

学位論文等の執筆要領

東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻

東北大学工学部 建築・社会環境工学科 (土木系 3 コース)

誰も興味が無いらしいので
とりあえず構造強度学研究室 L^AT_EX 2_ε版

目 次	3 審査会でのプレゼンテーション	12
1 論文とは	3.1 スライド作成についての技術的なヒ ント	12
1.1 論文の目的	3.2 発表と質疑応答でのマナー	15
1.2 論理的構成を持った論文	卒論生のとんでもない勘違い	17
1.3 自分自身の成果と他人の成果	参考文献	19
1.4 起承転結は科学論文には不適切か	索 引	19
2 論文の執筆要領	卒業論文・修論概要サンプル	20
2.1 文章のスタイルと章建て	卒業論文・修士論文・博士論文サンプル	23
2.2 フォント等		
2.3 式番号や図表の番号と配置		
2.4 参考文献の引用とリスト		
2.5 図の描き方と著作権		

suthesis.sty (下敷き L^AT_EX209 1989-1995 頃の版)

tu-civil.sty (初版 L^AT_EX209 1998/1/29, 現 L^AT_EX 2_ε 2014/12/27)

2015 年春現在

1 論文とは

1.1 論文の目的

対象とした問題に対して、自らが得た結論までの過程を、説得力があり誤解が生じないように論理的に組み直した上で記述して、その問題の分野を専門とする読者（卒業論文の場合は教員）に報告する形式で表現することが、論文執筆の目的である。それはレイアウトするという意味ではなく、内容を論理的にかつ誤解が生じないように記述することである。

最近、第1著者らが関係する学会論文集等への投稿原稿（査読時）でも見られる悪い例として

- 一段落に一文（か二文）しかなく、それが数段落続いて並ぶ。つまりは、単なる箇条書きをそのまま論文にただけの文章で、全く論理性が見えない。
- 一つの段落の中での論理が明確ではなく、異なるトピックスについて順不同で書かれている。「まえがき」は教員が見てくれたのか、よくまとまっているのに、次の章になった途端に箇条書き様の文が並ぶ。教員の怠慢か。
- ソフトウェアのデフォルトのままの出力の図で、線の太さも1種類しか使われておらず、どれが一番着目すべきであるか等が一見してはわからない図が並ぶ。
- 他人の仕事と自分のやったことの区別が明確ではない。また、適切な文献（もちろん査読者の仕事という意味ではない）が引用されていない。
- 使用した装置やソフトウェアのマニュアル中の図や、他人の論文の図表等を、そのままスキャンして用いる等、知的財産権のことに全く留意せずに使っている。

等が挙げられる。こういったことが生じないように、まずこの章の前半では、論文執筆の目的に関連した必要最小限のアドバイス¹を与える。

また一般に、論文を投稿する際には投稿先の論文集毎に詳細な執筆要領が決められており、それを守った原稿のみが受け付けられる。ここには一例として、土木学会論文集を基本とし、それを若干拡張し、審査対象になる論文が備えるべき最低限の執筆要領も記した。また卒業論文等を念頭に置いて、最終審査会でのプレゼンテーションの際の注意事項とマナーも列挙しておく。なお文献[3]は、英語での執筆についてだけでなく、論文の書き方についても役に立つ。最近出版された秋田大学の後藤さんの著書[1]ではこの章が引用されているが、実はこの内容は、第1著者が学生のとき所属した研究室の西野文雄・長谷川彰夫両先生による論文の執筆と発表の手引きを下敷きにしたものである。

1.2 論理的構成を持った論文

一つの論文はいくつかの「章」で構成され、それぞれの章の内容と目的等はお互いに少しずつ異なっている。そして、各章の中身（題目）と章の順番は、報告が容易に理解できるようになっていなければならない。この中身（題目）と順番を最適にすることが、論文執筆の最も重要な第1ステップである。そして、原則としてまえがきと結語の章を除き、一つの章には複数の「節」が存在する。それぞれの節も、その内容と目的等はお互いに少しずつ異なる。この節を章の中で、どのような題目でどのような順序で並べるべきかという点も、論文を他人に理解してもらうために考慮すべき重要な点の一つである。一つの節には複数の「段落」で構成された

¹ 中田亨氏による「やればできる 卒業論文の書き方 (<http://www015.upp.so-net.ne.jp/notgeld/sotsuron.html>)」というものがあり、特に「ダメな論文を書く14の方法」は優れたものだ。

文章が、論理的に並ぶ。段落は、複数の「文節」で一つのことを述べるように構成される。こういった章・節の並びは、ワードプロセッサを使う人にとっては、書式構成あるいはレイアウト構成と思われがちだが、これは論理構成に沿って配されるべきものである。

そういう意味で、文節と文節は必要に応じて適切な接続詞で関係付けられているべきである。同様に、段落と段落の間にも、必要に応じて適切な接続詞を付すべきであろう。しばしば段落の初めか前の段落の最後に、次に説明することについて予告編のような一文、例えば

次に、前述の〇〇の定義と△△モデルへの導入について説明する。

といった文を付ける者がいるが、それは論理的に文章が書けていないことを意味する。そうするよりも、適切な接続詞を使って、前の段落を受けて次にする説明そのものをすぐに始める方が読み易いし、理解され易い。また、そうなるように、お互いの段落の中身と表現が選ばれていなければならない。わかり易い文章を書くヒントについては文献 [4]（読むのは前半のみでいい）がたいへん役に立つので、是非読んで欲しい。また、接続詞等の論理的な記述については、元々は英語の文章記述法ではあるが、文献 [2]（英作文については今は読み飛ばしていい）がとても参考になる。

また過去に読ませてもらった修士論文等で時折見られたことであるが、例えば

韌性 (toughness) を確保するために・・

のように、英訳を括弧書きで記す学生がいる。これは教科書中の説明のように、初学者への情報提供の場合に用いる教育的手段であって、卒業論文や修士論文あるいは技術報告書のような、専門知識のある教員や上司に提出する文書では使ってはいけない。さらに、原則として脚注は用いないこととする。これは、審査員や読者の読み方によっては、論文の論理の理解を一時的に中断させる役割を持ってしまう可能性があるからである。もし本当に重要な内容なら本文にきちんと書くべきであり、それほどでもない内容ならそもそも書く必要は無いが、あるいは付録（補遺）に並べればいい。

また卒業論文等で、非常に多くの図表を並べる者がいるが、それが審査員の理解を深めるとは限らない。例えば

・・・の場合の結果を示した図 12～図 31 を比較すると、A が B であることが明らかである。次に、図 32～図 50 には・・・A が B ではない場合があり得ることも予測できる。そこで・・・

といった表現を何度も読まれたことがあるが、このような場合には、自分が審査員になって一度に 20 枚もの図を眺めさせられて、そのどこをどう比較すればいいかの記述も無いのに、たった一つの結論を理解せよと言われることを思い描いて欲しい。そうすれば、このような文は無いに等しいことを理解できるはずだ。結局、通常出版されている論文 1 編に含まれている程度の図表の数の範囲で、論理的に成果を報告すべきである。したがって上の例は、例えば

・・・のパラメータを 0.1 として表 4 に示した 20 通りの α の値を用いた場合の結果をまとめて比較した図 7 からは、a であることや、b であることが明らかなることから、c でありさえすれば A が B であることになる。一方、 α を 0.5 に固定して・・・比較した図 8 からは C が D である・・・また図 9 と図 10 に示したのは、典型的な 2 種類の β を用いた場合の結果であるが、その比較からは、上述の「A が B である」結論は、限定された条件のときにしか・・・

のようになるべきである。

また卒業論文等は、自分の研究の自分用の勉強メモではない。すなわちそれは、やったことや学んだことをすべて、その過程の順番に沿って記しておくような備忘録ではなく、専門家に提出する専門的な報告書である

ことに注意すべきである。もし自分用あるいは研究室用の備忘録を作りたかったら、論文とは別に作成し、さらには証拠となるすべての図や情報・プログラムをファイルするのが望ましい。卒業論文や修士論文そのものは、そのできあがりそのまま土木学会の各種論文集への投稿原稿 1 編ないし 2 編程度になるように、情報の適切な取捨選択と文章表現がなされるべきである。

1.3 自分自身の成果と他人の成果

卒業論文で時折見られることであるが、単にページ数を増やすだけの目的で、引用もしない情報を羅列する学生がいる。例えば自分が研修をするのに必要だった勉強で得た知識や既往の研究の結果を誘導する過程、つまり教科書や既発表論文に載っているような理論や式・説明を並べた節を設ける学生がいる。あるいは、自分が引用したい他人の式の誘導過程をすべてコピーして論文に含める者もいる。これは全く意味がない。というのも、前述のように、論文は専門知識のある教員に提出する報告書だからである。研修をするに当たって自分が勉強して理解した新しい知識の大半は個人の備忘録に含めるべきであり、論文には載せるべきではない。つまり本文中で引用しない情報は論文には含めてはいけない。

これに対し、自分の論文の位置付け等を述べるために、どうしても教科書や他人の論文にある文章や式を論文中で用いなければならない場合には、必要なものだけを、代表的なものだけを書く。つまりこの場合も、誘導過程等の他人の成果をそのままコピーして論文に載せることはしない。さらに、引用文や式の箇所には、必ず引用した文献を記しておく。また、他人の文章を引用する場合には、原文をそのまま引用符の中に入れて

誰某⁵⁾によれば「何野の○△理論を用いたモデル化からは・・・という結論にはな」り得ないことが定説となっている。

のように表現する。ただし、その際にも必ず引用した論文の出典を、この例の「誰某⁵⁾」のように明記する必要がある。その文献を文献リストに載せなければならない。また引用した括弧の中の文字列は元の文章と寸分違わないようにしなければならない。上の例の場合の原文は「何野の○△理論を・・・結論にはならない。」になっていると想定したため、「何野の・・・」から「・・・にはな」までしか引用できないのである。

逆に、自分自身が得た成果は、そうであることを読者が誤解無く理解できるように記述されなければならない。つまり、他人のこれまでの成果との関係を明記した上で、この研究によって明らかにされたことが何なのか、そのうちのいくつかは既存の結果と同じなのか異なるのか等について、明確に判別できるような表現になっていないといけない。実はこのような、自分の成果と他人の成果を区別していないのではないかという注意は、他専攻の教授からも苦情を聞いたことがある。土木学会の論文集への投稿論文の査読を依頼されたその教授から「土木の分野では、他人の成果も自分のもののように記述していいのか。あるいは、どこが自分の成果なのか明示的にはしないのが慣習か」と問われたことがある。十分に気をつけなければならない点である。

1.4 起承転結は科学論文には不適切か

先日インターネットをぼおーっと見ていたら、科学論文には起承転結は不適切というページ²を見つけた。ま、そこに書かれていることは当然のことであった。その他にも、起承転結の可否の議論がたくさんあるようだ。ただ、「転」の意味を元々の漢詩のそれではなく緩めることを前提とした場合、しかし「別の角度から検討する」ことや単なる「話の展開」という意味ではなく、「起承」までの結論を「否定するように見える展開³」という意味と捉えて使った場合、そのややスリリングな文章が理解を深めることもあるのではないかと考えら

² 著者が誰かわからないページ (<http://shouronbun.com/>)

³ そのページの著者はこれを「話の展開」と呼んでいるのかもしれないが、ここでは限定的に、意外性や一時的な否定を読者に印象付ける展開のこと。

れる。論文は論理的であることが最も重要だが、読者にインパクトも与えずに、結果をすべて知っている立場からの、一方向に向かってこれでもかこれでもかという論文が「読み易い」「理解し易い」という点には疑問を感じている。特に教育の手段として研究をして論文を書かせている大学においては、審査会でのプレゼンテーションや就職後の営業業務等で必要な資料作成のことを念頭に置くと、一流の研究者が世界トップの論文集に投稿する（学生さんと一緒に研究した成果をまとめたものもちろん含むが）論文とは若干違う性質を、卒論や修論は持っていないでもいいようにも思えるのだが、どうだろう。もちろん、研究室内の意見もすべて「起承転結の転は科学論文には不適切」ではあったが、以下の例のようなことには賛同を得た。

ときどき査読の依頼があるが、もちろん、そのテーマに精通しているとは限らない論文も回ってくる。ある程度の許容範囲で最大限引き受けないといけないのだが、自分の研究テーマから遠い論文の場合、どうしても読み易さが論文の価値を左右してしまうことは避けられない。もちろん小説と同じとまでは決して言うつもりはないが、「読み物」として論文に接する機会も多いのである。初めてその分野の勉強をする学生さんにとっても、最初は論文には「読み物」としてしか接することができないのではないだろうか。

表1 要因と効果

要因	基本	改訂	効果	有り	さらに有り	無し
A	A_{BASIC}	A_{MOD}	要因 A	A_{BASIC}	A_{MOD}	—
B	B_{BASIC}	B_{MOD}	要因 B	B_{BASIC}	B_{MOD}	—
B'	B'_{BASIC}	B'_{MOD}	要因 B'	B'_{BASIC}	—	B'_{MOD}

例えば、ある要因が与える影響・効果を説明する場面を想定しよう。表1に示したように、要因Aの基本は効果があり、その改訂ではさらに高い効果を示すのと同様、要因Bも基本と改訂で要因Aと同じような効果を及ぼすものとしよう。この要因Bがこの研究の目玉で斬新な提案だとしよう。ただし要因Bに対し、その基本部分に若干の違いのあるB'の場合は、基本は他と同様の効果があるのに対し、改訂ではその効果が逆にほとんど無くなるものとしよう。そして、この順番に研究も実施されてきたもの（指導教員には先見の明があつて、とても緻密に予め設計された羨ましい研究⁴だ）とする。これを説明するのに、 $A \rightarrow B \rightarrow B'$ の順に淡々と

要因A基本 A_{BASIC} は○・・・、それはこういう理由から。そこで要因Aを△の考え方で改訂してみると、よく知られているように、その A_{MOD} の結果はさらに○・・・だった。それはそういう理由から。

これに対し、要因Aと▽の部分若干異なる要因B基本 B_{BASIC} の場合にも○・・・、それはああいう理由から。しかもこの要因Bも、要因Aと同じような改訂をした場合にはさらに効果があり○・・・、それは▽が・・・という理由から。

そこで要因Bの◎の部分若干抑えた要因B'の効果を検討してみると、基本 B'_{BASIC} は○・・・であるものの、それを△の考え方で改訂した B'_{MOD} はほとんど効果が無く×・・・になる。つまり、▽と◎のこういった非線形関係から、そういった理由が成り立つからだ。総合すると、ああいうことが成立する。

と表現したとき、実際の研究の順番とはBとB'を入れ替えて、かつ表の順番も $A \rightarrow B' \rightarrow B$ にした上で

⁴ FermiがFanoにした研究指導の逸話はとても興味深い、実際は教員側も紆余曲折だよ。学生さんと一緒に悩むのも楽しい。

要因 A 基本 A_{BASIC} は $\circ \dots$, それはこういう理由から。そこで要因 A を Δ の考え方で改訂してみると, よく知られているように, その A_{MOD} の結果はさらに $\circ \dots$ だった。それはそういう理由から。

これに対し, 要因 A と $\nabla \odot$ の部分が若干異なる要因 B' 基本 B'_{BASIC} の場合にも $\circ \dots$, それはどういう理由から。しかしこの要因 B' の場合, Δ の考え方で改訂してしまうと, これまでの定説とは異なり B'_{MOD} はほとんど効果が無く $\times \dots$ 。このことから, ∇ と \odot のああいっただ非線形関係が結果に影響を及ぼしているのではないかと推測できる。

そこで要因 B' の \odot の部分を若干増幅させた要因 B の効果を検討してみると, 基本 B_{BASIC} はもちろん $\circ \dots$ で, 改訂 B_{MOD} は要因 A と同様の高い効果が得られ $\circ \dots$ 。このことから, ∇ と \odot のこういった関係から, そういった理由が成り立つからだと結論付けられる。総合すると, ああいうことが成立する。

にしたとき, どっちが読み易いだろう。個人差はあるとは思いますが, 原因や理由を印象深く説得するには後者の方が読み手にはよさそうには感じないだろうか。ただし, 論文概要の論理は一直線であるべきで簡潔に

要因 B は, これまで検討されてきた要因 A と同様の効果が確認でき, 特に ∇ の有無の影響が少ないことが確認できたが, Δ の考え方で改訂する場合には非線形的な影響が現れ, \odot の増幅が効果をさらに高めるといふ新しい知見を, 実験的に得た。

