

博士論文（要約）

ニューラルネットワーク援用並列有限要素法を用いた
CFRP 構造物の損傷解析に関する研究

山口 太一

目次

第 1 章	序論	1
1.1	炭素繊維強化プラスチックの応用に関する問題	1
1.2	CFRP の有限要素解析	2
1.2.1	直交異方性モデル	2
1.2.2	連続体損傷力学	3
1.2.3	Cohesive 要素	3
1.2.4	均質化法	4
1.2.5	ブーミング法	4
1.2.6	メゾスケール解析	4
1.3	大規模並列有限要素法	5
1.4	ニューラルネットワークの有限要素解析への応用	6
1.5	本研究の目的と位置づけ	7
1.6	本論文の構成	9
第 2 章	大規模モデルの界面損傷進展解析手法の開発	11
2.1	緒言	11
2.2	界面損傷モデルの定式化	11
2.3	cohesive 要素の検証	14
2.3.1	検証方法	14
2.3.2	検証結果	16
2.4	DCB シミュレーションを用いた検証	18
2.4.1	検証方法	18
2.4.2	検証結果	21
2.5	結論	24
第 3 章	ニューラルネットワークを用いたブーミング法の開発	25
3.1	緒言	25
3.2	ニューラルネットワークを用いたブーミング法の概要	26
3.3	小規模モデルを用いた検証	27
3.3.1	検証方法	27

3.3.2	検証結果	32
3.4	大規模 CFRP モデルへの適用	45
3.4.1	方法	45
3.4.2	結果	48
3.5	結論	51
第 4 章	大規模 CFRP モデルを用いた損傷進展解析手法の開発	53
4.1	緒言	53
4.2	繊維樹脂界面の損傷評価	53
4.2.1	繊維樹脂界面特性評価の実験方法	54
4.2.2	シミュレーション方法	54
4.2.3	マイクロドロップレット実験結果	55
4.2.4	マイクロドロップレットシミュレーション結果	56
4.2.5	繊維樹脂界面のモデル化まとめ	58
4.3	繊維の損傷評価	58
4.3.1	繊維破断のモデル化	58
4.3.2	繊維破断のシミュレーション方法	58
4.3.3	シミュレーション結果	59
4.3.4	繊維損傷のモデル化まとめ	60
4.4	繊維樹脂界面，繊維，樹脂の損傷を考慮した解析	61
4.4.1	薄層モデルの損傷進展解析方法	61
4.4.2	薄層モデルの損傷進展解析結果	65
4.5	層厚の違いによる損傷進展への影響評価	68
4.5.1	層厚の比較に用いるモデル	68
4.5.2	層厚の比較結果	72
4.6	結論	79
第 5 章	ニューラルネットワークを用いた応力集中予測手法の開発	81
5.1	緒言	81
5.2	2次元モデルでの角部モデルを用いたフィレット部応力予測	85
5.2.1	2次元モデル用のニューラルネットワークの開発	86
5.2.2	2次元モデルでの学習に用いていないモデルでの検証	91
5.2.3	2次元モデルでのまとめ	94
5.3	3次元モデルでの角部モデルを用いたフィレット部応力予測	95
5.3.1	3次元モデル用のニューラルネットワークの開発	95
5.3.2	3次元モデルでの学習に用いていないモデルでの検証	107
5.3.3	3次元モデルでのまとめ	110
5.4	CFRP の補強効果検証への適用	110
5.4.1	CFRP 補強の簡易モデル	111

5.4.2	CFRP で補強された橋梁モデル	113
5.5	結論	119
第 6 章	結論	121
	謝辞	123
	参考文献	125

目次

1.1	CFRP の損傷	2
1.2	Building block approach	2
1.3	1 方向 CFRP の繊維方向と座標	3
1.4	並列計算のための領域分割	6
1.5	本研究の位置づけ	9
2.1	cohesive 要素の形状	14
2.2	界面の特性	14
2.3	検証用モデルの解析条件	15
2.4	検証用モデル内の Cohesive 要素	15
2.5	領域分割の様子	16
2.6	損傷変数のコンター図	17
2.7	DCB モデル	19
2.8	COD が 4.7 mm における $h = 0.0625$ mm モデルの損傷変数のコンター図	21
2.9	荷重-COD 曲線	22
2.10	COD が 4.4 mm におけるき裂先端の損傷変数	22
2.11	サブステップごとのインクリメントサイズ	23
3.1	ローカルモデルとグローバルモデルの節点	26
3.2	学習（節点座標と変位の関係）	27
3.3	予測（節点座標と変位の関係）	27
3.4	グローバルモデル	28
3.5	ローカルモデル A	29
3.6	ローカルモデル B	29
3.7	学習に用いる領域	30
3.8	ズーム法用のニューラルネットワークの構成	30
3.9	ローカルモデル A の境界条件（前面）	31
3.10	ローカルモデル A の境界条件（背面）	31
3.11	ローカルモデル B の境界条件（前面）	31
3.12	ローカルモデル B の境界条件（背面）	32

