

雪 CFD を用いた超高層ビルの風雪シミュレーション手法 —積雪寒冷都市における都市デザイン その 31—

正会員 ○道野 貴光*
同 濑戸口 剛**
同 渡部 典大***

積雪寒冷都市 風雪シミュレーション CFD
超高層ビル 札幌 JR タワー

1. 背景と目的

超高層ビルはその巨大なヴォリュームにより周辺環境に大きな影響を及ぼすことが知られており、風環境については様々な対策が取られている。しかし雪環境については、これまで積雪寒冷都市における超高層ビルの例が少ないとから、その課題特性を把握しきれておらず、対策も経験を用いながらの試行錯誤が繰り返されている状況にある。

前報では、実測による超高層ビル屋上の積雪実態解析を行った。本研究では、CFD(Computational Fluid Dynamics)による風雪シミュレーション(以下、雪 CFD)を用いて積雪寒冷都市の超高層ビルの積雪分布状況を解析し、実測結果との比較を行う。それにより、雪 CFD を用いて風雪環境の課題を解析し超高層ビルの設計へと反映するための風雪シミュレーション手法を明らかにすることを目的とする。また本研究は、「北 5 西 1・西 2 地区第一種市街地再開発」における超高層ビル開発へ応用するための研究である。

2. 研究方法

本論では、①超高層ビルにおける積雪分布状況を把握するために、実在する建築物を対象とする。②吹雪時の

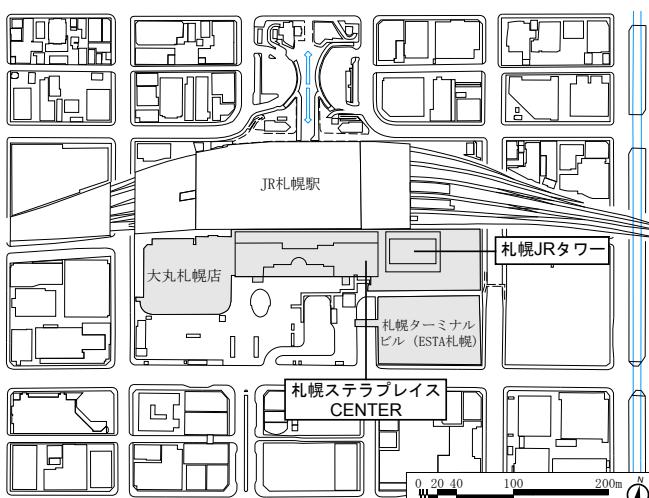


図 1 対象建築物周辺

気象条件(以下、吹雪条件)および実際の気象状況に即した気象条件(以下、比較条件)を定め、③それぞれ雪 CFD を行う。④積雪状況の結果を整理し、吹き溜まりや雪庇が生じる箇所を把握する。⑤実測結果と比較し、⑥雪 CFD を用いた 超高層ビルの風雪シミュレーション手法を明らかにする。

2-1. 研究対象

世界でも有数の積雪寒冷都市である札幌の都心において調査期間中に現存する建築物の中で、最高高さを有する「札幌駅 JR タワー」の屋上(高さ 173m)とそれに接続する札幌ステラプレイス CENTER 屋上の「そらのひろば」を対象とした(図 1)。

2-2. 雪 CFD の概要と設定

雪 CFD は、OpenFOAMv1912 を使用して RANS モデルに基づく定常解析を行った。解析領域の広さは 2400m(x) × 1800m(y) × 900m(z) とし、乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルとした。モデルのメッシュ分割は図 2 に示す通りで、対象建築物の周辺で細分割している。総メッシュ数は約 4000 万メッシュである。