のようにすべきであろう。

またプレゼンテーションの場合には, この例のような弱い「転」は聴衆の理解を高める効果があり得ると思う。聴衆も「あれっ? どうしてだろう?」と引き込まれるかもしれない。特に土木系の卒論や修論の発表会の場合は, 土木学会の 7 部門のどこかを主専門とする教員や学生が, その部門を越えて集まり審査員や聴衆になることが多いから, わかり易い発表という観点からは「文学的にスリリングな」順番の説明が説得力を強める可能性もある。ただ最終的な専門部門に投稿する論文の場合, 遊びのような「転」は避けるべきであろうが, 読み易さという観点からの弱い「転」の利用は, ある程度は許容できるのではないだろうか。よく「他力本願」という言葉を本来の意味⁵ではなく間違っ使用人が多い。というよりも, そっちの方が多くて, 今や元の意味を知っている人はほとんどいない⁶のではないか。それと同様, あちこちの論文の書き方のコメントにある「起承転結」も, そもそも漢詩の定義とはかけ離れた意味で用いられているようにも推測されるのだが, ちょっと擁護し過ぎかな。

2 論文の執筆要領

2.1 文章のスタイルと章建て

卒業論文・修士論文執筆では版下原稿を作することを目的とはしていないため, A4 サイズの用紙に, 上下左右に十分なマージンをとった上で, 英文で言うところのダブルスペース程度で, 例えば二バイト (全角) 文字 40 字が 24 行程度で, 用紙片面に書くこととする。ページ番号は, 表紙から目次の最後までの前文ではローマ数字で i から振る。本文は第 1 章から最後までをアラビア数字で振る。前文のページ番号の配置は, 表紙を i とするが表示しないものとし, それ以降は下マージン中央あるいは上マージン右に置く。本文のページ番号は,

⁵ 第 1 著者も, 笠原一男先生の授業を受けていなかったら, 最近になって家のお坊様からもらった冊子を読むまでは知らなかっただろう。

⁶ 研究室で学生によく質問するのは, 「袖すりあう (振りあうが正しいとする説あり) もタシヨウの縁」「情けは人のタメナラズ」のカタカナ部分の漢字や意味である。ほぼ 100% が知らない。実はこの言葉そのものを, ほとんどの学生が聞いたことがないらしい。

章タイトルのあるページは必ず下マージンの中央とし、それ以外のページは下マージン中央あるいは上マージン右とする。

前文には、表紙の次に、修士論文の場合でもし必要なら審査員のリストを置くことができ、その次には論文概要を書く。論文概要はまえがきではなく、章構成の説明文でもない。そこには、論文の目的から結論に至るまでの論理的な流れが容易に理解できるように書く。つまり、何が問題で、その対象をどうモデル化し、どういう観点からその問題解決を図ろうとしたか、そして得られた成果から主張できることは何か、についてを簡潔に述べ、審査員が概要のみを眺めて中身を容易に理解できるようにすべきである。2015年春以降の工学研究科では、修士論文と博士論文の概要は英語で執筆するようになったが、本専攻ではかなり前から、別紙概要に記す概要部分は英文指定となっている。もし謝辞を前文に置くなら、その次に挿入して、その後ろに目次を書く。目次の最後には、表・図・写真の目次を置くこともできる。

本文の第1章は、例えば「まえがき」あるいは「序論」等で始める。章は見出し番号を付して「1. まえがき」「2. モデル化」のようにする。あるいは「第1章 まえがき」のようにしてもいい。章の中の大きな節は両括弧の見出し番号を付して「(1) 解析対象」「(2) その数値モデル」のような土木学会方式を使うか、あるいは、「2.1 解析対象」「2.2 その数値モデル」のように章番号を付して使うかのいずれかとする。節の中には、もう一段小さい節（「項」）を設けることができる。土木学会方式を使う場合には「a) 構成モデル」「b) パラメータの定義」のようになるが、章番号を使った節見出し番号を用いる場合には「2.1.1 パラメータの定義」「2.1.2 その数値モデル」のようにする。それより小さい節を使ってはいけない。いずれの場合も統一をとる必要があり、上述の2種類を混在させてはならない。

最終章は「おわりに」あるいは「結論」「結語」等とする。その後ろに、必要なら「補遺」あるいは「付録」を付けてもいい。巻末に「参考文献リスト」を置く場合には、「補遺」の後ろとする。また巻末に図表を並べる場合には、「参考文献リスト」の後ろに、表・図・写真の順で、それぞれを引用される順に通して並べる。謝辞を前文に置かない場合には、本文の最終ページの次に、ページ番号を振らずに置く。国際誌への投稿原稿のほとんどは、「前文」「本文」「付録」「参考文献」「表・図・写真のキャプション一覧」「表」「図」「写真」の順番であり、上述の各オプションのうち、「参考文献」「表・図・写真」は巻末にまとめる方式が多いので、これを原則としたい。前文から本文の最後までまでのページ構成を表2にまとめた。

表2 ページの構成

前文: 論文の付随的な情報のページ群	n 第2章
i 表紙: ページ番号は表示しない。	n+u 【章末選択オプション】参考文献リスト
ii 【オプション】修士論文の場合には審査員リストを置いてもいい。	n+v 【章末選択オプション】表・図・写真
ii+p 論文概要を少なくとも2ページ。(p ≥ 0)	... 第3章・・・と順に続ける。
ii+q 【原則】謝辞	M 終章
ii+r 目次: オプションとして、表・図・写真目次を付けることも可。	M+x 【章末選択オプション】参考文献リスト
本文: 論文の本体	N 補遺
1 第1章	N+y 【原則】全参考文献リスト
1+s 【章末選択オプション】参考文献リスト	N+z 【原則】全表・図・写真
1+t 【章末選択オプション】表・図・写真	- 【巻末選択オプション】謝辞: ページ番号は振らない。

2.2 フォント等

文章は横組みとし、「です」「ます」調ではなく、この文書のような「だ」「である」調で結ぶ。句読点に相当する区切り記号は、土木学会方式なら「，」「。」を用いるが、文部科学省の横組み規則の「，」「。」を用いてもいい。ただしいずれも全角を用いる。もちろん、この2種類のうちの片方に統一しなければならない。横組みには読点「、」は用いない。全角のフォントは、組版の伝統を破る「MS明朝P」等は使わず、「MS明朝」等を用いる。それは、区切り文字に「MS明朝P」や半角を使った場合には、「横組み句読点の全角ドリ」の規則が守られず、詰まってしまって読み難くなるからである。

英数字は、章番号や年号等も含めてすべて1バイト（半角）文字で書く。そのフォントも「MS明朝」のような醜いものはやめ、「Times」等の適切な英数字フォントを用いる。半角のコンマとピリオドは、英数字間および英数字の末尾にのみ許容される。その際、コンマとピリオドは前の英数字に密着させ、コンマ・ピリオドの次には半角のスペースを必ず置く。この「密着」と「スペース配置」のルールは、他の半角区切り文字のコロンやセミコロン等でも同様である。中等教育で習っているはずなのに、最近守らない学生が多い。

【すべて間違い】 ‘pen ,pencil,knife , eraser and …’ 【正しくは】 ‘pen, pencil, knife, eraser …’

【すべて間違い】 「鉛筆と,紙を ,箱に ,一緒に …」 【正しくは】 「鉛筆と, 紙を, 箱に, …」

ところで、コロンを箇条書きの見出し記号として使う者もいるが、行頭には区切り文字（いわゆる約物と呼ばれる文字類）は持ってこないことになっているから、あまり好ましくない。

間違った例

: このように行頭にコロンが来ることはない。

正しい例:

その代わり、コロンは前行の最後に位置する。

また、英語の場合の引用符は区切り文字までを囲むことになっており、例えば“stimulus and response,” になる。区切り文字と同様、引用符始めは次の文字列と、引用符終わりは前の文字列と密着させ、スペースを入れない。なお“”の記号は引用符ではなく「インチ記号」なので使わない。また引用記号は、必ず引用始めと終わりを区別した上で対にして

間違った例: 半角: ‘abc’, “def”, 全角: ‘ ほげ’ , ‘ほげ’ , ” うほ大” , ”うほ大”

正しい例: ‘abc’, “def”, ‘ほげ’ , “うほ大”

のように用いる。

数式の記号は通常は斜体を使うのが普通であるので、それに相応しいフォントで書き、文章中や図表中でその記号を用いる場合にも、誤解が生じないように、式中で用いたフォントと全く同じか、あるいは非常によく似たフォントを用いる必要がある。ただし、単位にはローマンを使う。つまり $p = 50 \text{ N/mm}^2$ のようになる。

「°C」「%」以外の単位と数値の間には四分程度の空きを入れる。また単位の接頭語のMN, GN等の‘M’や‘G’は大文字であるが、キロ(10^3 は‘k’, $2^{10} = 1024$ の場合‘K’とすることがある)より小さい倍数の接頭語は小文字であることに注意する。

間違った例: $p = 40 \text{ N/mm}^2, q = 5 \text{ gN}$ (これは「グラムニュートン?」になる), $r = 7 \text{ Kg}, s = 9 \text{ KG}$

章や節見出しをゴシック（太字⁷）で書くのは構わないが、本文中に明朝とローマンおよび数式フォント以外のフォントを用いるのは原則禁止とする。また下線等の使用も禁止する。半角のカタカナ「ダメ」や全角1文字

⁷ フォントを持たない古いプリンタの時代によく用いられた「強調文字」、例えば「明朝の強調文字」も醜いので使用しない。

の「㎡」「㎥」等は元々は機種依存の特殊文字で醜いフォントなので、図表中やスライドの中であっても使用すべきではない。

2.3 式番号や図表の番号と配置

式は出現順に、図表は引用する順に、次のいずれかの方法で通し番号を振る。これも混在させてはいけない。

- 論文全体を通して定義し、式は(1)(2)とし、例えば図の場合は、図-1、図-2のようにする。
- 章毎に通しで定義し、二章の式なら(2.1)(2.2)とし、例えば図の場合は、図-2.1、図-2.2のようにする。

番号に章番号を用いる場合、中のピリオドはハイフンでもいい。また「図」の次をハイフンにするかどうかも任意とする。図表や写真には、上記の引用番号と一緒に、中身を適切に示すキャプションを付さなければならない。表のキャプションは表の上に、図と写真のキャプションは図・写真の下に配置する。

図表の配置は

- 原則として、論文巻末に順に並べて置くのが望ましいが、
- 章毎に通しで番号を振る場合には、章末に順に並べてもいい

こととし、引用しているページ付近にレイアウトすることはしない。土木学会関係の論文集のようにレイアウトして版下を作る場合には、A4サイズのできあがりサイズで文章そのものを組むことが求められているために、図表をレイアウトしても見通しが悪くならないが、卒業論文のような場合には、論文草稿のスタイルをとり、行間隔を広くして執筆しているため、図表を文章途中に挿入すると読む側の見通しが悪く⁸なる。そのため、文章途中ではなく、巻末あるいは章末にまとめることとする。第1著者は修士論文だけでなく海外から依頼される査読論文を読むとき、とじた図表のページだけを本文から取り外して机の上に置き、文章と図表を同時に眺められるようにして読んでいる。下手にレイアウトされた原稿よりはるかに読み易い。

図表や写真がA4横長向きになる場合には、「左綴じ上綴じ」の原則を守るようにする。すなわち、図表や写真を正しい向きに見えるように置いた場合に、その綴じ代が左か上に来るように綴じるのが必須である。これは用紙サイズがA3になって折り込む場合等も同様である。

2.4 参考文献の引用とリスト

(1) 原則

論文で最も重要なものの一つが「参考文献リスト」である。参考文献リストは、巻末にまとめるか、あるいは章末に置いてもいい。通常、図表を章末に置く場合には、その章の最後の節の次に参考文献リストを置き、その後ろに図表を並べる。そうでない場合は、参考文献リストは巻末にまとめるのが望ましい。

本文中で著者名を用いて引用する場合には、著者が2名以下の場合にはすべての著者名を書いた上で引用する必要があるが、3名以上の場合には、「第1著者名ら」「First-Author et al.」として引用してもいい。ただし、文献リストでの著者名の省略は許されないし、「著者中の大物の名前ら」で引用することも許されない。また、文献リストにある「4) 鈴木・山田」の論文と「7) 鈴木・熊谷・佐藤」の論文で、たとえ両方の鈴木が同一人物だったとしても、「鈴木ら⁴⁾⁷⁾」と引用することは許されない。この場合は別々に引用するか、「文献⁴⁾⁷⁾」のようにする。

⁸ よく経験したのは、ある文章のページの次に10枚くらいの図が挿入され、続く文章がその次に1枚入ったあと、またさらに20枚くらいの図が配置されるという状況が続くもの。文章を読む審査員は、続きの文がどこにあるのか探すのに手間がかかり、内容を理解し難い。

文献リストには、著者名・論文名・論文集名・巻・開始ページと最終ページ・発行年をすべて含め、審査員や読者がその文献を間違い無く探し出すことができるようにする。地盤工学会の‘Soils and Foundations’のように、同じ巻の異なる号ですべて第1ページから始まるような場合には、巻の次に号を書く必要があるが、同じ巻では通しでページが振られている多くの論文集の場合は号を原則書かない。また発行月も原則不要とし、付ける場合にはリストにあるすべての文献に付ける。著書の場合は、著者名・著書題目・必要なら引用部分のページ番号・出版社名・発行年を書く。欧米語の論文集名と著書題目はイタリックにすることを原則とする。また、欧米語の論文題目は最初の単語の1文字目だけを大文字とし、固有名詞以外の最初の文字は小文字とする。もちろんドイツ語やフランス語等の大文字の使い方の方が優先する。一方、欧米語の著書名の主な単語の最初の文字は大文字にする。また論文集名を略称にする場合には、リストすべての文献のそれを略称にしなければならない。同様に、略さない場合には、すべての文献で略さない。引用の仕方と各文献リスト内の項目の順番は、次の二つの節で示す方式のいずれか片方に統一する。

(2) 土木学会方式

参考文献には、本文で引用した順に1から番号を付ける。引用する場合には

これこれの手法については文献¹⁾に詳しいが、南野²⁾は次のようにも・・・

のようにする。この場合、文献リストは

参考文献

- 1) 山田太郎, 鈴木次郎: 題目はこれこれ。〇〇国際シンポジウム, 佐藤三郎編, シンポジウム題目あるいはその出版物題目, pp.101-120, 1999.
- 2) 南野何某: 題目はこれこれ。土木学会論文集, No.123/I-50, pp.51-60, 2005.
- 3) Chen, T., Dvorak, G.J. and Doe, J.: MT estimates of the overall elastic moduli, *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, Vol.59, pp.539-546, 1992.
- 4) Foo, J., Boo, K. and Woo, M.: Structural prediction of our future, *Soils Foundations*, Vol.123, No.3, pp.51-60, 2002.
- 5) Nemat-Nasser, S. and Hori, M.: *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*, North-Holland, 1993.

のようになる。最近の国際誌での著書リストでは、出版社所在地は略すようなので、ここでも略した。章末に文献リストを置く場合、番号に章番号を付ける必要はないが、他の章の文献を引用してはならない。つまり、章末に文献リストを置く場合、同じ文献を複数の章で引用していたとしても、それはそのいずれの章のリストにも重複して並べられていなければならない。

(3) 国際論文集の代表的な方式

例えば Harvard スタイル等 (T_EX の場合の ‘natbib.sty’ の利用) の場合を参考にして、論文リストには著者のアルファベット順に並べる。引用する場合には

これこれの手法については Foo et al.(2002) が詳しく述べているが、ここで用いているパラメータは実験 (Chen and Dvorak, 1992; 山田, 鈴木, 1999b) によったものである

のようにする。この場合の文献リストは、例えば

参考文献

Chen, T. and Dvorak, G.J., 1992. MT estimates of the overall elastic moduli. *J. Appl. Mech. Trans. ASME* 59, 539-546.

Foo, J., Boo, K. and Woo, M., 2002. Structural prediction of our future, *Soils Foundations* 123 (3), 51-60.

Nemat-Nasser, S. and Hori, M., 1993. *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*. North-Holland.

山田太郎, 鈴木次郎, 1999a. 題目はこれこれ. ○○国際シンポジウム, 佐藤三郎編, シンポジウム題目あるいはその出版物題目, 101-120.

山田太郎, 鈴木次郎, 1999b. 違う題目. ○△論文集, 51, 1215-1230.