3.13	ローカルモデル B と比較するためのグローバルモデル	32
3.14	目的関数の履歴	33
3.15	ローカルモデル A の変位コンター図 (Proposed zooming)	34
3.16	ローカルモデル A の変位コンター図 (Abaqus zooming)	35
3.17	ローカルモデル A の変位コンター図 (Fine mesh for global model)	35
3.18	ローカルモデル A のミーゼス応力コンター図 (Proposed zooming)	36
3.19	ローカルモデル A のミーゼス応力コンター図 (Abaqus zooming)	36
3.20	ローカルモデル A のミーゼス応力コンター図 (Fine mesh for global model)	37
3.21	ローカルモデル B の変位コンター図 (Proposed zooming)	38
3.22	ローカルモデル B の変位コンター図 (Abaqus zooming)	38
3.23	ローカルモデル B の変位コンター図 (Fine mesh for global model)	39
3.24	ローカルモデル B のミーゼス応力コンター図 (Proposed zooming)	39
3.25	ローカルモデル B のミーゼス応力コンター図 (Abaqus zooming)	40
3.26	ローカルモデル B のミーゼス応力コンター図 (Fine mesh for global model)	40
3.27	学習に用いた領域と座標	41
3.28	学習済みニューラルネットワークの出力値 (x 断面)	42
3.29	学習済みニューラルネットワークの出力値 (y 断面)	43
3.30	学習済みニューラルネットワークの出力値 (z 断面)	44
3.31	CFRP の OHT 試験片のグローバルモデル	46
3.32	CFRP の OHT 試験片のグローバルモデルにおける学習に用いる領域	47
3.33	CFRP の OHT 試験片のローカルモデルの位置	47
3.34	CFRP の OHT 試験片のローカルモデル	48
3.35	CFRP の OHT 試験片のローカルモデルメッシュ	48
3.36	CFRP グローバルモデルの解析結果	49
3.37	CFRP モデルにおける目的関数の推移	49
3.38	断面の位置	50
3.39	ローカルモデルにおけるミーゼス応力 (断面)	50
3.40	ローカルモデルにおける最大主ひずみ (断面)	51
4.1	マイクロドロップレット試験	54
4.2	埋め込み長さ と 最大引き抜き力の関係	55
4.3	埋め込み長さ と 引き抜き力最大時の樹脂玉・界面の変位	56
4.4	埋め込み長さ 40 μm でのミーゼス応力コンター図	57
4.5	埋め込み長さ 50 μm でのミーゼス応力コンター図	57
4.6	埋め込み長さ 60 μm でのミーゼス応力コンター図	58
4.7	フラグメンテーション試験片のモデル	59
4.8	界面強度 20MPa の繊維方向の応力分布	60
4.9	界面強度 60MPa の繊維方向の応力分布	60
4.10	1/8 の OHT 試験片モデル	62

4.11	ブーミング解析に用いる学習領域	62
4.12	ローカルモデルの寸法と位置	63
4.13	ローカルモデルの境界条件	63
4.14	エポキシ樹脂の塑性ひずみと降伏応力	64
4.15	グローバルモデルのミーゼス応力分布	65
4.16	ローカルモデルの要素ミーゼス応力コンター図 (界面損傷あり)	65
4.17	繊維樹脂界面 cohesive 要素の損傷係数コンター図	66
4.18	樹脂の損傷係数のコンターズ図 (界面損傷あり)	66
4.19	剥離部分の拡大図	67
4.20	樹脂の損傷係数コンター図 (界面損傷なし)	68
4.21	損傷を起こした樹脂のみの表示 (界面損傷なし)	68
4.22	層厚の影響評価用 1/8 の OHT 試験片モデル	69
4.23	層厚の影響評価用のローカルモデル	70
4.24	層厚 20 μm のローカルモデルの損傷領域 A	70
4.25	層厚 100 μm のローカルモデルの損傷領域 A	71
4.26	層厚 20 μm のローカルモデルの損傷領域 B	71
4.27	層厚 100 μm のローカルモデルの損傷領域 B	72
4.28	層厚 20 μm のせん断ひずみ γ_{xy}	73
4.29	層厚 100 μm のせん断ひずみ γ_{xy}	73
4.30	層厚 20 μm のせん断ひずみ γ_{yz}	74
4.31	層厚 100 μm のせん断ひずみ γ_{yz}	74
4.32	層厚 20 μm のせん断ひずみ γ_{xz}	75
4.33	層厚 100 μm のせん断ひずみ γ_{xz}	75
4.34	層厚 20 μm の損傷係数コンター図 A	76
4.35	層厚 100 μm の損傷係数コンター図 A	76
4.36	層厚 20 μm の損傷係数コンター図 B	77
4.37	層厚 20 μm の損傷係数コンター図 B(損傷発生部分のみ)	77
4.38	層厚 100 μm の損傷係数コンター図 B	78
4.39	層厚 100 μm の損傷係数コンター図 B(損傷発生部分のみ)	78
5.1	応力特異点 (角部)	82
5.2	応力特異点 (異種材の積層界面)	82
5.3	応力特異点 (CFRP の繊維樹脂界面)	83
5.4	応力集中部 (フィレット部)	83
5.5	応力集中部 (円孔部)	84
5.6	応力集中部 (ノッチ部)	84
5.7	応力特異点でのメッシュサイズの影響評価	85
5.8	応力集中部でのメッシュサイズの影響評価	85
5.9	2次元モデルの入力に用いる節点応力	86