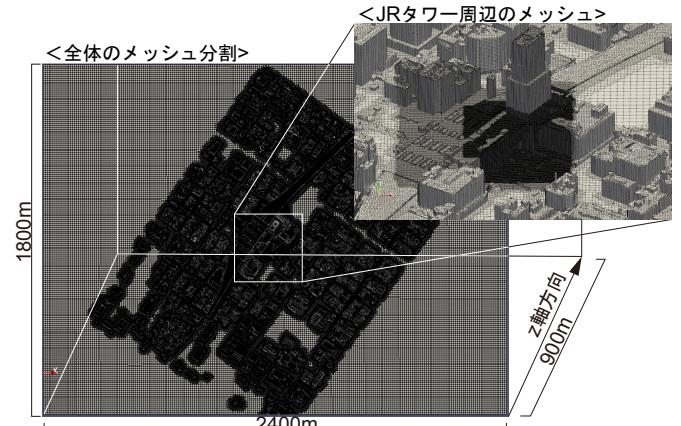


図 2 雪 CFD のメッシュ分割

風向は過去 10 年間の気象データ^{注1)}より冬の卓越風向である北北西、北西、西北西の 3 風向とした(図 3)。吹雪条件は、設定風向の吹雪発生時における平均風速・降水量を参考に風速を 8.50m/s、降雪量を 0.50cm/h、継続時間を 28.3h^{注2)}とした。比較条件は、連続した降雪が確認

され 1 時間ごとの代表風向が 4 時間以上連続して同一である日時を対象として表 1 のように設定した。また、地表面粗度区分よりべき指数 α を 0.35¹⁾ とした。街 区 モ デ ル は PLATEAU のオーパンデータ²⁾ を用いて、一部修正を加えて³⁾ 作成した。

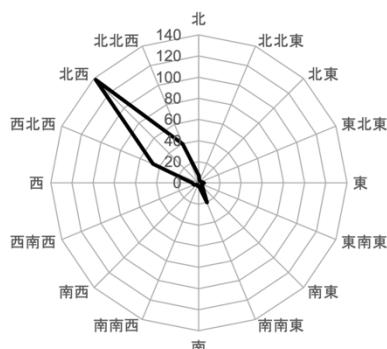


図 3 日降雪量5cm以上の風向頻度
(2014.12- 2024.3)

表 1 雪CFDの設定気象条件と対象日時

風向	設定気象条件	分析対象日時と気象状況
北北西	風速: 4.25m/s 降雪量: 3.13cm/h 継続時間: 8h	日持: 2024/02/22 15:00 - 2024/02/22 22:00 日照時間: 0.0h 平均気温: -5.2°C 平均風速: 4.25m/s 降雪量: 3.13cm/h 継続時間: 8h
北西	風速: 3.73m/s 降雪量: 1.75cm/h 継続時間: 4h	日持: 2023/01/09 20:00 - 2023/01/09 23:00 日照時間: 0.0h 平均気温: -1.9°C 平均風速: 3.73m/s 降雪量: 1.75cm/h 継続時間: 4h
西北西	風速: 5.80m/s 降雪量: 0.50cm/h 継続時間: 4h	日持: 2022/12/29 16:00 - 2022/12/29 19:00 日照時間: 0.4h 平均気温: -3.0°C 平均風速: 5.80m/s 降雪量: 0.50cm/h 継続時間: 4h

3. 雪 CFD 解析結果と分析

3-1. 吹雪条件での解析結果

吹雪条件での雪 CFD 解析結果を図 5 左側に示す。結果の図は無風時の積雪深を境に、それより積雪深の多い箇所を赤系統で少ない箇所を青系統で表している。すなわち、図の赤い部分が「吹き溜まりのできる箇所」、青い部分が「吹き払いの起きる箇所」を示している。

吹雪条件での雪 CFD 解析結果より、積雪分布について以下の結果が確認された。

①ヘリポート下において、北東側パラペット (C1_P) では、3 風向すべてで積雪深差比 0 と積雪が確認されず、雪が吹き払われた。一方北東側フロア (C1_F) と南東側パラペット (C2_P) および南東側フロア C2_F では、3 風向すべてで 24m から 110m までの多量の積雪深が計算された。このことから、吹雪条件における JR タワー屋上のヘリポート下では、風上側のパラペットに雪は積もらず、風上側のフロアと風下側に吹き溜まりが発生する。

②そらのひろば南側 (C3) およびそらのひろば東側 (C4) について、北北西風向では積雪深差比が 1.55、2.47 と 1 を越える吹き溜まりが観測されたが、北西・西北西風向では吹き払われ、特にそらのひろば東側 (C3) では雪が完全に吹き払われた。また、3 風向の結果を冬季の風向発生頻度で按分して合算するとそらのひろばの積雪深差比がおよそ 1 となり、気象台と同程度の積雪が見込まれる。当パラペットの高さが 0.8m で、札幌市の過去 30 年の平均最深積雪はそれを越える 0.97m であることから、そらのひろばの南側パラペットでは雪庇落雪の危険性が