のようになる。同一著者による同一出版年の文献が複数ある場合の表示の区別には注意する。また巻号の号が必要な場合は括弧書きになる。著者欄の‘and’を省略することもあるようだが、ここでは残した。上の順番は言語によらず著者のローマ字表示でのアルファベット順にしたが、例えば、非日本語の論文をアルファベット順にまず並べたあとに、日本語論文を五十音順に並べてもいい。また著者名が名・姓の順番になる論文集もあるので注意する。

2.5 図の描き方と著作権

最近では論文の公開 pdf ファイルから直接、あるいはスキャナですぐに他人の図表をファイルに取り込めるため、その図表の作成者に断りなく論文にそのままを使う人がいて困っている。プレゼンテーションで使う程度ならまだ許容される（望ましくはない）だろうが、印刷物に他人の作成した図を許諾なく用いるのは許容されない。必ず、論文提出の前日までに、指導教員を通したメール連絡でいいから、著者の許諾を受けておき、図2のキャプションに例示したように、許諾のことを明記する。実験装置のマニュアル等にある図も同様である。もし許諾が得られない場合には、必ず、自ら描きなおす必要がある。そのときも、複製したい図とできるだけ似ないようにする必要がある。ほとんどすべての図と写真については、作成者・撮影者がその著作権を有していると考えて欲しい。ただし、公開されている地震波等はこれには当たらない。

きちんとした出版社によって発行されている雑誌では、投稿された図表を出版社自身が加工して、より鮮明になるような作業をすることがある。そのため、図表はできるだけ大きめの（解像度の高い）図になっていることが望ましい。したがって、できるだけ太い線を用いて、A4サイズ用の紙に図が1枚ないし4枚程度までになるような作図をして欲しい。つまり図は、ソフトウェアの出力に工夫を加えずにデフォルトのまま使うことはしないようにして欲しい。常に、以下に示すような留意点を考えながら作図する必要がある。また上下左右のマージンは本文のそれと同等にし、すべてのページにページ番号を振る。

まず、図の枠線あるいは座標線を0.2 mm程度の細い線で描くこととする。そして、この図を引用している文章の説明中で最も重要な研究結果を示す線を、最も太い実線で描く。太さは0.8 mm程度が望ましい。これと比較する重要な情報は、同じ太さの破線や点線・一点鎖線等で描く。それよりも重要度の低いものは、中間の太さ0.4 mm程度の線で描く。参考程度の情報は0.2 mm程度の細い線で描けばいい（図1参照）。このように、最低でも3種類の太さの線を使い分ける必要がある。これで12種類のデータを一つの図に、モノクロであっても区別して描くことができる。それ以上の種類のデータを、たとえカラーにして同じ図に並べたとして

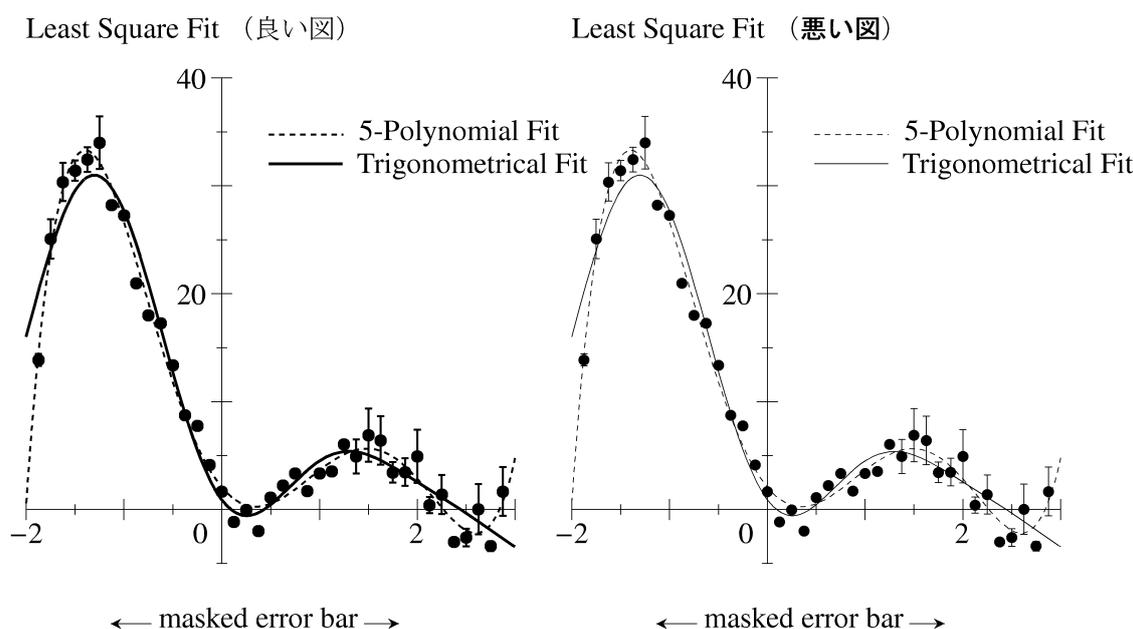


図1 左が適切な太さのバランスを使った良い図で右はすべて同じ太さの悪い図

も、それで中身の理解が深まるとはとうてい思えない。10種類以上の情報を比較する場合には、着目する観点毎に選択されたデータのみを複数の図に分けて説明する方が説得力はあるだろう。プレゼンテーションではカラー化することは効果的であるが、カラーにするのは、上記の実線・破線・点線等の区別に相当するものと考えて欲しい。カラーの線でも太さを使い分ける等、注意して欲しい。太さを設定できないソフトウェアは捨てましょう。図そのものの作成については文献[3]も非常に参考になる。

最後に、言語のことに触れておきたい。図1は、図中の文字は英語になっているが、これは一つの例として示したものである。土木学会論文集では、英語の論文は英語で、日本語の論文は日本語で図表(表も)を作成することになっている。昔、製図機器で描画していたときは、日本語を清書する器具が無かったことや、墨入れの手間とあとで国際論文集に投稿することを考えて、英語の文字プレートを使って清書していたため、図中の文字列にはほとんど英語を用いていた。今は、どんなソフトウェアでも日本語で入力できるだろうから、手間を惜みず、日本語の論文には日本語の図表を入れるようにして欲しい。指導教員がどうしても英語でという指示があったときには英語でも構わないが、一言「先生、そんな横着しなくても、国際誌に出すときはまた書き直してあげますよ。」と言ってみたら⁹どうだろう。

3 審査会でのプレゼンテーション

3.1 スライド作成についての技術的なヒント

近年、プレゼンテーション用のソフトウェアが充実し、見やすいスライドが増えてきてはいるが、それでも自己満足で独りよがりのスライドも散見される。発表する本人は中身を十分に理解しているから、小さい字でたくさんの情報が書かれていても、また論文中で用いた記号で各種設定を区別してあっても、何も問題を感じないだろう。しかし、指導教員以外の先生や、少し分野の違う教員にとっては、全く理解の足しになるスライドにはなっていないことが多い。スライド作成に当たっては、最終審査会に参加すると予想される教員の中で、

⁹ 心の中では「そのくらい先生自分でできるでしょ。」と思いながら、描画用のデータファイルをそっと渡せばいいんです。

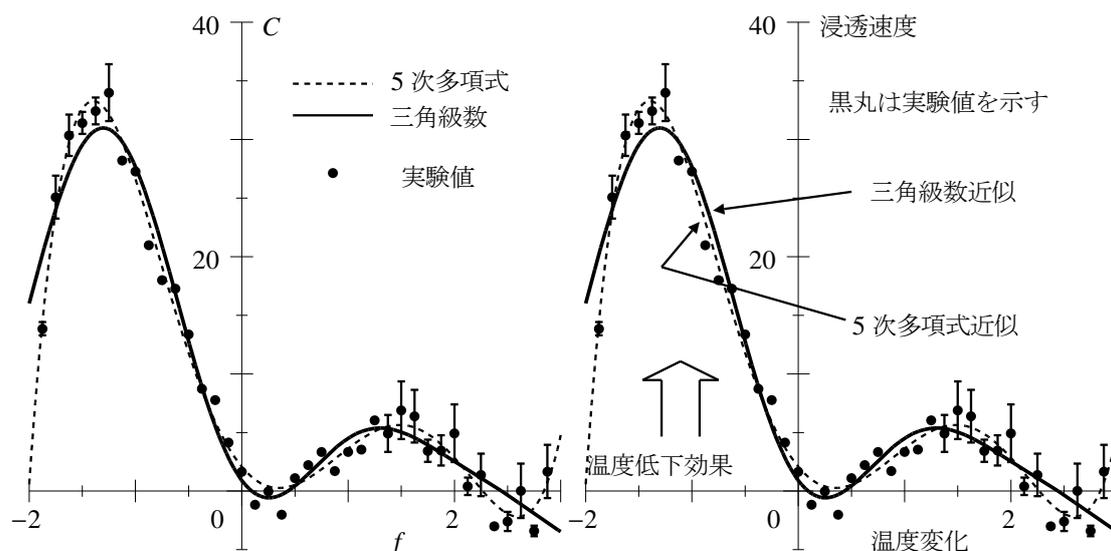


図2 左を論文中の図としたとき、右が発表の場合に表示する図；左図は文献²⁾の著者から使用許諾を得た(2005/7/7 メール)

最も専門分野が異なる先生に説明する状況を念頭に置くのが望ましい。

- スライドの内容は骨子であり、必要なキーワードがすべて表示されていなければならない。発表は、その表示されているキーワードを用いて行う。書かれていないことはしゃべらない。説明すべきことのキーワードはすべて書いておく。
- 話し言葉で話す。普段使いもしない漢語や丁寧語も使わない。説明することを暗記しない。自然と話したいことを思い出せるように、スライドに示すキーワードを選ぶ。
- すべての発表スライドには、順にページ番号を振る。できれば全ページ数 n を含めて m/n の形で表示する。
- 一つのスライドには、文章でその量を表現するなら、10行を越えないくらいに留める。あるいは発表時間で表すと1分程度の量が適切である。それ以上の量になると早口にならざるを得なくなったり、スクリーンに示される文字サイズが必然的に小さくなり、これも審査員の理解を妨げる。フォントは18ポイント相当以上¹⁰⁾のように、大きめのサイズを選ぶ必要がある。多分すべてゴシックが望ましい。
- したがって総ページ数は、発表時間(分)と同じ程度にするのが望ましい。1ページに1分くらいは使わないと、真意は正しくは伝わらない。9分の卒業論文発表なら8ページ程度(まだ素人だから)、15分の修士論文発表なら15～18ページ程度が適切と考えて欲しい。
- そうなると、特に発表時間が短い卒業論文の場合には、人によっては得られた結果全部を発表することは不可能かもしれない。その場合には、一番大事なことを中心にして、時間内に審査員が理解し易い内容に限定してスライドを構成し、それ以外の結果等はスライドの付録に載せておけばいい。もしかすると質問時間に使えるかもしれないからである。
- また講演会ではなく審査会であることから、今後の課題等は発表しない。審査会では君がやったことを聞くのであって、やらなかったことや後輩がやるだろうことは聞きたくない。

¹⁰⁾ 英数字のポイントの数値は括弧の記号「C」の高さを規定しているため、実際の文字の高さはその数値のサイズより小さい。したがって、それとバランスする漢字のサイズは、英数字のサイズ指定値とは若干異なってくる。正確ではないが、例えば12ポイントで英数字を表現する場合には、英数字そのもの高さは11ポイント程度になるため、漢字のサイズは11ポイントに設定しないと、英数字よりも漢字が大きく見えたり、基底がずれたりしてバランスが悪くなる。漢字の活字サイズは元々「級」で定義されていた。

表3 左を論文中の表としたとき、右が発表の場合に表示する表

ケース	α	β
A	1.23	20.3
B	2.34	12.3

剛度 (λ)	〇〇量 (α)	Δ ■指標 (β)
剛 (5)	1.23	20.3 (不経済)
柔 (1)	2.34 (危険性大)	12.3

- 図や表に、論文に含めたものと全く同じものを用いた場合には、審査員の理解が浅くなる可能性があるので注意する。例えば図の場合のヒントを図2に示したが、略語等を使わずに、意図することが文字で表示されているのが望ましい。凡例も理解を遅らせるので避けるべきである。審査員は結局1分たらずで図の中身を理解しなければならないため、理想的には「一つの図で一つの結論を」という『暮らしの手帖方式』が望ましいので、極力そのように努力する。また表の場合も表3にヒントを示した。
- ポスターや漫画ではないので、内容と関係のない模様や動画・挿絵を用いる必要は無い。あっても、最初のインパクトだけがあって、内容の理解には何ら助けにはならない。また、原則として黒い文字を使い、背景を暗くし過ぎないようにする等、文字の色とのコントラストに注意してページをデザインする。特に背景に色を付けたい場合には、文字の色の選択には注意する。
- 大学ロゴは、その目的が論文審査とは無関係なので付けない。社会人学生が所属する会社ロゴ等を付すことを禁止はしないが、本来は論文審査には無関係の情報であるので自粛して欲しい。
- また、ワイドショーのプレゼンテーションではないので、アニメーションも極力避ける。つまり、1ページの中を区分けして段階的に表示することはせず、説明すべき全ページを表示しておく。審査員の読む速度・理解する速度は個々に異なるので、発表者の時間配分を聴衆には強制しない方がいいからである。よく遭遇するとんでもない状況は次のようなものである。1ページを3段階で説明しながら、最後に開けて見せる重要な結論が1行だった場合に、その大切な結論が表示され審査員が読み始めた途端に次のページに表示が切り替わるのである。理解の妨げにしかかっていない。また、タイマーを使って表示をコントロールすることは絶対にやめるべきで、発表本番中の説明の速度に合わせてその場でページをめくる。
- 直接論文発表とは関係はないが、最近のプレゼンテーション文化に変なところがあるので注意する。上述のようにスライドの中身は骨子とキーワードに過ぎない。口頭で説明を加えることによって始めて完結する情報発信が、プレゼンテーションの目的である。したがって、口頭の説明を聞かずにスライドのコピーだけを読んだ場合には、実はその内容は正しくは伝わらないのが当然であって、それでもそのスライドの価値は下がらないのである。逆に、スライドのコピーが講演資料として配付された場合には、そのスライドの各ページには情報量がとても多過ぎる等、不適切な設定になっている可能性がある。したがって、スライドのコピー配付は禁止する。資料を配付するなら、それにはスライドとは別に、もっと詳細がきちんとした文章で書かれていなければ意味が無い。そのため第1著者が所属している教室では、卒業論文と修士論文の発表の理解に役立つように、2ページないし4ページの概要を事前に提出することになっている。

3.2 発表と質疑応答でのマナー

(1) 発表する側のマナー

ここに記載するマナーは、プレゼンテーションの目的が卒業・修了研修の最終審査であることを念頭に置いて設けたものであり、短い時間で効果的に学生の能力を判定するために設けられている。したがって学生は、尊大な態度で臨むことのないようにして欲しい。前の人の発表が終わってからゆっくりと椅子から立ち上がり、スクリーンの前で準備を始め、タイマーが動き始めて司会が「どうぞ」と言ったにもかかわらず、まだ発表を始めない学生がときどきいるが、とても困った人、つまり卒業・修了の対象にはならない学生だと判断される。

- 前の発表者への質疑が始まったら、発表演台の横で待機する。
- 前の発表者の質疑応答がすべて終わったら、すぐにスクリーンにスライドの最初のページを映写する準備を始め、表示されたら発表を始める。司会が制止しない限り、これで発表は始まる。
- 発表は「させてもらう」のではなく、審査のためにしなければならないことなので、所属研究室名と氏名・題目を述べて「発表します」と宣言する。
- 前節にも書いたが、普段使いもしない漢語のようなわかり難い言葉を使わない。逆に「微妙」等のように、教員と学生でその定義が異なる話し言葉はもちろん、指導教員および同じ専門分野の中でしか通じないような略語、例えば材料力学分野の一部の人だけに通じる「RVE」や、一般に知られている略語であっても敢えて略す必要のない「B [by]over C」等は使わないで、誰もが耳で聞いて理解できる言葉で話す。
- すべての図は、縦軸と横軸が何であるのかまず簡潔に説明する。ただし、後続する同様の図の場合には省略できる。
- 可能な限り指し棒（レーザーポインタ¹¹は駄目 [1]）使い、先端をスクリーン上の指示箇所にあてるか、横棒にして式を指定する等する。次のスライドに変えるときには、スクリーンとコンピュータの間を歩きながら次のスライドにつながる適切な説明を述べるのが望ましい。ちょうど論文中に適切な接続詞が必要だったのと同じ理由である。
- 所定の時間が来て発表の終了ベルが鳴った段階で、いかなる状況に（あと一行読めばいいだけで）あっても発表をすぐに止め、結論を示したページをスクリーンにフルサイズで表示した上で、「発表を終わります」と宣言する。ベルを無視して発表を続けることは許されない。決められた時間内に十分な説明ができないのは、そもそも発表が失敗してしまっているわけであるし、ベルを無視するとさらに最も悪い印象を与える。また、心にも無い言葉「ご清聴有難うございます」等の発言は必要ではないし、最後のスライドに‘Thank you’等と書かない。いずれも、一般社会人不特定多数を対象とした講演¹²で使うものであって、審査会には不要の文言である。