5.10	応力比が 0.45 のときのミーゼス応力分布	87
5.11	応力比が 1.0 のときのミーゼス応力分布	87
5.12	2次元モデルの出力に用いる応力	87
5.13	2次元モデルのフィレット部応力予測に用いるニューラルネットワークの構成	88
5.14	2次元の学習用モデルと境界条件	89
5.15	2次元の角部の角度が異なる学習用モデル	89
5.16	2次元の 90°モデルにおけるメッシュサイズの違い	90
5.17	2次元の 90°モデルにおけるフィレット径の違い	90
5.18	2次元用ニューラルネットワークの学習履歴	91
5.19	2次元用検証用モデル A	92
5.20	2次元用検証用モデル B	92
5.21	2次元用検証用モデル B の角部での解析結果	93
5.22	2次元用検証用モデル B の半径 0.15 mm のフィレットでの解析結果	94
5.23	3次元モデルでのニューラルネットワークに用いる角部の節点応力	95
5.24	3次元モデルでのニューラルネットワークに用いるフィレット部の節点応力	96
5.25	3次元モデル用のニューラルネットワークの構成 (Type III)	96
5.26	学習用の 3次元角部モデル	97
5.27	学習用の 3次元フィレット部モデル	97
5.28	学習モデルの境界条件	98
5.29	学習モデルの荷重条件 A	98
5.30	学習モデルの荷重条件 B	99
5.31	学習モデルの荷重条件 C	99
5.32	学習モデルの荷重条件 D	100
5.33	学習用角部モデルの解析結果の一例	101
5.34	学習用角部モデルの解析結果の一例	101
5.35	3次元モデル用ニューラルネットワークの学習履歴	103
5.36	Type I での入力と出力の関係 (学習データ)	104
5.37	Type I での入力と出力の関係 (学習済み NN)	104
5.38	Type II での入力と出力の関係 (学習データ)	105
5.39	Type II での入力と出力の関係 (学習済み NN)	105
5.40	Type III での入力と出力の関係 (学習データ)	106
5.41	Type III での入力と出力の関係 (学習済み NN)	106
5.42	検証用の 3次元モデル	107
5.43	検証用の 3次元角部モデルの解析結果の一例	109
5.44	検証用の 3次元フィレット部モデルの解析結果の一例	110
5.45	CFRP 補強の簡易モデルの寸法	111
5.46	CFRP 補強の簡易モデルの境界条件	112
5.47	検証用の橋梁モデルの寸法	113

5.48	検証用の橋梁モデルの断面寸法	113
5.49	橋梁モデルにおける CFRP の補強箇所	114
5.50	橋梁モデルの荷重・境界条件	115
5.51	橋梁モデルの固定箇所	115
5.52	橋脚モデルの角, フィレット, 評価点の箇所	116
5.53	橋脚の角部モデルの変位コンター図	118
5.54	橋脚の角部モデルのミーゼス応力コンター図	118
5.55	橋脚の評価点周辺の応力の比較	119

