



長寿台風といった例年にはない夏も処暑にさしかかっていますが、皆様いかがお過ごしでしょうか。皆様からのご質問や業界での話題、EMSolution の特徴を活かした解析方法などの記事をまとめた EMSolution Topics No.39 をお送りいたします。なお、記事に関するご要望やご意見などお寄せいただければ幸いです。

■ 気になる話題: 誘導電動機のスキュー解析

貝森 弘行

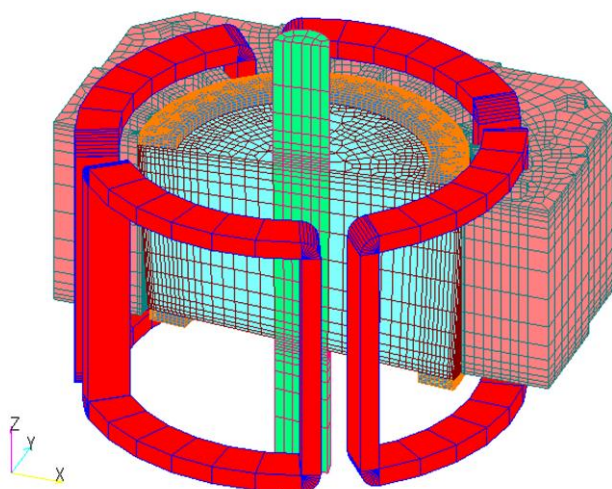
◆ 概要

誘導電動機は堅牢な構造であることもあり、高速運転する移動体や産業用途で広く使用されています。一般に誘導電動機はスキューを施してトルクリップルを抑制しています。電磁界解析においてスキューをモデル化する場合、軸方向は対称性がないため、Fig.1(a)に示すようなコイルエンドやエンドリングまで含めて三次元モデル化されることが多いかと思われます。スキューを簡易的に考慮する方法として、二次元多断面法と三次元多層法があります。文献[1]ではその得失を検討されており、三次元多層法の方がスキューによる周方向電流成分も表現できること、スキューによるロータバーの全長のメッシュで考慮できることから、二次元多断面法よりも高精度であると報告されています。EMSolution で採用しているスライド法は三次元多層法に適していますので、例題を用いて説明します。