¹¹ これを開発している人は指し棒の機能がわかっているのだろうか。どうして「点」あるいは「○」なのだろう。第1著者は文献 [1] の著者と同様、使いたくない。指し棒は先端のみならず、そこにつながる棒の存在が視線の誘導をしている。その棒の部分が無いのであるから機能としては指し棒に劣るわけだ。また注意を引くには点対称ではない方がいいと思うので楕円の映像はやや優れていると感じるが、視線をもっと誘導するような大きさで点対称ではない映像を投射するアイデアは無いのだろうか。例えば、スクリーン上のサイズで5 cm以上の長さで太さが1 cm程度の水平線あるいは波線の方が優れていると予想するがどうだろう。dviout for Windowsのスライドモードでは箱や線が引けるので、とてもいいと思う。と書いていたら、スクリーン上に線を描けるシステムが市販されていた。とても便利だが高価だ。

¹² 学会全国大会等の研究発表会でも使う必要はない。

- 質問者がスライドのページを指定した場合には、すぐに対応して（たいていは矢印キーでページ移動ができるし、ソフトウェアによっては‘p[revious]’や‘n[ext]’を押せばフルサイズのまま戻ったり次のページに移動できる）、これもフルサイズで画面表示をしたまま、質問に答える。いわゆる「スライドショー」の状態、つまり画面全体に1ページが表示されたままで、質疑には答えるべきである。
- 質問された言葉を復唱しないで、答をすぐに言う。「わかりません」「知りません」は禁句である。何か答える。質問には質問しない。ただし、本当に知らない「知識」を聞かれたときは「それは知りません」と即答すること。
- また質問事項を「今後の課題にします」という答は、思考を停止してしまったのか、あるいは自分の考察が不十分だったことを誤魔化しているような悪い印象を与える。「それは検討しませんでした」と正直に言えばいい。実際ちょっとでも検討したのであれば、「その段階に行くには〇〇が必要だと思ったから私は深くは検討しませんでした。」といった内容のあるコメントを述べるべきである。
- 答は質問の要点に対してだけ簡潔に述べ、ダラダラと関連事項や周辺事情を説明しない。要点がまとめられないということは、理解が浅いということを宣言しているだけである。
- 質問の意味がわからない時は「質問の意味がわかりません」と言う。声が聞こえない時は「聞こえません」と言う。
- 答えている最中に質問者が制止した場合は、質問と異なることに答えているのだから、すぐに発言を止め、再度質問者の言葉に耳を傾ける。
- 先入観を持たないようにすることが重要だ。特に想定質問の抽出等に無駄な時間を費やし過ぎたときに、この先入観で大失敗をすることがある。

(2) 質問する側のマナー

これは論文の審査会であって、研究打ち合わせや中間発表ではないから、教員からのコメントは原則として禁止する。もし興味を持った論文の発表者にコメントを与えたい場合には、休み時間にすればいい。時間が限られているので、次のような質問の仕方とする。

- 司会は、開始のベルと発表終了のベルだけは厳守させ、発表終了ベルでは必ず発表を制止する。質疑応答も含めた最終のベルが鳴った場合には、そのベルが鳴る前に出された最後の質疑に対する満足な回答をもって終了とする。
- 質問者は挙手をし、司会者が指名した教員が質問をする。前の質問と関連する場合は「〇〇先生の質問に関連した質問」と発言する。
- 質問は一人1回で、卒業論文に対しては1問、修士論文の場合には2問以下とし、連続質問は禁止する。
- 質問はその要点を簡潔な言葉でし、意味の無い「たいへん興味深い研究だ」といった言葉や、背景あるいは自分の考えは述べない。スライドにはページ番号が振られているので、発表中にメモをとりながら、適切なスライドを迅速に表示するように指示した上で質問するのが望ましい。
- 学生の答が質問の意図とずれている場合には、すぐに学生の発言を制止し、別の表現で問い直す。言い直した質問に対する答もずれている場合には、再度学生の発言を制止し、「あ、じゃいいです。次の人の質問に移ってください」のように発言して、別の質問者に時間を譲る。

- 知識を問わない。「知らない」と答えられたら質問自体の意味が無くなる。時間の無駄。
- 前の人の質問への回答が終わったと思ったら、次の質問者はすぐに挙手する。司会は、回答が終わっているかどうかを判断して、適切な対処をする。
- 司会が質問を2回促しても質問が出ない場合にのみ、同一教員による2回目以降の質問ができる。
- 司会が質問を何回促しても質問が出ない場合にのみ、教員からのコメントを短く述べることができる。

なお、意味のある最終審査会にするためには、日本人の場合は日本語によるプレゼンテーション¹³と質疑応答にするべきである。

卒論生のとんでもない勘違い

先生は答・結果を知っている: まさか。宿題じゃないんだから決してそういうことはない。もちろん、先生の経験から、こんな内容の結論が出たらいいなあと思いつながりながらテーマが決められている場合が多いとは思いますが、そうなるかどうかはやってみないとわからない。卒論生が手を動かさない限り、答に近づく道は無いのである。

最初に指示された計算・実験の結果が出たらほぼ終わりだ: これもまさかである。その逆で、最初の結果が出たところが本当の「始まり」である。最初の結果は、その研修の方向を決めるための第一歩に過ぎない。それを見た上で次の計算や実験をどのようにすべきか考えるというプロセスが入る。最悪の場合は、テーマそのものの変更もある。これは教員のミスの場合もあるかもしれないが、新しいことをやる時には避けられないプロセスでもある。したがって、できるだけ早めに最初の結果を出すべきである。特に最近、最初の指示を2月までに済ませれば良いと勘違いしている学生が増えてきたような印象がある。

得た結果（実験ですら）は6桁で正しい: 高性能の計算機ですら、それは当てはまらない。世の中には「倍半分¹⁴の世界」というものも存在するこ

とを知るべきである。

変な結果を出す計算機は壊れている: 計算機ではなく、それに命令したプログラムやデータ、つまりはプログラムとデータを作った人間が間違っている。

論文は一週もあれば書くことができる: 結果がすべて揃っており、図表化も終わっている状態から論文を書き始めたとして、普通の教員であれば、論文の草稿ができるまでに約一ヶ月はかかるだろう。最初の一週間で粗っぽい草稿ができて数日休ま¹⁵せる。次の一週間で60～70%の出来の草稿を書き上げ、また数日休ませる。再度推敲をして、うまくいけば、ほぼ満足できる草稿になると考えて欲しい。このような論文執筆を生まれて初めて卒論生がやるのだから、二ヶ月はかかってもおかしくないと思えるべきである。

すべて二ヶ月もあれば終わる: 上述のようにそれは不可能である。教員でも無理。

最後は先生や先輩が助けてくれる: 十分な結果があればそれもあるかもしれないが、自分の手を動かさずして援助の手が差し延べられることはあり得ない。

¹³ 大学周辺で、「プレゼンテーション能力」という言葉が英語による発表能力と誤解されているように感じてならない。母国語で説得力のあるわかり易い発表ができることこそがその能力である。

¹⁴ インターネット上で紹介されている意味とは異なる使い方を我々はしているようだ。結果が2倍や半分でも誤差の範囲ってこともあるということを指している。

¹⁵ 書いた内容を一旦忘れると推敲がし易い。

ワードプロセサや描画・発表ソフトウェアは論文を書く段階・発表する段階で使い始めれば十分だ: 1月に卒論を書いている段階で、最近よくある例を挙げておく。教員が「この図のここは網掛けにして、ここにこういった挿画をなさい」と指示したとしても、網掛けの機能を先輩から聞きだして描けるようになるのに半日、挿画に至ってはその方法を教わるのは半日だが、描くのに一週かかる。締め切り日までにどうやって卒論を書き上げるつもりなんだろう。また本番の発表を始めた途端、違うスライドが表示されてそれを正しくできない、所定のスライドを表示するまでモタモタ¹⁶する。何のために夏休みがあったのか。

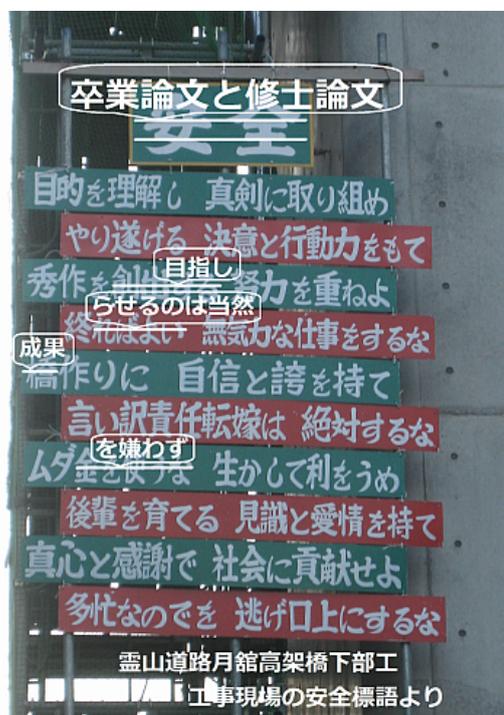
先生・先輩は常に正しいことを言っている: さて、場合によりけりである。推測を述べている場合もあるし、希望を述べている場合もある。また卒論生の質問の真意が通じていない状態での助言である可能性もある。本当に知りたいことが得られるまで、しつこく情報交換と意思の疎通をすべきである。とにかく、大学に来ること、週に複数回は教員と会って研修の進捗状況を報告することが大事。

卒論を提出したら卒業できる: 極力卒業させてあげたいが、それに値しない研修生活（大学に滅多に来ない、最初の指示の結果だけしか出ていない）しかできなかった学生を卒業させたいとは

思わないのも正直なところである。

卒論発表なんてちょろい: まさか。最初の練習で、卒論生が発表していることが理解できる先生・先輩はほぼ零であると思って欲しい。ただし、これは全員が経験すること。何を目的にしているのか、どういうアプローチなのか、何をしたいのか、何を言っているのかすらわからないというのが、最初の発表練習でもう何十年も続いている状況である。

橋梁下部工の工事現場の安全標語がとても面白かったのでそれをアレンジしてみた。



教員は自分自身の研修の経験と、これまでに出会った卒論生のパフォーマンスとに基づいて、テーマを示している。それを締め切りまでに完了できるかどうかは、実際にはわからない。まして卒論生は研修なんて初体験である。いつまでに何ができるかわからなくて当然だ。だからこそ早め早めの行動が重要である。とにかくまずは大学に毎日来てくれえー！

¹⁶ 本場に最近イライラすることが多い。ひどいのは、コンピュータの電源設定をいい加減にしたことから、スクリーンに表示されるのがログイン画面だったりする。

参考文献

- [1] 後藤文彦: 良いプレゼン悪いプレゼン わかりやすいプレゼンテーションのために, カットシステム, 2009.
- [2] 杉原厚吉: 理科系のための英文作法 文章をなめらかにつなぐ四つの法則, 中公新書, 1997.
- [3] 日本物理学会 編: 科学英語論文のすべて, 丸善, 1984.
- [4] 本多勝一: 日本語の作文技術, 朝日文庫, 1999.

索引

- | | | | |
|-------------|-------------|------------|-------------|
| アニメーション, 14 | コロソ, 8 | タイマー, 14 | 文献リスト, 4, 9 |
| 引用, 4 | コンマ, 8 | 単位, 8 | 文末表現, 8 |
| 引用符, 8 | 式番号, 9 | 単位の接頭語, 8 | ページ構成, 7 |
| 英数字, 8 | 謝辞, 7 | 単位前空白, 8 | ページ番号, 6 |
| 概要, 7 | 章節項, 2 | 段落, 3 | ページ番号位置, 6 |
| 下線, 8 | 審査員, 7 | 著作権, 11 | 勉強メモ, 3 |
| 括弧書き, 3 | 数学斜体, 8 | 著者ら, 9 | 補遺, 7 |
| カラー化, 12 | 図表の数, 3 | 読点, 8 | マージソ, 6 |
| 機種依存文字, 9 | 図表番号, 9 | 半角区切り文字, 8 | 見出し番号, 7 |
| 脚注, 3 | スライド配付, 14 | 半角フォソト, 8 | 文字数, 6 |
| キャプション, 9 | 接続詞, 3 | 左綴じ上綴じ, 9 | 予告編, 3 |
| 行数, 6 | セミコロソ, 8 | 備忘録, 4 | 横向き図表, 9 |
| 区切り文字, 8 | 全角フォソト, 8 | ピリオド, 8 | |
| 句点, 8 | 線の太さ, 11 | 付録, 3, 7 | |
| | 大学ロゴマーク, 14 | | |

論文と同時提出する概要サンプル

審査会におけるスムーズな質疑応答のために・・・

修士論文・卒業論文の概要作成マニュアル

Preparing Abstract Pages of Master and Graduation Theses

土木浩次*
Koji DOBOKU

*土木建設学研究室（指導教員：建設大作 准教授）

この文書には、論文概要の準備と提出の仕方を概説する。また、この書式は論文提出時に同時に提出する概要原稿に合わせてあるので参考にすること。

この概要集原稿の概要部分は左右に約 17mm ほどのマージンを入れ、本文との区別を明確にする。だいたい 5～6 行が限度である。本文の文章は簡潔に、しかしこの概要だけで自己簡潔し起承転結となるように努力する。

Key Words: 非保存系, 大変位, 有限要素, 変形の局所化

1. 論文の概要集原稿提出

修士論文あるいは卒業論文を提出する際には、この文書とほぼ同じ書式で書いた概要原稿を専攻長に提出する必要がある。卒論の場合は 2 頁を、修論の場合には 4 頁を論文と一緒に、専攻長から指示された方法で提出すること。用紙は A4 サイズとし、文書の幅は 169mm、高さ 251mm 程度にして、左右と上とに約 2cm のマージンがあり、下に約 2.5cm のマージンが取ってあるものとする。頁は二段組とし、一段に 25 文字を標準とし、頁は 50 行とするが、文字数・行数は少しくらい違っていてもよい。この書式は、おおよそ土木学会論文集に準じている。なお、概要原稿の締め切りは、専攻長への論文提出締め切り日とし、その後の差し替えは許されない。

第一頁目のヘッダーにはこの例にあるような情報を書き込む。卒業論文の場合は、左側が「卒業論文概要集 200? 年? 月」であり、右側は「うほ大学工学部土木工学科」（2007 年度からは「うほ大学工学部建築・社会環境工学科」）である。それ以下にはそれぞれ約 1 行の空白を開けて、「論文題目」「英文題目」「論文提出者名」「その英名」「所属研究室と指導教員名」「概要」「キーワード」の順に一段で組む。「概要」「キーワード」は、修論の場合には英語を用いることとする。また「指導教員名」は、書類上の教授である必要はなく、実際に主な指導をしてくださった先生の名前がよい。

本文はその約 2 行下から二段組にして論理的に並べ、最後の参考文献リストまで続ける。最終頁の左右の段の下端はできるだけ揃えること。文献リストの最後には「論文提出締切日」を明記する。この文章は概要なので、謝辞や補遺・付録は付けない。また、数式や図表は省略することなく示す必要があるが、最終発表の場で発表する最も重要な結論を述べるのに必要なだけの最小限に留め、文章も解りやすい構成および言葉で論理的に書くこと。

もし L^AT_EX を用いて概要原稿を書く場合には、別途 `ceabs-2e.sty` が用意してある。

<http://hashi4.civil.tohoku.ac.jp/~bear/soft/index-j.html#StyleFiles>

にあるのでダウンロードする。パッケージ中の `ceabs-2e.tex` がこの文書のソースであり、それをテンプレートにするとよい。最後の頁の段揃えには

```
\lastpagecontrol{18cm}
\lastpagesettings
```

のふたつが使える。前者のコマンドが最終頁左段文章中で定義されると、その頁の下に 18cm の空白を空けてくれる。後者のコマンドは最終行に置かれ、提出日付を出力する。その他の設定については、この文書ファイルのコメントを参照しながら入れれば、レイアウトやヘッダについては自動的に出力される。

謝辞: ありがとう

参考文献

- 1) ファン, Y. C. (大橋義夫・村上澄男・神谷紀生 共訳) : 固体の力学/理論, 培風館, 1970.
- 2) 山田邦夫: 2 相材料の平均弾塑性挙動の定性的把握とその定量化への発展性の限界, 土木学会論文集, 第 333 号/I-99, pp.123-234, 1991.
- 3) Hill, R.: A self-consistent mechanics of composite materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.13, pp.213-222, 1965.
- 4) Malvern, L.E.: *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice Hall, New Jersey 1969.