表目次

2.1	界面の特性	15
2.2	要素番号 4122 の比較結果	17
2.3	要素番号 4051 の比較結果	18
2.4	要素番号 4122 の並列計算の比較結果	18
2.5	要素番号 4051 の並列計算の比較結果	18
2.6	CFRP の材料特性 [74]	19
2.7	CFRP の積層界面の材料特性 [74]	20
2.8	Newton-Raphson 法を用いた増分解析の条件	20
2.9	DCB シミュレーションの計算条件	20
2.10	Newton-Raphson 法の計算時間と反復回数	23
2.11	CG 法の計算時間と反復回数	24
3.1	ニューラルネットワークの構成の比較	33
3.2	ローカルモデル A での比較結果	34
3.3	ローカルモデル B での比較結果	37
3.4	CFRP の直交異方性の材料特性	46
3.5	炭素繊維と樹脂の材料特性	46
4.1	マイクロドロップレットのシミュレーションに用いる材料特性	55
4.2	求めた cohesive 要素の特性	56
4.3	シミュレーション結果と実験結果のまとめ	56
4.4	実験と比較したシミュレーション精度のまとめ	57
4.5	CFRP の直交異方性の材料特性	64
4.6	炭素繊維と樹脂の弾性特性	64
4.7	cohesive 要素の特性	64
5.1	角部とフィレット部の特徴	85
5.2	2次元用検証用モデル B における角モデルとフィレットモデルの比較	94
5.3	3次元用学習モデルの解析条件	102
5.4	ニューラルネットワークの構成による予測精度の比較	103
5.5	寸法の評価に用いる条件	108

5.6	フィレット径の評価に用いる条件	108
5.7	寸法の評価用モデルにおける計算コストの比較	108
5.8	フィレット径の評価用モデルにおける計算コストの比較	109
5.9	簡易モデルでの予測精度	112
5.10	簡易モデルでの計算時間の比較	112
5.11	橋梁の材料特性	116
5.12	橋梁の補強に用いる CFRP の直交異方性の材料特性	117
5.13	橋梁モデルにおける計算コストと予測精度の比較	119

第1章

序論

第1章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第2章

大規模モデルの界面損傷進展解析手法の 開発

第2章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第3章

ニューラルネットワークを用いたブーミング法の開発

第3章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第4章

大規模 CFRP モデルを用いた損傷進展解析手法の開発

第4章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第5章

ニューラルネットワークを用いた応力集中予測手法の開発

第5章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第6章

結論

第6章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻博士課程における研究成果をまとめたものです。本論文を作成するにあたり、お世話になりました全ての方々に対し、深く感謝の意を表します。

はじめに、指導教官である東京大学大学院新領域創成科学研究科奥田洋司教授に深い感謝を申し上げます。日頃より丁寧で温かい御指導を賜ると共に、国内外の会議や研究会等様々な挑戦の機会を与えて頂きまして、研究者として成長することができました。また、東京大学大学院新領域創成科学研究科橋本学講師には、日ごろから研究室ゼミ等において様々な御助言を頂きました。心から感謝いたします。

本論文の副査をお引き受けくださいました東京大学大学院新領域創成科学研究科佐々木健教授、陳ユ教授、福井類准教授、東京大学生産技術研究所吉川暢宏教授には貴重なご意見を数多くいただきました。ここに感謝いたします。