あると言える。そのため、札幌駅の出入り口が真下に位置するそらのひろば南側ではパラペット付近にルーフヒーティングが埋設され、対策が施されている。

3-2. 比較条件での解析結果

比較条件での雪 CFD 解析結果 (図 5 右) より、積雪分布の特徴が 2 つ確認できる。

①設定風速が 4.25m/s、3.73m/s である北北西、北西風向では、すべての地点で積雪深差比が 0.50 以下となり、地点ごとの差も小さい。これは、雪が風によってほとんど移動していないことを意味する。

②設定風速が 5.8m/s と大きい西北西風向では、高層部屋上のヘリポート下 (C1, C2) において 5~18 の大きい積雪深差比が確認される一方で、低層部屋上のそらのひろば (C3, C4) の積雪は極めて少ない。この結果は、吹雪条件での雪 CFD 解析結果と似ており、雪粒子の動き方が吹雪条件のものと同類であると推測できる。この要因として設定気象条件の違いが挙げられるが、降雪量と継続時間については積雪深差比に影響を与えないため、影響を及ぼしているのは「風速」であると考えられる。

風速に着目して比較すると、風速が 4m/s 程度に小さいときヘリポート下とそらのひろばは同等の積雪深を示し、風速が 5m/s 以上となるときヘリポート下で集中した積雪が確認される。反対にそらのひろばでは、風速が小さいとき積雪深が増加する傾向にある。

4. 実測結果と雪 CFD 解析結果の比較

これまで、前報では固定カメラと 3D レーザーを用いた実測によって超高層ビル屋上の積雪状況を調査、整理し述べてきた。本論では雪 CFD による超高層ビル屋上の積雪状況について述べてきた。実測において測量間隔が短く比較検討しやすい固定カメラの結果を抽出して雪 CFD の結果と比較 (表 2) すると、以下のことが考察される。

①吹雪の条件である高い地吹雪 (飛雪が目の高さよりも高く飛ぶ現象) は風速 4.5m/s 以上で発生し始めることがわかっており^{2) 3)}、それ以下の風速では雪は顕著に移動しない。このことが、風速 4m/s 前後 (北北西、北西風向) の条件において地点ごとの積雪深の差が実測と雪 CFD の両者ともに小さいという結果からも確認できる。

②風速 5.8m/s (西北西風向) の条件における両者の積雪状況結果の比較から、風速が大きいとき、ヘリポート下、そらのひろばとともに両者の結果に大きな差が生じる。

③吹雪条件において 3 風向の積雪深差比の按分結果がおよそ 1 となった C3 では、実測においてもパラペットを超える積雪が観測されており (図 4)、この地点では雪 CFD と実測の間に整合性が見られる。