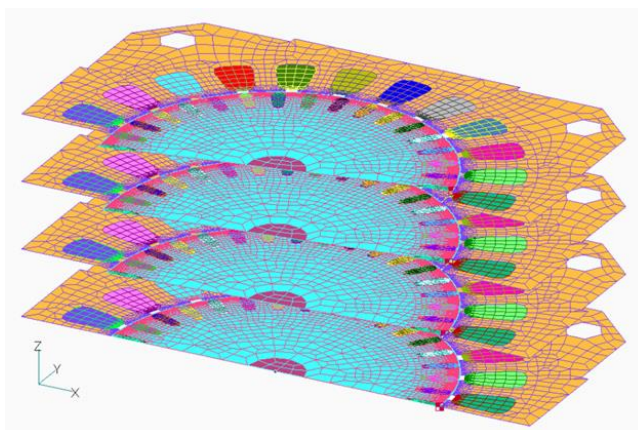
◆ 三次元多層法でのスキュー考慮法

ここでは回転子にスキューを施したと想定して説明します。

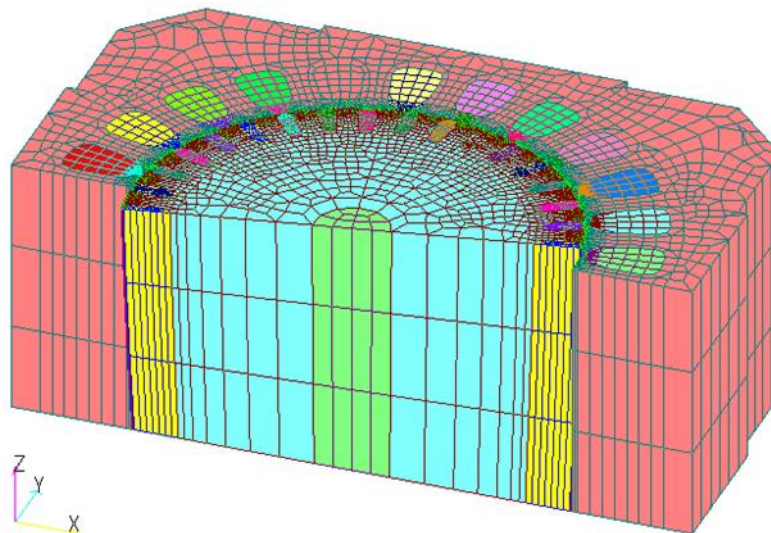
二次元多断面法は、Fig.1(b)のように二次元メッシュを軸方向にあるピッチでスキュー角度を考慮して配置し、各断面間でロータバーを流れる電流は保存するように拘束条件を与えて解析するものです。そのため、各断面間で磁束密度の結合がなく、周方向の電流成分、軸方向磁束密度成分を表現することができません。これに対し三次元多層法は、Fig.1(c)に示すように軸方向に軸長分、例えばスキュー角を考慮しながら三層押し出して作成するものです。この場合、軸方向の分割数はかなり粗くなるためギャップ部で固定子メッシュと回転子メッシュを接合(節点を共有)するのは難しくなります。先に述べたスライド法では周方向に層状に節点が並んでいればメッシュを接合する必要はなく計算時にもリメッシュする必要がないため、単純にロータメッシュ全体をスキュー角に応じて捻りながら押し出せばよいことになります。



(a) フル三次元モデル
(エンドリング, コイルエンド)
コイルは U 相のみ表示



(b) 二次元多断面モデル
* EMSolution では解析できません



(c) 三次元多層法による簡易三次元モデル(三層押し出し)

Fig.1 誘導電動機 解析モデル

◆スキューによる横流と軸方向電磁力

スキューを施すとロータバーのスロットとステータのスロットが上下方向でずれるため、トルクリップルを抑制する効果があります。トルク(ローレンツ力: $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$)に寄与するロータバーの電流成分は軸方向電流成分ですが、スキューを施したことにより、Fig.2 に示すように軸方向電流成分だけでなく周方向電流成分も現れます。もしロータコア内でどこかしらロータバー間が導通してしまう場合、この周方向電流成分が流れてしまう、いわゆる横流が発生してしまうと言われています。さらに周方向電流成分はステータからの磁束により軸方向電磁力と電磁加振力を発生してしまいます。横流の原因となるロータバー間の導通は、一般的には製造過程で入り込んでしまうと言われているため、例えばロータバーをくり抜いたロータコア表面に絶縁処理を施すことで対処していると思われます。一方、軸方向電磁力および電磁加振力はスキュー構造上発生してしまうため、回転軸を介して外部に伝わる振動や騒音の原因となりうるため、大きさと次数の把握が重要だと考えられます。文献[3]では、スキューによりギャップ部の空隙磁束密度の成分が変わるため、径方向電磁力による電磁加振力も小さくなることが示されています。いずれにしろスキューを施されたモデルは、三次元解析する必要があると言えます。