研究室の皆様からは、日々の議論を通して多くのことを学ばせていただき、多くの刺激を受けました。ここに感謝いたします。

勤務しながらの博士課程進学を許可いただいた福井県工業技術センター山本雅己所長はじめ職員の皆様にも大変お世話になりました。ここに感謝いたします。

最後に、仕事と研究を両立するにあたって支えとなってくれた両親、姉、祖母に感謝いたします。

参考文献

- [1] Lu, K. , The future of metals. *science*, 328(5976), 319-320 (2010).
- [2] 三角潤, 軽くて強い炭素繊維. *化学と教育*, 66(9), 448-451 (2018).
- [3] 本田史郎, CO2 排出削減に貢献する CFRP, ネットワークポリマー 32.3, 135-141 (2011).
- [4] 福田博, 邊吾一, 末益博志, 新版 複合材料・技術総覧 (2011).
- [5] N. Sato, T. Kurauchi, S. Sato, and O. Kamigaito, Microfailure behavior of randomly dispersed short fibre reinforced thermoplastic composites obtained by direct SEM observation, *Journal of Materials Science*, 26, 3891-3898 (1991).
- [6] B. Cox, and Q. Yang, In quest of virtual tests for structural composites. *Science*, 314.5802, 1102-1107 (2006).
- [7] LLorca, C. Gonzalez, J.M. Molina-Aldaregua, J. Segurado, R. Seltzer, F. Sket, M.Rodrguez, S.Sdaba, R. Muoz, and L.P. Canal, Multiscale modeling of composite materials: a roadmap towards virtual testing, *Advanced Materials* 23.44, 5130-5147 (2011).
- [8] Okereke, M. I., A. I. Akpoyomare, and M. S. Bingley, Virtual testing of advanced composites, cellular materials and biomaterials: a review, *Composites Part B: Engineering* 60, 637-662 (2014).
- [9] T. Okabe, Recent studies on numerical modelling of damage progression in fi-bre-reinforced plastic composites. *Mechanical Engineering Reviews*, 14-00226 (2014).
- [10] 久田俊明, 野口裕久. 非線形有限要素法の基礎と応用. 丸善 (1995).
- [11] 石川敏之, 鋼橋の CFRP 板接着補修・補強の現状と課題. *日本接着学会誌*, 45(4), 139-144 (2009).
- [12] 国土交通省, 老朽化対策の取組み (2019).
- [13] Miller, T. C., Chajes, M. J., Mertz, D. R., and Hastings, J. N, Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates. *Journal of bridge engineering*, 6(6), 514-522 (2001).
- [14] 松村政秀, 北田俊行, 久部修弘, 高弾性 CFRP 板を I 形断面鋼桁に貼付する補強効果に関する研究. *構造工学論文集 A*, 54, 834-841 (2008).
- [15] 杉浦江, 小林朗, 稲葉尚文, 本間淳史, 大垣賀津雄, 長井正嗣, 鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案. *土木学会論文集 F*, 65(1), 106-118 (2009).
- [16] 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 長井正嗣, 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察. *構造工学論文集 A*, 60, 541-553 (2014).

- [17] Hosseini, A., Ghafoori, E., Al-Mahaidi, R., Zhao, X. L., and Motavalli, M. Strengthening of a 19th-century roadway metallic bridge using nonprestressed bonded and prestressed unbonded CFRP plates. *Construction and Building Materials*, 209, 240-259 (2018).
- [18] 三木千寿, 坂野昌弘, 館石和雄, 福岡良典, 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析. *土木学会論文集*, (392), 403-410 (1988)..
- [19] 岸正彦, 構造解析のための有限要素法実践ハンドブック, 森北出版 (2006).
- [20] Ever J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus*. CRC Press(2013).
- [21] 村上澄男, 連続体損傷力学, 森北出版 (2008).
- [22] Ladeveze, P., and LeDantec, E., Damage modelling of the elementary ply for laminated composites. *Composites science and technology*, 43(3), 257-267 (1992).
- [23] Ladevze, P., Allix, O., Gornet, L., and Lvque, D. , A computational damage mechanics approach for laminates: identification and comparison with experimental results (1998).
- [24] 結城良治, 界面の力学, 培風館 (1993).
- [25] Elices, M. G. G. V., Guinea, G. V., Gomez, J., and Planas, J., The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges. *Engineering fracture mechanics*, 69(2), 137-163 (2002).
- [26] Alfano, G., and Crisfield, M., Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International journal for numerical methods in engineering*, 50(7), 1701-1736 (2001).
- [27] Nishikawa, M., Okabe, T., and Takeda, N., Numerical simulation of interlaminar damage propagation in CFRP cross-ply laminates under transverse loading. *International Journal of Solids and Structures*, 44(10), 3101-3113 (2007).
- [28] Alfano, G. On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models, *Composites Science and Technology*, 66(6), 723-730 (2006).
- [29] Dassault Systmes, *Abaqus Analysis User' s Manual v2018* (2018).
- [30] Zhou, Q., Xu, J., Chen, X., Zheng, J., and Zhou, C., Stress singularity in a rectangular bond specimen of a solid rocket motor: effects and elimination. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 63, 57-65 (2015).
- [31] Hu, X., Bui, T. Q., Wang, J., Yao, W., Ton, L. H. T., Singh, I. V., and Tanaka, S., A new cohesive crack tip symplectic analytical singular element involving plastic zone length for fatigue crack growth prediction under variable amplitude cyclic loading. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 65, 79-90 (2017).
- [32] 寺田賢二郎, 菊池昇, 均質化法入門, 丸善 (2003).
- [33] 寺田賢二郎, 犬飼壮典, 平山紀夫, 非線形マルチスケール材料解析における数値材料実験. *日本機械学会論文集 A 編*, 74(744), 1084-1094 (2008).
- [34] Terada, K., Kato, J., Hirayama, N., Inugai, T., and Yamamoto, K, A method of two-scale analysis with micro-macro decoupling scheme: application to hyperelastic composite materials. *Computational Mechanics*, 52(5), 1199-1219 (2013).