(2015 年 2 月 4 日 提出)

修士論文・卒業論文の概要作成マニュアル

Preparing Abstract Pages of Master and Graduation Theses

土木浩次*
Koji DOBOKU

*土木建設学研究室（指導教員：建設大作 准教授）

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress.

Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

Key Words: *Non-Conservative, Finite Element Method, Localization of Deformation*

1. 論文の概要集原稿提出

修士論文あるいは卒業論文を提出する際には、この文書とほぼ同じ書式で書いた概要原稿を専攻長に提出する必要がある。卒論の場合は 2 頁を、修論の場合には 4 頁を論文と一緒に、専攻長から指示された方法で提出すること。用紙は A4 サイズとし、文書の幅は 169mm、高さ 251mm 程度にして、左右と上とに約 2cm のマージンがあり、下に約 2.5cm のマージンが取ってあるものとする。頁は二段組とし、一段に 25 文字を標準とし、頁は 50 行とするが、文字数・行数は少しくらい違っていてもよい。この書式は、おおよそ土木学会論文集に準じている。なお、概要原稿の締め切りは、専攻長への論文提出締め切り日とし、その後の差し替えは許されない。

第一頁目のヘッダーにはこの例にあるような情報を書き込む。卒業論文の場合は、左側が「卒業論文概要集 200? 年? 月」であり、右側は「うほ大学工学部土木工学科」（2007 年度からは「うほ大学工学部建築・社会環境工学科」）である。それ以下にはそれぞれ約 1 行の空白を開けて、「論文題目」「英文題目」「論文提出者名」「その英名」「所属研究室と指導教員名」「概要」「キーワード」の順に一段で組む。「概要」「キーワード」は、修論の場合には英語を用いることとする。また「指導教員名」は、書類上の教授である必要はなく、実際に主な指導をしてくださった先生の名前がよい。

本文はその約 2 行下から二段組にして論理的に並べ、最後の参考文献リストまで続ける。最終頁の左右の段の下端はできるだけ揃えること。文献リストの最後には「論文提出締め切り日」を明記する。この文章は概要なので、謝辞や補遺・付録は付けない。また、数式や図表は省略することなく示す必要があるが、最終発表の場で発表する最も重要な結論を述べるのに必要なだけの最小限

に留め、文章も解りやすい構成および言葉で論理的に書くこと。

もし $\text{L}^{\text{T}}\text{E}^{\text{X}}$ を用いて概要原稿を書く場合には、別途 `ceabs-2e.sty` が用意してある。

`http://hashi4.civil.tohoku.ac.jp/~bear/soft/index-j.html#StyleFiles`

にあるのでダウンロードする。パッケージ中の `ceabs-2e.tex` がこの文書のソースであり、それをテンプレートにするとよい。最後の頁の段揃えには

```
\lastpagecontrol{18cm}
\lastpagesettings
```

のふたつが使える。前者のコマンドが最終頁左段文章中で定義されると、その頁の下に 18cm の空白を空けてくれる。後者のコマンドは最終行に置かれ、提出日付を出力する。その他の設定については、この文書ファイルのコメントを参照しながら入れれば、レイアウトやヘッダについては自動的に出力される。

謝辞: ありがとう

参考文献

- 1) ファン, Y. C. (大橋義夫・村上澄男・神谷紀生 共訳) : 固体の力学/理論, 培風館, 1970.
- 2) 山田邦夫: 2 相材料の平均弾塑性挙動の定性的把握とその定量化への発展性の限界, 土木学会論文集, 第 333 号 / I-99, pp.123-234, 1991.
- 3) Hill, R.: A self-consistent mechanics of composite materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.13, pp.213-222, 1965.
- 4) Malvern, L.E.: *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice Hall, New Jersey 1969.

(2015 年 2 月 4 日 提出)

以下， 論文本体のサンプル

Stanford 大学のスタイルファイル 'suthesis.sty' を下敷きにして・・・

卒業論文 (25 頁)

Graduation Thesis (25 pages)

修士論文 (略歴情報付き: 27 頁)

Master Thesis (with Author's Profile and Curriculum Vitae; 27 pages)

博士論文 (略歴情報付き; 27 頁)

Dissertation (with Author's Profile and Curriculum Vitae; 27 pages)

卒業論文

複合材料の平均的な弾塑性係数の評価と
変形の局所化

東北大学工学部建築・社会環境工学科

指導教員 絵来 詮西 教授

土木 浩二

2015年3月

要 旨

複合材料の平均的な弾塑性係数の評価と

変形の局所化

土木 浩二

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。

□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。

□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。

□△を用いた材料実験を行なった結果，ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については，かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた．さらに，増分理論に拡張することにより，有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた．

謝 辞

絵来詮西教授先生にはたいへん・・・ほげほげ・・・

目次

1	まえがき	1
2	構成モデルと局所化条件	3
(1)	構成モデル	3
a)	3 次元的表现	3
(2)	局所化条件	4
a)	古典的すべり線理論 — 微小変形理論の枠組	4
b)	有限変形理論の枠組での条件	5
3	Jaumann の応力速度を用いた場合	6
(1)	単純な応答	6
(2)	単純な荷重状態での応答の特徴	7
a)	単純せん断状態	7
4	結論	9
	補遺 I 延性の評価	11
(1)	とりあえず, まずは	11
	参考文献	13

表 目 次

1	表	15
2	表	15

目 次

1	図	16
2	弾性体の単純せん断載荷	16

写 真 目 次

1	現場視察で利用したヘリコプター	17
---	---------------------------	----

1. まえがき

延性材料の破壊前には、ストライプ様の Lüders 帯のような周期的な絞りや、マクロなすべり線のような孤立した帯といった局所化した変形が発生することが多い。このような局所変形予測には古くはすべり線理論¹⁾がよく用いられ、塑性加工の終局強度設計等に実際に利用されてきた。地盤材料等にも拡張され、活断層上の堆積層中のすべり予測²⁾等にも用いられている。これに対応した近代的な理論としては、Hill による規準³⁾がせん断帯発生に使われる。しかし文献⁴⁾等では、先に周期的な絞りが発生するとされており、実験⁵⁾でも周期的な絞りが発生した後に孤立したせん断帯が発生している。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

2. 構成モデルと局所化条件

(1) 構成モデル

a) 3 次元的表現

例として用いる構成則には地盤や岩盤も含むことができる一般的なものを用い、各材料パラメータの影響も調べる。その代表例として Rudnicki and Rice⁶⁾によるモデルを用いると、

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひ

ずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

(2) 局所化条件

a) 古典的すべり線理論 — 微小変形理論の枠組

古典的すべり線理論は、微小変形理論の枠組の剛・完全塑性体の平面ひずみ状態で、Mises の降伏条件と Prandtl-Reuss の流れ則

一方、Hill は平面ひずみの条件式を使わずに一軸状態を考え⁷⁾

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なっ

た結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

b) 有限変形理論の枠組での条件

これに対し、硬化体等のせん断帯発生を予測する理論もいくつか提案されている。その中でよく用いられるのは、均質な変形状態に発生し得る速度勾配の不連続面の発生条件⁸⁾だ。

3. Jaumann の応力速度を用いた場合

(1) 単純な応答

まず Jaumann の応力速度を用いた場合の、よく知られた結果を列挙しておく。材料パラメータは文献^{9),10)}を参考にして Poisson 比を $\nu = 0.3$ とし、硬化域 ($H \geq 0$) でのせん断帯発生を対象とする。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの

精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

(2) 単純な載荷状態での応答の特徴

a) 単純せん断状態

Truesdell 応力速度で構成則を定義した場合のせん断帯発生の解析をする前に、Jaumann の応力速度を用いた場合と Truesdell の応力速度を用いた場合の、その材料モデルが示す特性の違いを明らかにしておく。最初は著名な結果¹¹⁾であるが、単純せん断をした場合の応答の違いである。図-2 中の小さい図にも示したように、非零の変位成分が $u_1 = X_2 \tan \xi$ のみという単純せん断を対象とする。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なっ

た結果，ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については，かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた．さらに，増分理論に拡張することにより，有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた．

4. 結論

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

かなり基礎的かつ半解析的・数値的な検討に留まったが、構成則に Truesdell の応力速度を用いた場合、次のような特性が得られた。

- 単純せん断载荷と
- 予測される
- ただ、引張の局所化は

補遺 I. 延性の評価

(1) とりあえず、まずは . . .

図 1 に示したように柔らかい介在物の導入は延性の改善を促す。ここでは、その定量的な評価を行なうために次式のような延性率 D を導入した。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、

増分理論に拡張することにより，有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた．

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し，微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった．□△を用いた材料実験を行なった結果，ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については，かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた．さらに，増分理論に拡張することにより，有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた．

参考文献

- 1) Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Classic Texts in the Physical Sciences, Clarendon Press, 1998.
- 2) 谷和夫: ジョイント要素を用いた FEM による逆断層の模型実験のシミュレーション, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.215-222, 1994.
- 3) Hill, R.: Acceleration waves in solids, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.10, pp.1-16, 1962.
- 4) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation phenomena in the plane tension test, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.239-264, 1975.
- 5) Anand, L. and Spitzig, W. A.: Initiation of localized shear bands in plane strain, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.28, pp.113-128, 1980.
- 6) 寺沢直樹, 岩熊哲夫, 後藤文彦, 白戸真大: 地盤の不安定問題における変形局所化の数値予測, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.3, pp.283-294, 2000.
- 7) Iwakuma, T. and Nemat-Nasser, S.: An analytical estimate of shear band initiation in a necked bar, *Int. J. Solids Structures*, Vol.18, pp.69-83, 1982.
- 8) Asaro, R. J.: Micromechanics of crystals and polycrystals, *Advances in Appl. Mech.*, Vol.23, pp.1-115, 1983.

- 9) Ratel, R., Kawauchi, M., Mori, T., Saiki, I., Withers, P. J. and Iwakuma, T.: Application of anisotropic inclusion theory to the deformation of Ni based single crystal superalloys: Stress-strain curves determination, *Mech. Mater.*, Vol.42, pp.237-247, 2010.
- 10) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R.: Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.371-394, 1975.
- 11) Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A.: On finite plastic flows of compressible materials with internal friction, *Int. J. Solids Structures*, Vol.16, pp.495-514, 1980.
- 12) de Souza Neto, E. A., Perić, D. and Owen, D. R. J.: *Computational Methods for Plasticity: Theory and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- 13) Lee, E. H., Mallett, R. L. and Wertheimer, T. B.: Stress analysis for anisotropic hardening in finite-deformation plasticity, *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, Vol.50, pp.554-560, 1983.
- 14) 吉田輝, 後藤正司, 亀谷泰久, 龍岡文夫, 木幡行宏, 薫軍: 砂礫の平面ひずみ圧縮試験におけるせん断層の応力・変形関係, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.189-196, 1994.
- 15) Nemat-Nasser, S.: *Plasticity, A Treatise on Finite Deformation of Heterogeneous Inelastic Materials*, Cambridge Monographs on Mechanics, Cambridge Univ. Press, 2005.

表-1 表

x	y
a	b
c	d

表-2 表

a b
c d

【図】

図-1 図

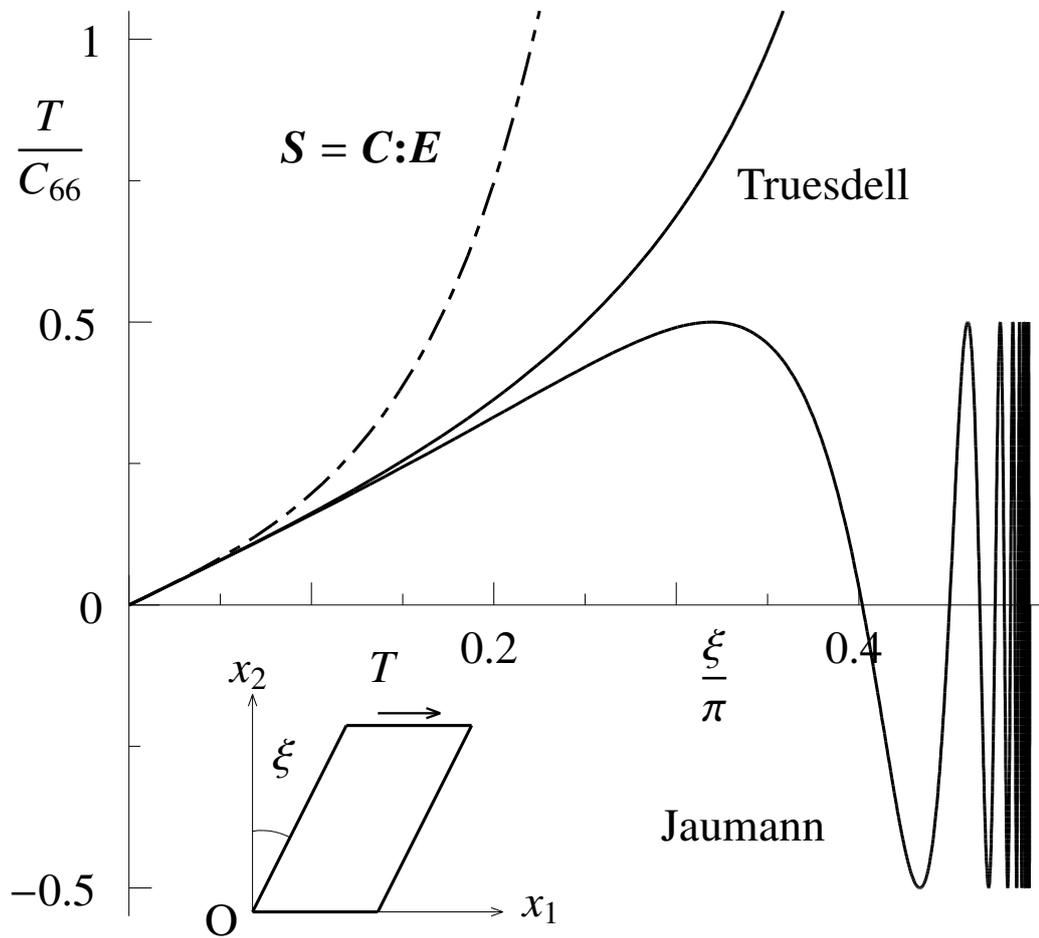


図-2 弾性体の単純せん断载荷



写真-1 現場視察で利用したヘリコプター

Estimate of Average Elastoplastic Moduli of
Composites and
Localized Deformation

A GRADUATION THESIS

SUBMITTED TO THE DEPARTMENT OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

OF TOHOKU UNIVERSITY

FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING

ADVISOR PROFESSOR EDWARD CIVIL

KOJI DOBOKU

MARCH 2015

ABSTRACT

ESTIMATE OF AVERAGE ELASTOPLASTIC MODULI OF COMPOSITES AND LOCALIZED DEFORMATION

Koji DOBOKU

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results

were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

ACKNOWLEDGMENT

I appreciate

Contents

1	Introduction	1
2	The averaging approach to multi-phase elastoplastic composites	3
(1)	Mori-Tanaka averaging in incremental form	3
a)	3D expression	3
(2)	Localization	4
a)	Classical approaches	4
b)	Finite deformation	4
3	Experimental approaches	6
(1)	Uniaxial case	6
a)	Infinitesimal deformation	6
4	Concluding remarks	8
	APPENDIX A Ductility	10
(1)	In the case of	10
(2)	Incremental theory	11
	REFERENCES	13

List of Tables

1	Material parameters	15
2	Experimental settings	15

List of Figures

1	First results	16
2	Second results	16

List of Photos

1	My helicopter	17
---	-------------------------	----

1 . Introduction

Analytical methods for averaging the material characteristics of composites are extremely useful in designing new materials long before carrying out either experimental trials or numerical analyses with precise models of microstructure. Among many such methods, the Mori-Tanaka approach¹⁾ is a simple one used to evaluate the average elastic and elastoplastic properties of composites²⁾. However, since the method does not take into account the mechanical interactions between many inhomogeneities, the predicted behavior, especially in the plastic states, tends to be significantly stiffer than what is observed in experiments. In order to improve its ability to predict the behavior of materials, a variety of approaches has been suggested: an explicit geometrical distribution of inhomogeneities was assumed and introduced³⁾, and secant and tangential moduli were employed to evaluate interactions approximately by Doe⁴⁾.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

2 . The averaging approach to multi-phase elastoplastic composites

(1) Mori-Tanaka averaging in incremental form

a) 3D expression

Suppose that there are $(N - 1)$ different types of ellipsoidal inhomogeneities distributed in an infinite body where the N -th phase is the matrix. Let $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ and C denote the incremental stress tensor, incremental strain tensor and tangential isotropic elastic tensor, respectively. Since a virtual matrix introduced in the next section is an elastic body because, for example, the Eshelby tensor can be easily evaluated, the matrix (N -th phase) is assumed to be isotropically elastic, and the corresponding constitutive relation in rate form is expressed as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

(2) Localization

a) Classical approaches

Then, based on the Mori-Tanaka approach, an approximate average constitutive relation of the matrix can be assumed by

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

b) Finite deformation

The strain field of the i -th inhomogeneity must include the interaction between the particular inhomogeneity and the surrounding matrix material, and can be written as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

3 . Experimental approaches

(1) Uniaxial case

a) Infinitesimal deformation

Then the equivalent inclusion method⁵⁾ allows the following expression in the i -th inhomogeneity as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during

motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

4 . Concluding remarks

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation

was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

Finally, we can define the overall average incremental stress $\dot{\bar{\sigma}}$ and the corresponding incremental strain $\dot{\bar{\epsilon}}$ of the composite by simple volume averages as

APPENDIX A . Ductility

(1) In the case of ...

