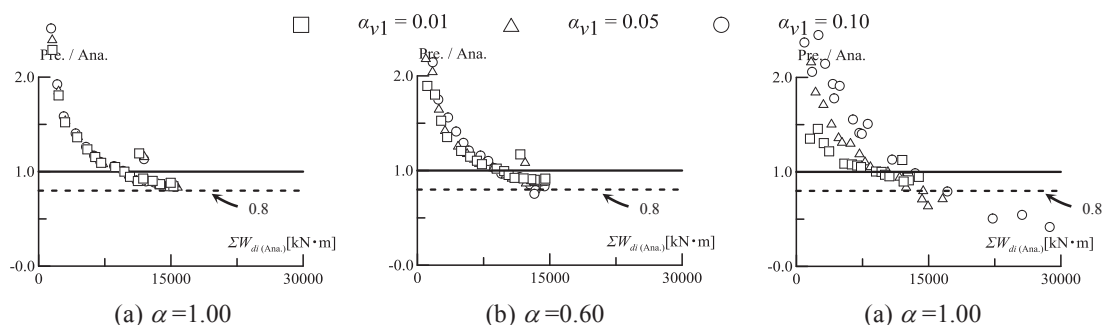


Fig.3 Prediction accuracy

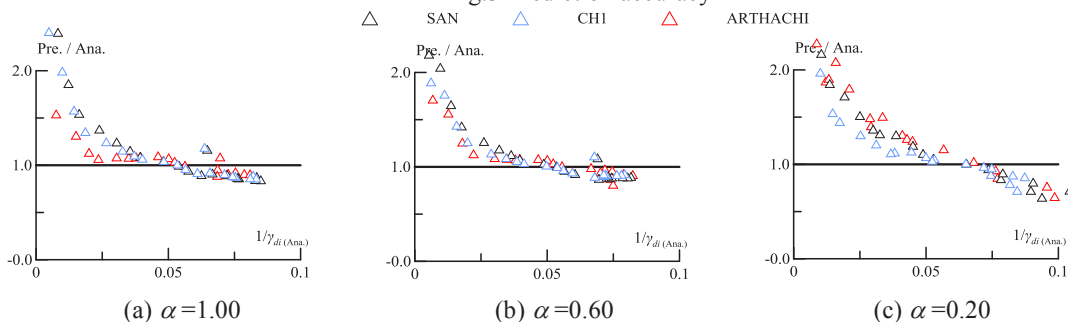


Fig.4 Prediction accuracy ($\alpha_{v1}=0.05$)

5. まとめ

本報その1では、ダンパーの性能低下を踏まえたエネルギー法による設計手法の確立のための初期段階として、既往研究³⁾で提案されている応答評価手法について入力エネルギーやダンパーのエネルギー分担率に関する分析を行った。

本報その2では、エネルギー法への粘性ダンパーの適用のため、線形ダッシュポットを有する粘性ダンパーを取付けた建物のエネルギー法による応答評価法⁹⁾(原田式)の仮定条件の確認およびエネルギー分配の予測精度を検証した。以下の知見が得られた。

(1) 原田式では、線形系ダッシュポット(ダッシュポット速度の指数乗 α が1.00)のみを対象とし、エネルギー吸収量の算出および粘性係数の無次元化が行われていることが確認された。また、等価繰り返し数は各層で共通としている。さらに、全体架構(主架構+ダンパー)の最大せん断力は主架構の剛性とダッシュポットの最大変形から近似的に算出していることが分かった。

(2) 粘性ダンパーを配した建物の時刻歴応答解析では、 α が小さい値、つまり非線形性が強くなる粘性ダンパーを用いた場合かつダンパー量が多くなるに従い、下層付近での粘性ダンパーのエネルギー吸収量の集中が見られた。

(3) 原田式による粘性ダンパーのエネルギー分配の予測では、エネルギー吸収量が多くなるに従い危険側の評価となり、特に、強い非線形性を持つ粘性ダンパーを用いた場合かつダンパー量が多くなるに従い、大きく危険側の評価となった。また、入力地震波による予測精度への影響は殆ど見られなかった。

今後は、ダンパー量、入力地震動、建物モデルのケースを増やし、検証していく予定である。

謝辞

本研究の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。

参考文献

- 1) 秋山宏:エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1991.1
- 2) 脇田直弥, 松藤知明, 樋口公平, 中村秀司:エネルギー法による建物の構造設計~優れた耐震性と経済性を両立した設計手法の確立~, 新日鉄エンジニアリング技報, vol.3, 2012
- 3) 佐藤大樹, 長山祥, 笠井和彦, 松田和浩:長周期地震動時における粘性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価, 日本建築学会技術報告集, 第24巻, pp.59-62, 2018.2
- 4) 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩:粘性ダンパーの長時間繰り返しによる特性値低下を考慮した解析モデルの提案と地震応答評価, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.163-164, 2017.31
- 5) 中村哲也:3次元振動解析による実大5層制振構造建物実験の再現と地震応答制御効果の分析, 平成26年度東京工業大学修士論文
- 6) 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩, 長山祥:長時間正弦波による4種の実大制振ダンパーの動の特性の変化および簡易評価手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第63巻, pp.275-284, 2017.3
- 7) 日本建築学会:鋼構造制振設計指針, 第1版, 2014.1
- 8) 有井季萌, 佐藤大樹, 松田頼征, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 山口慎吾, 綿貫雄太:粘性ダンパーを使用した制振構造におけるダンパーのエネルギー分散係数の精度評価, 日本建築学会関東支部研究報告集, 88(I), pp.281-284, 2018.3
- 9) 原田幸博, 秋山宏:エネルギー集中型柔剛混合骨組の耐震設計, 日本建築学会構造系論文集, 第472号, pp.57-66, 1995.6

*1 東京工業大学大学院 大学院生

*2 東京工業大学大学院 准教授・博士(工学)

*3 東京工業大学大学院

* Graduate Student, Tokyo Institute of Technology ^{*1}

* Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. ^{*2}

* Tokyo Institute of Technology ^{*3}