-
- [35] Saito, R., Yamaguchi, Y., Matsubara, S., Moriguchi, S., Mihara, Y., Kobayashi, T., and Terada, K., Decoupled two-scale viscoelastic analysis of FRP in consideration of dependence of resin properties on degree of cure. *International Journal of Solids and Structures*, 190, 199-215 (2020).
- [36] Okabe, T., Nishikawa, M., and Toyoshima, H., A periodic unit-cell simulation of fiber arrangement dependence on the transverse tensile failure in unidirectional carbon fiber reinforced composites. *International Journal of Solids and Structures*, 48(20), 2948-2959 (2011).
- [37] Crouch, R. D., Clay, S. B., and Oskay, C., Experimental and computational investigation of progressive damage accumulation in CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 48, 59-67 (2013).
- [38] Liu, P. F., and Li, X. K., A large-scale finite element model on micromechanical damage and failure of carbon fiber/epoxy composites including thermal residual stress. *Applied Composite Materials*, 25(3), 545-560 (2018).
- [39] Qi, Z., Liu, Y., and Chen, W., An approach to predict the mechanical properties of CFRP based on cross-scale simulation. *Composite Structures*, 210, 339-347 (2019).
- [40] Chevalier, J., Camanho, P. P., Lani, F., and Pardoen, T., Multi-scale characterization and modelling of the transverse compression response of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy. *Composite Structures*, 209, 160-176 (2019).
- [41] Hirai, Itio, Bo Ping Wang, and Walter D. Pilkey, An efficient zooming method for finite element analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 20.9, 1671-1683, (1984).
- [42] Mao, K. M., and Sun, C. T., "A refined global local finite element analysis method", *International journal for numerical methods in engineering*, 32.1, pp.2943 (1991).
- [43] Reinoso, J., Blzquez, A., Estefani, A., Pars, F., Caas, J., Arvalo, E., and Cruz, F., Experimental and three-dimensional global-local finite element analysis of a composite component including degradation process at the interfaces. *Composites Part B: Engineering*, 43(4), 1929-1942 (2012).
- [44] Reinoso, J., Blzquez, A., Tvara, L., Pars, F., and Arellano, C., Damage tolerance of composite runout panels under tensile loading. *Composites Part B: Engineering*, 96, 79-93 (2016).
- [45] Akterskaia, M., Jansen, E., Hallett, S. R., Weaver, P., and Rolfes, R., Analysis of skin-stringer debonding in composite panels through a two-way global-local method. *Composite Structures*, 202, 1280-1294 (2018).
- [46] 竹本真一郎, 吉川暢宏, 高圧水素容器 CFRP 積層構造のメソスケール引張強度評価のための樹脂非線形材料モデルの高度化. *日本機械学会論文集*, 85(869), 18-00304 (2019).
- [47] 竹本真一郎, 吉川暢宏, メソスケールズーミング解析による CFRP 製圧力容器の強度評価. *日本機械学会論文集*, 86(883), 19-00338 (2020).
- [48] <https://gitlab.com/FrontISTR-Commons/FrontISTR> (accessed 2020-04-11).

- [49] <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/> (accessed 2020-04-11).
- [50] 奥田洋司, 並列有限要素解析 II 並列構造解析ソフトウェア FrontSTAR を使いこなす, 培風館 (2008).
- [51] 片桐孝洋, スパコンプログラミング入門, 並列処理と MPI の学習, 東京大学出版会 (2013).
- [52] 片桐孝洋, 並列プログラミング入門, サンプルプログラムで学ぶ OpenMP と OpenACC, 東京大学出版会 (2015).
- [53] H. Kadowaki, G. Hashimoto, H. Okuda, T. Higuchi, H. Jinnai, E. Seta, and T. Saguchi, Evaluation of the appropriate size of the finite element representative volume for filled rubber composite analyses, *Mechanical Engineering Journal*, 3, 5, 16-00372 (2016).
- [54] Y. Ihara, G. Hashimoto, and H. Okuda, Web-based integrated cloud CAE platform for large-scale finite element analysis, *Mechanical Engineering Letters*, 3, 17-00520 (2017).
- [55] 総務省情報通信国際戦略局技術政策課研究推進室: 総務省における人工知能の研究開発に関する取組み, ITU ジャーナル, Vol.47, No.1 (2017).
- [56] Alom, M. Z., Taha, T. M., Yakopcic, C., Westberg, S., Sidike, P., Nasrin, M. S., Hasan, M., Van Essen, B. C., Awwal, A. A. S. and Asari, V. K., A state-of-the-art survey on deep learning theory and architectures, *Electronics*, 8(3), 292 (2019).
- [57] Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G., Imagenet classification with deep convolutional neural networks, *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 1097-1105 (2012).
- [58] 施勤忠, 萩原一郎, 高島太: 応答曲面法による多峰性問題の最適設計法の開発. 日本機械学会論文集 A 編 65.630, 232-239 (1999).
- [59] 茨木誠一, 富田勲, 杉本浩一: 遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを用いたターボチャージャ用遠心圧縮機の最適空力設計 (新製品・新技術特集), 三菱重工技報, 52(1), 82-86 (2015).
- [60] Lu, X., Giovanis, D. G., Yvonnet, J., Papadopoulos, V., Detrez, F., and Bai, J., A data-driven computational homogenization method based on neural networks for the nonlinear anisotropic electrical response of graphene/polymer nanocomposites. *Computational Mechanics*, 64(2), 307-321 (2019).
- [61] Okuda, H., Miyazaki, H. and Yagawa, G., A Neural Network Approach for Modelling of Viscoplastic Material Behaviors, *Advanced Computer Applications, ASME/PVP*, Vol.274, pp. 141145 (1994).
- [62] Yun, Gun Jin, Jamshid Ghaboussi, and Amr S. Elnashai: A new neural network - based model for hysteretic behavior of materials, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 73.4, 447-469 (2008).
- [63] 望月義彦, 矢川元基, 吉村忍, 階層型ニューラルネットワークと計算力学に基づく逆問題解析法: 学習・推定メカニズムの検討と定量的欠陥同定への適用. 日本機械学会論文集 A 編, 57.540 (1991).
- [64] 大石篤哉, 山田勝稔, 吉村忍, 矢川元基, ニューラルネットワークと計算力学に基づく欠陥同定: 超音波非破壊検査への応用. 日本機械学会論文集 A 編, 60(569), 264-271(1994).