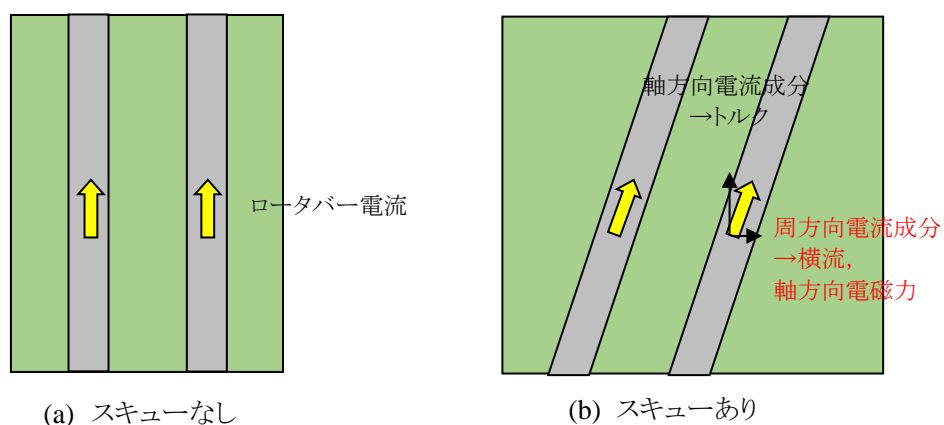


Fig.2 スキュー効果 概念図

◆解析例とスキュー効果

誘導電動機モデル(K モデル)^[2]を用いて解析例とスキュー効果について示します。

文献[1]で三次元多層法では軸方向に三層押し出せば精度も十分だと説明されておりますので、Fig.1(c)に示した三層押し出しモデルと、比較のため三次元フルモデル(Fig.1(a))、および二次元モデルを用います。二次元モデルおよび三層押し出し多層法モデルの導電率は、ロータバーは物性値を設定してエンドリングを外部抵抗として模擬し、三次元モデルはそのまま物性値を使用しています。なお、三層押し出し多層法モデルではスキューを考慮するため、ロータの軸方向の境界条件をヘリカル周期境界条件(捻りピッチを考慮した周期境界条件)、ステータも周期境界条件として設定しています。この周期境界条件により、三層押し出し多層法モデルでも軸方向電磁力が三次元モデルに近い結果を得ることができます。

Fig.3にロータバー電流を示します。二次元モデル(2D)はスキューが考慮されていないためリプルが大きいのに対し、三次元モデル(full3D)はスキューによりリプルが抑制されています。三層押し出し多層法モデル(3D_3layer)は、ほぼ三次元モデルと同じ波形が得られています。Fig.4にトルク波形を示します。スキューの考慮された三次元モデルおよび三層押し出し多層法モデルではリプルが抑制されていることがわかります。平均トルクは二次元モデルよりも三層押し出し多層法モデルの方がやや大きく、三次元モデルがさらに大きくなっています。三層押し出し多層法モデルは三次元モデルと同程度のリプルとなっていることが確認できます。Fig.5にロータの軸方向電磁力の F_z の時間平均値を示します。「概算式」は平均トルク T 、ロータ径 D およびスキュー角 α から次式より算出したものです^[2]。

$$F_z = \frac{T \tan \alpha}{D}$$

三層押し出し多層法モデルよりも三次元モデルの方が軸方向電磁力は小さいのに対し、概算式では三次元モデルの方が平均トルクは大きいために、三層押し出し多層法モデルよりも軸方向電磁力も大きくなってしまっています。これらより、簡易的ではありますが三層押し出し多層法モデルで三次元モデルに近い結果を得られることが示せたと思います。