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an

updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

(2) Incremental theory

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

REFERENCES

- 1) Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Classic Texts in the Physical Sciences, Clarendon Press, 1998.
- 2) Hill, R.: Acceleration waves in solids, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.10, pp.1-16, 1962.
- 3) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation phenomena in the plane tension test, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.239-264, 1975.
- 4) Anand, L. and Spitzig, W. A.: Initiation of localized shear bands in plane strain, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.28, pp.113-128, 1980.
- 5) Asaro, R. J.: Micromechanics of crystals and polycrystals, *Advances in Appl. Mech.*, Vol.23, pp.1-115, 1983.
- 6) Ratel, R., Kawauchi, M., Mori, T., Saiki, I., Withers, P. J. and Iwakuma, T.: Application of anisotropic inclusion theory to the deformation of Ni based single crystal superalloys: Stress-strain curves determination, *Mech. Mater.*, Vol.42, pp.237-247, 2010.
- 7) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R.: Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.371-394, 1975.
- 8) Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A.: On finite plastic flows of compressible materials with internal friction, *Int. J. Solids Structures*, Vol.16, pp.495-514, 1980.
- 9) de Souza Neto, E. A., Perić, D. and Owen, D. R. J.: *Computational Methods for Plasticity: Theory and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

- 10) Lee, E. H., Mallett, R. L. and Wertheimer, T. B.: Stress analysis for anisotropic hardening in finite-deformation plasticity, *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, Vol.50, pp.554-560, 1983.
- 11) Nemat-Nasser, S.: *Plasticity, A Treatise on Finite Deformation of Heterogeneous Inelastic Materials*, Cambridge Monographs on Mechanics, Cambridge Univ. Press, 2005.

Table 1 Material parameters

x	y
a	b
c	d

Table 2 Experimental settings

a b
c d

【図】

Fig. 1 First results

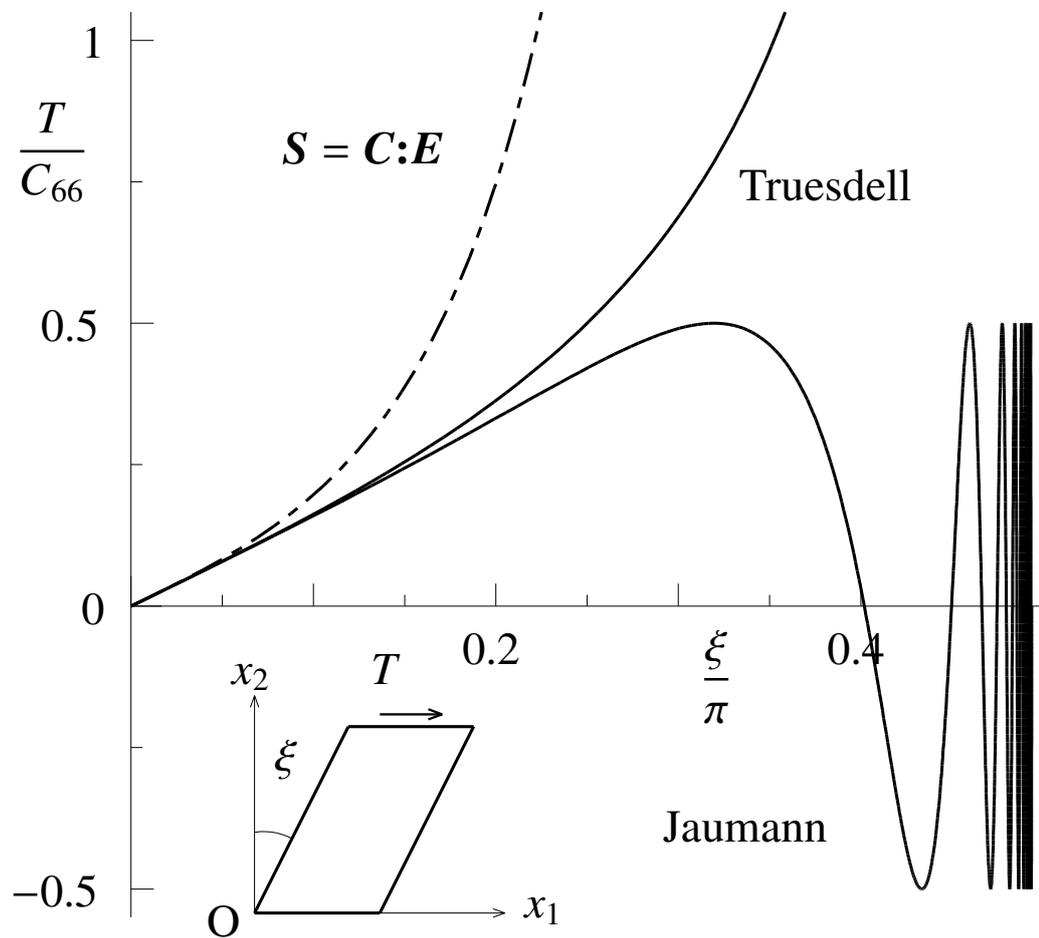


Fig. 2 Second results



Photo 1 My helicopter

指導教員	絵来 詮西 教授
研究指導教員	僕蛾 教絵太 准教授
審査委員 (○印は主査)	○ 絵来 詮西 教授 <u>1 僕画 三田 教授</u> <u>2 翼 和歌蘭 教授</u> <u>3 堂藻 項模 教授</u> <u>4 僕蛾 教絵太 准教授</u>

提出者略歴		
氏名 <small>ふりがな</small> 土木 浩二 <small>とほく こうじ</small>	昭和 (平成)	1年5月20日生
本籍 宮城	都・道 府・ <u>県</u>	国籍
履歴事項		
【学歴】		
平成10年4月1日	東北大学工学部	入学
平成14年3月26日	同	卒業
平成14年4月1日	東北大学大学院工学研究科博士課程前期2年の課程	入学
平成16年3月25日	同	修了
平成23年4月1日	東北大学大学院工学研究科博士課程後期3年の課程	編入学
平成26年3月26日	同	修了
【職歴】		
平成16年4月1日	何出模建設株式会社	入社

備考 (1) 外国人留学生は、国籍を記入すること。

(2) 履歴事項は、大学入学から年次にしたがって記入すること。

修士論文

複合材料の平均的な弾塑性係数の評価と
変形の局所化

Estimate of Average Elastoplastic Moduli of Composites and
Localized Deformation

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

土木 浩二

Koji DOBOKU

2015年3月

Copyright © 2015 by Koji DOBOKU

絵来 詮西 教授
(主 査)

僕画 三田 教授

翼 和歌蘭 教授

堂藻 項模 教授

僕蛾 教絵太 准教授

ABSTRACT

Estimate of Average Elastoplastic Moduli of Composites and Localized Deformation

Koji DOBOKU

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity.

Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

謝 辞

絵来詮西教授先生にはたいへん・・・ほげほげ・・・

目次

1	まえがき	1
2	構成モデルと局所化条件	3
(1)	構成モデル	3
a)	3 次元的表现	3
(2)	局所化条件	4
a)	古典的すべり線理論 — 微小変形理論の枠組	4
b)	有限変形理論の枠組での条件	5
3	Jaumann の応力速度を用いた場合	6
(1)	単純な応答	6
(2)	単純な荷重状態での応答の特徴	7
a)	単純せん断状態	7
4	結論	9
	補遺 I 延性の評価	11
(1)	とりあえず, まずは	11
	参考文献	13

表 目 次

1 表	15
2 表	15

目 次

1	図	16
2	弾性体の単純せん断載荷	16

写 真 目 次

1	現場視察で利用したヘリコプター	17
---	---------------------------	----

1. まえがき

延性材料の破壊前には、ストライプ様の Lüders 帯のような周期的な絞りや、マクロなすべり線のような孤立した帯といった局所化した変形が発生することが多い。このような局所変形予測には古くはすべり線理論¹⁾がよく用いられ、塑性加工の終局強度設計等に実際に利用されてきた。地盤材料等にも拡張され、活断層上の堆積層中のすべり予測²⁾等にも用いられている。これに対応した近代的な理論としては、Hill による規準³⁾がせん断帯発生に使われる。しかし文献⁴⁾等では、先に周期的な絞りが発生するとされており、実験⁵⁾でも周期的な絞りが発生した後に孤立したせん断帯が発生している。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

2. 構成モデルと局所化条件

(1) 構成モデル

a) 3 次元的表現

例として用いる構成則には地盤や岩盤も含むことができる一般的なものを用い、各材料パラメータの影響も調べる。その代表例として Rudnicki and Rice⁶⁾によるモデルを用いると、

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひ

ずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

(2) 局所化条件

a) 古典的すべり線理論 — 微小変形理論の枠組

古典的すべり線理論は、微小変形理論の枠組の剛・完全塑性体の平面ひずみ状態で、Mises の降伏条件と Prandtl-Reuss の流れ則

一方、Hill は平面ひずみの条件式を使わずに一軸状態を考え⁷⁾

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なっ

た結果，ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については，かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた．さらに，増分理論に拡張することにより，有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた．

b) 有限変形理論の枠組での条件

これに対し，硬化体等のせん断帯発生を予測する理論もいくつか提案されている。その中でよく用いられるのは，均質な変形状態に発生し得る速度勾配の不連続面の発生条件⁸⁾だ。

3. Jaumann の応力速度を用いた場合

(1) 単純な応答

まず Jaumann の応力速度を用いた場合の、よく知られた結果を列挙しておく。材料パラメータは文献^{9),10)}を参考にして Poisson 比を $\nu = 0.3$ とし、硬化域 ($H \geq 0$) でのせん断帯発生を対象とする。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの

精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

(2) 単純な載荷状態での応答の特徴

a) 単純せん断状態

Truesdell 応力速度で構成則を定義した場合のせん断帯発生の解析をする前に、Jaumann の応力速度を用いた場合と Truesdell の応力速度を用いた場合の、その材料モデルが示す特性の違いを明らかにしておく。最初は著名な結果¹¹⁾であるが、単純せん断をした場合の応答の違いである。図-2 中の小さい図にも示したように、非零の変位成分が $u_1 = X_2 \tan \xi$ のみという単純せん断を対象とする。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なっ

た結果，ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については，かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた．さらに，増分理論に拡張することにより，有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた．

4. 結論

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

かなり基礎的かつ半解析的・数値的な検討に留まったが、構成則に Truesdell の応力速度を用いた場合、次のような特性が得られた。

- 単純せん断载荷と
- 予測される
- ただ、引張の局所化は

補遺 I. 延性の評価

(1) とりあえず、まずは . . .

図 1 に示したように柔らかい介在物の導入は延性の改善を促す。ここでは、その定量的な評価を行なうために次式のような延性率 D を導入した。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、

増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

参考文献

- 1) Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Classic Texts in the Physical Sciences, Clarendon Press, 1998.
- 2) 谷和夫: ジョイント要素を用いた FEM による逆断層の模型実験のシミュレーション, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.215-222, 1994.
- 3) Hill, R.: Acceleration waves in solids, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.10, pp.1-16, 1962.
- 4) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation phenomena in the plane tension test, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.239-264, 1975.
- 5) Anand, L. and Spitzig, W. A.: Initiation of localized shear bands in plane strain, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.28, pp.113-128, 1980.
- 6) 寺沢直樹, 岩熊哲夫, 後藤文彦, 白戸真大: 地盤の不安定問題における変形局所化の数値予測, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.3, pp.283-294, 2000.
- 7) Iwakuma, T. and Nemat-Nasser, S.: An analytical estimate of shear band initiation in a necked bar, *Int. J. Solids Structures*, Vol.18, pp.69-83, 1982.
- 8) Asaro, R. J.: Micromechanics of crystals and polycrystals, *Advances in Appl. Mech.*, Vol.23, pp.1-115, 1983.

- 9) Ratel, R., Kawauchi, M., Mori, T., Saiki, I., Withers, P. J. and Iwakuma, T.: Application of anisotropic inclusion theory to the deformation of Ni based single crystal superalloys: Stress-strain curves determination, *Mech. Mater.*, Vol.42, pp.237-247, 2010.
- 10) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R.: Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.371-394, 1975.
- 11) Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A.: On finite plastic flows of compressible materials with internal friction, *Int. J. Solids Structures*, Vol.16, pp.495-514, 1980.
- 12) de Souza Neto, E. A., Perić, D. and Owen, D. R. J.: *Computational Methods for Plasticity: Theory and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- 13) Lee, E. H., Mallett, R. L. and Wertheimer, T. B.: Stress analysis for anisotropic hardening in finite-deformation plasticity, *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, Vol.50, pp.554-560, 1983.
- 14) 吉田輝, 後藤正司, 亀谷泰久, 龍岡文夫, 木幡行宏, 薫軍: 砂礫の平面ひずみ圧縮試験におけるせん断層の応力・変形関係, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.189-196, 1994.
- 15) Nemat-Nasser, S.: *Plasticity, A Treatise on Finite Deformation of Heterogeneous Inelastic Materials*, Cambridge Monographs on Mechanics, Cambridge Univ. Press, 2005.