-
- [65] Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., Kudlur, M., Levenberg, J., Monga, R., Moore, S., Murray, D. G., Steiner, B., Tucker, P., Vasudevan, V., Warden, P., Wicke, M., Yu, Y., and Zheng, X., Tensorflow: A system for large-scale machine learning, In 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16) , Savannah , pp. 265-283 (2016).
- [66] Bahrapour, Soheil, et al. , Comparative study of caffe, neon, theano, and torch for deep learning (2016).
- [67] Oishi, A., Yagawa, G., Computational mechanics enhanced by deep learning, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 327, 327-351 (2017).
- [68] 山田賢也, 片桐孝洋, 永井亨, and 荻野正雄. (2017). 疎行列形状のカラー画像を入力としたディープラーニングによる数値計算ライブラリの自動チューニング方式. 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) (24), 1-8 (2017).
- [69] Wang, Q., Zhang, G., Sun, C., Wu, N., High efficient load paths analysis with U* index generated by deep learning, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 344, 499-511 (2019).
- [70] Yagawa, G., and Okuda, H., Neural networks in computational mechanics. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 3(4), 435 (1996).
- [71] J.K. Kim and Y.W. Mai, High strength, high fracture toughness fibre composites with interface control - A review, *Composites Science and Technology*, 41, 333-378 (1991) .
- [72] L.G. Tang and J.L. Kardos, A review of methods for improving the interfacial adhesion between carbon fiber and polymer matrix, *Polymer Composites*, 18, 100-113 (1997).
- [73] P.P. Camanho, and C.G. Davila, Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials, NASA/TM-2002-211737 (2002).
- [74] A. Turon, C.G. Davila, P.P. Camanho, and J. Costa, An Engineering Solution for Mesh Size Effects in the Simulation of Delamination Using Cohesive Zone Mod-els, *Engineering fracture mechanics*, 74, 10, pp. 1665-1682 (2007).
- [75] V. Shanmugam, R. Penmetsa, E. Tuegel, and S. Clay, Stochastic modeling of de-lamination growth in unidirectional composite DCB specimens using cohesive zone models, *Composite Structures*, 102, pp. 38-60 (2013).
- [76] S. Zhandarov, and E. Mader, Characterization of fiber/matrix interface strength: Applicability of different tests, approaches and parameters, *Composites Science and Technology*, 65, pp. 149-160 (2005).
- [77] M.A. Minnicino, and M.H. Santare, Modeling the progressive damage of the microdroplet test using contact surfaces with cohesive behaviour, *Composites science and technology*, 72.16, pp. 2024-2031 (2012).
- [78] S. Sockalingam, M. Dey, J.W. Gillespie Jr, and M. Keefe, Finite element analysis of the microdroplet test method using cohesive zone model of the fiber/matrix in-terface, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 56, pp. 239-247 (2014).