図 4 パラペット高さと同等の積雪深を観測時の写真

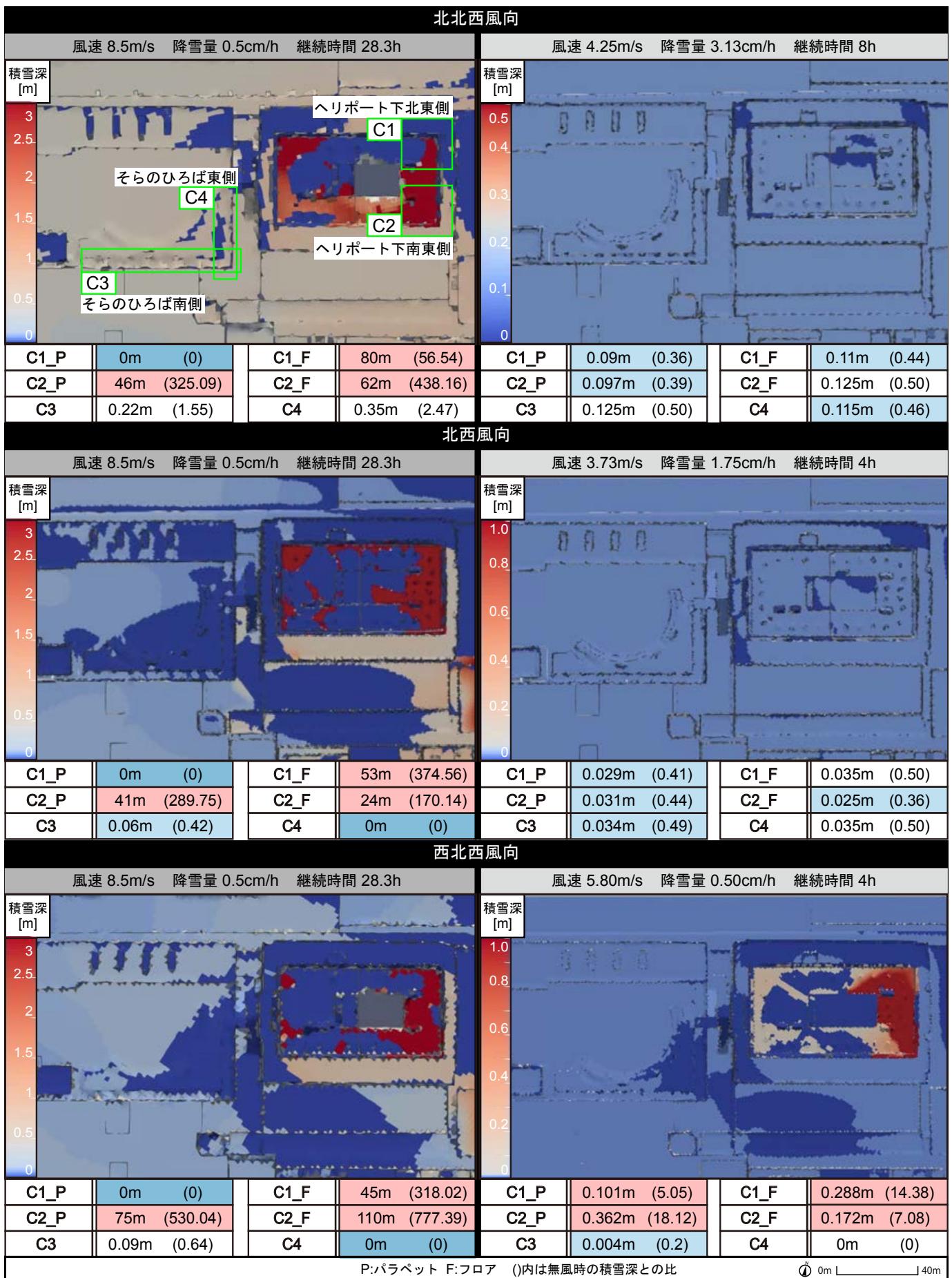


図5 雪CFDによる風雪シミュレーション結果（左：吹雪条件、右：比較条件）

表2 実測結果と雪CFDの積雪深差比（基準値を1としたときの割合）

風向	北北西風向			北西風向			西北西風向		
	設定(気象)条件	風速：4.25m/s 降雪量：3.13cm/h 継続時間：8h	風速：8.5m/s 降雪量：0.5cm/h 継続時間：28.3h	風速：3.73m/s 降雪量：1.75cm/h 継続時間：4h	風速：8.5m/s 降雪量：0.5cm/h 継続時間：28.3h	風速：5.80m/s 降雪量：0.5cm/h 継続時間：4h	風速：8.5m/s 降雪量：0.5cm/h 継続時間：28.3h	風速：8.5m/s 降雪量：0.5cm/h 継続時間：28.3h	
積雪深差比	実測	比較条件	吹雪条件	実測	比較条件	吹雪条件	実測	比較条件	吹雪条件
C1_P	0.32	0.36	0	0.76	0.41	0	0.75	5.05	0
C1_F	0.05	0.44	56.54	0.23	0.50	374.56	0	14.38	318.02
C2_P	0.25	0.39	325.09	0.13	0.44	289.75	0.25	18.12	530.04
C2_F	0	0.50	438.16	0	0.36	170.14	0	7.08	777.39
C3	0.39	0.50	1.55	0	0.49	0.42	0	0.20	0.64
C4	0.51	0.46	2.47	0.79	0.50	0	0.80	0	0