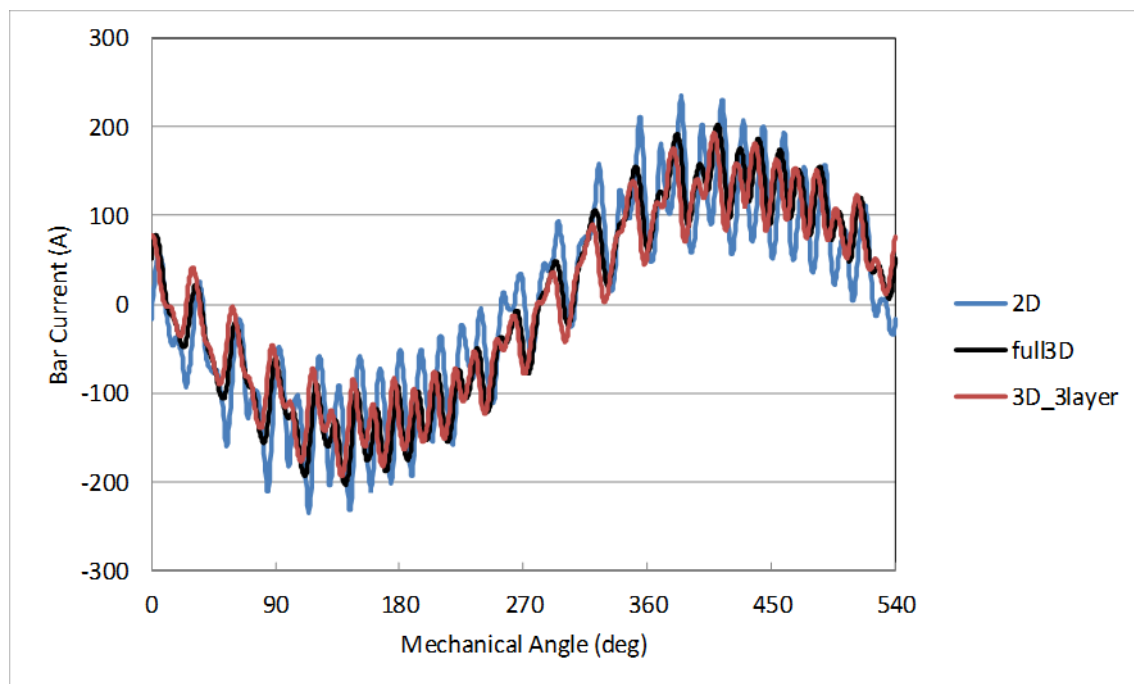


Fig. 3 ロータバー電流波形

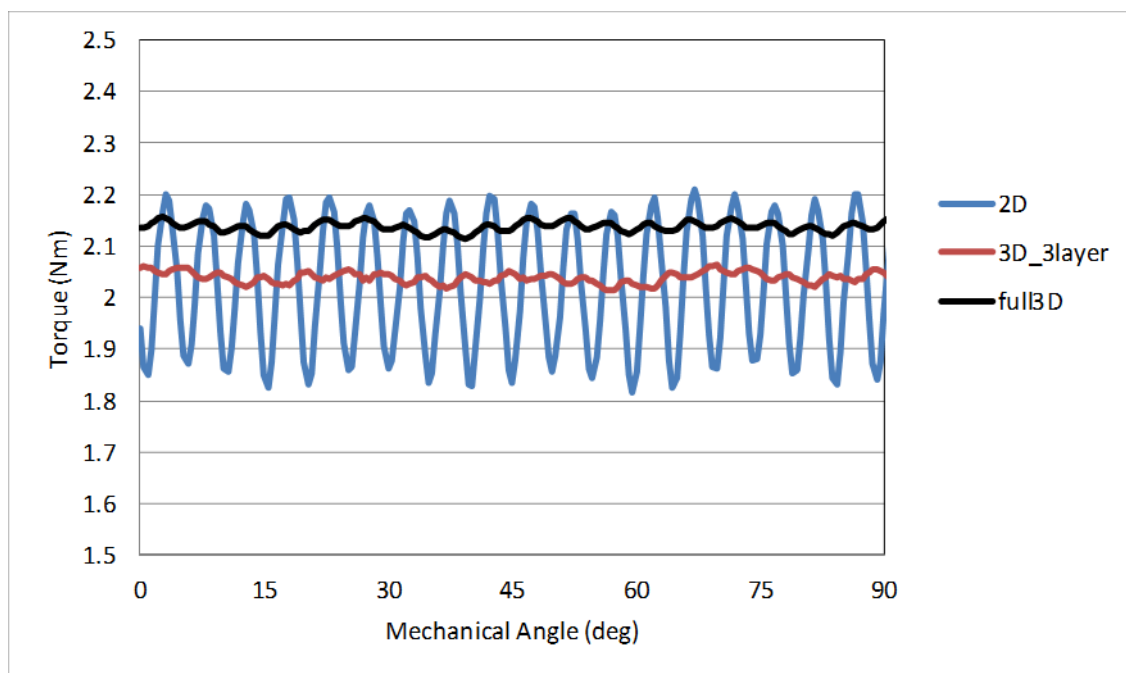


Fig. 4 トルク波形

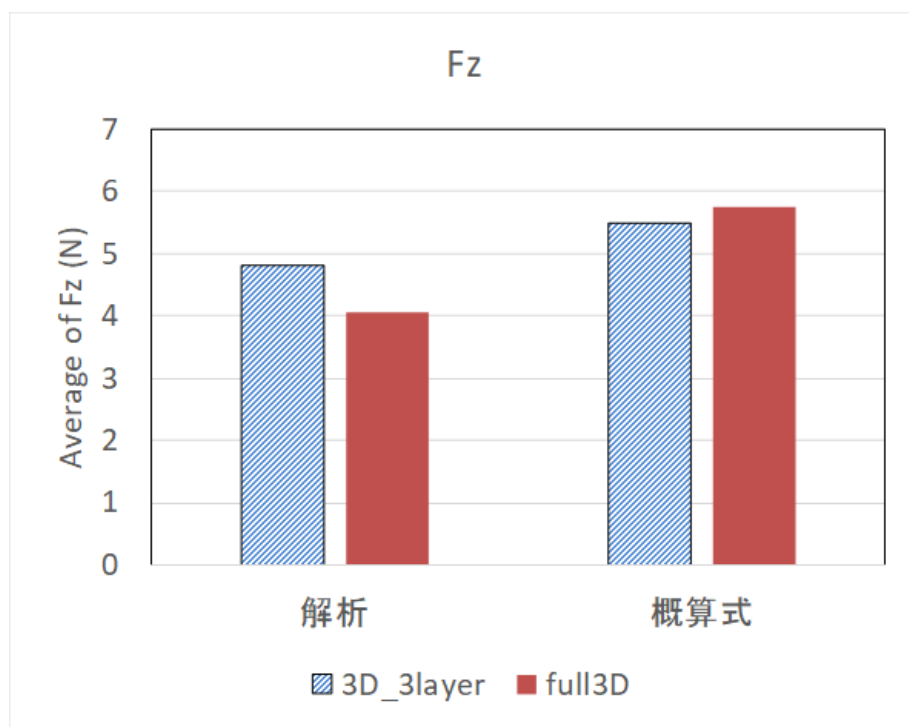


Fig. 5 軸方向平均電磁力

最後に、要素数と計算時間について示します。解析は交流定常解析を初期値として過渡解析を 6 周期(1836 ステップ)計算しています。Table I に要素数、未知変数、一ステップあたりの計算時間をまとめます。要素数は、三層押し出し多層法モデルは二次元モデルの 3 倍ですが、未知変数は軸方向を周期境界として扱っているためにおよそ 10 倍になっています。計算時間は二次元モデルは 1 秒に対し、三層押し出し多層法モデルは 32 秒と増えていますが、三次元モデルは要素数、未知数共に三層押し出し多層法モデルの 12 倍程度で計算時間は 10 倍の 320 秒ですので、三層押し出し多層法モデルは三次元モデルに比べて要素数、計算時間共に 1/10 でほぼ同程度の計算結果を得ることができています。

	要素数	未知変数	計算時間(秒) (1 ステップあたり)
二次元モデル	9,620	9,074	0.99
三層押し出し多層法モデル	28,860	87,400	31.59
三次元モデル	351,216	1,039,358	317.74

スライド法による多層法を用いた誘導電動機のスキュー解析について紹介しました。なお、2D_to_3D の新機能を用いれば、二次元メッシュから積み上げながらスキューするメッシュを作成することができますので、スライド法による多層法と併せてご使用いただければと思います。

[参考文献]

- [1] 高橋康人・藤原耕二:「誘導機のスキュー考慮法に関する一考察」, 電学静止器・回転機合同研資, SA-14-89/RM-14-105 (2014)
- [2] 回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術調査専門委員会:「回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術」, 電学技報, No.776 (2000)
- [3] 米谷晴之:「三次元解析による誘導電動機のスキューの効果に関する検討」, 電学論 D, 122, No.12, 1135-1141 (2002)

In June 2017, SSIL presented two conference papers in Compumag 2017 Conference, held on June 18 ~ 22 in Daejeon, South Korea.

Compumag stands for Computational Electromagnetics and Compumag conference is an international conference focusing on electromagnetic field computation, held biannually by International Compumag Society (ICS). Researchers in this field from all over the world gather to share their latest findings and methodologies through oral and poster presentations and even informal conversations. Fig. 1 shows ICS logo, the list of current ICS Board members, as well as a history of the conference locations during the past years.



International Compumag Society

ICS Board Elections 2016

The Americas	Asia and Oceania	Europe and Africa
David Lowther	Kazuhiro Muramatsu	Maurizio Repetto
Nathan Ida	Jiansheng Yuan	Oszkár Bíró
Sheppard Salon	Katsumi Yamazaki	Stéphane Clénet
Arturo Bretas	Chang-Seop Koh	Zhuoxiang Ren

Compumag Conferences:

- 2017, Compumag **Daejeon**
- 2015, [Compumag Montreal](#)
- 2013, [Compumag Budapest](#)
- 2011, Compumag Sydney
- 2009, Compumag Florianopolis
- 2007, Compumag Aachen
- 2005, Compumag Shenyang
- 2003, Compumag Saratoga Springs
- 2001, Compumag Evian
- 1999, Compumag Sapporo



Fig.1. ICS and Compumag conferences. Source: Compumag 2017 website.