- [79] M. Sato, E. Imai, J. Koyanagi, Y. Ishida, and T. Ogasawara, Evaluation of the interfacial strength of carbon-fiber-reinforced temperature-resistant polymer composites by the microdroplet test, *Advanced Composite Materials*, 26, 5, pp. 465-476 (2017).
- [80] <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/en/supercomputer/ofp/service/> (accessed 2020-04-11).
- [81] Higuchi, R., T. Okabe, and T. Nagashima, Numerical simulation of progressive damage and failure in composite laminates using XFEM/CZM coupled approach, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 95, 197-207 (2017).
- [82] Zhang, D., Zheng, X. and Wu, T., Damage characteristics of open-hole laminated composites subjected to longitudinal loads. *Composite Structures*, 230, 111474 (2019).
- [83] Almeida Jr, J. H. S., Bittrich, L. and Spickenheuer, A., Improving the open-hole tension characteristics with variable-axial composite laminates: Optimization, progressive damage modeling and experimental observations. *Composites Science and Technology*, 185, 107889 (2020).
- [84] Carneiro, T., Da Nbrega, R. V. M., Nepomuceno, T., Bian, G. B., De Albuquerque, V. H. C. and Reboucas Filho, P. P., Performance analysis of google colab as a tool for accelerating deep learning applications. *IEEE Access*, 6, 61677-61685 (2018).
- [85] Dong, C., Loy, C. C., He, K., and Tang, X., Learning a deep convolutional network for image super-resolution. In *European conference on computer vision*, 184-199 (2014).
- [86] Industrial Technology Center of Fukui prefecture, Thin-ply laminates (FUKUI method Towspreading technology) (2014).
- [87] Carroll, B. J., The accurate measurement of contact angle, phase contact areas, drop volume, and Laplace excess pressure in drop-on-fiber systems," *Journal of colloid and interface science*, 57(3), 488-495 (1976).
- [88] Nishikawa, M., Okabe, T., Hemmi, K., and Takeda, N., Micromechanical modeling of the microbond test to quantify the interfacial properties of fiber-reinforced composites. *International Journal of Solids and Structures*, 45(14-15), 4098-4113 (2008).
- [89] 三輪 実, 大沢 直志, 富田 厚志, ガラス繊維-熱可塑性樹脂系複合材料における臨界繊維長及び界面の降伏せん断強度の温度, ひずみ速度依存性. *高分子論文集*, 41, 6 (1984).
- [90] Galos, J., Thin-ply composite laminates: a review. *Composite Structures*, 111920 (2020).
- [91] <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/obcx/service/> (accessed 2020-04-11)
- [92] Guillamet, G., Turon, A., Costa, J., and Linde, P., A quick procedure to predict free-edge delamination in thin-ply laminates under tension. *Engineering Fracture Mechanics*, 168, 28-39 (2016).
- [93] Ridha, M., Wang, C. H., Chen, B. Y., and Tay, T. E. Modelling complex progressive failure in notched composite laminates with varying sizes and stacking sequences. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 58, 16-23 (2014).
- [94] Seweryn, A. and Molski, K., Elastic stress singularities and corresponding generalized stress intensity factors for angular corners under various boundary conditions, *Engineering Frac-*

- ture Mechanics, 55(4), 529-556 (1996).
- [95] Dunn, M. L., Suwito, W. and Cunningham, S., Stress intensities at notch singularities, Engineering Fracture Mechanics, 57(4), 417-430 (1997).
- [96] Raju, I. S. and Crews Jr, J. H., Interlaminar stress singularities at a straight free edge in composite laminates, Computers Structures, 14(1-2), 21-28 (1981).
- [97] Peterson, R. E., Stress concentration design factors, John Wiley Sons Ltd (1953).
- [98] Danglade, F., Pernot, J. P. and Vron, P., On the use of machine learning to defeature CAD models for simulation, Computer-Aided Design and Applications, 11(3), 358-368 (2014).
- [99] Chow, P., Kubota, T. and Georgescu, S., Automatic Detection of Geometric Features in CAD models by Characteristics, Computer-Aided Design and Applications, 12(6), 784-793 (2015).
- [100] Fish, J., Markolefas, S., Guttal, R. and Nayak, P., On adaptive multilevel superposition of finite element meshes for linear elastostatics, Applied Numerical Mathematics, 14(1-3), 135-164 (1994).
- [101] Shunmugam, M. S. and Prasad, N. S., Prediction of stress in fillet portion of spur gears using artificial neural networks, AI EDAM, 22(1), 41-51 (2008).
- [102] Dabiri, M., Ghafouri, M., Raftar, H. R. and Bjrck, T., Neural network-based assessment of the stress concentration factor in a T-welded joint, Journal of Constructional Steel Research, 128, 567-578 (2017).
- [103] 小西拓洋, 高橋和也, and 三木千寿, 高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性. 土木学会論文集, 654, 91-103 (2000).