[■] 実測の積雪深差比との差≤0.50 [■] 0.50<実測の積雪深差比との差≤1.50 [■] 1.50<実測の積雪深差比との差

5. 結論

前報および本研究では、札幌 JR タワーを対象に冬季における超高層ビル屋上の積雪状況について実測および雪 CFD 解析結果から把握し、その比較から実測と雪 CFD を用いた超高層ビルの風雪シミュレーション手法について、以下の5点を明らかにした。

(1)冬季2年間の実測より、実際には高層部屋上のヘリポート下では、日射や建物からの排熱、地表面の熱伝導性の違いなどの環境要因により融雪しやすく、雪庇落雪の危険となるほどどの積雪は発生しにくい。その積雪深は、多い順に風上側パラペット、風下側パラペット、風上側フロア、風下側フロアであった。

(2) CFD による風雪シミュレーションによると、5.8m/s や 8.5m/s と風速が大きいとき、超高層ビルの屋上ヘリポート下で多量の吹き溜まりが計算されるようになる。

(3) 実測結果と雪 CFD 解析結果の比較から、①低層部屋上であるそらのひろばでは雪庇落雪の危険性があることが明らかになった。このことから、低層部屋上では雪 CFD 解析結果と実際の積雪状況に整合性が見られる。そのため、雪 CFD で低層部の雪庇落雪箇所を検討することは有意義であると言え、計画段階で対策することが可能となる。②風速が 4.5m/s 以下では雪は顕著に移動しないとされており、実測結果および雪 CFD 解析結果においても風速 4m/s 前後で積雪の偏りが小さいことから、建物が密集している札幌都心部においてもこの影響を受けていることが確認できる。

(4) 実測結果と雪 CFD 解析結果の比較から、風速が 4.5m/s 以上での高層部屋上の積雪状況は実測と雪 CFD で大きく乖離することが明らかとなった。そのため、強風の条件下での雪 CFD における超高層部の積雪状況結果には留意する必要がある。

(5) 雪 CFD に考慮されていない環境要因の多くは日射や建物からの排熱による融雪などの積雪深を小さくする要因であるため、雪 CFD では雪が積もる際の最悪の状況をシミュレーションすることができる。そのため、複数の卓越風向で雪 CFD をを行い積雪による危険箇所を解析することで、あらかじめ最悪の状況に対応した計画を行うことが可能である。

以上より、低層部においては、雪 CFD を使用して積雪による危険箇所を計画設計段階で把握し、事前に適切な対策を行うことが可能である。高層部においては、雪 CFD の結果が示す積雪分布が実際に起こりうるとは断言できないが、雪 CFD は積雪の最悪の状況をシミュレーションするため、不慮の事態に備えて対策を行うことが可能であり、必要である。

6. 今後の展望

今後の積雪寒冷都市において、超高層ビルの屋上および周辺の積雪状況を計画設計段階で把握し、対策することが必須である。一方で、計算ソフトによる計算結果の違いや一定以上の風速における雪粒子の挙動の再現性、雪粒子のパラメータの調節具合などの課題がある。これらの課題を考慮して適切に超高層ビルの設計プロセスに組み込むことにより、積雪寒冷都市における体系だった雪環境評価手法を構築していくことが求められる。

《注釈》注1) 2014年12月-2024年3月の過去10年間の気象庁データより、日降雪5cm以上の最多風向 注2) 過去10年間の札幌における継続時間19時間以上の吹雪11回の平均吹雪継続時間 注3) 2024/7/22現在のデータを使用 注4) 反映されていない形状や計算が発散する空隙を修正

《参考文献》1) 都市の風環境予測のためのCFDガイドブック/日本建築学会 2) ワイオミングの吹雪とその対策/竹内政夫/北海道開発局技術研究発表会論文集 24巻p.442-p.449/1981 3) 吹雪とその対策(1)-吹雪のしくみ-/竹内政夫/日本雪氷学会誌 雪氷 58巻2号p.161-p.168/1996

* 神戸市役所 工修

** 北海道大学理事・副学長

大学院工学研究院 教授 博士 (工学)

*** 北海道大学大学院工学研究院 准教授 博士 (工学)

* Kobe City Hall, M.Eng.

** Executive Vice President,

Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

*** Assoc. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.