表-1 表

x	y
a	b
c	d

表-2 表

a b
c d

【図】

図-1 図

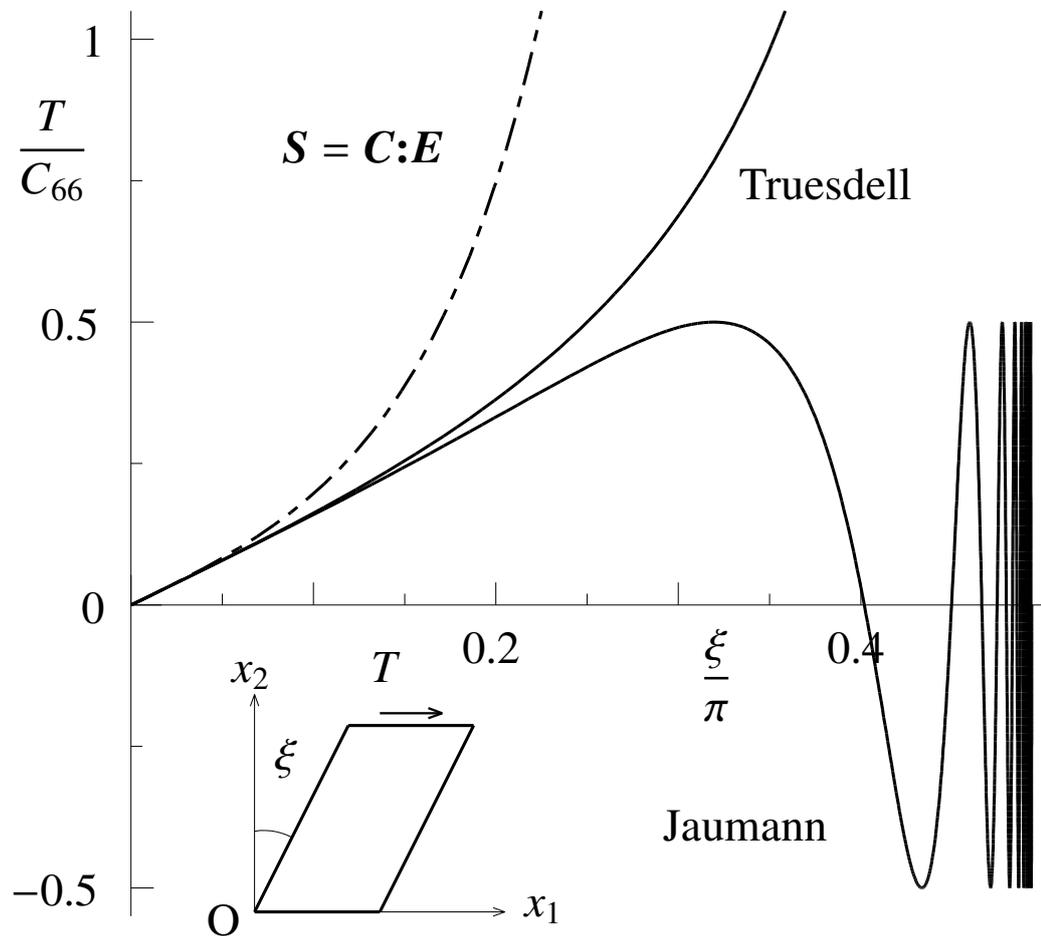


図-2 弾性体の単純せん断载荷



写真-1 現場視察で利用したヘリコプター

Advising Professor at Tohoku Univ.	Professor Edward CIVIL
Research Advisor at Tohoku Univ.	Assoc.Prof. J. DOE
Dissertation Committee Members Name marked with "○" is the Chief Examiner	○ Professor Edward CIVIL <u>1 Prof. W. DOE</u> <u>2 Prof. L. DOE</u> <u>3 Prof. T. DOE</u> <u>4 Assoc.Prof. J. DOE</u>

Author's Profile	
Name Doboku, Koji	Date of Birth October 1, 1979
Nationality Japan	
Curriculum Vitae	
Educational Background	
From April 1, 1998 To March 26, 2002	School of Engineering, Tohoku Univ.
From April 1, 2002 To March 25, 2004	Graduate School of Engineering, Tohoku Univ. (Master's Program)
From April 1, 2011 To March 26, 2014	Graduate School of Engineering, Tohoku Univ. (Doctoral Program)
From To	
From To	
Work Experience	
From April 1, 2004 To March 20, 2010	Tohoku Construction Co.
From To	
From To	

Note: Educational background has to be filled in, starting from the date of university enrollment.

Estimate of Average Elastoplastic Moduli of
Composites and
Localized Deformation

A MASTER THESIS

SUBMITTED TO THE DEPARTMENT OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

AND THE COMMITTEE ON GRADUATE STUDIES

OF TOHOKU UNIVERSITY

FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING

KOJI DOBOKU

MARCH 2015

Copyright © 2015 by Koji DOBOKU

Professor Edward CIVIL
(Principal Advisor)

Prof. W. DOE

Prof. L. DOE

Prof. T. DOE

Assoc.Prof. J. DOE

ABSTRACT

ESTIMATE OF AVERAGE ELASTOPLASTIC MODULI OF COMPOSITES AND LOCALIZED DEFORMATION

Koji DOBOKU

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results

were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

ACKNOWLEDGMENT

I appreciate

Contents

1	Introduction	1
2	The averaging approach to multi-phase elastoplastic composites	3
(1)	Mori-Tanaka averaging in incremental form	3
a)	3D expression	3
(2)	Localization	4
a)	Classical approaches	4
b)	Finite deformation	4
3	Experimental approaches	6
(1)	Uniaxial case	6
a)	Infinitesimal deformation	6
4	Concluding remarks	8
	APPENDIX A Ductility	10
(1)	In the case of	10
(2)	Incremental theory	11
	REFERENCES	13

List of Tables

1	Material parameters	15
2	Experimental settings	15

List of Figures

1	First results	16
2	Second results	16

List of Photos

1	My helicopter	17
---	-------------------------	----

1 . Introduction

Analytical methods for averaging the material characteristics of composites are extremely useful in designing new materials long before carrying out either experimental trials or numerical analyses with precise models of microstructure. Among many such methods, the Mori-Tanaka approach¹⁾ is a simple one used to evaluate the average elastic and elastoplastic properties of composites²⁾. However, since the method does not take into account the mechanical interactions between many inhomogeneities, the predicted behavior, especially in the plastic states, tends to be significantly stiffer than what is observed in experiments. In order to improve its ability to predict the behavior of materials, a variety of approaches has been suggested: an explicit geometrical distribution of inhomogeneities was assumed and introduced³⁾, and secant and tangential moduli were employed to evaluate interactions approximately by Doe⁴⁾.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

2 . The averaging approach to multi-phase elastoplastic composites

(1) Mori-Tanaka averaging in incremental form

a) 3D expression

Suppose that there are $(N - 1)$ different types of ellipsoidal inhomogeneities distributed in an infinite body where the N -th phase is the matrix. Let $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ and C denote the incremental stress tensor, incremental strain tensor and tangential isotropic elastic tensor, respectively. Since a virtual matrix introduced in the next section is an elastic body because, for example, the Eshelby tensor can be easily evaluated, the matrix (N -th phase) is assumed to be isotropically elastic, and the corresponding constitutive relation in rate form is expressed as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

(2) Localization

a) Classical approaches

Then, based on the Mori-Tanaka approach, an approximate average constitutive relation of the matrix can be assumed by

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

b) Finite deformation

The strain field of the i -th inhomogeneity must include the interaction between the particular inhomogeneity and the surrounding matrix material, and can be written as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

3 . Experimental approaches

(1) Uniaxial case

a) Infinitesimal deformation

Then the equivalent inclusion method⁵⁾ allows the following expression in the i -th inhomogeneity as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during

motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

4 . Concluding remarks

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation

was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

Finally, we can define the overall average incremental stress $\dot{\bar{\sigma}}$ and the corresponding incremental strain $\dot{\bar{\epsilon}}$ of the composite by simple volume averages as

APPENDIX A . Ductility

(1) In the case of ...

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an

updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

(2) Incremental theory

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

REFERENCES

- 1) Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Classic Texts in the Physical Sciences, Clarendon Press, 1998.
- 2) Hill, R.: Acceleration waves in solids, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.10, pp.1-16, 1962.
- 3) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation phenomena in the plane tension test, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.239-264, 1975.
- 4) Anand, L. and Spitzig, W. A.: Initiation of localized shear bands in plane strain, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.28, pp.113-128, 1980.
- 5) Asaro, R. J.: Micromechanics of crystals and polycrystals, *Advances in Appl. Mech.*, Vol.23, pp.1-115, 1983.
- 6) Ratel, R., Kawauchi, M., Mori, T., Saiki, I., Withers, P. J. and Iwakuma, T.: Application of anisotropic inclusion theory to the deformation of Ni based single crystal superalloys: Stress-strain curves determination, *Mech. Mater.*, Vol.42, pp.237-247, 2010.
- 7) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R.: Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.371-394, 1975.
- 8) Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A.: On finite plastic flows of compressible materials with internal friction, *Int. J. Solids Structures*, Vol.16, pp.495-514, 1980.
- 9) de Souza Neto, E. A., Perić, D. and Owen, D. R. J.: *Computational Methods for Plasticity: Theory and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

- 10) Lee, E. H., Mallett, R. L. and Wertheimer, T. B.: Stress analysis for anisotropic hardening in finite-deformation plasticity, *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, Vol.50, pp.554-560, 1983.
- 11) Nemat-Nasser, S.: *Plasticity, A Treatise on Finite Deformation of Heterogeneous Inelastic Materials*, Cambridge Monographs on Mechanics, Cambridge Univ. Press, 2005.

Table 1 Material parameters

x	y
a	b
c	d

Table 2 Experimental settings

a b
c d

【図】

Fig. 1 First results

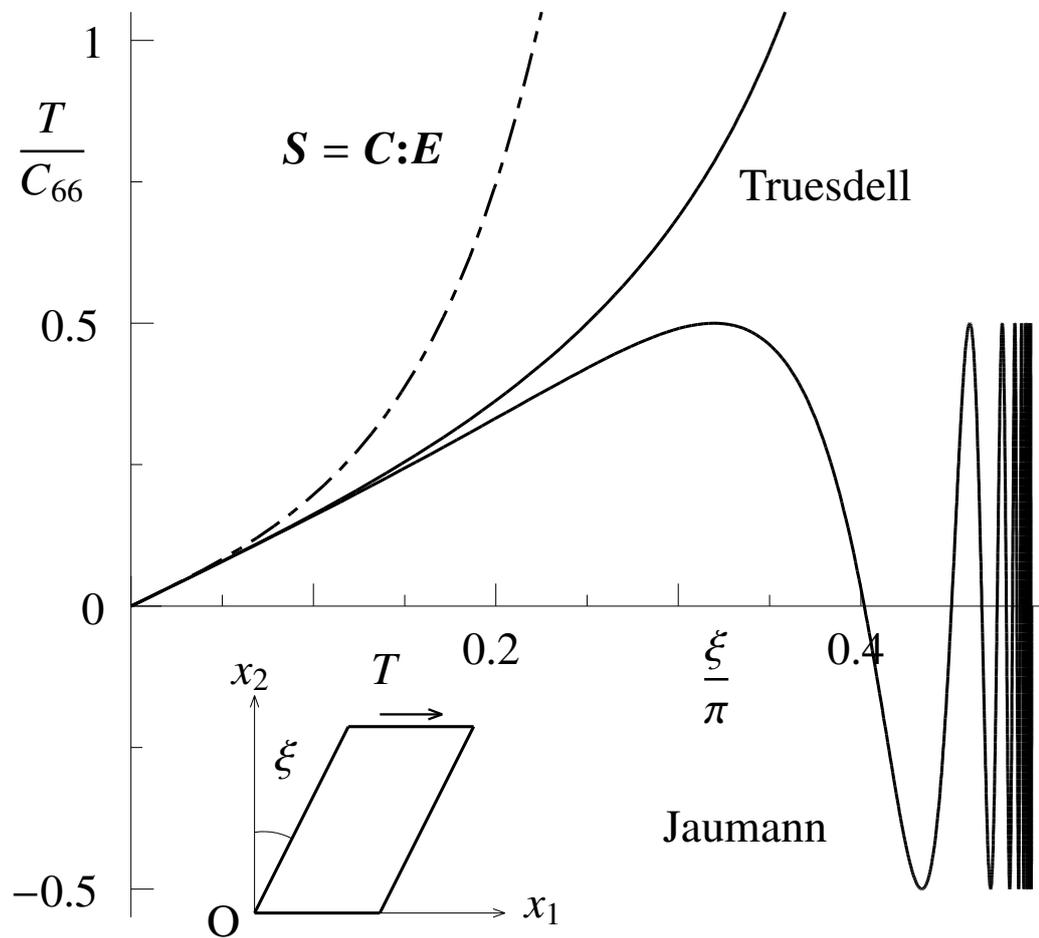


Fig. 2 Second results



Photo 1 My helicopter

指導教員	絵来 詮西 教授
研究指導教員	僕蛾 教絵太 准教授
審査委員 (○印は主査)	○ 絵来 詮西 教授 <u>1 僕画 三田 教授</u> <u>2 翼 和歌蘭 教授</u> <u>3 堂藻 項模 教授</u> <u>4 僕蛾 教絵太 准教授</u>

提出者略歴		
氏名	昭和平成	昭和 平成
氏名	土木 浩二	1年5月20日生
本籍	宮城	都・道 府・ <u>県</u>
国籍		
履歴事項		
【学歴】		
平成10年4月1日	東北大学工学部	入学
平成14年3月26日	同	卒業
平成14年4月1日	東北大学大学院工学研究科博士課程前期2年の課程	入学
平成16年3月25日	同	修了
平成23年4月1日	東北大学大学院工学研究科博士課程後期3年の課程	編入学
平成26年3月26日	同	修了
【職歴】		
平成16年4月1日	何出模建設株式会社	入社

備考(1) 外国人留学生は、国籍を記入すること。

(2) 履歴事項は、大学入学から年次にしたがって記入すること。

博士論文

複合材料の平均的な弾塑性係数の評価と
変形の局所化

Estimate of Average Elastoplastic Moduli of Composites and
Localized Deformation

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

土木 浩二

Koji DOBOKU

2015年3月

Copyright © 2015 by Koji DOBOKU

絵来 詮西 教授
(主 査)

僕画 三田 教授

翼 和歌蘭 教授

堂藻 項模 教授

僕蛾 教絵太 准教授

ABSTRACT

Estimate of Average Elastoplastic Moduli of Composites and Localized Deformation

Koji DOBOKU

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity.

Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

謝 辞

絵来詮西教授先生にはたいへん・・・ほげほげ・・・

目 次

1	まえがき	1
2	構成モデルと局所化条件	3
(1)	構成モデル	3
a)	3 次元的表现	3
(2)	局所化条件	4
a)	古典的すべり線理論 — 微小変形理論の枠組	4
b)	有限変形理論の枠組での条件	5
3	Jaumann の応力速度を用いた場合	6
(1)	単純な応答	6
(2)	単純な荷重状態での応答の特徴	7
a)	単純せん断状態	7
4	結論	9
	補遺 I 延性の評価	11
(1)	とりあえず, まずは	11
	参考文献	13

表 目 次

1 表	15
2 表	15

目 次

1	図	16
2	弾性体の単純せん断載荷	16

写 真 目 次

1	現場視察で利用したヘリコプター	17
---	---------------------------	----

1. まえがき

延性材料の破壊前には、ストライプ様の Lüders 帯のような周期的な絞りや、マクロなすべり線のような孤立した帯といった局所化した変形が発生することが多い。このような局所変形予測には古くはすべり線理論¹⁾がよく用いられ、塑性加工の終局強度設計等に実際に利用されてきた。地盤材料等にも拡張され、活断層上の堆積層中のすべり予測²⁾等にも用いられている。これに対応した近代的な理論としては、Hill による規準³⁾がせん断帯発生に使われる。しかし文献⁴⁾等では、先に周期的な絞りが発生するとされており、実験⁵⁾でも周期的な絞りが発生した後に孤立したせん断帯が発生している。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

2. 構成モデルと局所化条件

(1) 構成モデル

a) 3 次元的表現

例として用いる構成則には地盤や岩盤も含むことができる一般的なものを用い、各材料パラメータの影響も調べる。その代表例として Rudnicki and Rice⁶⁾によるモデルを用いると、

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひ

ずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

(2) 局所化条件

a) 古典的すべり線理論 — 微小変形理論の枠組

古典的すべり線理論は、微小変形理論の枠組の剛・完全塑性体の平面ひずみ状態で、Mises の降伏条件と Prandtl-Reuss の流れ則

一方、Hill は平面ひずみの条件式を使わずに一軸状態を考え⁷⁾

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なっ

た結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

b) 有限変形理論の枠組での条件

これに対し、硬化体等のせん断帯発生を予測する理論もいくつか提案されている。その中でよく用いられるのは、均質な変形状態に発生し得る速度勾配の不連続面の発生条件⁸⁾だ。

3. Jaumann の応力速度を用いた場合

(1) 単純な応答

まず Jaumann の応力速度を用いた場合の、よく知られた結果を列挙しておく。材料パラメータは文献^{9),10)}を参考にして Poisson 比を $\nu = 0.3$ とし、硬化域 ($H \geq 0$) でのせん断帯発生を対象とする。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの

精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

(2) 単純な載荷状態での応答の特徴

a) 単純せん断状態

Truesdell 応力速度で構成則を定義した場合のせん断帯発生の解析をする前に、Jaumann の応力速度を用いた場合と Truesdell の応力速度を用いた場合の、その材料モデルが示す特性の違いを明らかにしておく。最初は著名な結果¹¹⁾であるが、単純せん断をした場合の応答の違いである。図-2 中の小さい図にも示したように、非零の変位成分が $u_1 = X_2 \tan \xi$ のみという単純せん断を対象とする。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なっ

た結果，ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については，かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた．さらに，増分理論に拡張することにより，有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた．

4. 結論

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

かなり基礎的かつ半解析的・数値的な検討に留まったが、構成則に Truesdell の応力速度を用いた場合、次のような特性が得られた。

- 単純せん断载荷と
- 予測される
- ただ，引張の局所化は

補遺 I. 延性の評価

(1) とりあえず、まずは . . .