Daejeon is a city of over 1.5 million population located about 140 km to the south of Seoul. The conference location was Daejeon Convention Center, very close to the landmark Expo Bridge and Expo Science shown in Fig.2.



Expo Bridge



Expo Science Park

Fig 2. Views around the conference location. (1/2)



Daejeon Convention Center



Conference Opening Session

Fig 2. Views around the conference location. (2/2)

SSIL presented two papers in this conference. On June 19 was the poster presentation of the novel method of Caue ladder network (CLN) representation of linear eddy current fields (See Fig. 3). By replacing the original finite element problem with a CLN of a few stages, accurate results are obtained with much less computational cost. The eddy current losses of the original problem are can be simply calculated from the losses in the CLN resistances. Although other researchers had already proposed an equivalent method under the name of equivalent circuit, SSIL's method of calculating the CLN parameters is novel. The CLN method has an initial cost of CLN generation but once the CLN is generated, it can be efficiently used with various external circuit configurations.

The method is patent-pending and is now being implemented as a commercial tool. Meanwhile we are trying to extend the method to nonlinear problems and to multi-port CLN.

Cauer Ladder Network Representation of Eddy-Current Fields for Model Order Reduction Using Finite Element Method

A. Kameari¹, H. Ebrahimi¹, K. Sugahara², Y. Shindo³ and T. Matsuo⁴

¹Science Solutions International Laboratory, Inc., Tokyo 153-0065, Japan, kamearia@ssil.co.jp, ebrahimih@ssil.co.jp²Faculty of Science and Engineering, Kindai University, Higashiosaka 577-8502, Japan, ksugahar@kindai.ac.jp

³Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Akashi 673-8666, Japan, shindo_yuji@khi.co.jp

⁴Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto 615-8510, Japan. matsuo.tetsuji.5u@kyoto-u.ac.jp

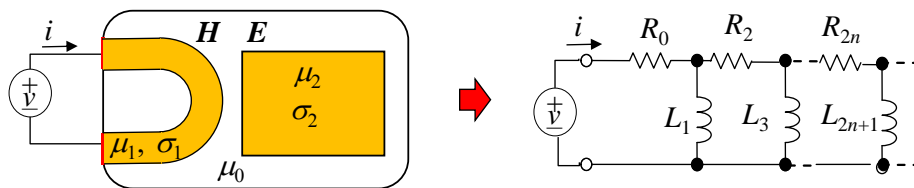


Fig 3. Paper title, list of authors, and a diagram of CLN representation.

The second presentation of SSIL was an oral presentation on June 21st. The paper proposes a new type of second order tetrahedral edge element by partial tree-gauging. Second order tetrahedral edge elements are much more accurate compared with the first order ones. However, since they bring about much larger number of unknowns, the computation cost becomes high. In three-dimensional magnetic field analysis using A -phi formulation, a large number edge variables are redundant and can be eliminated without affecting the accuracy of the magnetic field distribution or the eddy current. The edge variable removal is known as tree-gauging. By full tree-gauging the number of variables reduces but condition of system matrix worsens, resulting in slow convergence of iterative solvers. The paper proposes a method of partial tree-gauging of tetrahedral elements which results in a new type edge element. The element has the same accuracy of the conventional second order element, and when the number of elements is relatively high, the computation cost become less than half. Fig. 4 shows the paper title, the author list, and an illustration of the proposed method.

New Type of Second Order Tetrahedral Edge Elements by Reducing Edge Variables for Quasi-static Field Analysis

Akira Ahagon¹, Akihisa Kameari¹, Hassan Ebrahimi¹, Koji Fujiwara², and Yasuhito Takahashi²

¹Science Solutions International Laboratory, Inc., Tokyo 153-0065, Japan

²Department of Electrical Engineering, Doshisha University, Kyoto 610-0321, Japan

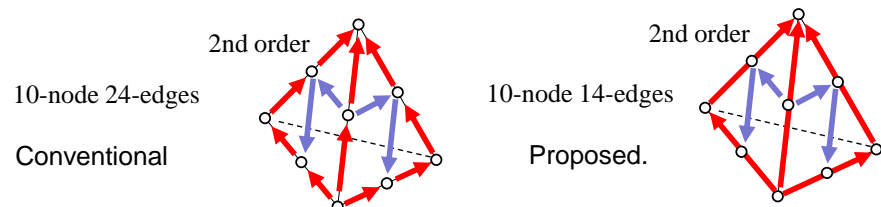


Fig 4. Paper title, list of authors, and illustration of the proposed element.