図 1 に示したように柔らかい介在物の導入は延性の改善を促す。ここでは、その定量的な評価を行なうために次式のような延性率 D を導入した。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、

増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

非均質材料の平均的な弾性挙動の予測に用いられている簡単な方法を拡張し、微小ひずみの範囲での複合材料の弾塑性挙動の把握を行なった。□△を用いた材料実験を行なった結果、ここで選んだような比較的延性を顕著に示すような材料については、かなりの精度で材料挙動を予測することが可能な構成モデルを構築することができた。さらに、増分理論に拡張することにより、有限ひずみの範囲までも無理なく拡張できた。

参考文献

- 1) Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Classic Texts in the Physical Sciences, Clarendon Press, 1998.
- 2) 谷和夫: ジョイント要素を用いた FEM による逆断層の模型実験のシミュレーション, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.215-222, 1994.
- 3) Hill, R.: Acceleration waves in solids, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.10, pp.1-16, 1962.
- 4) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation phenomena in the plane tension test, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.239-264, 1975.
- 5) Anand, L. and Spitzig, W. A.: Initiation of localized shear bands in plane strain, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.28, pp.113-128, 1980.
- 6) 寺沢直樹, 岩熊哲夫, 後藤文彦, 白戸真大: 地盤の不安定問題における変形局所化の数値予測, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.3, pp.283-294, 2000.
- 7) Iwakuma, T. and Nemat-Nasser, S.: An analytical estimate of shear band initiation in a necked bar, *Int. J. Solids Structures*, Vol.18, pp.69-83, 1982.
- 8) Asaro, R. J.: Micromechanics of crystals and polycrystals, *Advances in Appl. Mech.*, Vol.23, pp.1-115, 1983.

- 9) Ratel, R., Kawauchi, M., Mori, T., Saiki, I., Withers, P. J. and Iwakuma, T.: Application of anisotropic inclusion theory to the deformation of Ni based single crystal superalloys: Stress-strain curves determination, *Mech. Mater.*, Vol.42, pp.237-247, 2010.
- 10) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R.: Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.371-394, 1975.
- 11) Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A.: On finite plastic flows of compressible materials with internal friction, *Int. J. Solids Structures*, Vol.16, pp.495-514, 1980.
- 12) de Souza Neto, E. A., Perić, D. and Owen, D. R. J.: *Computational Methods for Plasticity: Theory and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- 13) Lee, E. H., Mallett, R. L. and Wertheimer, T. B.: Stress analysis for anisotropic hardening in finite-deformation plasticity, *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, Vol.50, pp.554-560, 1983.
- 14) 吉田輝, 後藤正司, 亀谷泰久, 龍岡文夫, 木幡行宏, 薫軍: 砂礫の平面ひずみ圧縮試験におけるせん断層の応力・変形関係, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.189-196, 1994.
- 15) Nemat-Nasser, S.: *Plasticity, A Treatise on Finite Deformation of Heterogeneous Inelastic Materials*, Cambridge Monographs on Mechanics, Cambridge Univ. Press, 2005.

表-1 表

x	y
a	b
c	d

表-2 表

a b
c d

【図】

図-1 図

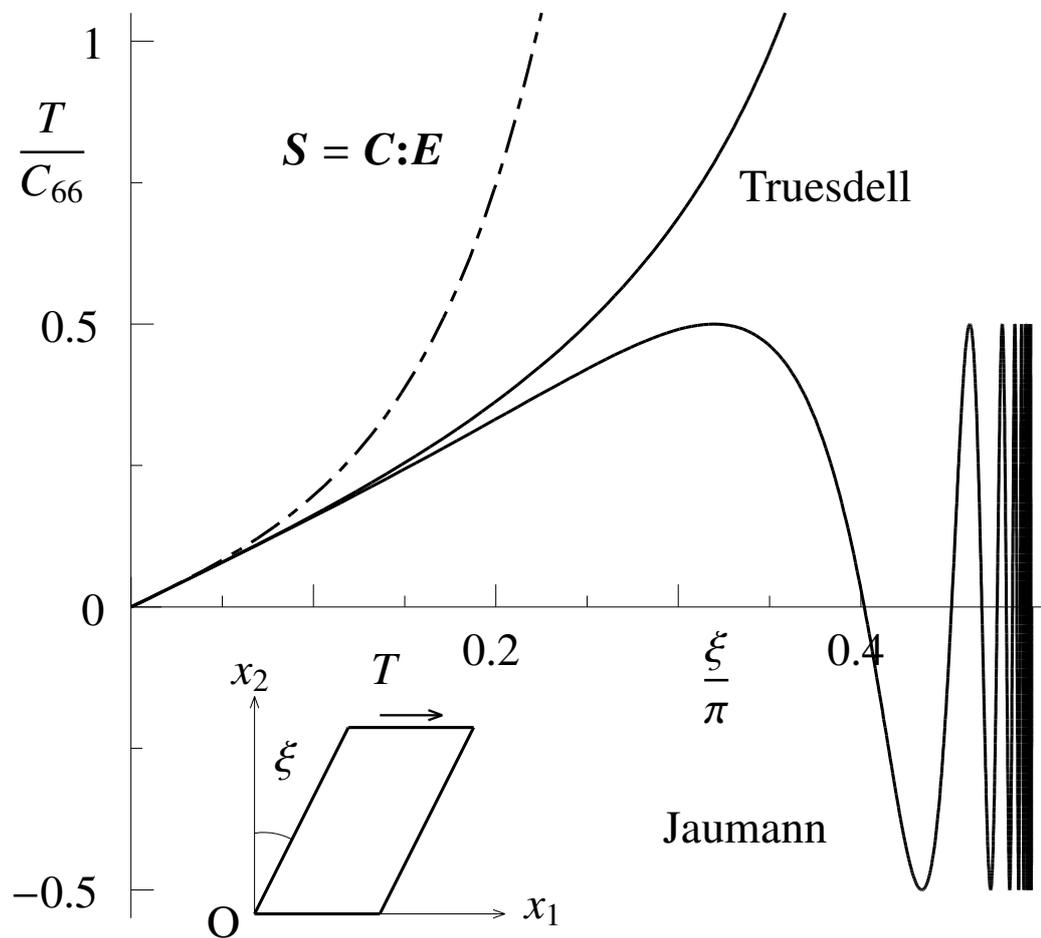


図-2 弾性体の単純せん断载荷



写真-1 現場視察で利用したヘリコプター

Advising Professor at Tohoku Univ.	Professor Edward CIVIL
Research Advisor at Tohoku Univ.	Assoc.Prof. J. DOE
Dissertation Committee Members Name marked with "○" is the Chief Examiner	○ Professor Edward CIVIL <u>1 Prof. W. DOE</u> <u>2 Prof. L. DOE</u> <u>3 Prof. T. DOE</u> <u>4 Assoc.Prof. J. DOE</u>

Author's Profile	
Name Doboku, Koji	Date of Birth October 1, 1979
Nationality Japan	
Curriculum Vitae	
Educational Background	
From April 1, 1998 To March 26, 2002	School of Engineering, Tohoku Univ.
From April 1, 2002 To March 25, 2004	Graduate School of Engineering, Tohoku Univ. (Master's Program)
From April 1, 2011 To March 26, 2014	Graduate School of Engineering, Tohoku Univ. (Doctoral Program)
From To	
From To	
Work Experience	
From April 1, 2004 To March 20, 2010	Tohoku Construction Co.
From To	
From To	

Note: Educational background has to be filled in, starting from the date of university enrollment.

Estimate of Average Elastoplastic Moduli of
Composites and
Localized Deformation

A DISSERTATION

SUBMITTED TO THE DEPARTMENT OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

AND THE COMMITTEE ON GRADUATE STUDIES

OF TOHOKU UNIVERSITY

IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF ENGINEERING

KOJI DOBOKU

MARCH 2015

Copyright © 2015 by Koji DOBOKU

Professor Edward CIVIL
(Principal Advisor)

Prof. W. DOE

Prof. L. DOE

Prof. T. DOE

Assoc.Prof. J. DOE

ABSTRACT

ESTIMATE OF AVERAGE ELASTOPLASTIC MODULI OF COMPOSITES AND LOCALIZED DEFORMATION

Koji DOBOKU

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results

were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

ACKNOWLEDGMENT

I appreciate

Contents

1	Introduction	1
2	The averaging approach to multi-phase elastoplastic composites	3
(1)	Mori-Tanaka averaging in incremental form	3
a)	3D expression	3
(2)	Localization	4
a)	Classical approaches	4
b)	Finite deformation	4
3	Experimental approaches	6
(1)	Uniaxial case	6
a)	Infinitesimal deformation	6
4	Concluding remarks	8
	APPENDIX A Ductility	10
(1)	In the case of	10
(2)	Incremental theory	11
	REFERENCES	13

List of Tables

1	Material parameters	15
2	Experimental settings	15

List of Figures

1	First results	16
2	Second results	16

List of Photos

1	My helicopter	17
---	-------------------------	----

1 . Introduction

Analytical methods for averaging the material characteristics of composites are extremely useful in designing new materials long before carrying out either experimental trials or numerical analyses with precise models of microstructure. Among many such methods, the Mori-Tanaka approach¹⁾ is a simple one used to evaluate the average elastic and elastoplastic properties of composites²⁾. However, since the method does not take into account the mechanical interactions between many inhomogeneities, the predicted behavior, especially in the plastic states, tends to be significantly stiffer than what is observed in experiments. In order to improve its ability to predict the behavior of materials, a variety of approaches has been suggested: an explicit geometrical distribution of inhomogeneities was assumed and introduced³⁾, and secant and tangential moduli were employed to evaluate interactions approximately by Doe⁴⁾.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

2 . The averaging approach to multi-phase elastoplastic composites

(1) Mori-Tanaka averaging in incremental form

a) 3D expression

Suppose that there are $(N - 1)$ different types of ellipsoidal inhomogeneities distributed in an infinite body where the N -th phase is the matrix. Let $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ and C denote the incremental stress tensor, incremental strain tensor and tangential isotropic elastic tensor, respectively. Since a virtual matrix introduced in the next section is an elastic body because, for example, the Eshelby tensor can be easily evaluated, the matrix (N -th phase) is assumed to be isotropically elastic, and the corresponding constitutive relation in rate form is expressed as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

(2) Localization

a) Classical approaches

Then, based on the Mori-Tanaka approach, an approximate average constitutive relation of the matrix can be assumed by

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

b) Finite deformation

The strain field of the i -th inhomogeneity must include the interaction between the particular inhomogeneity and the surrounding matrix material, and can be written as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

3 . Experimental approaches

(1) Uniaxial case

a) Infinitesimal deformation

Then the equivalent inclusion method⁵⁾ allows the following expression in the i -th inhomogeneity as

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during

motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

4 . Concluding remarks

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation

was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

Finally, we can define the overall average incremental stress $\dot{\bar{\sigma}}$ and the corresponding incremental strain $\dot{\bar{\epsilon}}$ of the composite by simple volume averages as

APPENDIX A . Ductility

(1) In the case of ...

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an

updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

(2) Incremental theory

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell

stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

In order to compare the characteristics of the stress rates, localization of deformation was predicted by using the Truesdell stress rate and the convected stress rate, and the results were compared with those by the Jaumann stress rate of the Cauchy stress. However, in plane strain state, the predicted stresses of incipience of the localization by the Truesdell stress rate become close to the experimental critical stresses, Also, the orientations of the localized deformation obtained by the Truesdell stress rate showed consistency with those by the infinitesimal deformation theory, when the stress levels of the localization were in practical order.

The Jaumann stress rate of the Cauchy stress is usually used to represent hypoelasticity. Since this stress rate takes into account only the effect of finite rotation; i.e. spin during motion, we here examined the effects of deformation rate terms which can be included in the definitions of the stress rates. First we have shown that the Truesdell stress rate can be defined as a rate of the 2nd Piola-Kirchhoff stress with the current state as reference; i.e. an updated Lagrangian measure.

REFERENCES

- 1) Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Classic Texts in the Physical Sciences, Clarendon Press, 1998.
- 2) Hill, R.: Acceleration waves in solids, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.10, pp.1-16, 1962.
- 3) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation phenomena in the plane tension test, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.239-264, 1975.
- 4) Anand, L. and Spitzig, W. A.: Initiation of localized shear bands in plane strain, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.28, pp.113-128, 1980.
- 5) Asaro, R. J.: Micromechanics of crystals and polycrystals, *Advances in Appl. Mech.*, Vol.23, pp.1-115, 1983.
- 6) Ratel, R., Kawauchi, M., Mori, T., Saiki, I., Withers, P. J. and Iwakuma, T.: Application of anisotropic inclusion theory to the deformation of Ni based single crystal superalloys: Stress-strain curves determination, *Mech. Mater.*, Vol.42, pp.237-247, 2010.
- 7) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R.: Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.371-394, 1975.
- 8) Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A.: On finite plastic flows of compressible materials with internal friction, *Int. J. Solids Structures*, Vol.16, pp.495-514, 1980.
- 9) de Souza Neto, E. A., Perić, D. and Owen, D. R. J.: *Computational Methods for Plasticity: Theory and Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

- 10) Lee, E. H., Mallett, R. L. and Wertheimer, T. B.: Stress analysis for anisotropic hardening in finite-deformation plasticity, *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, Vol.50, pp.554-560, 1983.
- 11) Nemat-Nasser, S.: *Plasticity, A Treatise on Finite Deformation of Heterogeneous Inelastic Materials*, Cambridge Monographs on Mechanics, Cambridge Univ. Press, 2005.

Table 1 Material parameters

x	y
a	b
c	d

Table 2 Experimental settings

a b
c d

【図】

Fig. 1 First results

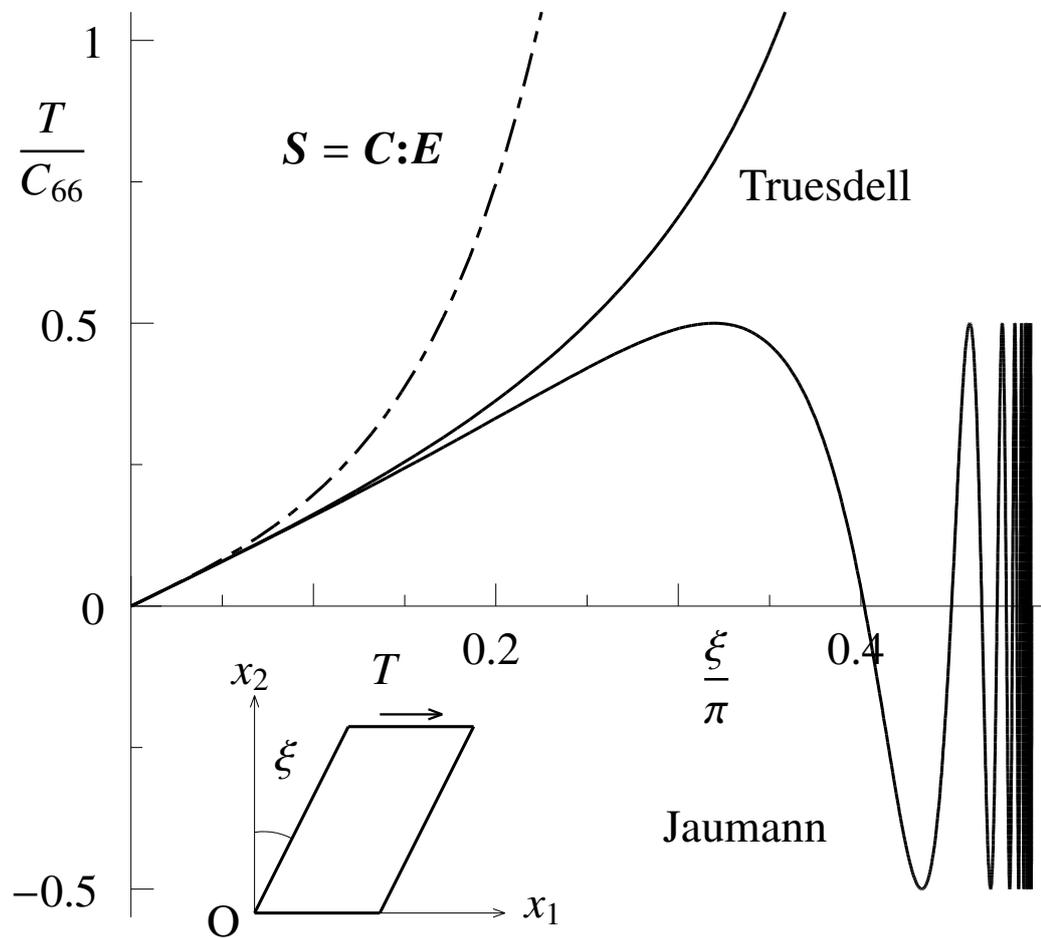


Fig. 2 Second results



Photo 1 My helicopter