ちよっと一息: EMSolution の故郷(三軒茶屋) その 33

今回は、三軒茶屋に行ってみます。当社からだ、北西方向に直線で約 2.5km、バスで 15 分、徒歩で 40 分程度。渋谷駅からは田園都市線で二駅目です。

江戸時代、日本橋を起点に東海道、中山道、日光街道、奥州街道、甲州街道の五街道が整備されましたが、東海道の裏道として赤坂御門を起点に沼津までの矢倉沢往還もありました。この道の歴史は古く、律令制度時代には足柄路(道)と呼ばれ、江戸時代に新しい東海道が整備されるまでは東海道の本道でした。現在の国道 246 号(三宅坂～沼津)とほぼ同じルートで、途中の伊勢原市までは、丹沢山塊の大山にある阿夫利神社に参拝する大山街道と同一です。



三軒茶屋交差点 (Y 字路)
(右側: 世田谷通り、高速道路下: 国道 246)



三軒茶屋周辺地図
(Y 字路)

赤坂御門を出発し、現在で言えば青山通を渋谷に向い、渋谷の先から首都高速3号線の下を歩くと、矢倉沢往還の最初の宿場三軒茶屋に到着します。ここまでの距離は約9km。日本橋を起点とする五街道の最初の宿場は、品川、内藤新宿、板橋、千住の四ヶで（日光道、奥州道の最初の宿場は一緒に、千住）、各々に多くの旅籠があったのに比べ、三軒茶屋に旅籠があったのか否かは解りません。なお、宿場とは公用の荷物や書信を隣の宿場まで運ぶための人馬を準備する事（駅通）なので、旅籠が無くても不思議では無いのですが。

江戸時代の後期になると、大山の阿夫利神社に参拝する大山詣が庶民のレジャーとなり、三軒茶屋の部分で大山街道からY字状に別れる新しい道（新道、近道）ができ、この部分に田中屋、石橋屋、角屋の三軒の茶屋ができました。当時、これら三軒の茶屋は繁盛したようで、これが三軒茶屋の名称の始まりです。ただ、三軒茶屋が正式の地名になったのは1932年です。元から存在した大山街道は現在の世田谷通（都道3号線）、新道が国道246号線です。ただ、当時の新道は現在の田園都市線に沿っていて、駒澤大学の先で国道246と別れ二子玉川でまた合流しています。



東急世田谷線 三軒茶屋駅ホーム
(ちょっとヨーロッパの鉄道駅に近い雰囲気です。)



すずらん通り商店街
(昔からある典型的な路地の飲み屋街)

現在、国道246には高架の首都高速3号線があり、風情はありません。しかし、三軒茶屋は世田谷区の代表的な商業地域で、脇道のような形で商店街が多くあり、飲食店を中心に驚く程の商店があります。一部は再開発され商業ビル（キャロットタワー）になったのですが、未だ多くの商店街は健在です。世田谷警察、郵便局、パブリックシアター等の公共施設もあります。また、東京に残された数少ない路面電車が専用軌道で京王線の下高井戸まで運行されています。嘗ては渋谷からの路面電車がおり、三軒茶屋で二子玉川行きと高井戸行きに別れていたのですが、現在残っているのは上記の専用軌道の分だけです。1960年代の後半頃は、地下鉄工事と首都高速の工事があり、この周辺は深刻な交通渋滞が続きました。今は夕方の通勤時間帯でも、あまり酷い渋滞にはなりません。ただ、オリンピックを控え、近所にある駒沢競技場の整備で最近では交通渋滞が悪化しています。

三軒茶屋の商店街は徐々に綺麗になっています、昔の闇市的なパワーは少し薄れているのが寂しいところです。

EMSolution Topics No.39

編集・発行：〒153-0065 東京都目黒区中町 2-21-7
サイエンス ソリューションズ株式会社

お問い合わせは、下記までお願いいたします。

EMSolution 事務局

E-mail: emsdesk@ssil.co.jp TEL: 03-3711-8900 FAX: 03-3711-8910